



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ZAŘÍZENÍ PRO DLOUHODOBÝ TEST BLDC KONTROLÉRU

EQUIPMENT FOR LONG-TERM TEST OF BLDC CONTROLLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Řihák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Roman Řihák

ID: 203335

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Zařízení pro dlouhodobý test BLDC kontroléru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce navrhnete a realizujete zařízení pro dlouhodobý test BLDC kontroléru. V práci se zaměřte na návrh HW a FW pro chlazení a ohřev kontroléru. Zařízení navrhnete tak, aby umožňovalo ovládání chladicího bloku o příkonu 1400 W. Zařízení musí umožňovat chlazení v zadaném teplotním rozsahu. Funkčnost navrženého zařízení ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací zařízení pro dlouhodobé testování kontroléru bezkartáčových stejnosměrných motorů. V teoretické části je obecně rozebrán princip a vysvětlení funkce jednotlivých druhů elektromotorů. Dále se práce zabývá bezkartáčovými motory, jak se ovládají, dělí, konstruuje atd. V samotném závěru první kapitoly je zmínka o termoelektrických jevech. Druhá kapitola poté popisuje vhodný návrh zařízení pro dlouhodobé testování od blokového schématu až po samotnou konstrukci. Třetí kapitola pojednává o realizaci a funkci celého testovacího systému.

Klíčová slova

testování, elektromotory, bezkartáčový stejnosměrný motor, BLDC, řídicí algoritmy, Peltierův jev, Peltierův článek

Abstract

This diploma thesis deals with the design and realization of equipment for long-term testing of the controller of brushless DC motors. In the theoretical part are mentioned principles and explanation of the function of various types of electric motors. The diploma thesis also deals with brushless motors, how they are controlled, types, constructed, etc. At the end of the first chapter there is a mention of thermoelectric phenomena. The second chapter describes the appropriate design of equipment for long-term testing from the block diagram to the construction itself. The third chapter deals with the implementation and function of the entire test system.

Keywords

testing, electric motors, brushless DC motor, BLDC, control algorithm, Peltier's phenomena, Peltier's module

Bibliografická citace

ŘIHÁK, Roman. Zařízení pro dlouhodobý test BLDC kontroléru. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142453>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Pavel Šteffan.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Roman Řihák</i>
VUT ID studenta:	<i>203335</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Zařízení pro dlouhodobý test BLDC kontroléru</i>

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

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

V Brně dne: 20. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegovi a konzultantovi Ing. Jiřímu Čapkovi za cenné rady, zkušenosti a za vedení celého projektu ve firmě siliXcon.

V Brně dne: 20. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. TEORETICKÝ ROZBOR.....	12
1.1 ELEKTROMOTORY	12
1.1.1 Stejnoseměrný komutátorový motor.....	12
1.1.2 Stejnoseměrný BLDC motor	13
1.1.3 Univerzální motor	13
1.1.4 Střídavý třífázový motor.....	13
1.1.5 Střídavý jednofázový motor.....	13
1.1.6 Krokové motory.....	14
1.1.7 Synchronní reluktanční motor.....	14
1.2 BLDC MOTORY	15
1.2.1 Stator.....	15
1.2.2 Rotor	16
1.2.3 Zpětné elektromotorické napětí – BEMF	17
1.2.4 Typy BLDC motorů	18
1.2.5 Snímání polohy rotoru	19
1.2.6 Komutace	23
1.2.7 Momentová charakteristika.....	25
1.2.8 Typické parametry BLDC motoru.....	25
1.2.9 Řízení BLDC motoru.....	26
1.3 TERMoelektrické jevy	29
1.3.1 Seebeckův jev	29
1.3.2 Peltierův jev	30
2. NÁVRH TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	32
2.1 BLOKOVÉ SCHÉMA TESTOVÁNÍ.....	32
2.2 VT BOX	33
2.3 KONSTRUKCE TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ	33
2.4 ZÁTĚŽ KONTROLÉRU	34
2.5 TESTOVACÍ CYKLUS	35
2.6 KOMPONENTY ZAŘÍZENÍ.....	36
2.6.1 Peltierovy moduly	36
2.6.2 DC zdroje.....	36
2.6.3 PWM modul	36
2.6.4 Teplotní čidla	37
2.6.5 Vodní chlazení.....	37
2.6.6 Tepelný výměník.....	37
2.6.7 Pumpa	38
3. REALIZACE DLOUHODOBÉHO TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	39
3.1 DEFINICE JEDNOTLIVÝCH TESTŮ	39
3.1.1 Komunikace UART, USB a CAN.....	39

3.1.2	<i>Vstupy motorových senzorů (MSENS)</i>	40
3.1.3	<i>Vstupně výstupní piny kontroléru (GPIO)</i>	41
3.1.4	<i>Výstup kontroléru (CONTACTOR)</i>	42
3.1.5	<i>Zapínací obvod</i>	43
3.1.6	<i>Selftest</i>	43
3.1.7	<i>Test GND</i>	43
3.1.8	<i>Heat-up</i>	43
3.2	OVLÁDÁNÍ PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	45
3.3	OVLÁDÁNÍ PUMPY	46
3.4	ČTENÍ TEPLoty	47
3.5	ŘÍDÍCÍ ALGORITMUS	49
3.6	CHLAZENÍ CHLADICÍ KAPALINY	50
3.7	ZÁTĚŽ PRO BLDC KONTROLÉR	51
3.8	NASTAVENÍ CHLADICÍHO SYSTÉMU	52
3.9	OVĚŘENÍ FUNKCE	54
3.10	UNIVERZÁLNOST TESTOVÁNÍ	57
4.	ZÁVĚR	59
	LITERATURA	62
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Rozdělení motorů podle buzení, převzato z [4]	12
Obr. 1.2: Stator BLDC motoru, převzato z [14]	16
Obr. 1.3: Průřez rotorů s uloženými magnety, převzato z [15]	16
Obr. 1.4: Lichoběžníkový a sinusový tvar BEMF, převzato z [13]	17
Obr. 1.5: Typy BLDC motorů, převzato z [16]	18
Obr. 1.6: Příčný řez BLDC motoru, převzato z [13]	19
Obr. 1.7: Princip činnosti optického enkodéru, převzato z [17]	20
Obr. 1.8: Inkrementální a absolutní enkodér, převzato z [21]	21
Obr. 1.9: Konfigurace vinutí resolveru, převzato z [21]	22
Obr. 1.10: Porovnání tvaru signálů BEMF a Halloových senzorů, převzato z [13]	23
Obr. 1.11: Vektory toku statoru při šestistupňovém řízení, převzato z [22]	24
Obr. 1.12: Situace před a po komutaci, převzato z [22]	24
Obr. 1.13: Momentová charakteristika BLDC motoru, převzato z [13]	25
Obr. 1.14: Šestistupňová komutace, převzato z [23]	27
Obr. 1.15: Sinusová komutace, převzato z [23]	28
Obr. 1.16: Ukázka principu Seebeckova jevu, převzato z [28]	30
Obr. 1.17: Ukázka principu Peltierova jevu, převzato z [32]	30
Obr. 1.18: Vnitřní uspořádání Peltierova článku, převzato z [34]	31
Obr. 2.1: Blokové schéma zařízení pro dlouhodobé testování	32
Obr. 2.2: Detailní blokové schéma VT Boxu	33
Obr. 2.3: Princip chlazení kontroléru	34
Obr. 2.4: Schéma zapojení PWM modulu	36
Obr. 2.5: Vodní blok pro chlazení	37
Obr. 3.1: Blokové schéma testu sběrnice UART	39
Obr. 3.2: Blokové schéma testu vstupů motorových senzorů	40
Obr. 3.3: Blokové schéma testování vstupně výstupních pinů	41
Obr. 3.4: Blokové schéma testování výstupu kontroléru	42
Obr. 3.5: Blokové schéma heat-up testu	44
Obr. 3.6: Časový průběh PWM zachycený osciloskopem T3DSO1104, 10 V/div	46
Obr. 3.7: Pohled na modul pro ovládání pumpy a PWM	47
Obr. 3.8: Zapojení teplotních čidel	48
Obr. 3.9: Stand pro kontrolér včetně teplotních čidel a Peltierových článků	48
Obr. 3.10: Blokové schéma řídicího algoritmu	49
Obr. 3.11: Výsledek měření pomocí příkazu „indentlin“	52
Obr. 3.12: Zátěž kontroléru složená ze tří cívek	52
Obr. 3.13: Výstup jednoho cyklu dlouhodobého testování	54
Obr. 3.14: Pracoviště dlouhodobého testování	55
Obr. 3.15: Pracoviště dlouhodobého testování – chlazení chladicí kapaliny	56
Obr. 3.16: Model úchytky pro kontrolér SC – a) horní strana, b) dolní strana	58
Obr. 3.17: Model úchytky pro kontrolér AM – a) horní strana, b) dolní strana	58

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Typické elektrické parametry BLDC motoru, převzato z [13]	26
Tabulka 2: Porovnání řídicích algoritmů, převzato z [24]	29
Tabulka 3: Naměřené minimální teploty a časy pro různou dobu změny teploty o 1 °C.....	53
Tabulka 4: Parametry jednotlivých variant kontrolérů, převzato z [45].	57

ÚVOD

Není tomu zase tak dávno, kdy byl vynalezen vůbec první elektromotor na světě. Mnozí si pod pojmem elektromotor vybaví důmyslný stroj, který je schopný pohánět nejrůznější zařízení pro usnadnění a vykonání spousty práce. První elektromotor se vůbec nepodobal tomu, jak jej známe dnes. V podstatě se jednalo o napájecí zdroj, kousek drátu ponořeného do rtuti ve, které byl permanentní magnet. Postupem času si elektromotory prošly značným vývojem a dnes si bez nich snad nedokážeme život ani představit. V současnosti se velmi řeší ekologie, spalovací motory proto začínají být v určitých aplikacích na ústupu a jsou nahrazovány právě elektrickými motory, které jsou tišší, menší a mají vyšší účinnost. Nejvíce se tak v posledních letech děje právě u automobilů.

Mezi jednoduché elektrické stroje se řadí kartáčové stejnosměrné motory, využívající kartáče pro komutaci, které zajišťují točivé magnetické pole. Není proto potřeba žádné řídicí elektroniky, ale pouze zajištění napájení. Nevýhoda těchto motorů spočívá v opotřebením kartáčů, které je potřeba občas vyměnit a poměrně „malé“ účinnosti. Z těchto důvodů se začaly používat bezkartáčové stejnosměrné motory. Pro komutaci nevyužívají komutátor ale střídač, který vytváří točivé magnetické pole, čímž umožňuje motoru, aby se otáčel. Nedávné použití těchto motorů je dáno především složitější řídicí elektronikou, která využívá polovodičových součástek.

Bezkartáčové stejnosměrné motory potřebují ke svému chodu kontrolér, respektive řídicí obvod. V případě implementace motoru a kontroléru do nějakého zařízení, je důležité, aby kontrolér plnil svou funkci co nejdéle, neboť i jeho selhání se projeví na snížení spolehlivosti produktu jako celku, což může mít za následek snížený prodej a tím pádem i zisk. Aby se předešlo těmto nepříjemnostem, běžně se výrobky zrychleně testují např. v klimatických komorách, které umožňují regulovat teplotu a relativní vlhkost, čímž dochází k velkému namáhání testovaného zařízení. Takto provedené testy poskytnou rychlejší odpověď ohledně životnosti zařízení, než by tomu bylo v reálných podmínkách a zároveň dochází k nasimulování klimatických podmínek, které panují v jednotlivých částech světa, např. od mrazivé Sibíře přes vlhký amazonský prales až po spalující Saharu, v nichž by se produkt mohl potenciálně objevit.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem zařízení, které bude schopné dlouhodobě testovat kontrolér, resp. řídicí jednotku bezkartáčových stejnosměrných motorů. Hlavní podstatou bude dosažení nejmenší možné teploty Peltierovými články, s jejichž pomocí bude chlazen kontrolér v neaktivním stavu, do kterého se dostane po dosažení teplotní limitace, kdy se kontrolér rychle zahřívá procházejícím proudem. Při každém cyklu budou provedeny výkonové a nevýkonové testy, ověřující funkčnost komunikace (USB, UART a CAN), vstupů motorových senzorů (MSENS), vstupně-výstupní piny a proběhne měření teploty. Patřičná data budou uložena do firemní databáze s názvem Intranet.

1. TEORETICKÝ ROZBOR

Tato kapitola se zabývá teoretickým úvodem diplomové práce. Nejprve jsou popsány jednotlivé druhy elektromotorů, poté se dílčí kapitoly zabývají problematikou BLDC motorů a v samotném závěru jsou zmíněny termoelektrické jevy.

1.1 Elektromotory

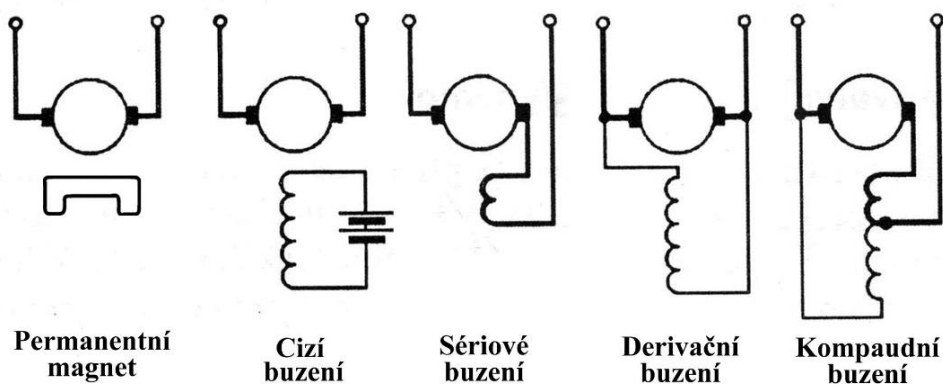
Elektrický motor je jakékoli zařízení, které přeměňuje elektrickou energii na mechanickou energii, obvykle pomocí elektromagnetických jevů.

Většina elektromotorů vyvine svůj mechanický točivý moment interakcí vodičů vedoucích proud ve směru kolmém k magnetickému poli. Různé typy elektromotorů se liší způsobem, jakým jsou vodiče a pole uspořádány, a také ovládáním, které lze provádět nad mechanickým výstupním momentem, rychlostí a polohou. [1]

1.1.1 Stejnosměrný komutátorový motor

Stejnosměrný motor je rotační elektrický stroj, který může pracovat v motorickém nebo generátorickém režimu. Obsahuje dvě klíčové části: stator a rotor. Stator je nepohyblivá část motoru, poskytující točivé magnetické pole, které roztáčí rotor. Jednoduchý stejnosměrný motor využívá permanentních magnetů ve statoru a cívku, kterou protéká proud, ke generování elektromagnetického pole. Kolem jádra motoru je namotáno několik vinutí, aby došlo k vytvoření koncentrovaného magnetického pole. Vinutí izolovaného vodiče jsou připojena ke komutátoru, který umožňuje střídavé napájení každé cívky rotoru, čímž se vytváří stálá rotační síla, známá jako točivý moment.

Stejnosměrné motory, lze budit několika způsoby viz obr. 1.1. Nejjednodušší je využití permanentních magnetů. Dále lze použít cizí buzení, kde jsou permanentní magnety ve statoru nahrazeny elektromagnety, sériové buzení využívá sériového spojení vinutí statoru a rotoru, derivační buzení má elektromagnet statoru napájený paralelně s rotorem, popřípadě kompaundní buzení, které má sériové i paralelní vinutí, jejichž magnetické toky působí buď souhlasně nebo proti sobě. [2], [3]



Obr. 1.1: Rozdělení motorů podle buzení, převzato z [4]

1.1.2 Stejnosměrný BLDC motor

Bezkartáčový motor (Brushless DC motor) patří do kategorie stejnosměrných, i když je strukturou podobný střídavému třífázovému synchronnímu motoru. Z tohoto důvodu nelze na motor připojit přímo stejnosměrné napětí ze zdroje, ale je nutné provádět jeho spínání. Stator je běžně tvořen 3 budícími vinutími zapojenými do hvězdy, přičemž stejnosměrné napájecí napětí se střídavě připojuje ke dvěma ze tří vinutí nebo celé napětí k jednomu a jedna polovina napětí na zbylá dvě vinutí. Rotor je tvořen permanentními magnety, které mohou být upevněny vnitřně, na vnější straně nebo paralelně se statorem. Proud vinutími se sekvencuje, přičemž se třífázový průběh simuluje současným napájením vždy jen 2 vinutí, každé opačným směrem proudu. Spínání uvnitř sekvencí se realizuje PWM modulací, aby se vytvořil efekt sinusového průběhu. [5]

1.1.3 Univerzální motor

Univerzální motory jsou variací stejnosměrných kartáčových motorů a je možné je provozovat jak na stejnosměrné, tak i na střídavé napětí a proud. Rotor tvoří kotva zapojená v sérii se statorem. U motorů na střídavý proud musí být stator složen z plechů, kvůli ztrátám vířivými proudy. Obrácení chodu stroje se provádí přepólováním buď statoru, nebo rotoru. Univerzální motory mají vzhledem k velikosti velký točivý moment i velký výkon, nicméně točivý moment je maximální při nízkých otáčkách, a naopak minimální při vysokých otáčkách. [5], [6]

1.1.4 Střídavý třífázový motor

Všechny třífázové motory napájené střídavým napětím mají 3 pevná budící vinutí napájená napětím i proudem vzájemně posunutým o 120° (fáze U, V a W), čímž se vytváří točivé magnetické pole. Podle provedení rotoru se pak rozlišují dvě základní provedení:

Synchronní motor – rotor je tvořený buď permanentními magnety nebo prostřednictvím kartáčů stále napájenými elektromagnety. Otáčení rotoru přesně sleduje točivé magnetické pole statoru, tzn. rotor se otáčí synchronně. Rychlost se řídí změnou frekvence.

Asynchronní motor – rotor je tvořený tyčovou klecí spojenou nakrátko, tzv. rotor s kotvou nakrátko. Proměnné magnetické pole tvořené statorem indukuje v kleci proud, který vytváří vlastní magnetické pole. Pole statoru a rotoru se navzájem odpuzuje a rotor se tak otáčí. Proud se však v kleci vytváří a ztrácí v porovnání se statorem se zpožděním, a tedy i otáčení rotoru je zpožděné za točivým magnetickým polem statoru, otáčí se tedy asynchronně. Rychlost se také řídí změnou frekvence. [5]

1.1.5 Střídavý jednofázový motor

Střídavý jednofázový motor se připojuje pouze k fázi a nulovému vodiči. Třetí fáze se nastaví přes fázový posun pomocí kondenzátoru. Protože kondenzátor nemůže vytvořit

fázový posuv 120° , ale pouze 90° , navrhuje se tento druh jednofázového motoru zpravidla pouze se dvěma třetinami výkonu srovnatelného třífázového motoru.

Druhý způsob, jak zkonstruovat jednofázový motor, spočívá v přizpůsobení techniky vinutí. Aby se jednofázový motor sám roztočil, přidává se na stator pomocná fáze, která se po rozběhu samočinně vypne. Místo třífázového vinutí jsou realizovány pouze dvě fáze. Cívky prostorově nyní předsazené o 90° jsou pomocí kondenzátoru i časově napájeny proudem s předsazením o 90° , čímž vzniká točivé pole. Nestejné proudové poměry hlavního a pomocného vinutí zpravidla rovněž umožňují pouze dvě třetiny výkonu třífázového motoru stejné konstrukční velikosti. [7], [9]

1.1.6 Krokové motory

Krokové motory se podle konstrukce rozdělují na dvě následující varianty:

Bipolární krokové motory – U bipolárního motoru je stator podobný jako u BLDC motoru, ale běžně obsahuje pouze 2 vinutí. Rotor je tvořen permanentními magnety s póly, které jsou přitahovány "zuby" statorového vinutí. Přesnost krokování je dána počtem zubů rotoru. Motor dokáže zastavit a zůstat stát na konkrétní pozici zubu nebo na pozici mezi zuby, přičemž síla držení motoru na místě je dána velikostí proudu. Nejběžnější je tedy bipolární provedení se dvěma páry vodičů, které umožňuje dopředný i zpětný chod, krokování po jedné polovině kroku či mikrokrokování. Pro buzení bipolárního krokového motoru je zapotřebí měnit polaritu napětí na jeho vinutích, k čemuž se používá tzv. H-můstek.

Unipolární krokové motory – Unipolární provedení je tvořeno 6 vodiči (3 páry), i když běžněji jen 4 (jeden společný vodič místo třech), přičemž neumožňuje zpětný chod, ale pouze dopředný chod. Pro buzení unipolárního krokového motoru stačí neměnná polarita napětí, jednotlivá vinutí motoru se spínají např. tranzistory k zemi. [5], [8]

1.1.7 Synchronní reluktanční motor

Synchronní reluktanční motor je třífázový elektrický stroj bez permanentních magnetů, optimalizovaný pro provoz s frekvenčním měničem. Stator je stejný jako u klasického asynchronního motoru. Rotor netvoří kotva nakrátko, ale pouze paket elektromagnetických plechů, které mají rozdílný magnetický odpor ve dvou, či více na sebe kolmých os. Točivý moment motoru je vytvořen v důsledku tendence rotoru vyrovnat se v minimální reluktanční poloze, když se otáčky motoru blíží synchronní rychlosti. Rotor tak táhne synchronně. Setrvačnost při zatížení by měla být v mezích, pro správnou účinnost. Při synchronizaci zmizí indukční točivý moment, ale rotor zůstává synchronizován v důsledku synchronního točivého momentu. [10], [11]

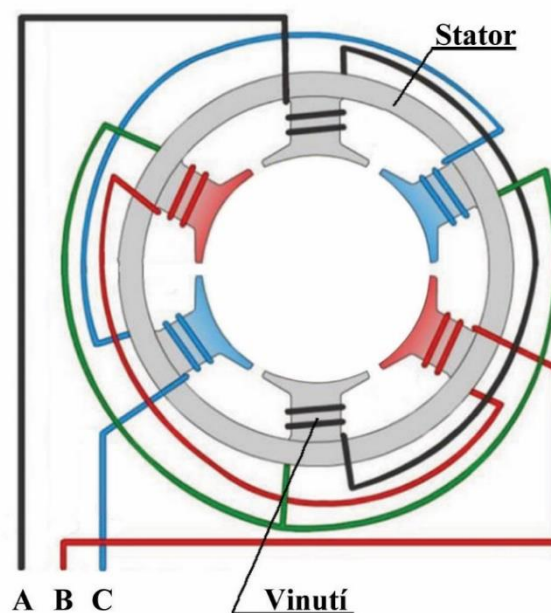
1.2 BLDC motory

BLDC motory jsou široce používány ve všech možných aplikacích, jako jsou spotřebiče, automobilový průmysl, letecký a kosmický průmysl, automatizovaná průmyslová zařízení atd. Motor je komutován elektricky střídačem pomocí pulzů a nikoli pomocí kartáčů. Řadí se mezi synchronní typy motorů, což znamená, že se magnetické pole rotoru a statoru otáčí se stejnou frekvencí. V porovnání s kartáčovým stejnosměrným nebo indukčním motorem, má BLDC motor několik výhod: [12], [18]

- vyšší efektivita a spolehlivost,
- nižší akustický hluk,
- menší rozměry a hmotnost,
- větší dynamická odezva,
- lepší charakteristika otáčky vs točivý moment,
- vyšší rozsah otáček,
- delší životnost.

1.2.1 Stator

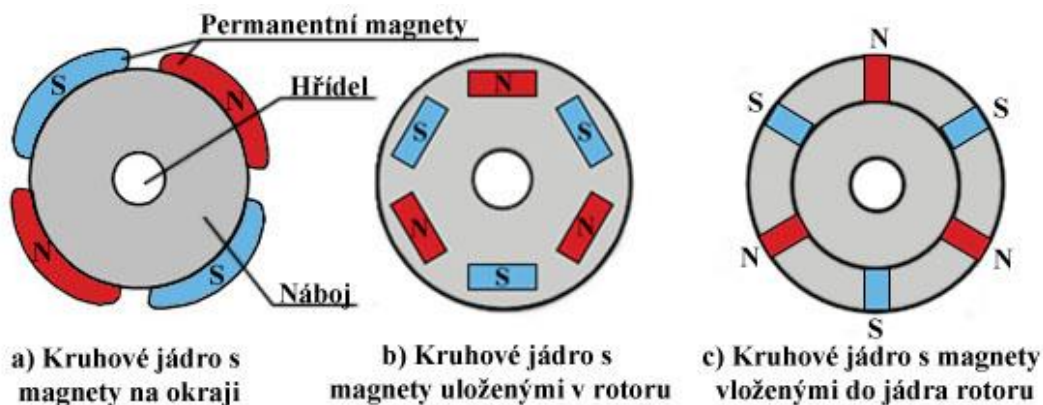
Stator je složen ze skládaných ocelových lamel s vinutími umístěnými v drážkách, které jsou axiálně řezány podél vnitřního obvodu viz obr. 1.2. Většina motorů BLDC má tři hvězdicová vinutí připojená ke statoru. Každé z těchto vinutí se skládá z několika cívek propojených mezi sebou. Tyto vinutí jsou rozloženy po obvodu statoru a tvoří sudý počet pólů. Existují dvě varianty vinutí statoru: lichoběžníkové a sinusové. Jednotlivé varianty se liší na základě propojení cívek ve statorovém vinutí, které dávají různé typy zpětného elektromotorického napětí (BEMF). Jak naznačuje jejich název, lichoběžníkový motor vytváří lichoběžníkové BEMF, zatímco sinusový motor sinusové viz obr. 1.4. Kromě BEMF má fázový proud také lichoběžníkové a sinusové odchylky v příslušných typech motorů. Díky tomu je výstupní točivý moment sinusového motoru plynulejší než u lichoběžníkového motoru, ale vyžadují vyšší náklady, kvůli přídavným vinutím. [13]



Obr. 1.2: Stator BLDC motoru, převzato z [14]

1.2.2 Rotor

Rotor je vyroben z permanentního magnetu a může se lišit dle počtu pól párů. Na základě požadované hustoty magnetického pole v rotoru je vybrán správný materiál, jež se použije na výrobu. Tradičně se pro výrobu permanentních magnetů používají feritové materiály, které jsou levnější, ale mají nízkou hustotu magnetického toku pro daný objem. S lepší technologií jsou magnety ze slitin vzácných zemin populárnější, zejména díky vyšší magnetické hustotě, což umožňuje udělat rotor menší, avšak se stejným točivým momentem. Tyto slitinové magnety také zlepšují poměr velikosti ku hmotnosti a poskytují vyšší točivý moment motoru, než jaký by poskytoval motor složený z feritových magnetů stejné velikosti. Pro magnety ze slitin se používá Neodym (Nd), Samarium-kobalt (SmCo) a slitina neodymu, feritu a bóru (NdFeB). [13]



Obr. 1.3: Průřez rotorů s uloženými magnety, převzato z [15]

1.2.3 Zpětné elektromotorické napětí – BEMF

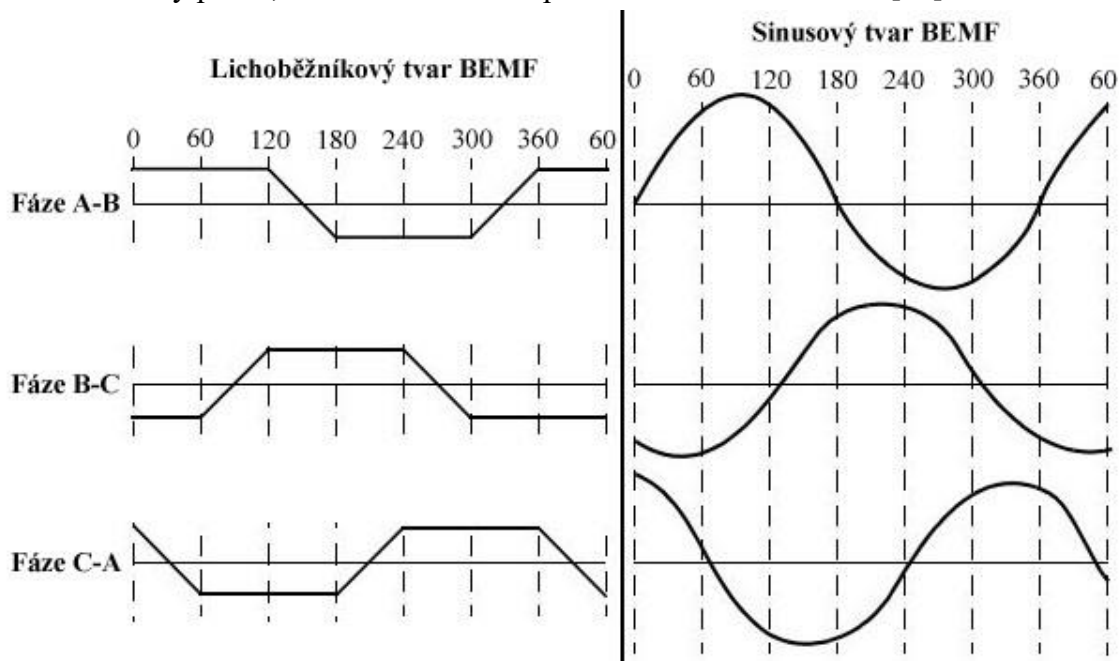
Když se BLDC motor otáčí, každé vinutí generuje zpětné elektromotorické napětí známé jako zpětné EMF, které je proti hlavnímu napájecímu napětí přiváděné do vinutí podle Lenzova zákona. Polarita BEMF má opačný směr než napájecí napětí a záleží na třech hlavních faktorech:

- úhlová rychlost rotoru,
- magnetické pole generované magnety rotoru,
- počet závitů ve vinutí statoru,

$$BEMF = (E) \propto NlrB\omega, \quad (1)$$

kde N je počet závitů ve vinutí každé fáze, l je délka rotoru, r je vnitřní poloměr rotoru, B je hustota magnetického toku rotoru a ω je úhlová rychlost motoru.

Jakmile je motor zkonstruován, magnetické pole rotoru a počet závitů ve vinutí statoru zůstávají konstantní. Jediný faktor, který řídí BEMF, je úhlová rychlost nebo rychlost rotoru, čím se rychlost zvyšuje, roste také hodnota BEMF. Technická specifikace motoru udává parametr s názvem zpětná konstanta EMF, kterou lze použít k odhadu BEMF pro danou rychlost. Elektrické napětí mezi vinutími může být vypočteno odečtením hodnoty BEMF od napájecího napětí. Motory jsou konstruovány s konstantou BEMF takovým způsobem, že když motor běží při jmenovitých otáčkách, bude rozdíl mezi elektrickým napětím BEMF a napájecím napětí dostatečný k tomu, aby motor odebíral jmenovitý proud a dodával jmenovitý točivý moment. Pokud je motor poháněn nad jmenovité otáčky, BEMF se může podstatně zvýšit, čímž se sníží napětí na vinutích a díky tomu se sníží odebíraný proud, což má za následek pokles točivého momentu. [13]



Obr. 1.4: Lichoběžníkový a sinusový tvar BEMF, převzato z [13]

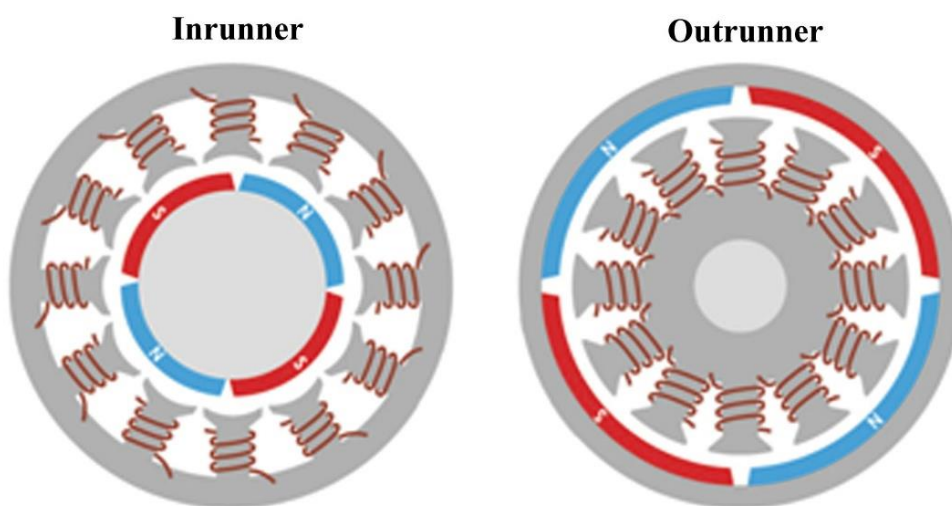
1.2.4 Typy BLDC motorů

V praxi se lze setkat se třemi konstrukčními typy motorů.

První typ je označován jako „Inrunner“. V tomto případě je rotor uložen uvnitř statoru s permanentními magnety uloženými na vnějším povrchu rotoru. Díky malému průměru rotoru a nízkému momentu setrvačnosti poskytuje vynikající odezvu na zrychlení a zpomalení. Vzhledem k tomu, že je stator v blízkosti povrchu motoru, je zde dobrý přestup tepla, což umožňuje zkonstruovat kompaktní motor s vysokým výstupním výkonem.

Druhý typ je označován jako „Outrunner“. Zde je rotor umístěn mimo stator a permanentní magnety jsou umístěny ve vnitřním prostoru rotoru. Umístění statoru a permanentních magnetů je opačné než u typu „Inrunner“. „Šálkový“ tvar rotoru není vhodný pro svižné pohyby, protože moment setrvačnosti je větší, reakce na zrychlení a zpomalení jsou špatné, ale přesto poskytuje vynikající rychlostní stabilitu. Díky většímu průměru rotoru do něj lze nainstalovat vyšší počet magnetů, než u typu „Inrunner“, což zvyšuje počet magnetických pólů, které umožňují dosáhnout vyššího výstupního výkonu v kompaktní velikosti. Nevýhodou je fakt, že vinutí jsou umístěna uvnitř motoru, což se projeví zvýšeným zahříváním a ve finále sníženou dobou provozu viz obr. 1.5.

Třetí typ je označován jako „Disk rotor“. Stator je tvořen vinutími a snímači magnetických pólů na desce s plošnými spoji. Tento typ motoru je tenký, protože jsou ploché permanentní magnety umístěny na povrchu rotoru tak, aby směřovaly ke statoru. Používají se k udržování stabilní, konstantní rychlosti s lehkým zatížením. Motor neobsahuje žádnou hřídel, takže je zatížení instalováno na rotor. Své použití nacházejí zejména v pevných discích a diskových jednotkách CD, Blu-ray atd. [18]



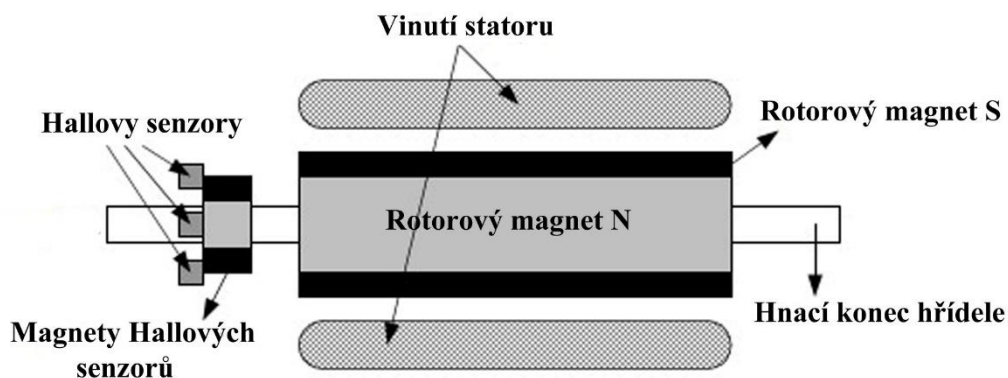
Obr. 1.5: Typy BLDC motorů, převzato z [16]

1.2.5 Snímání polohy rotoru

Snímač polohy hraje důležitou roli při určování pozice pólu rotoru v BLDC motoru a poskytuje informace o změně fáze pro řídicí obvody. Existuje mnoho druhů snímačů polohy s různými charakteristikami. U BLDC motorů se lze nejčastěji setkat s Hallovyými senzory, enkodéry, resolvery, popřípadě lze použít i bezsenzorové snímání polohy. [20]

Hallovy senzory

Na rozdíl od kartáčového stejnosměrného motoru je komutace BLDC motoru řízena elektronicky. K otáčení motoru by vinutí statoru měla být pod napětím v určitých sekvencích. Je důležité znát polohu rotoru, aby se dalo určit, která vinutí budou v jednotlivých sekvencích napájena. Poloha rotoru je snímána většinou pomocí tří Hallovyých senzorů zabudovaných do statoru na nehybném konci motoru. Kdykoli magnetické póly rotoru procházejí poblíž Hallovyých senzorů, generují logickou jedničku nebo logickou nulu, což naznačuje, že se v blízkosti senzorů nachází pól N nebo S. Na základě kombinace těchto tří signálů Hallovyých senzorů lze určit přesnou sekvenci komutace. [13]

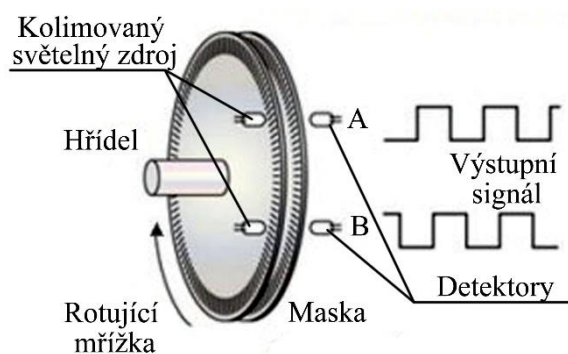


Obr. 1.6: Příčný řez BLDC motoru, převzato z [13]

Na obr. 1.6 je příčný řez motoru BLDC s rotorem, který má střídavě póly N a S permanentních magnetů. Hallovy senzory jsou zabudovány do nehybné části motoru, ve které musejí být uloženy velmi pečlivě, protože jakékoliv nesprávné zarovnání vzhledem k magnetům, může generovat chybu při určování polohy rotoru. Aby se zjednodušil proces montáže senzorů na stator, mohou mít některé motory kromě hlavních magnetů rotoru také magnety Hallova senzoru na rotoru. Kdykoli se rotor otáčí, magnety Hallova senzoru mají stejný účinek jako hlavní magnety. Hallovy senzory jsou namontovány na desce plošného spoje a upevněny k nepohyblivé části krytu motoru. Díky tomu si mohou uživatelé upravit kompletní sestavu Hallovyých senzorů tak, aby byla v souladu s magnety rotoru, pro dosažení nejlepšího výkonu. Na základě fyzické polohy Hallovyých senzorů existují dvě verze výstupu, které mohou mít vzájemný fázový posun 60° nebo 120°. Na základě toho definuje výrobce motoru komutační sekvenci, kterou je třeba při ovládání motoru dodržovat. [13]

Enkodéry

Existují dva typy optických enkodérů: absolutní a inkrementální enkodéry. V optických enkodérech prochází světlo přes průhledné oblasti mřížky a následně je snímáno fotodetektorem. Pro zvýšení rozlišení se používá kolimovaný světelný zdroj a maska, která se umístí mezi mřížku a detektor. Světlo může procházet k detektoru, pouze tehdy, jsou-li průhledné části mřížky a masky ve stejné rovině viz obr. 1.7. [21]



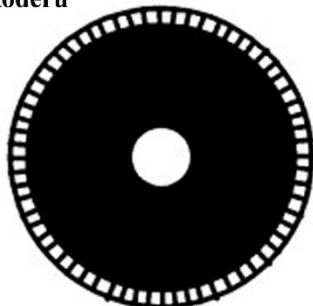
Obr. 1.7: Princip činnosti optického enkodéru, převzato z [17]

Inkrementální enkodéry generují pulz pro daný přírůstek úhlové polohy hřídele, který je určen počítáním generovaných pulzů z enkodéru. Rotující disk enkodéru má jedinou stopu viz obr. 1.8. V případě výpadku napájení ztrácí inkrementální enkodér informaci o pozici a musí být resetován do známého nulového bodu. Pro určení směru rotace je potřeba použít dvoukanálový enkodér. Výstupní obdélníkový signál je mezi kanály posunut o 90° viz obr. 1.8. Během jedné periody lze vidět čtyři hrany signálu z kanálů A a B. Při zpracování dvoukanálových výstupů k vytvoření samostatných pulzů pro každou hranu obdélníkového signálu musí být rozlišení enkodéru čtyřnásobné. Rychlost přeběhu inkrementálního enkodéru je dána maximální rychlostí, která je určena maximální pracovní frekvencí. Pokud je tato rychlost překročena, přesnost se výrazně zhorší a výstupní signál bude nespolehlivý.

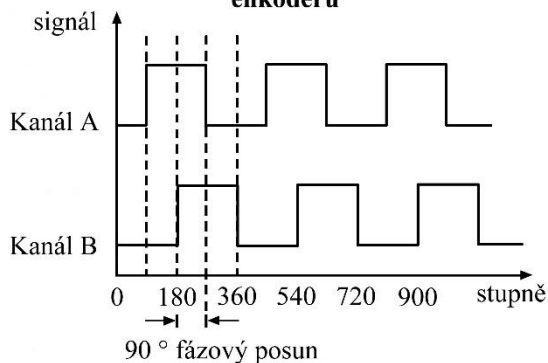
Absolutní enkodér je zařízení pro ověřování polohy, které poskytuje úhlovou polohu hřídele. Díky určitému počtu výstupních kanálů je každá úhlová poloha hřídele popsána svým vlastním jedinečným kódem. Počet kanálů se zvyšuje s rostoucím požadovaným rozlišením. Absolutní enkodér není přičítající zařízení jako inkrementální enkodér a neztrácí informace o poloze v případě ztráty napájení. Zde je disk vyroben ze skla nebo kovu, má několik soustředěných stop, ke kterým jsou přiřazeny nezávislé zdroje světla viz obr. 1.8. Stopy se liší vzorem a velikostí šěrbin, které se zvětšují směrem ke středu. Podle průchodu světla se generují logické nuly a jedničky, které poskytují informace o poloze hřídele. Rozlišení nebo množství informací o poloze, které lze získat, je určeno počtem stop. Pro 10 stop je rozlišení obvykle $2^{10} = 1024$ pozic na jednu otáčku. Vzor disku je vytvořen ve strojově čitelném kódu, tj. Binárním nebo Grayovu kódu.

Jednoduchý příklad je uveden na obr. 1.8, kde uvedená pozice odpovídá desítkovému číslu $11 = 1011_B$. [21]

a) Disk inkrementálního enkodéru



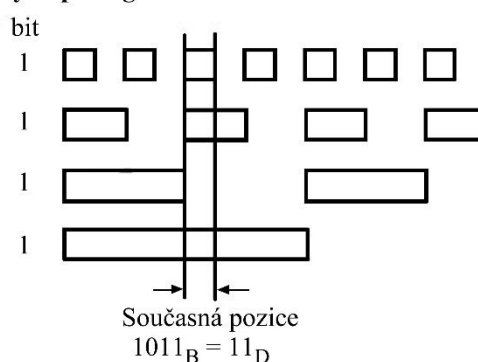
b) Fázově posunutý signál inkrementálního enkodéru



c) Disk absolutního enkodéru



d) Výstupní signál absolutního enkodéru

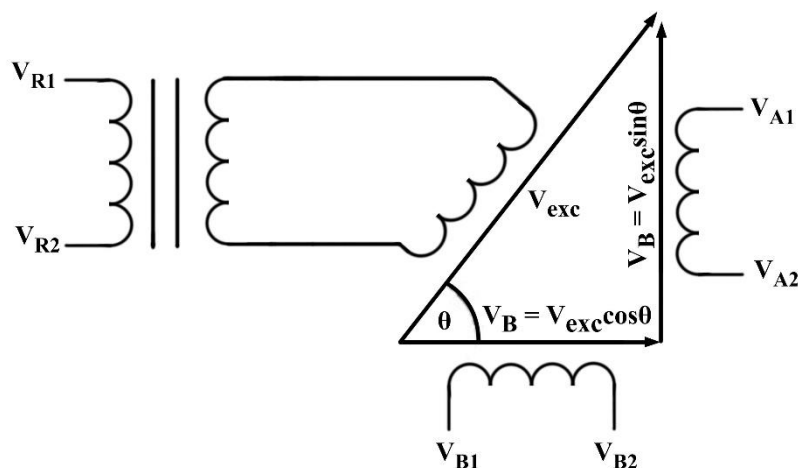


Obr. 1.8: Inkrementální a absolutní enkodér, převzato z [21]

Víceotáčkové absolutní enkodéry mají více disků, které jsou spojeny s hlavním diskem s vysokým rozlišením a zvýšeným převodovým poměrem. Například přidáním druhého disku se 3 stopami a převodovým poměrem 8: 1 k hlavnímu disku s 1024 polohami na otáčku bude mít absolutní enkodér 8 úplných otáček hřídele, což odpovídá 8192 diskretním polohám. [21]

Resolvery

Resolver je rotační elektromechanický transformátor, který poskytuje výstupy ve formě trigonometrických funkcí svých vstupů. Pro zjišťování polohy rotoru bezkartáčových motorů je budící nebo primární vinutí namontováno na rotoru resolveru a výstupní nebo sekundární vinutí jsou navinuty navzájem v pravém úhlu na jádro statoru. Výsledkem je, že výstupní signály jsou sinusové vlny posunuté o 90° , tj. jedna vlna je sinusová funkce úhlového posunutí θ a druhá vlna je kosinusová funkce θ viz obr. 1.9. Jeden signál pro každou otáčku motoru určuje elektrický cyklus. Analogové výstupní signály jsou převedeny do digitální podoby, aby je bylo možné použít v digitálním pozičním systému. Rozdíl mezi dvěma signály určuje polohu rotoru. Rychlost motoru je dána periodou průběhů a směr rotace je určen podle počáteční křivky. [21]

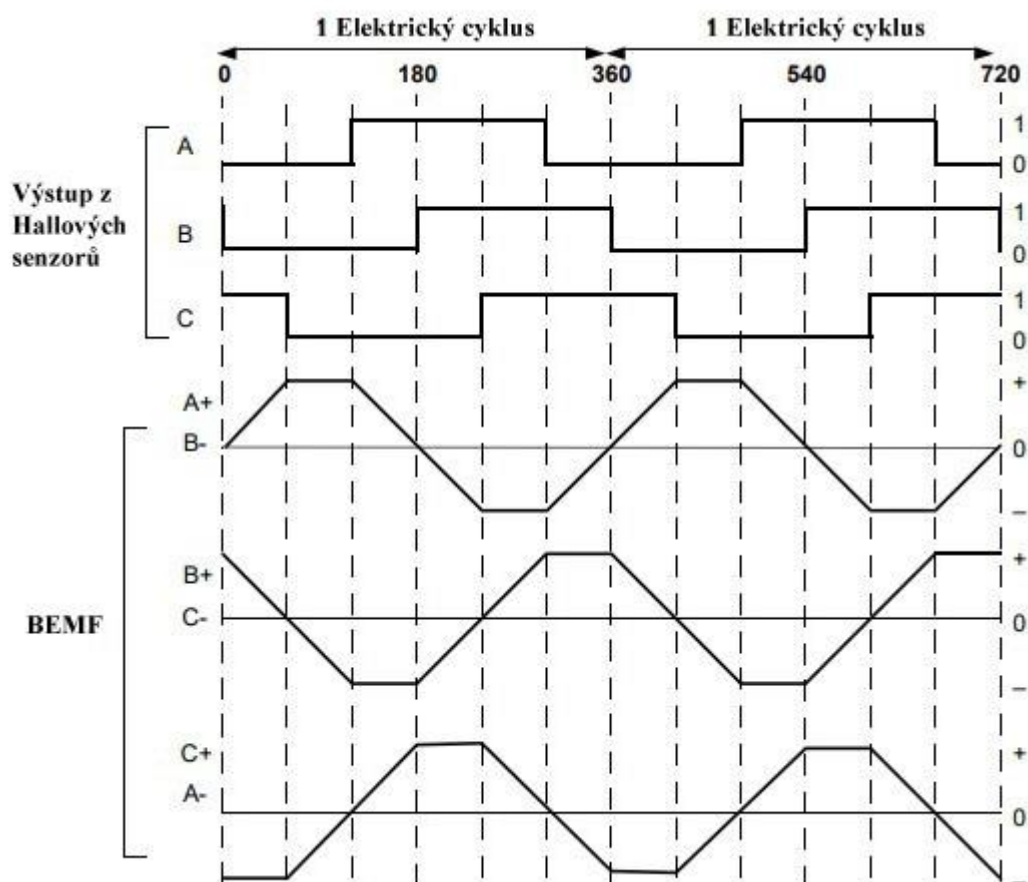


Obr. 1.9: Konfigurace vinutí resolveru, převzato z [21]

Bezsenzorové snímání

V předchozích případech byla komutace zajištěna na základě polohy rotoru dané přídatnými senzory. Motory BLDC, lze ale komutovat i sledováním signálů BEMF. Vztah fázového napětí mezi Hallovými senzory a BEMF, je znázorněn na obr. 1.10. Každá komutační sekvence má jedno vinutí napájené kladně, druhé záporně a třetí je nenapájené. Signál Hallova senzoru mění stav, když polarita BEMF přechází z kladné do záporné nebo naopak viz obr. 1.10. Změna stavu v ideálních případech nastane při průchodu BEMF nulou, ale prakticky dojde ke zpoždění kvůli charakteristikám vinutí. Toto zpoždění by mělo být kompenzováno mikrokontrolerem. Další aspekt, který musí být zváženo jsou velmi nízké rychlosti. Vzhledem k tomu, že je BEMF úměrný rychlosti otáčení, má při nízké rychlosti příliš malou amplitudu na to, aby došlo k detekci překročení nuly. Motor musí být spuštěn v otevřené smyčce, z klidné polohy a když je vytvořen dostatečný BEMF pro detekci průchodu nulou, řízení by mělo být posunuto na BEMF snímání. Minimální rychlost, při které lze BEMF snímat, se vypočítá z BEMF konstanty motoru.

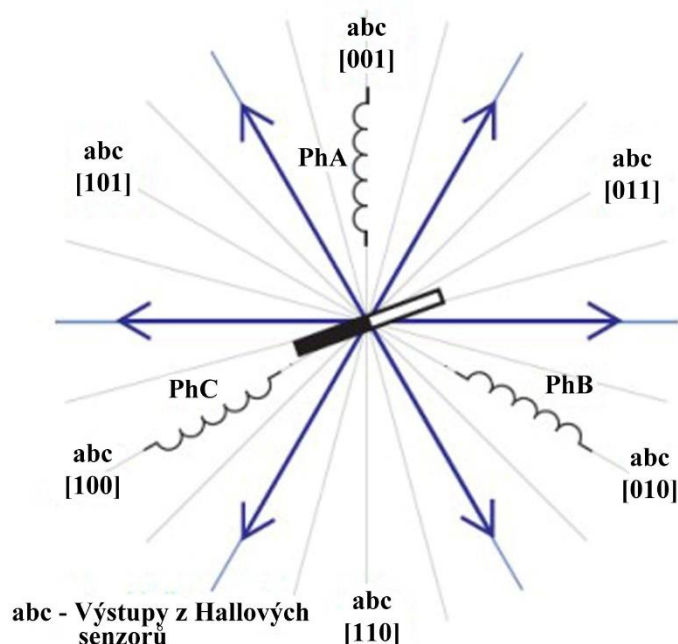
Tímto způsobem komutace lze eliminovat Hallové senzory a u některých motorů také magnety pro Hallové senzory. Tím se zjednoduší konstrukce motoru a sníží se náklady, což je výhodné, pokud motor pracuje v prašném nebo olejovém prostředí, kde je vyžadováno občasné čištění, aby Hallové senzory správně snímaly. Totéž platí, pokud je motor namontován na méně přístupném místě. [13]



Obr. 1.10: Porovnání tvaru signálů BEMF a Hallových senzorů, převzato z [13]

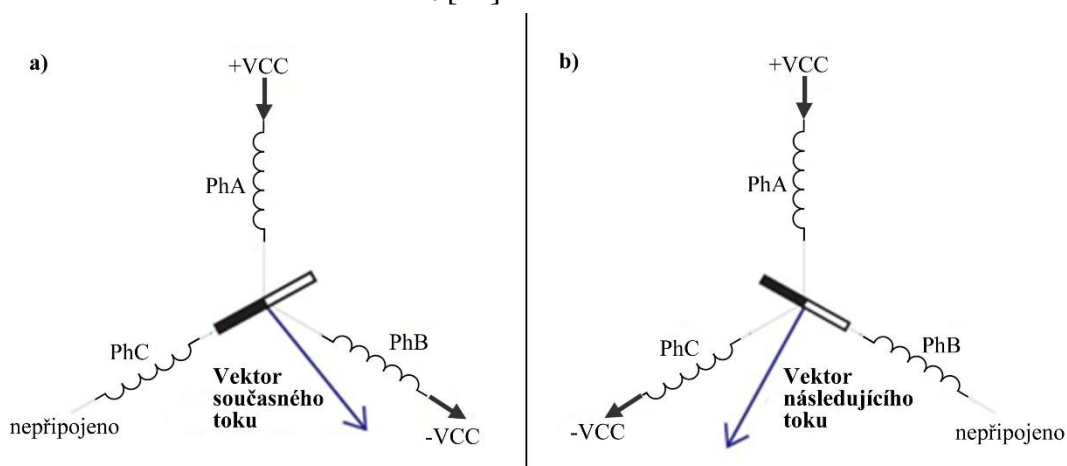
1.2.6 Komutace

Komutace zajišťuje vytvoření rotačního pole. Při každé komutační sekvenci má jedno vinutí kladné napětí (proud teče do vinutí), na druhém vinutí je záporné napětí (proud teče z vynutí) a třetí vinutí je bez napětí. Točivý moment je vytvářen interakcí mezi magnetickým polem generovaným cívkami statoru a permanentními magnety. V ideálním případě k maximálnímu točivému momentu dochází, když jsou tato dvě pole vůči sobě v úhlu 90° , a klesá, když se pole pohybují společně. Aby motor zůstal v chodu, mělo by magnetické pole vytvářené vinutími posunout polohu, jak se rotor pohybuje, aby dohnal pole statoru. Celkem šest možných vektorových toků statoru lze získat pomocí šestistupňového řízení. Vektor toku statoru musí být změněn v konkrétních polohách rotoru, které jsou obvykle snímány Hallovými senzory. Ty generují tři signály, které mají také šest stavů, kde každý odpovídá určitému vektoru toku statoru viz obr. 1.11. [13], [22]



Obr. 1.11: Vektory toku statoru při šestistupňovém řízení, převzato z [22]

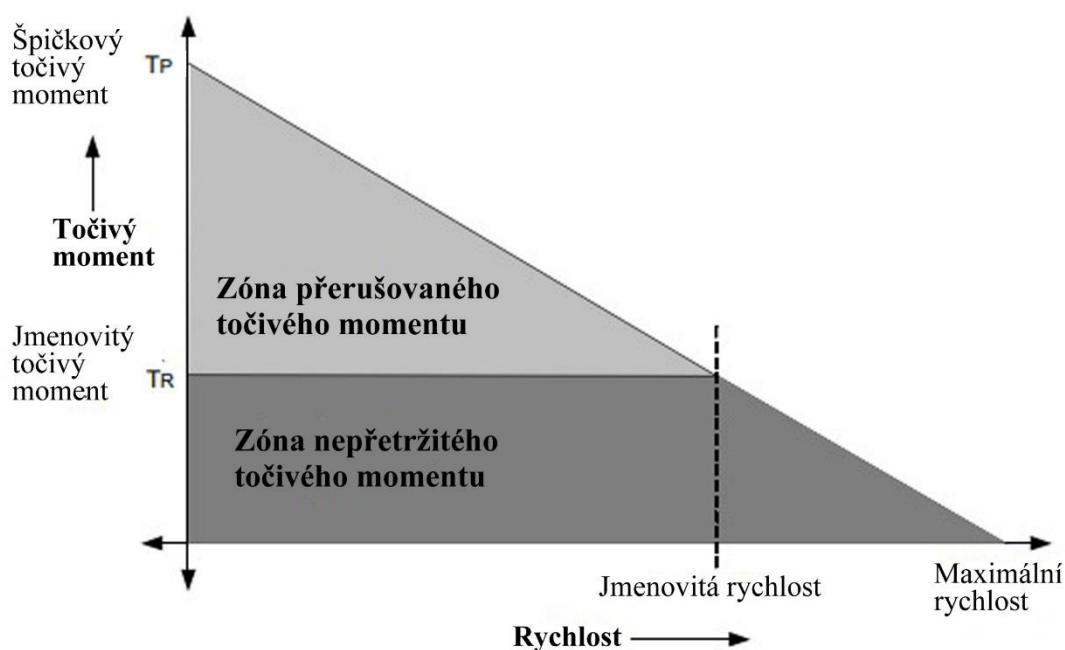
Na obr. 1.12 je znázorněn komutační proces. Skutečná poloha rotoru na obr. 1.12a odpovídá stavu Hallových senzorů ABC [110]. Fáze A je připojena ke kladnému stejnosměrnému napájení, Fáze B je spojena se zemí a fáze C je bez napájení. Jakmile rotor dosáhne určité polohy, stav Hallových senzorů změní svou hodnotu z ABC [110] na ABC [100]. Na obr. 1.12b je vidět přepnutí nulového potenciálu z jednoho spodního vinutí na druhé. Dále je zřejmé, že je obtížné udržet úhel mezi tokem rotoru a statoru přesně na 90° v šestistupňovém řízení při použití šestikrokové řídicí techniky. Skutečný úhel se pohybuje od 60° do 120° . Proces komutace se opakuje pro každých 60 elektrických stupňů a je důležité, aby se po detekci hrany Hallova senzoru co nejrychleji změnilo pořadí napájení vinutí. Jakákoli odchylka způsobuje zvlnění točivého momentu, což má za následek kolísání otáček. [22]



Obr. 1.12: Situace před a po komutaci, převzato z [22]

1.2.7 Momentová charakteristika

Na obr. 1.13, je příklad charakteristiky závislosti točivého momentu na rychlosti. V charakteristice jsou uvedeny dva parametry pro točivý moment, které charakterizují BLDC motor, špičkový točivý moment T_P a jmenovitý točivý moment T_R . Při nepřetržitém provozu lze motor zatížit až do jmenovitého točivého momentu. V BLDC motoru zůstává točivý moment konstantní až do jmenovitých otáček. Motor lze rozběhnout na maximální otáčky, což může být až 150 % jmenovitých otáček, ale točivý moment začne klesat. Aplikace, které mají časté spouštění, zastavování a obrácení otáček se zatížením motoru, vyžadují větší točivý moment, než je jmenovitý točivý moment. Tento požadavek přichází na krátkou dobu, zvláště když motor startuje z klidu a během akcelerace. Během tohoto období je k překonání setrvačnosti zátěže a samotného rotoru zapotřebí další točivý moment, který může zajistit motor poskytnutím špičkového točivého momentu. [13]



Obr. 1.13: Momentová charakteristika BLDC motoru, převzato z [13]

1.2.8 Typické parametry BLDC motoru

Následující tabulka zobrazuje několik parametrů, které lze nalézt v technické specifikaci motoru, a vysvětluje, jak jsou jednotlivé parametry užitečné pro aplikaci. Kromě toho lze fyzický typový štítek obvykle nalézt na motoru, který uvádí mnoho stejných parametrů. [13]

Tabulka 1: Typické elektrické parametry BLDC motoru, převzato z [13]

Elektrický parametr	Typický symbol	Jednotka	Definice
Referenční napětí	V	V	Jmenovité svorkové napětí
Jmenovitý proud	I_r	A	Proud odebíraný motorem, když dodává jmenovitý točivý moment.
Špičkový proud	I_{pk}	A	Maximální proud, který může motor odebírat
Bezzátěžový proud	I_{NL}	A	Proud odebíraný motorem, když na hřídeli motoru není žádné zatížení
BEMF konstanta	K_E	V/RPM nebo V/rad/s	Parametr pro odhad BEMF pro danou rychlost.
Odpor	R	Ω	Odpor každého vinutí statoru
Indukčnost	L	mH	Indukčnost vinutí. Spolu s odporem, lze použít ke stanovení celkové impedance vinutí pro výpočet elektrické časové konstanty motoru
Motorová konstanta	K_M	Oz-in/ $\sqrt{W}$ nebo Nm/ $\sqrt{W}$	Poměr točivého momentu k výkonu.
Elektrická časová konstanta	τ_E	ms	Vypočtená na základě R a L vinutí.

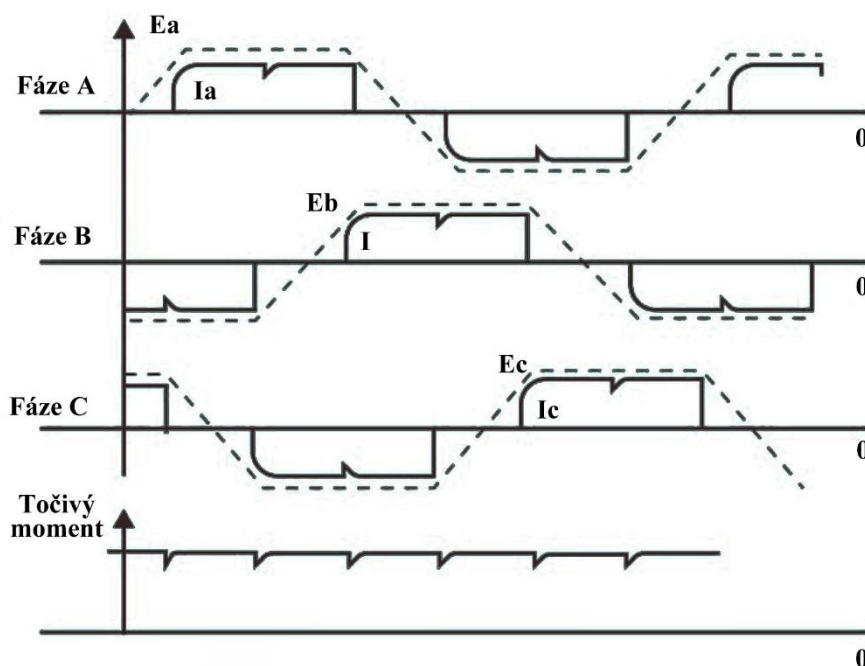
1.2.9 Řízení BLDC motoru

Existuje řada různých typů nebo metod řízení bezkartáčových motorů, které mění způsob, jakým může motor fungovat.

Každá metoda má svá pro a proti, jak technicky, tak v některých případech i finančně. První, obvykle nejběžnější, je lichoběžníkový pohon, druhý je sinusový a třetí vektorový (označovaný jako FOC). [25]

Lichoběžníkové řízení

Jedna z nejjednodušších metod řízení pro stejnosměrné střídavé motory používá takzvanou lichoběžníkovou komutaci. Tato metoda definuje tvar BEMF a průběh budícího proudu. Aby motor získal optimální výkon, měl by se řídicí proud shodovat s průběhem BEMF. Protože BEMF motoru BLDC má lichoběžníkový tvar, měl by být poháněn lichoběžníkovým proudem, aby byl dosažen nejlepší výkon. Lichoběžníková komutace je také známá jako „šestistupňová komutace“, protože k dokončení jedné otáčky rotoru je použito celkem šest kroků řídicího proudu. Při lichoběžníkovém řízení jsou aktivní pouze dvě fáze. Tato metoda má jednoduchý řídicí algoritmus, ale trpí zvlněním točivého momentu motoru při každé komutaci (60 stupňů) viz obr. 1.14. [23]

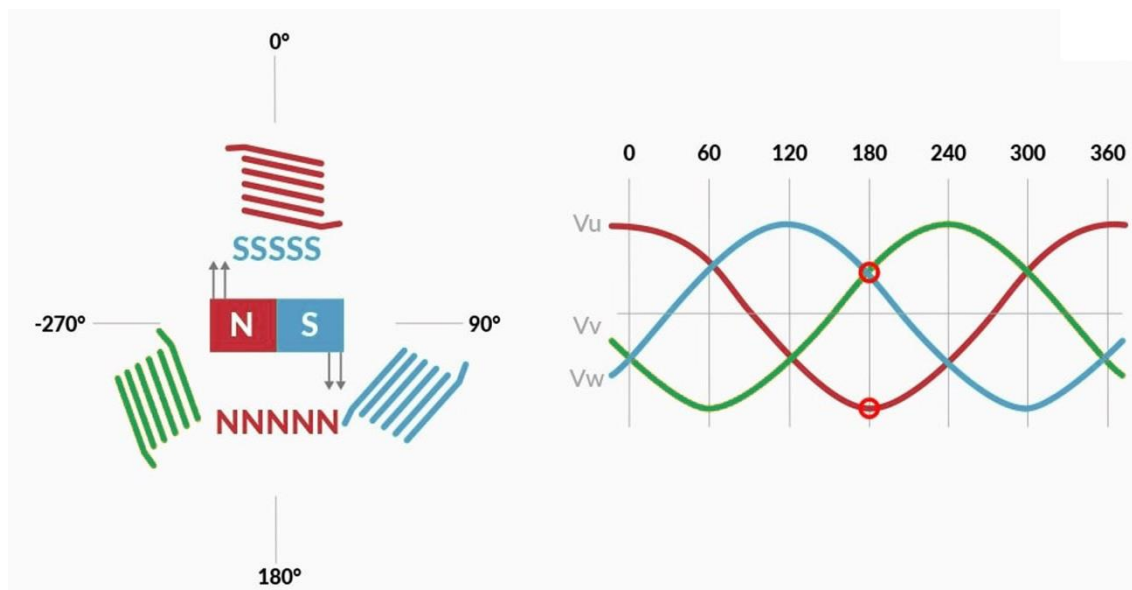


Obr. 1.14: Šestistupňová komutace, převzato z [23]

Sinusové řízení

Sinusová komutace se používá v synchronních motorech s permanentními magnety, protože motor PMSM má sinusový BEMF. Ačkoli je teoreticky tvar signálu zpětného elektromotorického napětí motoru BLDC lichoběžníkový, indukčnost ji v motoru vyhlazuje do sinusového tvaru.

Jak naznačuje název, tvar BEMF a budícího proudu je u této metody sinusový. Sinusové řízení eliminuje zvlnění točivého momentu a zajišťuje plynulý pohyb. Základním principem sinusové komutace je poskytnout sinusový proud, který se mění podle polohy rotoru. Proud je fázově posunut o 120° . Sinusového řízení je dosaženo použitím vektorového řídicího algoritmu. Základním principem tohoto algoritmu je, že maximální točivý moment vzniká, když jsou magnetické pole rotoru a statoru vzájemně kolmé. Sinusový proud se tedy mění podle polohy rotoru, aby byl dosažen maximální točivý moment a plynulý pohyb viz obr. 1.15. [23]



Obr. 1.15: Sinusová komutace, převzato z [23]

Vektorové řízení (FOC)

Vektorové řízení bylo ve skutečnosti vyvinuto pro střídavé motory již dávno, ale technologický vývoj v posledních letech znamenal, že tuto technologii lze nyní použít pro motory BLDC s nižším napětím. Dříve bylo skutečné magnetické pole měřeno v motoru pomocí senzorů za chodu. Nyní však díky snížení nákladů na výkonné mikrokontrolery mohou být pokročilé vzorce a výpočty dokončeny dostatečně rychle, aby bylo možné velmi přesně změřit proud ve dvou fázích motoru (třetí lze vypočítat) a určit tak přesnou orientaci rotoru. To umožňuje mikrokontroleru velmi rychle dokončit výpočty a odeslat optimalizované PWM do všech tří fází motoru, aby bylo zajištěno, že motor bude vždy vytvářet optimální točivý moment. FOC se někdy zaměňuje se sinusovým řízením, protože průběhy proudu jsou téměř identické, rozdíl je u sinusové komutace, proud produkovaný v každé poloze je obvykle aproximovaný a nebere v úvahu výrobní tolerance, motor, enkodér, pokud je použit a jakoukoli setrvačnost zátěže motoru nebo aplikaci. FOC řízení neustále kontroluje a provádí informace o poloze/načítání, je vždy optimalizován pro jakoukoli aplikaci a vždy běží s maximální účinností, protože elektromagnetické pole vždy vzniká přesně pod úhlem 90 stupňů ke každému pólu motoru. V důsledku toho lze otáčky motoru snížit na téměř 0 ot./min. [25]

Tabulka 2: Porovnání řídicích algoritmů, převzato z [24]

Komutační metody	Regulace otáček	Regulace točivého momentu		Požadované senzory pro zpětnou vazbu	Složitost řídicího algoritmu
		Nízké otáčky	Vysoké otáčky		
Lichoběžníková	Výborná	Zvlnění točivého momentu	Efektivní	Hallův senzor	Jednoduchý
Sinusová	Výborná	Výborná	Neefektivní	Enkodéry, Resolvery	Střední
FOC	Výborná	Výborná	Výborná	Proudový senzor, enkodér	Složitý

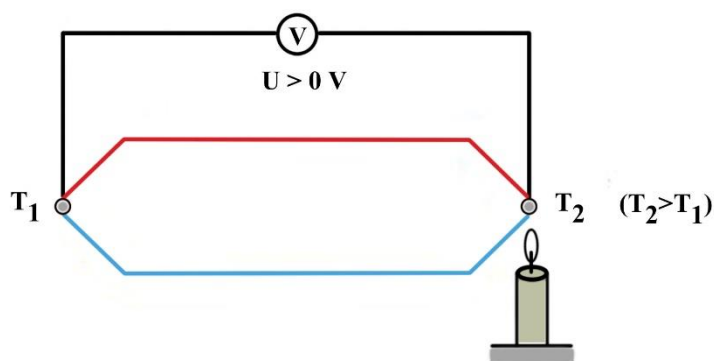
1.3 Termoelektrické jevy

Perspektivy praktického využití termoelektrických jevů (zejména Seebeckova a Peltierova jevu) nabízejí lidstvu možnosti řešení hned několika současných palčivých problémů. Přímá přeměna tepelné energie na elektrickou (Seebeckův jev) či elektrické energie na tepelnou (Peltierův jev) představují ve své podstatě velmi čisté způsoby konverze. Pro jejich masovější využití je však třeba nalézt nové typy materiálů mající výrazně lepší termoelektrické vlastnosti, než mají doposud zkoumané. Pokud by byly nalezeny, bylo by možné např. konstruovat prakticky bezhlučná chladicí zařízení pracující bez jakýchkoliv chladicích médií, s velmi přesnou možností regulace. Účinnější termoelektrické generátory by zase umožnily efektivnější využití obrovského množství produkovaného odpadního tepla a jeho zpětnou konverzi na elektřinu. Obecně lze rozlišit tři základní druhy termoelektrických jevů: [26], [27]

- Seebeckův jev – vznik termoelektrického napětí v obvodu složeném ze dvou vodičů, jejichž spoje se nacházejí na různých teplotách,
- Peltierův jev – vznik nebo zánik tepla na styku dvou vodičů při průchodu elektrického proudu,
- Thomsonův jev – vznik nebo zánik tepla v objemu vodiče s teplotním gradientem při průtoku elektrického proudu.

1.3.1 Seebeckův jev

Tento jev jako první pozoroval estonsko-německý fyzik Thomas Johann Seebeck v roce 1821. V neuzavřeném obvodu lze mezi dvěma spoji dvou kovů naměřit termoelektrické napětí, které je dáno rozdílem kontaktních napětí vznikajících na obou spojích daných kovů. Mají-li dva spoje dvou kovů, které tvoří termočlánek, rozdílnou teplotu, jsou i kontaktní napětí obou rozhraní různá. Proto je výsledné napětí měřené mezi těmito rozhraními nenulové a termočlánek lze využít jako zdroj elektrického napětí viz obr. 1.16. Obvodem prochází elektrický proud a nastává tzv. Seebeckův jev. [28]



Obr. 1.16: Ukázka principu Seebeckova jevu, převzato z [28]

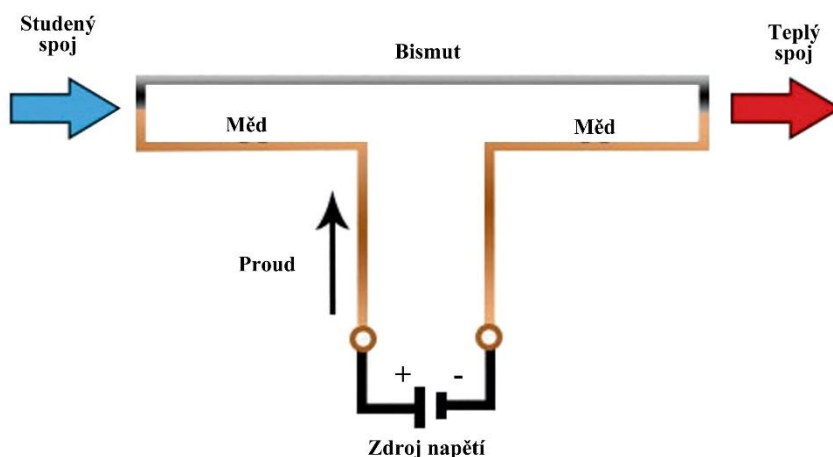
Pro malé teplotní rozdíly teplot T_1 a T_2 obou spojů daných kovů platí přibližně lineární závislost termoelektrického napětí na teplotě. Termoelektrické napětí závisí jen na rozdílu teplot daných materiálů a lze jej vypočítat pomocí rovnice:

$$\Delta U = \alpha_{12}(T_2 - T_1) = \alpha_{12}\Delta T, \quad (2)$$

kde ΔU je termoelektrické napětí, ΔT je teplotní rozdíl kovových spojů, α_{12} je Seebeckův koeficient, který závisí vždy na dané dvojici kovů. [28]

1.3.2 Peltierův jev

Tento jev je opakem Seebeckova jevu a byl objeven Jean C. Peltierem roku 1834. Spočívá ve vzniku teplotního rozdílu mezi dvěma vodiči při průchodu elektrického proudu, což je způsobeno pohybem volných nosičů náboje. V závislosti na směru průchodu proudu se teplo na spojích vodičů uvolňuje nebo pohlcuje. V případě využití polovodičů lze získat silnější efekt než při použití vodičů. [29], [30], [31]



Obr. 1.17: Ukázka principu Peltierova jevu, převzato z [32]

Na přechodu dvou odlišných vodičů přecházejí elektrony z jednoho vodiče do druhého. V závislosti na směru toku elektrického náboje budou tyto elektrony buď

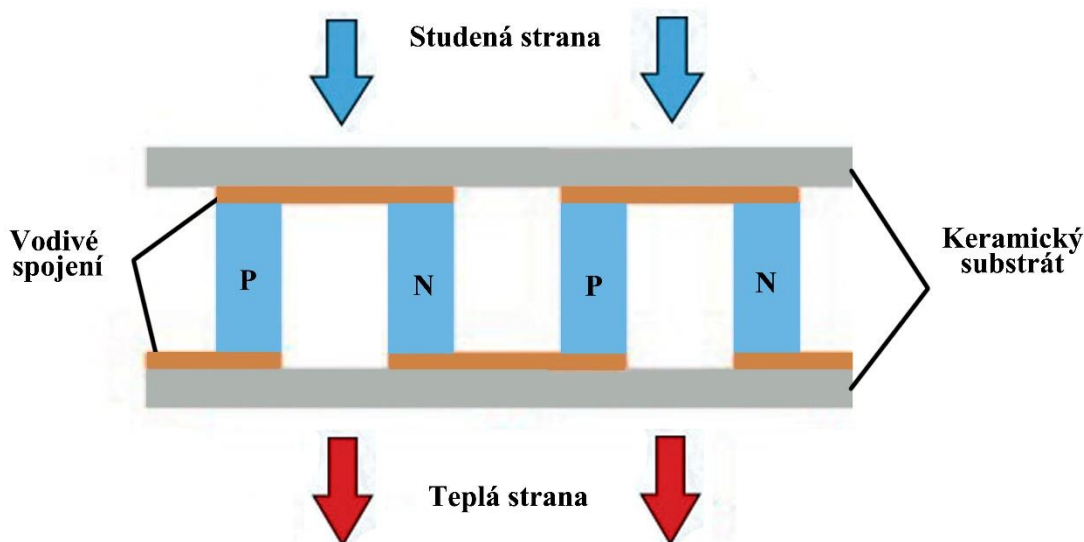
předávat svou přebytečnou energii okolním atomům, nebo z nich energii absorbovat. V prvním případě se teplo odvádí, zatímco v druhém je absorbováno. Rychlost chlazení nebo ohřívání lze vypočítat pomocí rovnice:

$$Q_C \text{ nebo } Q_H = \beta * I, \quad (3)$$

kde Q_C je rychlost chlazení, Q_H je rychlost ohřívání, β je Peltierův rozdílový koeficient mezi dvěma materiály A a B, I je proud procházející obvodem. [32]

Peltierův článek

Objev Peltierova jevu měl jen malé praktické využití, při používání vodičů, nicméně vše se změnilo ve 20. století, kdy se začaly používat polovodiče, jež umožnily vyrábět malé a efektivní Peltierovy články. Ty se skládají z polovodičových pelet z telluridu bismutitého typu P a N. Ty jsou odděleny keramickými substráty, které jsou pokovené, aby umožnily vedení tepla z „chladné“ na „horkou“ stranu článku při připojení ke zdroji stejnosměrného napětí. V rámci modulu jsou polovodiče zapojeny elektricky do série, ale spojují se za účelem přenosu tepla paralelním způsobem viz obr. 1.18. [33]



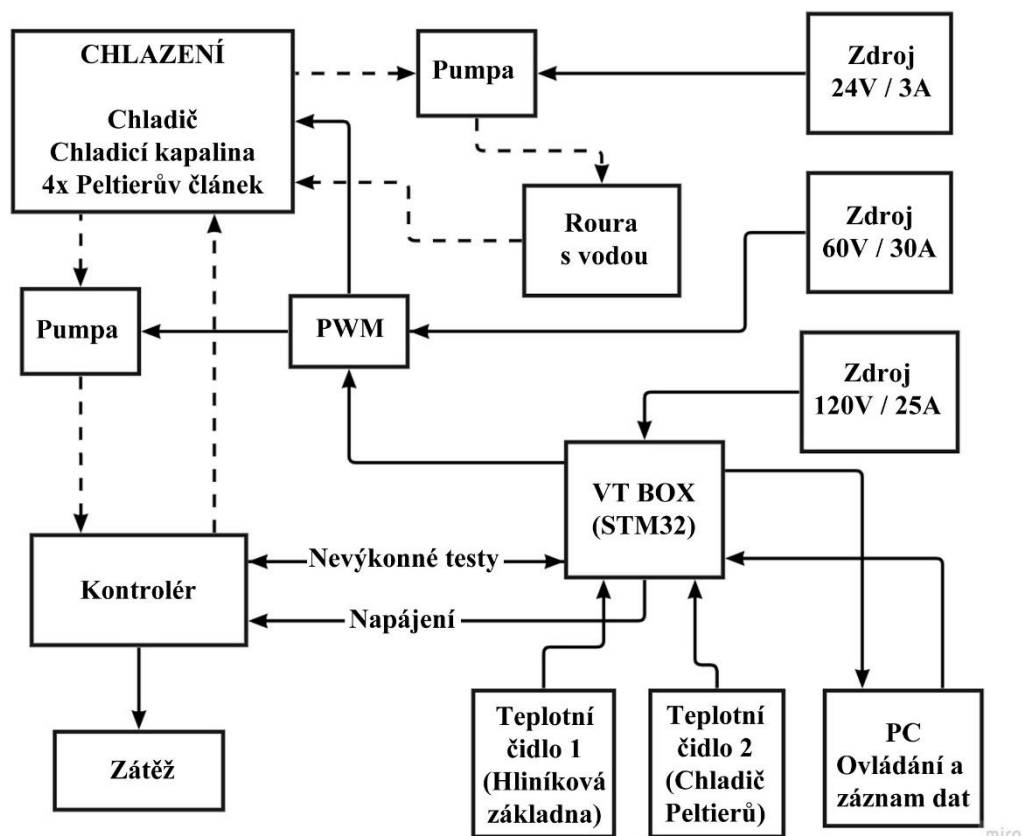
Obr. 1.18: Vnitřní uspořádání Peltierova článku, převzato z [34]

2. NÁVRH TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Cílem této části bude návrh zařízení pro dlouhodobý test BLDC kontroléru. Zařízení by mělo být univerzální a schopné otestovat celkem 4 druhy kontrolérů s označeními SL, SX, SC a AM. Každý kontrolér se liší od druhého svými parametry ať už elektrickými nebo mechanickými. Testování je nezbytné z důvodu ověření funkčnosti jednotlivých částí kontroléru z dlouhodobého hlediska. Z těchto údajů lze získat statistické veličiny MTBF a MTTF. MTBF (Mean time between failure), což je střední doba mezi poruchami, která se využívá v případě, že se porouchané zařízení opravuje, zatímco MTTF (Mean time to failure) je střední doba do poruchy, jenž se používá u zařízení, které se po poruše neopravují. Z těchto parametrů lze získat informace o spolehlivosti výrobku, popřípadě životnost výrobku.

2.1 Blokové schéma testování

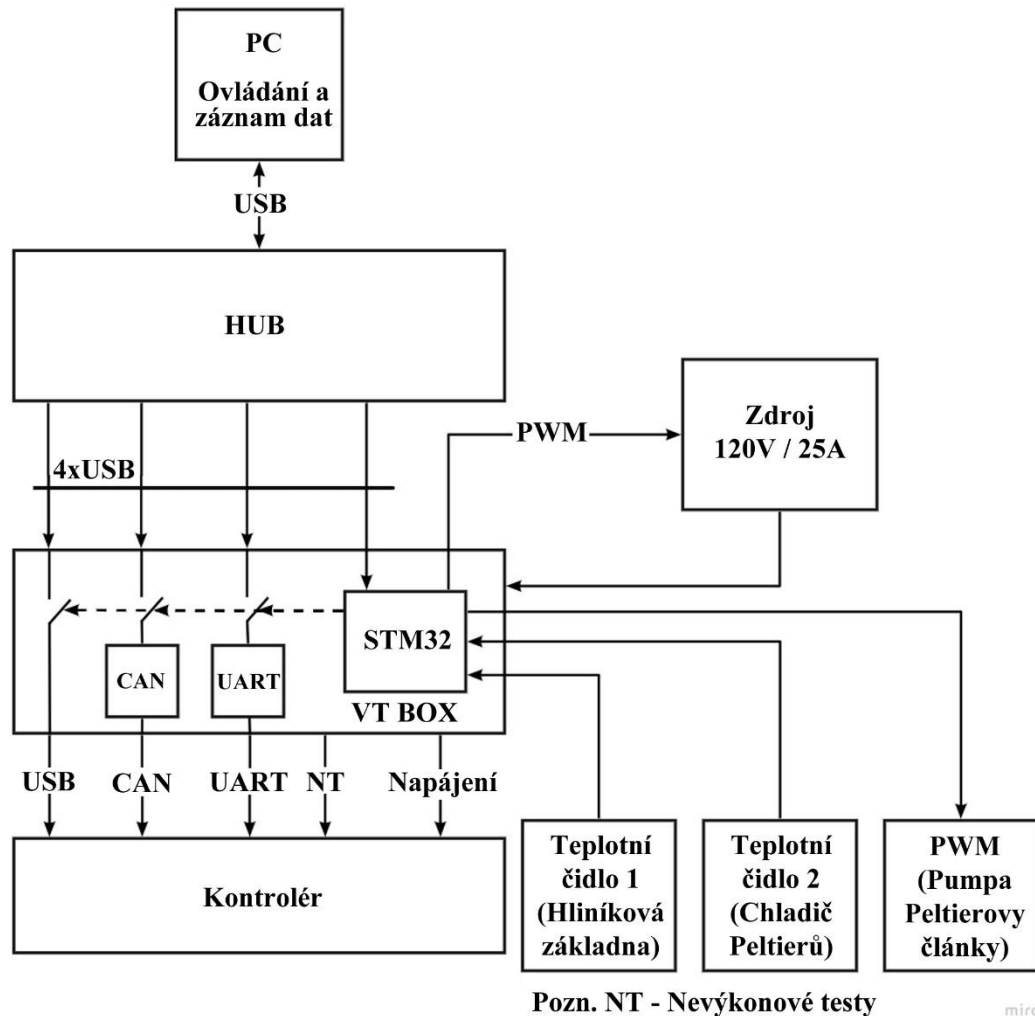
Systém se bude skládat ze 4 Peltierových článků, chladicí kapaliny, pumpy, teplotních čidel, chladičů, ventilátorů, zdroje 60 V/33,3 A, PWM ovládání, VT Boxu, zátěže a zdroje 120 V/25 A viz obr. 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma zařízení pro dlouhodobé testování

2.2 VT BOX

Princip zařízení výstupního testování, zkráceně VT Box, spočívá v komunikaci mezi počítačem a mikrokontrolérem STM32. Skript v počítači zadává příkazy VT Boxu, který následně přepíná mezi jednotlivými relé, čímž postupně dochází k otestování jednotlivých částí kontroléru. Bloky CAN a UART představují převodníky CAN-USB a UART-USB. Teplotní čidla a PWM ovládání pro pumpu a Peltierovy články budou připojeny k procesoru STM32 ve VT Boxu

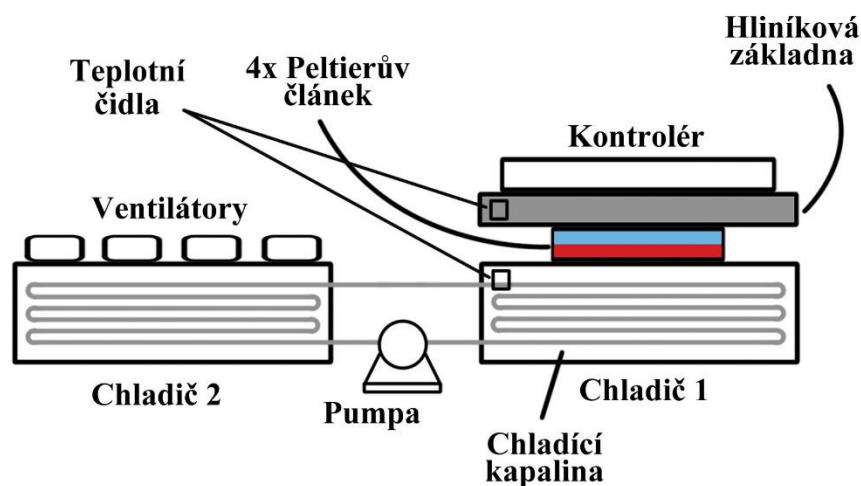


Obr. 2.2: Detailní blokové schéma VT Boxu

2.3 Konstrukce testovacího zařízení

Z Peltierových článků se bude využívat pouze chladná strana, teplá bude produkovat odpadní teplo, kterého se bude potřeba co nejrychleji zbavit. Podstatné taky bude, aby se teplá strana ochladila na co nejmenší možnou teplotu, protože jen tak lze dosáhnout velkého teplotního rozdílu mezi teplou a studenou stranou, a tím lze dostat studenou stranu na co nejnižší teplotu.

Pro dobrý tepelný přenos bude výhodné chladnou stranu článku umístit co nejbližší kontroléru a teplou stranu umístit na chladič, jímž bude proudit chladicí kapalina, která bude chlazena mimo systém Peltierův článek – Kontrolér. Vzhledem k tomu, že Peltierovy články s výkony větší než 150 W mají rozměry okolo (50 x 50) mm až (60 x 60) mm, nebylo by možné uchytit 4 články na kontrolér, protože verze SL má rozměry (148 x 96) mm [35]. Ostatní verze kontrolérů mají rozměry menší, proto bude jako rozhraní mezi kontrolérem a Peltierovým článkem použita hliníková základna, která zajistí potřebný tepelný přenos viz obr. 2.3. Pro uchycení Peltierových článků mezi hliníkovou základnu a chladič bude použito plastových šroubů, aby se eliminoval parazitní přenos tepla z ohřáté strany na studenou. Pro teplotní čidla bude v chladičích vyvrtána díra, aby se dala umístit co nejbližší k Peltierovým článkům a pro zlepšení tepelného přenosu budou natřena teplovodivou pastou. Čidlo teploty 1 bude umístěno na hliníkovou základnu (studená strana) a čidlo teploty 2 bude umístěno na chladič Peltierova článku.



Obr. 2.3: Princip chlazení kontroléru

2.4 Zátěž kontroléru

Ačkoli je testování konstruováno pro kontrolér, který je určen pro řízení BLDC motorů nebude se motor kvůli zvýšení bezpečnosti, hlučnosti a ceny používat. Navíc, aby se otestoval celý potenciál kontroléru, nesměl by motor běžet naprázdno, ale musel by být určitým způsobem zatížen. Proto je výhodné místo motoru použít jako jednu z možných zátěží třífázovou tlumivku, která ho plně nahradí, bude se s ní bezpečněji manipulovat a nebude vydávat hluk. Tato tlumivka musí mít dostatečné parametry, neboť kontrolér pracuje s velkými proudy v řádu stovek ampér. Další možností je vytvoření vlastních cívek s několika závitů pomocí měděného drátu.

2.5 Testovací cyklus

Cílem testování bude zkontrolovat chod kontroléru při každém cyklu. Kontrolér bude řízen testovacím skriptem, který ověří funkčnost výkonovými a nevýkonovými testy. Záznam naměřených dat bude prováděn počítačem. Výkonové testy spočívají ve vyčítání chybových kódů při běhu kontroléru.

Mezi nevýkonové testy patří kontrola:

1. komunikace USB, UART a CAN,
2. vstupů motorových senzorů (MSENS),
3. vstupně-výstupních pinů kontroléru (GPIO),
4. výstupu kontroléru (CONTACTOR),
5. zapínacího obvodu (flip-flop),
6. selftest (schopnost kontroléru diagnostikovat si chyby např. zda nejsou proraženy výstupní FETY).

V případě poruchy dojde k odpojení zařízení. Pokud je kontrolér v aktivním stavu, začne se sám díky procházejícímu proudu ohřívat. Jakmile dosáhne teplotní limitace, ve které zůstane po určitou dobu, aby se pořádně prohřál, je potřeba jej co nejrychleji ochladit na co nejnížší teplotu a setrvat zde určitou dobu pro důkladné ochlazení všech částí.

Počáteční podmínky:

1. Pokojová teplota
2. Kontrolér připojený k zátěži a napájení
3. Zapnutý kontrolér po dobu provádění testů

Testovací cyklus bude následující:

1. Provedení nevýkonových testů, vypnout kompletně chlazení,
2. RUN 1 = ohřev aktivního kontroléru až do horního teplotního limitu, ve kterém setrvá po dobu 15 sekund,
3. zapnutí pumpy a Peltierových článků, kontrolér neaktivní, vyčkat na co nejnížší teplotu kontroléru nebo čidla teploty 1. Najít kompromis mezi dobou chlazení a min teplotou,
4. vypnutí chlazení, opakuje se bod 1.

Počet cyklů: 1000

Pozn. Velkými písmeny „RUN a STOP“ jsou myšleny příkazy ovládající kontrolér.

2.6 Komponenty zařízení

Tato kapitola se zabývá výběrem vhodných komponent, ze kterých bude zhotoveno dlouhodobé testovací zařízení.

2.6.1 Peltierovy moduly

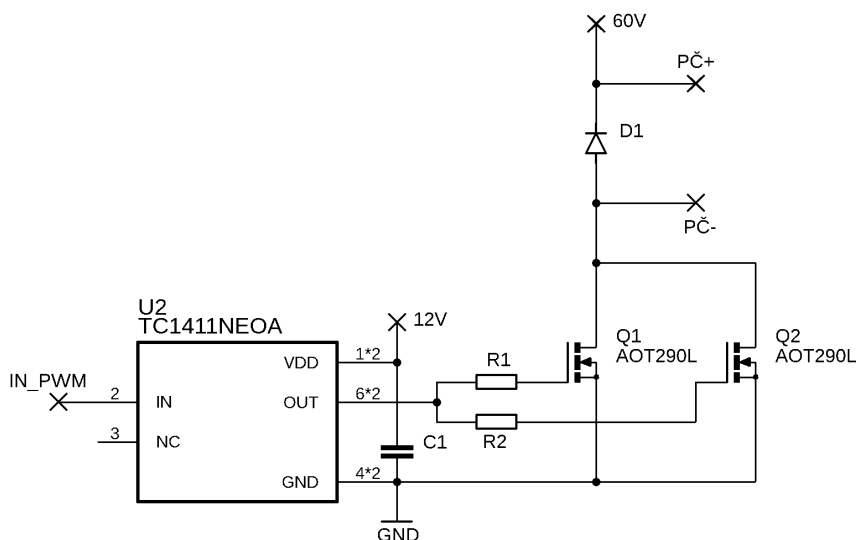
Peltierovy moduly se budou starat o chlazení kontroléru. Celkem budou použity čtyři moduly o výkon 350 W typu TEC1-12730. Maximální pracovní napětí modulu je 15,6 V a maximální pracovní proud je 30,5 A. Z těchto hodnot vychází nejlépe zapojení článků do série, kdy pro maximální výkon bude potřeba napětí 62,4 V a proud o hodnotě 30,5 A. Maximální rozdíl teplot $\Delta T = 68\text{ }^{\circ}\text{C}$. [36]

2.6.2 DC zdroje

Pro napájení Peltierových článků byl zvolen spínaný zdroj s pracovním napětím 60 V a výkonem 2000 W, což odpovídá proudu 33,3 A. Pro napájení VT Boxu byl zvolen spínaný zdroj CSP-3000-120. Jedná se o modulový 3000 W programovatelný zdroj s hodnotou napětí 120 V a proudem 25 A. Vzhledem k tomu, že se jedná o programovatelný zdroj, je jeho napětí ovládáno v závislosti na použitém kontroléru pomocí PWM signálu z VT Boxu. [37]

2.6.3 PWM modul

Přídavný PWM modul bude zajišťovat spínání a regulaci Peltierových článků. Budou použity 2 unipolární tranzistory NMOS s označením AOT290L zapojené paralelně. Pro budič bude použit IO s označením TC1411 viz obr. 2.4. [38], [39]



Obr. 2.4: Schéma zapojení PWM modulu.

2.6.4 Teplotní čidla

Maximální teplota Peltierových článků je 138 °C. Minimální teplota poté závisí na maximálním teplotním rozdílu, který je 68 °C a na teplotě teplé strany Peltierova modulu. Pokud je uvažována pracovní teplota 55 °C, je schopna studená strana dosahovat teploty -13 °C. Vzhledem k možnostem VT Boxu (ADC s rozsahem 3,3 V, rušení ze strany napájení kontroléru či zátěže a také vzhledem k očekávanému teplotnímu rozsahu cyklování) bylo vybráno snímání teploty pomocí PTC termistorů. Jako vhodný kandidát se jeví PTC Termistor KTY81-210, který má udávaný měřicí rozsah od -55 °C do 150 °C. Hodnota odporu pro 25 °C činí 2 kΩ, $R_{25^{\circ}\text{C}} = 2 \text{ k}\Omega$. Popřípadě NTC termistor s teplotním rozsahem od -20 °C do 105 °C s hodnotou odporu $R_{25^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ k}\Omega$ a konstantou $\beta = 3950 \text{ K}$. K oběma teplotním senzorům bude stačit přidat externí pull-up rezistor s tolerancí menší než 0,1 % kvůli přesnosti. [40], [41]

2.6.5 Vodní chlazení

Vodní chlazení bude použito pro chlazení teplé strany Peltierových článků. Bude použit hliníkový blok s měděným potrubím, kterým bude proudit destilovaná voda, která nebude zanášet okruh nečistotami viz obr. 2.5. Rozměry bloku jsou 152x127x15 mm.



Obr. 2.5: Vodní blok pro chlazení

2.6.6 Tepelný výměník

Kapalinu lze chladit dvěma způsoby.

První způsob je použití radiátorů, kterými bude proudit kapalina. Radiátory budou chlazeny pomocí ventilátorů. Je výhodné použít 360 mm radiátor, na který lze celkem umístit 3 x 120 mm ventilátory, které budou napájeny z 12 V zdroje.

Další způsob je využití podzemní vody, která volně natéká do roury umístěné ve sklepení, kdy se použije další čerpadlo a chladič, který se ponoří do roury s vodou.

2.6.7 Pumpa

První pumpa bude zajišťovat oběh chladicí kapaliny mezi chladičem Peltierových článků a nádrží s destilovanou vodou. Bude použito DC čerpadlo CL15-12V5 napájené 12 V s maximálním jmenovitým proudem 400 mA. Maximální udávaný průtok 240 l/h. Pumpa bude ovládána pomocí signálu z PWM a tranzistoru PMOS.

Druhá pumpa bude neustále v provozu a bude se starat o oběh chladicí kapaliny mezi nádrží s destilovanou vodou a rourou se studenou vodou. Pro tento okruh bude použito ponorné čerpadlo Comet ELEGANT napájené 24 V s maximálním jmenovitým proudem až 1 A. Maximální udávaný průtok je 600 l/h, který zajistí dostatečně rychlou cirkulaci vody. [42], [43]

3. REALIZACE DLOUHODOBÉHO TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola diplomové práce se zabývá realizací dlouhodobého testovacího zařízení. Včetně ověření funkce celého systému.

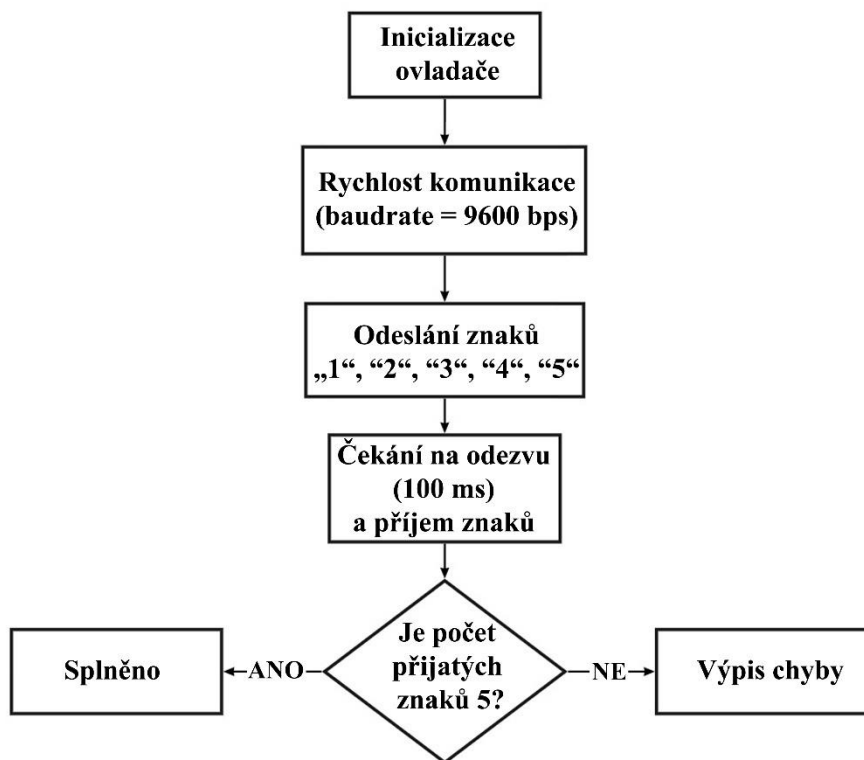
3.1 Definice jednotlivých testů

Tato podkapitola se zabývá přesnou definicí jednotlivých testů, které budou prováděny každý cyklus v rámci dlouhodobého testování. Každý test je ovládán pomocí svého testovacího skriptu, prostřednictvím počítače a VT Boxu.

3.1.1 Komunikace UART, USB a CAN

Test UARTU spočívá v nastavení rychlosti komunikace na 9600 bps. Poté dojde k odeslání znaků "1", "2", "3", "4", "5", čeká se na odezvu a počítá se počet přijatých zpráv. Pokud přijde všech 5 znaků ve správném pořadí, je test splněn.

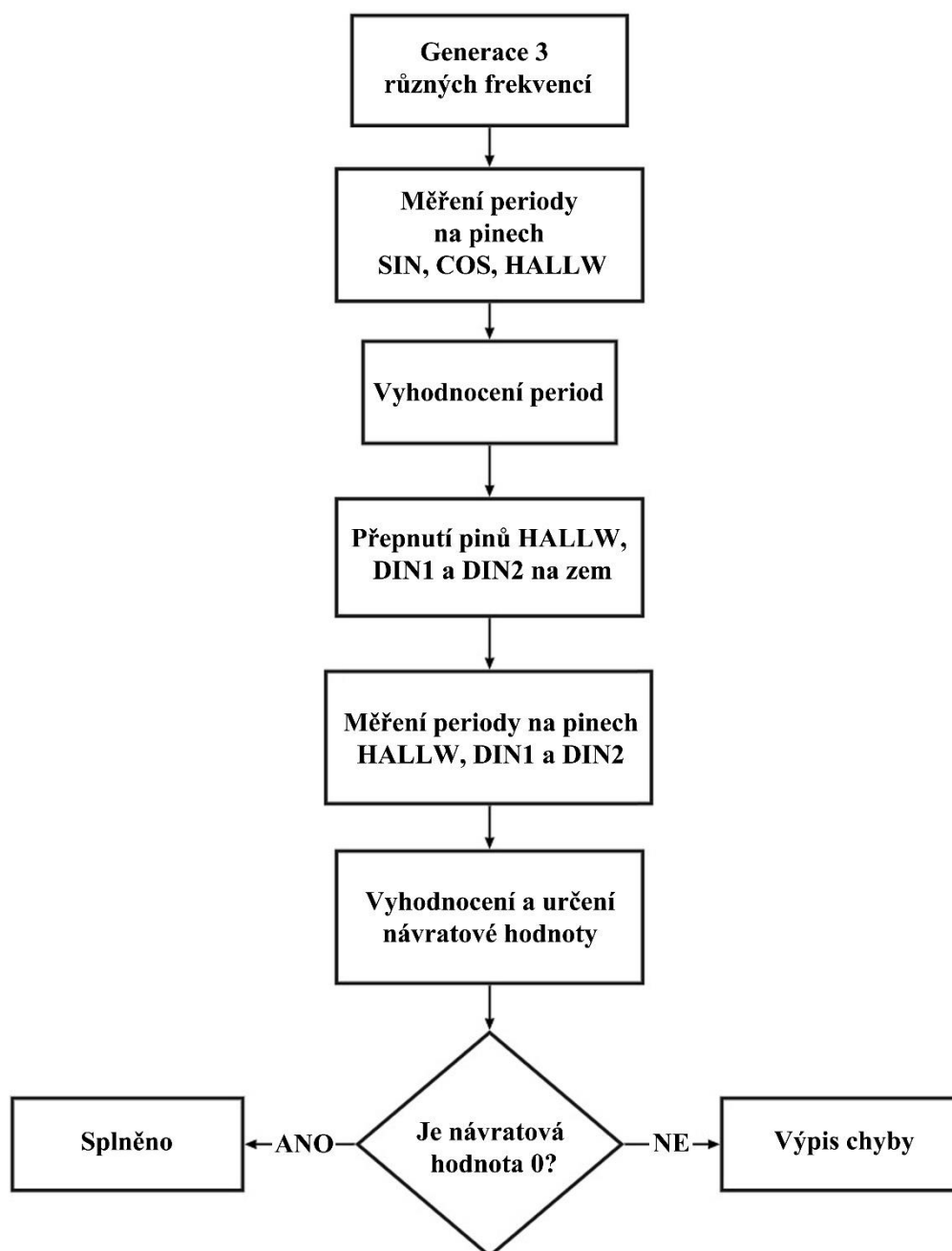
Test sběrnic USB a CAN, funguje na stejném principu, v podstatě se jedná o nepřímý test pomocí komunikace, kdy na začátku spuštění testu dojde k nahrání konfigurace pomocí USB a CANU. V případě neúspěchu se objeví chybová hláška viz obr. 3.1.



Obr. 3.1: Blokové schéma testu sběrnice UART

3.1.2 Vstupy motorových senzorů (MSENS)

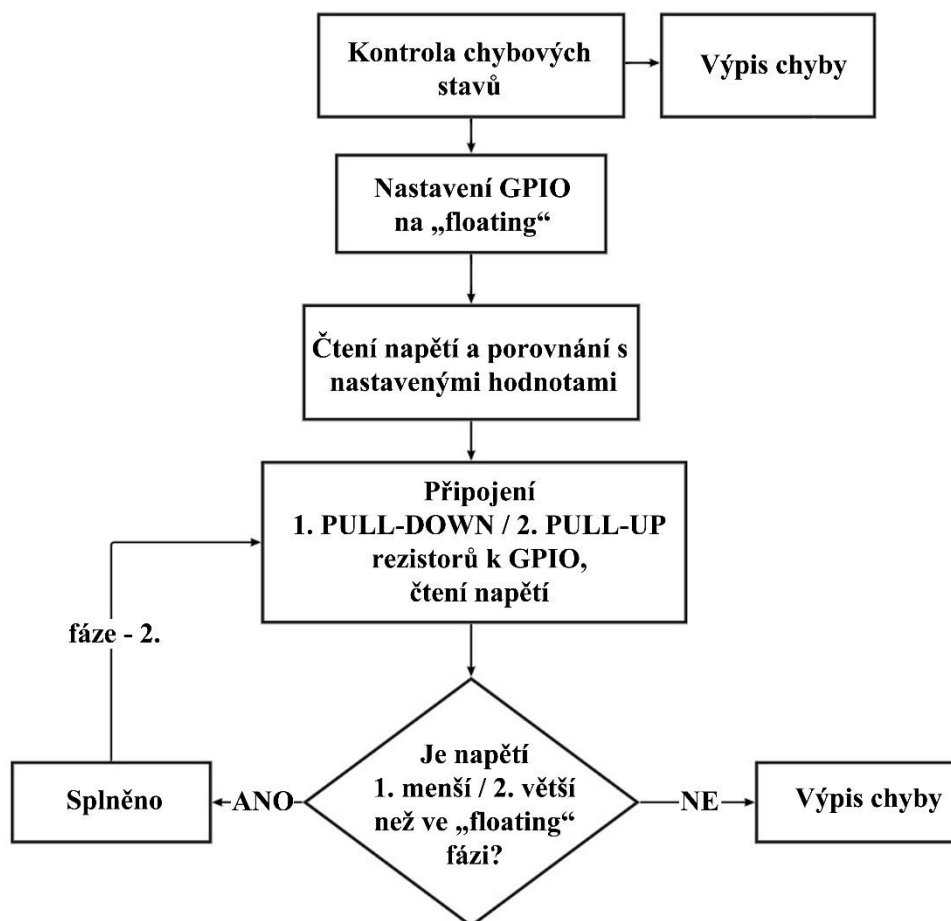
Kontrolér pracuje s Hallovými senzory, které zabírají 3 vstupy kontroléru. Testovací skript běžící na počítači za pomoci přípravku generuje 3 různé frekvence, jež jsou měřeny kontrolérem a zároveň hlídá, jestli je měřena správná frekvence na správném pinu viz obr. 3.2.



Obr. 3.2: Blokové schéma testu vstupů motorových senzorů

3.1.3 Vstupně výstupní piny kontroléru (GPIO)

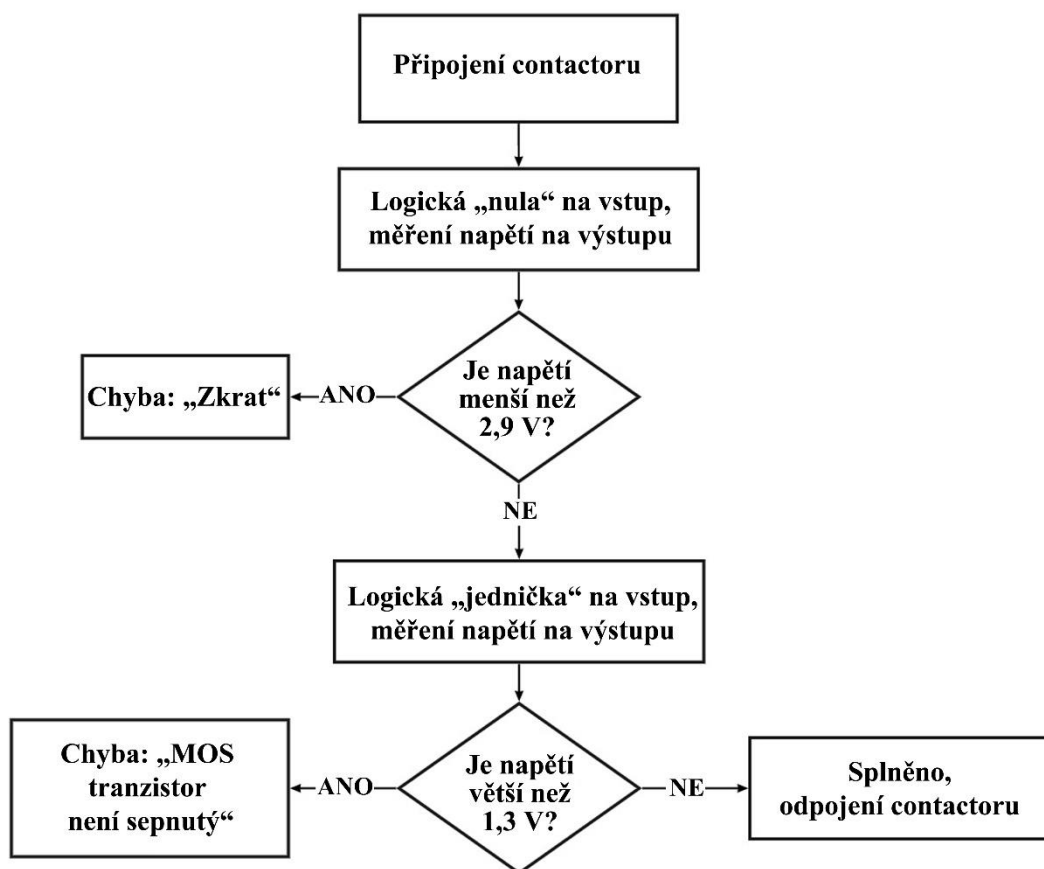
Jednotlivé GPIO piny kontroléru jsou připojeny na rezistorové děliče. Na začátku testu dojde v kontroléru k vyhodnocení chybových stavů. V případě, že jsou některé nalezeny, dojde k ukončení testu s výpisem dané chyby. Pak dojde k nastavení GPIO pinů na „floating“, přečtou se hodnoty napětí na jednotlivých pinech a dojde k jejich porovnání s minimální a maximální prahovou hodnotou napětí, která se liší pro každý pin. Poté dojde k připojení „pull-down“ rezistoru a zkontroluje se, jestli je měřená hodnota napětí menší než hodnota „floating“. Rozdílová hodnota musí být větší než určitá definovaná hodnota, která se opět liší pro každý pin. Následně dojde k připojení „pull-up“ rezistoru a zkontroluje se, jestli je měřená hodnota napětí větší než hodnota „floating“. Rozdílová hodnota musí být větší než určitá definovaná hodnota, která se taktéž liší pro každý pin. V případě, že jsou všechny podmínky splněny, dojde k úspěšnému splnění testu viz obr. 3.3.



Obr. 3.3: Blokové schéma testování vstupně výstupních pinů

3.1.4 Výstup kontroléru (CONTACTOR)

Contactor představuje výkonový MOS tranzistor. Testovací skript pošle příkaz do kontroléru, aby došlo k připojení contactoru. Následně se contactor nastaví logická nula a dojde ke změření napětí na výstupu. Pokud je napětí na výstupu contactoru menší než 2,9 V, vypíše se chybová hláška, že je MOS tranzistor ve zkratu. Poté se případ opakuje, ale tentokrát se contactor nastaví do logické jedničky a opět se změří napětí na výstupu. Pokud je napětí na výstupu contactoru větší než 1,3, vypíše se chybová hláška, že MOS tranzistor není sepnutý. Následuje vypnutí a odpojení contactoru viz obr. 3.4.



Obr. 3.4: Blokové schéma testování výstupu kontroléru

3.1.5 Zapínací obvod

Kontrolér se zapne, když dojde ke spojení pinů KEY a POWER, které jsou vyvedeny na výstupní konektor. K vypínání dochází pomocí interního signálu, který naopak není vyveden na konektor. Zapínací obvod je typu flip-flop, kdy zapínání a vypínání funguje na principu krátkých impulzů. Samotné testování probíhá pomocí VT Boxu, který pošle do kontroléru signály, které jej vypnou a následně znovu zapnou.

3.1.6 Selftest

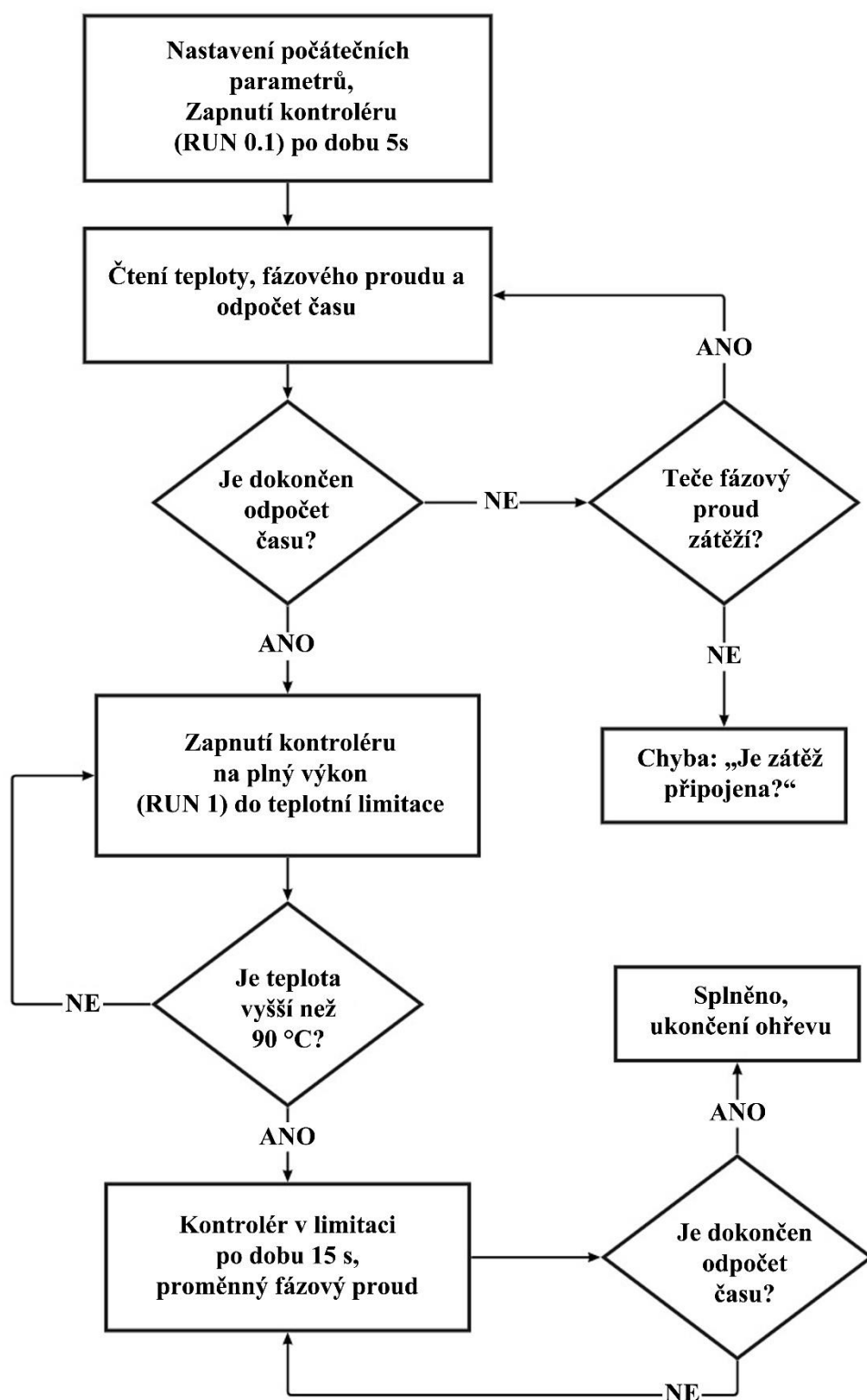
Selftest patří mezi testy, které si dělá kontrolér sám sobě, a pokud se vyskytují tak vypíše chybové stavy. Je ověřováno, zda není průraz na výstupních fetech, dále se kontroluje obvod pro měření proudu, komunikace mezi „master a slave“ mikrokontrolerem, zkratky na pinech MCU a další.

3.1.7 Test GND

Dojde k ověření, zda je správně připojena zem na konektoru ampseal. Propojení je řešeno v rámci kontroléru interní pájenou propojkou na DPS.

3.1.8 Heat-up

Heat-up patří mezi výkonové testy. Dojde k otevření NMOS tranzistorů, které jsou spínány pomocí PWM o frekvenci 20kHz. Výstupní frekvence udává rychlost změny napětí na zátěži, která je dána parametrem omega v kontroléru. Defaultní hodnota je 50 Hz, kvůli designu třífázových tlumivek, kterými se kontroléry běžně testují. Po celou dobu testu dochází ke spínání výstupních NMOS tranzistorů, kterými prochází maximální nastavený proud, jež ohřívá kontrolér. Tento děj se vykonává až do teplotní limitace, která je 90 °C. Při tomto testu je parametr PREST (Parameter estimator – odhad polohy rotoru) nastavený na hodnotu 0 = asynchronní režim, dále může nabývat hodnot 1 = bezsenzorový režim a 2 = režim Hallových sond. Blokové schéma heat-up testování je na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Blokové schéma heat-up testu

3.2 Ovládání Peltierových článků

PWM modul se skládá z NMOS tranzistorů AOT290L a budiče TC1411 viz obr. 2.4. Driver je napájen napětím 12 V pomocí DC/DC měniče. Na zátěž bude připojeno napájecí napětí $U_{CC} = 60 \text{ V}$. Maximální proud zátěží je $I_D = 30 \text{ A}$. Odpor sepnutého kanálu $R_{DSON} = 3,5 \text{ m}\Omega$. Frekvence spínání je $f = 1 \text{ kHz}$. Maximální náboj hradla je $Q_g = 126 \text{ nC}$. Budič je schopen dodat maximální proud 1 A. Maximální dobu sepnutí lze vypočítat pomocí vzorce:

$$t_{ON} = \frac{Q_{gmax}}{I_g} = \frac{126n}{1} = 126 \text{ ns} \quad (4)$$

Pro frekvenci 1 kHz vychází perioda $T = 1 \text{ ms}$, z čehož plyne, že budič s proudem 1 A zajistí dostatečně rychlé spínání a rozpínání tranzistorů. Pro určení přepínacích ztrát, je ještě potřeba znát hodnotu nábojů $Q_{GS} = 31 \text{ nC}$ a $Q_{GD} = 33 \text{ nC}$, určující dobu ztrátového výkonu při spínání, kterou lze vypočíst pomocí vzorce:

$$t_{PZ} = \frac{Q_{GS} + Q_{GD}}{I_g} = \frac{31n + 33n}{1} = 64 \text{ ns} \quad (5)$$

Celkové přepínací ztráty lze vypočítat pomocí vzorce:

$$P = P_C + P_{SW} = R_{DSON} * I_D^2 * S + U_{CC} * I_D * t_{PZ} * f, \quad (6)$$

kde P_C [W] jsou vodivostní ztráty, P_{SW} [W] jsou spínací ztráty, S [-] je střída, kdy nejvyšší ztrátový výkon je pro $S = 1$.

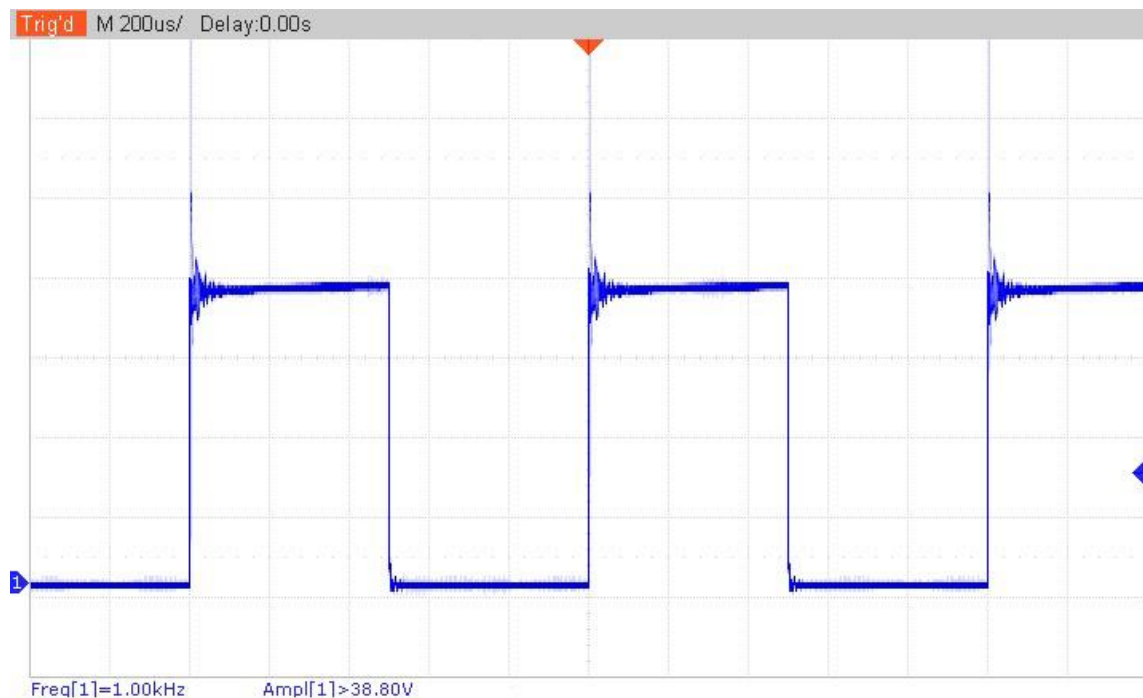
$$P = 3,5m * 30^2 * 1 + 60 * 30 * 64n * 1k = 3,27 \text{ W}$$

Při použití dvou NMOS tranzistorů připadá na jeden ztrátový výkon 1,64 W, což je hraniční hodnota pro uchazení, a proto bude potřeba přidat pasivní chladič. Pro tento účel byl vybrán chladič s tepelným odporem $R_{\theta SA} = 6,9 \text{ W/}^\circ\text{C}$, tepelný odpor přechodu čip-pouzdro $R_{\theta JC} = 0,25 \text{ W/}^\circ\text{C}$ a tepelný odpor přechodu pouzdro-chladič byl odhadnut na hodnotu $R_{\theta CS} = 0,5 \text{ W/}^\circ\text{C}$. Testování bude probíhat v chladnější místnosti, kde teplota okolí nepřesahuje $25 \text{ }^\circ\text{C}$, proto $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Ztrátový výkon jednoho tranzistoru je $P_{ZTR} = 1,64 \text{ W}$. Výslednou teplotu na čipu lze vypočíst pomocí vztahu:

$$T_j = T_A + P_{ZTR} * (R_{\theta SA} + R_{\theta CS} + R_{\theta JC}) = \quad (7)$$

$$= 25 + 1,64 * (6,9 + 0,5 + 0,25) \doteq 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Maximální udávaná teplota přechodu dle katalogového listu je $T_j = 175 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota určená výpočtem je $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$, což udává dostatečnou rezervu. Možný průběh PWM signálu se střídou 0,6 lze vidět na obr. 3.6. Ačkoli je přípravek PWM několikanásobně předdimenzován, je to u prototypu nutnost, aby se předešlo případným výkonovým poškozením jednotlivých částí. V případě výroby vyššího počtu kusů je vhodné volit pouze jeden tranzistor a přepočítat velikost chladiče.



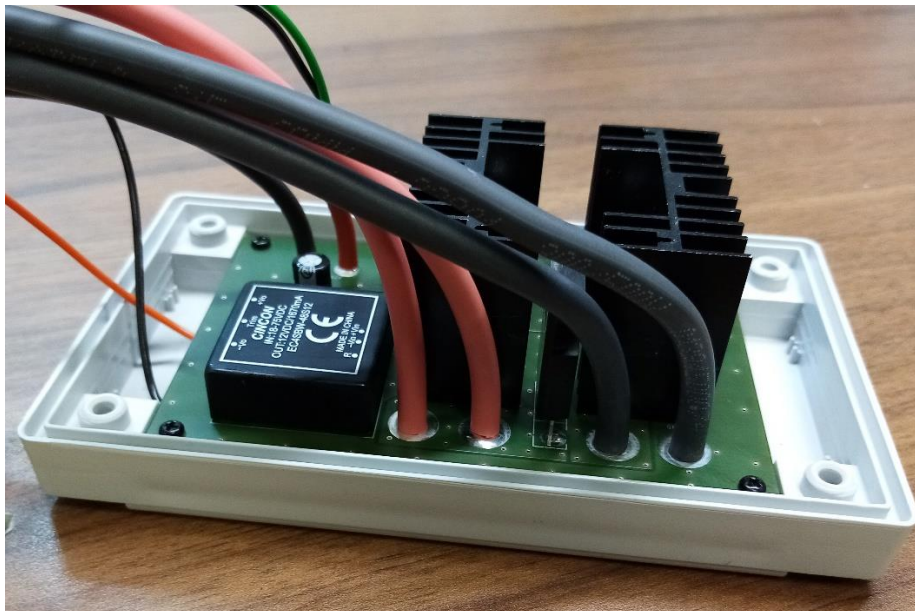
Obr. 3.6: Časový průběh PWM zachycený osciloskopem T3DSO1104, 10 V/div

3.3 Ovládání pumpy

Vzhledem k omezenému množství pinů u STM32 jsou Peltierovy články a pumpa ovládány pouze pomocí jednoho PWM pinu. Není žádoucí, aby byla pumpa závislá na PWM, protože musí jet na plný výkon po celou dobu. Z tohoto důvodu byl PWM signál filtrován a přetvořen na stejnosměrné napětí, které ovládá NPN tranzistor BC817, který slouží ke spínání PMOS tranzistoru BSP250, jež spíná pumpu. Vzhledem k tomu, že zde není kladen důraz na rychlost spínání, byly hodnoty rezistorů zvoleny vyšší, z důvodu nižší spotřeby a menší proudové zátěži součástek. Odpor kanálu v sepnutém stavu je $R_{\text{DS(on)}} = 0,4 \text{ } \Omega$, maximální proud zátěži $I_D = 0,4 \text{ A}$ a napětí zátěže je $U_{\text{DD}} = 12 \text{ V}$. Ztrátový výkon tranzistoru lze vypočítat dle vzorce:

$$P = R_{DS(on)} * I_D^2 = 0,4 * 0,4^2 = 64 \text{ mW} \quad (8)$$

Vzhledem k tak malému ztrátovému výkonu není potřeba uvažovat chlazení, ačkoli samotné pouzdro SOT223, je chlazeno drainovým vývodem připojeným k DPS. Celkové provedení DPS včetně umístění do krabičky lze vidět na obr. 3.7.



Obr. 3.7: Pohled na modul pro ovládání pumpy a PWM

3.4 Čtení teploty

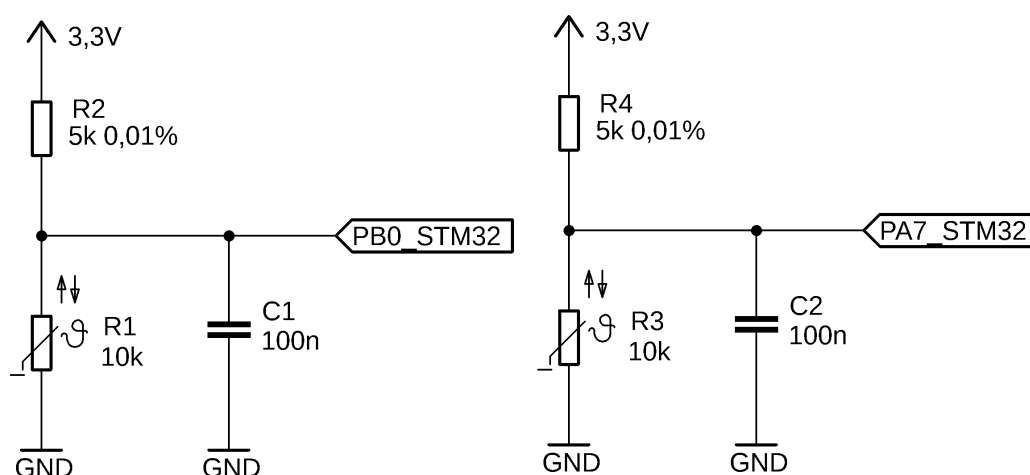
Čtení teploty bude probíhat pomocí dvou teplotních čidel. Vhodným teplotním senzorem s dobrou dostupností je čidlo NTC s hodnotou odporu $R_{25^\circ\text{C}} = 10 \text{ k}\Omega$, přesností 0,1 % a konstantou $\beta = 3950 \text{ K}$, které je umístěno ve válcovém kovovém pouzdře. Při použití malého množství teplovodivé pasty bude vhodné čidlo umístit do vyvrtané díry v hliníkové základně a chladiči viz obr. 3.9.

Zapojení vychází z odporového děliče, kde hodnota pull-up rezistoru byla zvolena na $5 \text{ k}\Omega$ s tolerancí 0,01 % viz obr. 3.8. Hodnota $5 \text{ k}\Omega$ vycházela nejlépe pro „jemné“ čtení teploty, kdy rozdíl mezi -15°C a -14°C je 11,3 mV a pro opačný extrém tedy 95°C a 96°C je taky 11,3 mV. Mikroprocesor STM32 disponuje ADC převodníkem s rozlišením 12 bit. Nejmenší možná čitelná hodnota převodníkem pro 3,3 V je 0,8 mV, a proto nebude problém určovat teplotu s přesností na desetiny stupňů celsia. VT Box si nejprve změří napětí NTC termistoru a dle vzorce (9) určí jeho hodnotu odporu. Samotnou teplotu čidla lze vypočítat upraveným vzorcem (10) pro určení hodnoty odporu NTC termistoru:

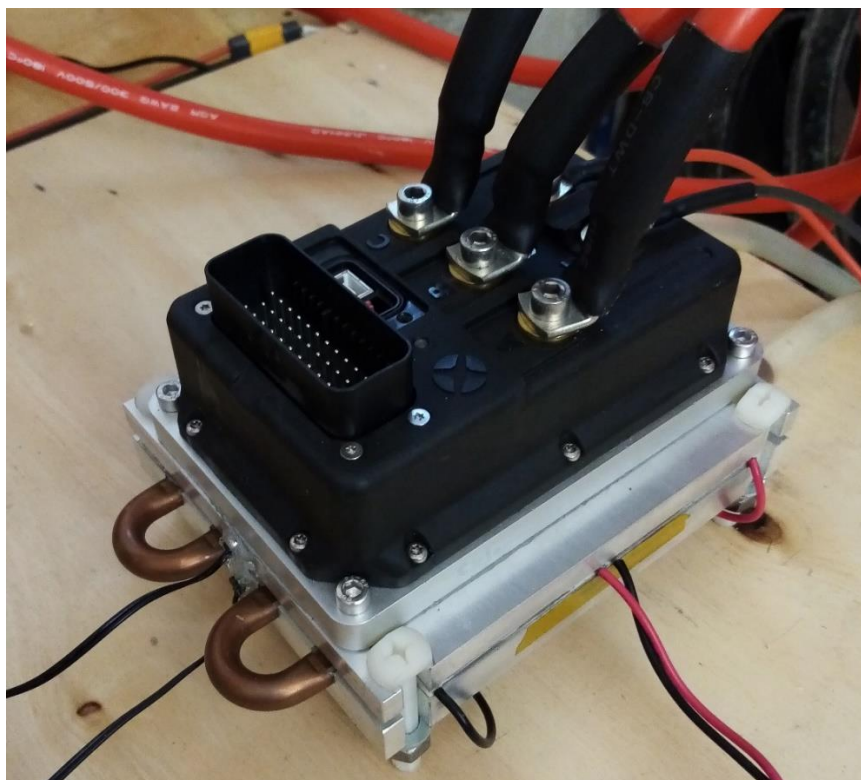
$$R_{NTC} = \frac{U_{R1} * R_2}{U_{IN} - U_{R1}}, \quad (9)$$

$$R_{NTC} = R_{25^{\circ}C} * e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \Rightarrow T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} * \ln\left(\frac{R_{NTC}}{R_{25^{\circ}C}}\right)}, \quad (10)$$

kde U_{R1} je napětí na termistoru, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, $U_{IN} = 3,3 \text{ V}$ a $R_{25^{\circ}C} = 10 \text{ k}\Omega$.

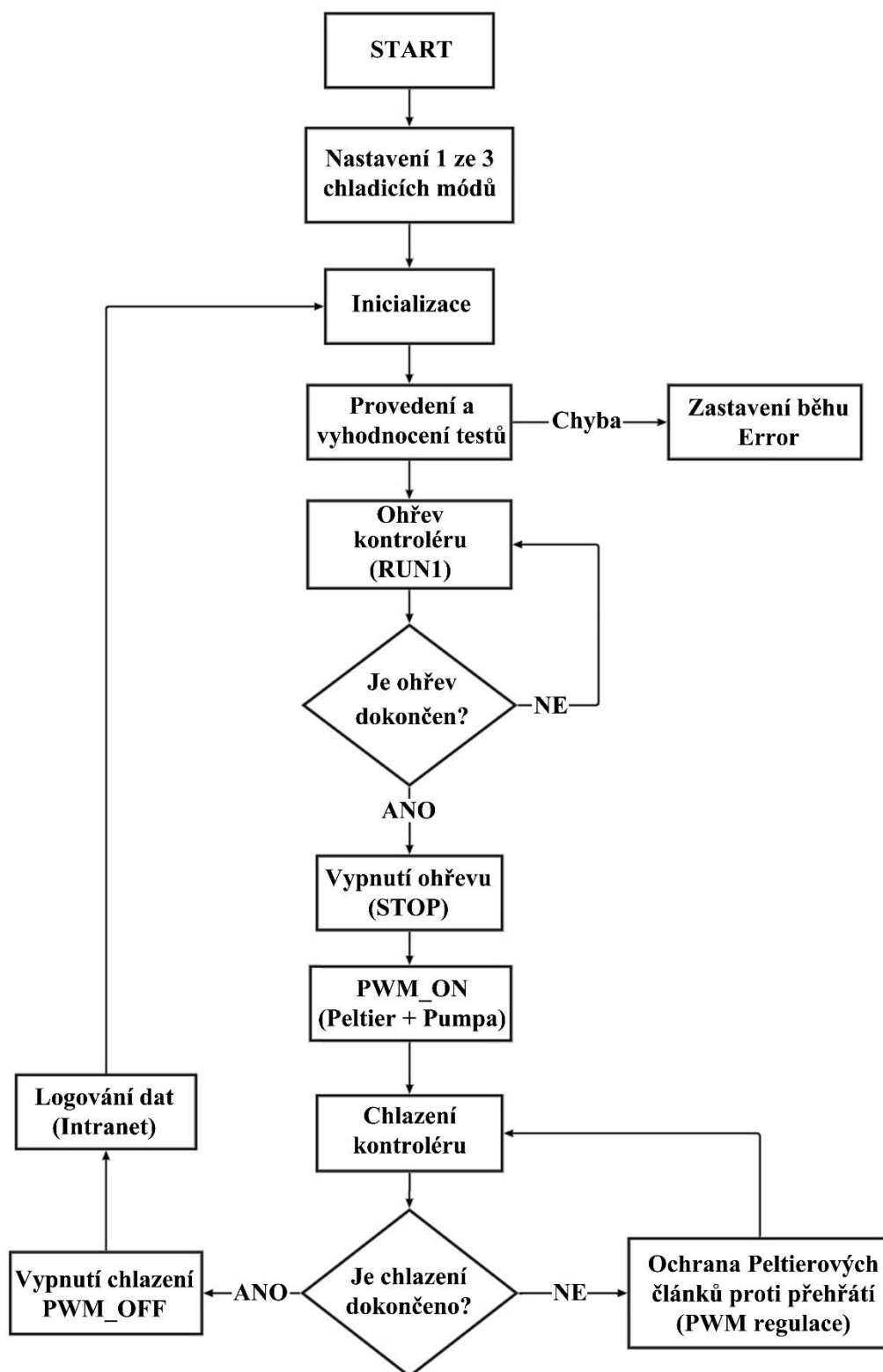


Obr. 3.8: Zapojení teplotních čidel



Obr. 3.9: Stand pro kontrolér včetně teplotních čidel a Peltierových článků

3.5 Řídicí algoritmus



Obr. 3.10: Blokové schéma řídicího algoritmu

O celkový chod systému se stará řídicí algoritmus, který běží v reálném čase na počítači a pomocí VT Boxu komunikuje s kontrolérem, kterému zadává jednotlivé příkazy pro zajištění optimální funkce. Na začátku testování dojde ke spojení počítače s VT Boxem a nastavení napájecího napětí pro daný kontrolér. Poté je provedena inicializace, kdy dojde k nahrání konfiguračního souboru do kontroléru, čímž dojde k ověření komunikace sběrnic USB a CAN. Následuje provedení jednotlivých testů a uložení výsledků do proměnných viz kapitola 3.1.

Ohřev kontroléru je součástí testu „heat-up“, kdy je běh kontroléru zapnut pomocí příkazu RUN 1. V tomto režimu dodává kontrolér do zátěže plný výkon dle nastavených parametrů. Jmenovitá hodnota proudu $i_{ref} = 550 \text{ A}$, špičková hodnota proudu $i_{peak} = 600 \text{ A}$. Limitní teplota je nastavena na $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Poté přejde kontrolér do limitace a hodnota proudu prudce poklesne. Jakmile limitace trvá déle než 15 sekund dojde k ukončení ohřevu a nastupuje fáze chlazení.

Chlazení nejprve spočívá v nastavení PWM na 30 % po dobu 10 sec, aby pumpa stihla načerpat chladicí kapalinu do chladiče. Toto řešení je nezbytné z důvodu omezeného počtu pinů u mikrokontroleru STM32 ve VT Boxu, kdy je ovládání pumpy a Peltierových článků řízeno pouze pomocí jednoho pinu. Následně se PWM zapne na 100 % a začíná samotný chladicí proces. Celkem je na výběr ze 3 režimů chlazení. První spočívá v nastavení pevného času, po který se bude kontrolér chladit, druhý režim otestuje každých X sekund rozdíl teplot chladné strany, pokud je menší než $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ chlazení se ukončí a třetí režim vychází ze zadání pevné teploty, do které bude chlazení provedeno. Všechny režimy jsou opatřeny ochranou, aby nedošlo např. k přehřívání Peltierových článků. Každé 2 sekundy je kontrolována teplota horké strany. Pokud teplota roste a zároveň je na chladiči více než $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dojde ke snížení hodnoty PWM o 10 %. Pokud teplota klesne pod $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ výkon se opět vrací na 100 %. Po nachlazení na požadovanou teplotu dojde k vypnutí PWM i pumpy.

V závěru samotného cyklu dojde k odeslání dat do databáze. Celý cyklus je zobrazen na obr. 3.10.

3.6 Chlazení chladicí kapaliny

V návrhu byly zvažovány dva způsoby chlazení chladicí kapaliny. Lepších výsledků bylo dosaženo druhým způsobem, v němž se použijí dvě čerpadla, kdy se jedno stará o chlazení Peltierových článků a druhé vhání chladicí kapalinu do chladicího bloku, který je umístěný v rouře s vodou. První způsob měl velkou nevýhodu v malém průtoku přes chladicí radiátor, kde jsou tenké dutiny, které velkou mírou omezují průtok chladicí kapaliny. Další nevýhoda spočívá v postupném ohřívání celé místnosti, což má za následek zvýšení minimálních teplot celého systému. Naopak druhé řešení bylo výhodnější, neboť se díky větším chladicím blokům zvýšil průtok a vzhledem k tomu, že do roury neustále přitéká poměrně studená voda s teplotou okolo $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, která se každou hodinu odčerpává čerpadlem pryč, nehrozí tak takovému systému zvýšení teploty

a následné přehřátí. Samotné čerpadlo je umístěno 30 cm nad dnem roury a spínací plovák je upevněn o 40 cm výše, díky tomu je teplá voda, která stoupá do horních vrstev odčerpána nejdříve a chlazení tak probíhá pomocí přítoku studené vody.

3.7 Zátěž pro BLDC kontrolér

Jako nedostupnější a nejlepší varianta, která plně postačí pro otestování kontroléru byla nakonec zvolena vlastní varianta zátěže, která bude zhotovena pomocí měděného drátu s průměr 8 mm, ze kterého se navinou 3 cívky o několika závitěch a zapojí se do hvězdy. Pro správnou funkci kontroléru je zapotřebí, aby jedno vinutí motoru, respektive jedno vinutí cívky mělo indukčnost větší než 15 μH . Indukčnost vzduchové cívky lze vypočítat pomocí vzorce [44]:

$$L_{loop} = N^2 \mu_0 \mu_r \left(\frac{D}{2} \right) * \left[\ln \left(\frac{8D}{d} \right) - 2 \right], \quad (11)$$

$$\begin{aligned} L_{loop} &= 7^2 * 1,26 * 10^{-6} * 1 * \left(\frac{0,2}{2} \right) * \left[\ln \left(\frac{8 * 0,2}{0,008} \right) - 2 \right] \\ &= 20,3 \mu\text{H} \end{aligned}$$

kde N je počet závitů, D je průměr cívky, μ_0 je permeabilita vakua, μ_r je relativní permeabilita a d je průměr drátu.

Po číselném vyjádření vychází hodnota indukčnosti cívky na 20,3 μH , což je dostatečná hodnota, se kterou dokáže kontrolér pracovat. Reálně lze hodnotu indukčnosti cívky změřit kontrolérem pomocí příkazu „identlin“, který provede měření indukčnosti a vnitřního odporu jednotlivých fází motoru, v tomto případě cívek. Měření indukčnosti jednotlivých cívek provedené kontrolérem vycházejí maximálně o 24,5 % více než je předpokládaná teoretická hodnota, nicméně je nutné vzít v úvahu nepřesnost navinuté cívky, obzvláště její průměr, neboť se jedná pouze o prototyp a skutečná indukčnost bude, kterou naměřil kontrolér viz obr. 3.11. Měření probíhá ve dvou krocích, kdy se zkoumá, jestli dojde k přesycení materiálů jádra, nicméně zde tato skutečnost nehrozí, neboť se jedná o vzduchovou cívku, a proto jsou hodnoty „biased“ a „unbiased“ velmi podobné.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - term
SL - serpent#>indentlin
running motor linear identification
IDENT: PHASE A 5.65993 milliOhm
IDENT:   biased D 23.3906 microHenry
IDENT:   unbiased D 23.3609 microHenry
IDENT: PHASE B 5.59217 milliOhm
IDENT:   biased D 24.9983 microHenry
IDENT:   unbiased D 25.0519 microHenry
IDENT: PHASE C 5.92880 milliOhm
IDENT:   biased D 24.6727 microHenry
IDENT:   unbiased D 25.2839 microHenry
```

Obr. 3.11: Výsledek měření pomocí příkazu „indentlin“

Pro úsporu místa je výhodné cívky rozmístit jako na obr. 3.12. V cívkách dochází k vytváření točivého magnetického pole, kde jsou vektory magnetických toků na sebe kolmé a lze předpokládat, že nebude docházet k indukci v ostatních cívkách, neboť se zapojení podobá reálnému motoru.



Obr. 3.12: Zátěž kontroléru složená ze tří cívek

3.8 Nastavení chladicího systému

Na začátku samotného testování bylo nutné nastavit vhodný teplotní gradient pro chlazení Peltierovými články. K tomuto účelu posloužil druhý chladicí režim, který má definovanou změnu teploty o 1 °C za určitý čas, s jímž bylo laborováno pro nalezení vhodného poměru minimální teplota / čas viz tabulka 3. Teplota destilované vody v zásobníku byla před každým testem 20 °C.

Z tabulky plyne, že nejlépe vychází změna teploty o 1 °C každých 30 sekund, kdy lze dosáhnout záporných teplot pod -4 °C. Na konci 12. cyklu měla destilovaná voda poměrně stabilní teplotu okolo 25 °C.

V případě, kdy dojde ke změně po 45 sekundách, připadá prodloužení času o 75 sekund, ale teplota začíná s přibývajícím cykly stoupat rychleji než v předchozím případě, jelikož je voda v nádrži déle zahřívána. Na konci 12. cyklu měla destilovaná voda teplotu okolo 29 °C a s největší pravděpodobností by se ještě o několik stupňů zvedla.

V posledním případě, kdy dojde ke změně po 60 sekundách vychází celková doba chlazení až na 8 minut. Zde je voda ohřívána nejdéle, což se ve výsledku projeví nejvyššími hodnotami teplot ze všech případů. Na konci 12. cyklu měla destilovaná voda teplotu okolo 33 °C a s největší pravděpodobností by se ještě o několik stupňů zvedla.

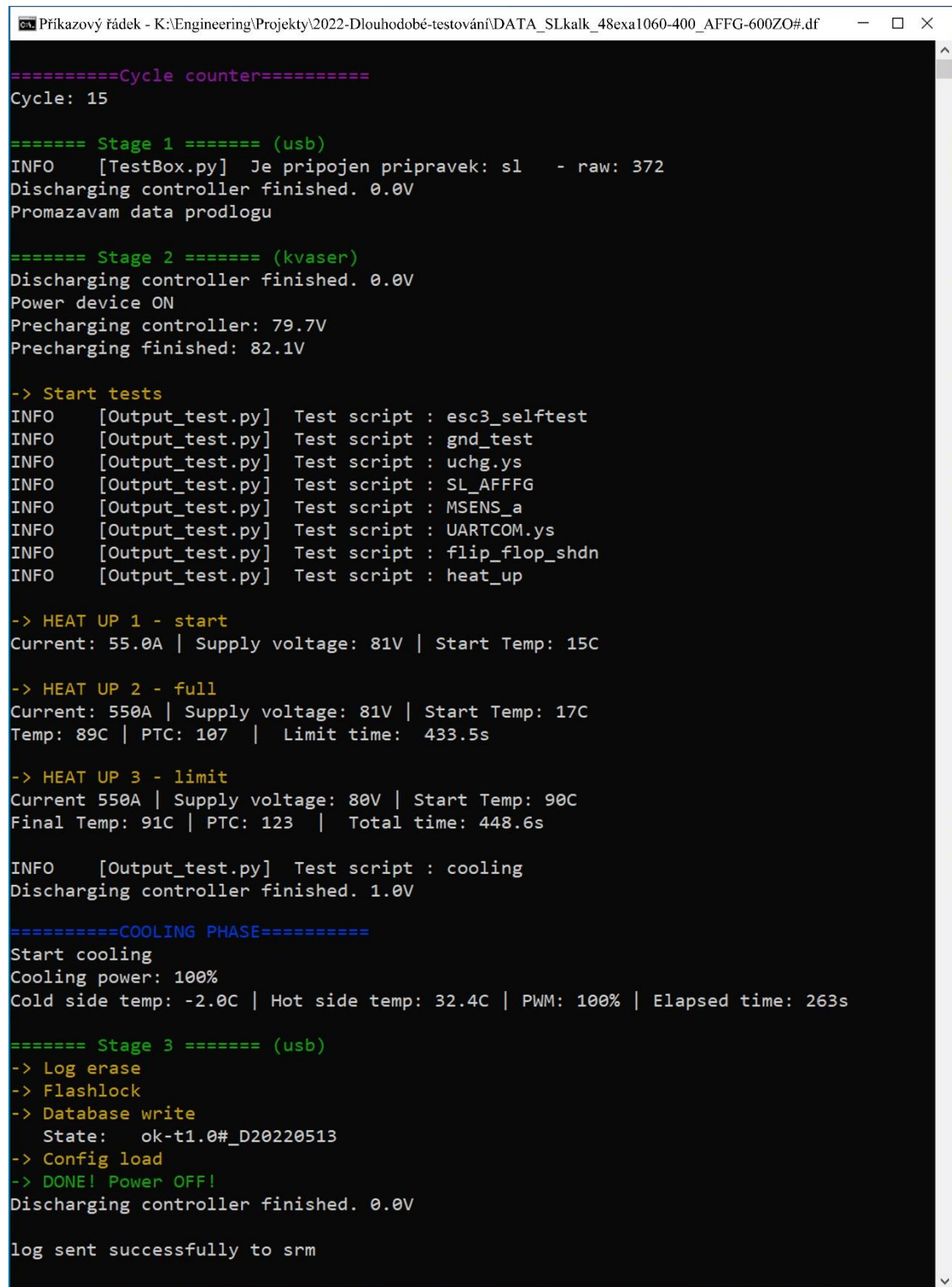
Ačkoli z pohledu teplot nejsou rozdíly velké, lze vidět, že ne vždy jsou delší časy chlazení účinnější, obzvláště v tomto případě. Chlazení po delší dobu by mělo smysl pouze v případě důmyslnějšího chlazení chladicí kapaliny.

Pro dlouhodobé testování byl zvolen třetí režim, kdy je zadána pevná teplota, na kterou se kontrolér nachladí. Jako kompromis mezi dobou trvání a minimální teplotou byla zvolena teplota chlazení na -2 °C, která je dosažena po době 260 ± 10 sekund, čímž dojde ke zkrácení jednoho cyklu.

Tabulka 3: Naměřené minimální teploty a časy pro různou dobu změny teploty o 1 °C

$\Delta T = 1\text{ °C}$ za Δt [s]	$\Delta t = 30$		$\Delta t = 45$		$\Delta t = 60$	
	min teplota [°C]	doba chlazení [s]	min teplota [°C]	doba chlazení [s]	min teplota [°C]	doba chlazení [s]
cyklus 1	-5,5	360	-6,4	405	-8,2	480
cyklus 2	-5,5	360	-6,4	405	-8,1	480
cyklus 3	-5,4	360	-6,0	405	-7,8	480
cyklus 4	-5,3	360	-5,5	405	-7,3	480
cyklus 5	-5,2	360	-5,1	405	-6,7	480
cyklus 5	-5,2	360	-4,8	405	-6,0	480
cyklus 7	-4,8	330	-4,7	405	-5,4	480
cyklus 8	-4,6	330	-4,4	405	-4,7	480
cyklus 9	-4,5	330	-4,2	405	-4,1	480
cyklus 10	-4,5	330	-4,0	405	-3,4	480
cyklus 11	-4,5	330	-3,7	405	-3,0	480
cyklus 12	-4,5	330	-3,7	405	-2,5	480

3.9 Ověření funkce



```
=====Cycle counter=====
Cycle: 15

===== Stage 1 ===== (usb)
INFO [TestBox.py] Je pripojen pripravek: sl - raw: 372
Discharging controller finished. 0.0V
Promazavam data prodlogu

===== Stage 2 ===== (kvaser)
Discharging controller finished. 0.0V
Power device ON
Precharging controller: 79.7V
Precharging finished: 82.1V

-> Start tests
INFO [Output_test.py] Test script : esc3_selftest
INFO [Output_test.py] Test script : gnd_test
INFO [Output_test.py] Test script : uchg.ys
INFO [Output_test.py] Test script : SL_AFFFG
INFO [Output_test.py] Test script : MSENS_a
INFO [Output_test.py] Test script : UARTCOM.ys
INFO [Output_test.py] Test script : flip_flop_shdn
INFO [Output_test.py] Test script : heat_up

-> HEAT UP 1 - start
Current: 55.0A | Supply voltage: 81V | Start Temp: 15C

-> HEAT UP 2 - full
Current: 550A | Supply voltage: 81V | Start Temp: 17C
Temp: 89C | PTC: 107 | Limit time: 433.5s

-> HEAT UP 3 - limit
Current 550A | Supply voltage: 80V | Start Temp: 90C
Final Temp: 91C | PTC: 123 | Total time: 448.6s

INFO [Output_test.py] Test script : cooling
Discharging controller finished. 1.0V

=====COOLING PHASE=====
Start cooling
Cooling power: 100%
Cold side temp: -2.0C | Hot side temp: 32.4C | PWM: 100% | Elapsed time: 263s

===== Stage 3 ===== (usb)
-> Log erase
-> Flashlock
-> Database write
State: ok-t1.0#_D20220513
-> Config load
-> DONE! Power OFF!
Discharging controller finished. 0.0V

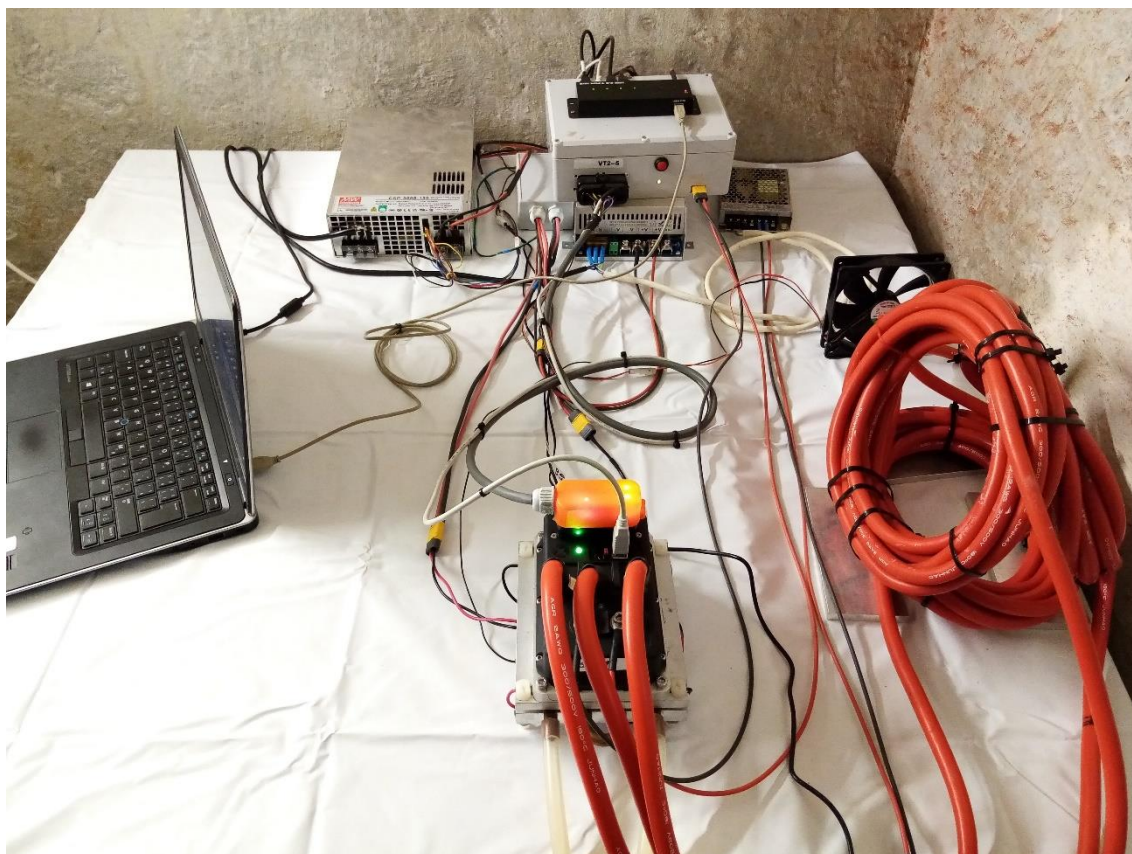
log sent successfully to srm
```

Obr. 3.13: Výstup jednoho cyklu dlouhodobého testování

Dlouhodobé testování, se spouští pomocí „datafilu“, který je vygenerován při zrodu kontroléru. V tomto souboru jsou nadefinovány nejružnější parametry jako je typ,

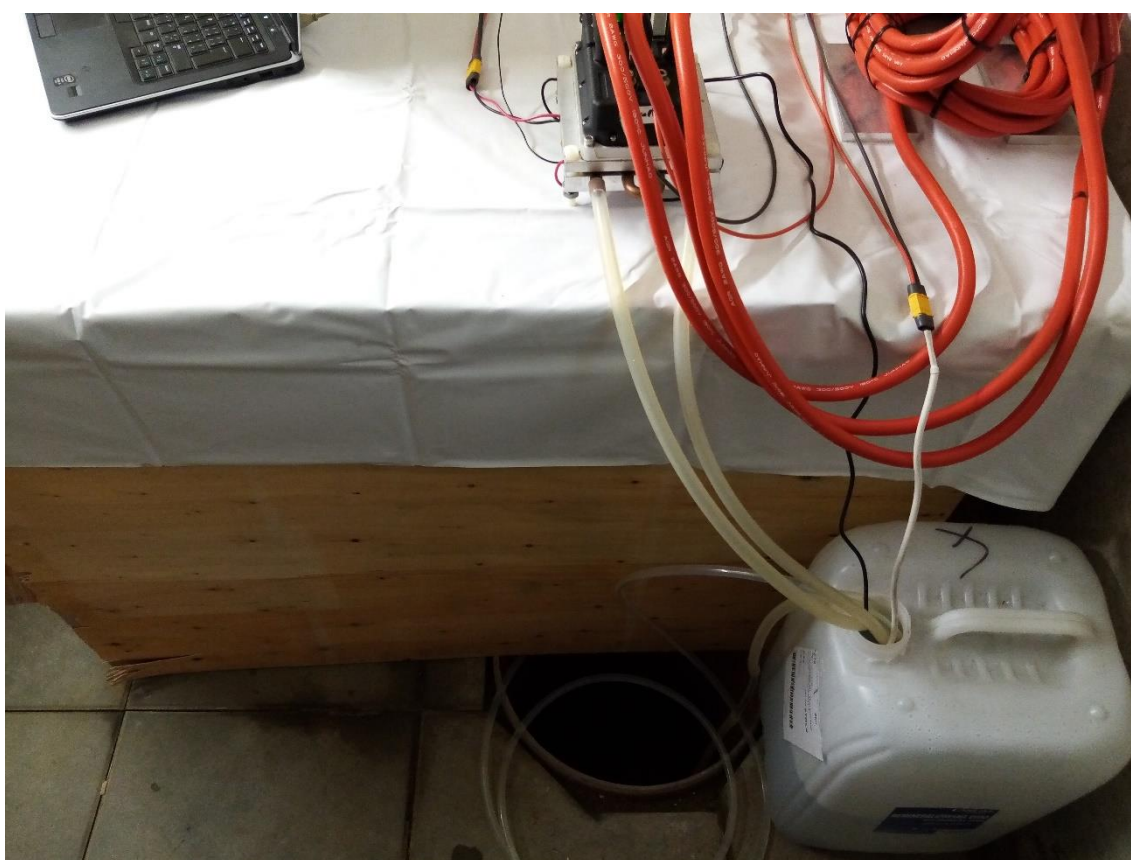
osazovací varianta, firmware, maximální napětí atd. Klíčový je zde definovaný parametr „auto_repeat = True“, který udává, zda bude daný kontrolér použit pro dlouhodobé testování či nikoli.

Obr. 3.13 reprezentuje výstup řídicího programu, který běží na počítači a ovládá celý systém. Na začátku řídicího programu je počítadlo cyklů, následují „stage 1 a stage 2“, kde dojde k inicializaci sběrnic USB a CAN. Poté po sobě následují samotné nevýkonové testy a po nich se přechází na výkonový test „heat-up“. Nejprve dojde ke spuštění kontroléru na 10 % nastaveného výkonu, aby se ověřilo, že je vše funkční a poté dochází ke spuštění 100 % výkonu a zahřívání kontroléru až do horní teplotní limitace, která je 90 °C. Po jejím dosažení zde 15 sekund setrvá, čímž dochází k ověření funkčnosti samotné limitace zhotovené pomocí PTC čidel umístěných mezi výkonovými NMOS tranzistory na kontroléru. Po skončení „heat-up“ následuje fáze chlazení dle nastaveného režimu, kdy je celý kontrolér včetně komunikace vybit, respektive vypnut, aby nebyl ohříván jeho vlastním příkonem. O čtení teplot se stará VT Box, v němž jsou čidla připojena k procesoru STM32. Po skončení chladicí fáze nastává „stage 3“ v níž dochází k uzamčení kontroléru, zapsání do databáze, načtení konfigurace a odeslání nasbíraných dat během jednoho cyklu do firemní databáze Intranet.



Obr. 3.14: Pracoviště dlouhodobého testování

Obr. 3.14 zobrazuje samotné pracoviště dlouhodobého testování, které je umístěno ve sklepení, kde jsou vhodnější atmosférické podmínky pro testování v podobě zvýšené vlhkosti a nízké teploty okolo 10 °C. Vzhledem k velkému ohřívání zátěže procházejícím proudem až na teplotu 120 °C bylo nutno přidat ventilátor a hliníkové podložky. Při těchto úpravách se teplota snížila na stabilních 100 °C, která je bezproblémová, protože kabely jsou potaženy silikonovou bužírkou s tepelnou odolností až do 180 °C. Pro lepší tepelnou izolaci je vhodnější mít testovací cívku umístěnou dále od kontroléru. Ještě lepších výsledků by mohlo být dosaženo, pokud by se kontrolér otočil spodní stranou nahoru, kvůli přirozené konvekci tepla směrem do stropu. Ačkoli by toto řešení mohlo pomoci k dosažení ještě nižších chladicích teplot, není tento návrh v tomto případě možný.



Obr. 3.15: Pracoviště dlouhodobého testování – chlazení chladicí kapaliny

Obr. 3.15 znázorňuje funkci chlazení chladicí kapaliny pomocí roury do níž proudí studená podzemní voda s teplotou okolo 10 °C. Nádrž tvoří 25 l kanystr, který je z poloviny naplněn destilovanou vodou. Uvnitř kanystru jsou dvě čerpadla, kde výkonnější pohání okruh „kanystr – roura“, neboť je potřeba vodu vytlačit z kanystru do chladicích bloků a následně zpět do výšky 1,2 m. Slabší čerpadlo pohání okruh „kanystr – kontrolér“, kde nejsou takové výškové rozdíly a průtok 240 l/hod pro daný chladicí režim plně dostačuje k chlazení Peltierových článků.

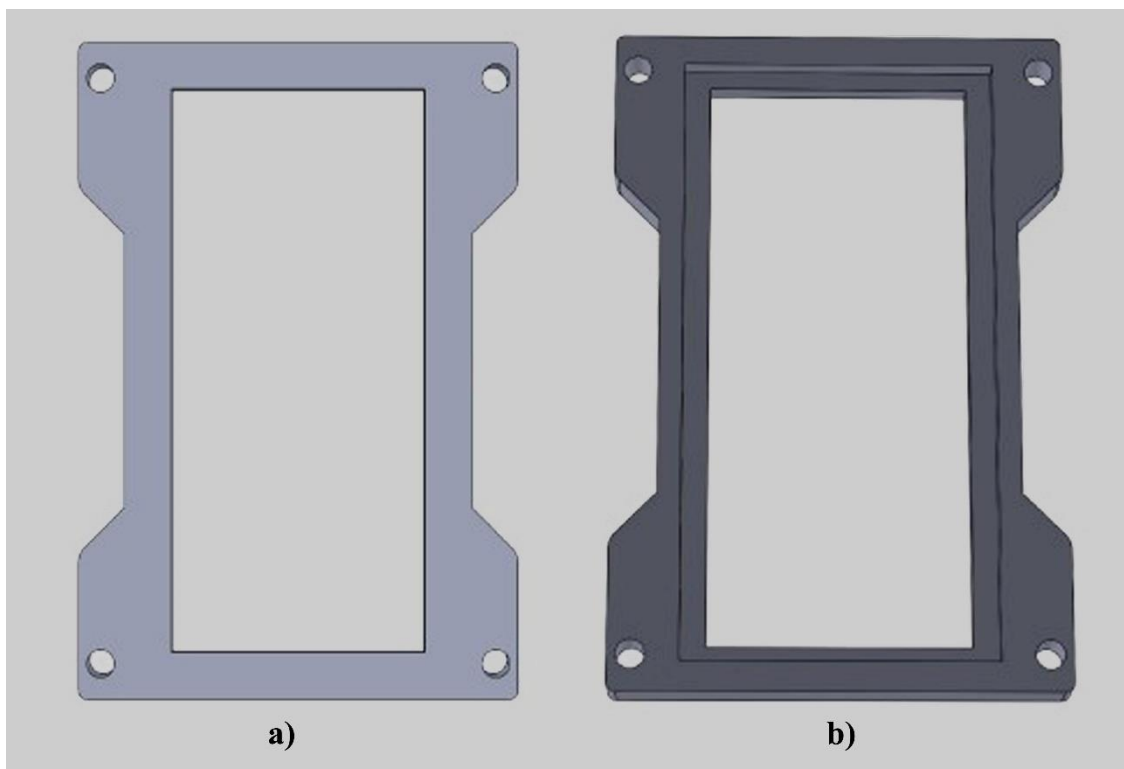
3.10 Univerzálnost testování

Od počátku realizace byla zamýšlena univerzálnost dlouhodobého testovacího zařízení, které by mělo být kompatibilní se všemi kontroléry, s jimiž firma siliXcon pracuje. Jedná se o varianty SL, SX, SC a AM. Jednotlivé varianty se od sebe odlišují počtem vstupů/výstupů a mají také odlišné jak mechanické, tak i elektrické parametry viz tabulka 4.

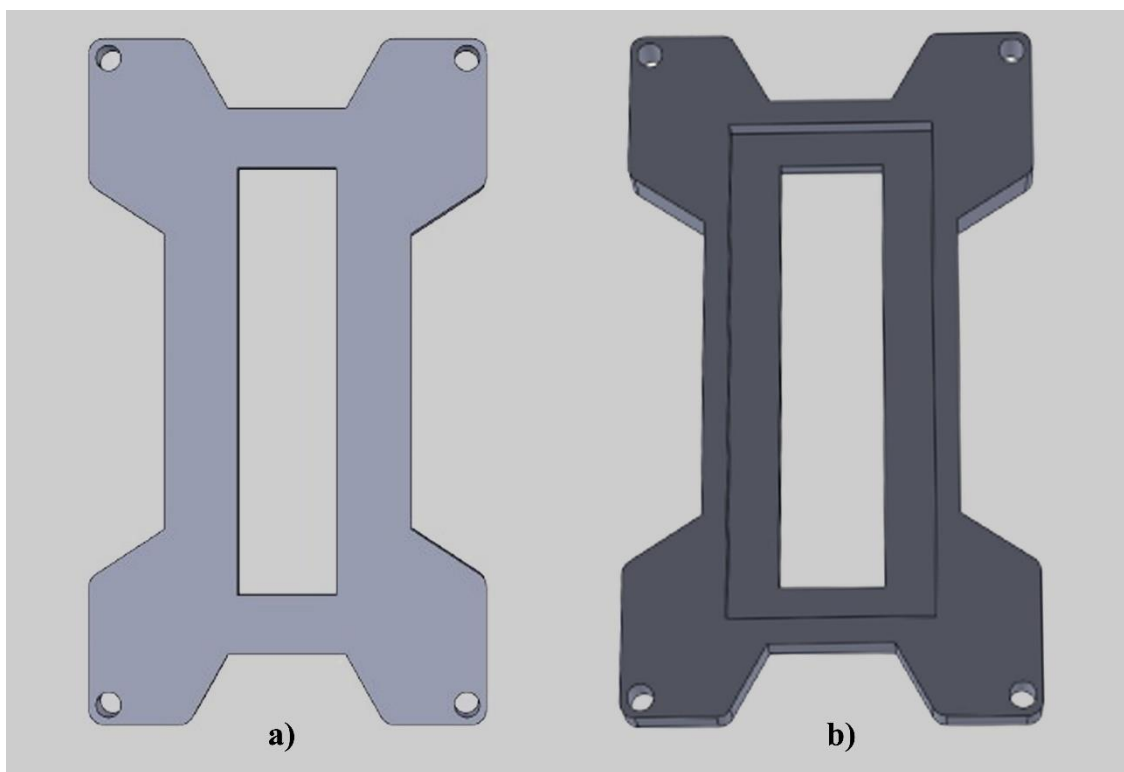
Tabulka 4: Parametry jednotlivých variant kontrolérů, převzato z [45].

Variant	SL	SX	SC	AM
Rozměr (Š x V x H) [mm]	148 x 64 x 96	139.3 x 80.6 x 47	131 x 35 x 66	101 x 13 x 35
Hmotnost [g]	1200	700	570	130
Maximální ztrátový výkon [W]	300	190	120	20
Limitující teplota [°C]	90	90	90	90
Jmenovitý výkon pro maximální vstupní napětí [W]	24500	17900	12600	2400

Tabulka 4 je uspořádána od nejvýkonnějšího kontroléru SL až po nejméně výkonný kontrolér AM, vybrané parametry jsou nejdůležitější vzhledem k realizaci testovacího zařízení. Maximální ztrátový výkon reprezentuje hodnotu, která ohřívá chladič. Ačkoli se realizace dlouhodobého testovacího zařízení v diplomové práci zabývá ověřením funkčnosti pouze u kontroléru SL, není důvod, aby zařízení nefungovalo na ostatní kontroléry nebo mělo dokonce horší výsledky. Ve všech ostatních případech bude naopak dlouhodobé testování fungovat lépe, protože bude potřeba ochladit podstatně menší masu chladiče kontroléru, který tak pojme menší množství tepla. Co se zátěže týče, zde bude docházet k menšímu zahřívání jednotlivých cívek, protože zbylé verze kontrolérů mají podstatně menší jmenovitý fázový proud. Zároveň byly do hliníkové základny vyvrtány díry se závity pro rozměry kontrolérů SL a SX, kde šrouby nemohou i při projití materiálem proniknout do Peltierových článků. Aby nebyla celá hliníková základna provrtána množstvím děr, byly pro zbylé 2 verze kontrolérů, vymodelovány úchytky pomocí programu SolidWorks, které můžou být přišroubovány do již vytvořených děr. Díky dnešním 3D tiskárnám není zhotovení jednoduchých modelů žádným problémem.



Obr. 3.16: Model úchytky pro kontrolér SC – a) horní strana, b) dolní strana



Obr. 3.17: Model úchytky pro kontrolér AM – a) horní strana, b) dolní strana

4. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat prototyp dlouhodobého testovacího zařízení BLDC kontrolérů pro firmu siliXcon. V práci je popsán princip ohřevu i chlazení kontroléru. Zařízení umožňuje ovládat chladicí blok o příkonu 1400 W. Kontrolér je zatěžován v teplotním rozsahu od -2 °C až do +90 °C.

V první kapitole diplomové práce se nachází teoretický úvod rozebírající jednotlivé typy elektromotorů, se kterými se lze v praxi setkat. Vzhledem k tomu, že je cílem práce navrhnout a realizovat testovací zařízení pro kontrolér BLDC motorů, je zde věnována pozornost právě problematice bezkartáčových motorů, z jakých částí se skládají, s jakými typy se lze setkat, způsoby snímání polohy rotoru, popis a srovnání řídicích algoritmů atd. V samotném závěru kapitoly je popsán Seebeckův a Peltierův jev, což jsou termoelektrické jevy, probíhající v Peltierových článcích, s jimiž se také pracuje v samotném návrhu zařízení a které budou použity pro chlazení kontroléru, který přejde vlivem průchozího proudu po určité době do teplotní limitace a bude nezbytně jej ochladit.

Druhá kapitola se zabývá návrhem univerzálního zařízení pro dlouhodobé testování, které bude schopné ověřit funkčnost celkem 4 druhy BLDC kontrolérů, s jimiž se pracuje. Pomocí blokového schématu je zde popsána funkce celého systému. Jednotlivé kapitoly se zabývají, popisem a funkčním principem několika částí obsažených v blokovém schématu, samotnou konstrukcí, která zobrazuje umístění a rozložení jednotlivých součástí, testovacím cyklem a výpisem jednotlivých komponentů, včetně výrobního označení, jež budou použity při sestavení systému.

Třetí kapitola se zabývá samotnou realizací testovacího zařízení. Nejprve jsou definovány a popsány jednotlivé testy, jimiž je kontrolér testován. Mezi nevýkonové testy se řadí testování komunikace po sběrnících USB, CAN a UART. Následuje ověření vstupů motorových senzorů, kontrola vstupně výstupních pinů GPIO, výstup kontroléru – CONTACTOR, zapínací obvod a selftest. Po nevýkonových testech přichází na řadu výkonový test heat-up. Při němž je kontrolér zahříván procházejícím proudem až do teplotní limitace, která je 90 °C.

Dále je popsána realizace PWM modulu. V základu se jedná o spojení dvou výkonových NMOS tranzistorů ovládaných pomocí budiče. Celý návrh PWM modulu je proveden s ohledem na značné předimenzování součástek, neboť jde o prototyp a je vhodné, aby z důvodu různých modifikací zvládal uřídit nadměrnou zátěž. Obdobný koncept se nachází i u ovládání pumpy, která je spínána pomocí PMOS tranzistoru. Zde bylo nutné vyřešit problém s nedostatečným počtem pinů u mikrokontroleru STM32. Ačkoli má ovládání pumpy i PWM modulu stejný pin, není ovládání pumpy pomocí PWM signálu žádoucí, protože pumpa musí jet na plný výkon po celou dobu, aby stíhala uchlazení teplou stranu Peltierových článků. Z tohoto důvodu byl PWM signál vyfiltrován

pomocí RC článku a tím přetvořen na konstantní stejnosměrné napětí, které spíná tranzistor. PWM modul i ovládání pumpy má společnou DPS.

V diplomové práci se také pracuje s teplotami, proto bylo nezbytné vybrat vhodná teplotní čidla. Nejlepší variantou se jevílo využití čidel NTC s hodnotou odporu 10 k Ω při 25 °C s přesností 0,1 %. Vycházejí z velmi jednoduchého zapojení, kdy stačí přidat přesný pull-up rezistor, který byl zvolen na hodnotu 5 k Ω s tolerancí 0,01 %. Při této hodnotě odporu je možné číst teploty v obou extrémech, tedy 90 °C i -2 °C s přesností na desetiny stupně Celsia. Čidla byla natřena teplovodivou pastou a umístěna do vyvrtaných děr na chladiči a hliníkové základně.

Vytvořený systém by se neobešel bez ovládání. K tomu slouží řídicí algoritmus, který běží v reálném čase na počítači a komunikuje s kontrolérem, jemuž zadává příkazy prostřednictvím VT Boxu. Skládá se z jednotlivých testů, doplňkových algoritmů a chladicího režimu. V rámci diplomové práce byly vytvořeny tři chladicí algoritmy. První spočívá v nastavení pevného času, po který se bude kontrolér chladit. Druhý režim využívá změny teploty o 1 °C za nastavenou dobu, která nejlépe vycházela 30 sekund. Poslední režim vychází ze zadání pevné teploty, do níž se kontrolér chladí. Všechny režimy jsou opatřeny algoritmem, který hlídá teplotu Peltierových článků. V případě, že je teplota vyšší než 45 °C a stále roste, dojde ke snížení výkonu o 10 % každé 2 sekundy. Před začátkem chladicí fáze, jede PWM pouze na 30 % po dobu 10 sekund, aby pumpa stihla načerpat vodu do chladiče, než pojede PWM na plný výkon.

Pro chlazení chladicí kapaliny, byla zvolena alternativní metoda, která spočívá ve využití studené podzemní vody s teplotou okolo 10 °C, která proudí do roury, z níž je následně odčerpána do kanalizace. V rouře jsou umístěny hliníkové bloky, jimiž proudí ohřátá chladicí kapalina, která předává své teplo podzemní vodě. Vzhledem k poměrně stabilnímu přítoku vody, dochází přibližně jednou za hodinu k jejímu odčerpání a tím ke snížení hladiny o 40 cm. Čerpadlo je umístěno v horní hladině, díky čemuž dochází k odčerpávání teplé vody, která stoupá ze spodních vrstev nahoru. Tento systém má výhody oproti chlazení vzduchem a použitím radiátorů v rychlejším průtoku chladicími bloky a taky nebude docházet k ohřívání celé místnosti, což by mělo časem za následek snížení účinnosti celého chladicího systému.

Testovaný kontrolér se neobejde bez indukční zátěže s indukčností jedné cívky větší než 15 μ H. Pro tuto příležitost byla zhotovena vlastní zátěž pomocí třech vzduchových cívek ze 7 závitů pomocí měděného drátu o průměru 8 mm. Indukčnost takové cívky byla určena výpočtem na hodnotu 20,3 μ H. Samotný kontrolér disponuje vlastním měřením indukčnosti zátěže. S jeho pomocí došlo ke změření indukčnosti každé cívky, kde nejvyšší změřená hodnota byla o 24,5 % vyšší než vypočtená, což je způsobeno nepřesným navinutím na požadovaný průměr 20 cm, nicméně hodnota je vyšší než minimální, a proto splní účel. Cívky byly spojeny do hvězdy, měly specifické uspořádání, které se nejvíce podobá uložení cívek uvnitř motoru, čímž se zabrání vzájemné indukci mezi jednotlivými cívkami. U zátěže se ještě vyskytl problém s jejím poměrně vysokým

zahříváním až na teplotu 120 °C. Toto nežádoucí teplo bylo pomocí výborné tepelné vodivosti mědi předáváno do kontroléru v chladicí fázi, což prodlužovalo čas chlazení. Proto byl přidán 12 V ventilátor včetně hliníkových plátů pod přívodní fázové kabely, čímž se začaly cívky ochlazovat podstatně rychleji a tím došlo k menšímu přenosu tepla zpět do kontroléru.

Výstup dlouhodobého testování je zobrazen v příkazovém řádku. Všechno je po nastavení počátečních parametrů plně automatizováno. Pro testování byl kontrolér nastaven na jmenovitý fázový proud „iref“ = 550 A a špičkový proud „ipeak“ = 600 A. Jedná se o mezní hodnoty, se kterými musí být kontrolér schopen pracovat, neboť jsou udávány v katalogovém listu kontroléru SL. Pro dlouhodobé testování byl zvolen třetí chladicí režim, který jak již bylo zmíněno spočívá v nastavení pevné teploty, na kterou bude kontrolér zchlazen. S dobrými výsledky se potýkala teplota -2 °C, u které dojde k vychlazení za 260 ± 10 sekund. Při této teplotě nebudou chladicí cykly příliš dlouhé a nebudou ani extrémně namáhány Peltierovy články. Navíc nebude docházet k výraznému ohřívání 13 l objemu chladicí kapaliny umístěné v kanystru, jejíž teplota je poměrně stabilní okolo 25 °C.

Na závěr lze konstatovat plnou funkčnost systému. I když má zatím najeto jen 30 testovacích cyklů, daly by se ještě některé věci vylepšit a tím dosáhnout efektivnějšího chlazení. Možnými změnami by bylo otočení kontroléru směrem vzhůru, čímž by teplo stoupalo nahoru a nedocházelo by k ohřívání nežádoucích částí. Další změna by mohla být provedena v chlazení, kdy by bylo efektivnější použít mrazničku, popřípadě kompresorovou chladicí jednotku, díky čemuž by šli zkrátit časy chlazení, popřípadě snížit samotné chladicí teploty.

LITERATURA

- [1] SLEMON, Gordon R. Electric motor. Encyclopedia Britannica [online]. 2018 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/electric-motor>
- [2] DC-motors-guide. Rs-online [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://ie.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/dc-motors-guide>
- [3] KUČEROVÁ, Dana. STEJNOSMĚRNÝ MOTOR [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://adoc.pub/1-obsah-2-stejnsmrny-motor-21-princip.html>
- [4] KREJČÍ, František. Hlavní druhy stejnosměrných strojů [online]. 2009 [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/hlavni-druhy-stejnsmernych-stroju/view>
- [5] VOJÁČEK, Antonín. El. motory a jejich řízení – základní přehled – 1.díl. Automatizace.hw [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/el-pohony-mereni-a-regulace/el-motory-a-jejich-rizeni-zakladni-prehled.html>
- [6] RUDOLF, Ladislav. STEJNOSMĚRNÉ STROJE [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://projekty.osu.cz/irp2016/Stejnsmrne%20stroje.pdf>
- [7] Třífázové motory, asynchronní motory. Sew–eurodrive [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: https://www.sew-eurodrive.cz/vyrobky/motory/trifazove_motory/drehstrommotoren_1.html
- [8] ZAJAČÍK, Michal. Jak se řídí krokové motory [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://stomisi.cz/jak-se-ridi-krokov-motory.html>
- [9] KREJČÍ, František. Jednofázový indukční motor [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/jednofazovy-indukcni-motor>
- [10] Synchronní reluktanční motor – cesta k úsporám. Enviweb [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/102280>
- [11] Reluktanční motor [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://illustrationprize.com/cs/562-reluctance-motor.html>
- [12] MUBEEN, Muhammad. Brushless DC Motor Primer [online]. Radford, 2008, , 41 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.pulseroller.com/files/NA/Sales%20Literature/Motorized%20Roller%20Primer.pdf>
- [13] YEDAMALE, Padmaraja. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [online]. 2003 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [14] PERA, Brad. 4-Pole-brushless-DC-motor-animation [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: http://www.avdweb.nl/Article_files/Solarbike/Motor-controller/4-Pole-brushless-DC-motor-animation.jpg
- [15] What is a Brushless DC Motor Construction? [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.bldcmotor.org/what-is-a-brushless-dc-motor-construction.html>

- [16] How Brushless Motor and ESC Work [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>
- [17] CE220799 – PSoC 6 MCU: Direction Detection Using Quadrature Decoder [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.cypress.com/file/393656/download>
- [18] TANG, Johann. Technical Manual Series: Types of Brushless Motors [online]. 2021 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://blog.orientalmotor.com/technical-manual-series-types-of-brushless-motors>
- [19] COLLINS, Danielle. What's the difference between BLDC and synchronous AC motors? [online]. 2015 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-whats-the-difference-between-bldc-and-synchronous-ac-motors/>
- [20] What are the Types of Position Sensor for BLDC Motor? [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.bldcmotor.org/what-are-the-types-of-position-sensor-for-bldc-motor.html>
- [21] GIERAS, Jacek a Mitchell WING. Permanent magnet motor technology [online]. 2. vyd. Basel: Marcel Dekker, 2002 [cit. 2021-10-19]. ISBN 0-8247-0739-7.
- [22] ŠUSTEK, Pavel. BLDC Motor Control with Hall Sensors Driven by DSC [online]. 2011 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4413.pdf>
- [23] Trapezoidal & Sinusoidal: Two BLDC Motor Controls [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.bacancytechnology.com/blog/trapezoidal-and-sinusoidal-bldc-motors>
- [24] SHIYOUNG, Lee. A COMPARISON STUDY OF THE COMMUTATION METHODS FOR THE THREE-PHASE PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.magnelab.com/wp-content/uploads/2015/02/A-comparison-study-of-the-commutation-methods-for-the-three-phase-permanent-magnet-brushless-dc-motor.pdf>
- [25] What Are The Different Types Of Brushless Motor Control – Sinusoidal, Trapezoidal and Field Orientated Control (FOC)? [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.zikodrive.com/support/zikouniversity-motor-control-theory-application/brushless-motor-drive-patterns-trapezoidal-sinusoidal-field-orientated-control/>
- [26] VACKOVÁ, Světlá a Josef VACEK. Termoelektrické jevy v polovodičích a rostlinných produktech [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/termoelektricke-jevy-v-polovodicich-a-rostlinnych-produktech--10069>
- [27] Termoelektrické materiály [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html>

- [28] REICHL, Jaroslav. Seebeckův jev [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [29] LOSKOT, Jan a Jan HADRAVA. Peltierův článek [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: https://kdf.mff.cuni.cz/tabor_old/2007/projekty/peltieruv_clanek.pdf
- [30] BRÁZDIL, Marián. PELTIEROVY ČLÁNKY PRO VÝROBU ELEKTRICKÉ ENERGIE [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/37435076-Peltierovy-clanky-pro-vyrobu-elektricke-energie.html>
- [31] AUGUSTYN, Adam. Peltier effect [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Peltier-effect>
- [32] Peltier Effect Theory [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/peltier-effect-theory/>
- [33] THE COMPLETE GUIDE TO THERMAL MANAGEMENT [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://www.cuidevices.com/thermal-management-ebook#DownloadEbook>
- [34] CALDERON, Carlos. An experimental study of a thermoelectric heat exchange module for domestic space heating [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-diagram-of-thermoelectric-element-b-Schematic-diagram-of-thermoelectric_fig1_315987843
- [35] ESC3–SL controller series [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: https://drive.google.com/drive/folders/1EV9828Q2E7wO_DBDFtdkdb6FZddaG-IF
- [36] PM-62X62-350_DTE [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/7e637d87af108709f5c303374002b6b4/PM-62X62-350_DTE.pdf
- [37] CSP-3000 [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/c77fa7075e1e7ae9a92b766dd4b06eb1/CSP-3000-spec.pdf>
- [38] AOT290L/AOB290L [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/32c5df37175a764b9778c58781d3f510/AOT290L-DTE.pdf?fbclid=IwAR2g8jDaVfNPkKmqpb64tk2MbSiSRaxquMD_9BZm6AFyhVYWNFtroc1NvE
- [39] TC1411/TC1411N [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001390F.pdf>
- [40] KTY81 series Silicon temperature sensors [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/63412cca845bf05e8bcce2ecca1aa6d/KTY81-210.pdf>
- [41] Vodotěsné čidlo teploty 2m NTC Termistor 10K 1% 3950 [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/vodotesne-cidlo-teploty-2m-ntc-termistor-10k-1--3950/?gclid=Cj0KCQjwmpSSBhCNARIsAH3cYgbTUIW8VqOj4DyaHKIRlPK1fEAeu-EaX-Al8s_N8ueY0hcskmRk6CsaAkjXEALw_wcB

- [42] DC čerpadlo CL15-12V5 [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z:
<https://www.solfoton.eu/products/cl15-12v5/>
- [43] Comet ELEGANT 24 V/DC 1305.79.59. CONRAD [online]. [cit. 2022-05-02].
Dostupné z: https://www.conrad.cz/p/comet-elegant-24-vdc-13057959-nizkonapetove-ponorne-cerpadlo-600-lh-55-m-551270?&vat=true&gclid=CjwKCAjwgr6TBhAGEiwA3aVuIZITyA7Zm3mO6viTSmQNim-u4psaS_mvWYq6w99iDNyr6L5oZ8IzuxoCwPEQAvD_BwE
- [44] Coil Inductance. EEWeb [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z:
<https://www.eeweb.com/tools/coil-inductance/>
- [45] SiliXcon-spaces [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z:
<https://silixcon2.atlassian.net/wiki/spaces>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

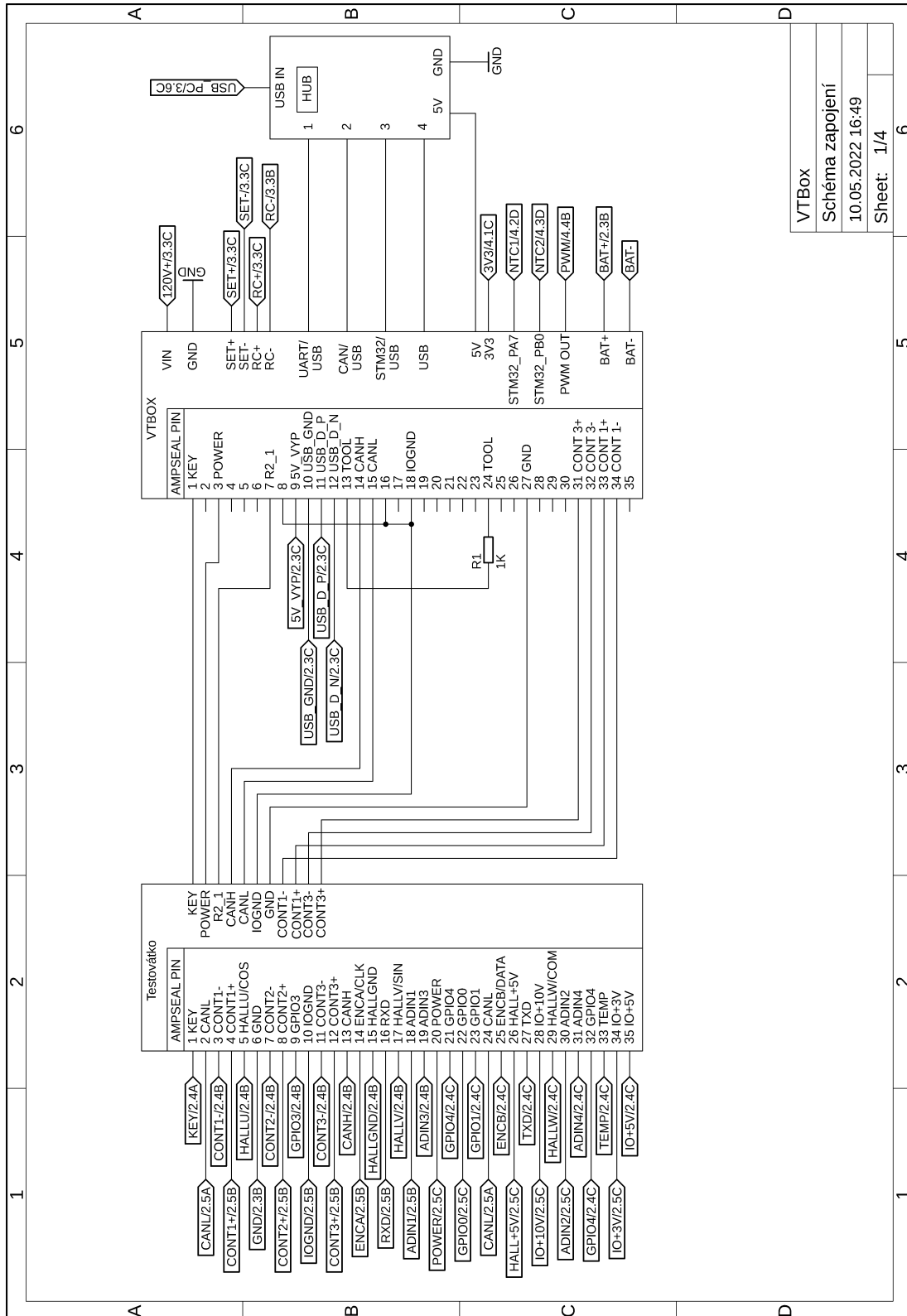
BLDC	Brushless DC, Bezkartáčový stejnosměrný motor
BEMF	Back electromotive force, Zpětné elektromotorické napětí
EMF	Electromotive force, Elektromotorické napětí
FOC	Field oriented control, Vektorové řízení
PMSM	Permanent magnet synchronous motor, Synchronní motor s permanentním magnetem
MTTF	Mean time to failure, Střední doba do poruchy
MTBF	Mean time between failure, Střední doba mezi poruchami
PWM	Pulse width modulation, Pulzní šířková modulace
IO	Integrovaný obvod
USB	Universal Serial Bus, Univerzální sériová sběrnice
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter, Univerzální asynchronní přijímač-vysílač
CAN	Controller Area Network, Datová sběrnice místní sítě
DPS	Deska plošných spojů
MOSFET	Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor, Transistor řízený elektrickým polem
MCU	Microcontroller unit, Jednočipový počítač
DC	Direct current, Stejnosměrný proud

Symboly:

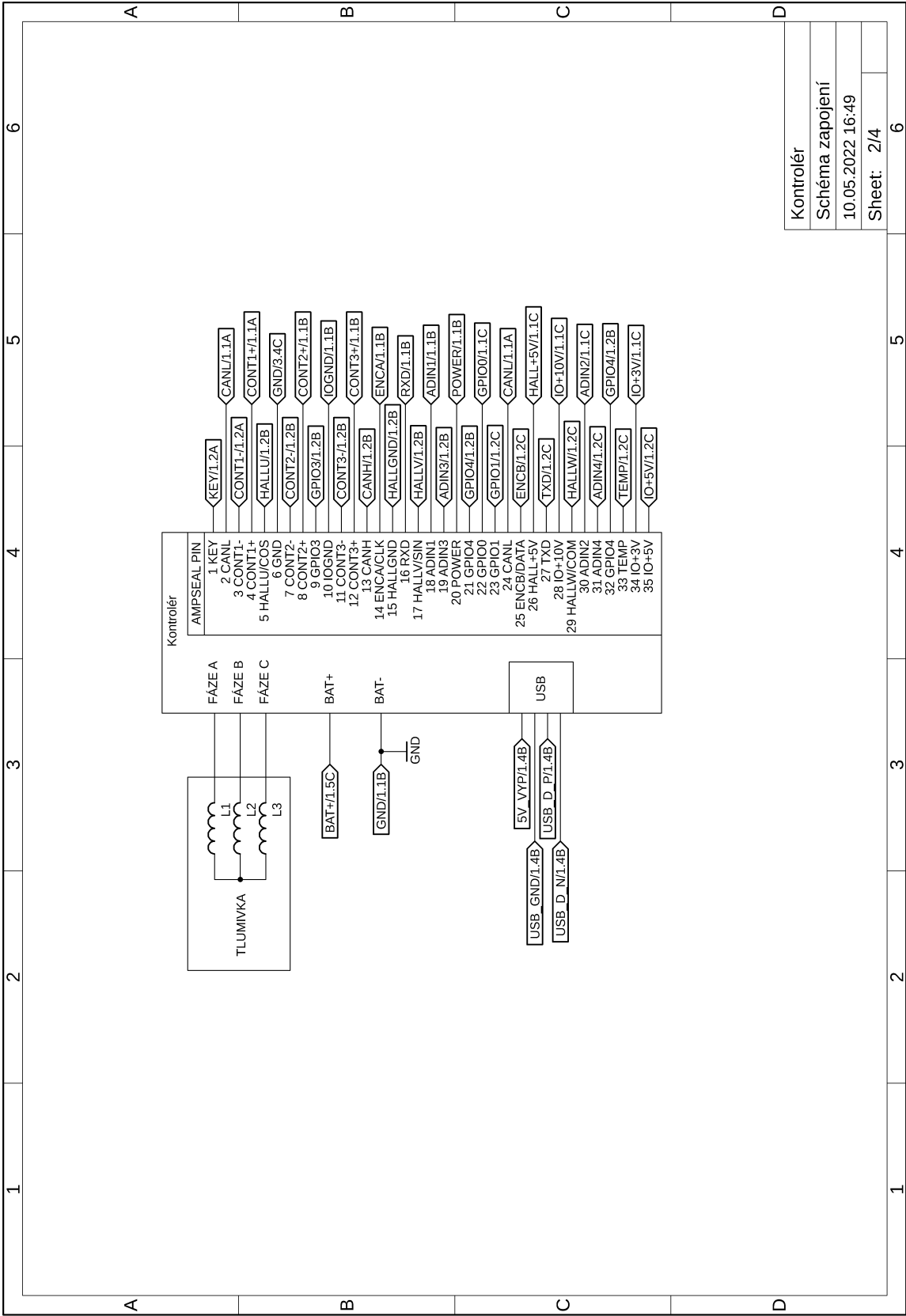
N	počet závitů	(-)
l	délka rotoru	(m)
r	vnitřní poloměr rotoru	(m)
B	hustota magnetického toku	(T)
ω	úhlová rychlost motoru	(rad/s)
T_P	točivý moment	(Nm)
T_R	jmenovitý točivý moment	(Nm)
ΔU	termoelektrické napětí	(V)
ΔT	teplotní rozdíl	(K)
α_{12}	Seebeckův koeficient	(VK ⁻¹)
Q_C	rychlost chlazení	(W)
Q_H	rychlost ohřívání	(W)
β	Peltierův rozdílový koeficient dvou materiálů	(V)
I	proud	(A)
f	frekvence	(Hz)

t_{ON}	maximální doba sepnutí MOS tranzistoru	(s)
R_{DSON}	odpor sepnutého kanálu MOS tranzistoru	(Ω)
Q_g	maximální náboj hradla	(C)
t_{PZ}	doba ztrátového výkonu při spínání MOSFETU	(s)
S	střída	(-)
P	výkon	(W)
R_{θ}	tepelný odpor	(W/°C)

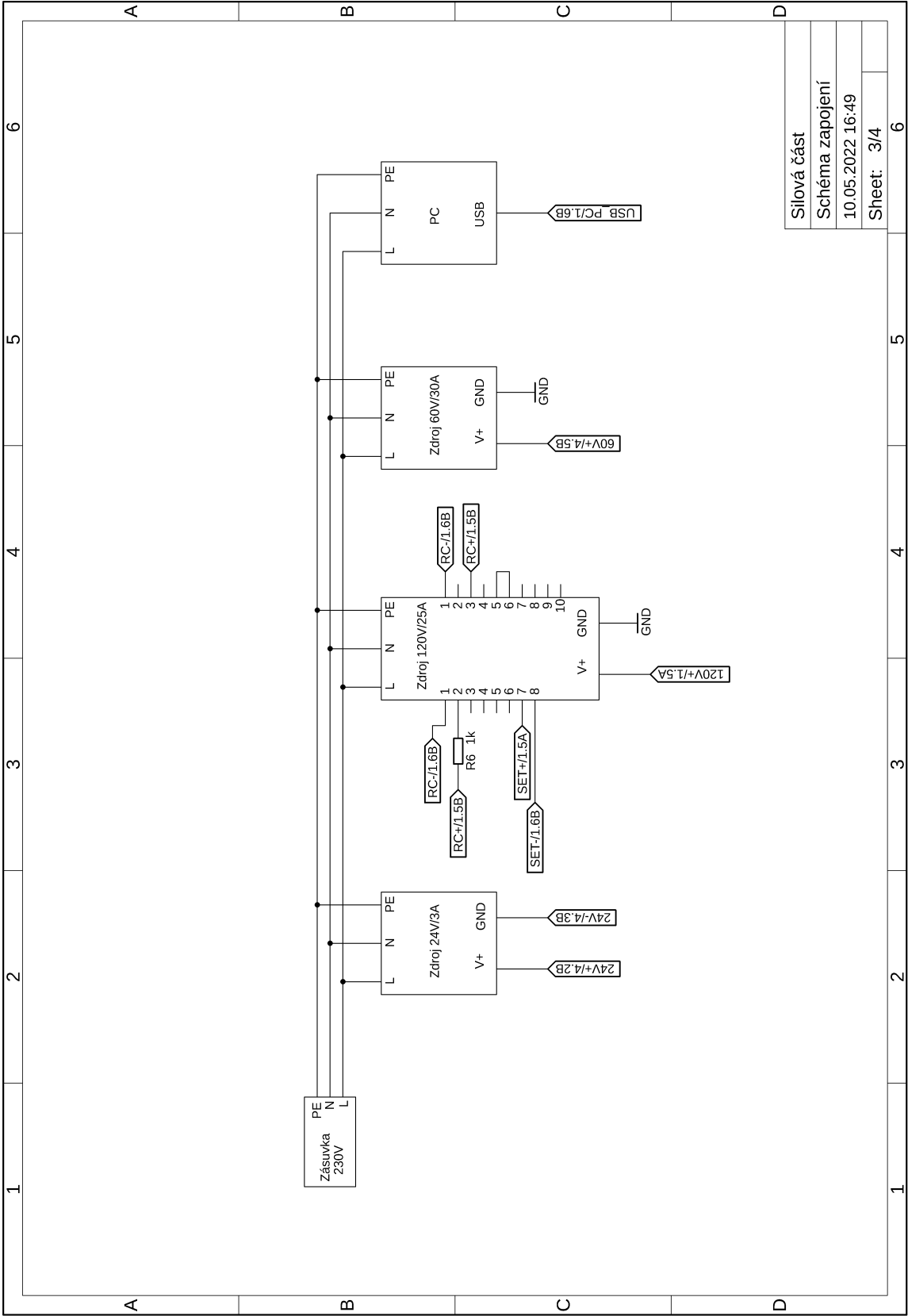
A.1 Zapojení VT Boxu



A.2 Zapojení kontroléru

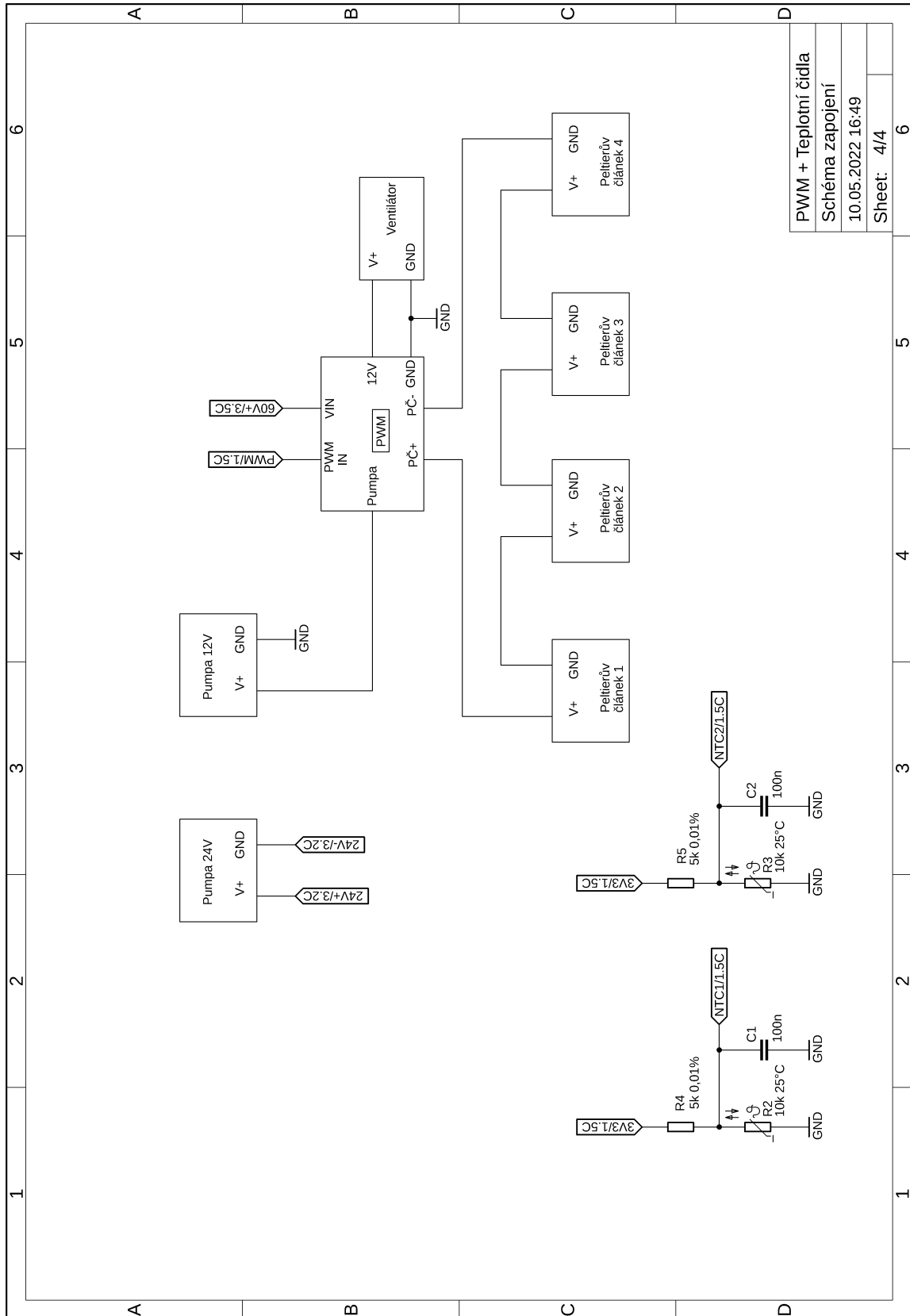


A.3 Zapojení silové části



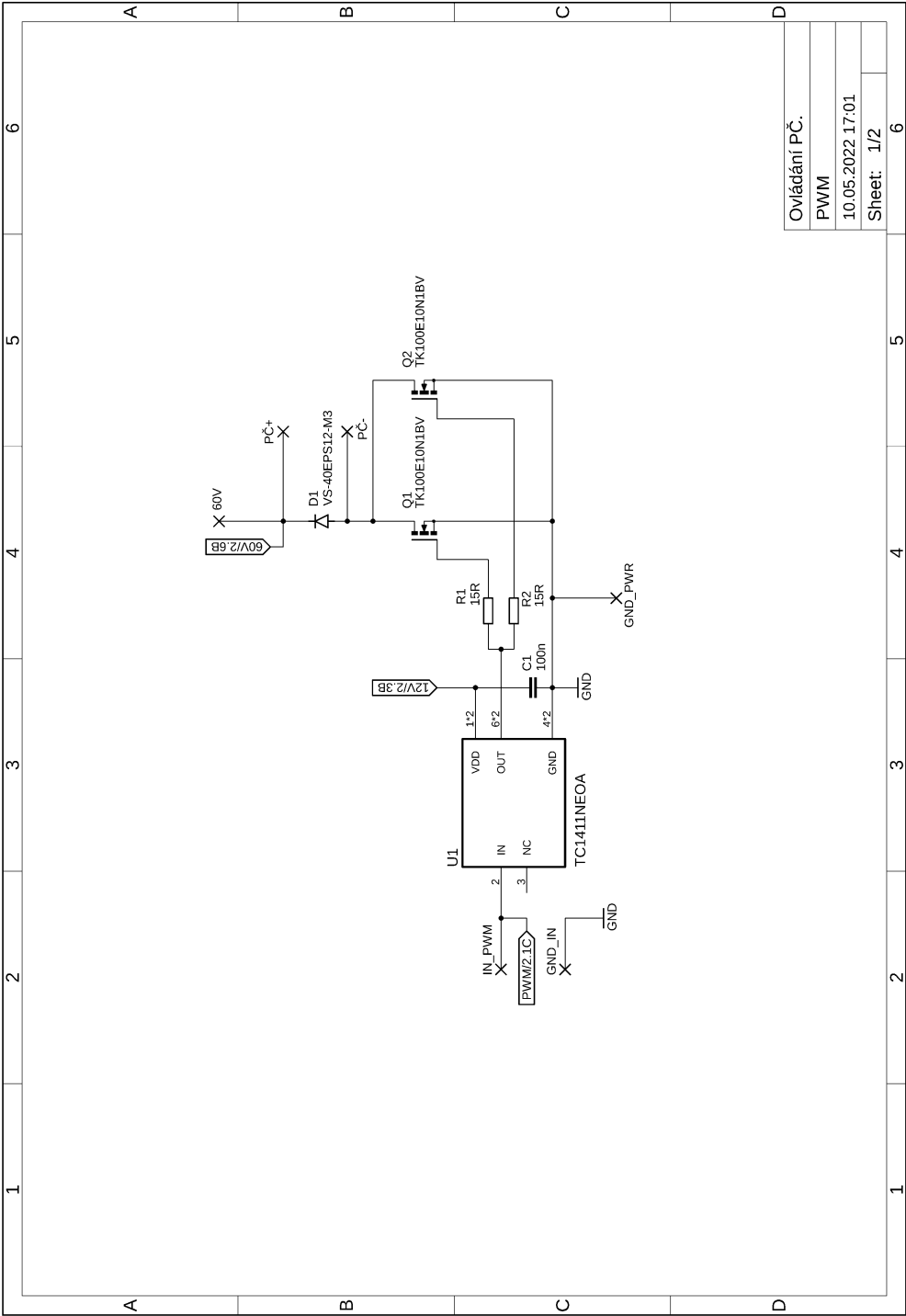
Silová část	6
Schéma zapojení	5
10.05.2022 16:49	4
Sheet: 3/4	3

A.4 Zapojení PWM a teplotních čidel

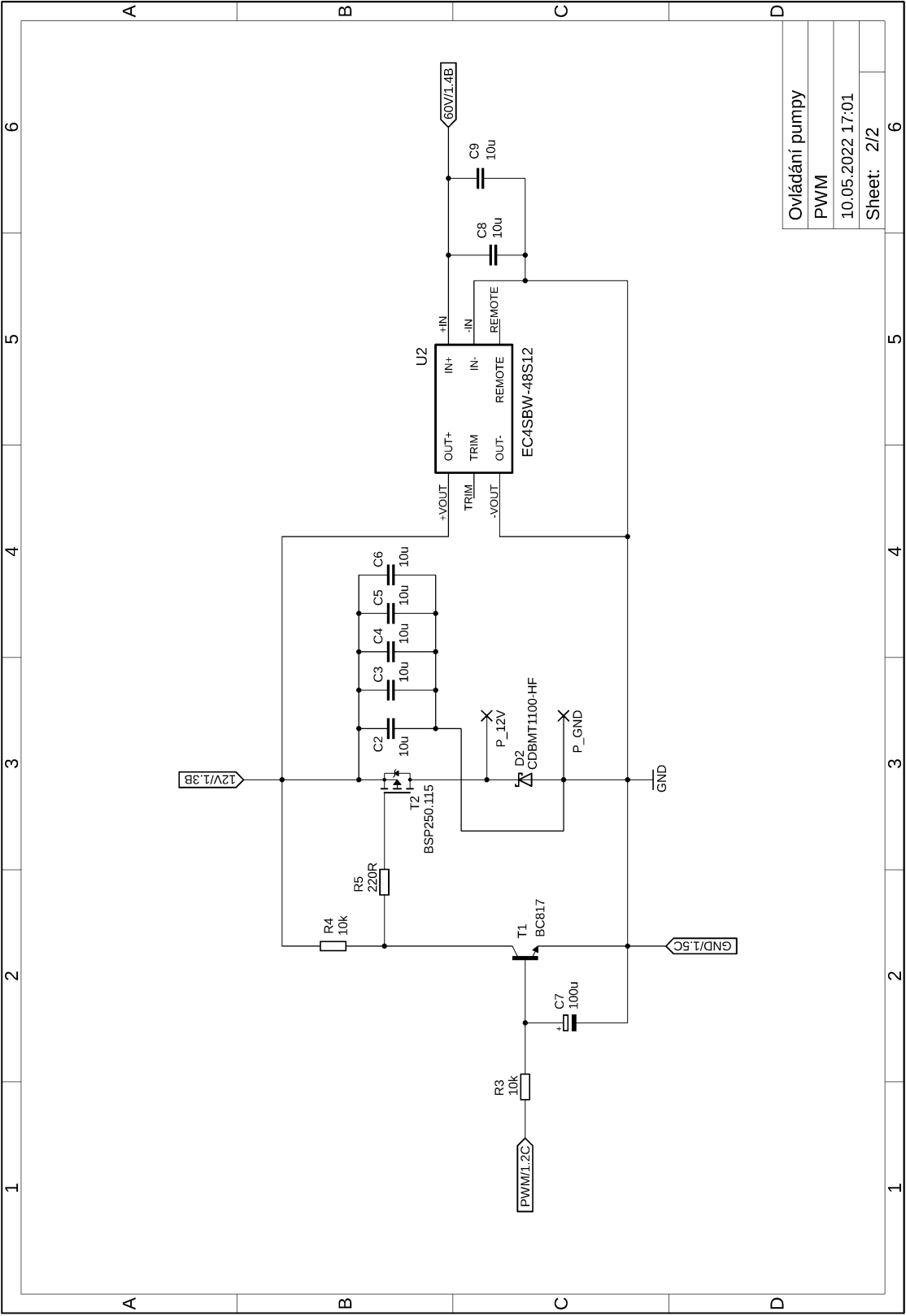


Příloha B - Schéma

C.1 Schéma zapojení ovládání Peltierových článků

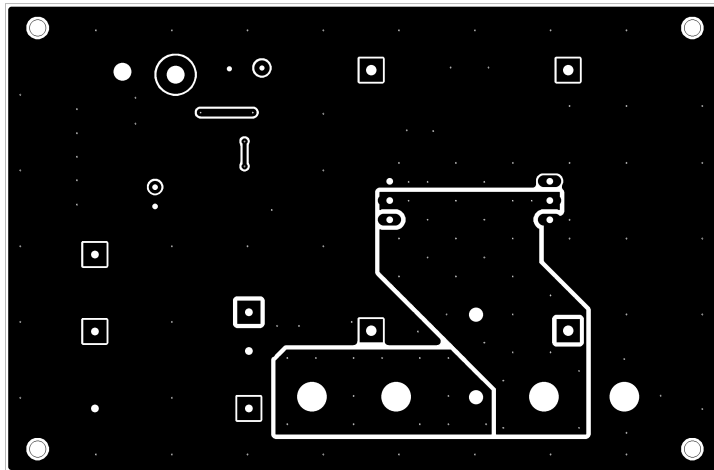


C.2 Schéma zapojení ovládání pumpy

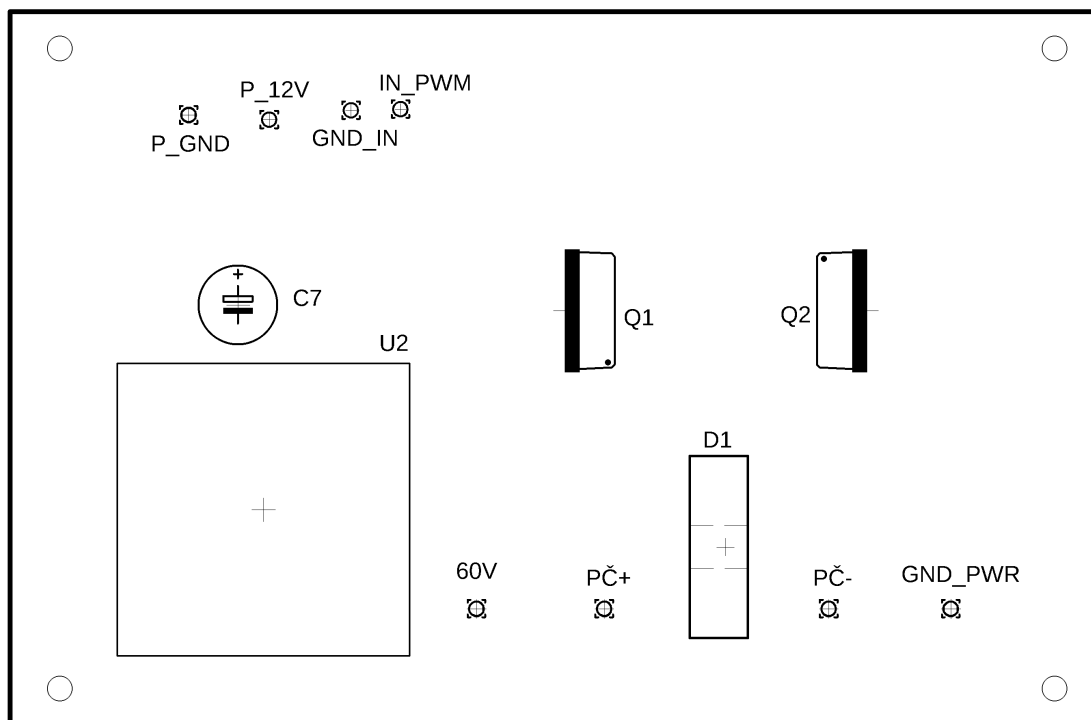


Příloha C - Podklady pro výrobu DPS

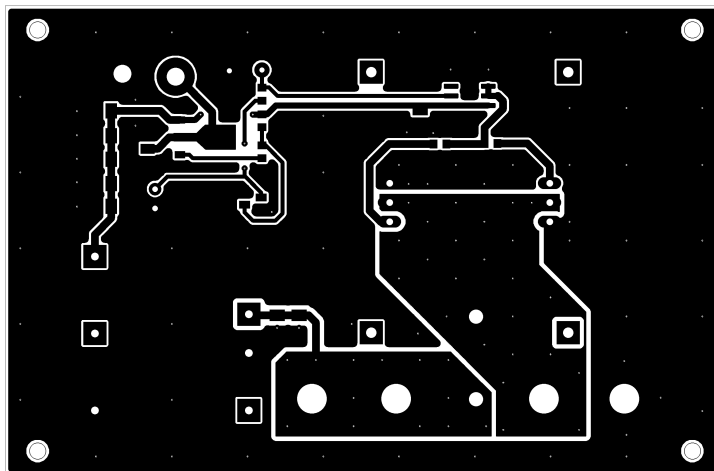
D.1 PWM + ovládání pumpy – TOP, M 1:1



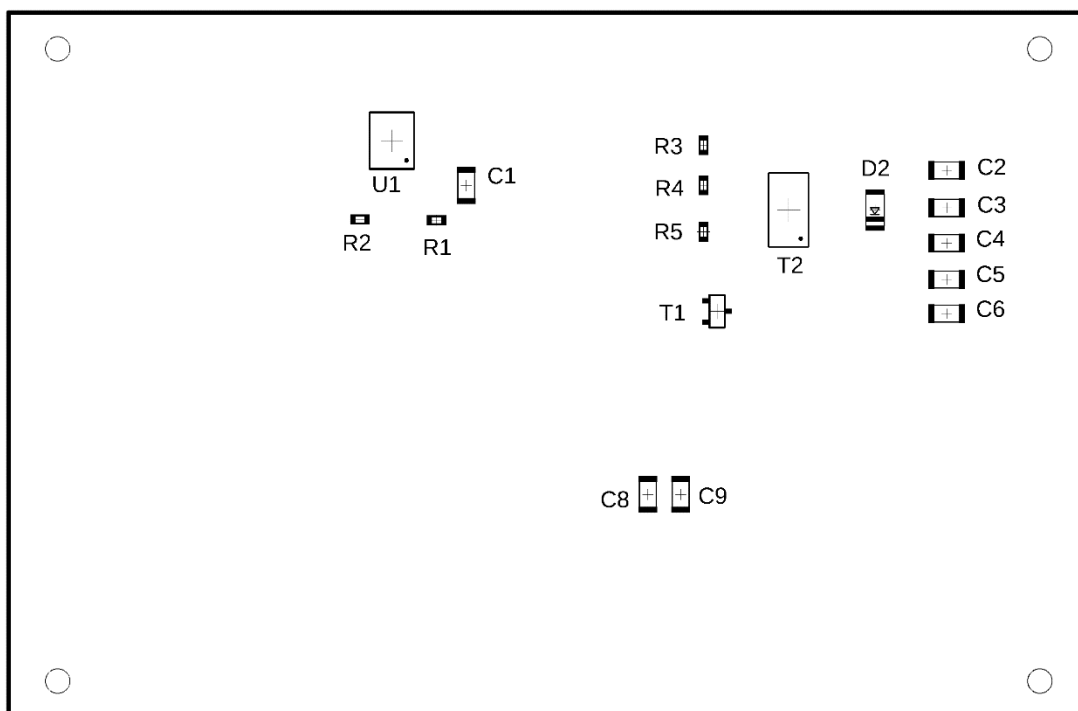
D.2 PWM + ovládání pumpy TOP – osazovací plán



D.3 PWM + ovládání pumpy – BOT, M 1:1



D.4 PWM + ovládání pumpy BOT – osazovací plán



Příloha D - Seznam součástek

E.1 Seznam součástek PWM + ovládání pumpy

Název	Hodnota	Popis
C1	100nF	1206
C7	100μF	CPOL-EUE 2.5-7
C2, C3, C4, C5, C6, C8, C9	10μF	1206
R1, R2	15Ω	0603
R3, R4	10kΩ	0603
R5	220Ω	0603
T1	BC817	SOT23
T2	BSP250.115	SOT223
Q1, Q2	AOT290L	TO220
D1	VS-40EPS12-M3	TO-247-2V
D2	CDBMT1100-HF	SOD-123H
U1	TC1411	SO8
U2	EC4SBW-48S12	