

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Řízení pohonů tříosého robotu

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk KEHL**
Osobní číslo: **E15N0056P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Řízení pohonů tříosého robotu**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Navrhněte a realizujte senzorky.
2. Navrhněte a realizujte výkonové části pohonů jednotlivých os robotu.
3. Navrhněte automatické regulace jednotlivých os (pohonů) robotu.
4. Navrhněte a implementujte řídicí algoritmus.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Přednášky či skripta z doporučených předmětů, elektronické zdroje.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Fořt, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky


Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017


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

V Plzni dne 14. října 2016




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na dokončení vývoje tříosého robotického systému. V jednotlivých kapitolách je popsáno pracovní prostředí a mechanická konstrukce robotu. Je zde popsán návrh a realizace výkonové části elektrických pohonů tříosého robotu. Práce se také zabývá řešením sensorického systému a automatické regulace polohy kloubů robotu. V závěru práce je popsán vyvinutý řídicí systém a pracovní režimy tříosého robotu. Součástí této diplomové práce je také reálné zhotovení celého robotického systému. Kromě návrhu a realizace elektrické části se jedná i o mechanické úpravy konstrukce robotu, řešení pracovního prostředí a realizaci umístění jednotlivých senzorů a kabeláže ke konstrukci robotu.

Klíčová slova

Robotický systém, efektor, řídicí jednotka, algoritmus, měnič, mikroprocesor, sensorika, regulace, senzor, tříúrovňové řízení, regulátor, stejnosměrný motor, hlavní řídicí jednotka, kloubová řídicí jednotka.

Abstract

The diploma thesis is focused on completing the development of the three-axis robotic system. The individual chapters describe the working environment and the mechanical structure of the robot. It describes the design and realization of the power section of three-axis robot electric drives. The work also deals with the solution of the sensor system and automatic regulation of the position of the robot joints. At the end of the thesis, the developed control system and working modes of the three-axis robot are described. Part of this diploma thesis is also the real construction of the entire robotic system. Apart from the design and realization of the electrical part, the mechanical modifications of the robot construction, the working environment solution and the implementation of the individual sensor and cabling are made to the robot construction.

Key words

Robotic system, effector, control unit, algorithm, inverter, microprocessor, sensor, regulation, sensor, three-level control, controller, DC motor, main control unit, articulated control unit.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni dne 19.5.2017

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Fořtovi, Ph.D. za cenné rady, za pomoc při řešení problémů, které vznikly při návrhu a realizaci tříosého robotického systému a za kvalitní vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
ÚVOD.....	12
1 MECHANICKÁ KONSTRUKCE A PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ TŘÍOSÉHO ROBOTU.....	14
1.1 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ.....	14
1.2 ZNAČENÍ A MECHANICKÁ KONSTRUKCE ROBOTU	15
2 ELEKTRICKÉ MOTORY TŘÍOSÉHO ROBOTU.....	16
2.1 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR PG420-12-49-B.....	16
2.2 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR PG521-24-53-B.....	16
3 NÁVRH A REALIZACE VÝKONOVÉ ČÁSTI ELEKTRICKÝCH POHONŮ TŘÍOSÉHO ROBOTU	17
3.1 VÝBĚR MĚNIČE A VOLBA ŘÍZENÍ.....	17
3.1.1 <i>Měnič BTM7752G</i>	18
3.1.2 <i>Tříúrovňové řízení měniče</i>	20
3.2 NÁVRH OBVODOVÉHO ZAPOJENÍ MĚNIČE BTM7752G.....	21
3.2.1 <i>Kondenzátorové baterie</i>	22
3.2.2 <i>Nabíjecí obvod kondenzátorové baterie</i>	23
3.2.3 <i>Externí čidlo proudu</i>	24
3.3 NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE PRO MĚNIČ BTM7752G	26
4 NÁVRH A REALIZACE SENZORICKÉHO SYSTÉMU TŘÍOSÉHO ROBOTU	26
4.1 SNÍMÁNÍ POLOHY KLOUBU Č.1 A KLOUBU Č.2	27
4.1.1 <i>Integrovaný obvod AS5040</i>	27
4.1.2 <i>Výstupní režimy senzorů polohy</i>	28
4.1.3 <i>Mechanické provedení senzorů polohy</i>	30
4.2 SNÍMÁNÍ RYCHLOSTI KLOUBU Č.1 A KLOUBU Č.2.....	31
4.2.1 <i>Realizace senzorů rychlosti</i>	31
4.2.2 <i>Mechanické provedení senzorů rychlosti</i>	33
4.3 SNÍMÁNÍ POLOHY A RYCHLOSTI KLOUBU Č.0.....	34
4.3.1 <i>Realizace senzoru rychlosti a polohy kloubu č.0</i>	34
4.3.2 <i>Realizace senzoru nulové polohy</i>	35
5 NÁVRH A REALIZACE AUTOMATICKÉ REGULACE POHONŮ ROBOTU.....	35
5.1 DISKRÉTNÍ PS REGULÁTOR	35
5.1.1 <i>Složkový algoritmus</i>	36
5.2 MODEL STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU A MĚNIČE.....	37
5.3 KASKÁDNÍ REGULAČNÍ STRUKTURA POLOHY	39
5.3.1 <i>Proudová smyčka</i>	39
5.3.2 <i>Rychlostní smyčka</i>	42
5.3.3 <i>Polohová smyčka</i>	42
5.4 REALIZACE KASKÁDNÍ REGULACE POLOHY V MIKROPROCESORU	42
6 NÁVRH A REALIZACE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU TŘÍOSÉHO ROBOTU	44
6.1 HLAVNÍ ŘÍDICÍ JEDNOTKA	45
6.1.1 <i>Algoritmus hlavní řídicí jednotky</i>	45
6.1.2 <i>Komunikační a ovládací rozhraní pro personál</i>	46

6.1.3	<i>Pracovní režimy tříosého robotu</i>	47
6.1.4	<i>Řízení komunikace SPI</i>	48
6.2	KLOUBOVÉ ŘÍDICÍ JEDNOTKY	48
6.2.1	<i>Algoritmus kloubové řídicí jednotky</i>	48
6.2.2	<i>Blokové schéma zapojení kloubové řídicí jednotky</i>	50
6.2.3	<i>Řídicí a stavový registr kloubové řídicí jednotky</i>	51
6.3	ZABEZPEČOVACÍ SYSTÉM ROBOTU	52
	ZÁVĚR	53
	POUŽITÁ LITERATURA	55
	ZDROJE OBRÁZKŮ	57
	PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

I/O porty	Vstupně-výstupní porty mikroprocesoru
PWM	Pulsně-šířková modulace
z	Poměrné sepnutí prvků měniče
U_{DC}	Napětí stejnosměrné strany měniče
GND	Nulový potenciál
U_{cc}	Napájecí napětí
R_{nab}	Nabíjecí odpor kondenzátorové baterie
C_{bat}	Kapacita kondenzátorové baterie
$P_{RnabZTR}$	Ztrátový výkon nabíjecího odporu
R_{S1}	Odpor cívky relé
C_F	Filtrační kondenzátor
U_{OUT}	Výstupní napětí
$\varphi_{element}$	Elementární úhel rozlišení senzoru polohy
N	Počet bitů
T_{PWM}	Perioda PWM signálu
T_{reg}	Perioda volání výpočtu diskretního regulátoru
τ_S	Časová konstanta regulovaného systému
ω_S	Úhlová frekvence kmitů odezvy systému
$\varepsilon_{(k)}$	Diskretní regulační odchylka
$S_{(k)}$	Sumační složka diskretního PS regulátoru
K_M	Zesílení bloku měniče
τ_M	Časová konstanta bloku měniče
τ_e	Elektrická časová konstanta motoru
M_N	Jmenovitý moment motoru

I_N	Jmenovitý proud motoru
U_N	Jmenovité napětí motoru
P_N	Jmenovitý výkon motoru
n_N	Jmenovité otáčky motoru
K_{ZI}	Konstanta zesílení čidla
F_{OI}	Přenos otevřené smyčky
K_R	Zesílení regulátoru
τ_R	Časová konstanta regulátoru
φ_B	Bezpečnost ve fázi
$\omega_{\dot{R}}$	Kmitočet řezu
I_L	Proud zátěží
DPS	Deska plošných spojů
J	Moment setrvačnosti

Úvod

Předkládaná diplomová práce navazuje na nedokončený projekt pana Ing. Petra Beneše, jehož cílem bylo vytvořit vlastní robotický systém na Katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky fakulty elektrotechnické v Plzni. Počáteční stav této práce spočíval v převzetí holé konstrukce tříosé robotické paže s osazenými elektrickými motory, kterou navrhl pan Ing. Petr Beneš. Další vývoj probíhal pod vedením pana Ing. Jiřího Fořta, Ph.D. s cílem dokončit robotický systém, který bude sloužit jak pro výukové účely, tak i pro prezentační či vývojové účely v oblasti robotiky.

Vývoj tříosého robotu dále probíhal navržením několika nových dílů konstrukce, které v původním návrhu nebyly příliš vhodně řešené. Dále proběhl návrh, realizace a oživení prototypů výkonových obvodů. Následně se řešil návrh algoritmů řízení výkonových obvodů pomocí vývojového kitu EvB5.1. s mikroprocesorem Atmel ATmega32. Nejprve se implementoval algoritmus dvouúrovňového řízení a následně tříúrovňového řízení. V dalším vývoji byly prototypy výkonových obvodů osazeny externími senzory proudu, z důvodu přesnějšího měření malých hodnot proudů. Následně proběhl návrh a realizace sensorického systému robotu, při kterém byly zhotoveny senzory polohy a rychlosti, založené na obvodu AS5040. Další vývoj spočíval v návrhu a realizaci automatické regulace polohy. Zde se nejprve navrhovala proudová smyčka, poté rychlostní smyčka a nakonec polohová smyčka. Tímto byl dokončen návrh fundamentálního algoritmu kloubových řídicích jednotek robotu, které zprostředkovávají řízení jednotlivých kloubů. Následně byl navržen jednoduchý zabezpečovací algoritmus, který hlídá správnou funkci řízení kloubů. Dále byla navržena topologie celého řídicího systému, byl vytvořen základní algoritmus hlavní řídicí jednotky, který řeší komunikaci s personálem, provádí nadřazené řízení robotu a také řídí komunikaci mezi jednotlivými mikroprocesory. Dále byly navrženy algoritmy základních pracovních režimů robotu, kterými jsou spouštěcí režim robotu, řízení jednotlivých kloubů robotu, režim kalibrace a ukončovací režim. Nakonec byl ještě vytvořen algoritmus řízení celého robotu pomocí přímé a inverzní kinematiky. Tento režim je pouze na základní úrovni, není zde řešeno například plánování trajektorie efektoru atd.

V následujících kapitolách se tato práce bude zabývat konkrétním návrhem a realizací jednotlivých částí robotického systému. Text je rozdělen do šesti hlavních částí. První část textu je zaměřena na popis mechanické konstrukce robotu a pracovního prostředí. V druhé části jsou popsány použité elektrické motory. Třetí část se zabývá návrhem a realizací

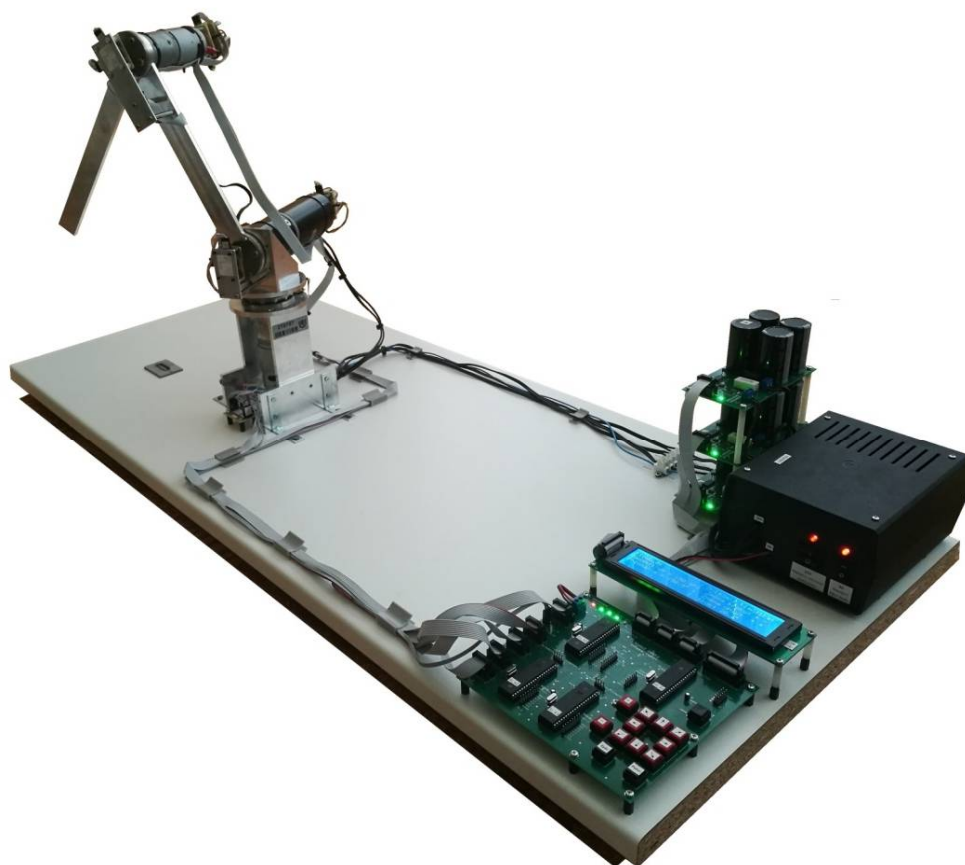
výkonové části elektrických pohonů tříosého robotu. V této kapitole je uvedena zvolená topologie výkonové části pohonů, použitý měnič a samotný návrh obvodového zapojení měniče včetně měření proudu. Čtvrtá část textu je zaměřena na realizaci senzorického systému robotu. Jsou zde popsány jak způsoby snímání polohy a rychlosti, tak i konkrétní řešení senzorů v jednotlivých kloubech robotu. Pátá část se věnuje problematice automatické regulace polohy, kde jsou rozepsané jednotlivé smyčky kaskádní regulace polohy a samotná realizace v mikroprocesoru. V šesté části je popsán celý řídicí systém tříosého robotu. To zahrnuje popis navržené topologie řídicího systému, popis činnosti jednotlivých řídicích jednotek včetně sériové komunikace, popis pracovních režimů robotu a popis zabezpečovacího algoritmu.

1 Mechanická konstrukce a pracovní prostředí tříosého robotu

V následující kapitole je krátce popsáno vytvořené pracovní prostředí a mechanická konstrukce robotu.

1.1 Pracovní prostředí

Pracovní prostředí robotu se skládá z podstavce, na kterém je umístěn jak samotný robot, tak i napájecí zdroj, výkonová elektronika a řídicí elektronika robotu. Uspořádání jednotlivých komponent je provedeno tak, aby byla zamezena kolize mezi robotem a ostatními díly a zároveň aby byla zajištěna snadná obsluha ovládání robotu nebo případný další vývoj robotu.

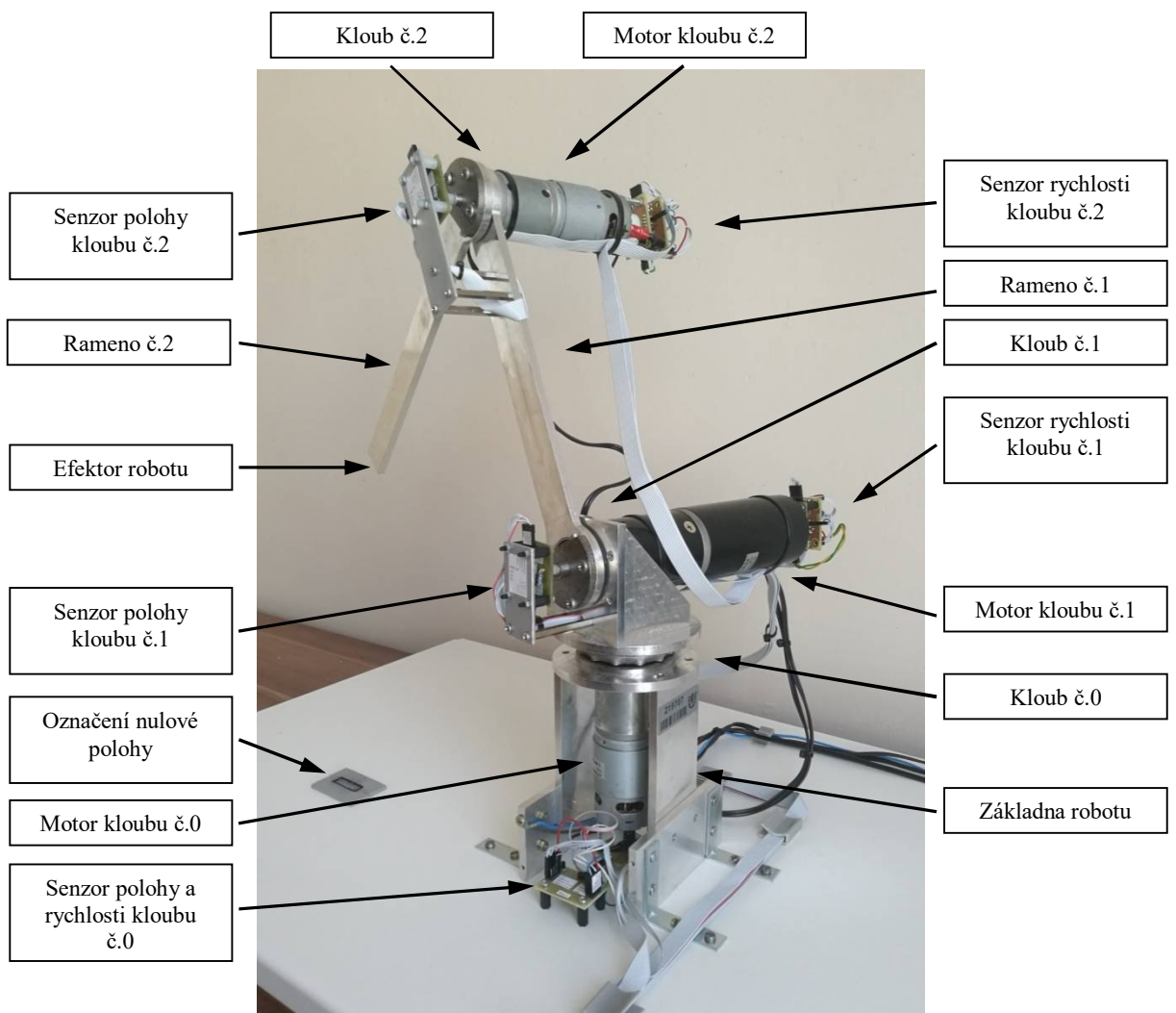


Obr. 1.1 Pracovní prostředí tříosého robotu

1.2 Značení a mechanická konstrukce robotu

Jak již z názvu vyplývá jedná se o robotický systém se třemi stupni volnosti. Jednotlivé osy, neboli klouby jsou značeny čísly 0, 1 a 2. Každý kloub je poháněn stejnosměrným cize buzeným motorem, který má označení podle příslušného kloubu. Ve všech kloubech jsou umístěné čidla polohy a rychlosti, které se opět označují číslem příslušného kloubu.

Mechanická konstrukce robotu je složená z hliníkových profilů. Konstrukci robotu lze rozdělit do tří hlavních částí - základna, rameno č.1 a rameno č.2. Jednotlivé části robotu jsou mezi sebou propojeny pohyblivými klouby, ve kterých se nacházejí kuličková ložiska. Tento robotický systém nemá efektor. Jako koncový bod se uvažuje střed konce ramene č.2. Popis a značení tříosého robotu je uveden na následujícím obrázku *Obr. 1.2*.



Obr. 1.2 Popis a značení tříosého robotu

2 Elektrické motory tříosého robotu

V robotickém systému jsou použity dva typy stejnosměrných motorů, které jsou doplněny planetovými převodovkami. Konkrétně se jedná o modely motorů PG420-12-49-B a PG521-24-53-B.

2.1 Stejnosměrný motor PG420-12-49-B

Tento typ motoru je používán jako pohon kloubu č.0 a kloubu č.2.

Parametry motoru s převodovkou:

- $P_N = 41,3\text{W}$
- $I_N \leq 5500\text{ mA}$
- $U_N = 12\text{V}$
- $M_N = 18\text{ kg-cm}$
- $n_N = 120\text{ ot/min}$
- převodový poměr = 1:49



Obr. 2.1 DC motor PG420-12-49-B [1]

2.2 Stejnosměrný motor PG521-24-53-B

Tento typ motoru je používán jako pohon kloubu č.1.

Parametry motoru s převodovkou:

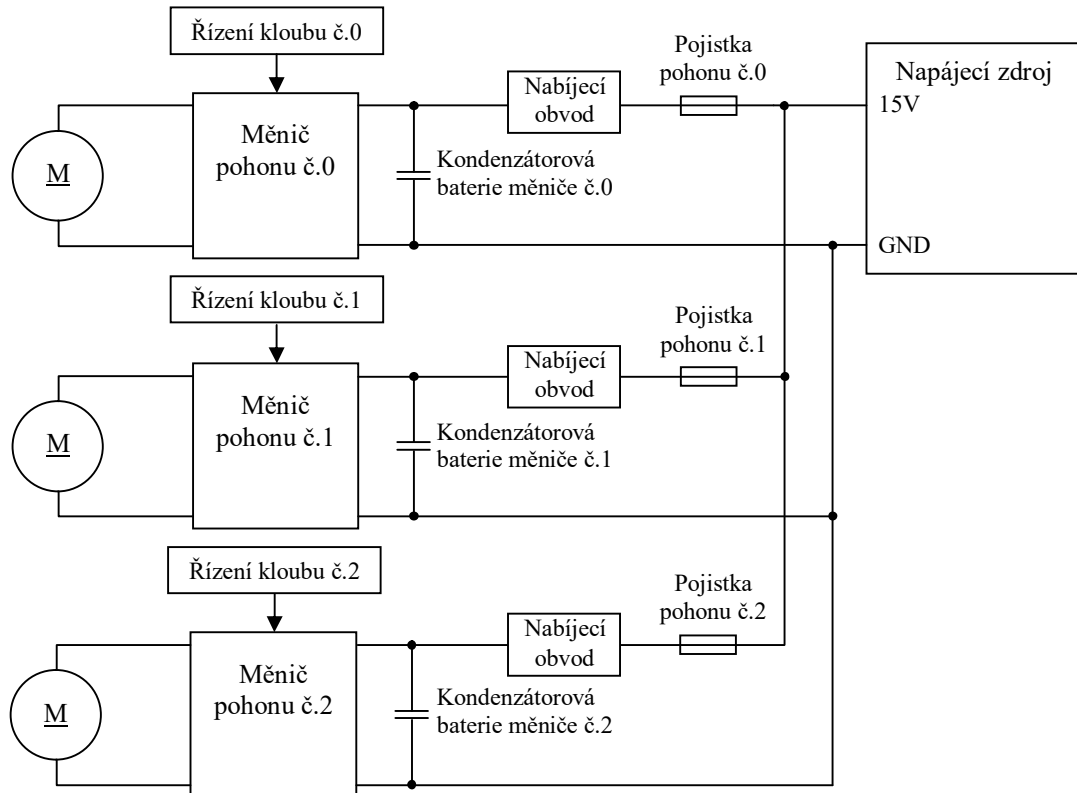
- $P_N = 48,6\text{W}$
- $I_N \leq 2850\text{ mA}$
- $U_N = 24\text{V}$
- $M_N = 41\text{ kg-cm}$
- $n_N = 67\text{ ot/min}$
- převodový poměr = 1:53



Obr. 2.2 DC motor PG521-24-53-B [2]

3 Návrh a realizace výkonové části elektrických pohonů tříosého robotu

Topologie elektrických pohonů tříosého robotu je znázorněna na *Obr.3.1*.



Obr. 3.1 Topologie elektrických pohonů tříosého robotu

Každý motor je napájen jedním měničem, který je řízen z příslušné kloubové řídicí jednotky. Jednotlivé měniče jsou od zdroje napětí oddělené kondenzátorovou baterií, která slouží jako zdroj energie při rozjezdu motoru nebo jako akumulátor energie při brzdění. Jako zdroj napětí pro napájení výkonových obvodů byl zvolen spínaný zdroj MEAN WELL s výstupními parametry 15V/7A, 102W. Jednotlivé pohony jsou chráněny pojistkami.

Jednotlivé měniče jsou řešeny modulárně, tzn. že každý měnič má svůj plošný spoj, kde je samotný obvod měniče, kondenzátorová baterie, externí čidlo proudu a pomocná elektronika. Modulární způsob skládání měničů má značnou univerzalitu v případě modifikace daného pohonu.

3.1 Výběr měniče a volba řízení

Jako výkonový měnič pro řízení stejnosměrných motorů byl vybrán čtyřkvadrantový pulsní měnič realizovaný obvodem BTM7752G od firmy Infineon. Tento obvod svými

parametry vyhovuje řízení obou stejnosměrných motorů, navíc díky své topologii umožňuje při obou směrech otáčení motorický i generátorický chod.

Jako způsob řízení čtyřkvadrantového pulsního měniče bylo možné zvolit buď dvojúrovňové řízení nebo tříúrovňové řízení. Bylo zvoleno tříúrovňové řízení díky svým výhodám, které jsou zmíněné v kapitole 3.1.2.

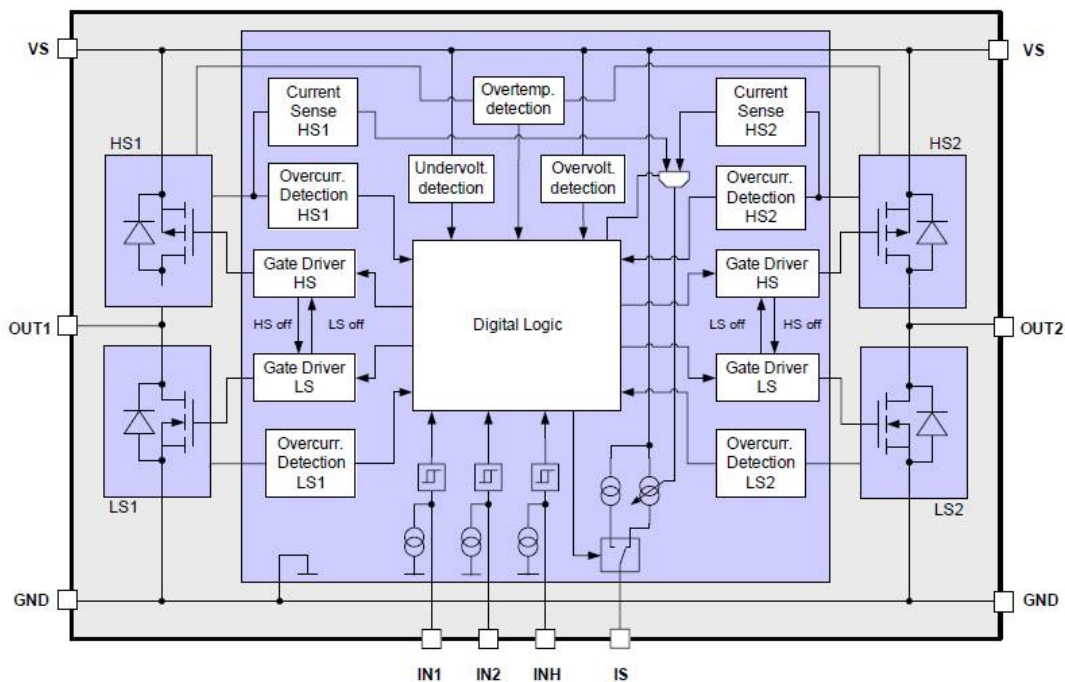
3.1.1 Měnič BTM7752G

Měnič BTM7752G je integrovaný čtyřkvadrantový pulsní měnič určený pro řízení DC motorů. Tento obvod může pracovat s maximálním napájecím napětím 48V, trvalým výstupním proudem 4A a spínacím kmitočtem až 25kHz. Výkonové spínače tohoto obvodu jsou MOSFET tranzistory,



Obr. 3.2 Obvod BTM7752G [3]

kteřé jsou společně s drivery a řídicí logikou integrované v jednom čipu. Díky integrovaným driverům a řídicí logice je možné ovládat měnič přímo výstupními piny mikroprocesoru, protože logické úrovně řídicích pinů měniče jsou totožné s logickými úrovněmi řídicího systému robotu. Tento obvod je kromě výkonových tranzistorů a řídicí logiky vybaven i diagnostickými a ochrannými prvky, jako je detekce přepětí, podpětí, přehřátí čipu a detekce nadproudu. Při vyhodnocení poruchy se měnič automaticky vypíná a signalizuje poruchu vysokou logickou úrovní na pinu IS. Dále je tento obvod vybaven generátorem mrtvých časů a senzorem proudu. Vnitřní uspořádání měniče BTM7752G je znázorněno na Obr.3.3 [11].



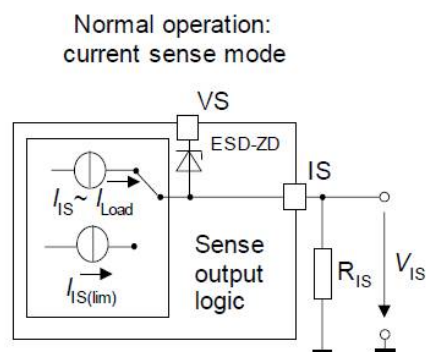
Obr. 3.3 Vnitřní uspořádání měniče BTM7752G [4]

Tab. 1 Vstupy a výstupy měniče BTM7752G

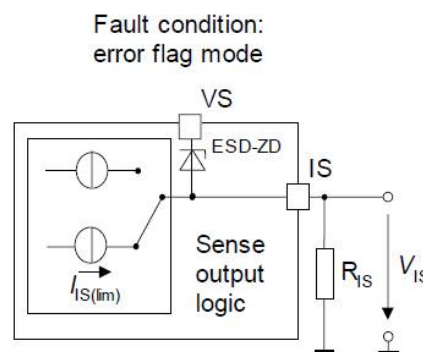
Označení pinu	Funkce pinu
VS	Napájení
GND	Zem
OUT1	Výkonový výstup první větve měniče
OUT2	Výkonový výstup druhé větve měniče
INH	Inhibit pin, slouží pro aktivaci/deaktivaci měniče
IN1	Vstup pro řídicí signál první větve měniče
IN2	Vstup pro řídicí signál druhé větve měniče
IS	Výstupní stavový pin, který slouží jako výstup integrovaného čidla proudu s možností signalizace poruchy.

Funkce IS pinu:

Stavový pin IS je kombinovaný výstup, který slouží jako výstup interního čidla proudu měniče nebo jako výstup pro signalizaci poruchy. Výstupní pin IS má proudový charakter, aby bylo možné tento výstup vyhodnocovat mikroprocesorem, musí být výstupní proud pinu IS převeden na napětí pomocí externího rezistoru R_{IS} .



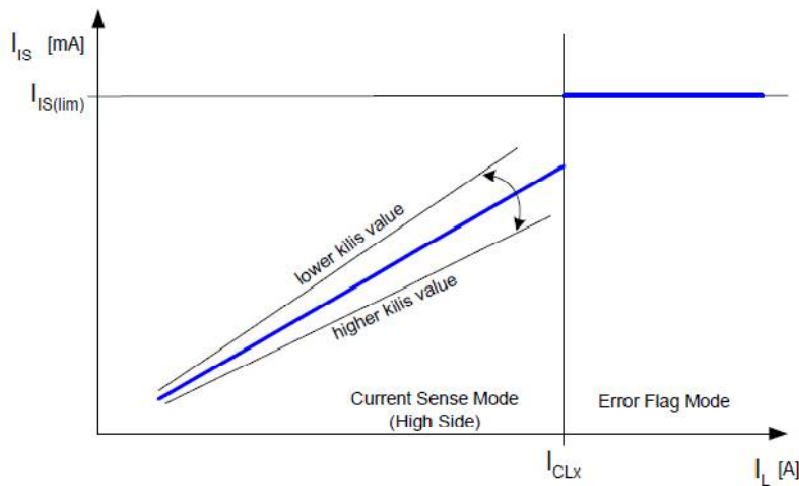
Obr. 3.4 Pin IS jako výstup čidla proudu [5]



Obr. 3.5 Pin IS jako indikátor poruchového stavu [6]

V případě, kdy měnič není v poruše, chová se IS pin jako výstup interního čidla proudu. Výstupní proud pinu IS je v tomto případě úměrný proudu tekoucímu do zátěže. Pomocí odporu R_{IS} můžeme nastavit převodní poměr mezi výstupním proudem pinu IS a napětím na odporu R_{IS} . V tomto režimu výstupní proud pinu IS nedosáhne maximální hodnoty $I_{S(lim)}$.

V případě, kdy se aktivuje nějaká z ochran měniče, přepne se výstupní proud pinu IS na hodnotu $I_{S(lim)}$. Tento proud způsobí maximální úbytek napětí na odporu R_{IS} čímž je indikována porucha měniče. Na Obr.3.6 je znázorněna závislost výstupního proudu IS pinu I_{IS} a proudu zátěže I_L . Hodna I_{CLx} je velikost proudu zátěže při které reagují nadproudové ochrany měniče BTM7752G.



Obr. 3.6 Závislost proudu IS pinu I_{IS} a proudu zátěží I_L [7]

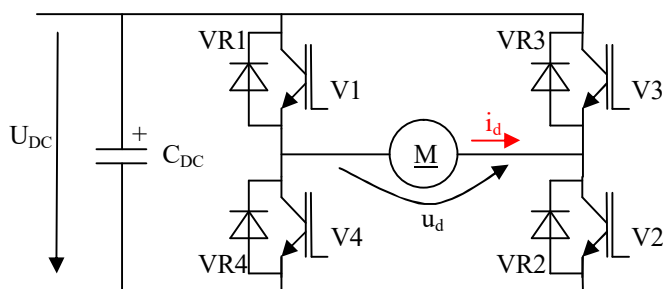
Interní čidlo proudu měniče BTM7752G měří proud tekoucí horními výkonovými spínači jak je naznačeno na Obr.3.3. Výstup interního čidla je absolutní, tudíž udává pouze velikost proudu zátěží nikoliv polaritu. Polarita proudu by se musela určovat ze spínací kombinace, což by bylo v některých případech velmi obtížné. Navíc bylo testováním zjištěno, že interní čidlo neměří příliš věrně malé proudy, řádově desetin ampér. Proto je výstupní pin IS používán pouze jako signalizace poruchy a pro měření proudu zátěží je využíván externí senzor proudu.

3.1.2 Tříúrovňové řízení měniče

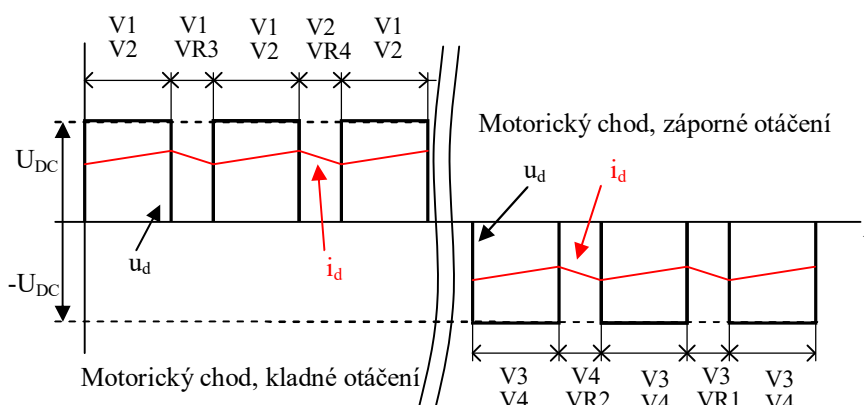
Tříúrovňové řízení je charakteristické tím, že se výstupní napětí měniče mění mezi třemi hladinami. Jednotlivé hladiny jsou U_{DC} , $-U_{DC}$, a 0 , kde U_{DC} je napětí stejnosměrné strany měniče. Výhoda tohoto řízení spočívá ve značné minimalizaci zvlnění výstupního proudu měniče, tedy i momentu stejnosměrného motoru, oproti zvlnění, které by nastalo při dvouúrovňovém řízení. Další výhodou oproti dvouúrovňovému řízení je skutečnost, že při tříúrovňovém řízení nedochází k periodické výměně jalové energie mezi indukčností zátěže(motoru) a stejnosměrným zdrojem. Tudíž dochází i k menšímu zatížení měniče [1, str.129].

Realizace tříúrovňového řízení je provedena pomocí komparační PWM modulace se dvěma řídicími signály, která je generována z příslušné kloubové řídicí jednotky robotu. Řídicí signály jsou vůči sobě inverzní což způsobí, že se mezi takty vedení do zátěže vloží nulové takty, při kterých je zátěž zkratována. Nulové takty lze realizovat sepnutím buď obou horních spínačů nebo sepnutím obou spodních spínačů. Během řízení se realizace nulových taktů střídá, aby se rozložilo zatížení prvků měniče. Velikost střední hodnoty výstupního napětí měniče je dána poměrným sepnutím z . Pokud je řídicí signál kladný, pohybuje se

výstupní napětí měniče mezi hladinami U_{DC} a 0, pokud je řídicí signál záporný, pohybuje se výstupní napětí měniče mezi hladinami $-U_{DC}$ a 0. Princip tříúrovňového řízení je naznačen na *Obr.3.8*.



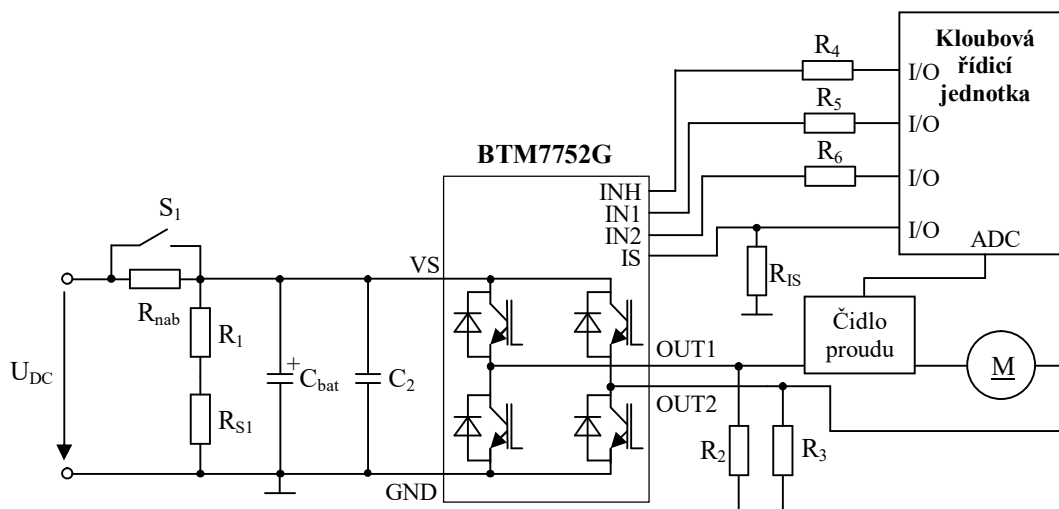
Obr. 3.7 Schéma čtyřkvadrantového pulsního měniče



Obr. 3.8 Časové průběhy napětí a proudu při tříúrovňovém řízení

3.2 Návrh obvodového zapojení měniče BTM7752G

Na *Obr.3.9* je uvedeno obvodové zapojení měniče BTM7752G. Schéma se skládá z nabíjecího obvodu, kondenzátorové baterie, externího čidla proudu a samotného měniče BTM7752G, který je svými logickými vstupy a výstupy připojen ke kloubové řídicí jednotce.



Obr. 3.9 Obvodové zapojení měniče BTM7752G

V následující tabulce *Tab.2* jsou vypsané jednotlivé součástky z obvodového zapojení měniče BTM7752G. V tabulce jsou uvedeny hodnoty a stručný popis součástek.

Tab. 2 Vstupy a výstupy měniče BTM7752G

Součástka	Hodnota	Funkce
R_{nab}	8,2 Ω	Nabíjecí odpor kondenzátorové baterie
S_1	-	Relé
R_1	560 Ω	Součást děliče pro zapínací cívku relé
R_{S1}	125 Ω	Odpor zapínací cívky relé
C_{bat}	88 mF	Kondenzátorová baterie
C_2	470 nF	Filtrační kondenzátor měniče BTM7752G
R_2	10 k Ω	Pull down rezistor
R_3	10 k Ω	Pull down rezistor
R_4	4,7 k Ω	Omezovač proudu mezi logickými vstupy/výstupy
R_5	4,7 k Ω	Omezovač proudu mezi logickými vstupy/výstupy
R_6	4,7 k Ω	Omezovač proudu mezi logickými vstupy/výstupy
R_{IS}	1 k Ω	Převodník proudového výstupu IS pinu na napětí

Pull down rezistory R_2 a R_3 připojené mezi OUT1 - GND a OUT2 - GND jsou zde z důvodu definování potenciálu výkonových výstupů měniče v případě rozpojené zátěže. Mohou být také využity k detekci připojení zátěže [11, str.22].

V následujících podkapitolách je popsán návrh jednotlivých částí obvodového schématu měniče BTM7752G.

3.2.1 Kondenzátorové baterie

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, měniče jsou řešeny modulárně, tudíž každý měnič má svoji kondenzátorovou baterii. Každá kondenzátorová baterie je tvořena paralelním spojením čtyř elektrolytických kondenzátorů. Kapacita jednotlivých kondenzátorů je 22mF. Kapacita celé baterie jednoho měniče je tedy 88mF. V robotickém systému jsou tři moduly měničů zapojené paralelně. Jmenovité napětí kondenzátorů a tedy i celé baterie je 25V.

Velikost kapacity kondenzátorové baterie byla určena empiricky, na základě měření zvlnění napětí na stejnosměrné straně měniče při opakující se reverzací proudu motorem. Hodnota kapacity baterie 88mF u každého měniče vyhovuje s dostatečnou rezervou pro současné naladění celé regulační struktury. Pokud by při dalším vývoji nastala potřeba, naladit regulační strukturu na vyšší dynamiku, tato kondenzátorová baterie by nejspíše nezvládala pohltit brzdou energii a mohlo by vznikat přepětí. Vzniklá brzdou energie by se musela mařit ve spínaném odporu.

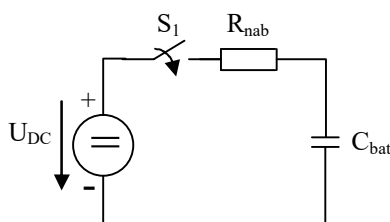
3.2.2 Nabíjecí obvod kondenzátorové baterie

Nabíjecí obvod kondenzátorové baterie je řešen nabíjecím odporem R_{nab} , který je překlenutý mechanickým spínačem. Jako mechanický spínač bylo vybráno relé s DC cívkou OMRON RELEG6D-1A-05DC. Cívka relé společně s odporem R_1 tvoří dělič, který je navržen tak, aby kontakt sepnul v okamžiku nabití kondenzátorové baterie. Parametry relé jsou znázorněny v následující tabulce *Tab.3*.

Tab. 3 Parametry relé OMRON RELEG6D-1A-05DC

Parametry DC cívky		Parametry kontaktu	
U_N	5V	I_L	5A
I_N	40mA	U_{MaxAC}	250V
R_{S1}	125 Ω	U_{MaxDC}	30V
U_{zap}	3,5V		
U_{vyp}	0,5V		

Při návrhu nabíjecího obvodu byl zanedbán filtrační kondenzátor C_2 , kvůli jeho nízké kapacitě oproti kapacitě kondenzátorové baterie. Nabíjecí odpor R_{nab} byl navržen následujícím způsobem.



Obr. 3.10 Schéma nabíjecího obvodu

Nabíjecí proces kondenzátorové baterie lze popsat rovnicí (3.1).

$$U_{C_{bat}} = U_{DC} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) ; \quad \tau = R_{nab} \cdot C_{bat} \quad (3.1)$$

Časová konstanta byla zvolena $\tau = 0,8s$. Dosazením do vztahu (3.2) vyšlo

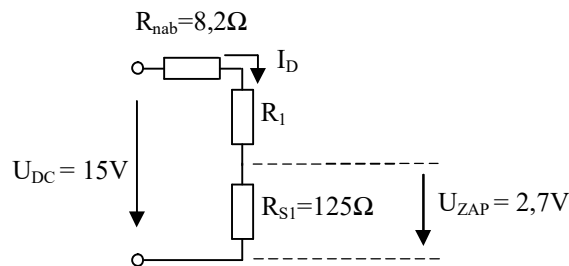
$$R_{nab} = \frac{\tau}{C_{bat}} = \frac{0,8}{88 \cdot 10^{-3}} = 9,09\Omega \rightarrow 8,2\Omega \quad (3.2)$$

Vypočtená hodnota nabíjecího odporu byla následně upravena podle řady E12, tudíž $R_{nab} = 8,2\Omega$. Ztrátový výkon $P_{R_{nab}ZTR}$ nabíjecího odporu byl určen z empirického vzorce (3.3), který je uveden v literatuře [6, str.28].

$$P_{R_{nab}ZTR} = \frac{U_{DC}^2}{10 \cdot R_{nab}} = \frac{15^2}{10 \cdot 8,2} = 2,74W \rightarrow 5W \quad (3.3)$$

Vypočtený ztrátový výkon nabíjecího odporu je volen 5W, z důvodu větší rezervy pro případný další vývoj robotu.

Zapínání kontaktu relé je realizováno DC cívkou, která společně s odporem R_1 tvoří dělič. Odpor DC cívky relé je $R_{S1}=125\Omega$. Výrobce udává, že by relé mělo sepnout, je-li na cívce alespoň 70% z jmenovitého napětí, tedy 3,5V. Měřením bylo zjištěno, že relé spíná už při napětí 2,7V. Na základě těchto informací byl dělič navržen následujícím způsobem.



Obr. 3.11 Schéma návrhu děliče

Velikost rezistoru R_1 byla určena podle vzorce (3.4).

$$U_{ZAP} = U_{DC} \cdot \frac{R_{S1}}{R_{S1} + R_1 + R_{nab}}$$

$$R_1 = \frac{U_{DC}}{U_{ZAP}} \cdot R_{S1} - (R_{S1} + R_{nab}) \quad (3.4)$$

$$R_1 = \frac{15}{2,7} \cdot 125 - (125 + 8,2) = 561,24\Omega \rightarrow 560\Omega$$

Ztrátový výkon rezistoru R_1 byl určena na základě proudu I_D protékajícího děličem v ustáleném stavu tj. v případě kdy už je R_{nab} přemostěn.

$$I_D = \frac{U_{DC}}{R_1 + R_{S1}} = \frac{15}{560 + 125} = 22mA$$

$$P_{ZTR_{R1}} = R_1 \cdot I_D^2 = 560 \cdot 0,022^2 = 0,27W \rightarrow 0,6W \quad (3.5)$$

3.2.3 Externí čidlo proudu

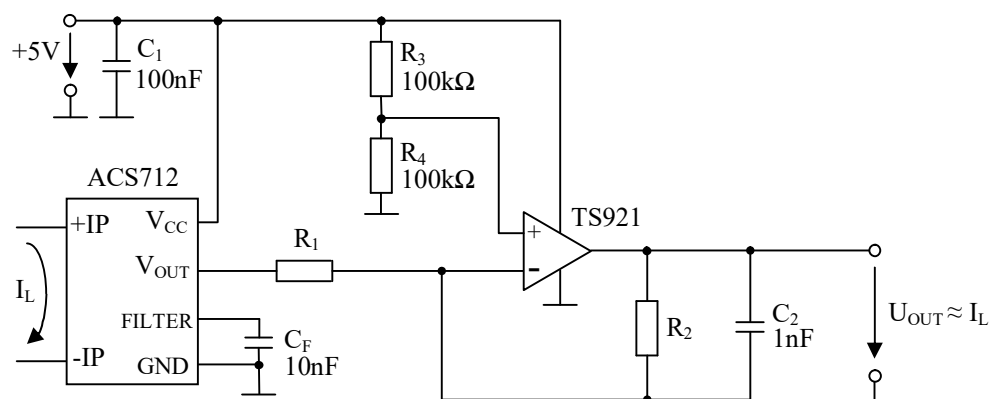
Jako externí čidlo proudu byl vybrán obvod ACS712 doplněný rail-to-rail operačním zesilovačem TS921, který zesiluje napěťový výstup externího čidla. Obvod ACS712 je integrovaný obvod, který umožňuje měření obou polarit proudu. Čidlo ACS712 se skládá ze dvou vzájemně izolovaných částí. První část je tvořena integrovanou měděnou cestou, kterou prochází měřený proud. Druhá část se skládá z Hallových senzorů.

Proud protékající měděnou cestou první části obvodu vytváří magnetické pole, které je snímáno Hallovými senzory druhé části obvodu. Výstupem čidla ACS712 je tedy Hallovo

napětí, které je úměrné měřenému proudu. Čidlo ACS712 dále umožňuje připojit filtrační kondenzátor $C_F=1\text{nF}$, který filtruje šum měřeného proudu a tím zajišťuje stabilnější výstupní napětí V_{out} .

Rozsah tohoto čidla je $\pm 5\text{A}$ s tím, že čidlo můžeme přetížít až pětinasobným proudem. Pokud měříme proud nad $\pm 5\text{A}$, projeví se to nelineární závislostí mezi měřeným proudem a výstupním napětím. Měřením bylo zjištěno, že pokud budeme toto čidlo provozovat v rozsahu $\pm 6\text{A}$, tak se nelineární závislost téměř neprojeví. Tudíž je toto čidlo použito pro měření proudu jak motoru PG521 s $I_N = 2850\text{mA}$, tak i pro měření proudu motoru PG420 s $I_N = 5500\text{mA}$.

Obvodové zapojení čidla ACS712 a zesilujícího obvodu s operačním zesilovačem je znázorněno na Obr.3.12.



Obr. 3.12 Schéma zapojení čidla proudu ACS712 a zesilujícího obvodu

Pomocí odporů R_1 a R_2 , jejichž poměr určuje zesílení operačního zesilovače, bylo nastaveno vhodné zesílení pro každý typ motoru. Vhodným zesílením je myšleno takové zesílení, které převede rozsah měřeného proudu daného motoru na co nejvyšší rozsah výstupního napětí U_{OUT} v rozmezí 0-5V. Tím je získána vyšší citlivost AD převodu výstupního napětí U_{OUT} , tedy i výsledného čísla v mikroprocesoru. Konkrétní hodnoty odporů, zesílení a rozsahy měřených proudů jsou uvedeny v Tab.4.

Tab. 4 Parametry externích čidel proudu se zesilovacími obvody

Motor	R_1	R_2	Zesílení	Rozsah měřeného proudu
PG420	$1\text{k}\Omega$	$2,7\text{k}\Omega$	2,7x	$\pm 3\text{A}$
PG521	$1\text{k}\Omega$	$3,9\text{k}\Omega$	3,9x	$\pm 6\text{A}$

3.3 Návrh plošného spoje pro měnič BTM7752G

Plošný spoj měniče je tvořen kondenzátorovou baterií, nabíjecím obvodem kondenzátorové baterie, externím čidlem proudu se zesilovacím obvodem a samotným obvodem BTM7752G. Plošný spoj je také osazen konektorem na plochý kabel a signalizační LED diodou, která signalizuje, že jsou připojené řídicí signály z řídicí jednotky.

Plošný spoj měniče je proveden dvouvrstvou technologií. Při návrhu bylo využito tzv. sendvičové struktury, která je charakteristická tím, že na jedné vrstvě plošného spoje je veden kladný potenciál a na druhé straně je veden nulový potenciál. Tím je zajištěno rovnoměrné rozložení proudu a tedy nedochází k oteplení určitých míst plošného spoje. Navíc tato struktura značně eliminuje parazitní indukčnost přívodů mezi kondenzátory a výkonovými prvky měniče. Jednotlivé vrstvy DPS měniče BTM7752G jsou uvedeny v příloze A.



Obr. 3.13 Modul měniče s obvodem BTM7752G

4 Návrh a realizace senzorického systému tříosého robotu

Senzorický systém tříosého robotu se skládá z externích čidel proudu, snímače nulové polohy kloubu č.0, senzorů rychlosti a senzorů polohy. Jelikož externím čidlům proudu byla věnována kapitola 3.2.3.

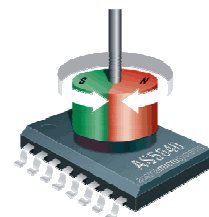
V následujících kapitolách bude popsán způsob realizace snímání rychlosti a polohy v jednotlivých kloubech tříosého robotu.

4.1 Snímání polohy kloubu č.1 a kloubu č.2

Pro snímání absolutní polohy kloubu č.1 a kloubu č.2 byl vyvinut prototyp senzoru polohy, který je založen na integrovaném obvodu AS5040. Senzory polohy jsou v případě těchto kloubů umístěny na straně nízkých otáček převodovky motoru. Tím je zajištěno, že vyhodnocená poloha ramene není zkreslená vůlema v převodovce.

4.1.1 Integrovaný obvod AS5040

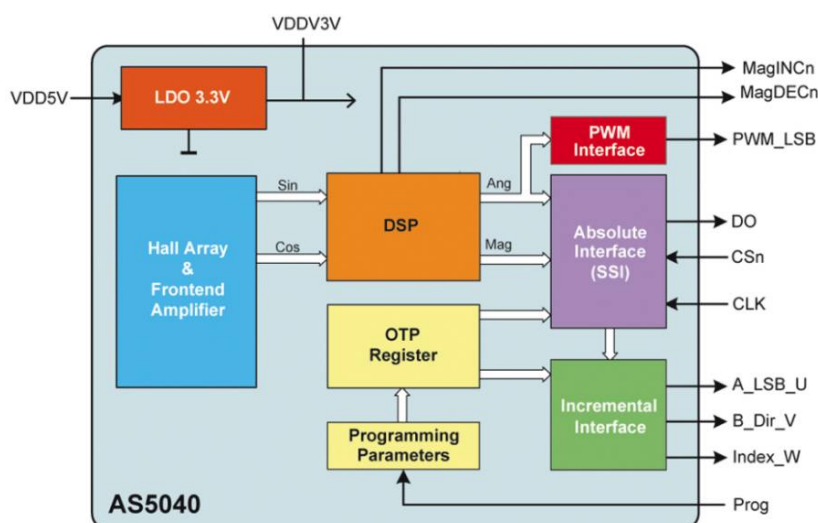
Integrovaný obvod AS5040 je bezkontaktní rotační enkodér, který v kombinaci s dvoupólovým magnetem umožňuje měřit jak absolutní polohu tak i rychlost otáčení magnetu. Magnet může být umístěn buď nad povrchem nebo pod povrchem čipu.



Princip obvodu AS5040 je založen na Hallově jevu. Hallové prvky jsou rozmístěny na povrchu integrovaného obvodu, což umožňuje snímat rozložení magnetického pole na povrchu čipu. Na základě znalosti rozložení magnetického pole a jeho změn, je obvod AS5040 schopný určit absolutní polohu nebo rychlost otáčení magnetu.

Obvod AS5040 také umožňuje uživatelskou volbu rozlišení snímání, a to buď 7, 8, 9 nebo 10bitů. Dále umožňuje naprogramování nulové polohy, která se může lišit od mechanické nulové polohy magnetu. Senzor AS5040 je vybaven také výstupy MagINCn a MagDECn, které je možné využít k detekci pohybu magnetu v ose Z nebo k signalizaci chybového stavu snímání polohy a to v případě kdy je magnet mimo rozsah čidla.

V nejvyšším rozlišení 10bitů je senzor AS5040 schopný snímat absolutní polohu s přesností $0,35^\circ$. Maximální rychlost otáčení magnetu, kterou je schopen senzor AS5040 zaznamenat je 30 000ot/min. [12]



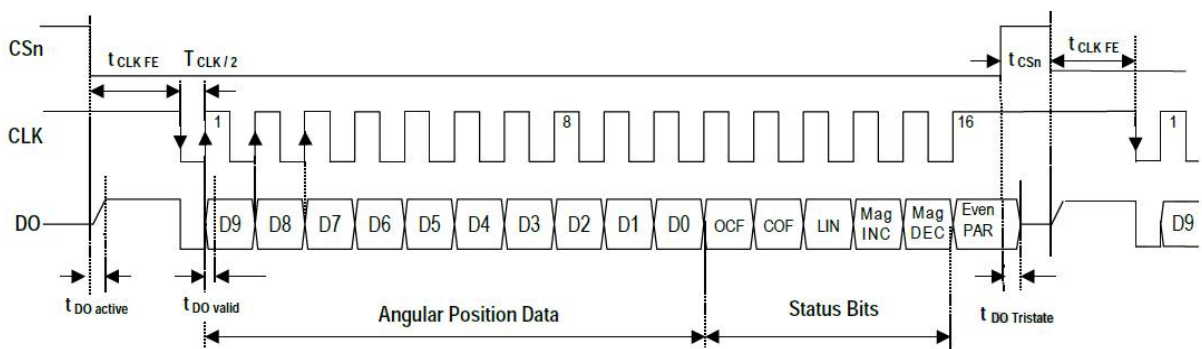
Obr. 4.2 Vnitřní uspořádání integrovaného obvodu AS5040 [9]

4.1.2 Výstupní režimy senzorů polohy

Senzor polohy disponuje dvěma digitálními výstupy absolutní polohy a třemi inkrementálními výstupy. Digitální výstupy jsou sériové rozhraní a PWM výstup. Inkrementální výstupy jsou kvadrurní A/B mód, step/direction mód a brushless DC motor commutation mód.

Sériové rozhraní senzoru polohy

Sériové rozhraní slouží jako výstup absolutní polohy. Integrovaný obvod AS5040 se chová jako SLAVE, tudíž komunikace musí být řízena mikroprocesorem podle protokolu vyznačeném na *Obr. 4.3*.



Obr. 4.3 Protokol sériového rozhraní [10]

Protokol se skládá z inicializační části komunikace, kde se pomocí logické nuly signálu CSn vybere příslušný senzor polohy. Dále musí být dodržena časová prodleva $t_{CLK FE}$, během které se vybraný senzor připraví na vyslání dat.

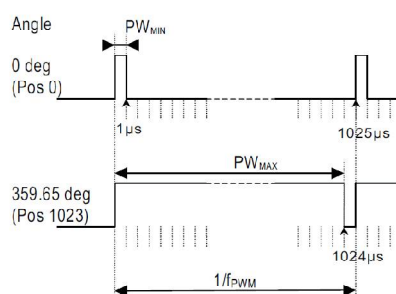
Následuje datová část protokolu, kde se nejprve posílá deset bitů nesoucí informaci o absolutní poloze a poté se posílají stavové bity. Stavové bity obsahují vnitřní systémové informace odvodu AS5040, které slouží k odhalení chybného vyhodnocení polohy. Stavový bit OCF signalizuje dokončení kompenzace offsetu. V okamžiku, kdy je tento bit nastaven do logické jedničky, jsou přijatá data platná. Bit COF logickou jedničkou hlásí chybu rozsahu, což může být způsobené vychýlením magnetu z tolerančních mezí v osách X-Y-Z. Pokud je tento bit v logické jedničce, přijatá data jsou neplatná. Bit LIN logickou jedničkou indikuje kritickou výstupní linearitu. Tento stav může nastat v případě, kdy se magnet pohybuje na hranici tolerančních mezí v osách X-Y-Z. Pokud je bit LIN nastaven do logické jedničky mohou být data o absolutní poloze považována jako platná, ale jsou zkreslená. Stavové bity MagINCn a MagDECn slouží k signalizaci pohybu magnetu v ose Z. Pokud jsou oba tyto bity v logické jedničce signalizuje to, že je magnet příliš vzdálen od povrchu čipu. V tomto případě jsou přijatá data neplatná.

Celý protokol je zakončen sudou paritou. Paritní bit je nastaven při každém přenosu tak, aby celkový počet jedniček v přenášeném paketu byl sudé číslo. To umožňuje mikroprocesoru odhalit jednonásobnou chybu vzniklou při přenosu dat.

Sériové rozhraní senzoru polohy také umožňuje tzv. Daisy Chain mód, při kterém jsou jednotlivé senzory zapojeny kaskádně. Pakety dat postupně procházejí od posledního senzoru v řetězci přes celou kaskádu až do mikroprocesoru.

PWM výstup senzoru polohy

Tento výstupní mód signalizuje absolutní polohu pomocí střidy PWM signálu. Kmitočet PWM je $f_{PWM} = 975,6\text{Hz}$.

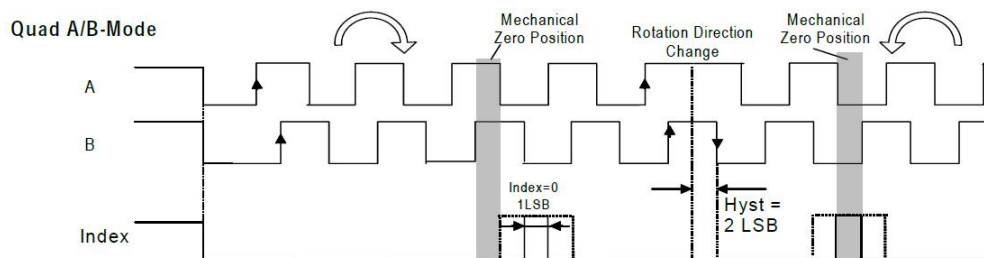


Obr. 4.4 Výstup PWM [11]

Tento výstup může být vyhodnocen buď přímo mikroprocesorem tak, že se bude měřit doba od náběžné hrany k sestupné, nebo použitím filtru DP a měřením střední hodnoty vyfiltrovaného PWM signálu.

Kvadrurní A/B výstup senzoru polohy

Kvadrurní A/B mód je inkrementální výstup založený na dvou vzájemně posunutých signálech A a B, které jsou od sebe posunuty vždy o 90° . Fázový posun mezi signály indikuje směr otáčení magnetu. Pokud předbíhá signál A otáčí se magnet po směru hodinových ručiček, pokud předbíhá signál B otáčí se magnet proti směru hodinových ručiček. Paralelně s výstupními signály A a B jde i signál Index, který signalizuje průchod nulovou polohou.



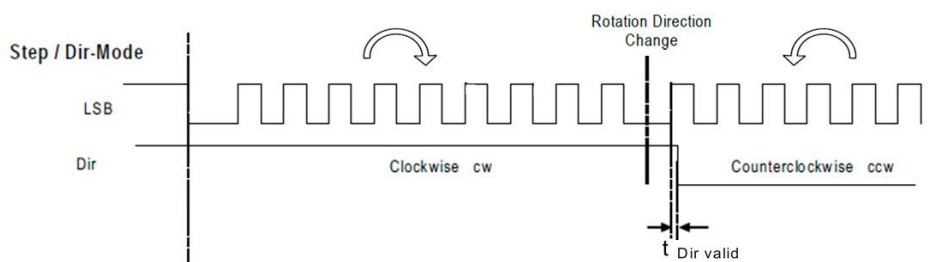
Obr. 4.5 Kvadrurní A/B mód [12]

Jednotlivé hrany signálů A a B definují elementární pootočení magnetu, které je dáno vztahem (4.1). Pro rozlišení 10 bitů vychází elementární pootočení magnetu $0,3516^\circ$.

$$\varphi_{element} = \frac{360}{2^N} [^\circ] \quad N = \text{počet bitů senzoru} \quad (4.1)$$

Výstup step/direction senzoru polohy

Výstup step/direction je inkrementální výstup, který se skládá ze signálu LSB a signálu Dir. Jednotlivé hrany pulsů signálu LSB definují opět elementární pootočení magnetu, které je dáno zvoleným rozlišením čidla. Signál Dir indikuje směr otáčení magnetu.



Obr. 4.6 Step/direction mód [13]

Brushless DC motor commutation mód senzoru polohy

Tento výstupní mód je určen pro BLDC motory. Jedná se o tři výstupní signály, které na základě polohy rotoru definují komutaci BLDC motoru. Tyto signály jsou navzájem posunuté o 120° nebo 60° . Fázový posun je programovatelný.

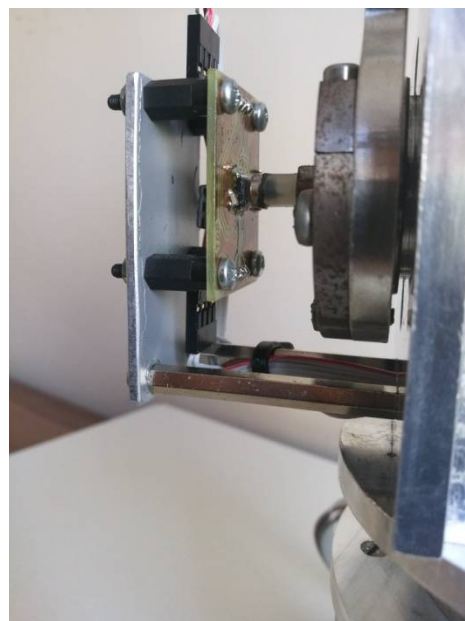
4.1.3 Mechanické provedení senzorů polohy

Čidlo polohy se skládá z nosné konstrukce, plošného spoje s elektronikou a magnetu. Nosná konstrukce je tvořena hliníkovým profilem, který je pomocí ocelových distančních sloupků uchycen k nepohyblivé části daného kloubu robotu. Na hliníkovém profilu je připevněn plošný spoj s obvodem AS5040 umístěným v jeho středu. Celý senzor polohy je umístěn tak, aby středem obvodu AS5040 procházela osa hřídele. Poslední částí čidla polohy je dvupólový magnet, který je připevněn k pohyblivé části kloubu tak, aby byl v ose hřídele. Vzdálenost mezi povrchem obvodu AS5040 a magnetem je zhruba 1mm. Průměr magnetu je 6mm a tloušťka 2,5mm. Magnet je k hřídeli motoru připevněn pomocí plastového distančního sloupku. Distanční sloupek má na jednom konci přilepený magnet a na druhém je šroub se závitem M3. Závít M3 je i ve středu hřídele motoru.

Mechanické provedení senzoru polohy je navrženo tak, aby byla umožněna rychlá a jednoduchá montáž či demontáž celého senzoru i s nosnými prvky. Zároveň je uchycení čidla značně robustní a odolné proti vychýlení čidla z osy magnetu.



Obr. 4.7 Senzor polohy kloubu č.2



Obr. 4.8 Senzor polohy kloubu č.1

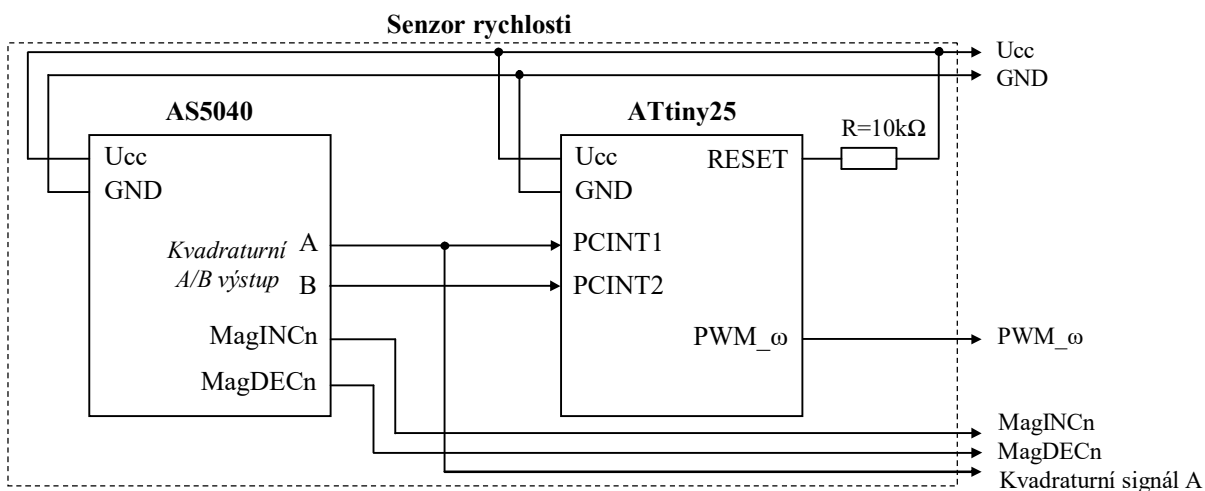
4.2 Snímání rychlosti kloubu č.1 a kloubu č.2

Pro snímání rychlosti kloubu č.1 a kloubu č.2 byl vyvinut prototyp senzoru rychlosti, jehož základem je opět integrovaný obvod AS5040. Senzory rychlosti navíc obsahují pomocnou řídicí jednotku Atmel ATtiny25, která vyhodnocuje rychlost z inkrementálního výstupu obvodu AS5040. Výstupem čidla rychlosti je PWM signál, jehož střída je úměrná změřené rychlosti.

Senzory rychlosti jsou umístěny na straně vysokých otáček. Tím je zajištěn dostatečný počet výstupních pulzů z obvodu AS5040 i při nízkých otáčkách motoru.

4.2.1 Realizace senzorů rychlosti

Blokové schéma senzoru rychlosti je znázorněno na Obr.4.9.



Obr. 4.9 Blokové schéma senzoru rychlosti

Jako výstupní režim obvodu AS5040 je využíván kvadrurní A/B mód v rozlišení 10bitů tzn. že během jedné otáčky se vygeneruje 2x256 pulzů. Signály A a B jsou přivedeny na vstupní piny PCINT1 a PCINT2 externího přerušeni mikroprocesoru ATtiny25. Oba vstupy externího přerušeni snímají jak náběžnou tak i sestupnou hranu. Ze znalosti počtu hran za dobu $T_{PWM_\omega} = 2,042ms$ mikroprocesor vypočte otáčky na straně vysokých otáček podle vztahu (4.2). Perioda $T_{PWM_\omega} = 2,042ms$ je dána nastavením Timeru_0, který generuje výstupní PWM_ω signál.

$$n_{strana\ vysokých\ otáček} = \frac{(\text{počet hran} \cdot \varphi_{element_rad}) \cdot 60}{2\pi T_{PWM_\omega}} [ot/min] \quad (4.2)$$

$$\varphi_{element_rad} = \frac{2\pi}{2^N} [rad]; \quad N = \text{počet bitů senzoru} \quad (4.3)$$

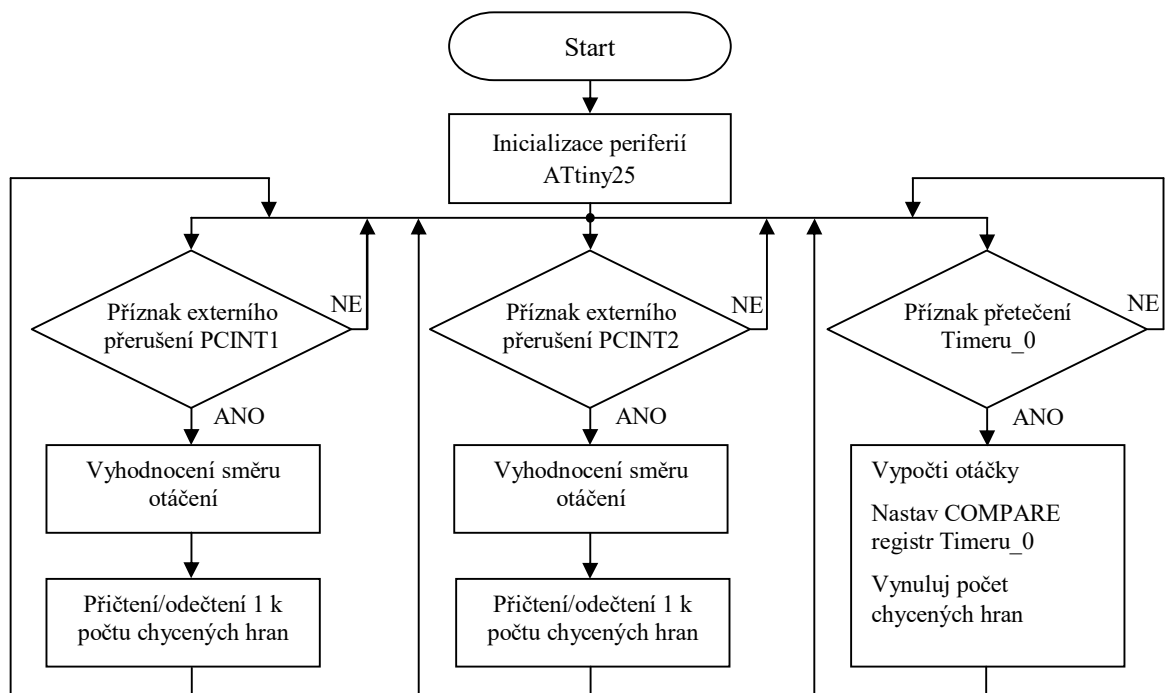
Dále dojde k přepočtení otáček ze strany vysokých otáček na stranu nízkých otáček dle vztahu (4.4).

$$n_{strana\ nízkých\ otáček} = -(n_{strana\ vysokých\ otáček} \cdot \text{převodový poměr}) [ot/min] \quad (4.4)$$

V posledním kroku pomocná řídicí jednotka ATtiny25 přenormuje změřené otáčky na střidu osmibitového výstupního PWM_ω signálu. Sensory rychlosti jsou znormovány na měření otáček v rozsahu $\pm 48ot/min$ na straně nízkých otáček.

Výstupy MagINCn, MagDECn a kvadrurní signál A jsou určeny pro zabezpečovací algoritmus, kterému je věnována kapitola 6.3.

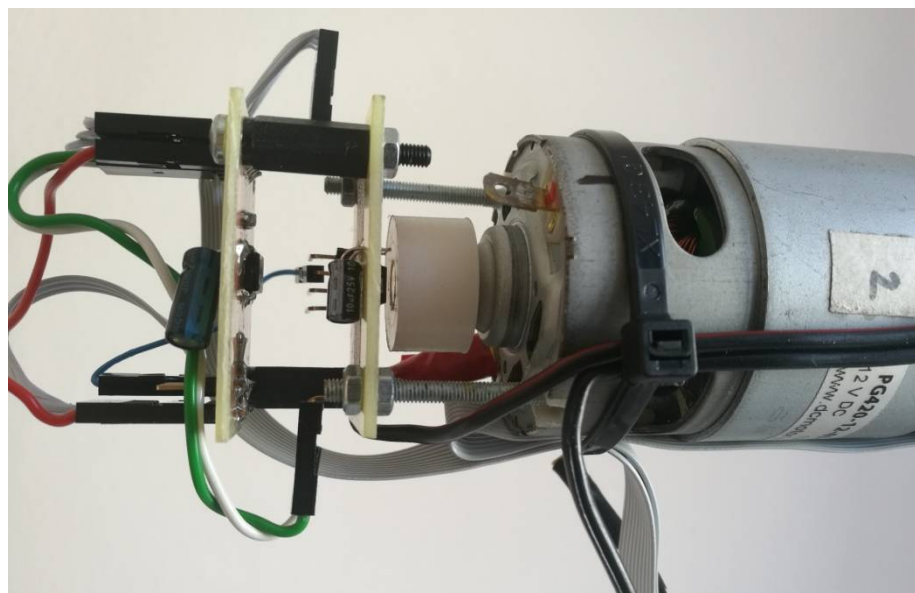
Vývojový diagram mikroprocesoru ATtiny25 je znázorněn na Obr.4.10.



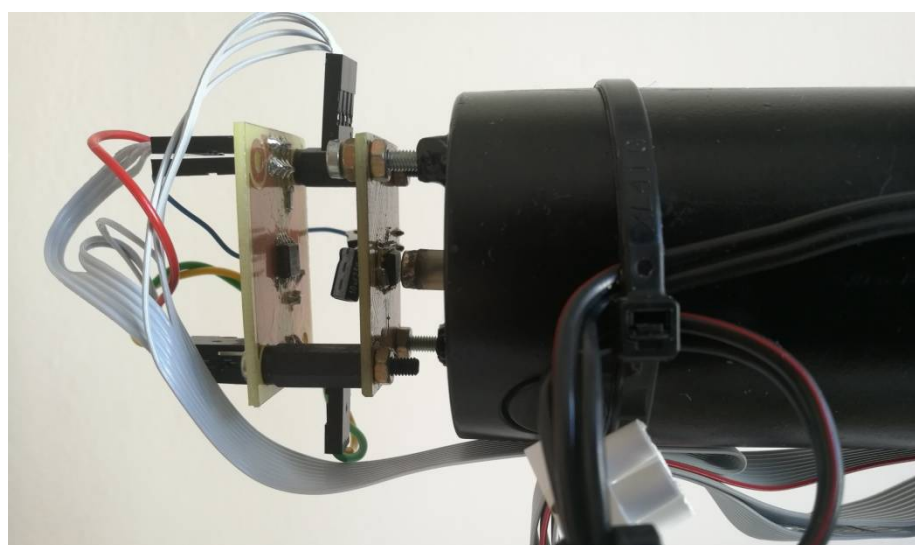
Obr. 4.10 Vývojový diagram pomocné řídicí jednotky ATtiny25

4.2.2 Mechanické provedení senzorů rychlosti

Mechanické provedení senzorů rychlosti je velmi podobné mechanickému provedení senzorů polohy. Sensory rychlosti se opět skládají z nosné konstrukce, plošného spoje s obvodem AS5040 a magnetu. Navíc je zde pouze plošný spoj s mikroprocesorem ATtiny25, který je připevněn za plošným spojem s čidlem AS5040. Nosná konstrukce je v tomto případě tvořena distančními sloupky, které jsou mezi plošnými spoji a také mezi kostrou motoru a plošným spojem s senzorem AS5040. Ke kostře motoru jsou distanční sloupky připevněny napevno. Magnet je k hřídeli motoru připevněn pomocí silikonového válečku. Celý senzor rychlosti je umístěn tak, aby střed obvodu AS5040 byl v ose hřídele. Vzdálenost mezi povrchem obvodu AS5040 a magnetem je zhruba 1mm.



Obr. 4.11 Senzor rychlosti kloubu č.2



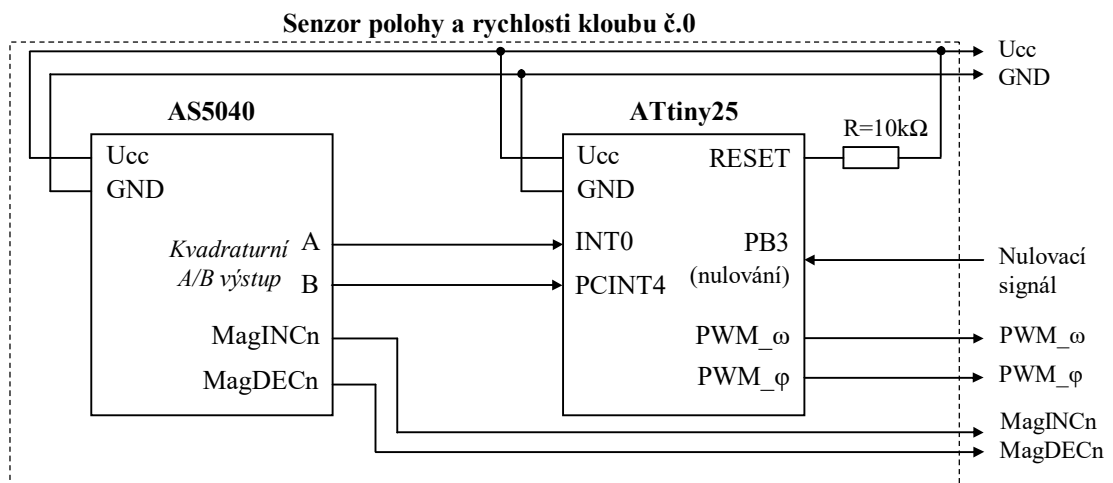
Obr. 4.12 Senzor rychlosti kloubu č.1

4.3 Snímání polohy a rychlosti kloubu č.0

V případě kloubu č.0 nebylo možné z mechanických důvodů umístit senzor polohy na stranu nízkých otáček. Proto je v tomto případě snímání polohy i rychlosti prováděno na straně vysokých otáček společným senzorem.

4.3.1 Realizace senzoru rychlosti a polohy kloubu č.0

Senzor rychlosti a polohy kloubu č.0 vychází z topologie prototypů senzorů rychlosti použitých v kloubu č.1 a kloubu č.2. Skládá se tedy opět z integrovaného obvodu AS5040 a pomocné řídicí jednotky Atmel ATtiny25. Jelikož zde měříme relativní polohu, je zde navíc tzv. senzor nulové polohy.



Obr. 4.13 Blokové schéma senzoru polohy a rychlosti kloubu č.0

Obvod AS5040 zde opět pracuje v kvadrurním A/B režimu v rozlišení 10b. Algoritmus mikroprocesoru ATtiny25, který vyhodnocuje rychlost je řešen stejným způsobem jako v případě senzorů rychlosti. Algoritmus pro vyhodnocení polohy snímá pouze náběžné hrany signálů A a B, které se podle směru otáčení sčítají nebo odčítají.

Jak algoritmus pro vyhodnocení rychlosti, tak i algoritmus pro vyhodnocení polohy je odvozen od Timeru_0, který pracuje s periodou $T_{PWM} = 2,042\text{ms}$. Při přetečení Timeru_0 dojde k přenormování změřené rychlosti i polohy na střídý výstupních PWM signálů.

Senzor polohy a rychlosti kloubu č.0 je vybaven tzv. nulovacím vstupem. Tento vstup slouží k definování nulové polohy při inicializaci robotu.

Výstupy MagINCn a MagDECn jsou určeny pro zabezpečovací algoritmus, kterému je věnována kapitola 6.3.

4.3.2 Realizace senzoru nulové polohy

Senzor nulové polohy je realizován pomocí optické závory TCST 1103 a jezdece, který zacloňuje paprsek závory v případě, je-li kloub č.0 v nulové poloze. Výstupem z toho senzoru je signál, který logickou jedničkou indikuje, že jezdec je mimo závoru. Logická nula indikuje, že se jezdec nachází ve štěrbině optické závory.

Senzor nulové polohy je umístěn v mezeře od axiálního ložiska kloubu č.0, mezi stojícím a pohyblivým kotoučem kostry robotu. Plošný spoj s optickou závorou je připevněn k stojícímu kotouči, jezdec je připevněn k pohyblivému kotouči. Toto umístění nijak neovlivňuje pracovní rozsah robotu.



Obr. 4.14 Senzor polohy a rychlosti kloubu č.0



Obr. 4.15 Senzor nulové polohy kloubu č.0

5 Návrh a realizace automatické regulace pohonů robotu

Automatická regulace jednotlivých pohonů tříosého robotu je řešena kaskádní regulační strukturou. Algoritmus kaskádní regulace polohy je implementován do každé kloubové řídicí jednotky, kde na základě vstupních požadavků od hlavní řídicí jednotky zajišťuje automatické polohování příslušného kloubu robotu.

5.1 Diskrétní PS regulátor

Diskrétní PS regulátor je alternativou spojitého PI regulátoru, kde je integrace regulační odchylky nahrazena sumací. Jelikož diskrétní regulátor pracuje jen v diskrétních okamžicích, je nutné jeho výpočet volat s periodou T_{reg} , která je alespoň dvakrát menší než časová odezva uzavřené soustavy τ_s na jednotkový skok. Pokud má odezva výraznou kmitavou složku, je nutné aby perioda T_{reg} splňovala i podmínku (5.2), kde ω_s je úhlová frekvence kmitů odezvy.

Pokud jsou splněny podmínky (5.1) a (5.2) je možné při návrhu uvažovat, že se diskrétní regulátor chová jako spojité, jelikož tvar výstupního signálu není příliš zkreslen diskretizací. [2, str.83]

$$T_{reg} \leq \frac{\tau_s}{2} \quad (5.1)$$

$$T_{reg} \leq \frac{1}{2\omega_s} \quad (5.2)$$

V mikroprocesoru může být PS regulátor realizován složkovým algoritmem, rekurentním algoritmem nebo anti-windup algoritmem. Rozdíl mezi složkovým a rekurentním algoritmem je ve výpočtu sumační složky. U složkového algoritmu se v každém kroku spočítá nová hodnota sumační složky, kdežto u rekurentního algoritmu se sumace získává z výstupní hodnoty regulátoru v předchozím cyklu. Složkový a rekurentní algoritmus musí být doplněn omezovači, které jednak omezují výstup regulátoru a také zastavují integraci v případě nasycení regulátoru. Nevýhodou těchto dvou algoritmů je skutečnost, že během saturace regulátor nereguluje. U anti-windup algoritmu je místo omezovačů použit korekční člen integrační složky, který je odvozen od rozdílu hodnoty výstupu, který by byl za omezovačem a hodnoty výstupu před omezovačem. Tento algoritmus PS regulátoru reguluje i případě saturace.

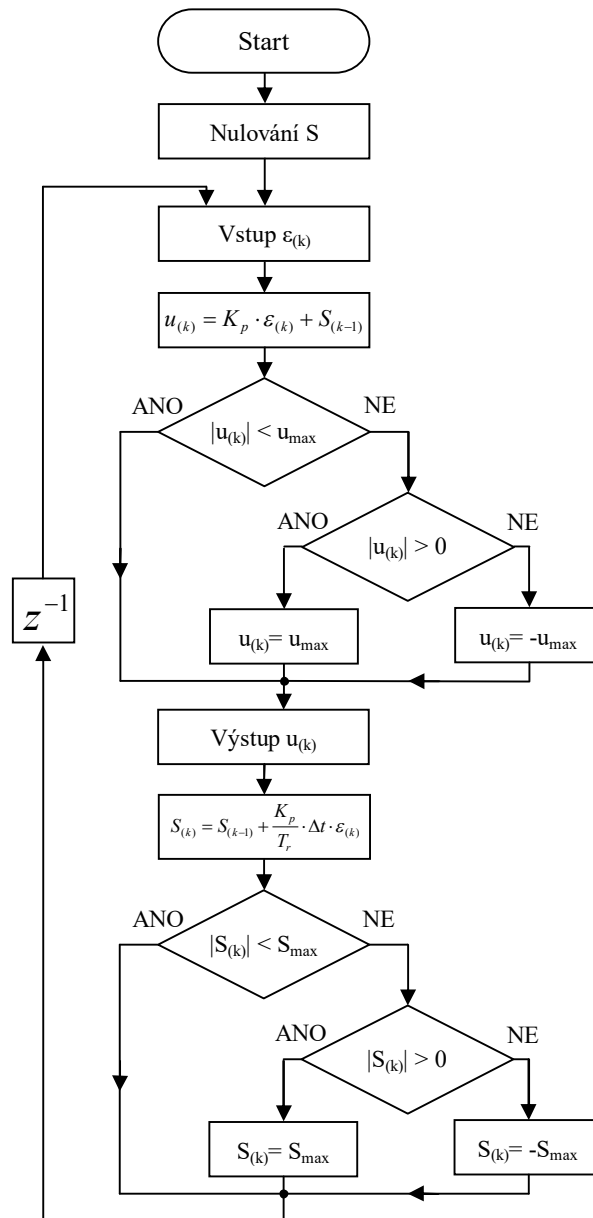
5.1.1 Složkový algoritmus

V následující kapitole bude popsán složkový algoritmus PS regulátoru s omezením během výpočtu. Toto je jedna z variant omezení výstupu a zastavení integrace PS regulátoru. Složkový tvar PS regulátoru je vyjádřen rovnicí (5.3).

$$u_{(k)} = K_p \cdot \varepsilon_{(k)} + \frac{K_p}{T_r} \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon_{(i)} \quad (5.3)$$

Kde $u_{(k)}$ je výstup regulátoru, K_p je zesílení proporční složky, $\varepsilon_{(k)}$ je regulační odchylka, T_r je časová konstanta integrace a Δt je čas daný periodou výpočetní smyčky.

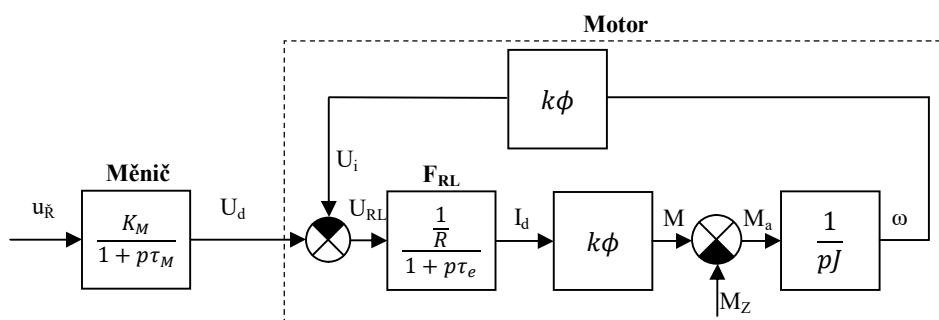
Kompletní algoritmus PS regulátoru s omezením během výpočtu je naznačen na *Obr.5.1*. Po startu dojde k vynulování sumace S a následuje první cyklus výpočtu. V dalším kroku dojde k vypočtení regulační odchylky $\varepsilon_{(k)}$. Následně se vypočte výstup regulátoru $u_{(k)}$, který dále prochází podmínkami, které reprezentují omezovač výstupu regulátoru. Za omezovačem je už vypočtený výstup regulátoru platný. Dále dojde k vypočtení hodnoty sumace $S_{(k)}$, která následně prochází opět podmínkami omezovače. V tomto případě se jedná o omezovač, který zajišťuje zastavení integrace. Vypočtená hodnota sumace $S_{(k)}$ je využita při dalším cyklu.



Obr. 5.1 Vývojový algoritmus PS regulátoru s omezením během výpočtu

5.2 Model stejnosměrného motoru a měniče

Model stejnosměrného motoru a měniče je naznačen a Obr.5.2. Dále se zaměřím na určení jednotlivých parametrů modelu.



Obr. 5.2 Blokové schéma měniče a stejnosměrného motoru

Blok měniče

Blok měniče je reprezentován aperiodickým členem, který je definovaný přenosem (5.4). Kde K_M je zesílení měniče a τ_M je časová konstanta měniče. Do měniče vstupuje řídicí signál $u_{\check{r}}$, který je reprezentován číslem v mikroprocesoru. Výstup z bloku měniče je napětí U_d .

$$F_M = \frac{K_M}{1 + p\tau_M} \quad (5.4)$$

Zesílení K_M lze určit poměrem maximální hodnoty výstupního napětí U_{dMAX} a maximální hodnotou řídicího signálu $u_{\check{r}}$. Maximální hodnota řídicího signálu $u_{\check{r}}$ je číslo 400, které odpovídá výstupnímu napětí $U_d = 15V$. U pohonu s motorem PG420, je maximální hodnota signálu $u_{\check{r}}$ snížena na 320. Tato hodnota odpovídá výstupnímu napětí měniče $U_d=12V$, což je jmenovité napětí motoru PG420. Časová konstanta měniče je dána průměrnou dobou zpoždění reakce měniče na řídicí signál. Hodnota časové konstanty je odvozena od frekvence proudové smyčky. Konkrétní hodnoty pro použité měniče jsou vypočteny v (5.5) až (5.7).

$$K_{M_pohonu\ s\ PG\ 521} = \frac{U_{dMAX}}{u_{\check{r}MAX}} = \frac{15}{400} = 0,0375 \quad (5.5)$$

$$K_{M_pohonu\ s\ PG\ 420} = \frac{U_{dMAX}}{u_{\check{r}MAX}} = \frac{12}{320} = 0,0375 \quad (5.6)$$

$$\tau_M = 150\mu s \quad (5.7)$$

Bloky motoru

Blok F_{RL} definuje přenos obvodu kotvy. Parametry R a L obvodu kotvy byly určeny měřením. Elektrická časová konstanta τ_e byla vypočtena za vztahu (5.8).

$$\tau_e = \frac{L}{R} [s; H; \Omega] \quad (5.8)$$

Blok $k\phi$ určuje činitel magnetického toku motoru, který byl vypočten ze štítkových údajů podle vztahu (5.9).

$$k\phi = \frac{M_N}{I_N} [Wb, Nm, A] \quad (5.9)$$

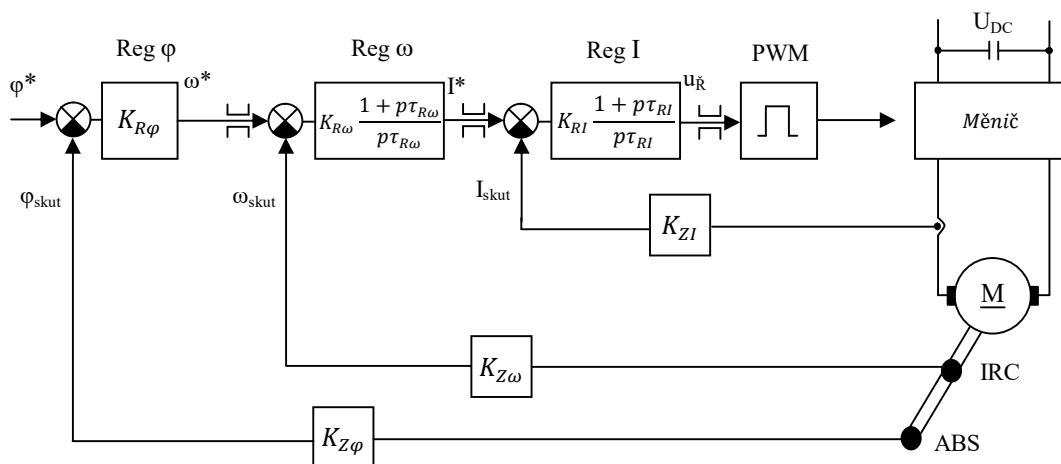
Moment setrvačnosti J byl změřen z doběhové zkoušky jednotlivých motorů naprázdno. Změřené hodnoty byly použity pouze při prvotním návrhu rychlostní smyčky motorů naprázdno. Celkový moment setrvačnosti jednotlivých motorů robotu je dán veškerými setrvačnými hmotami, které jsou přepočteny na hřídel motoru. Navíc je celkový moment setrvačnosti velmi proměnný, neboť závisí na aktuálním geometrickém uspořádání ramen robotu. Vypočtené parametry obou typů motorů jsou shrnuty v tabulce *Tab.5*.

Tab. 5 Parametry modelu stejnosměrného motoru a měniče

Motor	PG521-24-53-B	PG420-12-49-B
R [Ω]	0,92	0,46
L [mH]	1	0,483
τ_e [ms]	1,08	1,05
$k\phi$ [Wb]	0,0456	0,0127

5.3 Kaskádní regulační struktura polohy

Blokové schéma kaskádní regulační struktury polohy je naznačeno na Obr.5.3.



Obr. 5.3 Blokové schéma kaskádní regulační struktury polohy.

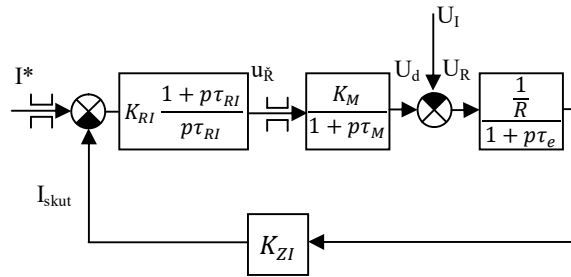
Kaskádní struktura se skládá z proudové smyčky, rychlostní smyčky a polohové smyčky. Jako regulátory proudové a rychlostní smyčky byly použity diskrétní PS regulátory, které jsou realizované složkovým algoritmem s omezením během výpočtu. U polohové smyčky musel být z důvodu stability použitý diskrétní P regulátor, jelikož dva integrační členy nelze zapojit do série.

V následujících kapitolách bude naznačen návrh parametrů regulátorů jednotlivých smyček.

5.3.1 Proudová smyčka

Proudová smyčka, v kaskádní regulační struktuře, zajišťuje regulaci kotevního proudu motoru. Regulací kotevního proudu je jednak vytvořený potřebný moment a současně je motor chráněn před proudovým přetížením.

Návrh parametrů regulátoru byl proveden metodou logaritmických frekvenčních charakteristik.



Obr. 5.4 Blokové schéma proudové smyčky

Proudová smyčka pohonu s motorem PG521-24-53-B

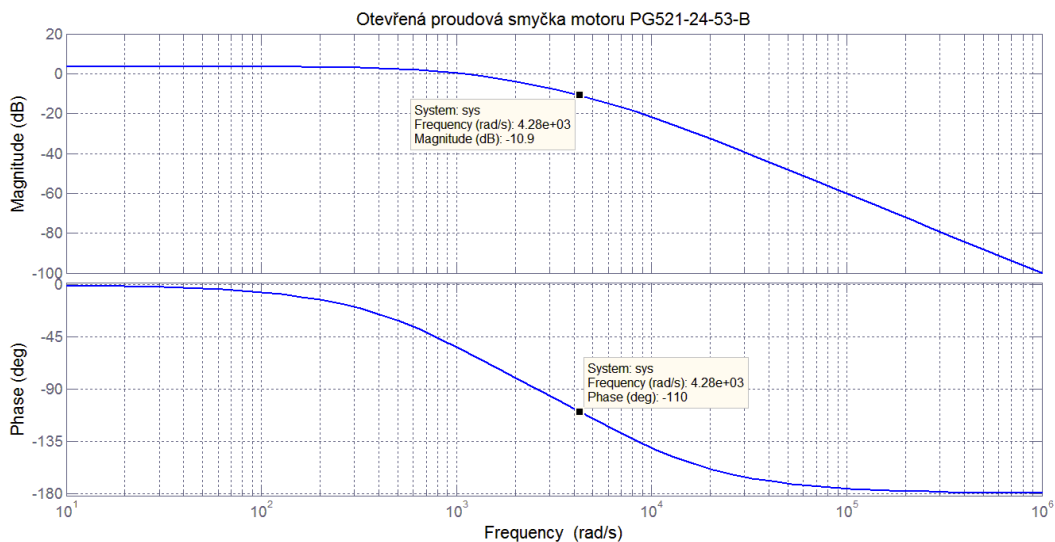
Blok K_{ZI} byl určen dle vztahu (5.10). Kde I_{dMAX} je maximální hodnota proudu kotvou motoru a ADC_{MAX} je číslo AD převodníku při I_{dMAX} .

$$K_{ZI_PG521} = \frac{ADC_{MAX}}{I_{dMAX}} = \frac{108}{3} = 36 \tag{5.10}$$

Přenos otevřené proudové smyčky pohonu s motorem PG521 je dán rovnicí (5.11).

$$F_{OI_PG521} = \frac{K_M \cdot \frac{1}{R} \cdot K_{ZI}}{(1 + p\tau_M)(1 + p\tau_e)} = \frac{1,47}{(1 + p1,5 \cdot 10^{-3})(1 + p1 \cdot 10^{-3})} \tag{5.11}$$

Na Obr.5.5 jsou znázorněny frekvenční charakteristiky otevřené proudové smyčky s parametry regulátoru $K_{RI} = 1$ a $\tau_{RI} = \infty$. Vyznačené body odpovídají zvolené bezpečnosti ve fázi $\phi_B = 70^\circ$. Tomuto bodu odpovídá $\omega_{\check{r}}=4280\text{rad/s}$.



Obr. 5.5 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika otevřené smyčky motoru PG521-24-53-B

Pro zvolenou bezpečnost ve fázi byl navržen regulátor následujícím způsobem.

$$\begin{aligned} A_{[dB]} &= 20 \log K_{RI} \\ 10,9 &= 20 \log K_{RI} \\ K_{RI} &= 10^{\frac{10,9}{20}} = 3,5 \end{aligned} \tag{5.12}$$

Kmitočet časové konstanty regulátoru ω_{RI} byl zvolen o dekádu menší než kmitočet řezu $\omega_{\dot{r}}$. Tomu odpovídá časová konstanta regulátoru $\tau_{RI}=0,002s$.

$$\begin{aligned}\omega_{RI} &= \frac{\omega_{\dot{r}}}{10} = \frac{4280}{10} = 428 \text{ rad/s} \\ \tau_{RI} &= \frac{1}{\omega_{RI}} = \frac{1}{428} = 0,00236 \text{ s}\end{aligned}\quad (5.13)$$

Proudová smyčka pohonu s motorem PG420-12-49-B

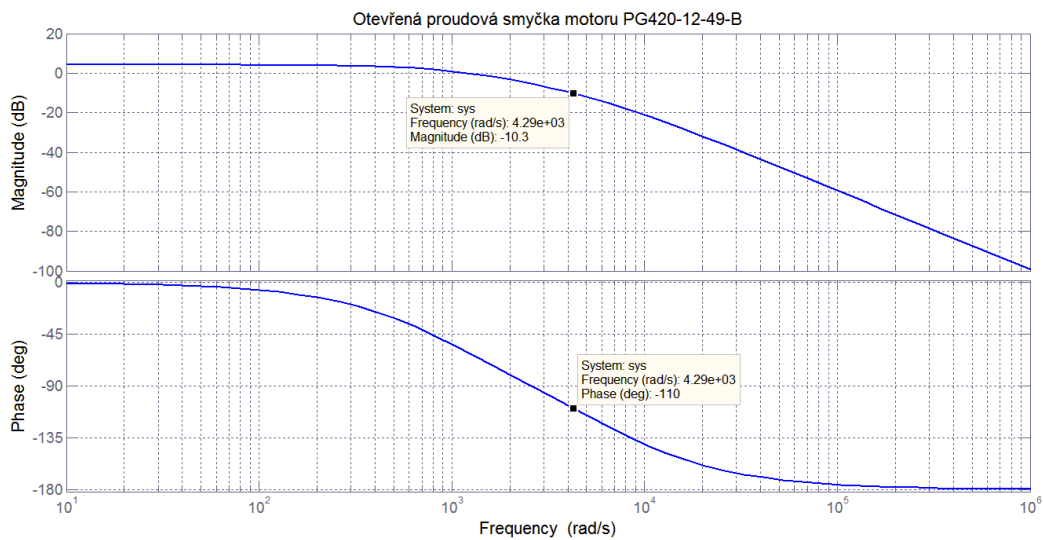
Proudová smyčka pohonu s motorem PG420-12-49-B byla odvozena stejným způsobem jako v předchozím případě. Konstanta zesílení čidla je dána rovnicí (5.14).

$$K_{ZI_PG420} = \frac{ADC_{MAX}}{I_{dMAX}} = \frac{108}{5,5} = 19,6 \quad (5.14)$$

Přenos otevřené proudové smyčky s motorem PG420 je dán rovnicí (5.15).

$$F_{OI_PG420} = \frac{K_M \cdot \frac{1}{R} \cdot K_{ZI}}{(1 + p\tau_M)(1 + p\tau_e)} = \frac{1,59}{(1 + p1,5 \cdot 10^{-3})(1 + p1 \cdot 10^{-3})} \quad (5.15)$$

Na Obr.5.6 jsou opět znázorněny frekvenční charakteristiky otevřené proudové smyčky s parametry regulátoru $K_{RI} = 1$ a $\tau_{RI} = \infty$. Vyznačené body odpovídají zvolené bezpečnosti ve fázi $\varphi_B = 70^\circ$. Tomuto bodu odpovídá $\omega_{\dot{r}}=4290\text{rad/s}$.



Obr. 5.6 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika otevřené smyčky motoru PG420-12-49-B

Pro zvolenou bezpečnost ve fázi byl navržen regulátor následujícím způsobem.

$$\begin{aligned}A_{[dB]} &= 20 \log K_{RI} \\ 10,3 &= 20 \log K_{RI} \\ K_{RI} &= 10^{\frac{10,3}{20}} = 3,27\end{aligned}\quad (5.16)$$

Kmitočet časové konstanty regulátoru ω_{RI} byl zvolen o dekádu menší než kmitočet řezu $\omega_{\dot{r}}$. Tomu odpovídá časová konstanta regulátoru $\tau_{RI}=0,002s$.

$$\begin{aligned}\omega_{RI} &= \frac{\omega_{\dot{r}}}{10} = \frac{4290}{10} = 429 \text{ rad / s} \\ \tau_{RI} &= \frac{1}{\omega_{RI}} = \frac{1}{429} 0,002s\end{aligned}\tag{5.17}$$

5.3.2 Rychlostní smyčka

Prvotní odhad parametrů regulátorů rychlostních smyček obou typů pohonů byl proveden nejprve pro motory naprázdno pomocí metody logaritmických frekvenčních charakteristik. Doladění parametrů regulátorů bylo provedeno až po realizaci polohové smyčky. Parametry byly laděny na základě změřených průběhů rychlosti. Výsledné naladění regulátoru rychlostní smyčky má převážně proporční charakter.

5.3.3 Polohová smyčka

Prvotní návrh parametrů regulátorů polohových smyček byl proveden opět pro motory naprázdno pomocí logaritmických frekvenčních charakteristik. Doladění parametrů bylo postupně provedeno s připojenými rameny robotu na základě změřených průběhů.

Důležité pro polohovou smyčku bylo dodržet požadavek, že skutečná poloha nesmí překmitnout požadovanou polohu. Nejprve byla regulační struktura polohy testována s blokem brzdě trajektorie, který byl realizován přímkou. Během ladění bylo zjištěno, že blok brzdě trajektorie nemá v tomto systému značný význam, proto byla kaskádní regulační struktura polohy realizována bez bloku brzdě trajektorie. Brzdě trajektorie by měla význam v případě, pokud by se regulační struktura polohy realizovala podle kritéria t-optimální. Toto kritérium definuje nejnižší čas, za který se má docílit požadované polohy.

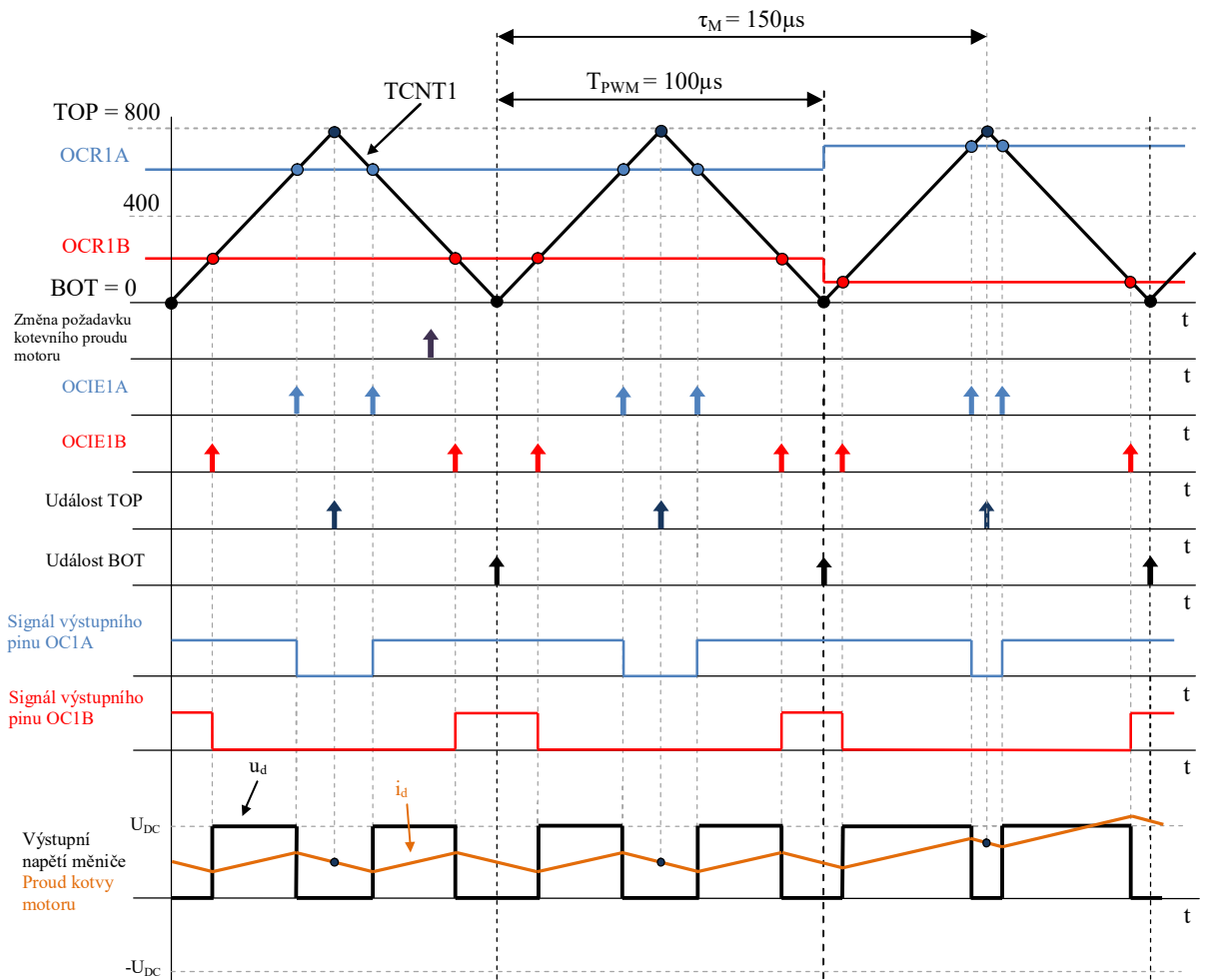
V případě kloubu č.0 a kloubu č.2 je rychlostní regulátor konstantní, jelikož zatížení motorů těchto kloubů je v celém rozsahu přibližně stejné.

U kloubu č.1 musel být pracovní rozsah rozdělen do několika sektorů, z důvodu proměnného zatížení. Pro každý sektor bylo určeno jiné zesílení polohového regulátoru. Navíc se v těchto sektorech rozlišuje, zda-li se rameno pohybuje směrem "dolů nebo nahoru".

5.4 Realizace kaskádní regulace polohy v mikroprocesoru

V této kapitole bude popsána konkrétní realizace jednotlivých regulačních smyček v mikroprocesoru ATmega16.

Časování celé regulační struktury je odvozeno od symetrické pily o frekvenci 10kHz. Symetrická pila je generována šestnáctibitovým časovačem, který má označení Timer/Counter1. Okamžitá hodnota pilového signálu je v každém taktu mikroprocesoru uložena v counter registru TCNT1. V komparačních registrech OCR1A a OCR1B jsou uloženy hodnoty řídicích signálů u_{R1} a u_{R2} . Řídicí signály jsou vůči sobě inverzní, což vychází z teorie tříúrovňového řízení.



Obr. 5.7 Časování regulační struktury

Během každé periody pily se generují příznaky událostí TOP, BOT, OCIE1A a OCIE1B. Událost TOP definuje vrchol symetrické pily. Při této události je spouštěn AD převodník, který převádí okamžitou hodnotu proudu kotvou motoru i_d . Při takto načasovaném spouštění, odpovídá změřená hodnota proudu střední hodnotě proudu v periodě T_{PWM} .

Událost BOT definuje okamžik, kdy obsah counter registru TCNT1 je rovný nule. V tomto okamžiku je spouštěn výpočet proudové smyčky. Výstupem proudové smyčky jsou řídicí signály u_{R1} a u_{R2} , jejichž hodnota je v následující události BOT uložena do porovnávacích registrů OCR1A a OCR1B. Tím vzniká dopravní zpoždění τ_M .

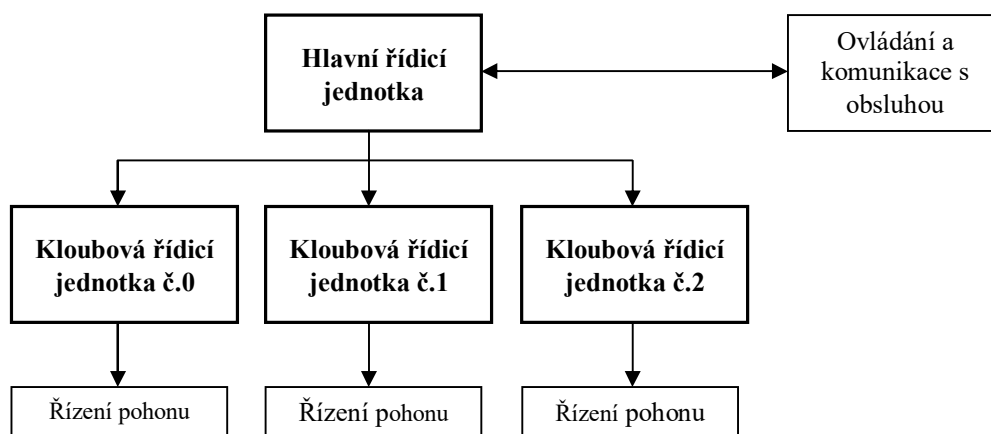
Události OCIE1A a OCIE1B definují shodu řídicích signálů u_{R1} a u_{R2} s obsahem counter registru TCNT1. Při těchto událostech jsou automaticky nastavovány výstupní piny OC1A a OC1B mikroprocesoru aniž by došlo k přerušení programu. Signály na výstupních pinech jsou přivedeny na vstupní logiku měniče BTM7752G, kde na základě logických úrovní těchto signálů je sepnuta příslušná kombinace výkonových tranzistorů.

Rychlostní smyčka je volána po deseti periodách T_{PWM} , což odpovídá frekvenci 1000Hz. Skutečná rychlost je měřená AD převodníkem. Výstupní signál PWM_{ω} z čidla rychlosti je u příslušného pinu AD převodníku vyfiltrován filtrem DP. Získaná střední hodnota odpovídá otáčkám motoru.

Smyčka polohy je volána vždy po dvaceti periodách T_{PWM} , což odpovídá kmitočtu 500Hz. Poloha ramene je v případě kloubu č.1 a kloubu č.2 vyhodnocována z kvadrurního A/B režimu čidla polohy. Zjištění počáteční absolutní polohy je provedeno pomocí sériového výstupu čidla polohy při inicializaci robotu. V případě kloubu č.0 je absolutní poloha měřena AD převodníkem. Výstupní signál PWM_{ϕ} z čidla polohy a rychlosti kloubu č.0 je u příslušného pinu AD převodníku vyfiltrován filtrem DP. Získaná střední hodnota odpovídá absolutní poloze kloubu č.0.

6 Návrh a realizace řídicího systému tříosého robotu

Řídicí systém tříosého robotu se skládá z hlavní řídicí jednotky a třech kloubových řídicích jednotek. Komunikace mezi hlavní řídicí jednotkou a kloubovými řídicími jednotkami je realizována pomocí SPI. Hardware řídicího systému je implementován na dvouvrstevném plošném spoji, kde je umístěna i klávesnice pro ovládání řídicího rozhraní. Pro napájení řídicí elektroniky byl vybrán spínaný zdroj MEAN WELL RS 15-5, jehož výstupní napětí je 5V. Hardware řídicího systému je chráněn pojistkou. Blokové schéma topologie řídicího systému je naznačeno na *Obr. 6.1*.



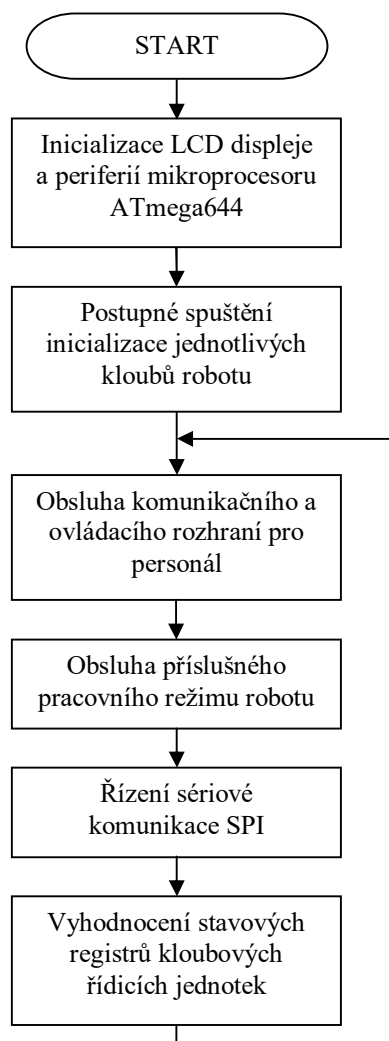
Obr. 6.1 Topologie řídicího systému tříosého robotu

6.1 Hlavní řídicí jednotka

Hlavní řídicí jednotka zajišťuje ovládání řídicího rozhraní a komunikaci s obsluhou, řízení komunikace SPI s kloubovými řídicími jednotkami a výpočet přímé a inverzní kinematiky robotu. Jako hlavní řídicí jednotka byl vybrán mikroprocesor Atmel ATmega644, který je taktován krystalem o frekvenci 16MHz.

6.1.1 Algoritmus hlavní řídicí jednotky

Základní algoritmus hlavní řídicí jednotky je naznačen na *Obr.6.2*.



Obr. 6.2 Základní algoritmus hlavní řídicí jednotky

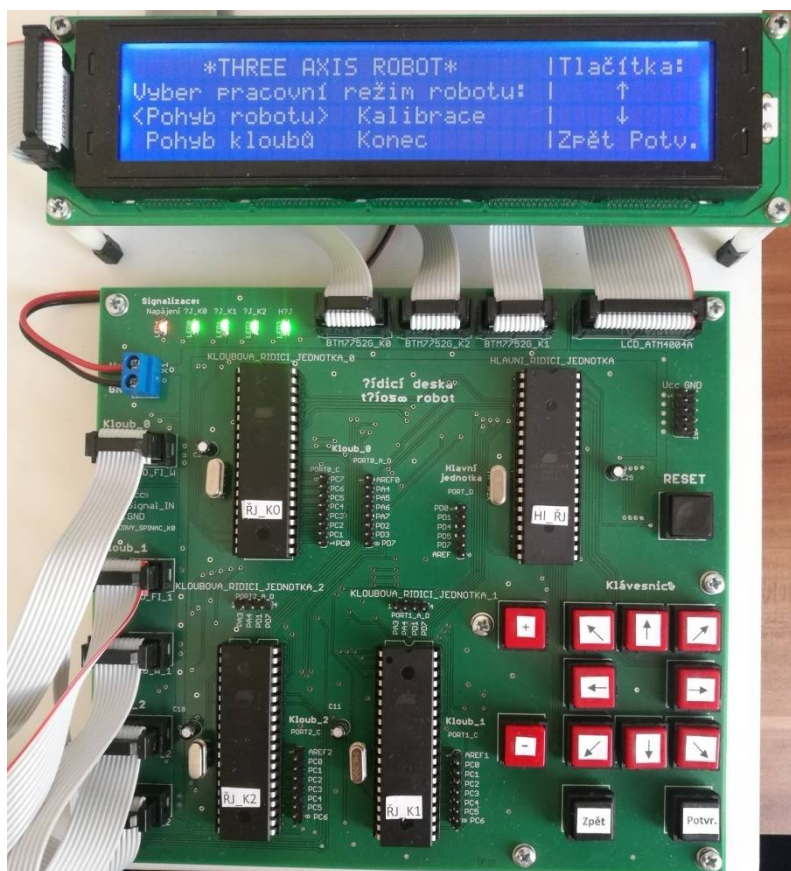
Po zapnutí napájení proběhne inicializace periférií hlavní řídicí jednotky, při které se nastaví SPI komunikace, externí přerušování, I/O porty, časovače a LCD displej. V dalším kroku je spuštěna inicializace celého robotu, při které se nejprve zjistí, zdali je robot v nulové poloze. Pokud není, je obsluha pomocí LCD vyzvána, aby nastavila efektor robotu do nulové polohy, která je vyznačena na pracovní desce robotu. V okamžiku kdy je robot nastaven do

nulové polohy, začíná spuštění inicializace jednotlivých kloubů. Po skončení inicializace je robot nastaven do referenční polohy. Dalším krokem se algoritmus hlavní řídicí jednotky dostává do nekonečné smyčky, ve které obsluhuje komunikační a ovládací rozhraní pro personál, obsluhu příslušného pracovního režimu robotu, řízení sériové komunikace SPI a vyhodnocení stavových registrů kloubových řídicích jednotek.

6.1.2 Komunikační a ovládací rozhraní pro personál

Komunikační a ovládací rozhraní pro personál se skládá z alfanumerického LCD displeje a klávesnice. Jako displej byl použit LCD modul ATM4004A, který je osazen řadičem S6A0069. Displej disponuje čtyřiceti znaky na řádek a čtyřmi řádky. Při realizaci algoritmu pro obsluhu komunikačního a ovládacího rozhraní byla základní znaková sada řadiče doplněna o některá česká písmena s diakritikou a speciálními znaky. Tyto prvky jsou do řadiče S6A0069 importovány vždy při inicializaci LCD.

Jednotlivá tlačítka klávesnice jsou vyhodnocovány I/O piny hlavní řídicí jednotky. Navržený algoritmus je ošetřen proti zámkům a současnému stisknutí dvou tlačítek. Vyhodnocení tlačítek klávesnice respektuje i vyšší prioritu tlačítka zpět a potvrdit.



Obr. 6.3 Komunikační a ovládací rozhraní tříosého robotu

6.1.3 Pracovní režimy tříosého robotu

Řídicí systém robotu je vybaven třemi základními pracovními režimy, kterými jsou řízení pohybu celého robotu, řízení pohybu jednotlivých kloubů robotu a kalibrační režim. Dále řídicí systém obsahuje algoritmus pro automatické nastavení referenční polohy z libovolné polohy efektoru robotu, inicializační algoritmus a ukončovací algoritmus, který při ukončení činnosti nastaví efektor robotu do nulové polohy a vypne výkonové měniče jednotlivých pohonů. V tomto stavu je robotický systém připravený na vypnutí napájecího zdroje.

Režim řízení pohybu celého robotu

Tento režim je založen na výpočtu přímé a inverzní kinematiky. Obě kinematické úlohy byly odvozeny pro konstrukci tříosého robotu pomocí metody přímého užití goniometrických funkcí. Výsledkem jsou základní kinematické úlohy, které umožňují přepočítat zadané globální souřadnice efektoru na úhly natočení jednotlivých kloubů a zpětný výpočet změřených úhlů natočení kloubů na globální souřadnice efektoru. Při návrhu byl pracovní prostor robotu rozdělen na čtyři oblasti, ve kterých je preferované natočení jednotlivých kloubů. Tím se snížil počet řešení kinematických úloh.

Ovládání robotu v tomto režimu se provádí šipkami klávesnice, kterými dojde ke změně požadovaných souřadnic efektoru. Tyto souřadnice jsou následně přepočteny inverzní kinematickou úlohou. Získané úhly natočení se pomocí SPI předávají kloubovým řídicím jednotkám, které zajistí natočení příslušných kloubů. Současně jsou odeslány informace o absolutních polohách kloubů z každé kloubové řídicí jednotky do hlavní řídicí jednotky. Následuje přepočet skutečných úhlů natočení na souřadnice efektoru, ty jsou následně vypsané na LCD. Obsluha tohoto režimu probíhá opakovaně s periodou 262ms.

Režim řízení jednotlivých kloubů robotu

Tento režim umožňuje polohování uživatelem vybraného kloubu robotu. Změna požadované polohy se opět provádí pomocí klávesnice. Pomocí klávesnice je zde možné zvolit i krok, o který se bude měnit zadání požadované polohy. Zadaná poloha se odesílá do příslušné kloubové řídicí jednotky opět pomocí SPI s periodou 262ms.

Režim kalibrace robotu

Režim kalibrace robotu slouží k automatickému zjištění kalibračních úhlů senzorů polohy kloubu č.1 a kloubu č.2. U kloubu č.0 tento režim není definován, jelikož kalibrace čidla polohy se provádí vždy při inicializaci robotu pomocí senzoru nulové polohy. Kalibrační úhly jsou uloženy v paměti EEPROM řídicí jednotky kloubu č.1 a kloubu č.2. Pomocí kalibračních úhlů je možné přepočítat mechanickou nulovou polohu magnetu na skutečnou nulovou

polohu souřadného systému kloubu robotu. Tento režim má využití zejména při demontáži robotu, při které je téměř nemožné vrátit magnety senzorů polohy do stejné polohy.

6.1.4 Řízení komunikace SPI

Řízení komunikace SPI zajišťuje hlavní řídicí jednotka, které se chová jako MASTER. S periodou $T_{\text{kom}}=262\text{ms}$ jsou posílány jednotlivé pakety do příslušných kloubových řídicích jednotek. Jeden paket se skládá ze čtyř osmibitových bytů. V prvních dvou bytech je uložena požadovaná poloha, třetí byte obsahuje konfiguraci řídicího registru kloubové jednotky a čtvrtý byte je kontrolní součet.

Současně s odesláním dat jsou i přijímány pakety z kloubových řídicích jednotek. Přijaté pakety se skládají opět ze čtyř osmibitových bytů. První dva byty obsahují skutečnou polohu kloubu, v třetím bytu je uložen obsah stavového registru kloubové řídicí jednotky a čtvrtý byte obsahuje opět kontrolní součet.

Kontrolní součet je vypočten exkluzivním součtem XOR jednotlivých bytů. Tato ochrana umožňuje odhalit jednonásobnou chybu na každé pozici bitů jednotlivých bytů.

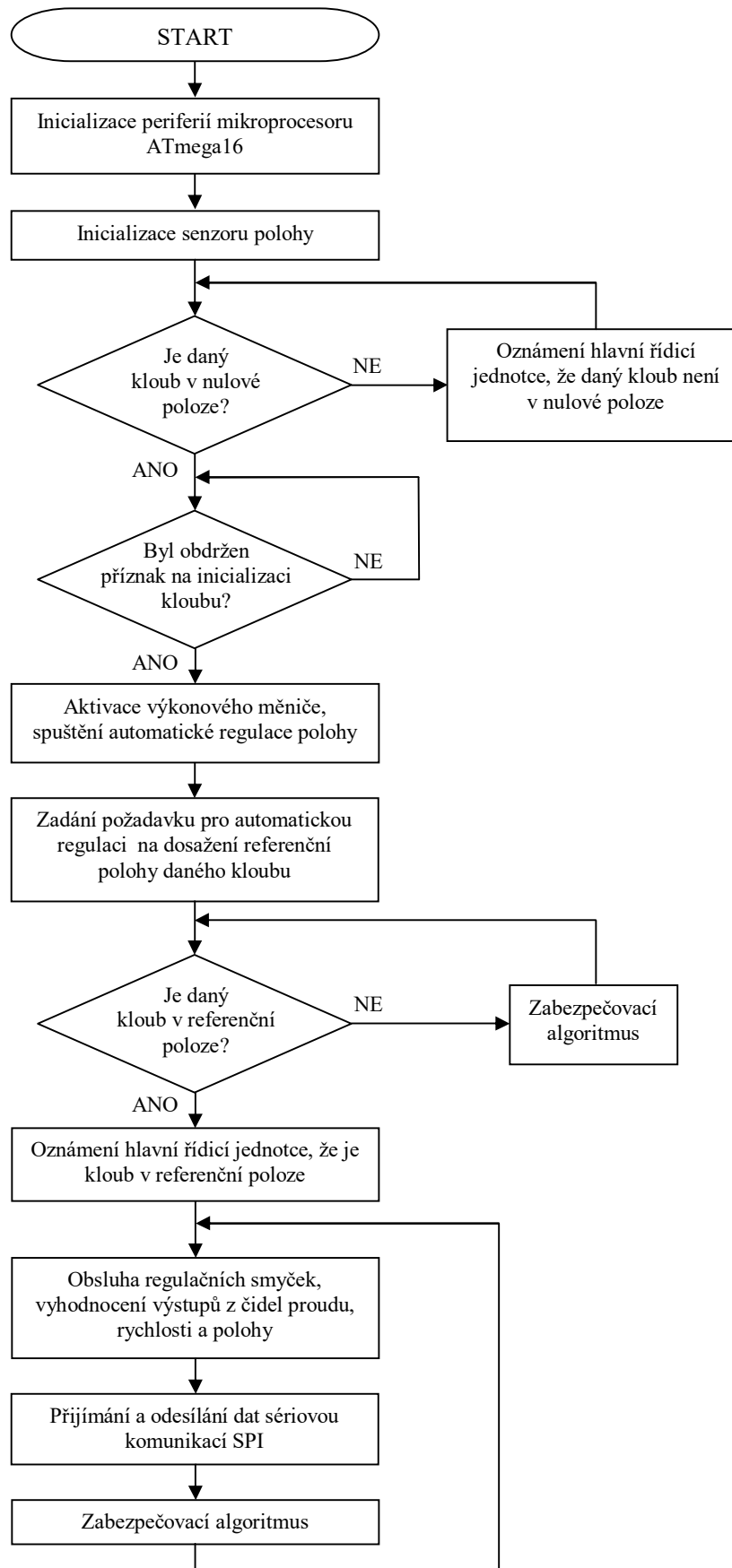
6.2 Kloubové řídicí jednotky

Kloubové řídicí jednotky zajišťují výpočet jednotlivých regulačních smyček, vyhodnocení signálů z čidla proudu, rychlosti a polohy, tříúrovňové řízení měniče a zabezpečovací smyčku řídicího systému tříosého robotu. Jako kloubové řídicí jednotky byly vybrány mikroprocesory ATmega16, které jsou taktované krystalem o frekvenci 16MHz.

6.2.1 Algoritmus kloubové řídicí jednotky

Algoritmus kloubových řídicích jednotek je naznačen na *Obr.6.4*. Po zapnutí napájení dojde k inicializaci periférií mikroprocesoru ATmega16, při které se nastaví SPI komunikace, I/O porty, AD převodník a externí přerušení. V této fázi algoritmu dojde i k nastavení parametrů časovače Timer/Counter0 zabezpečovacího algoritmu a základního časovače Timer/Counter1 regulačních smyček. Tyto časovače zatím nejsou spuštěny.

V další fázi dojde k inicializaci senzoru polohy. V případě kloubu č.1 a kloubu č.2 je přečtena absolutní poloha pomocí sériového výstupu čidla polohy, ke které je přičten kalibrační úhel. V případě kloubu č.0 je nulová poloha získána výstupem ze senzoru nulové polohy. Tímto se zjistí, zdali příslušný kloub je v nulové poloze. Pokud daný kloub není v nulové poloze, dojde k oznámení této skutečnosti hlavní řídicí jednotce, která následně vyzve personál, aby nastavil rameno robotu do nulové polohy.



Obr. 6.4 Algoritmus kloubové řídicí jednotky

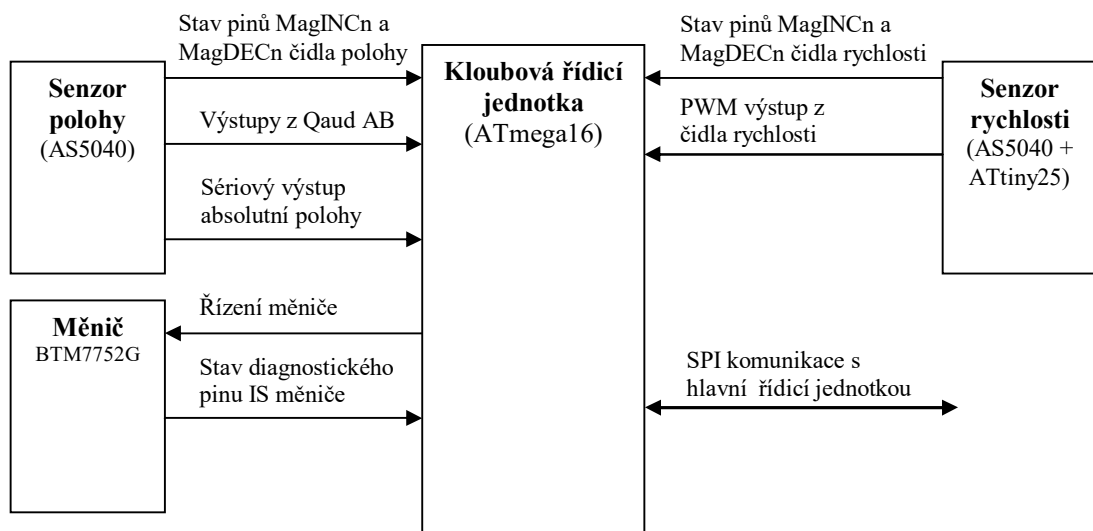
V případě kdy je kloub v nulové poloze, nastává čekací smyčka. Program čeká do doby, než hlavní řídicí jednotka pošle příkaz k inicializaci příslušného kloubu. Inicializace kloubů robotu probíhá v pořadí kloub č.1, kloub č.2 a kloub č.0. Toto pořadí bylo zvoleno, aby byla zamezena nechtěná kolize při inicializaci robotu.

V okamžiku kdy přijde do příslušné kloubové řídicí jednotky příkaz na inicializaci kloubu, dochází ke spuštění časovačů zabezpečovacího algoritmu a regulačních smyček. Tím je spuštěna regulační struktura a řízení měniče. Následně je zadána jako požadovaná poloha kloubu referenční poloha. Během pohybu kloubu z nulové polohy do referenční polohy je řízení hlídáno zabezpečovacím algoritmem.

Při dosažení referenční polohy je tato skutečnost oznámena hlavní řídicí jednotce a nastává nekonečná smyčka programu kloubové řídicí jednotky. V nekonečné smyčce běží výpočet regulačních smyček kaskádní regulace polohy a měření veličin příslušných zpětných vazeb regulace. Dále je zde prováděna rutina příjmu a odesílání dat sériovou komunikací SPI. Současně s regulací běží zabezpečovací algoritmus, který hlídá správnou činnost řízení příslušného pohonu.

6.2.2 Blokové schéma zapojení kloubové řídicí jednotky

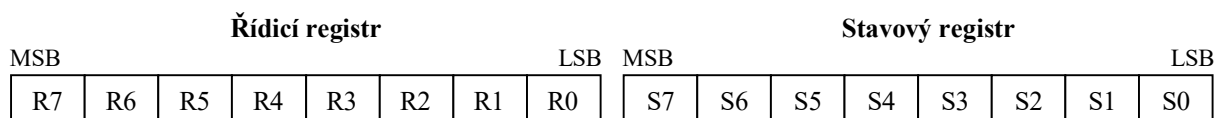
Na *Obr.6.5.* je znázorněné zapojení kloubových řídicích jednotek s jednotlivými externími moduly. Blokové schéma odpovídá kloubu č.1 a kloubu č.2. Kloub č.0 je zapojený velmi podobně, rozdíl je pouze v tom, že sensor polohy a sensor rychlosti jsou spojené do jednoho modulu, ze kterého jdou dva PWM signály.



Obr. 6.5 Blokové schéma zapojení kloubové řídicí jednotky

6.2.3 Řídicí a stavový registr kloubové řídicí jednotky

Řídicí a stavové registry kloubových jednotek jsou realizovány celočíselnými osmibitovými globálními proměnnými. Jednotlivé bity reprezentují buď příkazy v případě řídicího registru nebo stavy v případě stavového registru. Řídicí registry jednotlivých kloubových řídicích jednotek jsou nastavovány v hlavní řídicí jednotce. Stavové registry zachycují určité stavy a poruchy kloubových řídicích jednotek. Význam jednotlivých bitů obou registrů je popsán v *Tab.6* a *Tab.7*.



Obr. 6.6 Řídicí a stavový registr

Tab. 6 Význam jednotlivých bitů řídicího registru

Řídicí registr	
R0	<i>Zastavení pohybu kloubu</i>
R1	<i>Volba rychlostního režimu</i>
R2	<i>Kalibrace</i>
R3	<i>Inicializace</i>
R4	<i>Vypnutí výkonové části pohonu</i>
R5, R6, R7	<i>Tyto bity nereprezentují žádný příkaz</i>

Tab. 7 Význam jednotlivých bitů stavového registru

Stavový registr	
S0	<i>Pohyb kloubu opačným směrem</i>
S1	<i>Porucha senzoru rychlosti</i>
S2	<i>Porucha senzoru polohy</i>
S3	<i>Porucha měniče BTM7752G</i>
S4	<i>Porucha inicializace čidla polohy</i>
S5	<i>Tento bit nereprezentuje žádný stav</i>
S6	<i>Příslušný kloub není v nulové poloze</i>
S7	<i>Dokončení inicializace příslušného kloubu</i>

6.3 Zabezpečovací systém robotu

Zabezpečovací algoritmus je implementován do každé kloubové řídicí jednotky. Zabezpečovací smyčka běží s periodou $T_{zab}=0,5s$. V případě zjištění poruchy dochází k okamžité deaktivaci daného pohonu. Současně se nastaví příslušný stavový bit ve stavovém registru, který odpovídá dané poruše. V okamžiku kdy je stavový registr odeslán pomocí SPI, hlavní řídicí jednotka zajistí vypnutí pohonů ostatních kloubů. Poté dojde k vypsání obsahu stavových registrů všech kloubových jednotek na LCD, kde pomocí čísla poruchy je personál schopný odhalit poruchu, která způsobila vypnutí systému robotu. Zabezpečovací algoritmus umí odhalit opačný směr pohybu příslušného kloubu, poruchu senzoru polohy, senzoru rychlosti a poruchu měniče.

Zjištění poruchy opačného směru pohybu kloubu

Opačný směr pohybu kloubu může nastat např. v případě, kdy dojde k otočení výstupních kvadrurních signálů A/B z čidla polohy. Zjištění této poruchy je založeno na fyzikální podstatě regulační smyčky polohy, kdy správně pracující regulační smyčka snižuje regulační odchylku. Pokud nastane případ, že se regulační odchylka v čase zvětšuje, znamená to, že se kloub pohybuje opačným směrem než je požadováno.

Zjištění poruchy senzoru rychlosti nebo senzoru polohy

Zjištění poruchy senzorů polohy nebo rychlosti spočívá jednak v kontrole signálů MagINCn a MagDECn, které logickou nulou indikují, že je magnet mimo rozsah čidla. Také se zde kontroluje diference mezi výstupními signály senzoru rychlosti a senzoru polohy. Pokud při pohybu kloubu dochází ke změně výstupního signálu pouze jednoho senzoru, znamená to, že druhý senzor má nejspíše poruchu.

Zjištění poruchy měniče

Porucha měniče je identifikována pomocí diagnostického IS pinu obvodu BTM7752G. Pokud v měniči zareagují nějaké ochrany, je IS pin nastaven do logické jedničky.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo realizovat funkční robotický systém se třemi stupni volnosti. Konkrétní body zadání se týkaly návrhu a realizace senzoriky, výkonových částí pohonů robotu, automatické regulace polohy jednotlivých kloubů a řídicího systému robotu.

Po mechanické stránce se jednalo o návrh a realizaci pracovního prostředí robotu, úpravu některých dílů konstrukce robotu a mechanické řešení umístění jednotlivých senzorů a kabeláže. Po elektrické stránce se jednalo o návrh a realizaci hardwaru senzorů polohy a rychlosti, výkonových měničů a řídicího systému robotu. K vytvořenému hardwaru byl navržen a realizován kompletní software, který umožňuje snadné ovládání robotu.

Senzorika robotu se skládá ze senzorů polohy, rychlosti a proudu. Sensory polohy a rychlosti byly realizovány na základě rotačního enkodéru AS5040, který disponuje několika výstupními režimy. Sensory rychlosti byly navíc doplněny pomocnou řídicí jednotkou ATtiny25, která z výstupů obvodu AS5040 vypočítává otáčky motoru. Výstupem senzoru rychlosti je PWM signál, jehož střída je úměrná otáčkám motoru. Snímání proudů kotvami jednotlivých motorů nebylo možné realizovat pomocí integrovaného senzoru proudu v použitém měniči. Testováním bylo zjištěno, že integrované čidlo jeví značnou nedokonalost při měření malých proudů řádově desetiny ampér. Proto byl použit externí senzor proudu realizovaný obvodem ACS712, který byl doplněn o zesilovací obvod realizovaný operačním zesilovačem.

Výkonová část pohonů tříosého robotu byla realizována pomocí integrovaného měniče BTM7752G. Jedná se čtyřkvadrantový pulsní měnič založený na MOSFET technologii. Pro tento měnič byl navržen plošný spoj, na kterém je umístěna kondenzátorová baterie a externí čidlo proudu. Měniče pro jednotlivé pohony byly řešeny modulárně. Měniče jsou řízeny tříúrovňovým řízením.

Automatická regulace polohy jednotlivých kloubů byla řešena pomocí kaskádní regulační struktury, která se skládá z proudové smyčky, rychlostní smyčky a polohové smyčky. Jako regulátor proudové a rychlostní smyčky byl použit diskretní PS regulátor, pro polohovou smyčku byl z důvodu stability použit diskretní P regulátor. Celý algoritmus automatické regulace polohy byl implementován do jednotlivých kloubových řídicích jednotek systému.

Řídicí systém je založen na mikroprocesorech Atmel ATmega. Řídicí systém se skládá z jedné hlavní řídicí jednotky a třech kloubových řídicích jednotek. Hlavní řídicí jednotka řídí komunikaci SPI mezi mikroprocesory, provádí výpočet inverzní a přímé kinematiky v případě režimu řízení celého robotu a zajišťuje obsluhu komunikačního a ovládacího rozhraní pro

personál. Kloubové řídicí jednotky zajišťují automatickou regulaci polohy jednotlivých kloubů robotu, měření veličin příslušných zpětných vazeb regulace a řízení výkonového měniče.

Na zhotovení této diplomové práce, byl kladen velký důraz jak po mechanické, tak i po elektrické stránce. I přes to, že se během vývoje tříosého robotického systému vyskytlo nemálo problémů, byly splněny všechny body zadání a byl zhotoven funkční robotický systém, který byl doplněn navíc o zabezpečovací algoritmus a režim řízení celého robotu. Zabezpečovací algoritmus hlídá správnou funkci řízení jednotlivých kloubů. V případě detekce poruchy vypíná výkonovou část robotu aby nedošlo k poranění osob nebo mechanickému poškození. Režim řízení celého robotu je založen na přímé a inverzní kinematice. Obě úlohy jsou řešeny metodou přímého užití goniometrických funkcí a jsou pouze na základní úrovni. Není zde řešeno např. plánování trajektorie efektoru robotu.

Podle mého názoru se jedná o kvalitně zhotovený robotický systém, který Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni může používat nejen pro výuku a reprezentační účely, ale i pro další vývoj v oblasti robotiky.

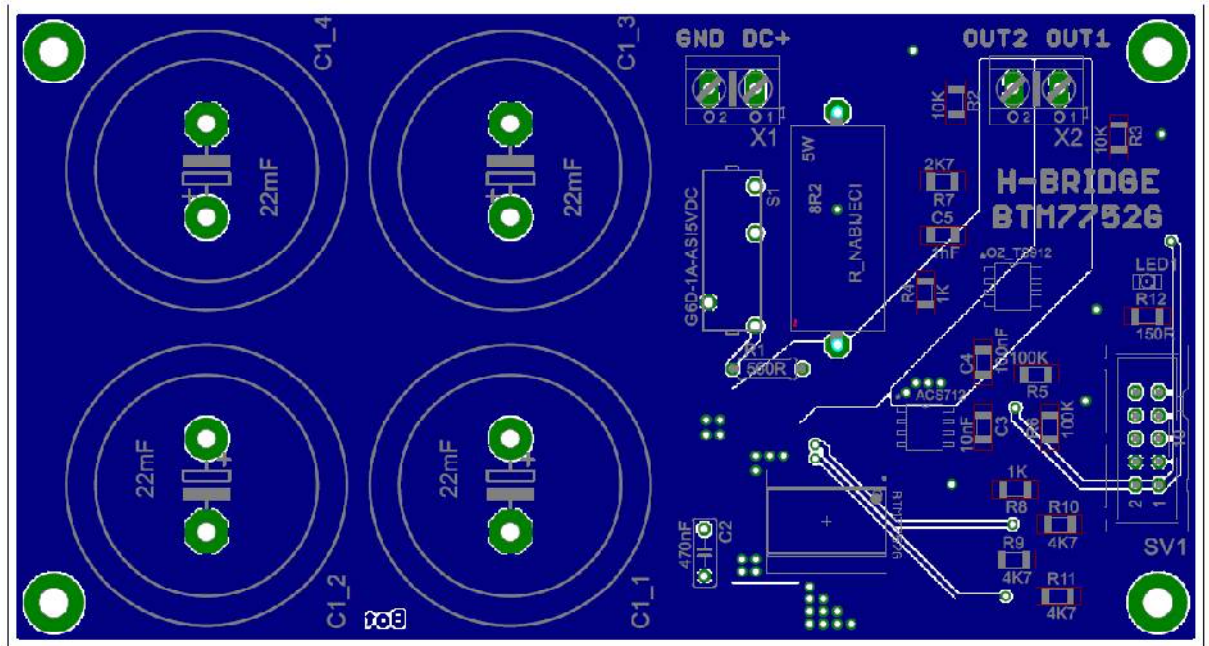
Použitá literatura

- [1] Prof. Ing. František Vondrášek, CSc. *Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2003. ISBN 80-7082-980-X.
- [2] Ing. Karel Zeman, CSc., Ing. Ludvík Spíral, CSc. *Automatická regulace v elektrických pohonech část I*. VŠSE v Plzni, Plzeň 1987.
- [3] Ing. Karel Zeman, CSc., Ing. Ludvík Spíral, CSc. *Automatická regulace v elektrických pohonech část II*. VŠSE v Plzni, Plzeň 1987.
- [4] Doc. Ing. František Tůma, CSc. *Automatická regulace v elektrických pohonech část I*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2007. ISBN 978-80-7043-568-7.
- [5] Doc. Ing. Luděk Piskač, CSc. *Průmyslové roboty*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2004. ISBN 80-7043-278-0.
- [6] Prof. Ing. Lumír Kule, CSc., Dr. Ing. Jiří Flajtingr. *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2005. ISBN 80-7043-354-X.
- [7] Prof. Ing. František Vondrášek, CSc., Ing. Jan Langhammer, CSc., Ing. Jan Měsíček, Ing. Jan Molnár, Ph.D., Bc. Aleš Peroutka. *Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2003. ISBN 80-7082-980-X.
- [8] Ing. Martin Pittermann, Ph.D.. *Elektrické pohony - základy*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2008. ISBN 978-80-7043-729-2.
- [9] *Datasheet ATmega16* [online]. Atmel [11.5.2017]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2466.pdf>
- [10] *Datasheet ATmega644* [online]. Atmel [11.5.2017]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2593.pdf>
- [11] *Datasheet BTM7752G* [online]. Infineon [11.5.2017]. Dostupné z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTM7752G-DS-v02_00-n.pdf?fileId=db3a30432e1525b3012e24c6ed042357
- [12] *Datasheet AS5040* [online]. Ams [11.5.2017]. Dostupné z: <http://ams.com/eng/content/download/1285/7214/494>
- [13] *Datasheet ACS712* [online]. Allegro Microsystems [11.5.2017]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>
- [14] *Datasheet ST912* [online]. STMicroelectronics [11.5.2017]. Dostupné z: <https://www.google.cz/search?client=opera&q=datasheet+atmega32&sourceid=opera&ie=UTF-8&oe=UTF-8#q=st+912+datasheet>

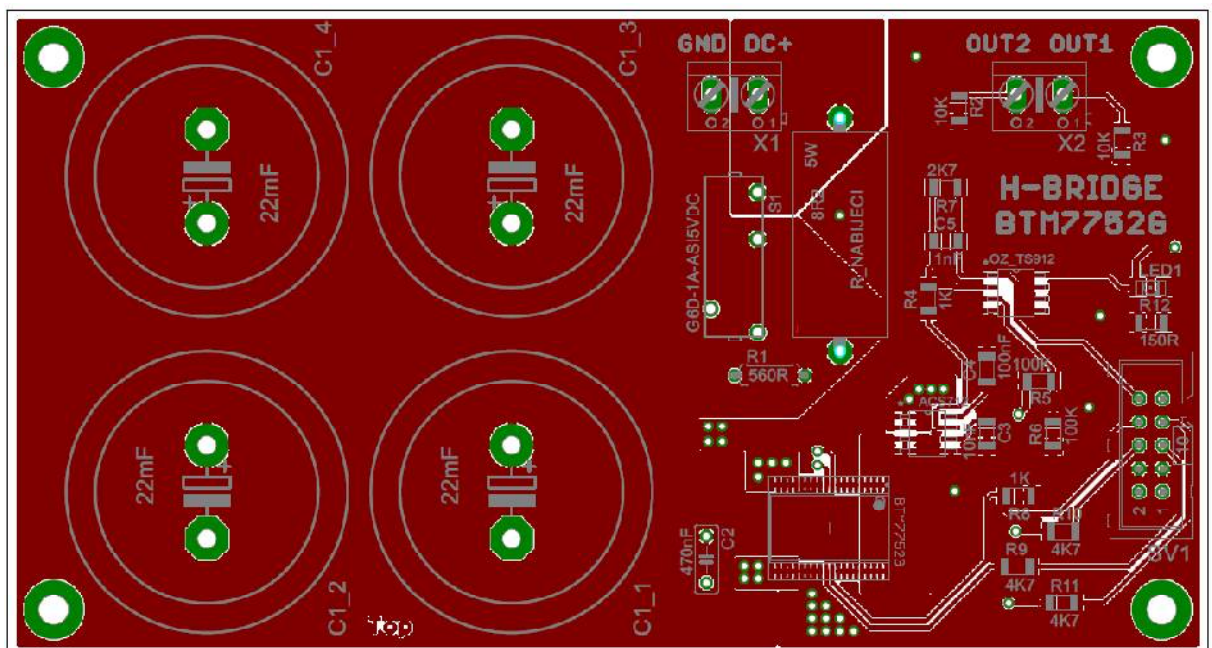
-
- [15] Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D. *Mikroprocesorové řízení pohonů* [prezentace]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/mrp/prednasky.html>
- [16] *Elektrické pohony* [online]. Jiří Pavlíček [12.5.2017]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2006041501>
- [17] *Datasheet LCD ATM4004A* [online]. Hebeild [12.5.2017]. Dostupné z: <http://www.hebeild.com.cn/lcm.datasheet/ATM4004A.pdf>
- [18] *Datasheet LCD ATM4004A* [online]. Hebeild [12.5.2017]. Dostupné z: <http://www.hebeild.com.cn/lcm.datasheet/ATM4004A.pdf>
- [19] *Datasheet řadiče S6A0069* [online]. SAMSUNG [12.5.2017]. Dostupné z: http://www.cse.chalmers.se/edu/resources/mop/documents/datablad_asciidisplay.pdf
- [20] *Datasheet ATtiny25* [online]. Atmel [12.5.2017]. Dostupné z: http://www.atmel.com/images/atmel-2586-avr-8-bit-microcontroller-attiny25-attiny45-attiny85_datasheet.pdf
- [21] *Datasheet motoru PG420-12-49-B* [online]. Stejnsměrné Motory [12.5.2017]. Dostupné z: <http://www.dcmotory.cz/dc-motory-planetova-prevodovka/kestazeni-serie-pg420.html>
- [21] *Datasheet motoru PG521-24-51-B* [online]. Stejnsměrné Motory [12.5.2017]. <http://www.dcmotory.cz/dc-motory-planetova-prevodovka/kestazeni-serie-pg521.html>

ZDROJE OBRÁZKŮ

- (1) Obr. 1 převzat z: <http://www.dcmotory.cz/images/3b-pg420.jpg>
- (2) Obr. 2 převzat z: <http://www.dcmotory.cz/images/71b-pg521.jpg>
- (3) Obr. 3 převzat z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTM7752G-DS-v02_00-n.pdf?fileId=db3a30432e1525b3012e24c6ed042357, str. 3
- (4) Obr. 4 převzat z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTM7752G-DS-v02_00-n.pdf?fileId=db3a30432e1525b3012e24c6ed042357, str. 4
- (5) Obr. 5 převzat z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTM7752G-DS-v02_00-n.pdf?fileId=db3a30432e1525b3012e24c6ed042357, str. 17
- (6) Obr. 6 převzat z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTM7752G-DS-v02_00-n.pdf?fileId=db3a30432e1525b3012e24c6ed042357, str. 17
- (7) Obr. 7 převzat z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTM7752G-DS-v02_00-n.pdf?fileId=db3a30432e1525b3012e24c6ed042357, str. 18
- (8) Obr. 8 převzat z: https://botland.com.pl/1774-thickbox_default/enkoder-magnetyczny-as5040.jpg
- (9) Obr. 9 převzat z: http://www.yeint.ru/upload/suppliers/ams/img/block_diagram_as5040.jpg
- (10) Obr. 10 převzat z: <http://ams.com/eng/content/download/1285/7214/494>, str. 18
- (11) Obr. 11 převzat z: <http://ams.com/eng/content/download/1285/7214/494>, str. 26
- (12) Obr. 12 převzat z: <http://ams.com/eng/content/download/1285/7214/494>, str. 23
- (13) Obr. 13 převzat z: <http://ams.com/eng/content/download/1285/7214/494>, str. 23



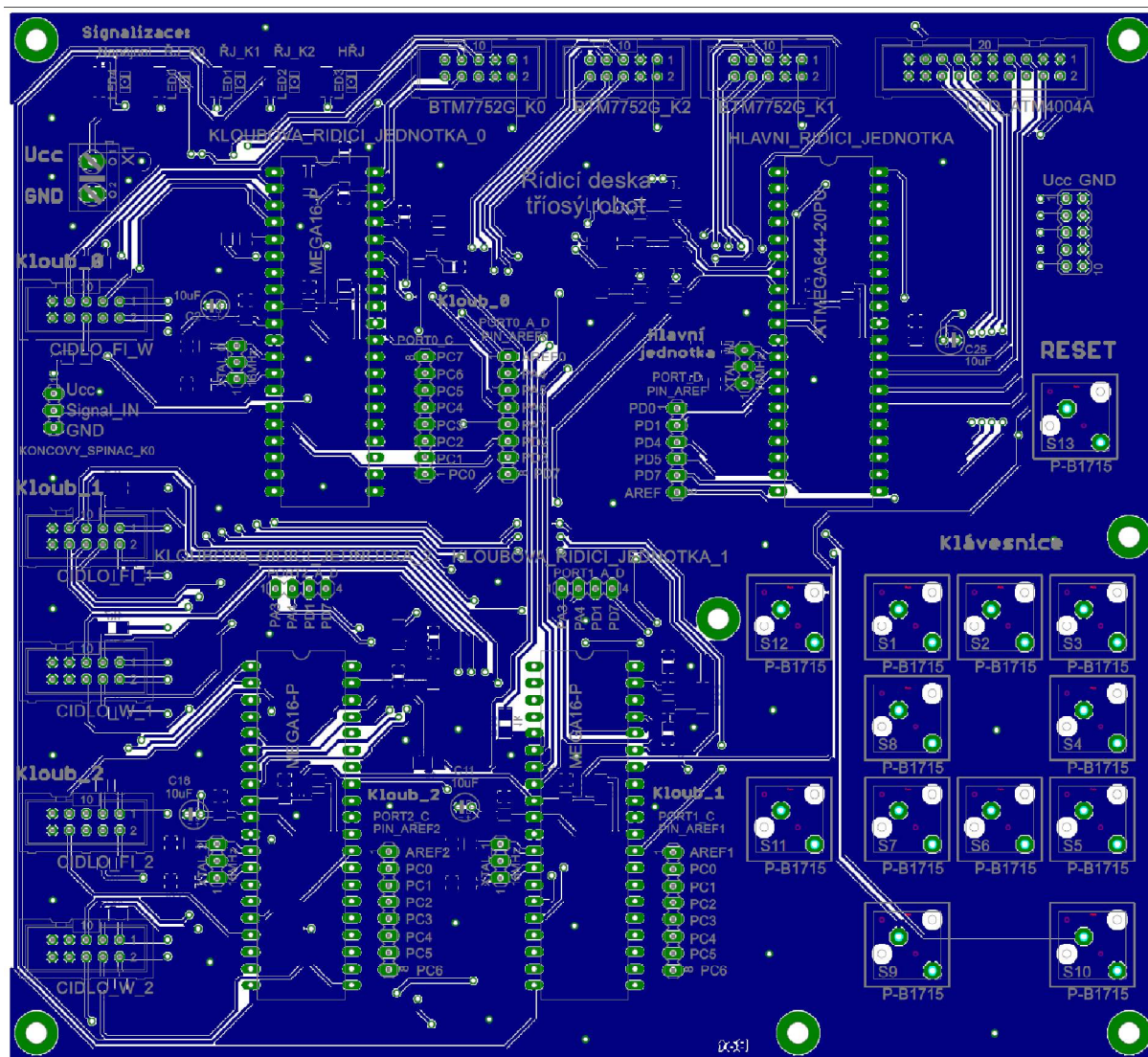
Obr. A.2 Spodní vrstva plošného spoje měniče



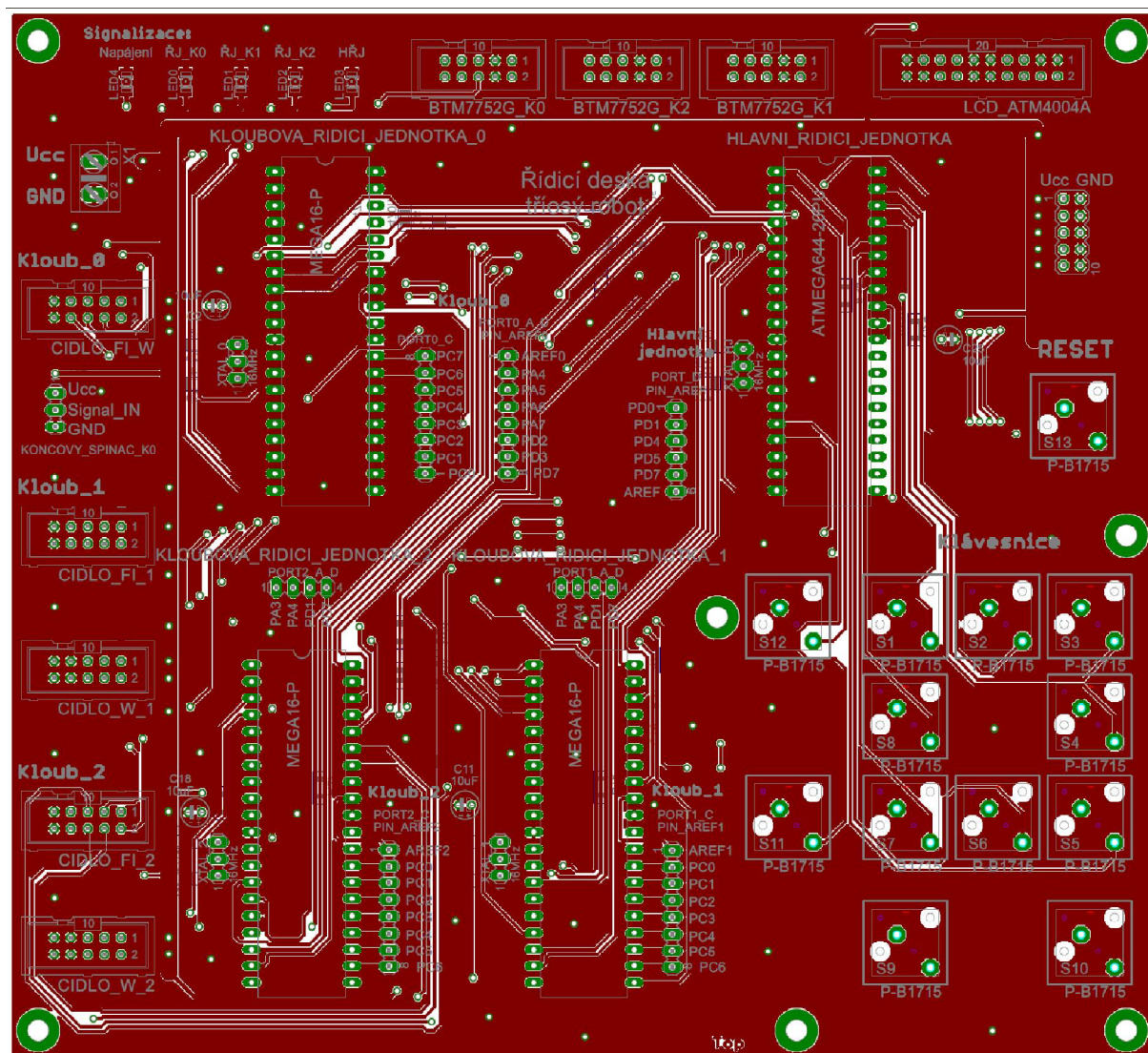
Obr. A.3 Horní vrstva plošného spoje měniče

Příloha B - Realizace modulu řídicí desky robotu

-schéma je přiloženo pouze v elektronické podobě z důvodu jeho nadměrné velikosti

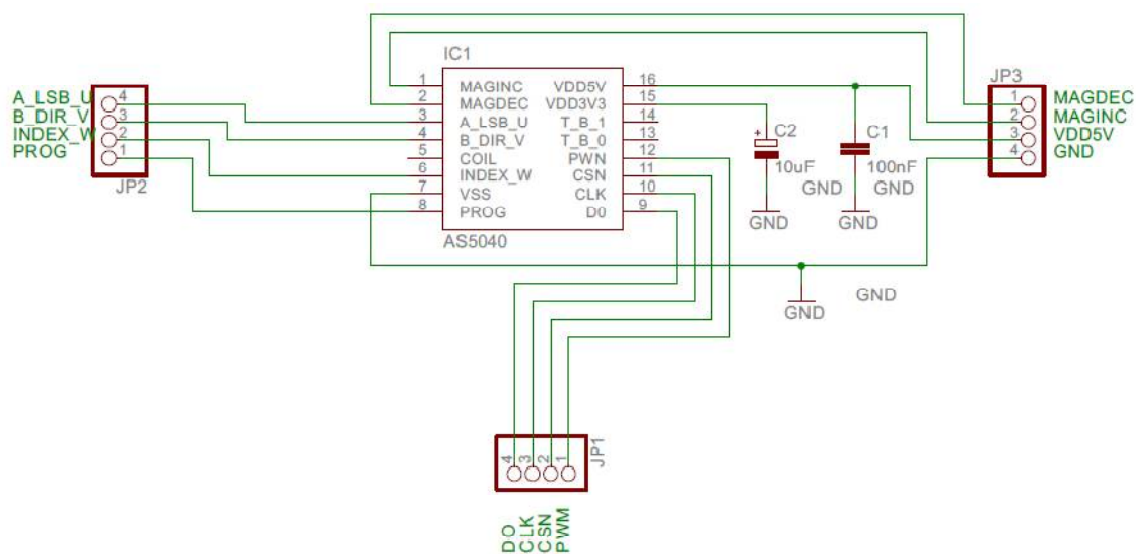


Obr. B.1 Spodní vrstva plošného spoje řídicí desky robotu

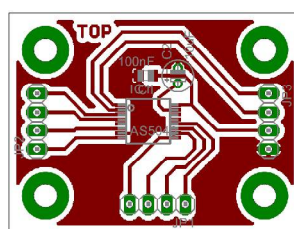


Obr. B.2 Horní vrstva plošného spoje řídicí desky robotu

Příloha C - Realizace modulu s integrovaným obvodem AS5040

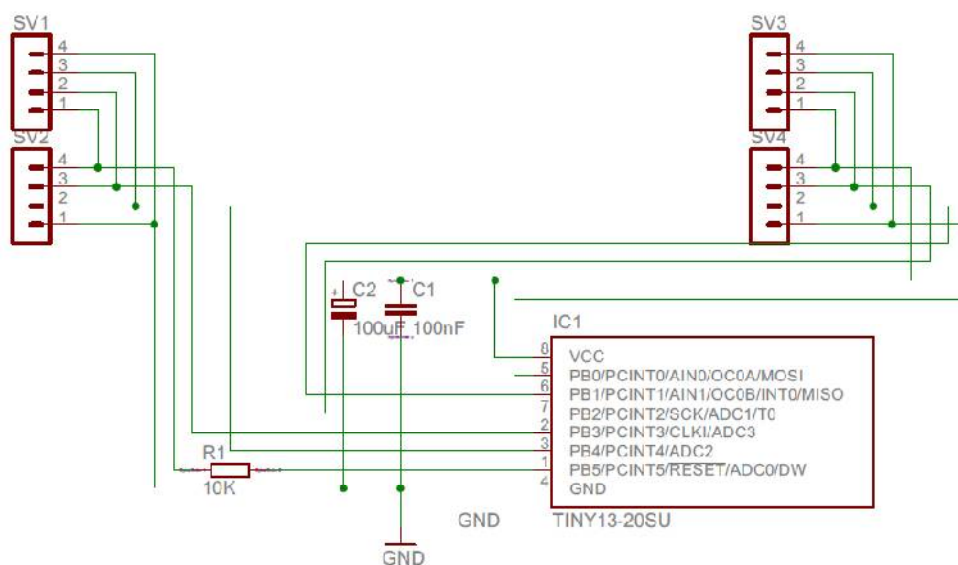


Obr. C.1 Schéma plošného spoje s obvodem AS5040

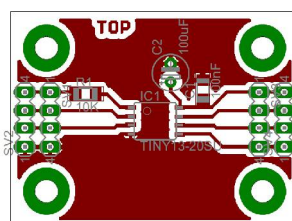


Obr. C.2 Horní vrstva plošného spoje s obvodem AS5040

Příloha D - Realizace modulu s mikroprocesorem ATtiny25



Obr. D.1 Schéma plošného spoje s mikroprocesorem ATtiny25

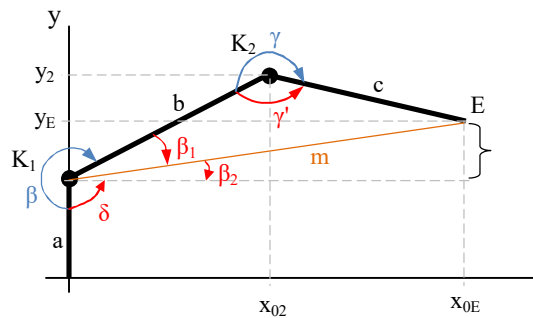


Obr. D.2 Horní vrstva plošného spoje s mikroprocesorem ATtiny25

Příloha E - Návrh přímé kinematiky tříosého robotu

Zadáno: $a=22,4\text{cm}$, $b=25\text{cm}$, $c=25\text{cm}$, $d=4,5\text{cm}$, α , β , γ .

Případ kdy platí $\beta \geq 180^\circ$:



Obr. E.1 Preferované natočení pro $\beta \geq 180^\circ$, pohled z čela.

$\gamma'=?$

$$\gamma' = 360 - \gamma \quad (\text{E.1})$$

$m=?$

$$m^2 = c^2 + b^2 - 2cb \cdot \cos \gamma' \quad \rightarrow \quad m = \sqrt{c^2 + b^2 - 2cb \cdot \cos \gamma'} \quad (\text{E.2})$$

$\beta_1=?$

$$c^2 = b^2 + m^2 - 2bm \cdot \cos \beta_1 \quad \rightarrow \quad \beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{b^2 + m^2 - c^2}{2bm} \right) \quad (\text{E.3})$$

$\beta_2=?$

$$270^\circ = \beta + \beta_1 + \beta_2 \quad \rightarrow \quad \beta_2 = 270^\circ - \beta - \beta_1 \quad (\text{E.4})$$

$x_{0E}=?$

$$\cos \beta_2 = \frac{x_{0E}}{m} \quad \rightarrow \quad x_{0E} = m \cdot \cos \beta_2 \quad (\text{E.5})$$

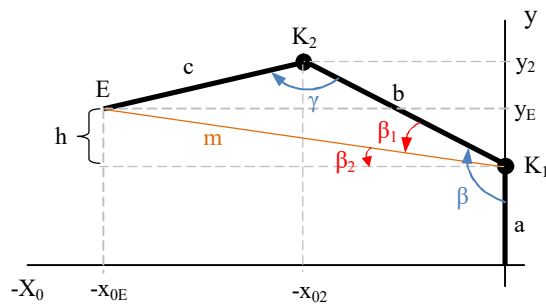
$h=?$

$$\sin \beta_2 = \frac{h}{m} \quad \rightarrow \quad h = m \cdot \sin \beta_2 \quad (\text{E.6})$$

$y_E=?$

$$y_E = a + h \quad (\text{E.7})$$

Případ kdy platí $\beta < 180^\circ$:



Obr. E.2 Preferované natočení pro $\beta < 180^\circ$, pohled z čela.

$m=?$

$$m^2 = c^2 + b^2 - 2cb \cdot \cos \gamma \quad \rightarrow \quad m = \sqrt{c^2 + b^2 - 2cb \cdot \cos \gamma} \quad (\text{E.8})$$

$\beta_1=?$

$$c^2 = b^2 + m^2 - 2bm \cdot \cos \beta_1 \quad \rightarrow \quad \beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{b^2 + m^2 - c^2}{2bm} \right) \quad (\text{E.9})$$

$\beta_2=?$

$$90^\circ = \beta - \beta_1 - \beta_2 \quad \rightarrow \quad \beta_2 = \beta - \beta_1 - 90^\circ \quad (\text{E.10})$$

$x_{0E}=?$

$$\cos \beta_2 = \frac{-x_{0E}}{m} \quad \rightarrow \quad -x_{0E} = m \cdot \cos \beta_2 \quad (\text{E.11})$$

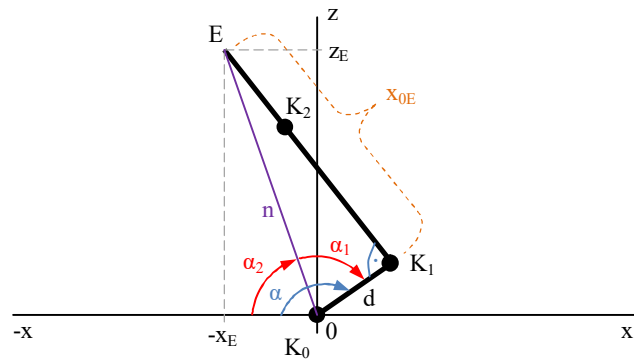
$h=?$

$$\sin \beta_2 = \frac{h}{m} \quad \rightarrow \quad h = m \cdot \sin \beta_2 \quad (\text{E.12})$$

$y_E=?$

$$y_E = a + h \quad (\text{E.13})$$

Případ pro $x_{0E} \geq 0$:



Obr. E.3 Preferované natočení pro $x_{0E} \geq 0$, pohled shora.

$n=?$

$$n = \sqrt{x_{0E}^2 + d^2} \quad (\text{E.14})$$

$\alpha_1=?$

$$\cos \alpha_1 = \frac{d}{n} \quad \rightarrow \quad \alpha_1 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{n}\right) \quad (\text{E.15})$$

$\alpha_2=?$

$$\alpha_2 = \alpha - \alpha_1 \quad (\text{E.16})$$

Výpočet x_E pro $\alpha_2 \leq 90^\circ$:

$$\cos \alpha_2 = \frac{-x_E}{n} \quad \rightarrow \quad -x_E = n \cdot \cos \alpha_2 \quad (\text{E.17})$$

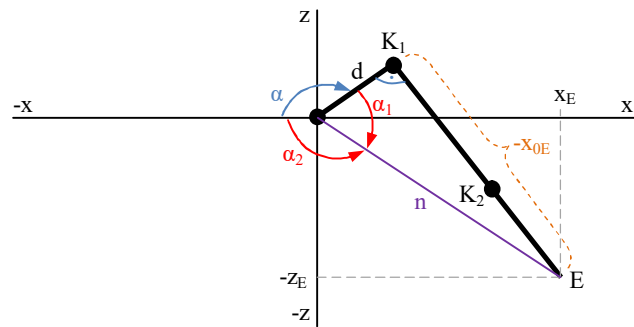
Výpočet x_E pro $\alpha_2 > 90^\circ$:

$$\cos \alpha_2 = \frac{x_E}{n} \quad \rightarrow \quad x_E = n \cdot \cos \alpha_2 \quad (\text{E.18})$$

$z_E=?$

$$\sin \alpha_2 = \frac{z_E}{n} \quad \rightarrow \quad z_E = n \cdot \sin \alpha_2 \quad (\text{E.19})$$

Případ pro $x_{0E} < 0$:



Obr. E. 4 Preferované natočení pro $x_{0E} < 0$, pohled shora.

$n=?$

$$n = \sqrt{x_{0E}^2 + d^2} \quad (E.20)$$

$\alpha_1=?$

$$\cos \alpha_1 = \frac{d}{n} \quad \rightarrow \quad \alpha_1 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{n}\right) \quad (E.21)$$

$\alpha_2=?$

$$360^\circ = \alpha + \alpha_1 + \alpha_2 \quad \rightarrow \quad \alpha_2 = 360^\circ - \alpha - \alpha_1 \quad (E.22)$$

Výpočet x_E pro $\alpha_2 \geq 90^\circ$:

$$\cos \alpha_2 = \frac{x_E}{n} \quad \rightarrow \quad x_E = n \cdot \cos \alpha_2 \quad (E.23)$$

Výpočet x_E pro $\alpha_2 < 90^\circ$:

$$\cos \alpha_2 = \frac{-x_E}{n} \quad \rightarrow \quad -x_E = n \cdot \cos \alpha_2 \quad (E.24)$$

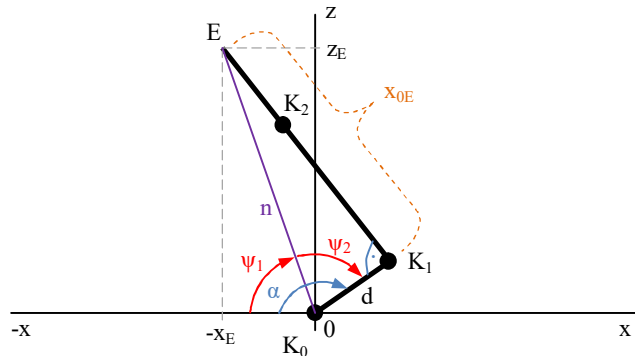
$z_E=?$

$$\sin \alpha_2 = \frac{-z_E}{n} \quad \rightarrow \quad -z_E = n \cdot \sin \alpha_2 \quad (E.25)$$

Příloha F - Návrh inverzní kinematiky tříosého robotu

Zadáno: $a=22,4\text{cm}$, $b=25\text{cm}$, $c=25\text{cm}$, $d=4,5\text{cm}$, x_E , y_E , z_E .

Případ pro zadání $-x_E$ a z_E :



Obr. F.1 Preferované natočení pro $-x_E$ a z_E , pohled shora.

$n=?$

$$n = \sqrt{x_E^2 + z_E^2} \quad (\text{F.1})$$

$x_{0E}=?$

$$x_{0E} = \sqrt{n^2 - d^2} \quad (\text{F.2})$$

$\psi_1=?$

$$\sin \psi_1 = \frac{z_E}{n} \quad \rightarrow \quad \psi_1 = \sin^{-1} \left(\frac{z_E}{n} \right) \quad (\text{F.3})$$

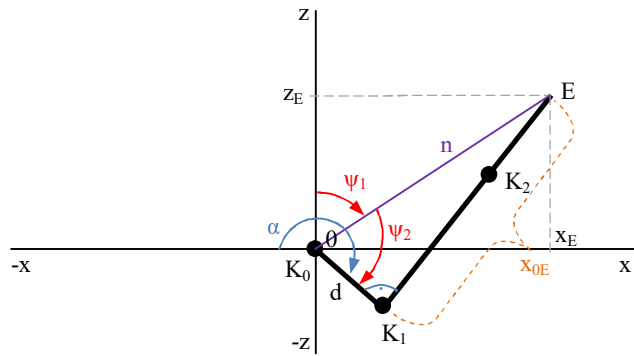
$\psi_2=?$

$$\cos \psi_2 = \frac{d}{n} \quad \rightarrow \quad \psi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{d}{n} \right) \quad (\text{F.4})$$

$\alpha=?$

$$\alpha = \psi_1 + \psi_2 \quad (\text{F.5})$$

Případ pro zadání x_E a z_E :



Obr. F.2 Preferované natočení pro x_E a z_E , pohled shora.

$n=?$

$$n = \sqrt{x_E^2 + z_E^2} \quad (\text{F.6})$$

$x_{0E}=?$

$$x_{0E} = \sqrt{n^2 - d^2} \quad (\text{F.7})$$

$\psi_1=?$

$$\sin \psi_1 = \frac{x_E}{n} \quad \rightarrow \quad \psi_1 = \sin^{-1} \left(\frac{x_E}{n} \right) \quad (\text{F.8})$$

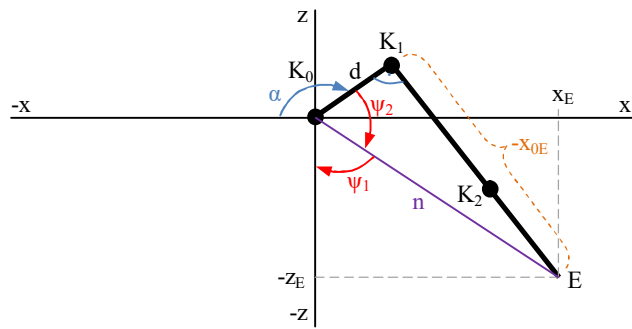
$\psi_2=?$

$$\cos \psi_2 = \frac{d}{n} \quad \rightarrow \quad \psi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{d}{n} \right) \quad (\text{F.9})$$

$\alpha=?$

$$\alpha = \psi_1 + \psi_2 + 90^\circ \quad (\text{F.10})$$

Případ pro zadání x_E a $-z_E$:



Obr. F.3 Preferované natočení pro x_E a $-z_E$, pohled shora.

$n=?$

$$n = \sqrt{x_E^2 + z_E^2} \quad (\text{F.11})$$

$x_{0E}=?$

$$-x_{0E} = \sqrt{n^2 - d^2} \quad (\text{F.12})$$

$\psi_1=?$

$$\sin \psi_1 = \frac{x_E}{n} \quad \rightarrow \quad \psi_1 = \sin^{-1} \left(\frac{x_E}{n} \right) \quad (\text{F.13})$$

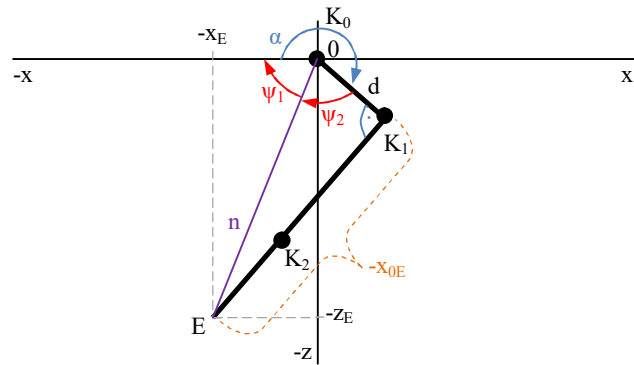
$\psi_2=?$

$$\cos \psi_2 = \frac{d}{n} \quad \rightarrow \quad \psi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{d}{n} \right) \quad (\text{F.14})$$

$\alpha=?$

$$360^\circ = \alpha + \psi_1 + \psi_2 + 90^\circ \quad \rightarrow \quad \alpha = 270^\circ - \psi_2 - \psi_1 \quad (\text{F.15})$$

Případ pro zadání $-x_E$ a $-z_E$:



Obr. F.4 Preferované natočení pro $-x_E$ a $-z_E$, pohled shora.

$n=?$

$$n = \sqrt{x_E^2 + z_E^2} \quad (\text{F.16})$$

$x_{0E}=?$

$$-x_{0E} = \sqrt{n^2 - d^2} \quad (\text{F.17})$$

$\psi_1=?$

$$\sin \psi_1 = \frac{-z_E}{n} \rightarrow \psi_1 = \sin^{-1}\left(\frac{-z_E}{n}\right) \quad (\text{F.20})$$

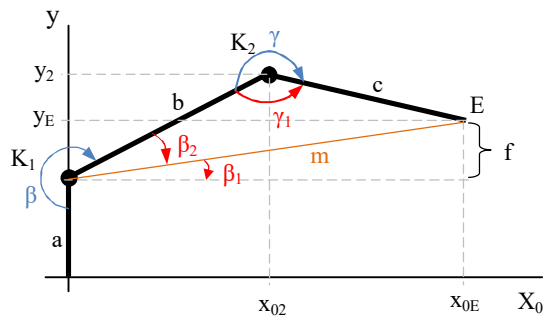
$\psi_2=?$

$$\cos \psi_2 = \frac{d}{n} \rightarrow \psi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{n}\right) \quad (\text{F.21})$$

$\alpha=?$

$$360^\circ = \alpha + \psi_1 + \psi_2 \rightarrow \alpha = 360^\circ - \psi_2 - \psi_1 \quad (\text{F.22})$$

Případ pro $x_{0E} \geq 0$:



Obr. F.5 Preferované natočení pro $x_{0E} \geq 0$, pohled z čela.

$f=?$

$$f = y_E - a \quad (\text{F.23})$$

$m=?$

$$m = \sqrt{x_{0E}^2 + f^2} \quad (\text{F.24})$$

$\beta_1=?$

$$\sin \beta_1 = \frac{f}{m} \quad \rightarrow \quad \beta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{f}{m}\right) \quad (\text{F.25})$$

$\gamma_1=?$

$$m^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos \gamma_1 \quad \rightarrow \quad \gamma_1 = \cos^{-1}\left(\frac{b^2 + c^2 - m^2}{2bc}\right) \quad (\text{F.26})$$

$\gamma=?$

$$\gamma = 360^\circ - \gamma_1 \quad (\text{F.27})$$

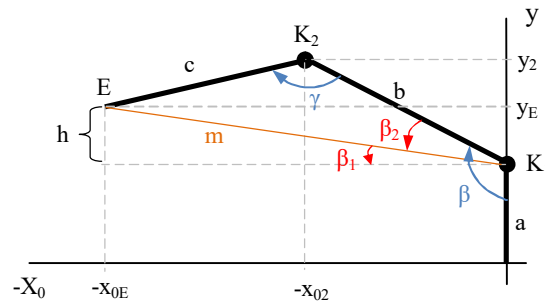
$\beta_2=?$

$$c^2 = b^2 + m^2 - 2bm \cdot \cos \beta_2 \quad \rightarrow \quad \beta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{b^2 + m^2 - c^2}{2bm}\right) \quad (\text{F.28})$$

$\beta=?$

$$360^\circ = \beta + \beta_2 + \beta_1 + 90^\circ \quad \rightarrow \quad \beta = 270^\circ - \beta_2 - \beta_1 \quad (\text{F.29})$$

Případ pro $x_{0E} < 0$:



Obr. F.6 Preferované natočení pro $x_{0E} < 0$, pohled z čela.

$f=?$

$$f = y_E - a \quad (\text{F.30})$$

$m=?$

$$m = \sqrt{x_{0E}^2 + f^2} \quad (\text{F.31})$$

$\beta_1=?$

$$\sin \beta_1 = \frac{f}{m} \quad \rightarrow \quad \beta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{f}{m}\right) \quad (\text{F.32})$$

$\gamma=?$

$$m^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos \gamma \quad \rightarrow \quad \gamma = \cos^{-1}\left(\frac{b^2 + c^2 - m^2}{2bc}\right) \quad (\text{F.33})$$

$\beta_2=?$

$$c^2 = b^2 + m^2 - 2bm \cdot \cos \beta_2 \quad \rightarrow \quad \beta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{b^2 + m^2 - c^2}{2bm}\right) \quad (\text{F.34})$$

$\beta=?$

$$180^\circ = \beta - \beta_2 - \beta_1 + 90^\circ \quad \rightarrow \quad \beta = 90^\circ + \beta_2 + \beta_1 \quad (\text{F.35})$$