

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Alternativní návrh a realizace polohového
servomechanizmu jako analogově a číslicově
regulované soustavy I

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislava Papežová, CSc.

Autor práce: Bc. Vojtěch Burian

Praha 2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Vojtěch Burian

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Alternativní návrh a realizace polohového servomechanismu jako analogově a číslicově regulované soustavy I

Název anglicky

Alternative design and realization of position servo as analog and digital controlled system I

Cíle práce

Cílem práce je návrh a realizace modelového polohového servomechanismu s chováním lineárního dynamického systému co nejnižšího řádu. Konkrétně jde o návrh a realizaci přístrojové části, tedy o návrh/výběr servomotoru, převodovky, měření rychlosti otáčení a polohy hřídele, návrh a realizaci výkonové elektroniky a jejího propojení s analogovým nebo číslicovým regulátorem.

Metodika

Na základě rozboru vlastností požadovaného polohového servomechanismu proveďte:

1. výběr vhodného stejnosměrného motoru – elektrické ovládání s amplitudovou modulací normalizovaného signálu,
2. výběr vhodného měření rychlosti otáčení a úhlu natočení hřídele pro jejich začlenění do zpětné vazby regulátoru,
3. návrh a realizaci výkonových obvodů soustavy, úprava signálů na normovaný
4. návrh a realizaci:
 - a) analogového řízení,
 - b) diskrétního řízení,
5. porovnání vlastností obou řešení.

Doporučený rozsah práce

50 – 60 stran

Klíčová slova

regulace, servomechanismus, výkonové přizpůsobení

Doporučené zdroje informací

BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-148-9.

Franklin, G.F., J.D. Powell, and M.L. Workman. *Digital Control of Dynamic Systems, Second Edition*, Addison-Wesley, 1990

Pospíchal, Z. *Realizace aplikace pro ovládání servopohonu*. VUT – Brno, 2008.

Roubíček, O. *Elektrické motory a pohony – příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. BEN – technická literatura, Praha 2004, ISBN 80-7300-092-X

Wescott, T. *Applied Control Theory for Embedded Systems*, Elsevier, 2006



Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Stanislava Papežová, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 2. 2. 2018

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2018

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Alternativní návrh a realizace polohového servomechanizmu jako analogově a číslicově regulované soustavy I vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V..... Dne.....

Podpis autora.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Stanislavě Papežové, CSc. za pomoc, čas a odborné rady při vedení diplomové práce.

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací analogově řízeného polohového servomechanismu. Práce je rozdělena na několik částí. První část je zaměřena na výběr vhodného stejnosměrného motoru, podle požadovaných vlastností. Druhá část se věnuje výběru snímače polohy hřídele stejnosměrného motoru, podle cenové dostupnosti a vhodných vlastností. V další části je popsána realizace výkonového obvodu pro řízení stejnosměrného motoru. Čtvrtá část se zabývá modulem optické závory a jejím začleněním do obvodu. Poslední část je věnovaná popisem Arduina jako digitálního regulátoru a jeho programováním pro správnou funkčnost celého projektu.

Klíčová slova: regulace, servomechanismus, výkonové přizpůsobení

Summary: This thesis deals with design and realization of analog-controlled position servomechanism. The thesis is divided into several parts. The first part is focused on selection of suitable DC motor according to required properties. The second part deals with the selection of the position sensor of the DC motor shaft, according to affordability and suitable properties. The next part describes the realization of the power circuit for DC motor control. The fourth part deals with the optical barrier module and its integration into the circuit. The last part is devoted to the description of Arduino as a digital controller and its programming for the proper functioning of the whole project.

Key words: regulation, servomechanism, power adaptation

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle práce	2
3	Metodika	3
4	Přehled řešené problematiky	4
4.1	Konstrukce stejnosměrného motoru	4
4.2	Princip stejnosměrného motoru	5
4.3	Rozdělení stejnosměrných motorů.....	7
4.3.1	Stejnoseměrné motory s cizím buzením.....	7
4.3.2	Stejnoseměrné motory se sériovým buzením.....	8
4.3.3	Stejnoseměrné motory s derivačním buzením.....	9
4.3.4	Stejnoseměrné motory se sdruženým buzením	10
4.4	Snímače otáček	11
4.4.1	Tachometrické dynamo	12
4.4.2	Tachometrický alternátor.....	13
4.4.3	Indukční snímač.....	14
4.4.4	Magnetoelektrický snímač.....	15
4.4.5	Kapacitní snímač	16
4.4.6	Optoelektronický snímač	17
4.5	Snímače polohy.....	19
4.5.1	Resolver	19

4.5.2	Selsyn	20
4.5.3	Absolutní snímač	21
4.5.4	Kapacitní snímač	22
4.6	Regulátory.....	23
4.6.1	Proporcionální regulátor	23
4.6.2	Integrační regulátor.....	24
4.6.3	Derivační regulátor	25
4.6.4	Proporcionálně integrační regulátor	26
4.6.5	Proporcionálně derivační regulátor	27
4.6.6	Proporcionálně integračně derivační regulátor	28
5	Vlastní zpracování	29
5.1	Výběr motoru	30
5.2	Měření polohy a natočení hřídele	33
5.3	Realizace výkonového obvodu	36
5.4	Nulová poloha.....	42
5.5	Arduino Mega 2560	45
5.6	Ovládání natočení hřídele pomocí potenciometru	46
5.7	Programové vybavení	48
6	Zhodnocení výsledků.....	52
7	Závěr	54
8	Seznam použitých zdrojů.....	55

9 Přílohy	58
------------------------	-----------

Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma stejnosměrného motoru [5].....	5
Obrázek 2 Princip stejnosměrného motoru [2].....	6
Obrázek 3 Princip motoru s cizím buzením [5].....	7
Obrázek 4 Princip motoru se sériovým buzením [5].....	8
Obrázek 5 Schéma motoru s derivačním buzením [5]	9
Obrázek 6 Princip motoru se sdruženým vinutím [5].....	10
Obrázek 7 Rozdělení snímačů otáček.....	11
Obrázek 8 Princip Tachometrického dynama [6].....	12
Obrázek 9 Princip tachometrického alternátoru [4]	13
Obrázek 10 Princip indukčního snímače [7]	14
Obrázek 11 Princip elektromagnetického snímače [8].....	15
Obrázek 12 Princip kapacitního snímače otáček [4]	16
Obrázek 13 Princip inkrementálního snímače [11]	17
Obrázek 14 Světelný tok na fotodiodách [12].....	18
Obrázek 15 Zpracování signálu [9]	18
Obrázek 16 Princip resolveru [16].....	19
Obrázek 17 Zapojení selsynu [17].....	20
Obrázek 18 Kód absolutních snímačů. a) Binární kód b) Grayův kód [19].....	21
Obrázek 19 Schéma kapacitního snímače [2].....	22

Obrázek 20 Zapojení P regulátoru [23]	23
Obrázek 21 Schéma zapojení I regulátoru [23]	24
Obrázek 22 Schéma zapojení D regulátoru [23]	25
Obrázek 23 Schéma zapojení PI regulátoru [24]	26
Obrázek 24 Schéma PD regulátoru [24]	27
Obrázek 25 Schéma zapojení PID regulátoru [24]	28
Obrázek 26 DC motor GM25-370CHV-286-R [23]	30
Obrázek 27 Motorek PAL	31
Obrázek 28 Převodovka motoru PAL	32
Obrázek 29 Inkrementální enkodér RU-1081 [24]	33
Obrázek 30 Impulzní diagram RU-1081 [24]	35
Obrázek 31 Schéma zapojení ručního ovládnání motoru	36
Obrázek 32 Schéma zapojení řízení s potenciometrem	37
Obrázek 33 Realizovaný výkonový obvod	38
Obrázek 34 Tranzistor IRF530N	39
Obrázek 35 Tranzistor IRF9530N	40
Obrázek 36 OZ LM741	41
Obrázek 37 Zdroj 12 V DC	42
Obrázek 38 Model kotoučku	43
Obrázek 39 Modul optické závory	44
Obrázek 40 Blokové schéma optické závory	45

Obrázek 41 Arduino Mega 2560	45
Obrázek 42 Celkové blokové zapojení.....	47

Seznam tabulek

Tabulka 1 Požadavky výběru DC motoru	30
Tabulka 2 Parametry motoru GM-25-370CHV-286-R [23]	31
Tabulka 3 Parametry DC motoru PAL	32
Tabulka 4 Parametry senzoru RU-1081 [24].....	34
Tabulka 5 Parametry senzoru ARC 400 [25]	35
Tabulka 6 Součástky pro řízení motoru.....	38
Tabulka 7 Parametry tranzistoru IRF530N	39
Tabulka 8 Parametry tranzistoru IRF9530N	40
Tabulka 9 Katalogové údaje OZ LM741	41

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací polohového servomechanismu, jako analogově a číslicově regulovatelné soustavy. Realizované zařízení by mělo sloužit jako model do výuky pro ovládání například hořáků, kde lze jednoduše pomocí potenciometru nastavit požadovaný průtok plynu a tím ovlivnit teplotu ohřívané součásti. Dalším využitím je seznámení se s analogovým a číslicovým zpracováním signálů a praktické ověření principu snímání inkrementálního snímače.

V teoretické části se práce snaží přiblížit a vysvětlit principy jednotlivých typů DC motorů. Poté rozděluje snímače polohy a otáček dle principů snímání, a nakonec popisuje funkci a použití regulátorů.

Praktická část se zabývá přímo návrhem a realizací polohového servomechanismu a je rozdělena do několika částí. Jako první se vybírá vhodný stejnosměrný motor s integrovanou převodovkou, který se svými vlastnostmi nejvíce přibližuje požadovaným hodnotám. Po výběru vhodného stejnosměrného motoru přichází na řadu výběr vhodného měření úhlu natočení hřídele, podle splnění mechanických a elektrických vlastností. V další části je popsán postup realizace výkonového obvodu vhodného pro analogové řízení stejnosměrného motoru. Po vytvoření výkonového obvodu se práce zabývá realizací a nastavením hřídele do výchozí nulové polohy, odkud se začne hřídel natáčet do požadované polohy. Poslední kapitolou z praktické části diplomové práce je popis Arduina, jako číslicového regulátoru celé soustavy a popsání jednotlivých částí jeho kódu pro ovládání úhlu natočení stejnosměrného motoru.

Závěrečná kapitola zhodnocuje komplexní řešení, popisuje doporučené úpravy a vylepšení a porovnává je s jinými dostupnými výrobky.

2 Cíle práce

Cílem práce je návrh a realizace modelového polohového servomechanismu s chováním lineárního dynamického systému co nejnižšího řádu. Konkrétně jde o návrh a realizaci přístrojové části, tedy o návrh a výběr stejnosměrného motoru, převodovky, měření rychlosti otáčení a polohy hřídele, návrh a realizaci výkonové elektroniky a jejího propojení s analogovým nebo číslicovým regulátorem.

3 Metodika

V teoretické části se tato diplomová práce zabývá popisem a rozdělením elektrických DC motorů do jednotlivých kategorií podle budicího vinutí. Druhá část je věnována rozdělení snímačů polohy podle principu snímání. Další část se zaměřuje na rozdělení snímačů otáček. Poslední část z teoretického rozboru je kapitola zaměřená na rozdělení a popis principu jednotlivých i složených regulátorů. Jejich výhody i nevýhody a využití u regulovaných soustav.

Praktická část diplomové práce je zaměřena na alternativní návrh a sestavení polohového servomechanismu s analogovým a číslicovým řízením. Jako první je vybrán, podle zadaných parametrů, vhodný stejnosměrný motor, snímač úhlu natočení hřídele stejnosměrného motoru. Další část je věnována samostatné realizaci výkonového obvodu pro řízení vybraného motoru a popisuje způsob nastavení hřídele motoru do výchozí polohy. Poslední kapitola v praktické části je věnována Arduinu, které slouží jako číslicový regulátor soustavy a jeho programování. Závěrečná kapitola porovnává výhody a nevýhody analogového řízení s řízením číslicovým a celkový postup řešení.

4 Přehled řešené problematiky

Tato kapitola se zabývá popisem a rozdělením stejnosměrných motorů, snímačů polohy, snímačů otáček a regulátorů. V první části popisuje funkci jednotlivých stejnosměrných motorů, které jsou historicky nejdéle používanými elektrickými pohonnými jednotkami. Popisuje jejich vlastnosti a charakteristiky a rozděluje je do jednotlivých kategorií podle buzení. Druhá část se zaměřuje na snímače polohy a otáček, rozděluje je do jednotlivých kategorií podle principu snímání jednotlivých veličin a popisuje způsob vyhodnocování snímaných veličin pro další využití. Poslední část se zabývá popisem a rozdělením regulátorů do kategorií podle typu regulace a způsobu použití podle specifických vlastností.

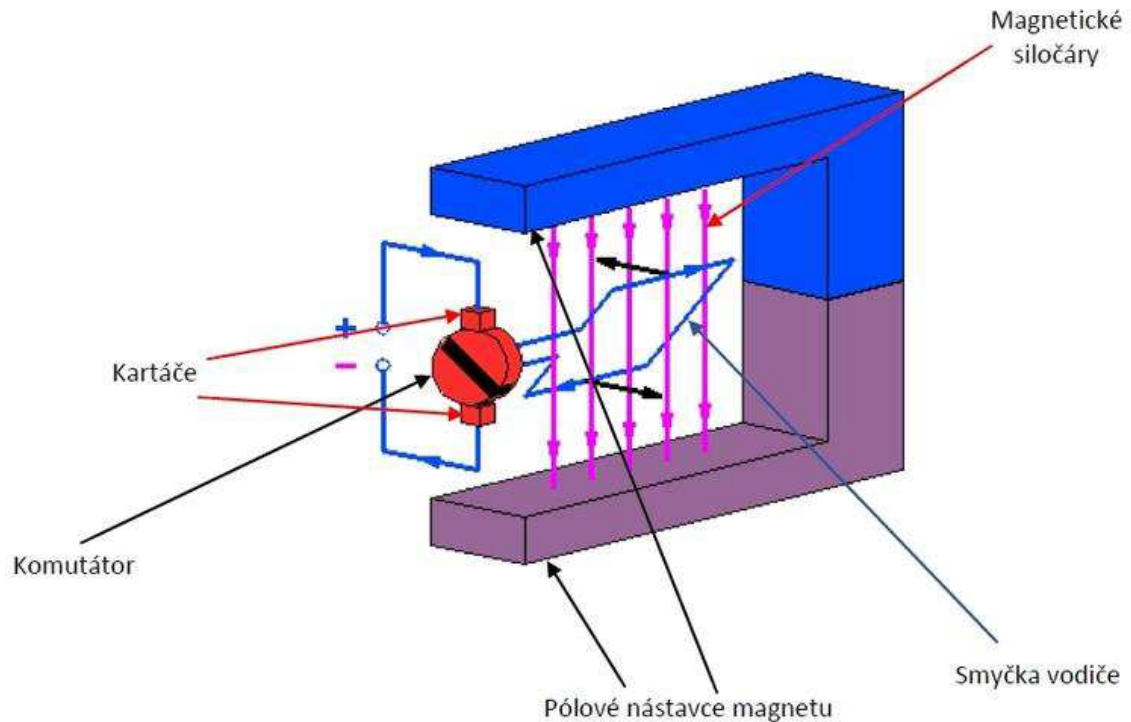
4.1 Konstrukce stejnosměrného motoru

Stator: Pevná část motoru je tvořena hlavními póly pro vytvoření magnetického toku. Ty jsou buzeny permanentními magnety, nebo drážkami s cívkami vytvářející dynamické statorové pole. Budící vinutí je složeno z pólového nástavce a pólového jádra. [1,3]

Rotor: Pohyblivá část motoru (kotva) je tvořena pomocí cívek. Do cívek přivedeme elektrickou energii, která vytvoří magnetické pole. Magnetické pole rotoru a magnetické pole statoru spolu vytváří točivý pohyb rotoru. [1,3]

Komutátor: Složený z několika vodivých (měděných) lamel, které jsou mezi sebou izolované a na něž doléhají grafitové kartáčky. Tím dochází ke změnám směru proudu protékajícího cívkami rotoru a zajištění napájení cívky vždy pod aktivním pólem. Tím je dosaženo optimální účinnosti otáčení motoru. Grafitové kartáče komutátoru jsou problémovou součástí stejnosměrného motoru, protože se delším používáním opotřebovávají a tím dochází ke změnám vlastností stejnosměrných motorů. Schéma jednoduchého stejnosměrného motoru je vyobrazeno na obrázku 1. [1,2,3]

Obrázek 2 Princip stejnosměrného motoru [2]



Na vodiče cívky působí síly vytvářející točivý moment. Směr točivého momentu udává směr proudu přívodu motoru a proudu ve vodičích. Pokud chceme mít u stejnosměrného motoru hnací účinek, musí být napětí zdroje větší než indukované napětí, jehož cílem bude roztáčení rotoru do maximálních otáček a rovnosti indukovaného napětí s napětím zdroje. Pokud bude napětí menší, bude mít točivý moment brzdny účinek, dojde ke snížení otáček rotoru na minimum a snížení indukovaného napětí. [1, 2, 3]

4.3 Rozdělení stejnosměrných motorů

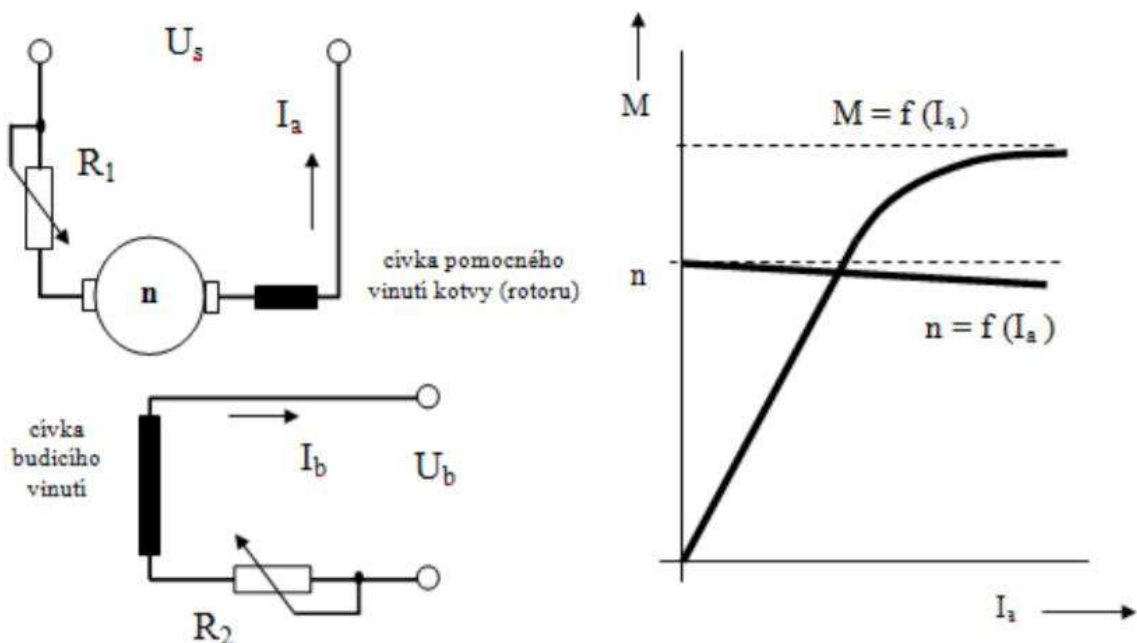
V této kapitole jsou rozděleny stejnosměrné motory do jednotlivých kategorií podle buzení magnetického pole.

4.3.1 Stejnosměrné motory s cizím buzením

Buzení satorového vinutí je realizováno vnějším elektrickým zdrojem (jiným než napájení rotoru), nebo je realizováno pomocí permanentních magnetů, které také vytváří magnetické pole statoru. Díky tomu je dochází k stálému buzení statoru a zajištění elektromagnetického pole v prostoru rotoru. [1,2,3]

Tento typ motoru umožňuje jednoduchou regulaci z důvodu vazby rotorového magnetického pole závislého na napájecím napětí rotoru U_b . Na velikosti momentu (M) motoru, který je dán protékajícím proudem rotoru a velikosti napětí U_b jsou závislé otáčky motoru (n). Velké motory mají v obvodu sériově zapojený odpor R_1 (viz. Obr.3), který umožňuje regulaci rozběhu motoru. Moment takového motoru má zvyšující se tendenci až do stavu nasycení a otáčky nejsou závislé na zátěži motoru. Pouhým přepólováním budícího napětí U_s dojde ke změně otáčení motoru. Charakteristiky tohoto motoru jsou zobrazeny na obrázku 3. [1,2,3]

Obrázek 3 Princip motoru s cizím buzením [5]

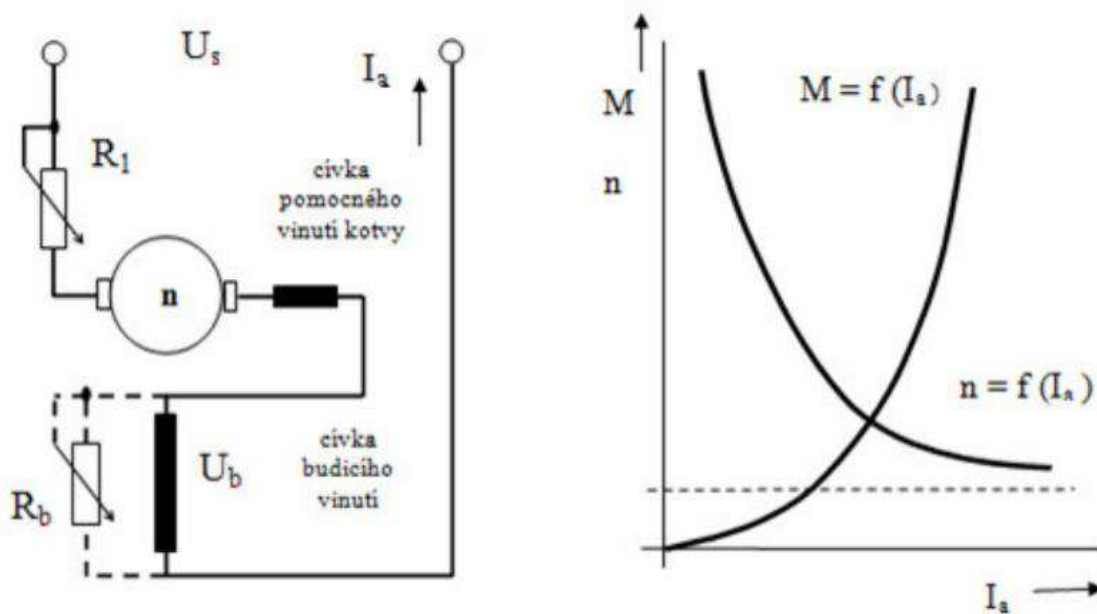


4.3.2 Stejnosměrné motory se sériovým buzením

Vinutí rotoru i vinutí statoru jsou připojeny sériově na stejný zdroj elektrické energie U_s . Tím dochází ke sdužení buzení magnetického pole statoru a velikosti magnetického pole v části rotorového magnetického pole. Rotorem prochází elektrický proud I_a , na kterém je závislý moment motoru (M). Vlastnosti motoru při rozběhu lze řídit sériově zapojeným odporem R_1 , který se nachází v kotvě motoru. [1,2,3]

Dobře regulovatelné otáčky motoru (n) jsou zajištěny odporem R_b , který je sériově zapojen ke statorovému a rotorovému vinutí. Čím bude hodnota odporu R_b větší, tím menší bude magnetické pole statoru. Pro rozběhnutí motoru je potřeba zajistit nulovou hodnotu sériového odporu. Se zvětšující se zátěží motoru, klesají jeho otáčky (n). Pro změnu otáčení motoru lze využít stejný postup, jako u motoru s cizím buzením, a to přepólováním statorového budícího napětí U_b . Brzdění motoru se může provádět využitím protiproudu a v případě napájení motoru z pulzního měniče se využívá brzdění pomocí rekuperace. Charakteristiky a zapojení motoru se sériovým buzením jsou zobrazeny na obrázku 4. [1,2,3]

Obrázek 4 Princip motoru se sériovým buzením [5]

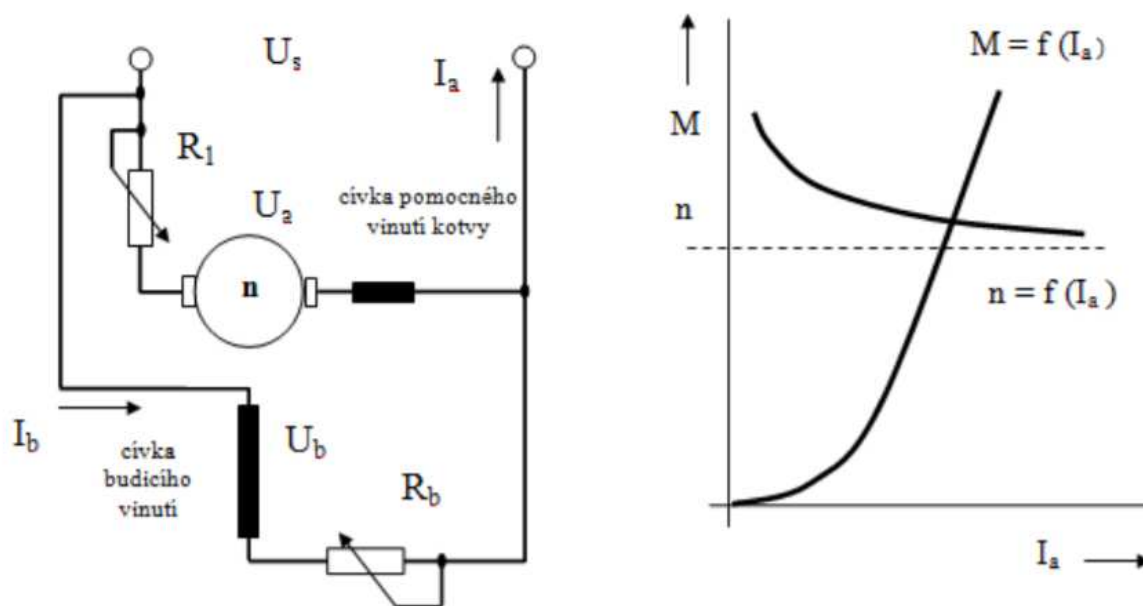


4.3.3 Stejnosměrné motory s derivačním buzením

K rotorovému vinutí je paralelně připojeno vinutí statoru. Rotorové i statorové vinutí jsou připojeny ke stejnému zdroji elektrické energie U_s . Tím dochází ke sdružení buzení magnetického pole statoru a velikosti magnetického pole v části rotorového magnetického pole. Velikost otáček rotoru n je řízena napětím U_a , které je připojeno na cívky rotoru. Moment motoru (M) je velice stálý a závisí na velikosti proudu I_a procházejícího rotorem. Nejčastější charakteristikou otáček motoru je hyperbola za předpokladu, že nemá magnetický tok motoru nižší hodnotu než napájecí napětí U_s . Nejčastější charakteristikou momentu je parabola, která je závislá na procházejícím proudu. Tento typ motoru má velký záběrový moment a používá se nejčastěji k pohonům s častými rozběhy s velkým zatížením (dopravníky, jeřáby, podavače). Ke snižování otáček motoru n slouží odpor R_b , který je sériově připojen ke statorovému budicímu vinutí. [1,2,3]

Motory s derivačním buzením se smí používat pouze v zařízení, kde je k motoru neustále připojena (nejčastěji pomocí zubových převodů) zátěž. V případě odpojení zátěže by se motor roztočil do otáček, ve kterých by došlo k mechanickému poškození motoru. Charakteristiky a zapojení motoru s derivačním buzením je zobrazeno na obrázku 5. [1,2,3]

Obrázek 5 Schéma motoru s derivačním buzením [5]

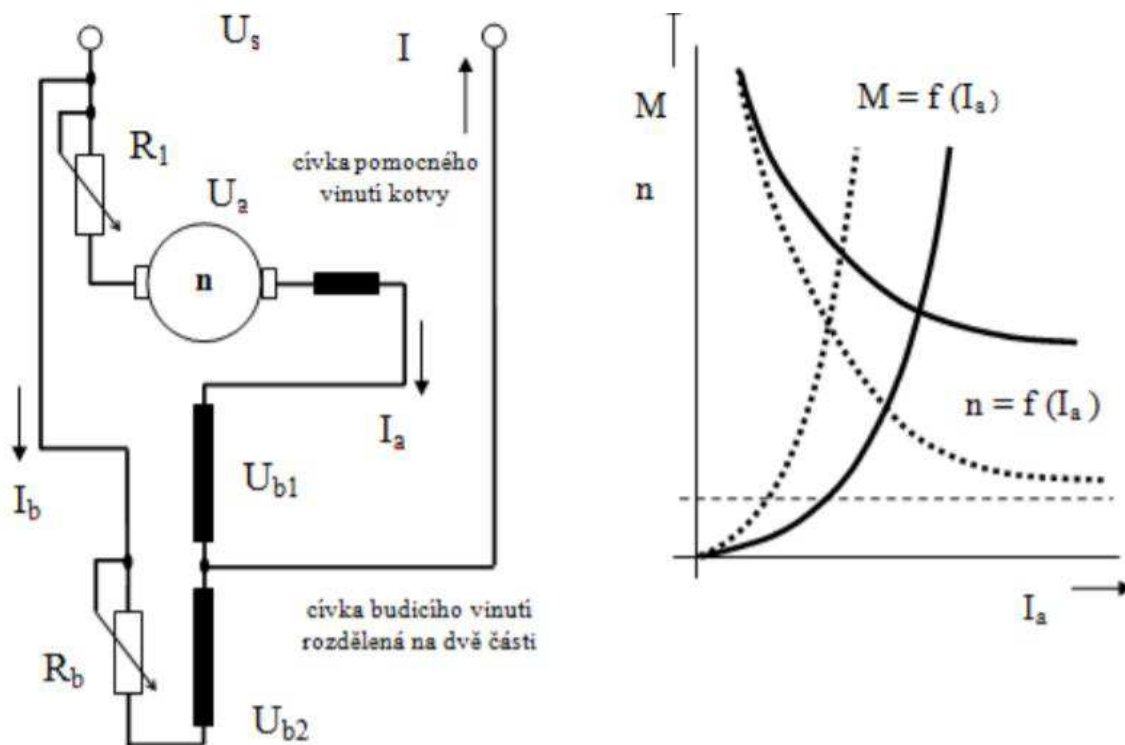


4.3.4 Stejnosměrné motory se sdruženým buzením

Dvě části statorového vinutí jsou připojeny na stejný zdroj elektrické energie U_s , jako vinutí rotorové. Jedna část vinutí je ke zdroji připojena sériově a druhá paralelně. Obě tato vinutí ovlivňují velikost magnetického pole statoru v rotoru. Charakteristické vlastnosti motoru jsou dány jedním ze dvou vinutí statoru, která mají momentálně větší magnetické pole. Otáčky motoru (n) a moment motoru (M) jsou podobné, jako u motoru se sériovým buzením. Pokud působí současně obě statorové vinutí, má motor větší moment (M) a otáčky n než motor s derivačním buzením. V případě, kdy působí obě vinutí, otáčky (n) klesají se zatížením a sériovým vinutím protéká velký proud I_a . [1,2,3]

Řízení otáček motoru se sdruženým buzením je poměrně snadné díky odporu R_b , který je paralelně připojen ke statorovému vinutí a tím dochází k zeslabování magnetického pole statoru. Stejně jako motory s derivačním buzením se nesmí použít v případech, kde je vysoká pravděpodobnost, že by se mohla odpojit zátěž. Kdyby došlo k odpojení zátěže při chodu motoru, motor by se roztočil na vyšší otáčky, než jsou jeho maximální otáčky a došlo by k mechanickému poškození celého motoru. Charakteristiky a zapojení motoru se sdruženým buzením je zobrazeno na obrázku 6. [1,2,3]

Obrázek 6 Princip motoru se sdruženým vinutím [5]

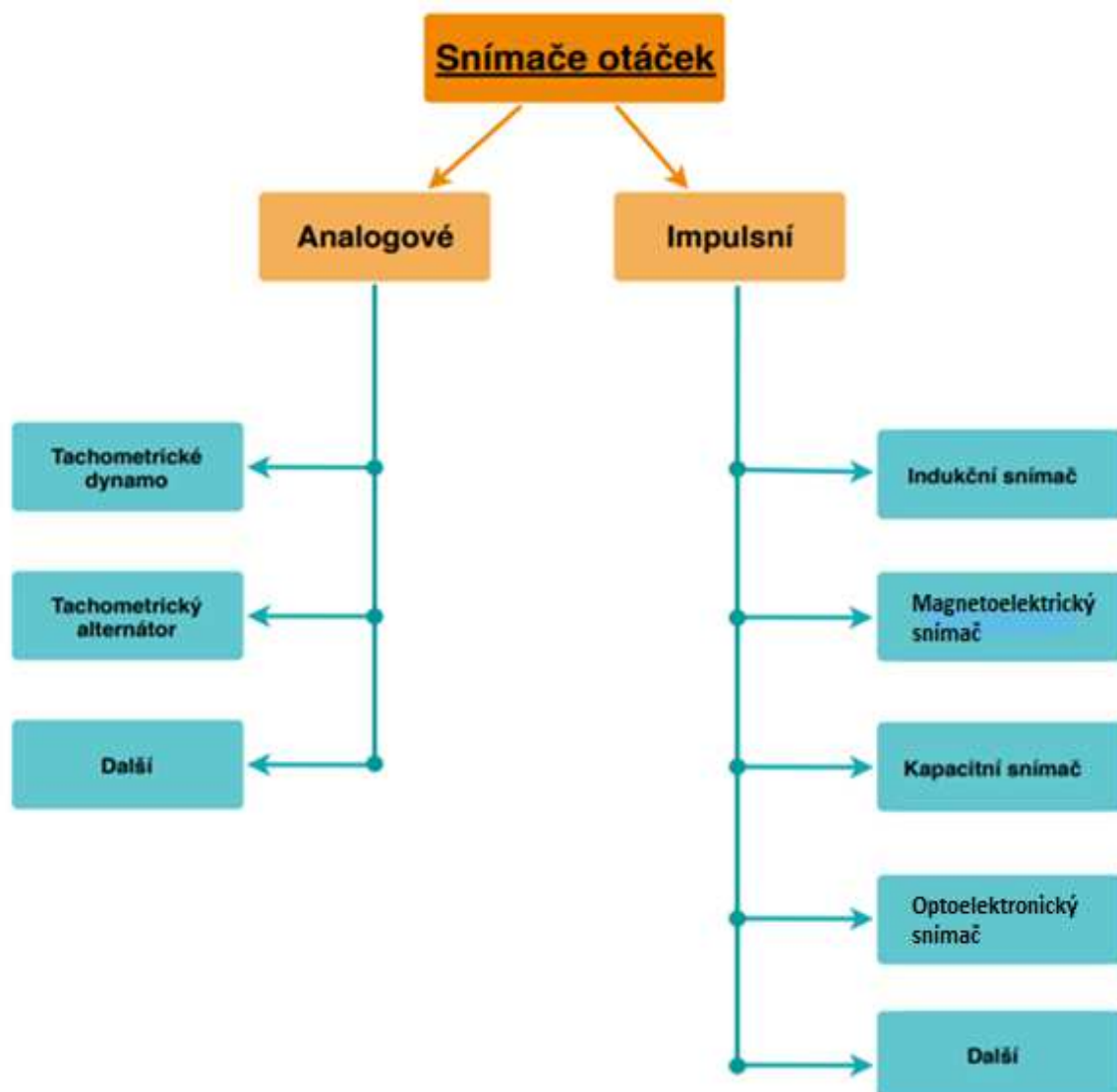


4.4 Snímače otáček

Snímače otáček měří frekvenci otáčení a můžeme je rozdělit do dvou základních skupin podle výstupního signálu na impulsní a analogové. Výstupní signál impulsního snímače jsou pulsy. Hřídel motoru se otáčí úhlovou rychlostí ω . Snímače polohy detekují značku (např. kovová destička) umístěnou na obvodu výstupní hřídele. Detektor nám dává signál ve tvaru pulsů. Po zpracování těchto pulsů získáme měřenou úhlovou rychlost.

Snímače založené na analogovém principu snímání shodné výstupní napětí s frekvencí otáčení. Základní rozdělení snímačů podle principu snímání je zobrazeno na obrázku 7. [4,5]

Obrázek 7 Rozdělení snímačů otáček



4.4.1 Tachometrické dynamo

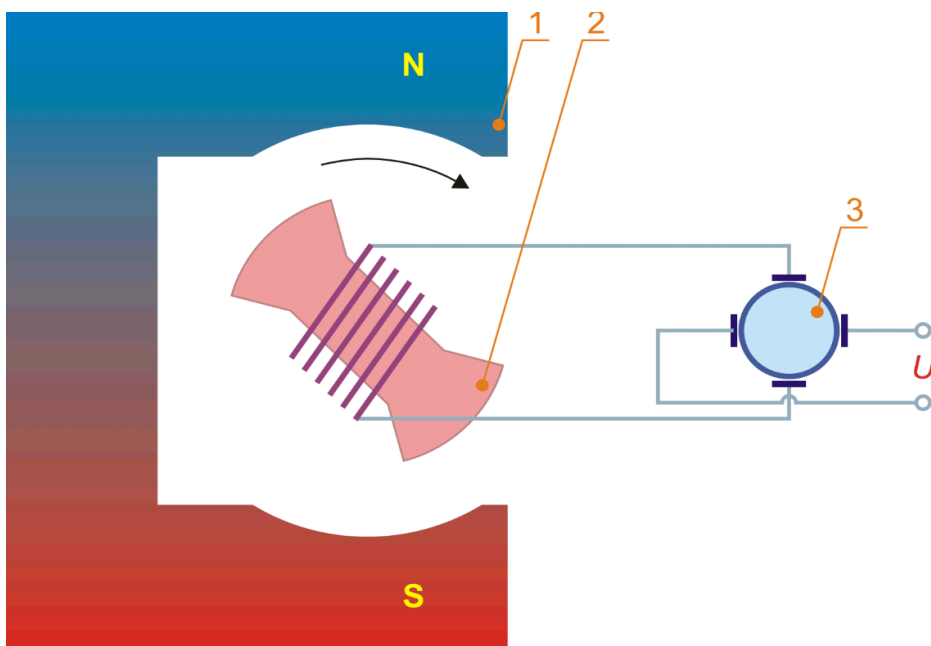
Tachometrické dynamo (tachodynamo) je buzeno permanentním magnetem umístěným na statoru. V magnetickém poli statoru se otáčí rotor s vinutím (viz obr. 8). Tachodynamo generuje stejnosměrné napětí, které se lineárně mění s otáčkami rotoru tachometrického dynama podle následujícího vztahu. Nejčastější použití tachometrického dynama je měření otáček v rozsahu od 0 do 6000 ot./min. [4,5,6]

K nejčastějším problémům u tachodynamu je problém s komutací, kdy dochází ke vzniku jiskření a šumu. Další nevýhodou je potom velké zvlnění. Naopak mezi velké výhody patří vysoká citlivost. [4,5,6]

$$U = \frac{p * \Phi * N}{a}$$

- p – Počet pólových dvojic
- N – Počet závitů kotvy
- Φ – Magnetický tok jedné pólové dvojice
- n – Frekvence otáčení
- a – Počet párů paralelních větví vinutí

Obrázek 8 Princip Tachometrického dynama [6]



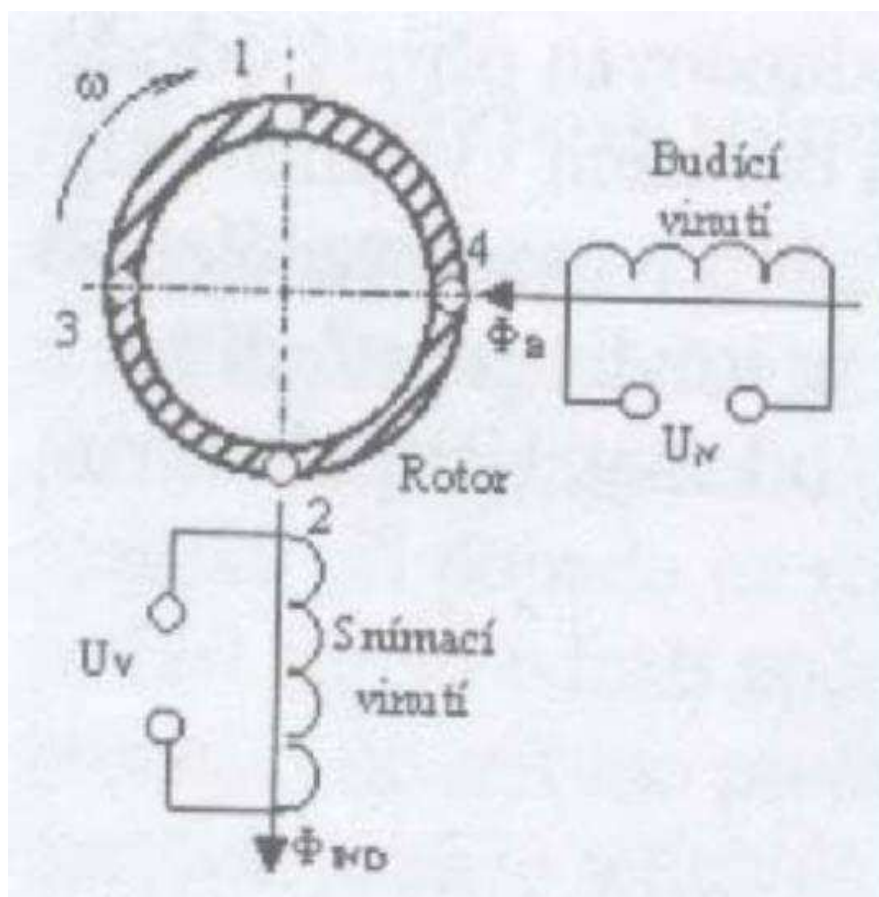
1 - Permanentní magnet, 2 - Kotva, 3 - Komutátor

4.4.2 Tachometrický alternátor

Podle konstrukce může připomínat indukční jednofázový motor. Stator se skládá ze dvou cívek, které jsou proti sobě otočené o 90° (viz obr. 9). Střídavý proud přivedený na budící vinutí vyvolá magnetický tok (Φ_b). Pokud se rotor nebude otáčet, vířivé proudy v rotoru nevybudí magnetické pole v ose vinutí, protože na snímací cívce se nebude indukovat žádné napětí. V případě roztočení rotoru vytvoří vířivé proudy v ose snímacího vinutí magnetický tok. Na snímacím vinutí pak bude možné indukovat napětí shodné s rychlostí otáčení rotoru. [4,5,6]

Výhodou tachometrických alternátorů je malé zvlnění a vysoká linearita výstupního signálu, který se pohybuje zpravidla mezi 10 – 100 V. Tachometrický alternátor se používá pro měření otáček v rozmezí 0 – 3000 ot./min. [4,5,6]

Obrázek 9 Princip tachometrického alternátoru [4]



4.4.3 Indukční snímač

Používají se pro měření rychlosti otáček. Snímání je založeno na principu změny indukce cívky. Na hřídeli motoru je připevněný kotouček s pravidelnými výstupky. Pokud se při otáčení motoru dostane výstupek do prostoru snímače, dojde ke změně indukčnosti cívky ve snímači a magnetického odporu R_m , z důvodu zmenšení vzdálenosti mezi výstupkem a cívkou umístěnou ve snímači. Indukčnost cívky můžeme vyjádřit následujícím vztahem. [4,5,6,7]

$$L = \frac{k * N^2}{R_m}$$

k – Konstrukční konstanta

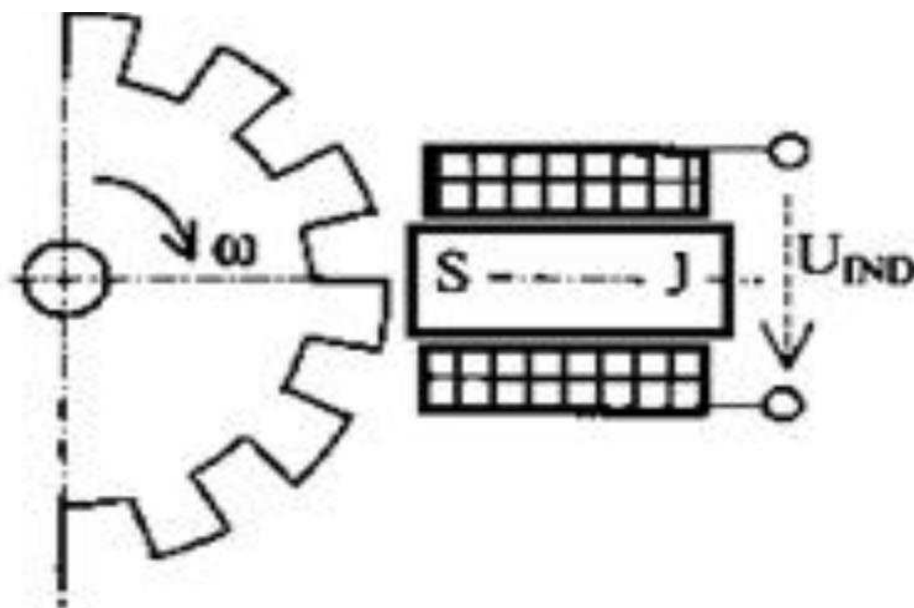
N – Počet závitů cívky

R_m – Magnetický odpor

Výhody indukčních snímačů: Tvar signálů v podobě pulsů vhodný k dalšímu zpracování. Přesnost snímání.

Nevýhody indukčních snímačů: Přetržitá činnost.

Obrázek 10 Princip indukčního snímače [7]



4.4.4 Magnetoelektrický snímač

Magnetoelektrický snímač reaguje na změny magnetického pole. Využívá Hallova jevu. Hallova sonda se skládá z polovodičové destičky, která je napájena proudem I_h (viz obr. 11). Na hřídeli motoru je umístěn kotouček s pravidelnými výstupky. Na výstupku je upevněn permanentní magnet, který rotuje spolu s hřídelí motoru. V případě přiblížení permanentního magnetu k polovodičové destičce začne magnetické pole B kolmo působit na proud protékající destičkou a tím vznikne Hallovo napětí. Protože je Halovo napětí malé, musí se pro další využití zesílit. Hallovo napětí lze vyjádřit následujícím vztahem. [5,6,7]

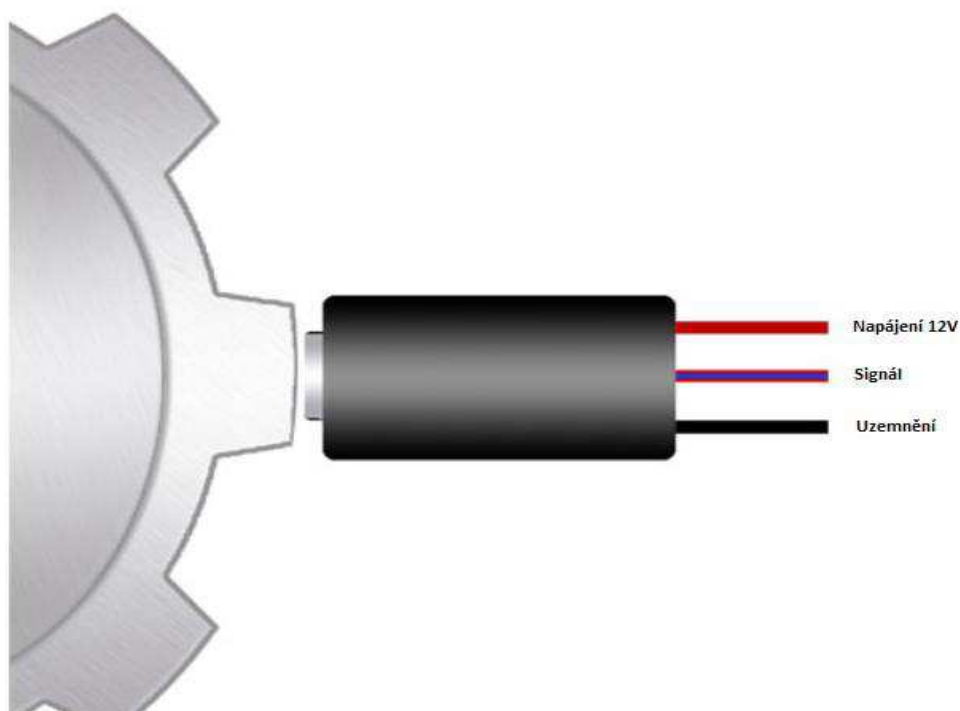
$$U_H = \frac{I_h * B}{d}$$

I_h – Proud protékající destičkou

B – Magnetické pole

d – Tloušťka destičky

Obrázek 11 Princip elektromagnetického snímače [8]



4.4.5 Kapacitní snímač

Princip je založen na měření frekvence změnou kapacity kondenzátoru. Skládá se z kovové destičky, která je pevně spojena s kotoučkem připevněným na hřídeli motoru (viz Obr. 12). Měřicím zařízením je zde deskový kondenzátor. Při rotaci kotoučku prochází kovová destička dvěma deskami měřicího kondenzátoru, a to způsobí změnu dielektrika a následnou změnu kapacity kondenzátoru. Jedním otočením se ve snímači vygeneruje jeden puls. Pro změření otáček se kotouček neustále otáčí a tím nám snímač generuje pulsy, ze kterých vypočítáme frekvenci otáčení hřídele motoru. Kapacitu deskového kondenzátoru můžeme vypočítat pomocí následujícího vztahu. [6,7]

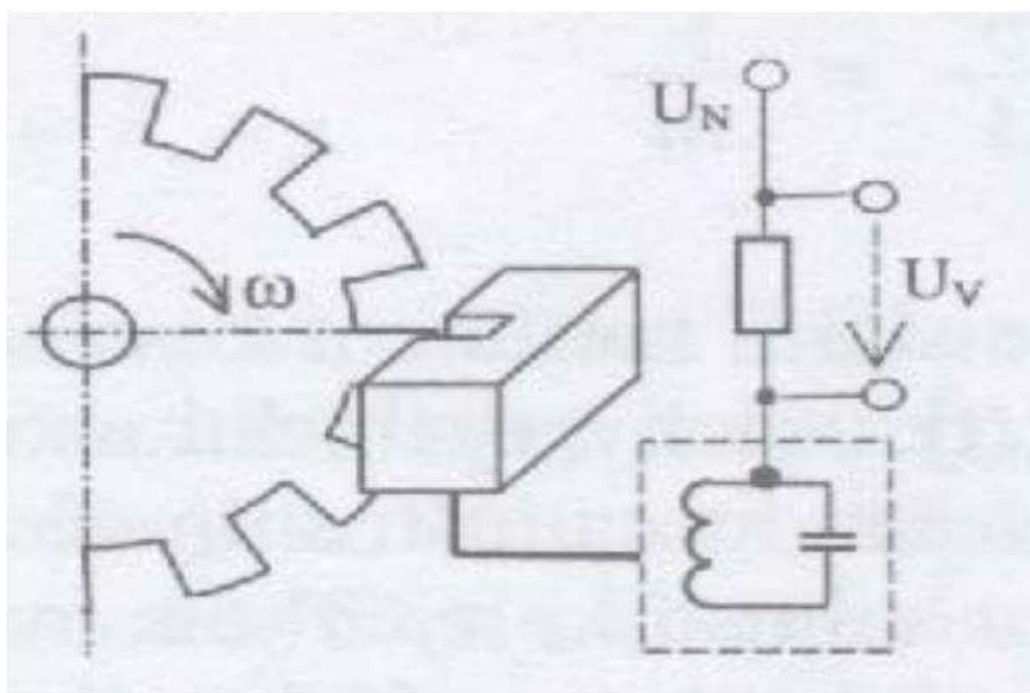
$$C = \frac{\varepsilon * S}{d}$$

ε – Permittivita dielektrika

S – Obsah desek kondenzátoru

d – Vzdálenost desek kondenzátoru

Obrázek 12 Princip kapacitního snímače otáček [4]

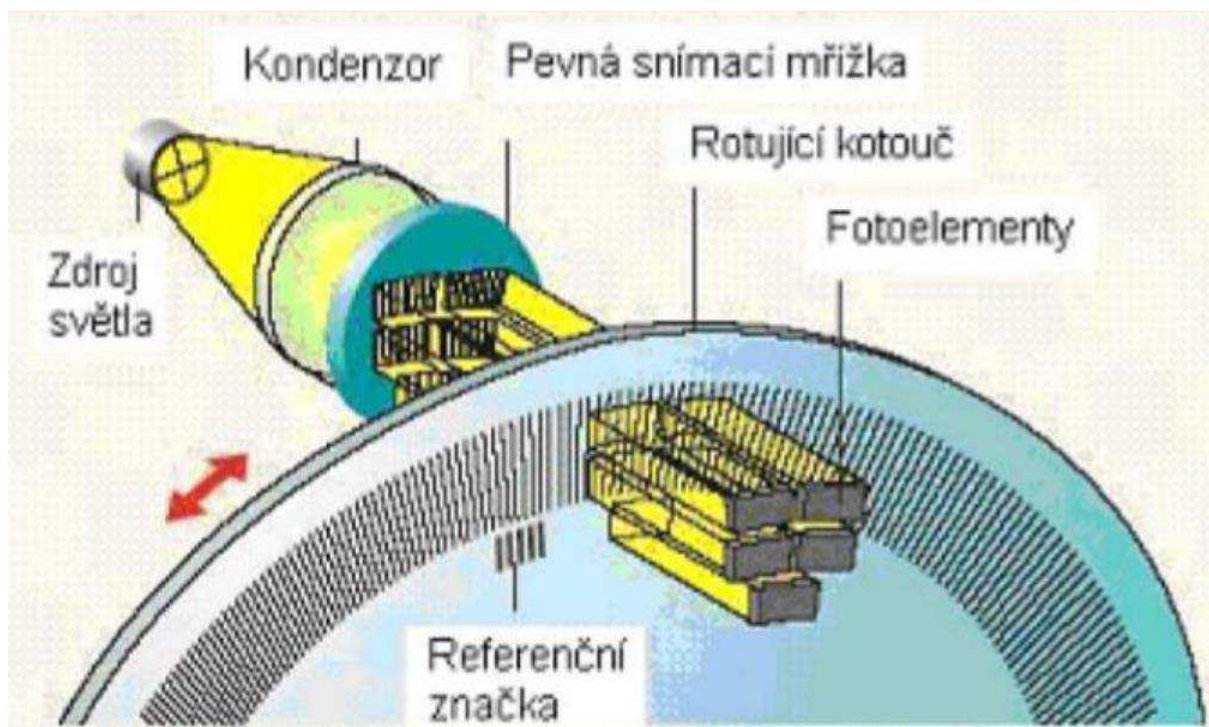


4.4.6 Optoelektronický snímač

Princip inkrementálního snímače spočívá ve clonění světelného toku mezi fotocitlivým prvkem a zdrojem. Zdrojem světla může být například svítivá LED dioda a pro snímání světla se používá například fototranzistor. Clonu nejčastěji tvoří kotouček s pravidelnými otvory (viz obr. 13). Kotouček je spojený s hřídelí motoru, což zajišťuje jeho rotaci. Tímto způsobem je zajištěno, že se při otáčení střídají úseky, které propouští světlo a které světlo nepropouští. [7, 9, 10]

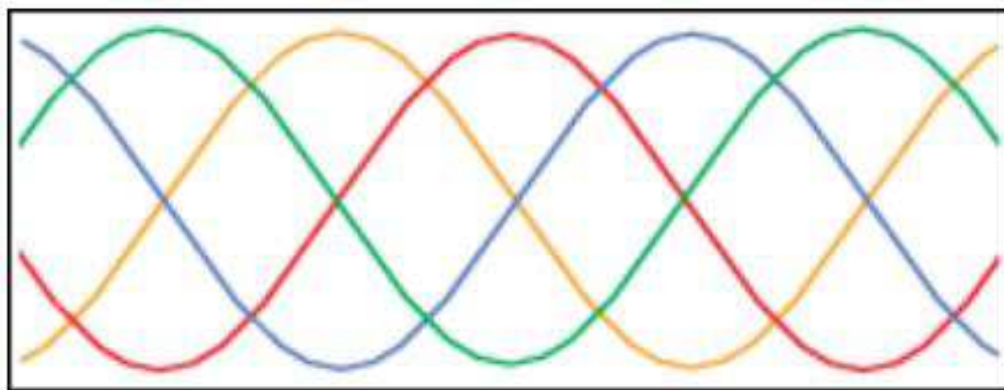
Inkrementální snímač obsahuje jednu nepohyblivou clonku, proti které je umístěna pohyblivá clonka připevněná na hřídeli motoru. Při stejné poloze obou clonek bude světelný tok procházející do detektoru maximální a tím pádem bude na výstupu i maximální signál. Při následné rotaci otočné clonky se začne průchodnost světelného toku snižovat a na výstupu naměříme nižší hodnotu signálu. Následně dojde k úplné neprůchodnosti světelného toku a k nulovému signálu na výstupu detektoru. Tento děj se periodicky opakuje a dostáváme sinusový signál, kde je frekvence závislá na otáčení. [7, 9, 10]

Obrázek 13 Princip inkrementálního snímače [11]



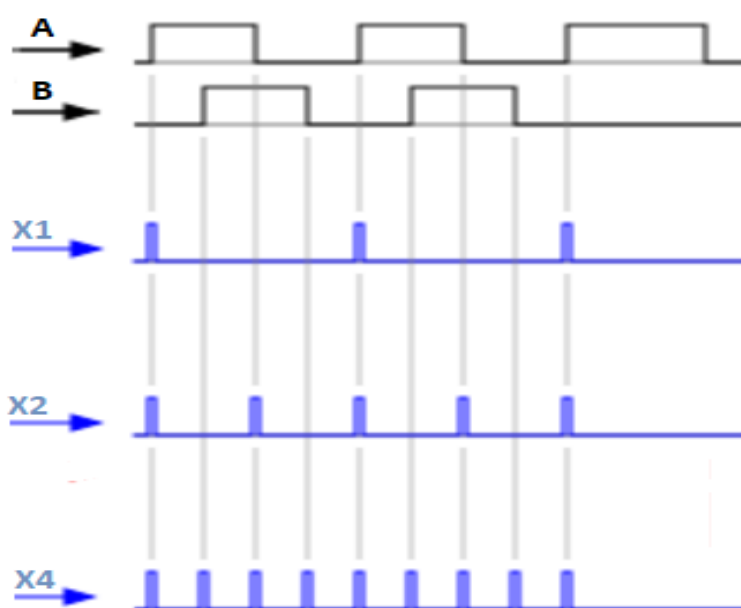
U těchto snímačů se používají čtyři kotoučky se stejnými otvory jako rotační kotouček a jsou vůči sobě posunuté o čtvrtinu periody. Pro určení začátku otáčení obsahují ještě jeden kotouček (nulový index). Při rotaci otočné clonky se na detektoru generují čtyři sinusové signály, které jsou vůči sobě posunuty o 90° . Průběhy jsou vyobrazeny na následujícím obrázku. [9, 10]

Obrázek 14 Světelný tok na fotodiodách [12]



Pro získání symetricky rozloženého signálu se používá diferenciální metoda. Princip této metody je antiparalelní zapojení fotodetektorů. Výsledkem jsou dva sinusové signály vzájemně posunuté o 90° . Pro rozpoznání směru otáčení se používají napěťové komparátory, které nám tento signál přemění na pravoúhlé signály A a B. Detekcí různých hran dosahujeme rozlišení jednotlivých poloh. Tyto signály X1, X2 a X4 jsou zobrazeny na obrázku 15.

Obrázek 15 Zpracování signálu [9]



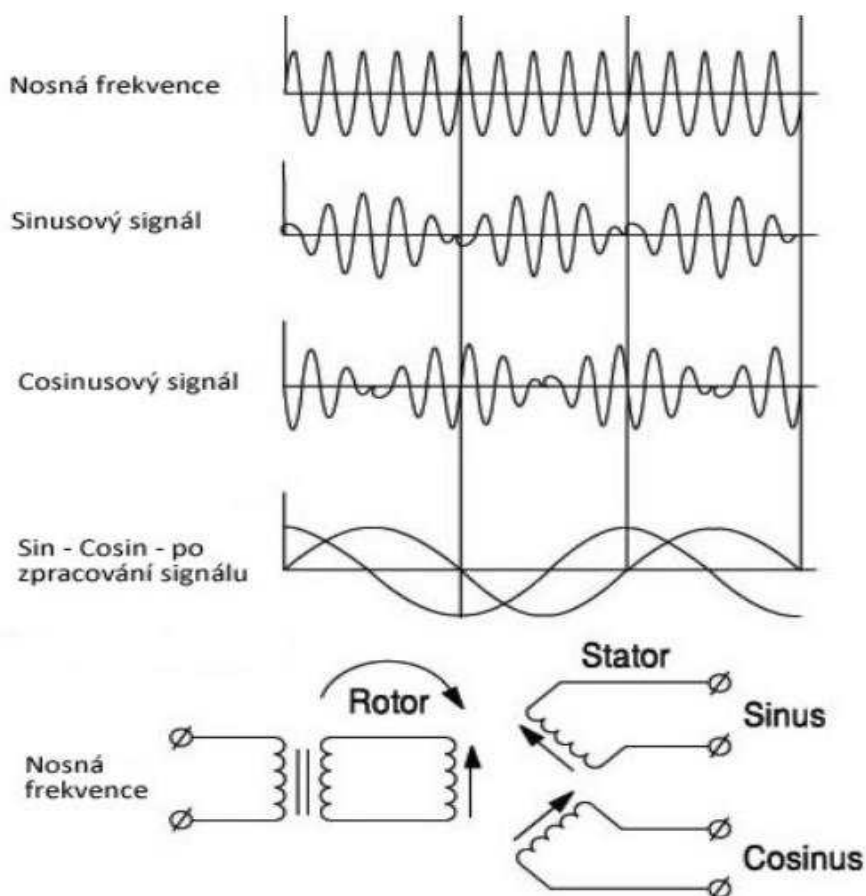
4.5 Snímače polohy

Snímače polohy mají provedení zajišťující snímání lineárního pohybu, nebo pro nás důležité rotační provedení. Úkolem je zjistit aktuální polohu pohyblivé části, většinou hřídele motoru a zprostředkovat signál k dalšímu použití. [13, 14, 15]

4.5.1 Resolver

Princip resolveru (rotačního transformátoru) spočívá ve vzájemné změně indukčnosti statoru a rotoru. Skládá se ze třech vinutí. Dvě vinutí jsou na statoru a jsou vzájemně posunuta o 90° . Třetí vinutí je pasivní vinutí rotoru. Napájení tohoto senzoru může být buď přivedením střídavého napětí do vinutí statoru, nebo do vinutí rotoru. Přivedením střídavého napětí na vinutí statoru vznikne magnetické točivé pole a tím se do rotoru indukuje napětí o stejné frekvenci, které je vůči statorovému napětí fázově posunuté o úhel φ . Přesnou polohu zjistíme vyhodnocením fázového posuvu mezi statorovým a rotorovým vinutím. Zapojení a jednotlivé signály resolveru jsou zobrazeny na obrázku 16. [13, 14, 15]

Obrázek 16 Princip resolveru [16]

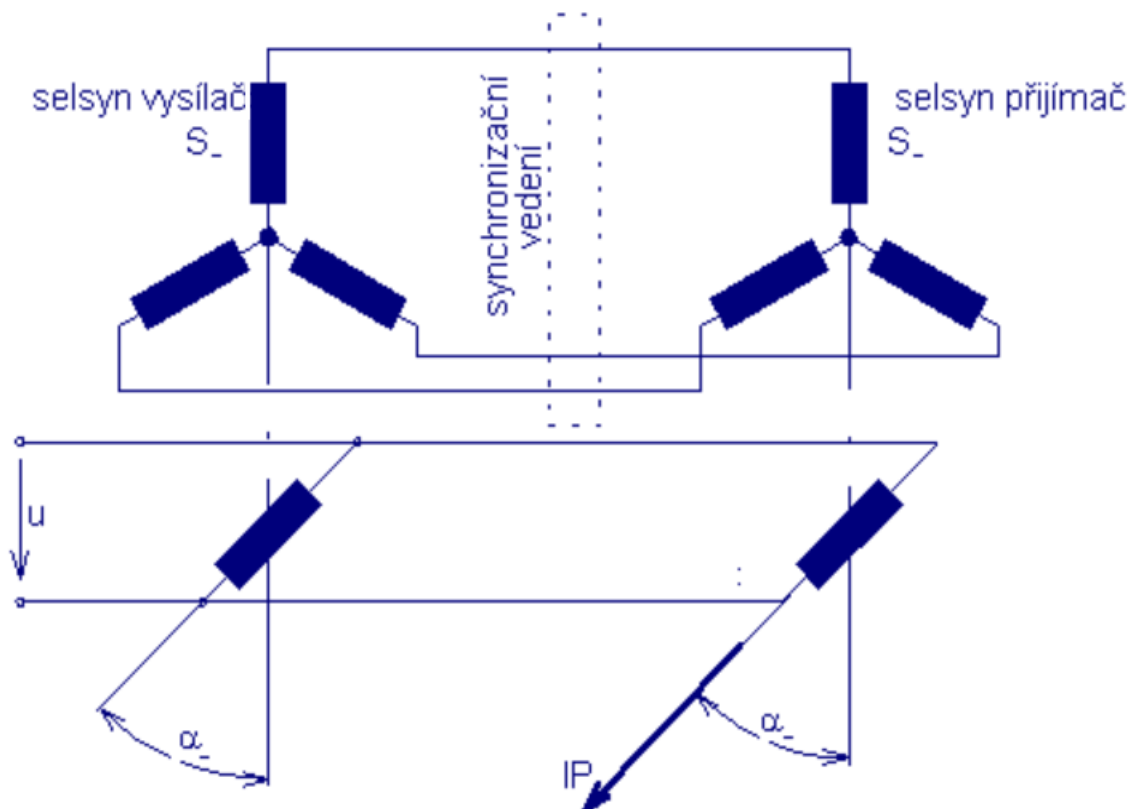


4.5.2 Selsyn

Selsyny jsou malé elektrické stroje (transformátor s pevným statorem a otočným vinutím rotoru), které se používají k měření úhlu natočení podobně jako resolvery s tím rozdílem, že selsyn má menší měřicí rozsah a to $\pm 85^\circ$. Selsyn se skládá ze třech vinutí na statoru, svírající mezi sebou úhel 120° a jedním vinutím na rotoru napájeným střídavým napětím. Pro měření úhlu natočení se používají dva selsyny. Jeden jako vysílač a druhý jako přijímač. Rotory i statory přijímače a vysílače jsou vzájemně propojeny. Přivedením střídavého napětí na rotor vysílače selsynu, začne se na statoru vysílače i přijímače indukovat napětí, která jsou různá a začne procházet proud. Ten vyvolá magnetický tok, který začne otáčet rotorem přijímače do stejné polohy jako je rotor vysílače. V důsledku zatěžovacího momentu hřídele sleduje rotor přijímače rotor vysílače s určitou chybou. Velikost napětí je závislá na úhlu natočení α . Zapojení dvou selsynů pro snímání polohy je zobrazena na obrázku 17. [14, 15, 17]

Výhodou tohoto snímače je schopnost přenášení úhlových výchylek i při rovnoměrném otáčení. Rozlišovací schopnost senzoru je 3 – 10 úhlových minut. [14, 15, 17]

Obrázek 17 Zapojení selsynu [17]



4.5.3 Absolutní snímač

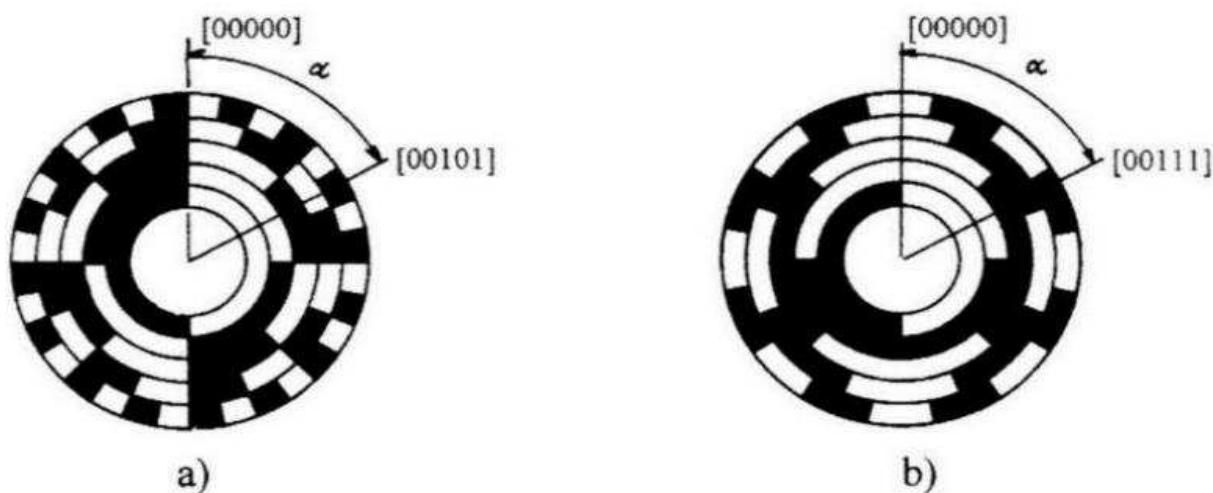
Používá se k zjištění aktuální polohy. Přenáší podobný signál jako inkrementální enkodéry s rozdílem udávání přesné polohy i po odpojení napájení. Absolutní snímač používá jiné kódování než snímač inkrementální, proto zaznamenává neustále polohu hřídele motoru. Absolutní senzor obsahuje kódovací kotouč (kotouč s ryskami), kde se střídají průhledné a neprůhledné plošky. Kódovací kotouček má několik řad těchto políček (viz obr. 18) a každá řada má samostatný senzor pro snímání. Uspořádání průhledných a neprůhledných políček je závislé na použitém kódu (Binární, nebo Grayův kód). Grayův kód je odolnější vůči chybám, protože změna polohy o jednu jednotku se v kódu projeví jako změna jednoho bitu, tím se zmenšuje pravděpodobnost chybné informace o poloze. [18, 19]

Typy snímačů: Pro zjištění okamžité úhlové polohy hřídele se používají snímače typu ARC řady 300. Okamžitá úhlová polohy je dána číselnou hodnotou úhlu natočení. Tyto snímače si uchovávají hodnotu polohy i v případě výpadku napájení. [18, 19]

Dalším absolutním snímačem je typ ARC řady 400. Jedná se o jednotáčkové snímače, které převádí úhel natočení do digitální podoby Grayova kódu. [18, 19]

Mezi nejpresnější absolutní jednotáčkové snímače s přesností 19 bitů se řadí absolutní snímač typu 8LSA. [18, 19]

Obrázek 18 Kód absolutních snímačů. a) Binární kód b) Grayův kód [19]

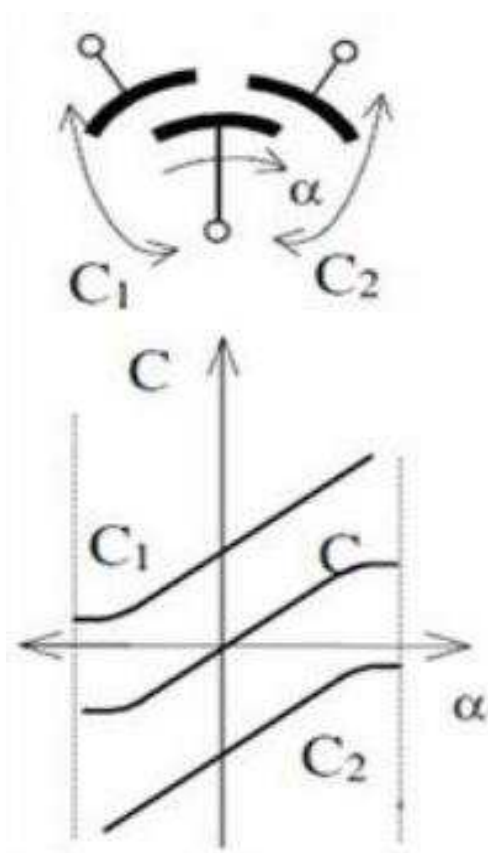


4.5.4 Kapacitní snímač

Princip kapacitních snímačů je založen na změně kapacity kondenzátoru. Kondenzátor se skládá několika elektrod. Pro měření úhlu natočení se používá zejména trojice elektrod, z nichž jedna je pohyblivá a je mechanicky spojena s měřeným systémem. Natočením pohyblivé elektrody se změní plochy překrytí mezi pohyblivou a nepohyblivou elektrodou, a to způsobí změnu kapacity podle následujícího vztahu. Pohyblivá (měřící) elektroda bývá čtvercového tvaru a je vyrobena z konstrukční oceli. Pohyblivá elektroda musí být vodivá a uzemněná, aby došlo ke změně kapacity. Kapacitní rotační snímače se používají jen pro malé úhly natočení. Schéma kapacitního snímače se třemi elektrodami je na obrázku 19. [20]

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_2}$$

Obrázek 19 Schéma kapacitního snímače [2]



- d_2 – Vzdálenost mezi elektrodami
- S – Plocha překrytí elektrod
- ε_r – Permittivita dielektrika
- ε_0 – Permittivita vakua

4.6 Regulátory

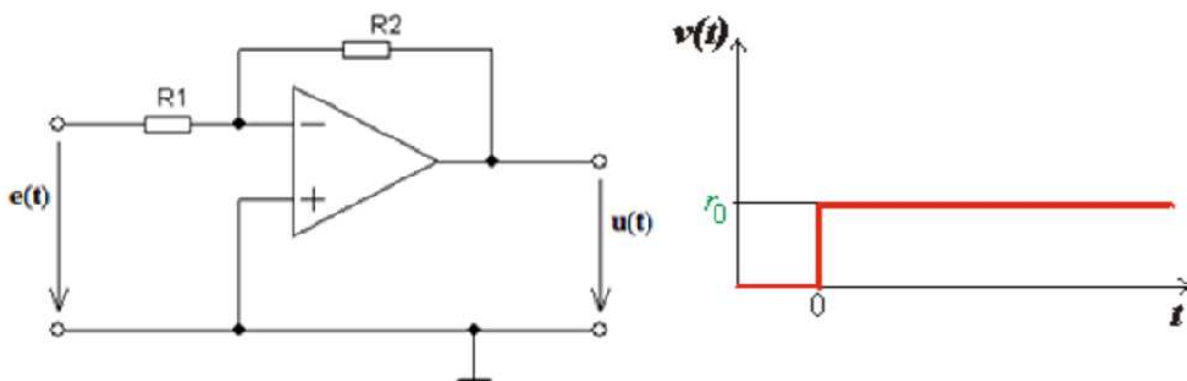
Tato kapitola se zabývá jednotlivými regulátory typu P, I, D, PI, PD a PID. Regulátory určují kvalitu regulace. Cílem regulátorů je zajistit, aby byl přenos řízení v širokém frekvenčním pásmu co nejbližší jedné a přenos poruch co nejbližší nule. Za předpokladu, že známe přenosové vlastnosti regulované soustavy, provedeme návrh konkrétního regulačního obvodu. Návrh můžeme provádět za pomoci grafické syntézy nejlépe frekvenční charakteristikou, nebo matematicky za pomoci blokové algebry. [21, 22]

4.6.1 Proporcionální regulátor

Regulátor typu P zesiluje regulační odchylku e . Zesílení je konstantní v širokém frekvenčním rozsahu. Jeho přenos klesá vlivem setrvačnosti teprve při vysokých frekvencích. Jeho konstantní reálný přenos je větší než jedna. Proporcionální regulátor můžeme vytvořit stejnosměrným invertujícím zesilovačem. Ideální operační zesilovač má nekonečný vstupní odpor, nekonečné zesílení a nulový výstupní odpor. Následující vztah vyjadřuje diferenciální rovnici proporcionálního regulátoru. Schéma zapojení proporcionálního regulátoru a odezva na jednotkový skok je zobrazeno na obrázku 20. [21, 22]

$$u(t) = r_0 * e_t$$

Obrázek 20 Zapojení P regulátoru [23]



4.6.2 Integrovní regulátor

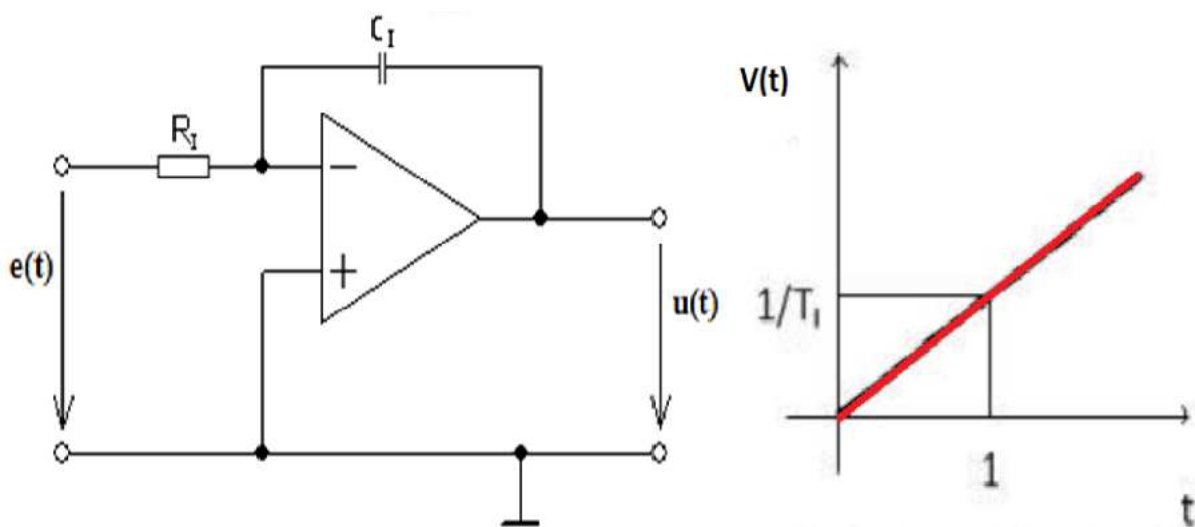
Integrovní regulátor integruje regulační odchylku e , proto dochází k jejímu odstranění. K úplnému odstranění dochází až po určitém čase. Regulátory I se používají pro regulované soustavy s velkou setrvačností (odolností proti krátkodobým poruchám). [21, 22]

Integrovní regulátor se dá snadno realizovat stejnosměrným invertujícím zesilovačem viz obr. 21. Přenos integrovního regulátoru můžeme vyjádřit jako poměr impedance a vstupního odporu. Impedance je v případě I regulátoru kapacitní reaktance. Diferenciální rovnice integrovního regulátoru je vyjádřena následujícím vztahem. [21, 22]

$$u(t) = r_i \int_0^t e(t) dt$$

Činnost I regulátoru je velmi uspokojivá. Poruchy se uplatňují zejména při vysokých frekvencích, kde již dochází k poklesu přenosu integrovního regulátorem. Přechodová charakteristika (obr. 21) je lineární přímka, která je nepřímo úměrná časové konstantě RC. [21, 22]

Obrázek 21 Schéma zapojení I regulátoru [23]



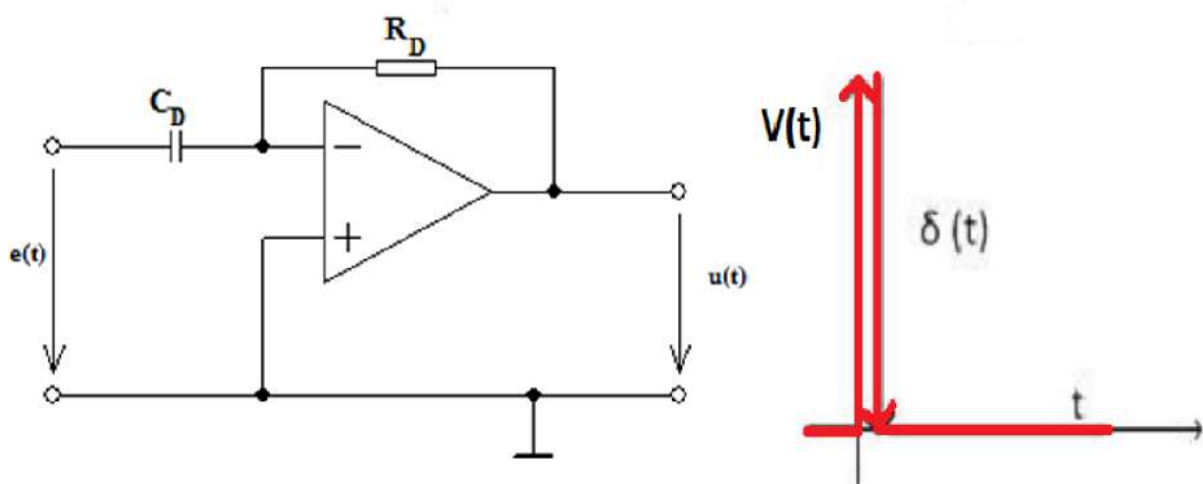
4.6.3 Derivační regulátor

U derivačních regulátorů vznikají parazitní setrvačnosti, které při vysokých frekvencích potlačují přenos regulátoru, který má být při těchto frekvencích největší. Z tohoto důvodu nelze sestavit ideální derivační regulátor. Základní zapojení derivačního regulátoru je znázorněno na obrázku 22. Poměrem zpětnovazebního odporu a vstupní impedance určujeme ideální přenos. Pro vyjádření skutečného přenosu D regulátoru je zapotřebí vynásobení přenosem parazitního setrvačného členu časovou konstantou. Diferenciální rovnice derivačního regulátoru je vyjádřena následujícím vztahem. [21, 22]

$$u(t) = r_d * \frac{de(t)}{dt}$$

Při konstantním vstupu má derivační regulátor nulový přenos. To vyplývá z přechodové charakteristiky na obrázku 22. Derivační regulátor nezesiluje regulační odchylku, a proto se nepoužívá samostatně, ale vždy ve spojení proporcionálního regulátoru, potom tedy PD, nebo s regulátorem integračním PI. V těchto zapojeních D regulátor zvyšuje stabilitu a zrychluje regulaci. Je tedy vhodný pro odstranění četných krátkodobých poruch. [21, 22]

Obrázek 22 Schéma zapojení D regulátoru [23]



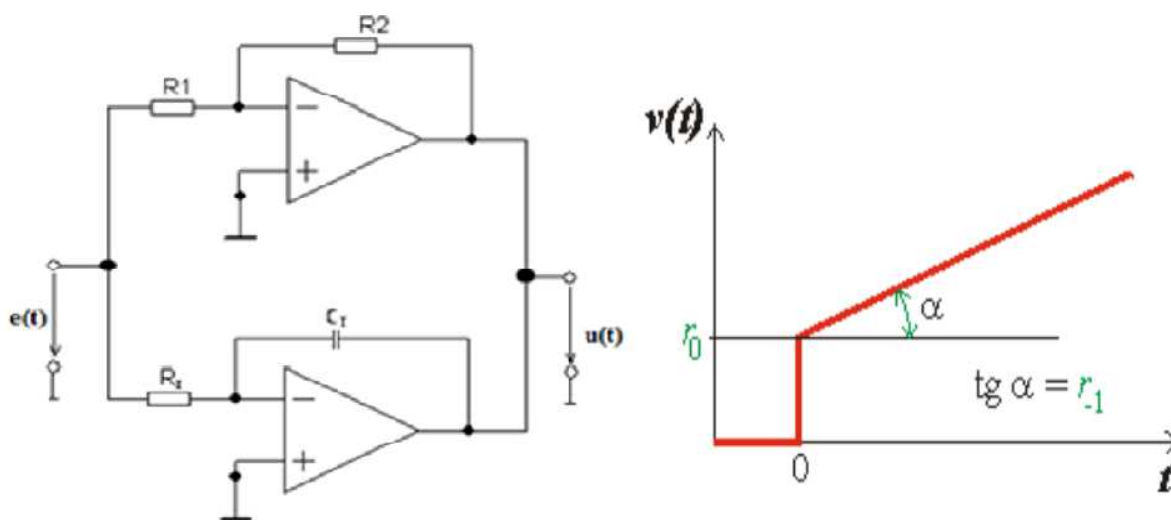
4.6.4 Proporcionálně integrační regulátor

Proporcionálně integrační regulátor vznikne paralelním zapojením proporcionálního a integračního regulátoru. Proporcionální složka zajišťuje dobrou stabilitu a regulaci. Integrační složka zajišťuje nulovou regulační odchylku. Při použití PI regulátoru se nejprve projeví složka P a následně složka I. Proporcionálně integrační regulátory jsou nejběžněji používanými regulátory. Využití je zejména pro středně náročné aplikace, u kterých se vyžaduje, aby se zamezilo vzniku trvalé regulační odchylky. Oproti integračnímu regulátoru má PI regulátor větší přenos na vyšších frekvencích, proto dokáže rychle odstraňovat nárazové poruchy. Přejímová charakteristika PI regulátoru je na obrázku 23. [21, 22]

Proporcionálně integrační regulátor můžeme realizovat pomocí zesilovače se zápornou zpětnou vazbou, jehož schéma zapojení je na obrázku 23. Pro nízké frekvence je ve zpětné vazbě zapojen derivační člen a pro vysoké frekvence proporcionální člen. Jelikož se jedná o zapojení těchto členů ve zpětné vazbě zesilovače, bude mít celý obvod proporcionálně integrační charakter. Diferenciální rovnice PI regulátoru je vyjádřena následujícím vztahem. [21, 22]

$$u(t) = r_0 * e(t) + r_i \int_0^t e(t) dt$$

Obrázek 23 Schéma zapojení PI regulátoru [24]



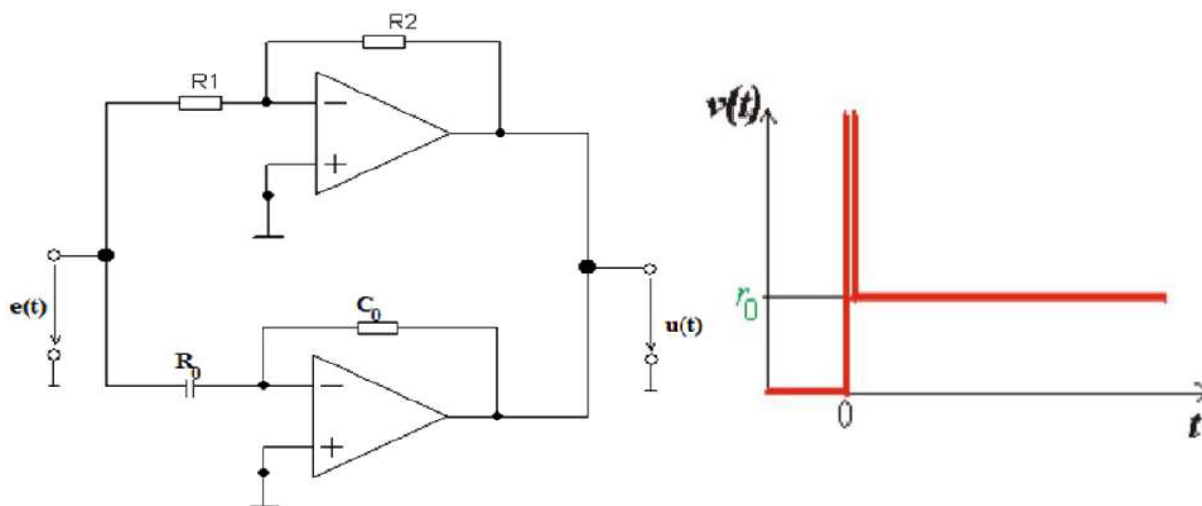
4.6.5 Proporcionálně derivační regulátor

Proporcionálně derivační regulátor je realizován paralelním spojením proporcionálního a derivačního regulátoru. PD regulátor pracuje s trvalou regulační odchylkou, proto se příliš často nepoužívá. Tento regulátor začne zvyšovat velikost akční veličiny při vzrůstu regulační odchylky. Jakmile se začne regulační odchylka zmenšovat, začne se rychleji zmenšovat i akční veličina. Tím se zabrání většímu přeregulování. Chová se tedy podobně jako proporcionální regulátor, kde derivační složka zesiluje reakci na rychlost změny regulační odchylky. Proporcionálně derivační regulátory jsou vhodné zejména pro regulované soustavy vyšších řádů s větším zpožděním. Regulační pochod nejdříve ovlivní složka D, která urychluje regulaci. Následně se do pochodu zapojí složka P, která ovlivňuje stabilitu regulované soustavy. Diferenciální rovnice PD regulátoru je vyjádřena následujícím vztahem. [22, 24]

$$u(t) = r_0 * e(t) + r_d \frac{de(t)}{dt}$$

PD regulátor může být také realizován závislým členem v obvodu záporné zpětné vazby viz obr. 24. Setrvačný člen zapojený ve zpětnovazební větvi přenáší proporcionálně stejnosměrné signály a signály nízkých frekvencí. Vyšší frekvence, než frekvence lomu zeslabuje o 20 dB/dek. Přechodová charakteristika je na obrázku 24. [22, 24]

Obrázek 24 Schéma PD regulátoru [24]



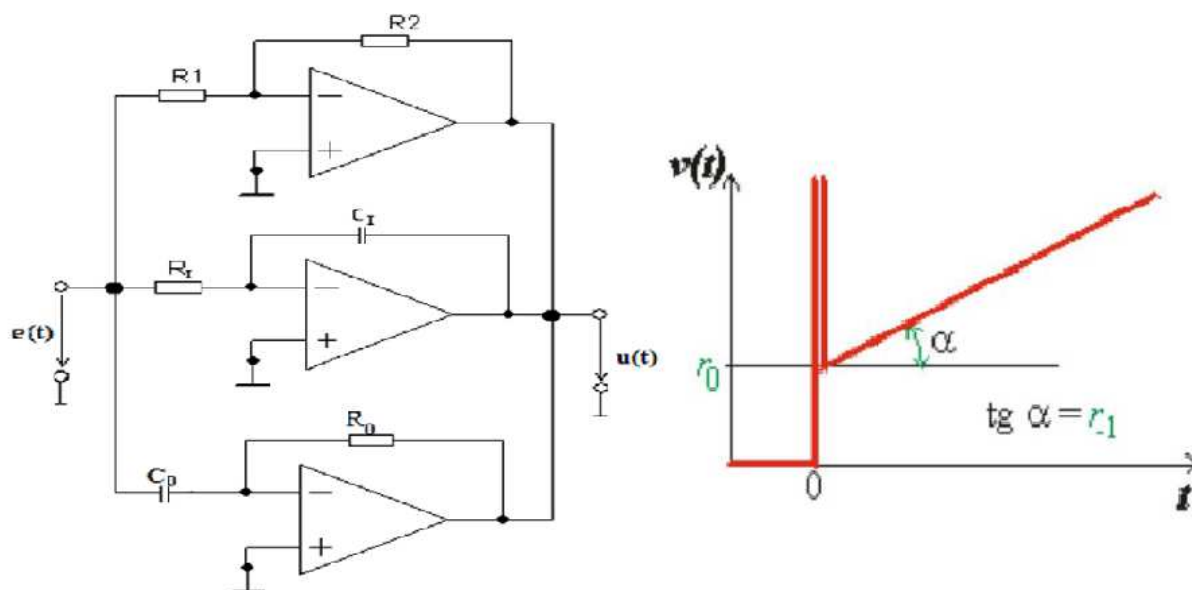
4.6.6 Proporcionálně integračně derivační regulátor

Proporcionálně integračně derivační regulátor lze realizovat paralelním zapojením regulátorů P, I a D. Jedná se o nejdokonalejší spojitý regulátor. Díky spojení všech členů dosahuje PID regulátor krátké doby regulace, vysoké přesnosti regulace a pracuje bez trvalé regulační odchylky. Regulaci nejprve ovlivní derivační složka, která zajistí krátkou dobu regulace. Následuje proporcionální složka, která zajistí stabilitu regulace. Jako poslední do regulačního pochodu zasahuje integrační složka, která potlačuje trvalou regulační odchylku. Jak již bylo zmíněno PID regulátor pracuje bez trvalé regulační odchylky a umí regulovat rychlé děje, proto se využívá pro náročné aplikace. V dnešní době jsou regulátory tvořeny mikroprocesory a funkce regulátorů je tvořena programem, proto se často prodávají univerzální PID regulátory a uživatel si nastavuje požadované složky podle potřeby, nebo náročnosti aplikace. Diferenciální rovnice PID regulátoru je vyjádřena následujícím vztahem. [21, 22, 24]

$$u(t) = r_0 * e(t) + r_d \frac{de(t)}{dt} + r_i \int_0^t e(t)dt$$

PID regulátor lze realizovat zpětnovazebním způsobem, který je na obrázku 25. Pro zanedbání interakce členů R_1 , R_2 , C_1 a C_2 volíme rezistor R_2 vždy mnohem vyšší než rezistor R_1 . Kvůli interakci jednotlivých členů není možné nastavit libovolné hodnoty pro každý člen regulátoru. Obecně lze říci, že správné nastavení PID regulátoru je složité. Na obrázku 25 je vyobrazeny přechodová charakteristika PID regulátoru. [21, 22, 24]

Obrázek 25 Schéma zapojení PID regulátoru [24]



5 Vlastní zpracování

Tato kapitola se věnuje návrhu a realizaci polohového servomechanismu. Je rozdělena na několik částí. První část je zaměřená na výběr a specifikaci použitého stejnosměrného motoru podle předem zadaných parametrů. Porovnává dva stejnosměrné motory s podobnými vlastnostmi a vyhodnocuje motor s vlastnostmi nejbližšími k požadovaným hodnotám.

Další část se zabývá dostupností a výběrem snímače polohy úhlu natočení hřídele stejnosměrného motoru, podle kterého dochází k natočení hřídele motoru do požadované polohy. Kapitola je rozšířena o možnou náhradu vybraného snímače za snímač jiného typu s podobnými vlastnostmi a popisuje, z jakého důvodu byl snímač vybrán.

V třetí části je řešen výkonový obvod pro analogové řízení a regulaci stejnosměrného motoru pomocí H-můstku. Rozbor jednotlivých součástí obvodu, seznam použitých součástek pro sestavení regulačního zapojení a popis i parametry nezbytných součástek pro správnou funkčnost.

V další části práce je popsán postup při hledání nulové (výchozí) polohy, nezbytné pro řízení celého regulačního cyklu. Nedílnou součástí kapitoly je postup při výrobě plastového kotoučku (s jedním pravidelným výřezem), umístěného na hřídeli stejnosměrného motoru a vyhodnocování polohy podle modulu optické závory zapojeného do Arduina.

Poslední část se věnuje propojení všech předchozích částí, popisu mikrokontroleru Arduina, jako číslicového regulátoru a naprogramování požadované funkčnosti celého zařízení v Arduinu.

5.1 Výběr motoru

První důležitou částí pro realizaci polohového servomechanismu je správný výběr stejnosměrného motoru a převodovky motoru, který bude realizovat úhel natočení hřídele. Existuje celá řada stejnosměrných motorů, které lze rozdělit dle principu buzení vinutí motoru, podle použití, například motory do prašného prostředí, motory s velkým kroutícím momentem, motory s odolnou konstrukcí a další. Proto není jednoduché vybrat vhodný stejnosměrný motor bez definování požadovaných vlastností. Z tohoto důvodu jsou v tabulce 1 uvedeny potřebné vlastnosti pro vhodný výběr stejnosměrného motoru.

Tabulka 1 Požadavky výběru DC motoru

Požadavky DC motoru	
Nominální napětí (V)	12
Rychlost otáčení (ot/min)	Min. 40
Moment na hřídeli (Nm)	Min. 0,2
Pracovní teplota (°C)	0 - 40

Po prozkoumání dostupnosti stejnosměrných motorů splňující parametry uvedené v tabulce 1, byly vybrány na porovnání dva stejnosměrné motory, z nichž první elektrický DC motor s integrovanou převodovkou je motor GM25-370CHV-286-R vyobrazen na obrázku 26.

Obrázek 26 DC motor GM25-370CHV-286-R [23]



Parametry splňující výše uvedené požadavky na řízení motoru GM25-370CHV-286-R jsou uvedeny v následující tabulce 2.

Tabulka 2 Parametry motoru GM-25-370CHV-286-R [23]

Parametry DC motoru GM25-370CHV-286-R	
Rozsah provozního napětí (V)	9 - 14
Nominální napětí (V)	12
Proud (mA)	115
Rychlost otáčení (ot/min.)	42
Moment na hřídeli (Nm)	0,7
Výkon (W)	1,3
Cena (Kč s DPH)	390

Druhým testovaným elektrickým stejnosměrným motorem pro realizaci polohového servomechanismu je starší motor Československé výroby značky PAL taktéž s integrovanou převodovkou, jehož použití se uplatňovalo u starších automobilů značky Škoda, jako pohon předních stěračů. Motor je vyobrazen na obrázku 27.

Obrázek 27 Motorek PAL



Pro porovnání obou stejnosměrných motorků jsou i k motorku PAL s integrovanou převodovkou uvedeny parametry v následující tabulce 3.

Tabulka 3 Parametry DC motoru PAL

Parametry DC motoru PAL	
Rozsah provozního napětí (V)	9 - 14
Nominální napětí (V)	12
Proud (mA)	2000
Rychlost otáčení (ot/min.)	65
Moment na hřídeli (Nm)	1,2
Výkon (W)	30
Cena (Kč s DPH, Dnes od jiného dodavatele)	650

Při porovnání elektrického stejnosměrného motorku GM25-370CHV-286-R a elektrického stejnosměrného motorku PAL můžeme v tabulkách 2 a 3 vidět stejné jmenovité napětí 12 V a rozsahy napětí 9 – 14 V. Motorek PAL má větší proud 2 A a výkon 30 W. Motorek PAL je celkově větší a robustnější konstrukce. Důležitými výhodami motorku PAL je větší rychlost otáčení hřídele a větší kroučící moment, než u motorku GM25-370CHV-286-R. Z tohoto důvodu byl pro realizaci zvolen stejnosměrný elektrický motorek PAL.

Přenos kroučícího momentu u motorku PAL je řešen integrovanou převodovkou. Výstupem hřídele rotoru je šnekový převod, který je na výstupní hřídel celého motoru převeden ještě přímým převodem viz obr. 28.

Obrázek 28 Převodovka motoru PAL

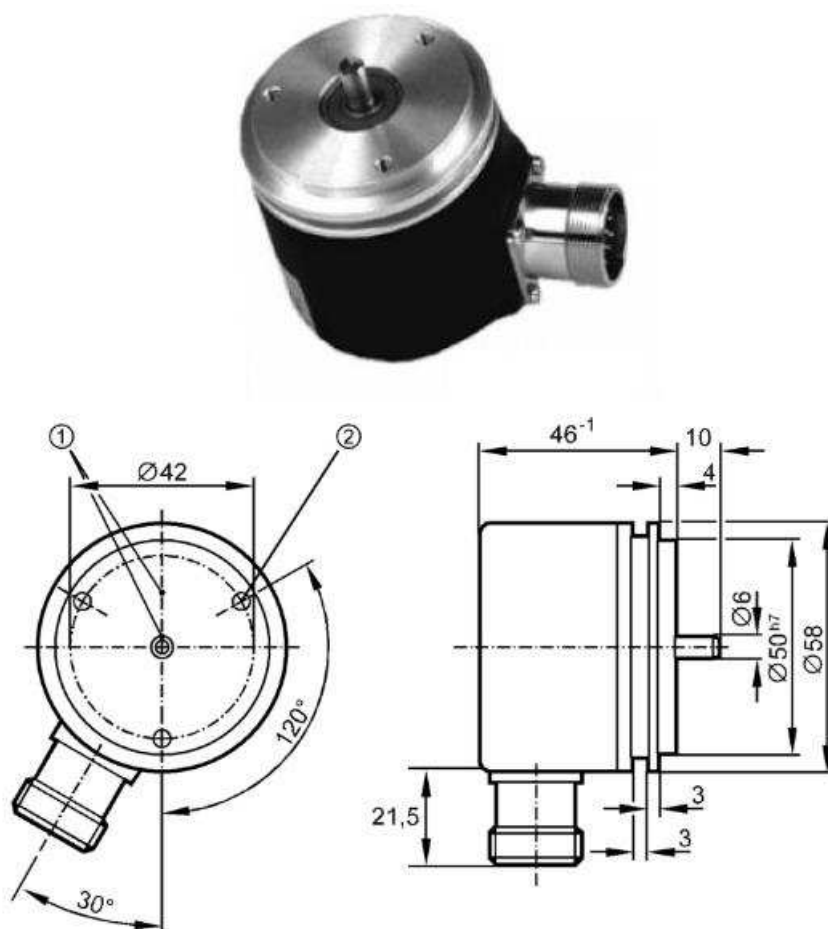


5.2 Měření polohy a natočení hřídele

Abychom dokázali zjistit aktuální polohu natočení hřídele motoru, potřebujeme vybrat vhodný snímač polohy, který nám poskytne informace o natočení v různé podobě. Existuje celá řada snímačů polohy, které se dělí podle principu snímání, dle mechanických vlastností, elektrických vlastností a způsobu použití. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, snímače lze dělit podle principu snímání na odporové, indukčnostní, kapacitní a diskretní. A podle výstupního signálu na analogové (Spojitý výstupní signál) a diskretní (číslicový signál, někdy v podobě kódu).

Většina těchto snímačů polohy jsou běžně dostupné k prodeji na internetu. Jejich cena je však celkem vysoká, proto byl pro práci použit inkrementální snímač polohy a otáček s plnou hřídelí RU-1081 na obrázku 29, který byl k zapůjčení a splňoval limitní parametry: Přesnost polohy do 2° , pracovní rozsah min. $0 - 360^\circ$ a rozsah provozních teplot od $0 - 40^\circ\text{C}$. Všechny parametry Inkrementálního snímače RU-1081 jsou uvedeny v tabulce 4.

Obrázek 29 Inkrementální enkodér RU-1081 [24]

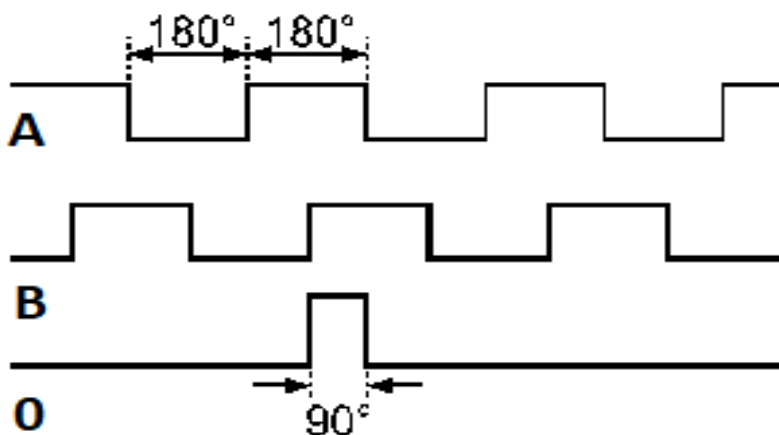


Tabulka 4 Parametry senzoru RU-1081 [24]

Parametry RU-1081	
Tolerance provozního napětí [%]	10
Provozní napětí [V]	5 DC
Proudový odběr [mA]	150
Elektrické provedení	TTL
Spínací frekvence [kHz]	300
Fázový posun A a B [°]	90
Rozlišení	360
Okolní teplota [°C]	-20...100
Max. přípustná relativní vlhkost vzduchu [%]	98
Krytí	IP 64
Odolnost vůči nárazům	100 g (6 ms)
Materiál	Hliník
Max. otáčky, mechanické [ot/min]	12000
Max. počáteční kroutící moment [Nm]	1
Provedení hřídele	Plná hřídel

Z tabulky 4 vyplývá, že snímač polohy RU-1081 splňuje parametry potřebné pro správné měření natočení hřídele stejnosměrného motoru. Hřídel motoru je s plnou hřídelí snímače RU-1081 spojen pomocí 57 mm dlouhé gumové hadičky, která je nasunuta na hřídel stejnosměrného motoru a také na hřídel inkrementálního snímače. Gumová hadička tak zajišťuje bezpečnou rotaci hřídele snímače v případě nepřesné sousosty s hřídelí motoru a také zamezuje vzniku velkých rázů na ložisko inkrementálního snímače. Na další straně je na obrázku 30 zobrazen impulzní diagram signálů A a B.

Obrázek 30 Impulzní diagram RU-1081 [24]

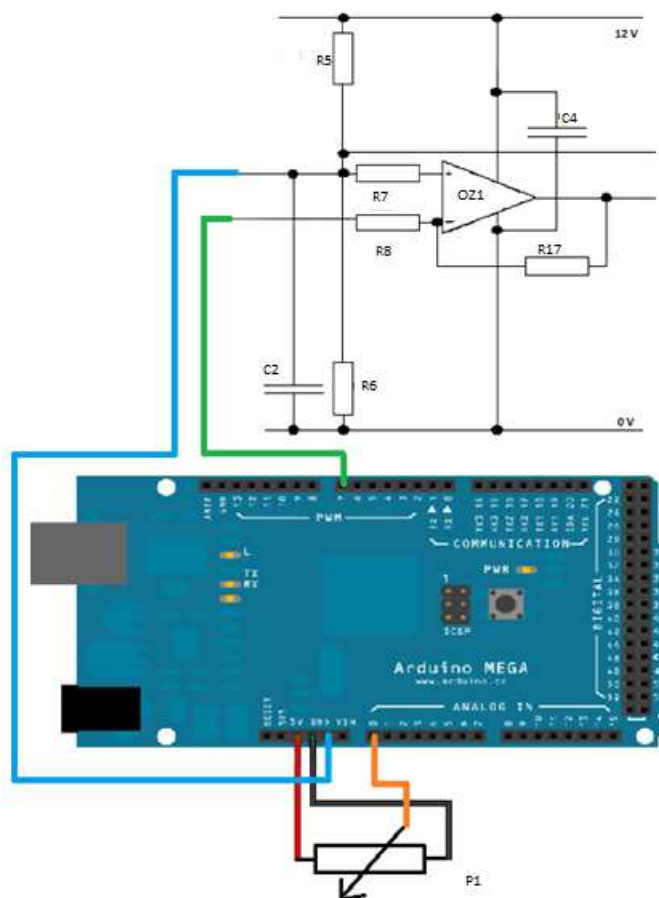


Jako možná náhrada za inkrementální snímač by se mohl použít absolutní rotační snímač ARC 400, který je na první pohled stejný, jako inkrementální snímač RU-1081, ale liší se parametry, výstupním signálem a také pořizovací cenou, která je okolo 10 000 Kč. Výhodou tohoto snímače je informace o aktuální poloze i při odpojení napájení. Tuto schopnost inkrementální rotační enkodéry postrádají. V tabulce 5 jsou pro porovnání uvedeny základní parametry snímače ARC 400.

Tabulka 5 Parametry senzoru ARC 400 [25]

Parametry ARC 400	
Provozní napětí [V]	10...30 DC
Proudový odběr [mA]	70
Spínací frekvence [kHz]	150
Okolní teplota [°C]	0...60
Krytí	IP 65
Max. otáčky, mechanické [ot/min]	6000
Materiál	Hliník
Max. počáteční kroutící moment [Nm]	1
Provedení hřídele	Plná hřídel

Obrázek 32 Schéma zapojení řízení s potenciometrem



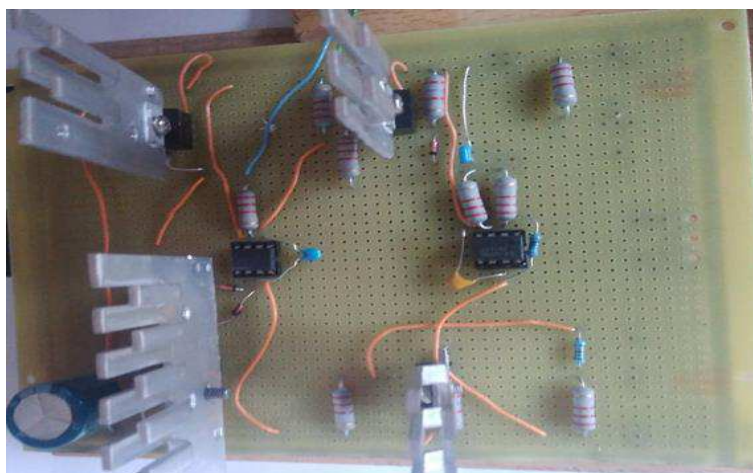
Takto upravené schéma zapojení realizuje natačení hřídele stejnosměrného motoru pomocí Arduina, kde bude Arduino vysílat řídicí napětí $U_{\text{ř}}$ do prvního operačního zesilovače, podle manuálního nastavení potenciometru $10\text{ K}\Omega$, připojeného do analogového vstupu Arduina. Ve středu dráhy potenciometru bude hřídel motoru nehnutě stát. Otočením potenciometru vlevo se hřídel motoru začne otáčet na levou stranu a otočením potenciometru vpravo na stranu pravou. Náhled celého schéma je v příloze 1.

V tabulce 6 jsou uvedeny veškeré součástky, který byly použity na realizaci obvodu pro ovládání polohy hřídele stejnosměrného motoru.

Seznam součástek pro nastavení polohy			
Název součástky	Označení ve schématu	Hodnota	Počet kusů ve schématu
Odpor	R1, R2	1K5	2
Odpor	R3, R4	330	2
Odpor	R5 – R12	2K2	8
Odpor	R17	10M	1
Odpor	R18	10K	1
Odpor	R13 – R16	2k7	4
Potenciometr	P1	10K	1
Kondenzátor	C1, C2	M33	2
Kondenzátor	C4	M1	1
Kondenzátor	C5	68K	1
Kondenzátor	C3	47M	1
Kondenzátor	C6	1G	1
Zenerova dioda	Z1, Z2	2,7V	2
Zenerova dioda	Z3, Z4	3,3V	2
Tranzistor	T1, T3	9530	2
Tranzistor	T2, T4	530	2
Operační zesilovač	OZ1, OZ2	741	2

Skutečné zapojení součástek pro ovládání stejnosměrného motoru je na obrázku 33.

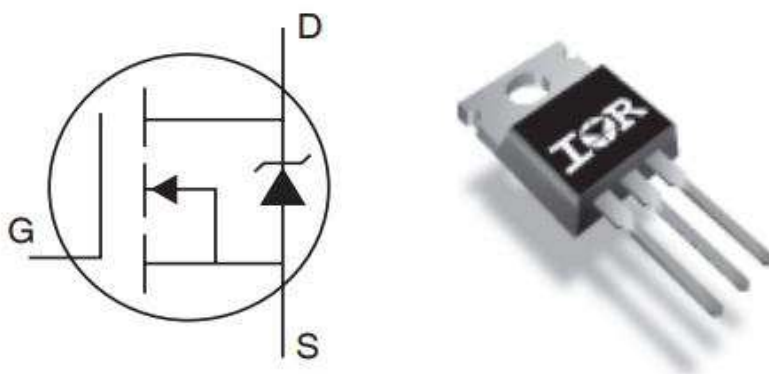
Obrázek 33 Realizovaný výkonový obvod



Otáčení hřídele motoru na jednu, nebo druhou stranu zajišťuje ve výkonovém obvodu H- můstek. Ten je tvořen pomocí dvou unipolárních tranzistorů IRF530N a dvou unipolárních tranzistorů IRF9530N. Otáčení na jednu stranu je realizován sepnutím tranzistoru T1 a T4 viz příloha 1. Otáčení hřídele na stranu druhou zajišťuje sepnutí tranzistoru T2 a T3 viz příloha 1.

Unipolární tranzistor IRF530N včetně schématické značky je na obrázku 34.

Obrázek 34 Tranzistor IRF530N



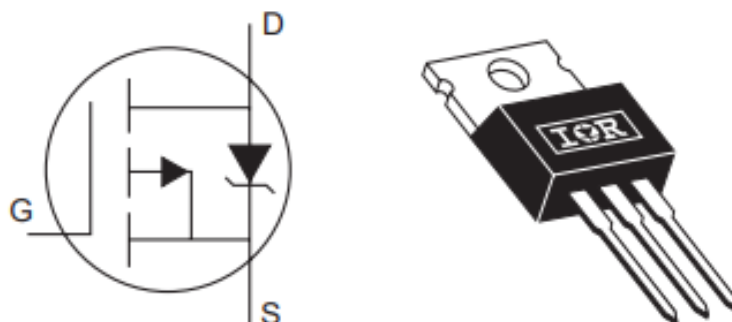
V následující tabulce 7 jsou uvedeny důležité parametry tranzistoru IRF530N.

Tabulka 7 Parametry tranzistoru IRF530N

Mezní parametry tranzistoru IRF530N	
I_D [A]	17
Ztrátový výkon [W]	70
Napětí na Gate [V]	± 20
V_{DSS} [V]	100
R_{DS} [MΩ]	90
Nejvyšší provozní teplota [°C]	175
Lavinový proud [A]	9
Doba zpoždění zapnutí [nS]	9,2
Doba zpoždění vypnutí [nS]	35

Na obrázku 35 je vyobrazen unipolární tranzistor IRF9530N s vodivým P-kanálem. Obrázek 35 také obsahuje schématickou značku tranzistoru IRF9530N.

Obrázek 35 Tranzistor IRF9530N



V tabulce 8 jsou uvedeny maximální hodnoty, pro které lze unipolární tranzistor IRF9530N použít.

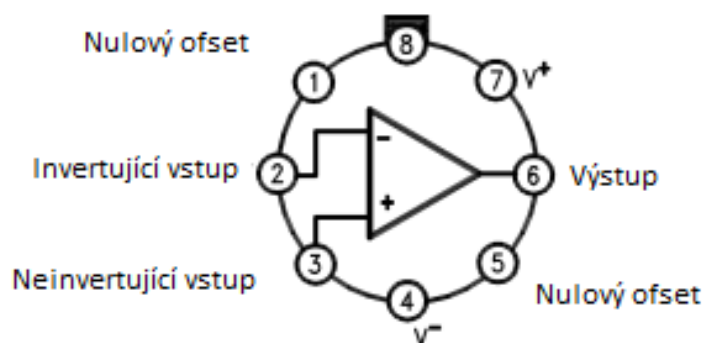
Tabulka 8 Parametry tranzistoru IRF9530N

Mezní parametry tranzistoru IRF9530N	
I_D [A]	-14
Ztrátový výkon [W]	79
Napětí na Gate [V]	± 20
V_{DSS} [V]	-100
R_{DS} [mΩ]	0,20
Nejvyšší provozní teplota [°C]	175
Lavinový proud [A]	-8,4
Doba zpoždění zapnutí [nS]	15
Doba zpoždění vypnutí [nS]	45

V případě, kdy je změněna požadovaná poloha hřídele motoru potenciometrem, vzniká na tranzistorech velký ztrátový výkon, který způsobí velký nárůst teploty tranzistorů. Z tohoto důvodu jsou všechny čtyři tranzistory opatřeny hliníkovými chladiči. Ty jsou s pouzdry tranzistorů spojeny pomocí šroubku. Pro lepší přenos tepelné energie z tranzistoru do chladiče je mezi chladiči a pouzdrům každého tranzistoru nanesena tenká vrstva teplovodivé pasty.

Otevírání tranzistorů je realizováno pomocí dvou operačních zesilovačů LM741. Signál do Gate pro otevření tranzistoru T1 a T4 a tím zajištění otáčení hřídele motoru na jednu stranu, zajišťuje operační zesilovač OZ1 viz příloha 1, kde je zobrazeno celé schéma zapojení. Signál do Gate pro tranzistory T2 a T3 a následné otáčení hřídele motoru na druhou stranu, slouží operační zesilovač OZ2 rovněž zobrazený v příloze 1. Na obrázku 36 je zobrazeno schéma zapojení operačních zesilovačů LM741.

Obrázek 36 OZ LM741



Operační zesilovač LM741 zesiluje rozdíl napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem do zesilovače. Na obrázku 36 vstupy 2 a 3. Změna vstupního napětí je způsobena změnou odporu potenciometru v Arduino. Tím dojde ke změně řídicího napětí $U_{\text{ř}}$ mezi oběma vstupy 2 a 3. V následující tabulce 9 jsou hlavní parametry operačního zesilovače LM741.

Tabulka 9 Katalogové údaje OZ LM741

Parametry OZ LM741	
Napájecí napětí [V]	±22
Ztrátový výkon [mW]	500
Vstupní napětí [V]	15
Rozsah provozních teplot [°C]	-55...125
Vstupní odpor [MΩ]	2
Napájecí proud [mA]	1,7
Spotřeba energie [mW]	60
Diferenciální vstupní napětí [V]	30
Maximální zahřátí při pájení [°C]	260

Pro napájení celého obvodu pro řízení natočení hřídele motoru je použit transformátor Firmy OEM viz obrázek 37. Jeho vstupní napětí je 230 V AC a výstupní parametry jsou 12 V DC a 1 A.

Obrázek 37 Zdroj 12 V DC



5.4 Nulová poloha

Pro indikaci úhlu natočení hřídele stejnosměrného motoru musíme mít stanovenou nulovou polohu, ze které budeme vždy vycházet, a to i v případě vypnutí napájení. Nastavení polohy hřídele nám vyhodnocuje inkrementální snímač, kde si nastavíme požadovaný úhel natočení hřídele na určitý počet pulzů snímače. Prvním krokem je nastavení nulové (referenční) polohy, protože daný snímač je relativní snímač polohy, (po odpojení napájení nezná aktuální polohu). Až po nastavení nulové (referenční) polohy se začne snímač používat a aktivuje se snímání polohy a celá regulační smyčka.

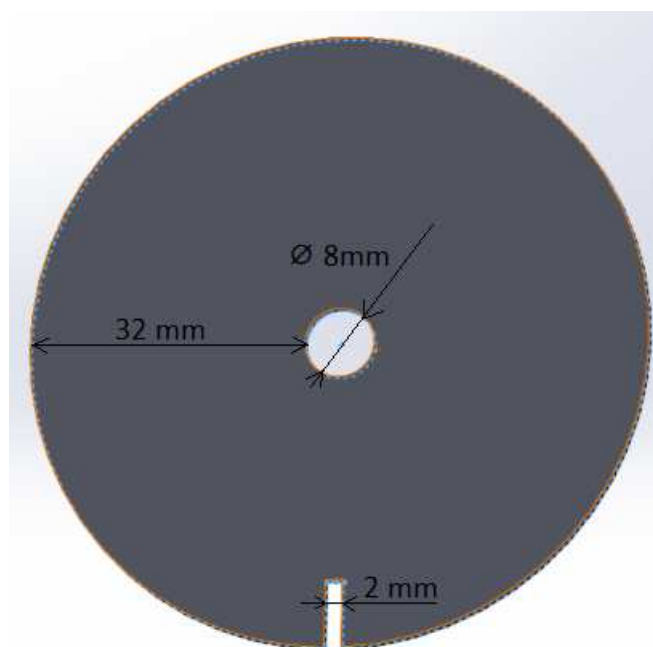
Z toho důvodu byl na hřídel motoru, která je pomocí pružné gumové spojky přilepen plastový kotouček s jedním výřezem (pružná gumová spojka je vyrobena z tvrdého gumového materiálu, aby nedošlo k ovlivnění indikace polohy). Kotouček se bude otáčet společně s hřídelí motoru a bude procházet optickou závorou FC-03.

Při spuštění celého zařízení se tedy nejprve roztočí motor jedním směrem pomalou rychlostí. Motor se bude otáčet, dokud výřez na hřídeli nerozpozná optická závora. V tu chvíli se motor zastaví na „nulové poloze“, a poté se hřídel motoru začne natáčet do žádané polohy podle

natočení potenciometru a enkodér odpočítá příslušný počet pulzů od nulové hodnoty. Po dosažení určitého nastaveného počtu pulzů (odpovídající natočení potenciometru) se motor zastaví v požadované pozici. Další změnou polohy potenciometru se změní i poloha hřídele motoru. Po každém vypnutí a opětovném zapnutí napájení, musí vždy nejdříve proběhnout „nastavení do nulové polohy“.

Na obrázku 38 je zobrazen model kotoučku s výřezem pro stanovení nulové polohy. Kotouček je vytisknut na 3D tiskárně. Materiál PLA plast.

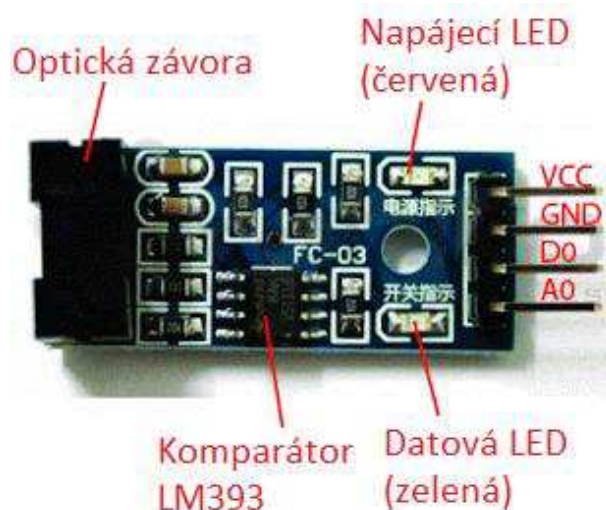
Obrázek 38 Model kotoučku



Pro vyhodnocení nulové polohy byl použit modul optické infračervené závory FC-03. Napájení 5 V je připojeno z Arduina. Optická závora FC-03 obsahuje dva výstupy jeden analogový a jeden digitální. Pro zjištění nulové polohy stačí vyhodnotit pulz jedné úrovně, proto použijeme pouze digitální vstup D2. Modul má dvě LED diody. Jedna červené barvy a druhá barvy zelené. Pokud svítí červená LED dioda, modul je napájen. Zelená LED indikuje prostupnost infračerveného paprsku od vysílače do přijímače.

V případě, že je zelená LED dioda rozsvícená, infračervený paprsek je zacloněn plastovým kotoučkem od vysílače do přijímače, tudíž hřídel motoru se nenachází v „nulové“ poloze. Pokud zelená LED dioda zhasne a červená LED dioda svítí, znamená to, že paprsek prochází výřezem v plastovém kotoučku na přijímač závory a hřídel motoru se nachází v „nulové“ poloze. Schéma modulu je na obrázku 39.

Obrázek 39 Modul optické závory

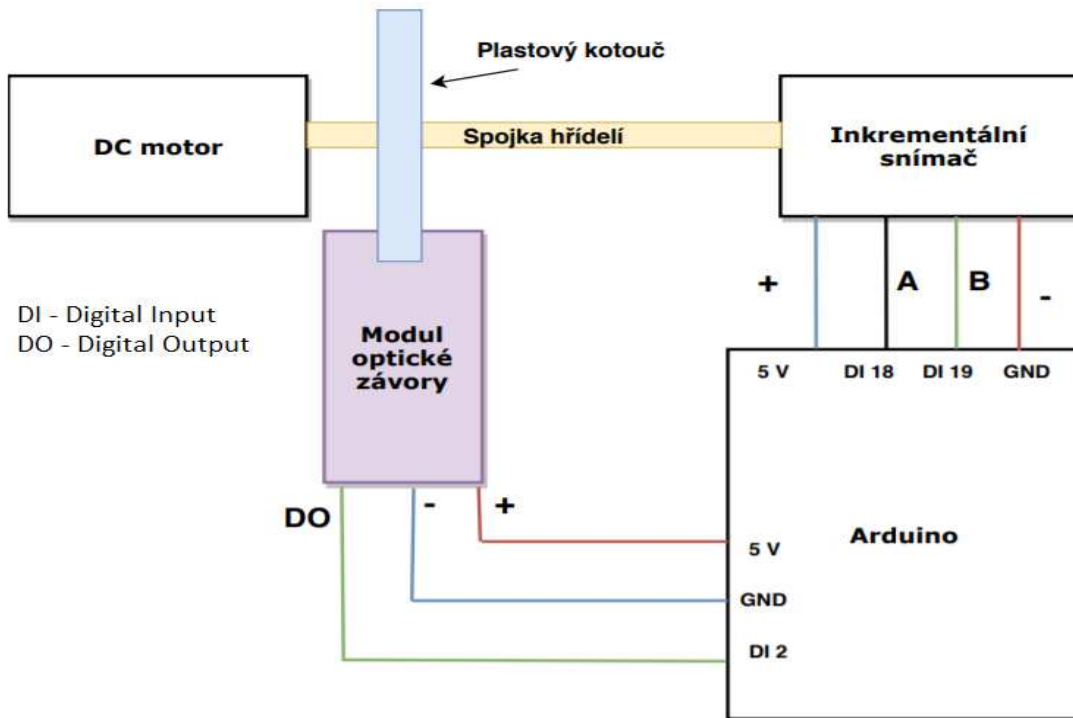


Princip tohoto modulu s komparátorem LM393 je následující: Snímač je osazen infračervenou LED diodou, která svítí na fotocitlivou bázi tranzistoru. Při přerušení paprsku dojde ke změně vodivosti na fototranzistoru, vyhodnocení komparátorem a změně stavu na výstupu.

Pro přehlednost je na dalším obrázku 40 zobrazeno blokové zapojení modulu infračervené závory, inkrementálního snímače do Arduina a také implementace plastového kotoučku na spojenou hřídel motoru s hřídelí snímače.

Přípravek by měl sloužit pro potřeby výuky v laboratorních cvičeních, pro implementaci různých algoritmů regulačních obvodů v číslicovém řízení a pro ověření jejich funkce. Algoritmus je možno přímo implementovat do mikropočítače Arduina.

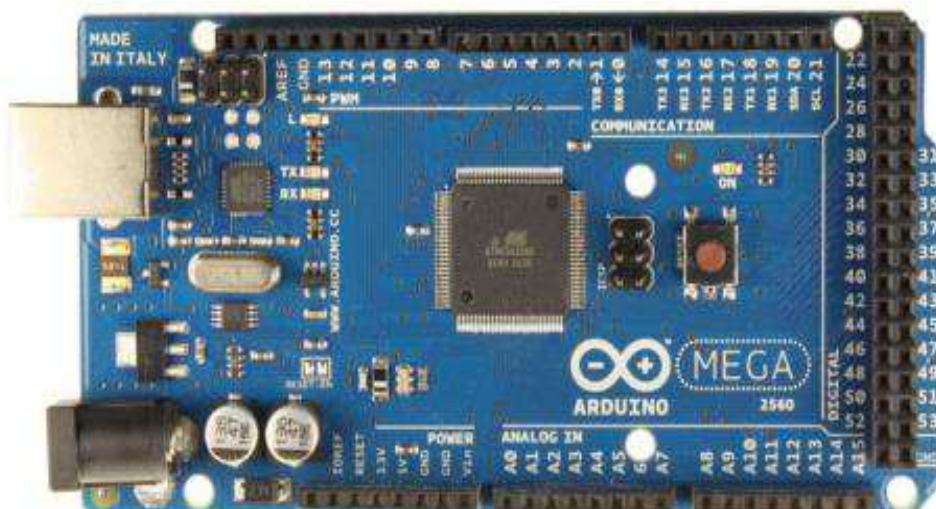
Obrázek 40 Blokové schéma optické závory



5.5 Arduino Mega 2560

Ovládání výkonového obvodu a tím i řízení celého procesu nastavování úhlu natočení hřídele stejnosměrného motoru realizuje mikrokontroler Arduino Mega 2560 zobrazený na obrázku 41. S Arduino Mega 2560 se dostáváme do skupiny desek, jejichž vzhled vznikl prodloužením designu Arduina Uno. Zvětšení rozměrů přináší prostor pro větší a výkonnější čipy a také více pinů (zdířek). Hodí se tam, kde je zapotřebí většího výpočetního výkonu.

Obrázek 41 Arduino Mega 2560



Arduino Mega 2560 je deska s vysoce výkonným mikrokontrolerem AT Mega 2560. Má 54 digitálních vstupních / výstupních pinů (z toho 15 lze použít jako výstupy PWM), 16 analogových vstupů, 4 UART (hardwarové sériové porty), 16 MHz krystalický oscilátor, USB připojení, a napájecí konektor, záhlaví ICSP a tlačítko reset. Obsahuje vše potřebné k podpoře mikrokontroleru. Jednoduše lze připojit k počítači pomocí kabelu USB nebo jde zapnout pomocí síťového napáječe s transformátorem a s usměrňovačem z 230 V AC na max 12 V DC, nebo baterií. AT Mega 2560 je kompatibilní s většinou navržených modulů, jako třeba v našem případě s optickou závorou FC-03. Arduino Mega 2560 je kompatibilní s většinou periférií určených pro Arduino Duemilanove nebo Diecimila.

Zde jsou uvedeny všechny důležité parametry pro Arduino Mega 2560.

- **Mikrokontroler:** AT Mega 2560
- **Architektura:** AVR
- **Datová sběrnice:** 16 bit
- **Provozní napětí:** 5 V DC
- **SRAM:** 8 kB
- **Taktovací frekvence:** 16 MHz
- **Analogové I/O piny:** 16
- **Digitální I/O piny:** 54 (z toho 15 pro PWM)
- **Stejnoseměrný proud na pin:** 40 mA
- **Vstupní napětí (doporučené):** 5 – 12 V DC
- **Vstupní napětí (limitní):** 6 – 20 V DC
- **Proudový odběr:** 38 mA

5.6 Ovládání natočení hřídele pomocí potenciometru

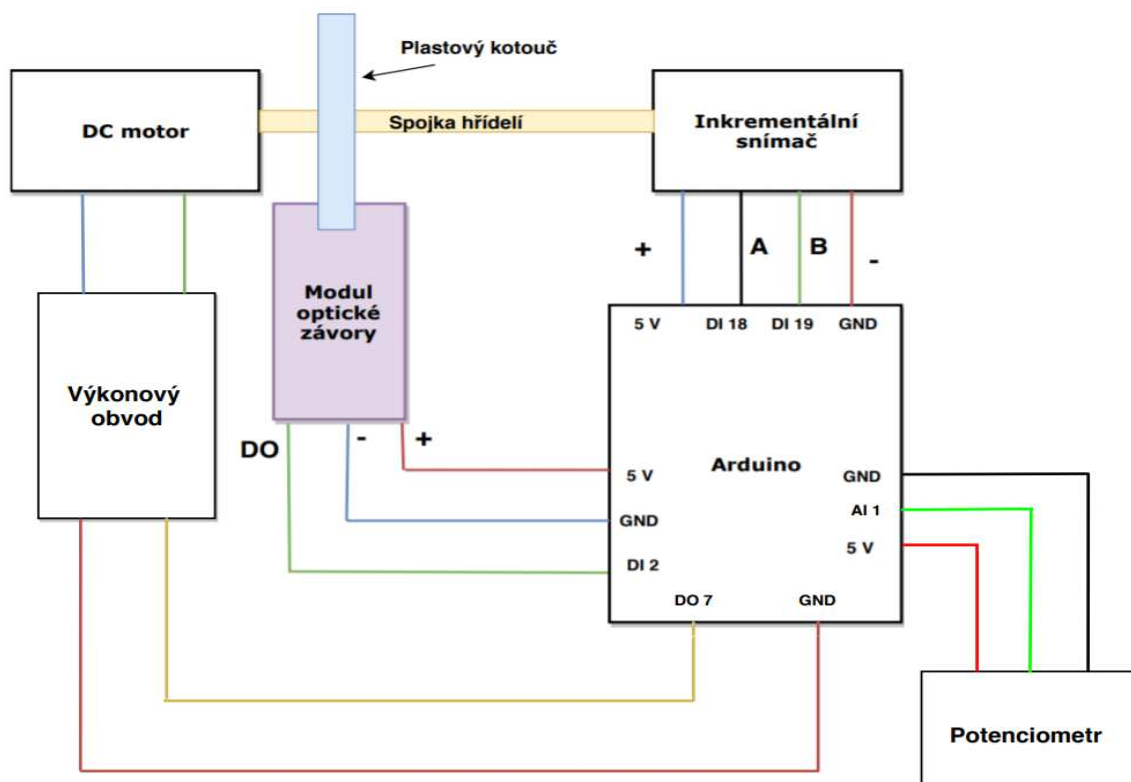
Nastavování natáčení hřídele stejnosměrného motoru na základě otáčení potenciometru, který je připojen do analogového vstupu Arduino Mega 2560. Po zapnutí vypínače se přivede napájení 12 V do výkonového obvodu na obrázku 33 a přivedením požadovaného řídicího napětí U_r (0 V) z Arduina (režim nastavení nulové polohy) se začne hřídel motoru otáčet doleva do té doby, než infračervený paprsek optické závory pronikne výřezem v plastovém kotoučku připevněným na hřídeli motoru. V tuto chvíli pošle optická závora signál do Arduina o změně stavu digitálního výstupu optické závory a Arduino okamžitě změní hodnotu řídicího napětí na

1 V. To způsobí zastavení motoru v takzvané „nulové“ poloze. Nyní se hřídel motoru nehýbe a čeká na další signál z Arduina, který zajišťuje nastavení polohy potenciometru na žádanou polohu. Při otočení potenciometru, který má rozsah 0 – 5 V převedený pomocí desetibitového převodníku na 0 – 1023 hodnot, Arduino vyhodnotí o kolik a jakým směrem se má hřídel motoru natočit a podle toho pošle řídicí napětí do výkonového obvodu. Pro otáčení vlevo je velikost řídicího napětí 0 V. Zastavení odpovídá hodnota napětí 1 V a pro otáčení hřídele motoru vpravo je hodnota napětí 2 V. Při maximálním otočení potenciometru vlevo se hřídel motoru natočí vlevo o 180 ° od výchozí polohy. Po otočení potenciometru do maximální polohy vpravo se hřídel motoru natočí vpravo o 180 ° od nulové polohy.

Každá převedená hodnota potenciometru má přiřazený určitý počet hodnot inkrementálního snímače. V Arduinu se tedy porovnává požadovaná hodnota s hodnotou skutečnou. Jakmile Arduino zaregistruje pomocí inkrementálního snímače shodnou požadovanou hodnotu a skutečnou hodnotu, pošle do výkonového obvodu napětí 1 V, a to způsobí zastavení motoru v požadované poloze. Další změna polohy hřídele se vyvolá po otočení potenciometru.

Na obrázku 42 je znázorněno blokové schéma celkového zapojení. Reálné zapojení je na obrázku v příloze 2.

Obrázek 42 Celkové blokové zapojení



5.7 Programové vybavení

V této kapitole je uveden kód potřebný pro řízení úhlu otáčení hřídele stejnosměrného motoru na základě natočení potenciometru. Celý kód je uveden v Příloze 3.

```
int motor = 7;
int potPin = A1;
int potentiometerValue = 0;
int calculatedIndex = 0;
int lastPotentiometer = 0;
int encoderPin1 = 18;
int encoderPin2 = 19;
int requiredPosition = 0;
volatile int lastEncoded = 0;
volatile long encoderValue = 0;

bool positionOK = false;
bool engineRun = true;
```

Výše uvedená část kódu deklaruje proměnné, jejich datové typy a počáteční podmínky

```
int positionArray []={0,1,2, ... ,1448,1449,1450};
```

Dále je nadeklarováno jednorozměrné pole s 1450 prvky, které slouží pro přepočítání polohy potenciometru na počet pulzů z inkrementálního snímače.

```
void setup()
```

Funkce, která se provede jednou po spuštění Arduina.

```
{
    pinMode(encoderPin1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(encoderPin2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(motor, OUTPUT);
    digitalWrite(encoderPin1, HIGH);
    digitalWrite(encoderPin2, HIGH);
```

Příkaz `pinMode` nastaví nadefinované piny `encoderPin1` a `encoderPin2` pro čtení a zároveň dojde k nastavení vnitřního odporu kvůli zamezení možným zákmitům. Předdefinovaný pin s názvem `motor` je tímto příkazem nastaven jako výstupní.

```
    attachInterrupt(0, referencePosition, RISING);
```

Příkazem `attachInterrupt` dojde k povolení externího přerušení, které reaguje na náběžnou hranu na vývodu 2. Pokud dojde ke změně logické hodnoty na pinu 2 vlivem změny stavu na optické závoře dojde k okamžitému zavolání funkce `referencePosition()`, která hlídá nulovou polohu hřídele a po jejím vykonání dojde k zastavení chodu motoru.

```

while (positionOK == false
{
    analogWrite (motor, 190);
}

```

Výše uvedená smyčka while zaručuje, že po spuštění vždy hřídel motoru dojde na referenční (nulovou) polohu.

```

delay (1000);

```

Příkaz delay zastaví chod procesoru na 1 s.

```

attachInterrupt (4, updateEncoder, CHANGE);
attachInterrupt (5, updateEncoder, CHANGE);

```

Povolením externího přerušení na vývodech 18 a 19, které jsou označeny v programu označeny čísla 4 a 5.

```

encoderValue = 0;

```

Přiřazením nulové hodnoty do nově nadefinované proměnné encoderValue dojde k nastavení počátečních podmínek pro inkrementálního snímač.

```

}
void loop ()
{
    potentiometerValue = analogRead (potPin);

```

Přečte, jaká hodnota je aktuálně na potenciometru.

```

if (lastPotentiometer != potentiometerValue)

```

Porovná, jestli se změnila hodnota potenciometru, jestliže se liší aktuální hodnota s minulou, začne se vykonávat kód v podmínce.

```

{
    engineRun = true;

```

Příkaz engineRun zajistí, že se začne motor otáčet.

```

lastPotentiometer = potentiometerValue;

```

Přiřadí aktuální hodnotu potenciometru do proměnné, která udržuje poslední hodnotu.

```

calculatedIndex = map (lastPotentiometer, 0, 1023, 0,
1450);

```

Map je funkce pro přepočtení velikostí pole (toho je 1450 hodnot) a rozsahu potenciometru (toho je 1023 hodnot).

```

requiredPosition = positionArray [calculatedIndex];

```

Z pole pozic je vyňata hodnota, která se bude hledat na encoderu při otáčení.


```
detachInterrupt (0);
```

detachInterrupt (0) zakáže externí přerušení zrušení.

```
}
```

```
void updateEncoder ()
```

Metoda, která se zavolá pokaždé změně logické hodnoty na výstupu enkodéru.

```
{
```

```
int MSB = digitalRead(encoderPin1);
```

Přečtení hodnoty na pinu 1.

```
int LSB = digitalRead(encoderPin2);
```

Přečtení hodnoty na pinu 2.

```
int encoded = (MSB << 1) | LSB;
```

Převedení hodnot z dvou pinů na jedno číslo.

```
int sum = (lastEncoded << 2) | encoded;
```

Přidání aktuální hodnoty bitů k minulé hodnotě.

```
if (sum == 0b1101 || sum == 0b0100 || sum == 0b0010 || sum  
== 0b1011) encoderValue ++;
```

Hlídaní otáčení enkodéru vpravo.

```
if (sum == 0b1110 || sum == 0b0111 || sum == 0b0001 || sum  
== 0b1000) encoderValue --;
```

Hlídaní otáčení enkodéru vlevo.

```
lastEncoded = encoded;
```

Přepsání aktuální hodnoty enkodéru do proměnné, která si pamatuje minulou hodnotu.

```
}
```


6 Zhodnocení výsledků

Všechny komponenty pro realizace řízení úhlu natočení hřídele stejnosměrného motoru jsou umístěny na laminátové desce o rozměrech 300 x 250 mm. Motor s rozměry 180 x 60 mm je položený na boku a k laminátu je přilepený pomocí tavného lepidla. Aby byla hřídel motoru ve vodorovné poloze, je motor z několika stran podložen dřevěnými kolíčky. Na hřídeli motoru je mimo jiné nasazený plastový kotouček (s jedním pravidelným výřezem o velikosti 2 mm) o průměru 72 mm, vytisknutý na 3D tiskárně. Pro 3D tisk plastového kotoučku byl použit Filament PLA tmavě modré barvy. Kotouček je na hřídeli motoru přichycen opět tavným lepidlem z důvodu jednoduchého sejmutí z hřídele motoru v případě potřeby.

Hřídel motoru je pomocí pružné gumové spojky o délce 57 mm spojena s hřídelí inkrementálního enkodéru. Pružná spojka je vhodným spojovacím materiálem, protože nelze zaručit přesnou souosost hřídele motoru a hřídele inkrementálního snímače. Další výhodou pružné spojky je snížení rázů, které může vyvolat hřídel stejnosměrného motoru při prudším otočení hřídele motoru na ložisko inkrementálního snímače.

Pro zajištění co největší souososti obou hřídelí je inkrementální snímač podložen laminátovou destičkou s půlkruhovým výřezem o shodném průměru, jako je průměr inkrementálního snímače, aby destička správně kopírovala obvod snímače a zvýšila se stabilita snímače. Pro inkrementální enkodér nebyl k dispozici odpovídající konektor pro připojení do Arduina, proto jsou na jednotlivých pinech inkrementálního snímače nasazeny vodiče s konektory Dupont. V tomto případě jsou připojeny k Arduinu čtyři vodiče. Napájení 5 V, GND a signály A a B.

Modul optické závory FC-03, který slouží pro vyhodnocení výchozí (nulové) polohy je umístěn na laminátové desce pod plastovým kotoučkem tak, aby kotouček s průřezem procházel vysílačem a přijímačem optické závory a mohlo dojít k zachycení průřezu v kotoučku a stanovení výchozí polohy. Optická závora je taktéž připojena pomocí vodičů s konektory Dupont do mikropočítače. Pro FC-03 jsou použity tři vodiče: 5 V, GND a digitální vstup.

Pro ovládání motoru slouží výkonový obvod složený ze dvou operačních zesilovačů LM 741 a H-můstku popsanych v kapitole 5.3 Realizace výkonového obvodu. Výkonový obvod je realizován na universálním pájivém poli o rozměrech 160 x 120 mm. Na laminátové desce je přilepen pomocí oboustranné lepicí pásky. Mimo jiné je na jedné straně pájivého pole umístěn

vypínač, který zapíná a vypíná chod celého zařízení. Z obvodu vedou dva vodiče do stejnosměrného motoru, které ho řídí. Arduino je do obvodu připojeno také pomocí dvou vodičů, a to GND a PWM výstup. V obvodu jsou tyto dva vodiče připojeny na U_ř (řídící napětí). Podle velikosti řídicího napětí je dosaženo otáčení hřídele motoru určitou rychlostí na jednu, nebo na druhou stranu. Výkonový obvod je napájen transformátorem 12 V DC.

Řízení celého procesu zajišťuje mikrokontroler Arduino Mega 2560, který je uloženo v krabici s rozměry 110 x 60 mm také vytisknuté na 3D tiskárně za pomoci Filamentu PLA tmavě modré barvy. Na laminátové desce je Arduino zhruba uprostřed, jakožto mozek celého zařízení. Arduino je napájeno pomocí transformátoru 12 V DC. Posledním článkem celého řetězce je potenciometr, kterým se ručně nastavuje požadovaná poloha natočené hřídele stejnosměrného motoru. Potenciometr je umístěn na okraji laminátové desky, pro snadný přístup k jeho ovládání. Na laminátovou desku je přilepen pomocí tavného lepidla a do mikrokontroleru je připojen třemi vodiči: 5 V, GND a analogový vstup. Hodnota potenciometru je 10 K Ω . Reálné zapojení celého zařízení je v příloze 2.

7 Závěr

Práce je zaměřena na návrh a realizaci polohového servomechanismu, jako analogově, nebo číslicově regulované soustavy. Zařízení je vyhotovené jako model použitelný například do výuky k seznámení se s principem snímání natočení hřídele motoru a analogovým ovládním stejnosměrného motoru. Stejným principem řízení (po výměně potenciometru za fotodiodu, nebo za termočlánek) by se mohlo ovládat zatažení okenních rolet, nebo regulovat ventil topení.

Teoretická část se nejprve zabývá rozdělením stejnosměrných motorů podle principu buzení. Další část je zaměřená na snímání polohy a otáček hřídele motoru. Jednotlivé snímače jsou rozděleny do kategorií podle zpracování signálu na analogový, nebo číslicový a poté jsou snímače rozděleny podle principu snímání. V poslední části jsou uvedeny a popsány jednotlivé typy analogových regulátorů.

Praktická část je zaměřena přímo na výběr jednotlivých komponentů a realizaci celého řízení natačení hřídele stejnosměrného motoru. Při výběru vhodných prvků byl kladen velký důraz na minimalizaci finančních nákladů a na jednoduchost realizace.

Pro ovládní byl vybrán stejnosměrný motor Pal s integrovanou převodovkou, který odpovídal požadovaným parametrům. Snímání úhlu natočení hřídele stejnosměrného motoru je realizováno pomocí inkrementálního enkodéru RU108, který byl k zapůjčení na katedře automatizace. Další variantou snímání úhlu natočení hřídele motoru se nabízí absolutní snímač, ten si pamatuje polohu i po odpojení napájení a tím by zařízení nemuselo řešit nastavování na výchozí polohu po každém zapnutí. Absolutní snímač je však finančně náročný.

Výkonový obvod pro ovládní stejnosměrného motoru PAL, je řešen universálním pájivým polem, které ovšem zbytečně zabírá moc místa. Náhradou se nabízí tištěný spoj navržený ve vhodném programu, například Eagle, který by podstatně zmenšil rozměry výkonového obvodu. Dalším možným rozšířením je přidání analogového regulátoru, aby regulace obvodu probíhala zcela analogově.

8 Seznam použitých zdrojů

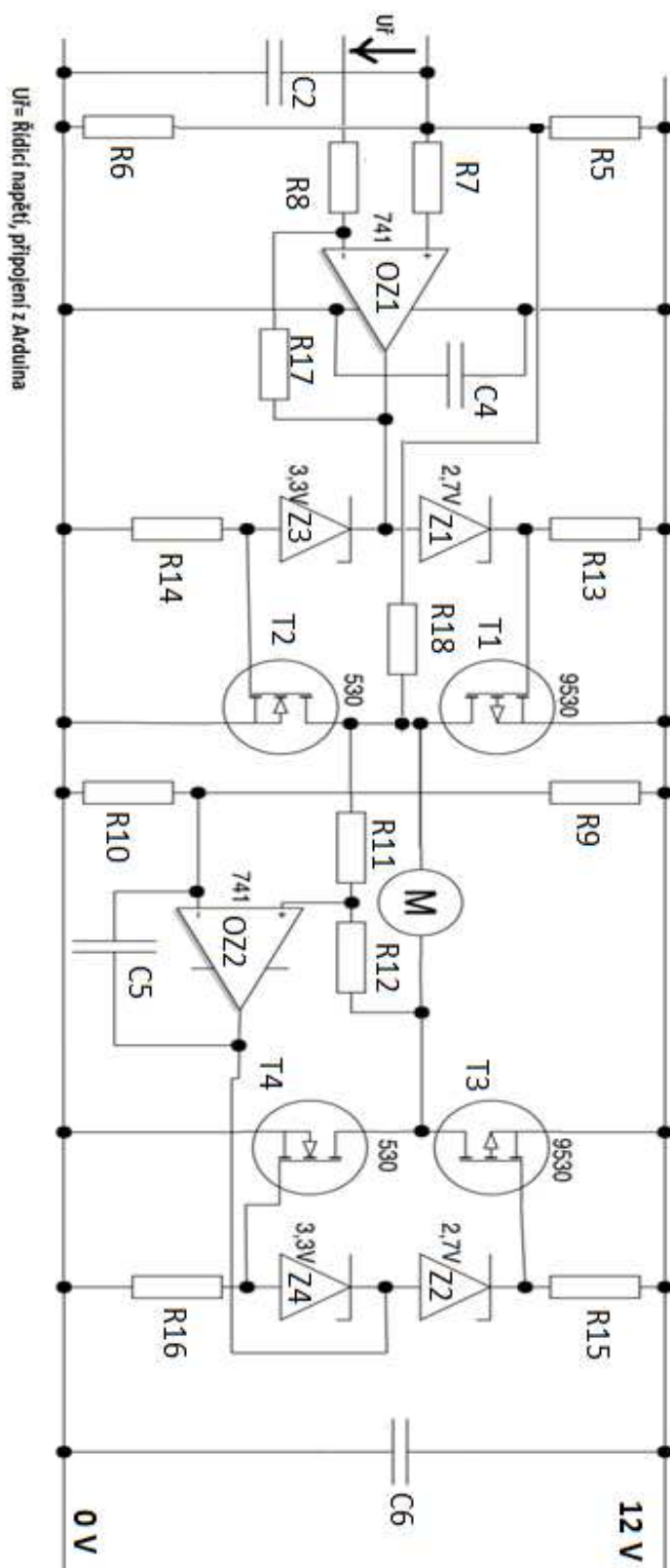
- [1] VRÁNA, Václav a Stanislav KOČMAN. Stejnoseměrné stroje [online]. Ostrava: FEI VŠB-TU, 2004 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_stejnosemerne%20stroje_bc%20FS.pdf
- [2] ELUC: Princip činnosti a konstrukce. Eluc.kr-olomoucky.cz [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1585>
- [3] KOVAL, Zdeněk. Stejnoseměrné stroje. KOVAL, Zdeněk. Stejnoseměrné stroje [online]. 1. 2014, s. 13 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/ELE/Ele_UT.pdf
- [4] Snímače otáček. Snímače otáček [online]. Nová Paka, s. 3 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Snimace%20otacek.pdf>
- [5] RADA, Václav. Stejnoseměrné pohony [online]. 2011. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/tst/rada.v/>
- [6] BĚLAVÝ, Cyril. Analogové snímače: Meradlá frekvencie otáčania s analogovým výstupným signálom. Http://vlm.clanweb.eu [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://vlm.clanweb.eu/frekvencia-otacania/analogove-snimace/>
- [7] Automatizace-snímače. Http://www.snimace.xf.cz [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.snimace.xf.cz/otackomery-impulsni-stroboskopicke.php>
- [8] Typy ABS snímačů. Http://www.mjauto.cz [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.mjauto.cz/typy-abs-snimacu>
- [9] PLC Automatizace: Kód pro inkrementální snímače. Http://plc-automatizace.cz [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://plc-automatizace.cz/knihovna/data/kodovani/IRC-code.htm>
- [10] FEJT, Radek. Senzory: Optický inkrementální senzor. www.senzory.aspone.cz [online]. 2012 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://senzory.aspone.cz/ois.htm>

- [11] Servopohony [online]. In: 2014, s. 23 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/dacey/servopohony>
- [12] Automa: Snímače polohy a otáček v praxi. Ústí nad Labem, 2003, 2003(03).
- [13] Position Sensors. Www.electronics-tutorials.ws [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_2.html
- [14] Position Sensor: Types of Position Sensor. Www.engineersgarage.com [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/articles/position-sensors>
- [15] VLČEK, Jiří. Automatizace 3. Automatizace 3: Snímače, čidla [online]. 2008, s. 11 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102_at3.pdf
- [16] Princip-Encoder. Http://www.pohonnatechnika.cz [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/encodery>
- [17] MAREŠ, Vlastimil. Selsyny [online]. MAREŠ, Vlastimil. Praha, s. 1 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: http://iat.fs.cvut.cz/109/files/DP/Mares_Vlastimil_DP2000_kyvadlo/mereni_polohy/selsyny.htm
- [18] Absolutní rotační snímače. Http://www.alphaint.cz [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/absolutni-rotacni-snimace/>
- [19] VYLEGALA, Pavel. Snímače optické, ultrazvukové a rádiové [online]. In: 2014, s. 22 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_ss_4.pdf
- [20] Regulátory a vlastnosti regulátorů. Automatizace [online]. s. 14 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory3/Vlastnosti%20regulatoru.pdf>
- [21] KOUBEK, Tomáš. Regulátory. Akela.mendelu.cz [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://akela.mendelu.cz/~xhammers/TKY/regulatory.htm>
- [22] Spojité regulátory [online]. Praha, 2005 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/>

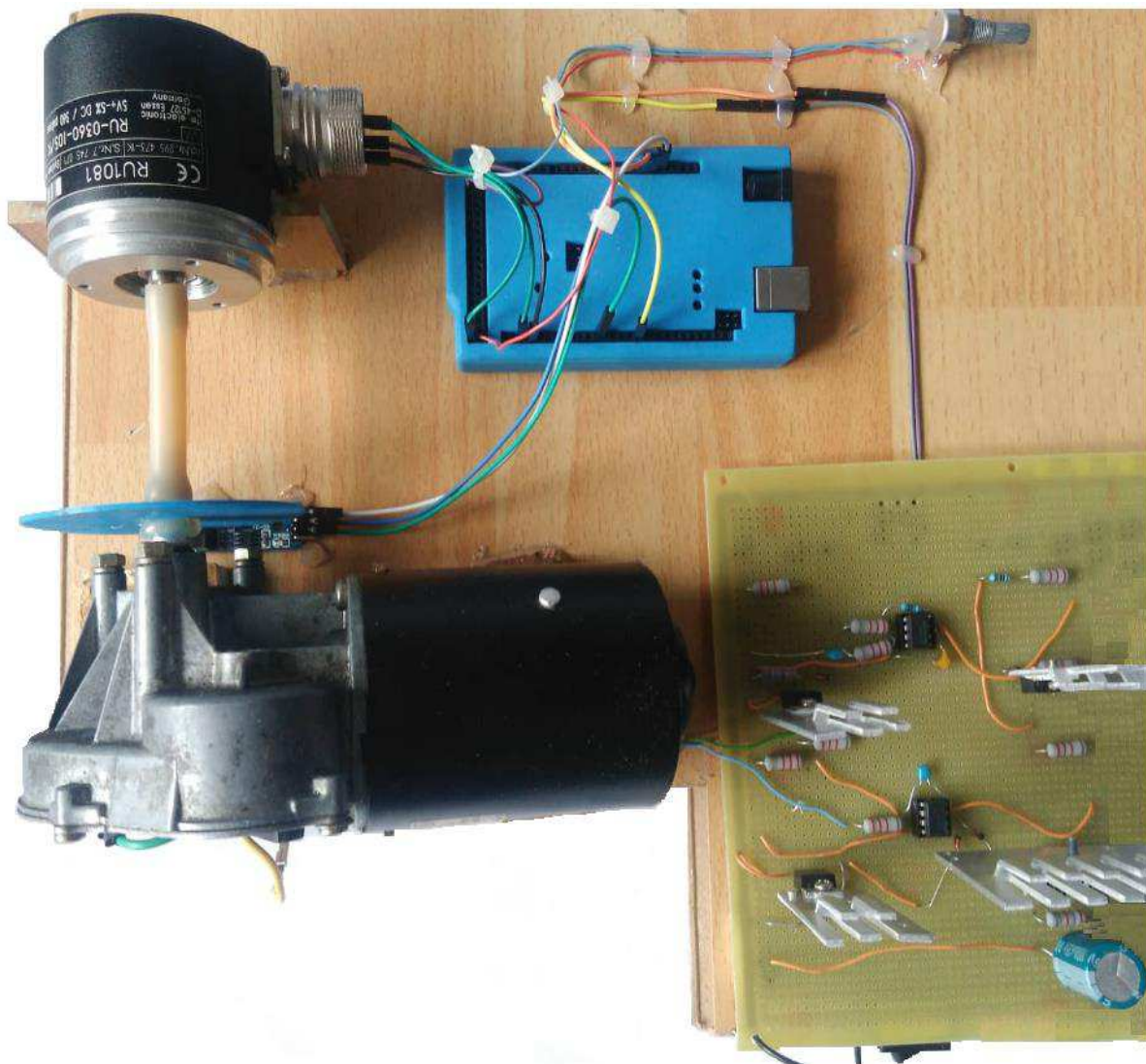
- [23] GME: Elektrický motorek s převodovkou GM25-370CHV-286-R [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/elektricky-motorek-s-prevodovkou-gm25-370chv-286>
- [24] Inkrementální rotační senzor s plnou hřídelí: RU1081. Wwww.ifm.com [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/cz/cs/product/RU1081?tab=details>
- [25] Absolutní rotační snímače. Http://www.larm.cz [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.larm.cz/absolutni-rotacni-snimace-arc-400-az-425/>

9 Přílohy

Příloha 1: Schéma zapojení výkonového obvodu



Příloha 2: Reálné zapojení všech součástí natáčení úhlu hřídele motoru



Příloha 3: Kód pro řízení polohy hřídele motoru na základě potenciometru

```
int motor = 7;
int potPin = A1;
int potentiometerValue = 0;
int calculatedIndex = 0;
int lastPotentiometer = 0;
int encoderPin1 = 18;
int encoderPin2 = 19;
int requiredPosition = 0;
volatile int lastEncoded = 0;
volatile long encoderValue = 0;
bool positionOK = false;

bool engineRun = true;

int positionArray
[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22
,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,4
3,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,
64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84
,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,
104,105,106,107,108,109,110,111,112,113,114,115,116,117,118,11
9,120,121,122,123,124,125,126,127,128,129,130,131,132,133,134,
135,136,137,138,139,140,141,142,143,144,145,146,147,148,149,15
0,151,152,153,154,155,156,157,158,159,160,161,162,163,164,165,
166,167,168,169,170,171,172,173,174,175,176,177,178,179,180,18
1,182,183,184,185,186,187,188,189,190,191,192,193,194,195,196,
197,198,199,191.....1192,1193,1194,1195,1196,1197,1198,1
199,1200,1201,1202,1203,1204,1205,1206,1207,1208,1209,1210,121
1,1212,1213,1214,1215,1216,1217,1218,1219,1220,1221,1222,1223,
1224,1225,1226,1227,1228,1229,1230,1231,1232,1233,1234,1235,12
36,1237,1238,1239,1240,1241,1242,1243,1244,1245,1246,1247,1248
,1249,1250,1251,1252,1253,1254,1255,1256,1257,1258,1259,1260,1
261,1262,1263,1264,1265,1266,1267,1268,1269,1270,1271,1272,127
3,1274,1275,1276,1277,1278,1279,1280,1281,1282,1283,1284,1285,
1286,1287,1288,1289,1290,1291,1292,1293,1294,1295,1296,1297,12
98,1299,1300,1301,1302,1303,1304,1305,1306,1307,1308,1309,1310
,1311,1312,1313,1314,1315,1316,1317,1318,1319,1320,1321,1322,1
323,1324,1325,1326,1327,1328,1329,1330,1331,1332,1333,1334,133
5,1336,1337,1338,1339,1340,1341,1342,1343,1344,1345,1346,1347,
1348,1349,1350,1351,1352,1353,1354,1355,1356,1357,1358,1359,13
60,1361,1362,1363,1364,1365,1366,1367,1368,1369,1370,1371,1372
,1373,1374,1375,1376,1377,1378,1379,1380,1381,1382,1383,1384,1
385,1386,1387,1388,1389,1390,1391,1392,1393,1394,1395,1396,139
7,1398,1399,1400,1401,1402,1403,1404,1405,1406,1407,1408,1409,
1410,1411,1412,1413,1414,1415,1416,1417,1418,1419,1420,1421,14
22,1423,1424,1425,1426,1427,1428,1429,1430,1431,1432,1433,1434
,1435,1436,1437,1438,1439,1440,1441,1442,1443,1444,1445,1446,1
447,1448,1449,1450};
```

```

void setup()
{
    pinMode(encoderPin1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(encoderPin2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(motor, OUTPUT);
    digitalWrite(encoderPin1, HIGH);
    digitalWrite(encoderPin2, HIGH);
    attachInterrupt(0, referencePosition, RISING);
    while(positionOK == false
        {
            analogWrite(motor,190);
        }
    delay(1000);
    attachInterrupt(4, updateEncoder, CHANGE);
    attachInterrupt(5, updateEncoder, CHANGE);
    encoderValue = 0;
}

void loop()
{
    potentiometerValue = analogRead(potPin);
    if (lastPotentiometer != potentiometerValue)
    {
        engineRun = true;
        lastPotentiometer = potentiometerValue;
        calculatedIndex = map(lastPotentiometer, 0, 1023, 0,
1450);
        requiredPosition = positionArray[calculatedIndex];
        if( requiredPosition < encoderValue)

```

```

    analogWrite(motor, 50);
    if( requiredPosition > encoderValue)
    analogWrite(motor, 200);
    while(engineRun)
    {
        if(encoderValue == requiredPosition)
        {
            analogWrite(motor, 107);
            engineRun = false;
            delay(1000);
        }
    }
}
void referencePosition()
{
    analogWrite(motor, 105);
    positionOK = true;
    detachInterrupt(0);
}
void updateEncoder()
{
    int MSB = digitalRead(encoderPin1);
    int LSB = digitalRead(encoderPin2);
    int encoded = (MSB << 1) |LSB;
    int sum = (lastEncoded << 2) | encoded;
    if(sum == 0b1101 || sum == 0b0100 || sum == 0b0010 || sum
    == 0b1011) encoderValue ++;
    if(sum == 0b1110 || sum == 0b0111 || sum == 0b0001 || sum
    == 0b1000) encoderValue --;
    lastEncoded = encoded;
}

```