

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Marko Buršič

Navodila in predloga za izdelavo diplomskega in magistrskega dela

Diplomsko delo

Mentor: prof. dr. Damijan Miljavec

Ljubljana, 2016

Zahvala

V zahvali se kandidati zahvali mentorju in poimensko tudi vsem sodelavcem in prijateljem, ki so pomagali in prispevali pri delu v laboratoriju, na računalniku, v delavnici, pri tehnični izdelavi dela in drugje.

Vsebina

1	Uvod	5
2	Dajalniki pozicije	7
2.1	Resolver	8
3	primeri latex	21
3.1	Podrobna navodila	21
3.1.1	Primer pisanja enačb	21
3.1.2	Slike	21
3.1.3	Tabele	22
3.1.4	Programska koda	23
4	Zaključek	25
A	Urejanje dokumentov z orodjem LaTeX	29
B	Primer kode PID regulatorja	31

Seznam slik

3.1 Primer vključitve slike	22
---------------------------------------	----

Seznam tabel

1	Veličine in simboli	xi
3.1	Prebojne trdnosti izolantov in priključne napetosti	23

Seznam uporabljenih simbolov

V pričujočem zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
čas	t	sekunda	s
frekvenca	f	Hertz	Hz
obodna hitrost	ω	-	rad/s
hitrost	v	-	m/s
kotni pospešek	α	-	rad/s ²
linearni pospešek	a	-	m/s ²
sila	F	Newton	N
masa	m	kilogram	kg
moment	M	Newtonmeter	Nm
vztrajnostni moment	J	-	kgm ²
napestost	U	Volt	V
tok	I	Ampere	A
upornost	R	Ohm	Ω
prevodnost	G	Siemens	S
induktivnost	L	Henry	H
kapacitivnost	C	Farad	F
gostota magnetnega pretoka	B	Tesla	T
jakost magnetnega polja	H	-	A/m
nekaj		-	-

Tabela 1: Veličine in simboli

Pri čemer so vektorji in matrike napisani s poudarjeno pisavo. Natančnejši pomen simbolov in njihovih indeksov je razviden iz ustreznih slik ali pa je pojasnjen v spremljajočem besedilu, kjer je simbol uporabljen.

Povzetek

V pričujočem delu so predstavljena navodila za izdelavo zaključnega dela na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaključno delo predstavlja diplomsko delo na prvi stopnji ter magistrsko delo na drugi stopnji izobraževalnega programa.

V povzetku v slovenščini in v angleščini kandidat navede glavne rezultate dela, zato naj povzetek seznani bralca z jedrom dela na način, ki je običajen za pisanje krajših člankov ali referatov. Obseg povzetka je za Repozitorij Univerze v Ljubljani omejen na tisoč znakov.

Povzetek se naj prične z opisom in definicijo problema. Nadaljuje se naj z opisom uporabljenih metod in postopkov, ki so privedli do rečitve. Na koncu naj bodo opisani rezultati dela in glavni zaključki, ki iz rezultatov izhajajo.

Za tem se na isti strani navede če ključne besede v slovenščini in v tujem jeziku.

Ključne besede: beseda1, beseda2, beseda3

Abstract

The thesis addresses ...

Key words: word1, word2, word3

1 Uvod

Uvod v zaključno delo ima namen, da uvede bralca v tematiko zaključnega dela. V njem kandidat razčleni zahteve in cilje zaključnega dela, po literaturi povzame znane rečitve in oceni njihov pomen za zaključno delo. Sklicevanje na literaturo se v besedilu označi s čtevilko v oglatem oklepaju, ki jo ima ta v seznamu uporabljenih virov, in po potrebi navede strani, npr. [?]

2 Dajalniki pozicije

Hall-ov pojav je posledica toka skozi prevodnik, ki se nahaja v magnetnem polju. Slika ?? prikazuje tanek sloj prevodnika (Hall element) skozi katerega teče tok v smeri x-osi. Priključne sponke izhodnega signala se nahajajo na obeh robovih elementa na y-osi, zunanje magnetno polje pa deluje v smeri z-osi. V kolikor zunanje magnetno polje ni prisotno, se elektroni pomikajo vzdolž x-osi v ravni smeri in na izhodnih sponkah ni zaznati razlike napetosti. V primeru prisotnosti zunanjega magnetnega polja, ki je pravokotno na smer gibanja elektronov le-ti občutijo t.i. Lorenz-ovo silo, ki povroča ukrivljanje smeri tako, da se na eni strani nabirajo elektroni, na drugi pa vrzeli in tako je možno izmeriti napetost V_H , kot razliko v potencialu med obema robovi elementa. [?]

Napetost V_H je premo sorazmerna produktu toka skozi element in gostoto magnetnega pretoka.

Hall sensorje odlikuje jih velika robustnost, hitra odzivnost ter nizka cena zato imajo veliko uporabo v industrijski elektroniki, kot na primer tokovni merilniki, senzorji prisotnosti,...itd v brezkrtačnih enosmernih motorjih se jih uporablja kot absolutne dajalnike pozicije rotorja, v absolutnih dajalnikih pozicije pa kot dekodirniki števca obratov. V nadaljevanju se bomo osredotočili le na uporabo senzorjev kjer nas analogna vrednost gostote magnetnega pretoka ne zanima, pač pa samo pristonost le-tega. V ta namen je potrebno preoblikovati izhodno napetost V_H v digitalen signal. Na sliki ?? je prikazana zgradba senzorja z digitalnim izhodom vklopljeno/izklopljeno. Diferencialna napetost hall-ovega elementa je naprej ojačana z uporabo operacijskega ojačevalnika in nato preoblikovana v di-

gitalen izhod s pomočjo schmitt triggerja, ki poskrbi za ustrezno histerezo med obema stanji izhoda. Glede na delovno področje histereze sta možna dva tipa: unipolarni in bipolarni. Unipolarni tip je namenjen za senzorje za zaznavo prisotnosti magnetnega pretoka, bipolarni pa je namenjen zaznavi prehoda magnetnih polov in je zato primeren kot sestavni del dajalnika pozicije. Resolver imenujemo v žargonu tudi rotirajoči transformator, je zelo robusten in cenovno zelo ugoden način merjenja kotne pozicije in hitrosti, . V primerjavi z ostalimi dajalniki pozicije ima resolver določene prednosti kot so: zmožnost delovanja v izjemno težkih okoljskih pogojih, kot so prah, vlaga in visoka temperatura so izjemno mehansko odporni na udarce in pospeške delujejo tudi pri zelo visoki vrtilni hitrosti brez izgube natančnosti

Zaradi teh odličnih lastnosti ima veliko uporabo v vojaški in vesoljski tehniki ter v industrijskih servo pogonih kot absolutni dajalnik pozicije rotorja motorja. Seveda imajo tudi slabe lastnosti kot so: slabša natančnost primerljiva z optičnimi enkoderji, potrebuje zelo hiter AD pretvornik in zmogljiv procesor, ki pretvori analogno obliko signala v digitalno obliko pozicije in hitrosti. Na sliki ?? je prikazana osnovna zgradba resolverja. Na statorju se nahajajo vzbujalno navitje ter dve navitji iz katerih dobimo povratni signal \sin in \cos . Skozi primarno navitje transformatorja je pritisnjena sinusna vzbujalna napetost, katera inducira tok v sekundarnem (rotorskem) tokokrogu, ki je v fazi s primarnim tokom in nedovisen od položaja rotorja in teče skozi drugo navitje rotorja, ki ima izražene pole. Rotorski tok, inducira napetost v statorskih navitjih \sin in \cos , ki sta geometrično zamaknjeni za 90 stopinj. Zaradi izraženosti polov rotorja in geometrične postavitve $\sin \cos$ navitij, so napetosti odvisni od položaja rotorja. Običajna vrednost amplitude vzbujalne napetosti U_{vzb} je $1V_{pp}$, frekvenca pa se giblje nekje med 1-10kHz.

V enačbah ?? sta prikazana odvisnost napetosti med \sin in \cos navitjema ter vzbujalno napetostjo resolverja, na sliki ?? pa tudi njihov potek. Konstanta K je sklopni faktor, odvisen je od velikosti reže ter razmerja ovojev med primarjem in sekundarjem. Ta podatek je pomemben pri izbiri resolverja z že podanim AD

pretvornikom, saj le-ti imajo merilno območje prilagojeno prav na sklopni faktor K . Iz enačbe ?? je razvidno, da padec napetosti zaradi ohmske upornosti, kot tudi različen sklopni faktor nimajo nikakršnega vpliva na točnost meritve vse dokler je povraten signal v merilnem območju AD pretvornika, to dosežemo z izborom resolverja, kateri ima ustrezen sklopni faktor.

Kot rotorja Θ se lahko izračuna na preprost način, kot prikazano v enačbi ??, ta metoda je najbolj natančna, če se vzorci signala zajemajo v točki maksimalne napetosti. Poleg rotorskega kota je zaželeno, da nam dajalnik podaja tudi hitrost, zato so se razvile različne metode, ki so bolj natančne in izračunajo tudi hitrost. Novejša metoda v uporabi se imenuje sledenje opazovanega kota (*angl. Angle Tracking Observer*). Blokovna shema metode prikazana na sliki ??, temelji na zaprtozančnem sistemu, pri čemer primerjamo signala resolverja u_{sin} in u_{cos} z njihovima približkoma. Podobno kot pri vskem zaprtozančnem sistemu je smisel čimbolj zmanjšati statični pogrešek. Pogrešek opazovanega kota je razlika med pravim kotom Θ in približkom $\hat{\Theta}$ [?]. Za izračun pogreška z danima signalima u_{sin} in u_{cos} se poslužujemo svojstva trigonometrične funkcije $\sin(\Theta - \hat{\Theta}) = \sin \Theta \cos \hat{\Theta} - \cos \Theta \sin \hat{\Theta}$ in njena realizacija se na sliki ?? vidi kot vhodni signal v ojačevalnik K_1 . Sedaj bi lahko sledil logičen sklep, da je potrebno izračunati še inverzno trigonometrično funkcijo arcsin, če želimo dobiti razliko $\Theta - \hat{\Theta}$. Ponovno izrabimo svojstvo trigonometrične funkcije in zapišemo, da za majhne odmike velja $\sin(\Theta - \hat{\Theta}) \approx \Theta - \hat{\Theta}$. Sistem sledenja sestoji iz integratorja in PI regulatorja, prenosna funkcija zaprte zanke je prikazana v enačbi ??, nadalje pa se za lažjo predstavo prenosno funkcijo opiše kot člen drugega reda, pri čemer je ω_n lastna frekvenca, ξ pa faktor dušenja [?]. Ustrezna izbira parametrov omogoča odziv na enotino stopnico tako, da ima izhodni signal čim hitrejši odziv s čim manjšim prenihajem.

Optični inkrementalni dajalnik je najbolj pogosto uporabljen pozicijski dajalnik v elektromotornih pogonih. Njegove dobre lastnosti so natančnost in relativno nizek strošek izdelave, kot slabosti pa štejemo: občutljivost na mehanske poškodbe, omejena življenska doba zaradi slabljenja občutljivosti foto detektor-

jev, omejena vrtilna hitrost delovanja zaradi omejene preklopne frekvence foto detektorjev. Na sliki ?? je prikazana poenostavljena zgradba inkrementalnega dajalnika: izvor svetlobe, disk z optično rešetko iz naparjene kovine, uklonska mrežica in foto detektorji. Svetlobni tok pronica skozi rotorsko rešetko in uklonsko mrežico do foto detektorjev A in B proge, ki sta zamaknjena za 90° glede na modulirano svetlobo, le-ta nastane zaradi uklona svetlobe pri prehodu skozi dve rešetki, kateri imata različen raster. Ta pojav se imenuje Moire-jev vzorec in na sliki ?? [?] je prikazan pomik rotorskega diska za en razdelek glede na statorsko ploščo, kjer se lepo vidi zatemnjene in osveltjene dele. Z uporabo uklonske mrežice je možno ustvariti ustrezno velika področja zatemnitve, da jih lahko foto detektor zazna, navkljub svoji večji fizični velikosti od samega rasterja rotorske plošče. Jakost svetlobe ima sinusno obliko v območju pomika za en razdelek (raster) in jo lahko pretvorimo v električni signal tako, da uporabimo za vsako progo dva fotodetektorja, ki sta zamaknjena za 180° , imenujemo jih A, \bar{A} ter B, \bar{B} . Njihove signale ojačamo z diferencialnim ojačevalnikom, kot prikazano na sliki ??, tako dobimo na izhodu diferencialnega ojačevalnika sinusni signal katerega nato preoblikujemo v pravokotne pulze, ki so primerne oblike za štetje z digitalnim števcem. Na sliki ?? so prikazani izhodni signali dveh prog in ponazoritev impulzov števca v pozitivno in negativno stran iz katerega tudi izhaja ime: inkrementalni dajalnik. Prikazani način štetja se v literaturi imenuje $4\times$, ker se v števec prišteva ob vsakem prehodu signala bodisi proge A ali B , zato je število pulzov na en obod enako štirikratniku števila črtic, ki jih ima rotorski disk. Primer rotorskega diska na sliki ?? ima 128 črtic, kar bi nanese 512 pulzov števca na en obrat. Pridobljena pozicija je tako relativen pomik od referenčne točke, ki jo je ob vsakem ponovnem zagonu potrebno znova določiti, saj inkrementalni dajalnik nam ne daje absolutne pozicije.

Pri pozicioniranju elektromotornih pogonov je poleg pozicije, pomembna tudi informacija o hitrosti. Ker je inkrementalni dajalnik po svoji zasnovi merilnik položaja se lahko hitrost meri posredno iz spremembe položaja v merilnem intervalu kot meritev periode pulzov ali kot meritev frekvence pulzov inkrementalnega

dajalnika. Na sliki ?? je prikazana metoda merjenja frekvence. Pulzi iz števca pozicije se merijo v fiksnih intervalih T_{vz} , le-ta je določen glede na periodo vzorčenja regulacijske zanke (gl. poglavje xx). Iz prikaza je razvidno, da pri nizki frekvenci pulzov postane metoda nenatančna, kot vidimo je število preštetih pulzov N_f pri isti vhodni frekvenci v zaporednih merilnih intervalih različno: 2, 2, 3, 2. Enačba ?? opisuje preračunano hitrost Ω_f [?], pri čemer je faktor 4 v enačbi posledica štetja vhodnih pulzov po metodi $4\times$ opisani na sliki ?. Relativni pogrešek e_f [?] metode je odvisen od dolžine periode merjenega signala T_p . Pri večanju periode vhodnega signala postaja pogrešek čedalje večji, kar pomeni da lahko to metodo uporabimo le pri visoki frekvenci vhodnih pulzov.

Naslednja metoda, katera je primerna za merjenje hitrosti meri čas periode vhodnih pulzov namesto frekvence, zato je primerna za merjenje pri nizkih hitrostih. Med dvema zaporednima pulzoma merjenega signala štejemo pulze urinega takta. Izbrana frekvenca urinih pulzov je najvišja možna glede na dane zmožnosti elektronske merilne enote, saj se relativni pogrešek e_T manjša ob večanju frekvence urinega takta. Enačba ?? opisuje izračun hitrosti Ω_T glede na število preštetih pulzov N_T ter periode urinih pulzov T_{ure} .

Ker metodi merjenja frekvence ali periode same po sebi ne zagotavljata točnost meritve na širokem obsegu hitrosti, je smiselno združiti obe v kombinacijo le-teh. Kot prikazano na diagramih poteka, bi lahko za posamezne metode uporabili zgolj logična vrata, nekaj bistabilnih multivibratorjev in urin takt z zelo visoko frekvenco. Vsi ti elementi se lahko sprogramirajo v logično enoto z uporabo FPGA logike, ki meri hitrost po obeh metodah in preklaplja rezultat glede na relativni pogrešek obeh. Če pogledamo enačbi ?? un ?? nam je takoj jasno, da je za izbiro ugodnejše metode dovolj primerjava preštetih pulzov N_f in N_T . Sin/Cos dajalnik se v sami zgradbi ne razlikuje on inkrementalnega, razlika je le v izhodnem signalu dajalnika. Kot smo spoznali, daje inkrementalni dajalnik provokotne pulze, ki so bili predhodno preoblikovani iz sinusne napetosti, ki jo daje diferencialni ojačevalnik prikazan na sliki ?. Sin/Cos dajalnik posreduje izhoden signal, ki je ravno takšne sinusne oblike z amplitudo $1V_{pp}$ za progo A

in B , ki sta medseboj zamaknjeni za 90° , se pravi sinus in kosinus, od tod ime Sin/Cos. Ta dva signala peljemo do vhoda merilne enote pozicije (slika ??, [?]), kjer se razdelita na dva dela. V prvem delu se signala preoblikujeta v pravokotne pulze in preštevajo po že omenjenih metodah. Drugi del sestoji iz računalja, ki preračunava vmesni kot med dvema črticama na rotorskem disku in na tak način z interpolacijo vrine še dodatne vmesne točke pozicije. Metoda izračuna kota se v bistvu ne razlikuje od že opisane metode *Angle Tracking Observer*. Prednosti Sin/Cos dajalnika je v tem, da je možno izračunati že zelo majhno hitrost in obenem je tak dajalnik uporaben tudi za visoke vrtilne hitrosti, saj potrebuje manjše število črtic na disku v primerjavi z inkrementalnim dajalnikom za isto resolucijo, kar posledično pomeni nižjo frekvenco preklapljanja fotodetektorjev, katera je omejena z vidika tehnoloških zmožnosti fotodetektorja. Tak tip dajalnika srečamo na CNC strojih za obdelavo kovine, kjer je zahtevana največja natančnost.

Absolutni optični dajalnik se razlikuje od inkrementalnega po tem da ima več prog in nam podaja absolutno pozicijo za en obrat rotorja. Za 2^N pozicij je potrebnih N prog, katere so razvrščene po Gray-evi kodi. Gray koda je oblika binarnega zapisa, kjer se dve sosednji vrednosti razlikujeta le za en bit. Zasnovana oblika kodiranja je nastala kot ustrezen rešitev problema lažnih prekloev med stanji binarne kode. V binarni kodi namreč, bi se morala stanja vseh elektromehanskih preklopnikov spremeniti sinhrono ob vsakem novem stanju, to pa seveda v praksi ni mogoče. Iz tabele ?? je ravnidna razlika med binarno in Gray-ovo kodo in sicer vsako novo stanje se v Gray kodi razlikuje od prejšnjega samo v enem bitu, puščice ponazarjajo redosled prehodov med stanji, ki ima lahko tudi obratno smer v primeru vrtenja dajalnika nazaj. Na sliki ?? je prikaz oblike vzorca rotorske plošče absolutnega dajalnika. Absolutne dajalnike v kombinaciji z večobratnim števcem (gl. naslednje podpoglavje) se uporablja v strojih pri katerih je zaželeno imeti znano pozicijo tudi v primeru izpada električne energije in povsod tam, kjer bi začetno iskanje referenčne točke povročalo težave. Primer takšnih strojev so dvigala, avtomatizirana regalna skladišča, proizvodna linija polizdelkov,...itd. Do

sedaj opisana absolutna dajalnika resolver in optični lahko podajata absolutno pozicijo le v območje enega obrata rotorja, vendar je to v praksi premajhno uporabno območje, zato se jim doda še večobratni števec. To je mehanska naprava, podobna števcu za porabo vode s to razliko, da je kodirana v Grey kodi in ima namesto cifer Hall senzorje za odčitavanje magnetnih prog, ki so nanešene na zobnikih. Na sliki ?? je prikazana praktična izvedba takšnega števca, ki skupaj z absolutnim dajalnikom tvorita t.i. večobratni absolutni dajalnik. V podatkih proizvajalca [?] se nahaja ločen podatek o tem kolikšna je resolucija na en obrat (npr. 10-bit = 512 razdelkov/obrat) ter kolikšen je obseg obratov (npr. 12-bit = 4096 obratov).

Električni stroji so naprave s katerimi pretvarjamo energijo s posredovanjem magnetnega polja. To so elektromagnetne naprave, ki pretvarjajo električno energijo v mehansko energijo, mehansko energijo v električno energijo in električno energijo ene oblike v električno energijo druge oblike. Po svojem namenu uporabe so to električni motorji, električni generatorji in transformatorji [?] V nadaljevanju se bomo osredotočili le na električne stroje, ki imajo zmožnost pretvarjanja električne energije v mehansko in obratno ter so sklopljeni z mehanskim sistemom, z drugim imenom jih imenujemo elektromotorni pogoni.

Na sliki ?? je prikazan sklop elektromotornega pogona. Sestoji se iz električnega stroja in mehanskega sistema, ki sta medseboj povezana in med njima delujejo navori, ki so v ravnovesju kot to opisuje ravnovesna enačba (??). Navorna ravnovesna enačba popisuje ravnotežje navorov, ki delujejo na gredi stroja in vplivajo na vrtenje rotorja. Poleg elektromagnetnega navora M delujejo na gred še drugi navori, ki izvirajo iz mehanike samega stroja. Ob tem pa še navori, ki izvirajo iz zunanjih naprav priključenih na gred. Vsi ti navori morajo biti na gredi vsak trenutek obratovanja v ravnotežju. Posamezne oznake pomenijo: Ω je trenutna kotna hitrost vrtenja gredi in rotorja; M je pogonski navor stroja; M_L je zunanji bremenski navor, ki zavira vrtenje gredi pri motorskem delovanju, negativna vrednost M_L pomeni navor, ki poganja rotor v smeri vrtenja v gene-

ratorskem delovanju; $J\alpha$ je navor, ki izvira iz vztrajnostnega momenta J vseh vrtečih se mas in skuša preprečiti vsako spremembo hitrosti Ω ; $F\Omega$ je navor viskoznega trenja, ki deluje vedno zaviralno ter ga je pogosto treba upoštevati pri obravnavi visoko dinamičnih pogonov [?].

Električni stroj žene breme, ki ima svoj vztrajnostni moment in deluje z določeno nazivno hitrostjo, zato je potrebno prilagoditi hitrost motorja bremenu. Na splošno uprabljeni elementi strojništva za ta namene so planetni reduktorji, zobniški prenosi, jermenice,...itd. Za optimalno delovanje celotnega sklopa je priporočljivo, da je preslikan bremenski vztrajnostni moment enak vztrajnostnemu momentu rotorja motorja. Le tako se lahko doseže najboljši odziv regulacijskega kroga. Na sliki ?? je prikazan princip mehanskega reduktorja s prestavnim razmerjem p . Izhodna hitrost iz reduktorja je tako: $\Omega_L = \frac{\Omega_R}{p}$, navor pa $M_L = M \cdot p$. Skoraj najpomembnejši podatek pa je preslikan vztrajnostni moment na vhodno stran reduktorja: $J'_L = \frac{J_L}{p^2}$, ki skupaj z vztrajnostnim momentom rotorja predstavlja vztrajnostni moment sistema: $J_S = J_R + J'_L$. Pomembna lastnost sklopa je ta, da izhodna hitrost upada sorazmerno s prestavnim razmerjem, preslikan vztrajnostni moment pa kvadratično, kar je zelo ugodno pri izbiri ustreznega prestavnega razmerja in tipa motorja.

Najprej je potrebno določiti vztrajnostni moment bremena ter hitrosti pomikov, nato se iz proizvajalčevega kataloga servo motorjev izbere določen nabor motorjev s podatki o vztrajnostnem momentu motorja in nominalno hitrostjo. Naparavi se tabela izračunov preslikave vztrajnostnega momenta bremena v odvisnosti od prestavnega razmerja in nato primerja z vztrajnostnim momentom rotorja in tako izbere ustrezen tip motorja. Proizvajalci imajo običajno nabor sinhronskih servo motorjev z različnimi vztrajnostnimi momenti pri skoraj enaki izhodni moči motorja. Imenovani so angl. high inertia, standard, high dynamics; to so motorji z velikim, standardnim ali majhnim vztrajnostnim momentom. Za izjemno dinamične sisteme pa obstajajo še prisilno hlajeni servo motorji, zračno ali vodno. Standardni motorji so konvekcijsko hlajeni, večje kot nazivne moči,

so tudi motorji večjih dimenzij in s tem imajo tudi večji vztrajnostni moment. Posebna oblika visoko dinamičnih motorjev je ta, da se za večjo moč motorja ne uporabi večanje dimenzij ampak tokovno obremenitev in zato postane potreba po prisilnem hlajenju. Motorji z naječjo dinamiko so tako vodno hlajeni, kar pomeni zajeten strošek saj potrebuje zraven še hladilni sistem.

Pri sami obliki montaže motorja na reduktor je potrebno še posebna pozornost, namreč spojka katera objema rotorsko gred ima lahko velik vztrajnostni moment v primerjavi z rotorjem, tu gre seveda za motorje z visoko dinamiko. Pri izbiri motorja z visoko dinamiko, prav vsi dodatki kot so dajalnik pozicije in elektromehanska zavora, znatno prispevajo h končnem vztrajnostnem momentu sistema, saj ostale vrteče se mase na izhodu reduktorja nimajo takšen velik vpliv.

V primeru, da poznamo osnovno matematično relacijo med vhomom in izhodom nekega sistema, bi lahko vnaprej določili vrednost vzbujanja, katerega bi vnesli v sistem, da bi dobili želeno izhodno vrednost iz sistema. Tak način vodenja imenujemo krmiljenje (slika ??), njegova značilnost je ta, da nima povratne zanke.

Slabost krmiljenja je občutljivost na zunanje vplive zaradi katerih pride do odstopanja med želeno in dejansko vrednostjo krmiljene količine. Kot ustrezna rešitev problema so se pojavili regulirani sistemi, kjer merimo izhodno količino in jo nato primerjamo z želeno vrednostjo, tako dobimo pogrešek ε . Regulator nato nastavlja vhodno količino sistema in s tem poskrbi, da je pogrešek čim manjši oz. da se ta celo popolnoma odpravi [?].

Regulirani sistemi (slika ??) imajo sklenjeno povratno zanko, zato te imenujemo tudi zaprtozačne sisteme, krmiljene sistema pa odprtozačne. Ker noben fizikalen sistem ne deluje neskončno hitro, tudi od regulatorja ne moremo pričakovati, da bo trenutno opdravil spremembo, za to je potreben nek regulacijski čas. Regulacije delimo na linearne in nelinearne, odvisno od členov, ki nastopajo v regulacijskem krogu. V linearnih regulacijah nastopajo le linearni

členi. Če v regulacijskem krogu nastopa le en nelinearen člen, je regulacija nelinearna. Realen sistem je skoraj vedno nelinearen, večinoma je njegova statična karakteristika nelinearna, zato se ga linearizira v točki delovanja in se smatra, da je za majhne odmike sistem linearen in se ga opiše z diferencialnimi enačbami za dano dolovno točko [?].

Teorija regulacij ukvarja predvsem s prehodnimi pojavi, se pravi s frekvenčno analizo, kjer so statične karakteristike sistema izvzete. Tukaj pride do pogostega napačnega razumevanja delovanja regulatorjev, ker se pozablja dejstvo, da gre za linearizacijo sistema v določeni delovni točki, ki jo praviloma prištejemo izhodni veličini regulatorja, vendar je v literaturi teorij regulacij ta člen izpuščen, ker je statičen. Na splošno se lahko dva področja združita, krmiljenje in regulacije tako, da se izhodni veličini regulatorja prišteje krmilno vejo, na primer posneto karakteristiko statičnega modela (slika ??), to se imenuje kombiniran sistem. Ker se krmilna veja ne nahaja v zaključeni zanki regulacijskega kroga, nima vpliva na stabilnost samega regulacijskega kroga.

Najpreprostejši regulator je proporcionalni (P) regulator, kjer je izhod regulatorja enak ojačanemu pogrešku $u(t) = K_p \varepsilon(t)$. Tak regulator srečamo povsod tam kjer je zaželen preprostost delovanja, na primer pri ogrevalni tehniki. Naslednji zelo razširjen regulator je proporcionalno integralni (PI) regulator, ki ima dodan integralni člen, le-ta poskrbi za odpravo statičnega pogreška, ki se pojavi pri proporcionalnem regulatorju v primeru, da sistem nima izražene integracije. Enačba, ki opisuje izhod proporcionalno integralnega regulatorja je: $u(t) = K_p (\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon(t) dt)$ ali pa v Laplace-ovim prostoru kot prenosna funkcija: $\frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = R(s) = K_p(1 + \frac{1}{sT_i})$. Najbolj razširjen tip regulatorja je proporcionalno integralni derivativni (PID), ki ga srečamo v industriji kot univerzallen tip regulatorja. Z uporabo diferencialnega člena je njegov odziv hitrejši, saj se odzove na časovno spremembo pogreška. Približno na enak način človek lovi ravnotežje, že pričetek nagibanja vzbudi reakcijo in popravek drže telesa še preden se sploh pojavi večji nagib.

Slabost splošnega PID regulatorja po enačbi ?? je ta, da je odziv diferencialnega člena premo sorazmeren časovni spremembi vhodnega signala ε , ne pa tudi amplitudi signala kar pomeni, da tudi zelo šibek hitro se spreminjajoč signal kot na primer šum, sproži velik odziv na izhodu. Ta pojav je seveda zelo nezaželen in zato se uporablja drugačna izvedba PID regulatorja, ki ima pred diferencialnim členom, člen prvega reda, kateri izloči visoke frekvence (enačba ??).

Najpogostejše je časovna konstanta člena prvega reda T_d' izražena iz same časovne konstante diferencialnega člena T_d kot faktor γ . Z velikim γ faktorju se učinek filtra zmanjšuje in je čedalje bolj podoben diferencialnemu členu brez filtra, pri zelo majhnem γ faktorju pa se zmanjšuje učinek diferencialnega člena do te meje, da izgubi svoj pomen. Po priporočilih za optimalno delovanje, naj bi ta faktor znašal približno 10 [?].

Na sliki ?? je prikazana enostavna regulacija pozicije. Celoten regulacijski krog ima le en regulator: želena vrednost je kot rotorja Θ^* , izhodna vrednost je želena napetost motorja u_q^* ter merjena vrednost je dejanski kot rotorja Θ . Takšen regulacijski krog bi deloval zelo počasi.

Rešitev je niz regulacijskih krogov, ki jo imenujemo kaskadna regulacija. Značilno za to vrsto regulacije je, da nastopata po dva ali več regulatorjev, pri čemer se njuna regulacijska kroga ne prepletata, temveč zajema zunanja povratna zveza vedno celotni notranji regulacijski krog [?]. Zunanje regulacijske kroge imenujemo počasne nadrejene, notranje pa hitre podrejene. Vsak nadrejeni krog je v bistvu dajalnik želene vrednosti podrejenemu. Za kaskadno regulacije se je potrebno vedno odločiti takoj, ko obstaja ena ali več vmesnih merjenih veličin procesa.

Na sliki ?? je prikazana kaskadna izvedba regulacije pozicije. Razdeljena je na tri regulacijske kroge: pozicijska, hitrostna in tokovna zanka. Zunanja, najpočasnejša je pozicijska zanka, katera podaja želeno vrednost hitrostni zanki, le-ta pa podaja

želeno vrednost tokovni, ki je najhitrejša. Prehod iz enostavnega regulacijskega kroga iz slike ?? je bil možen z uvedbo novih vmesnih merjenih vrednosti procesa, to sta hitrost Ω ter tok i_q .

Vodena regulacija je posebna oblika kombinirane regulacije, kjer v regulacijski krog vnašamo krmilno veličino. Na sliki ?? sta prikazani dve vhodni vrednosti: Θ^* je zelena pozicija, Ω^* pa zelena hitrost. Ti dve vrednosti bi lahko bile podane od generatorja trajektorije ali pa recimo od nekega nadrejenga pogona, ki se mu želi slediti. Navsezadnje, se lahko želena vrednost hitrosti Ω^* izrazi tudi z odvajanjem pozicije po času $\Omega^* = \frac{d\Theta^*}{dt}$. Krmilna veja na grobo podaja že vnaprej znano velikost hitrosti in toka, slednjega se preračuna z znano vztrajnostnim momentom sistema J , regulacijski krog pa skrbi, da se odpravijo morebitne netočnosti pri krmiljenju in prevzame tako vlogo korektorja. V primeru, da so parametri krmilne veje točni, bi sistem brez zunanjih vplivov točno sledil krmilni željeni vrednosti, kar pomeni da regulacijski krog nebi bil potreben. Ravno v tem nastopi težava, saj sprememba obeh zelenih vrednosti nastopita hkrati kar pomeni, da se pogrešek ε_Θ pojavi takoj, še preden pride do odziva sistema zaradi vpliva krmilne vrednosti, četudi bi se po reakcijskem času sistema pogrešek popolnoma izničil. Rešitev težave je postavitve kasnilnega člana pred posamezen regulacijski krog, v ta namen so običajno uporabljeni členi prvega reda, ki kasnijo odziv posameznega regulatorja. Tako se počaka odziv sistema zaradi krmilne vrednosti in šele nato ukrepa ob morebitni razliki med želeno in dejansko vrednostjo.

Ravno tako kot pri kombinirani regulaciji, tudi tukaj krmilna veja nima vpliva na stabilnost regulacijskega kroga, ker nima povratne zanke.

V praksi so danajšnji regulatorji skoraj izključno digitalni. Digitalni regulator je v osnovi nezvezen regulator, ker deluje v diskretnem času, medtem pa je reguliran sistem zvezen, ker se nahaja v zveznem prostoru. To pomeni, da digitalen regulator preslika zvezni čas v diskretnega s pomočjo analogno digitalnega pretvornika (A/D), opravi zračun ter preslika diskretne vrednosti izhoda v zvezni čas s pomočjo digitalno analognega pretvornika (D/A). Zaradi poenostavitve izračuna izhodnega signala regulatorja $u(k)$ je zaželeno, da se

celoten proces izvaja v determinističnih časovnih intervalih, ki ga imenujemo čas vzorčenja T_s ali pa frekvenca vzorčenja f_s .

Višja kot je frekvenca vzorčenja, bolj je digitalni regulator podoben analognemu zveznemu regulatorju, vendar v praksi obstaja omejitev izbire časa vzorčenja. Zaradi končne ločljivosti števil s plavajočo vejico, bi bili zelo majhni prirastki, ki se prištevajo integralnemu členu, preprosto zaokroženi na nič, zato velja uporabiti čim višjo ločljivostjo števila plavajoče vejice (*Double*, *LREAL*). Prav tako nastane težava pri diferencialnem členu zaradi skokov merjene veličine oz. kvantizacije, kar povroča velike skoke na izhodu diferencialnega člena. Pri izbitri časa vzorčenja je priporočljivo uporabiti: $\omega_{krit}T_s < \pi/4$, pri čemer je ω_{krit} kritična krožna frekvenca sistema odprte zanke. V slučaju, da se od regulatorja pričakuje, da izniči vpliv motnje mora biti po Shannon-ovem teoremu čas vzorčenja $T_s \leq \frac{\pi}{\omega_{max}}$, kjer ω_{max} predstavlja navšjo možno krožno frekvenco motnje, ki jo regulator lahko odpravi. Preprosto priporočilo je tudi, da se za čas vzorčenja vzame $T_s = (\frac{1}{6} \div \frac{1}{15}) \cdot T_{95}$, kjer je T_{95} čas odziva sistema na skočno spremembo dokler ne doseže 95% končne ustaljene vrednosti [?].

Pri realizaciji PID regulatorja v mikrokrmilniškem sistemu, se večkrat pojavi težava pri ustrezni rešitvi nasičenja integratorja. Pri normalnem delovanju regulatorja je zaželeno, da nikoli ne presežemo meje izhodnega signala, saj vsaka limita pomeni vnos nelinearnosti v sistem in s tem tudi injiciranje visokih frekvenc, ki lahko v sistemu zbudijo osciliranje. Zaradi tega je zaželeno, da je prehod med stanjem nasičenosti nazaj v normalno delovanje čim ugodnejše. Za izračun izhoda regulatorja se ponavadi seštevajo posamezne komponente P, I in D, vendar je s takšnim pristopom težje napraviti ustrezno limito. Rekurziven izračun regulatorja se lahko napravi tako, da se izračuna parcialne prispevke in prišteje prejšnjemu stanju izhoda: $u(k) = \Delta u(k) + u(k-1)$, ta način se imenuje inkrementalni algoritem. Rekurziven izračun ?? je izvedba PID regulatorja iz enačbe ?? z uporabo trapezne metode za preračun integrala. Ker je izhod vsako iteracijo preračunan kot prirastek, se lahko začetna točka poljubno spreminja. V kolikor

se izhod postavi na mejno vrednost, se bo v naslednji iteraciji preračunala nova vrednost z novim prirastkom od postavljene mejne vrednosti. Na tak način je zagotovljeno, da integralni člen preneha integrirati v kolikor je izhod v zasičenem stanju. V dodatku B se nahaja koda PID regulatorja iz enačbe ?? z limito.

3 primeri latex

3.1 Podrobna navodila

3.1.1 Primer pisanja enačb

Formule in enačbe je potrebno očtevilčiti z zaporedno številko v oklepaju, npr. (1), in se tako nanje tudi sklicevati. V tekstu je potrebno pojasniti pomen posameznih parametrov. Primer:

Enačba (3.1) opisuje hitrost točke \mathbf{v} , ki se nahaja na telesu:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (3.1)$$

pri čemer \mathbf{v}_0 predstavlja hitrost izhodišča koordinatnega sistema, $\boldsymbol{\omega}$ kotno hitrost, \mathbf{r} pa vektor od izhodišča do točke.

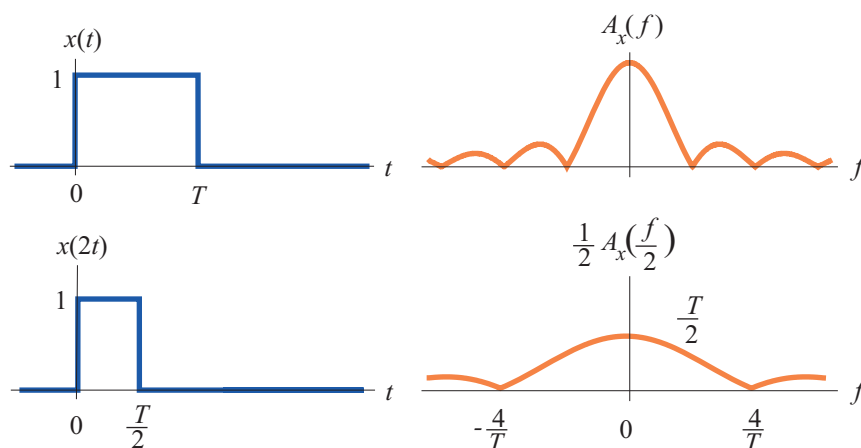
Enačbo (3.1) lahko zapičemo v sklopu enačb po komponentah kot:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + z \omega_y - y \omega_z \\ v_y &= v_{0y} + x \omega_z - z \omega_x \\ v_z &= v_{0z} + y \omega_x - x \omega_y \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.1.2 Slike

Slike ali fotografije morajo biti očtevilčene in citirane v besedilu ter podnaslovljene tako, da je razvidno, kaj predstavljajo. V besedilo so vstavljene približno

tam, kjer se nanje sklicujemo. Slike naj bodo pregledne in naj prikažejo le najpomembnejšo informacijo. Grafi potekov signalov na slikah morajo vsebovati imena osi, enote in legendo. Napisi na sliki morajo biti v slovenskem jeziku. Za več podrobnosti o vključevanju vektorskih in bitnih slik v okolju LaTeX, glej prilogo ??.



Slika 3.1: Primer vključitve slike

3.1.3 Tabele

Tabele morajo biti, podobno kot slike, oštevilčene in citirane v besedilu ter podnaslovljene tako, da je razvidno, kaj vsebujejo. V besedilo so vstavljene približno tam, kjer se nanje sklicujemo. Podatki v tabelah morajo biti poimenovani in navedeni z enotami v obliki, ki jo priporoča standard [?, ?].

Napisi morajo biti v slovenskem jeziku. Primer:

V tabeli 3.1 so navedene električne prebojne trdnosti različnih izolantov in priključne napetosti.

Izolant (pri 20°C)	E_p / (V/m)	U / V
zrak	3	30
trd papir	10	40
trda guma	10	36
transformatorsko olje	15	34.5
porcelan	20	45
polivinilklorid (PVC)	50	70
polistirol	80	45

Tabela 3.1: Prebojne trdnosti izolantov in priključne napetosti

3.1.4 Programska koda

Manjši deli programske kode so lahko navedeni in opisani v tekstu. Oblika teksta programske kode se loči od oblike ostalega teksta. Primer:

Funkcija, ki omogoča prenos podatkov, je naslednja:

```
void I2C_Transfer(unsigned Addr,unsigned Data) {
    I2CAddress = Addr;
    I2CData = Data;

    I2CONCLR = 0x000000FF; // Izbris I2C nastavitev
    I2CONSET = 0x00000040; // Vklop I2C prenosa
    I2CONSET = 0x00000020; // Start signal
}
```


4 Zaključek

- 1.
- 2.

Dodatek

A Urejanje dokumentov z orodjem LaTeX

Postopek dela:

Korak 1 Avtor kreira tekstovno datoteko s končnico *.tex*, ki vsebuje tekst in ukaze za oblikovanje teksta (glej osnovno obliko predloge v B). Dober uvod v delo z ukazi LaTeX so spletna navodila [?]. Za pisanje je lahko uporabljen katerikoli tekstovni urejevalnik. Priporočamo uporabo urejevalnikov WinEdt¹ ali TexStudio², ki sta namenski orodji z integriranimi ikonami za posamezne korake. Urejevalnika vsebujeta tudi slovar slovenskih besed³ za sprotno preverjanje in deljenje besed.

Korak 2 Prevajanje izvirne datoteke s prevajalnikom MikTeX. Močnost direktnega prevajanja v PDF dokument (ikonca PDFLaTeX), ali pa v EPS dokument (ikonca LaTeX - deluje brez vključenih bitnih slik). Pri prevajanju v EPS dokument se najprej ustvari datoteka s končnico *.dvi* (ang. Device Independent file), ki omogoča ogled dokumenta (ikona DVI Preview). Pri prvem prevajanju se ustvari tudi lista citatov in sklicevanj (datoteka *.aux*).

Korak 2.1 ⁴ Zagon BibTeX prevajanja (ikonca Bib), ki na osnovi *.aux* datoteke in podatkov iz baze referenc, ustvari oblikovan spisec referenc (datoteka *.bbl*) glede na izbran stil citiranja (datoteka *.bst*).

¹Dosegljivo na <http://www.winedt.org>

²Dosegljivo na <http://texstudio.sourceforge.net/>

³Dosegljivo na <http://www.winedt.org/Dict>

⁴Potrebno samo pri navajanju virov s pomočjo orodja BibTeX

Korak 2.2 ⁵ Ponovno prevajanje s prevajalnikom MikTeX, ki v glavni dokument vključi oblikovane reference iz datoteke *.bbl*.

Korak 3 Ponovno prevajanje s prevajalnikom MikTeX, ki poveča spisek referenc z navedki v tekstu.

Korak 4a Pretvorba oblikovanega dokumenta v *PostScript* format in nato izvoz v obliki PDF dokumenta:

- ikona DVI-PS - pretvorba v datoteko *.ps*
- Ogled *PostScript* datoteke s programom *GhostView*
- Pretvorba v PDF dokument: GhostView: File/Convert/pdfwrite, pri čemer je potrebno izbrati parametre za format PDF/A glede na spletna navodila⁶.

V tem primeru morajo biti vse vključene slike v formatu *PostScript*. V tem načinu je močna tudi uporaba orodja *PSfrag*, ki omogoča zamenjavo tekstovnih elementov na originalni sliki s poljubnim tekstom ali enačbo.

Korak 4b Pretvorba oblikovanega dokumenta neposredno v PDF format. Ikona PDFTexify. V tem primeru so vključene slike lahko le v formatu PDF, PNG, JPEG ali GIF.

Pretvorba iz formata PDF v format PDF/A, ki je zahtevan za oddajo v Repozitorij UL, je močna z uporabo spletnega prevajalnika⁷, programa Adobe Professional (plačljiva rečitev) ali programa PDFCreator⁸ (zastonjska rečitev). Program PDFCreator z nastavitvami⁹ omogoča tiskanje v format PDF/A, saj se namesti kot tiskalnik.

⁵Potrebno samo pri navajanju virov s pomočjo orodja BibTeX

⁶<http://svn.ghostscript.com/ghostscript/trunk/gs/doc/Ps2pdf.htm#PDFA>

⁷<http://convert.neevia.com>

⁸<http://www.pdfforge.org/pdfcreator>

⁹<http://www.jud.ct.gov/external/super/e-services/efile/How-to-Save-or-Convert-to-PDFA.htm>

B Primer kode PID regulatorja

```
double Ts, gamma, u_min, u_max;
double Kpu, Tu, Kp, Ti, Td, Tf, cf, ci, cd;
double q0, q1, q2, p1, p2;

//parametri, ki se preračunajo ob inicializaciji
Tf = Td/gamma;
cf = Tf/Ts;
ci = Ts/Ti;
cd = Td/Ts;
p1 = -4*cf/(1+2*cf);
p2 = (2*cf-1)/(1+2*cf);
q0 = Kp * (1 + 2*(cf+cd) + (ci/2)*(1+2*cf))/(1+2*cf);
q1 = Kp * (ci/2-4*(cf+cd))/(1+2*cf);
q2 = Kp * (cf*(2-ci) + 2*cd + ci/2 - 1)/(1+2*cf);

// PID algoritem preračunan ob vsaki prekinitvi
ek2 = ek1;
ek1 = ek;
ek = input;
uk2 = uk1;
uk1 = u;

u = q0*ek + q1*ek1 + q2*ek2 - p1*uk1 - p2*uk2;
//limita
```

```
if    u>u_max u = u_max;  
elseif u<u_min u= u_min;  
  
output=u;
```