PREDGOVOR

Ovaj udžbenik je nastao kao rezultat dugogodišnje saradnje njegovih autora u oblasti savremenih digitalno regulisanih elektromotornih pogona. Osnovu udžbenika čine predavanja koja autori drže studentima Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu i Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci, na više predmeta osnovnih (prvi ciklus) i master (drugi ciklus) studija, a on je nadograđen i pojedinim rezultatima zajedničkog naučno-istraživačkog rada autora.

Udžbenik je prvenstveno namenjen studentima koji se po prvi put susreću sa problematikom digitalno regulisanih elektromotornih pogona, a za praćenje izlaganja neophodna su elementarna znanja iz osnova rada električnih mašina i pogona, mehanike, kontinualnih i digitalnih sistema automatskog upravljanja, energetske elektronike, kao i mikroprocesorskog upravljanja pretvaračima.

Savremeni digitalni regulisani elektromotorni pogoni su veoma široka i multidisciplinarna oblast. U dugom periodu razvoja i primene, prelomne tačke su predstavljali iskoraci u razvoju pojedinih tehnologija i teorijskih pristupa (energetske elektronike, analize dinamičkih sistema, primene mikroprocesora itd). Međutim, osnova svakog regulisanog pogona je ostala ista, a to je da se električnim motorom upravlja tako da on postane linearni konvertor momenta, na koju se nadograđuju odgovarajuće strukture za regulaciju brzine i položaja. Upravo zbog toga je ovaj udžbenik koncipiran tako da se prvo predstave svi ključni aspekti regulisanog elektromotornog pogona sa motorom kao linearnim pojačavačem momenta, pa da se nakon toga obrade konkretni digitalno regulisani elektromotorni pogoni sa motorom jednosmerne struje, asinhronim i sinhronim motorom.

U prvoj glavi je dat opširan uvod u oblast regulisanih elektromotornih pogona. Prvo je dat pregled osnovnih pojmova iz elektromotornih pogona i digitalno regulisanih pogona, te rekapitulacija gradiva iz električnih mašina, sistema automatskog upravljanja, energetske elektronike i mikroprocesorskog upravljanja pretvaračima. Obrađeni su: princip rada pogona, mehaničke karakteristike motora i opterećenja, linearni regulatori u kontinualnom domenu, potrebne regulacione strukture i osnove kontrole kretanja, kao i izbor elemenata pogona. Nakon toga, obrađena je materija koja se bavi modernim digitalno regulisanim pogonima: diskretizacija regulacionih struktura, linearni regulatori u diskretnom domenu pogodni za primenu u pogonima i, sinteza parametara diskretnih linearnih regulatora. Na kraju, obrađen je hardverski deo digitalnog pogona: osnovne topologije pretvarača, merna i prilagodna kola, te mikrokontrolerski sistem namenjen za upravljanju pogonom. Ovde je posebna pažnja posvećena specijalizovanim periferijama mikrokontrolera namenjenog za upravljanje pogonima (A/D konvertoru, brojačkom sistemu i PWM jedinici kojom se generišu upravljački PWM signali ka pretvaraču). Cilj uvodnog dela je da se zaokruže opšta i osnovna znanja o digitalno regulisanim elektromotornim pogonima, zajednička za sve vrste pogona.

U drugoj glavi obrađeni su pogoni sa motorom jednosmerne struje. Prvo su prikazani osnovni elementi konstrukcije i objašnjen princip rada, a zatim su izvedene njegove statičke karakteristike i način upravljanja sa opisom kretanja radne tačke. Nakon toga su obrađeni dinamički model i načini digitalne regulacije brzine i položaja, koji su ilustrovano detaljnim računarskim simulacijama. Na kraju je predstavljen opis digitalno upravljanog pogona sa motorom jednosmerne struje: potreban hardver, merni sklopovi, detalji mikroprocesorske realizacije i blok dijagram algoritma mikroprocesorskog programa za upravljanje brzinom.

Treća glava obrađuje pogone sa trofaznim asinhronim motorom. Na početku su objašnjeni elementi konstrukcije i princip rada asinhronog motora, a zatim je formiran njegov dinamički model u originalnom (faznom) domenu. Dobijeni model je, primenom modernog

pristupa teorije prostornih vektora, transformisan u opšti, nepokretni, i sinhrono-rotirajući koordinatni sistem osa. Statičke karakteristike motora, ekvivalentna šema i statičke mehaničke karakteristike izvedene su modifikacijom dobijenog dinamičkog modela, te su objašnjeni osnovni postupci upravljanja brzinom i fluksom asinhronog motora. Primenom teorije prostornih vektora dalje su obrađeni načini upravljanja naponskim pretvaračem naizmenične struje, i to trofazna sinusna PWM modulacija i PWM modulacija prostornog vektora, te načini za regulaciju vektora izlazne struje naponskog pretvarača. Nakon toga obrađena su tri osnovna pravca za upravljanje momentom i fluksom asinhronog motora: skalarno (u/f) upravljanje, vektorsko upravljanje i direktno upravljanje momentom. Za sva tri pravca su dati matematički modeli i odgovarajuće šeme pogona koji je regulisan po brzini, što je dodatno ilustrovano računarskim simulacijama. Konačno, na kraju glave, dat je opis potrebnog hardvera za realizaciju digitalno upravljanog pogona naizmenične struje sa skalarnim i vektorskim upravljanjem, odgovarajući merni sklopovi, te blok dijagram mikrokontrolerskog programa za vektorsko upravljanje i regulaciju brzine asinhronog motora.

U četvrtoj glavi obrađeni su pogoni sa trofaznim sinhronim motorom sa permanentnim magnetima na rotoru. Dinamički model motora izveden je u sinhrono-rotirajućem koordinatnom sistemu na sličan način kao i model asinhronog motora, korišćenjem teorije prostornih vektora. Modifikacijom dinamičkog modela dobijen je model za ustaljena stanja i odgovarajuće mehaničke karkteristike. Objašnjeno je vektorsko upravljanje momentom i fluksom, izbor magnetizacione komponente struje, te regulacija brzine sinhronog motora u širokom opsegu. Na kraju, dat je detaljan opis hardvera i softvera za upravljanje pogonom, a akcenat je stavljen na upotrebu rezolvera kao davača apsolutnog položaja, karakterističnog za pogone sa sinhronim motorima. Mikrokontrolerski program za vektorsko upravljanje je dobijen modifikacijom programa za upravljanje asinhronim motorom iz prethodne glave, te je na taj način potvrđeno da se svim mašinama naizmenične struje upravlja na sličan način.

Autori se iskreno nadaju da će knjiga biti od koristi studentima, ali i svima onima koji se interesuju za digitalno regulisane elektromotorne pogone. Vrlo je moguće da su se u rukopisu potkrale izvesne nejasnoće ili greške, pa će autori biti zahvalni svim čitaocima koji na njih ukažu.

Autori zahvaljuju recenzentima, akademiku prof. dr Slobodanu Vukosaviću, prof. dr Branku Blanuši i prof. dr Đuri Orosu na korisnim sugestijama prilikom izrade knjige. Posebnu zahvalnost autori upućuju mladom kolegi dr Vladimiru Popoviću za pažljivo čitanje rukopisa i dragocene primedbe koje su nesumnjivo doprinele njegovoj razumljivosti i kvalitetu. Konačno, autori zahvaljuju multinacionalnoj korporaciji „Nidec“ i kompaniji „Neotech“ d.o.o Novi Sad na saradnji i interesantnim projektima, tokom čije izrade su nastale ideje za pojedina poglavlja ove knjige.

U Novom Sadu i Banjoj Luci, decembar 2020.

Autori

SADRŽAJ

1. Uvod u regulisane elektromotorne pogone 1
1.1. Osnovni elementi elektromotornih pogona 2
1.1.1. Pojam elektromotornog pogona 2
1.1.2. Pojam regulisanog elektromotornog pogona 3
1.1.3. Pojam digitalno regulisanog elektromotornog pogona 4
1.2. Princip rada elektromotornog pogona i mehanički podsistem 5
1.3. Mehaničke karakteristike REMP–a 8
1.3.1. Mehaničke karakteristike motora 9
1.3.2. Mehaničke karakteristike opterećenja 11
1.3.2.1. Momentne karakteristike reaktivnih opterećenja 11
1.3.2.2. Momentne karakteristike potencijalnih opterećenja 12
1.3.2.3. Pregled momentnih karakteristika opterećenja u ω-M i M-ω ravni 13
1.3.3. Radna tačka i stabilnost EMP–a 14
1.4. Regulacione strukture u REMP–u 15
1.5. Linearni regulatori u REMP–u u kontinualnom domenu 18
1.5.1. Električni motor kao objekat upravljanja u REMP–u 18
1.5.2. Tipičan sistem automatskog upravljanja 21
1.5.3. Odabir tipa linearnog regulatora 22
1.5.4. Modifikovana verzija PI regulatora pogodna za primenu u REMP–u 25
1.5.5. Osnovni postupci sinteze parametara regulatora u REMP–u 26
1.5.5.1. Sistem prvog reda – kompenzacija dominantne vremenske konstante 27
1.5.5.2. Sistem drugog reda – kompenzacija i postavljanje polova 29
1.5.5.3. Sistem drugog ili višeg reda – optimizacija odziva 34
1.5.5.4. Pregled karakterističnih odziva za sistem drugog reda 36
1.6. Regulacija brzine i struje u REMP–u 36
1.6.1. REMP sa regulacijom brzine bez unutrašnje strujne petlje 39
1.6.2. REMP sa kaskadnom regulacijom brzine i struje 42
1.6.2.1. Regulacija struje motora u kaskadi 42
1.6.2.2. Regulacija brzine motora u kaskadi 44
1.6.2.3. Prednosti kaskadne strukture u REMP–u 47
1.7. Odabir parametara kontinualnih linearnih regulatora u REMP–u 48
1.7.1. Odabir parametara strujnog PI regulatora 48
1.7.1.1. Strujna regulacija bez kašnjenja pogonskog pretvarača 49
1.7.1.2. Strujna regulacija pogonskog pretvarača sa kašnjenjem 50
1.7.2. Odabir parametara PI regulatora brzine u kaskadnom REMP–u 51
1.7.2.1. Regulacija brzine uz strujnu petlju bez kašnjenja 51
1.7.2.2. Regulacija brzine uz strujnu petlju bez kašnjenja i zanemarenim trenjem .. 51
1.7.2.3. Regulacija brzine uz strujnu petlju sa kašnjenjem i zanemarenim trenjem . 54
1.7.3. Odabir parametara P regulatora položaja u kaskadnoj regulaciji 56
1.8. Diskretni regulatori u REMP–u 59
1.8.1. Digitalni sistemi upravljanja 59
1.8.2. Diskretni linearni PI regulator pogodan za primenu u REMP–u 60
1.8.3. Digitalna regulacija struje u REMP–u 63
1.8.4. Digitalna regulacija brzine u REMP–u 65
1.8.5. Digitalna regulacija položaja u REMP–u 69
1.9. Osnove kontrole kretanja u REMP–u 70

1.9.1. Kontrola kretanja sa ograničenjem brzine i ubrzanja ... 71
1.9.1.1. Kaskadna regulacija položaja u nelinearnom režimu rada ... 72
1.9.1.2. Nelinearni diskretni PID regulator položaja ... 72
1.9.2. Kontrola kretanja sa ograničenjem trzaja ... 75
1.10. Izbor elemenata digitalnog REMP–a ... 76
1.10.1. Izbor tipa pogona ... 77
1.10.2. Izbor motora ... 78
1.10.2.1. Stepeni intermitencije pogona ... 78
1.10.2.2. Metode ekvivalentnih veličina ... 81
1.10.2.3. Izbor motora s obzirom na uslove ugradnje ... 83
1.10.2.4. Izbor motora s obzirom na ambijent i uslove napajanja ... 84
1.10.3. Izbor pogonskog pretvarača ... 84
1.10.4. Izbor prenosnika ... 85
1.10.5. Izbor tipa regulacije i mikroprocesora ... 86
1.11. Pretvarači energetske elektronike u REMP–u ... 87
1.11.1. Tipovi pretvarača u REMP–u ... 87
1.11.2. Impulsno upravljanje pretvaračima u REMP–u ... 88
1.11.3. Mosne topologije pretvarača i upravljačka kola ... 91
1.11.4. Naponski i strujno regulisani pretvarači u REMP–u ... 93
1.12. Merenja u REMP–u ... 95
1.12.1. Merenje napona i struje ... 95
1.12.2. Merenje brzine i položaja ... 96
1.13. Mikroprocesorska realizacija digitalnog REMP–a ... 98
1.13.1. Struktura mikrokontrolerskog programa za REMP ... 99
1.13.2. Analogno/digitalni konvertor ... 100
1.13.3. Brojački modul (*Timer*/*Counter*) ... 102
1.13.4. PWM modul ... 103
2. Regulisani elektromotorni pogoni sa motorom jednosmerne struje .. 107
2.1. Elementi konstrukcije i princip rada motora jednosmerne struje ... 107
2.2. Mehaničke karakteristike motora jednosmerne struje ... 109
2.2.1. Mehanička karakteristika MJS sa nezavisnom pobudom ... 109
2.2.2. Mehanička karakteristika MJS sa stalnim magnetima ... 111
2.2.3. Mehanička karakteristika MJS sa rednom pobudom ... 112
2.3. Upravljanje brzinom MJS i kretanje radne tačke ... 113
2.4. Kočenje pogona sa MJS ... 117
2.5. Dinamički model MJS ... 120
2.5.1. Dinamički model u apsolutnim jedinicama ... 120
2.5.2. Dinamički model u relativnim jedinicama ... 122
2.6. Pretvarači u pogonima sa motorom jednosmerne struje ... 124
2.6.1. Mrežno komutovani AC/DC pretvarači u REMP–u sa MJS ... 125
2.6.2. Tranzistorski DC/DC pretvarači u REMP-u sa MJS ... 130
2.6.2.1. Osnovne topologije prekidačkih DC/DC pretvarača ... 131
2.6.2.2. Princip rada PWM upravljanog DC/DC pretvarača ... 133
2.6.2.3. Izbor PWM učestanosti prekidačkih DC/DC pretvarača ... 134
2.6.2.4. DC/DC pretvarač kao naponski i strujno regulisan naponski izvor ... 135
2.6.2.5. Primeri topologija REMP–a sa tranzistorskim DC/DC pretvaračima ... 136
2.7. Regulacija brzine MJS ... 138
2.7.1. Regulacija brzine u baznom opsegu ... 138
2.7.2. Regulacija brzine MJS sa diskretnim regulatorima ... 140

2.7.3. Regulacija brzine MJS sa nezavisnom pobudom u širokom opsegu brzina 145
2.7.4. Regulacija brzine servopogona sa MJS male snage 148
2.8. Regulacija položaja MJS 150
2.8.1. Kaskadna regulacija položaja 150
2.8.2. Regulacija položaja sa PID regulatorom 153
2.9. Realizacija digitalno regulisanog pogona sa MJS 156
2.9.1. Merenja u digitalnom pogonu sa MJS 156
2.9.1.1. Merenje brzine rotora 156
2.9.1.2. Merenje struje armature 159
2.9.1.3. Merenje ulaznog napona u pretvarač 162
2.9.2. Mikrokontrolerska realizacija potrebnih regulacionih struktura 163
2.9.2.1. Regulacija brzine upravljanjem naponom armature 164
2.9.2.2. Regulacija brzine upravljanjem strujom armature 165
2.9.3. Primer hardverske realizacije digitalno upravljanog pogona sa MJS 166
2.9.4. Primer realizacije programa za regulaciju brzine MJS 168
2.9.4.1. Program za regulaciju brzine upravljanjem naponom armature 168
2.9.4.2. Program za regulaciju brzine upravljanjem strujom armature 172
3. Regulisani elektromotorni pogoni sa asinhronim motorom 176
3.1. Elementi konstrukcije i princip rada asinhronog motora 176
3.2. Dinamički model asinhronog motora 179
3.2.1. Matematički model trofaznog AM u faznom (*abc-ABC*) domenu 179
3.2.2. Primena koncepta prostornih vektora i opšti (*xy*) koordinatni sistem 181
3.2.3. Matematički model trofaznog AM u dvofaznom stacionarnom ($\alpha\beta$) domenu 187
3.2.4. Matematički model trofaznog AM u dvofaznom obrtnom (*dq*) domenu 189
3.2.5. Pregled dinamičkih modela AM i potrebnih transformacija 191
3.2.6. Normalizovani model AM 195
3.2.7. Modeli AM u *dq* sistemu u odnosu na prostorne vektore fluksa u mašini 197
3.2.7.1. Model AM vezan za prostorni vektor fluksa rotora 197
3.2.7.2. Model AM vezan za prostorni vektor fluksa statora 198
3.2.8. Strujna regulacija u sinhrono rotirajućem *dq* koordinatnom sistemu 200
3.3. Mehaničke karakteristike asinhronog motora i upravljanje brzinom 201
3.3.1. Ekvivalentna šema asinhronog motora 201
3.3.2. Mehanička karakteristika asinhronog motora 202
3.3.3. Upravljanje brzinom AM promenom učestanosti i kretanje radne tačke 204
3.3.4. Kočenje pogona sa AM 208
3.4. Energetski pretvarači u REMP–u sa motorima naizmenične struje 210
3.4.1. Topologije pretvarača u REMP–ima sa motorima naizmenične struje 210
3.4.2. Izbor nosioca PWM signala za trofazne sisteme 212
3.4.3. Trofazni invertor kao izvor naizmeničnog napona (VSI) 213
3.4.3.1. Trofazna sinusna PWM modulacija 214
3.4.3.2. Mikroprocesorska realizacija trofaznog sinusnog PWM modulatora 217
3.4.3.3. PWM modulacija prostornog vektora 218
3.4.3.4. Mikroprocesorska realizacija PWM modulatora prostornih vektora 227
3.4.4. Trofazni invertor kao strujno regulisani naponski izvor (CRVSI) 228
3.4.4.1. Realizacija CRVSI sa strujnim regulatorima u *dq* koordinatnom sistemu. 229
3.4.4.2. Digitalna realizacija strujnih regulatora u *dq* koordinatnom sistemu 231
3.5. Upravljanje fluksom i momentom i regulacija brzine AM 233
3.5.1. Skalarno upravljanje AM 234
3.5.2. Vektorsko upravljanje AM 238
3.5.2.1. Koncept vektorskog upravljanja 238

3.5.2.2. Indirektna procena položaja vektora rotorskog fluksa 239
3.5.2.3. Direktna procena položaja vektora rotorskog fluksa 243
3.5.2.4. Ilustracija rada vektorski upravljanog AM 245
3.5.3. Direktna kontrola momenta AM 250
3.5.3.1. Koncept direktne kontrole momenta 250
3.5.3.2. Klasična direktna kontrola momenta 252
3.5.3.3. Direktna kontrola momenta modulacijom prostornog vektora 256
3.5.3.4. Procena fluksa statora i momenta AM 258
3.5.4. Regulacija brzine u širokom opsegu i slabljenje polja AM 260
3.5.4.1. Slabljenje polja AM smanjenjem fluksa rotora 261
3.5.4.2. Slabljenje polja AM smanjenjem fluksa statora 265
3.5.4.3. Slabljenje polja AM limitiranjem napona 267
3.6. Digitalna realizacija pogona sa AM upravljanog po brzini 269
3.6.1. Merenja u digitalnom pogonu sa AM 272
3.6.1.1. Merenje linijskih i račun faznih struja motora 272
3.6.1.2. Merenje položaja rotora 274
3.6.1.3. Merenje faznih napona trofaznog motora 280
3.6.2. Mikrokontrolerska realizacija skalarnog upravljanja 281
3.6.3. Blok dijagram algoritma programa za skalarno upravljanje AM 283
3.6.4. Mikrokontrolerska realizacija indirektnog vektorskog upravljanja 286
3.6.5. Blok dijagram algoritma programa za vektorsko upravljanje AM 289
4. Regulisani elektromotorni pogoni sa sinhronim motorom 295
4.1. Elementi konstrukcije i princip rada sinhronog motora 296
4.2. Dinamički model PMSM napajanog iz naponskog izvora 299
4.2.1. Matematički model trofaznog PMSM u faznom (*abc*) domenu 299
4.2.2. Primena koncepta prostornih vektora u modelovanju PMSM 301
4.2.3. Matematički model trofaznog PMSM u dvofaznom obrtnom (*dq*) domenu 305
4.2.4. Normalizovani model PMSM 306
4.3. Model za ustaljena stanja i mehaničke karakteristike 307
4.3.1. Kočenje pogona sa PMSM 310
4.3.2. MTPA strategija 313
4.3.3. Kretanje radne tačke u *dq* ravni 314
4.4. Upravljanje fluksom i momentom i regulacija brzine PMSM 316
4.4.1. Vektorsko upravljanje SPMSM 316
4.4.1.1. Nezavisna regulacija fluksa statora i momenta SPMSM 316
4.4.1.2. Šema vektorskog upravljanja SPMSM u širokom opsegu brzina 316
4.4.1.3. Rezultati simulacija rada vektorski upravljanog SPMSM 317
4.4.2. Vektorsko upravljanje IPMSM 319
4.4.2.1. Nezavisna regulacija fluksa statora i momenta IPMSM 319
4.4.2.2. Šema vektorskog upravljanja IPMSM u širokom opsegu brzina 319
4.4.2.3. Rezultati simulacija rada vektorski upravljanog IPMSM 320
4.5. Digitalna realizacija pogona sa PMSM upravljanog po brzini 322
4.5.1. Blok dijagram pogona sa PMSM upravljanog po brzini 322
4.5.2. Blok dijagram algoritma programa za vektorsko upravljanje PMSM 324
5. Literatura 330

1. UVOD U REGULISANE ELEKTROMOTORNE POGONE

Istorijski, razvoj regulisanih elektromotornih pogona počeo je sa motorima jednosmerne struje, već početkom dvadesetog veka. Kod motora jednosmerne struje, samom konstrukcijom, ostvarena je jednostavna linearna veza između struje armature i momenta, a koja je osnovni preduslov za kvalitetnu regulaciju brzine i položaja. U pogonima sa motorom jednosmerne struje moguće je, prostim pretvaračem i prostom upravljačkom strukturom zasnovanom na analognoj tehnologiji, pretvoriti motor u linearni konvertor momenta. Tako su pogoni sa motorima jednosmerne struje, uprkos visokoj ceni motora, zahtevnom održavanju i lošijoj efikasnosti, držali primat u regulisanim elektromotornim pogonima tokom vrlo dugog perioda. S druge strane, motori naizmenične struje, iako se odlikuju manjom cenom, većom robusnošću i jednostavnijim održavanjem, uglavnom su korišćeni u neregulisanim pogonima, jer im je upravljanje momentom veoma složeno. Tokom vremena, situacija se ipak promenila u korist mašina naizmenične struje, i to zahvaljujući velikim tehnološkim i naučnim iskoracima: prvo u razvoju poluprovodničkih pretvarača energetske elektronike (1950-tih godina), zatim u razvoju koncepta vektorskog upravljanja i teorije digitalnih sistema upravljanja (1970-tih godina), te u intenzivnom razvoju i padu cene mikroprocesora (od 1980-tih, pa do danas).

U modernim regulisanim elektromotornim pogonima se upravljanje pretvaračima i motorima smatraju zrelim tehnologijama, koje su i dalje podržane snažnim razvojem poluprovodničkih komponenti i mikrokontrolera namenjenim za upravljanje pretvaračima. Iz tog razloga se u savremenim regulisanim pogonima uveliko koriste motori naizmenične struje, asinhroni i sinhroni. Ti motori, uz složeniji pretvarač i znatno složeniji upravljački algoritam, postižu isti cilj kao i pogoni sa motorom jednosmerne struje, ali uz manju cenu, veću efikasnost i robusnost, jednostavnije održavanje, te superiorne performanse uopšte. U ovim pogonima mikroprocesor izvršava znatno složeniji upravljački algoritam, čime pretvara motor naizmenične struje u linearni konvertor momenta, sa nezavisnim upravljanjem momentom i fluksom.

Dakle, napredak tehnologije je očigledno ekvivalentirao većinu tipova motora, i u prvoj aproksimaciji rada pretvorio ih u proste aktuatore momenta, koji razvijaju moment proporcionalno nekoj od ulaznih veličina motora, a kojom je u pogonu moguće upravljati. Upravljačka veličina je uobičajeno aktivna komponenta struje, koju pretvarač u realnom vremenu generiše i utiskuje u motor, i time obezbeđuje da i motor generiše željeni moment. Iz tog razloga, moderni regulisani elektromotorni pogoni se grade tako da se svaki motor, bilo jednosmerne, bilo naizmenične struje, posmatra kao linearni pojačavač momenta. Samim tim, modelovanje i analiza rada regulisanog elektromotornog pogona se zasnivaju na opštim upravljačkim strukturama, koje važe za svaki elektromotorni pogon, bez obzira na tip motora, sve dok se motor može posmatrati kao linearni konvertor momenta.

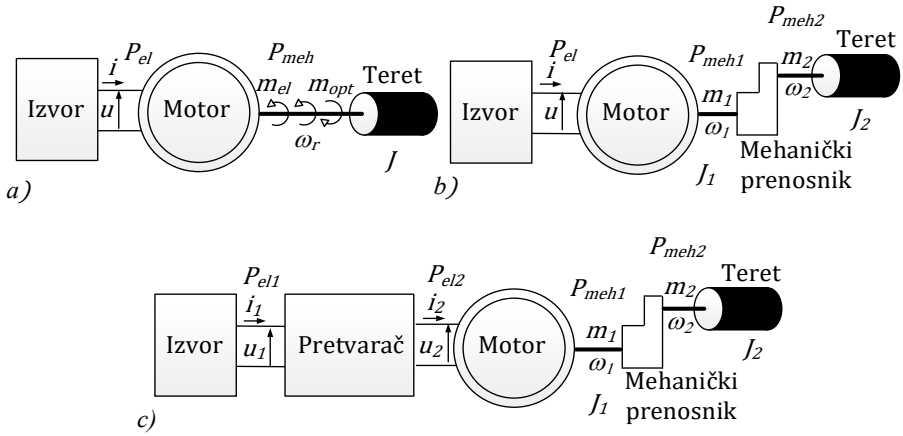
Upravljanje momentom omogućava regulaciju brzine i položaja, za šta mogu da se koriste različiti pristupi iz teorije sistema automatskog upravljanja. Tokom razvoja regulisanih elektromotornih pogona, praktičnu primenu je našlo nekoliko karakterističnih regulacionih struktura, prvenstveno kaskadnog tipa, uz odgovarajuće postupke za njihovu analizu, proračun i podešavanje. Osim toga, uprkos velikoj raznolikosti pojedinih elemenata elektromotornog pogona (motora, prenosnika, pogonskih pretvarača i odgovarajućih tehnika njihovog upravljanja itd) svi oni su najvećim delom standardizovani. Zbog toga je težište narednog izlaganja postavljeno upravo na standardne elemente uobičajenog digitalno regulisanog elektromotornog pogona.

U ovom poglavlju objašnjena je svrha elektromotornih pogona, kao i potreba za regulacijom njihovog rada. Data je osnovna šema pogona i objašnjeni pojedini delovi. Predstavljen je princip rada pogona korišćenjem osnovnih fizičkih zakona koji opisuju mehaničke karakteristike motora i pridruženog opterećenja. Dat je detaljan pregled potrebnih regulacionih struktura u kontinualnom i diskretnom domenu, i obrađene su osnove kontrole kretanja. Diskutovan je izbor pojedinih elemenata pogona, sa posebnim osvrtom na pretvarače i njihovo upravljanje, kao i potrebna merenja u pogonu. Na kraju poglavlja obrađene su osnove mikroprocesorske realizacije digitalno regulisanih elektromotornih pogona.

1.1. Osnovni elementi elektromotornih pogona

1.1.1. Pojam elektromotornog pogona

Elektromotorni pogon (EMP) je elektromehanički sistem koji električnu energiju iz primarnog izvora na kontrolisan način pretvara u mehanički rad, i time služi za pokretanje opreme ili opterećenja (tzv. tereta), [1], [2]. Postoji više mogućih vrsta elektromotornih pogona po pitanju performansi i složenosti, kako je prikazano na Sl. 1.1.



Sl. 1.1. Vrste elektromotornih pogona

Na Sl. 1.1 (a) dat je najprostiji primer neregulisanog EMP–a u kome je motor preko N električnih ulaza direktno povezan na primarni izvor električne energije (elektroenergetsku mrežu ili bateriju) iz kojeg uzima električnu snagu P_{el}:

$$P_{el} = \sum_{i}^{N} u_i \, i_i \,, \tag{1.1}$$

gde su u_i, i_i napon i struja na električnom ulazu i. Motor je u datom primeru na mehaničkoj strani direktno povezan na opterećenje preko vratila. Vratilo se obrće brzinom ω_r, a na njemu se suprostavljaju moment koji razvija motor m_{el} i moment opterećenja m_{opt}. U slučaju neregulisanog pogona moment, koji razvija motor, nije regulisan, tj. motor razvija moment na osnovu svoje prirodne mehaničke karakteristike. Motor na vratilu predaje vratilu mehaničku snagu:

$$P_{meh} = m_{el} \cdot \omega_r \,, \tag{1.2}$$

gde je m_{el} elektromagnetni moment koji motor razvija pri ugaonoj brzini motora ω_r. Primer ovakvog pogona je električna pumpa za vodu.

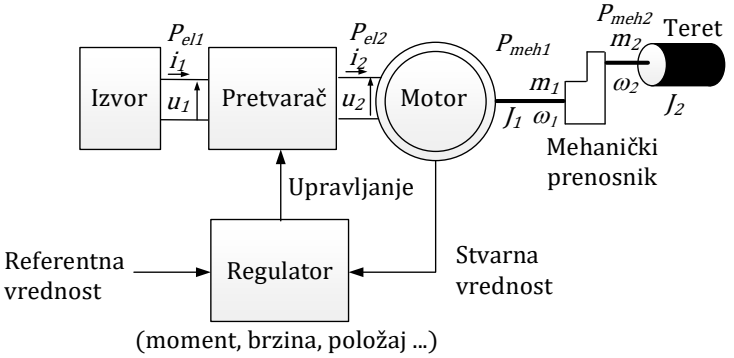
Na Sl. 1.1 (b) dat je složeniji EMP u kome je motor preko mehaničkog prenosnika povezan na opterećenje. Mehanički prenosnik prilagođava moment i brzinu koje daje motor na vrednosti potrebne opterećenju, transformišući ih sa vrednosti m_1 i ω_1 na m_2 i ω_2. Primer ovakvih pogona su ručni alati ili neki kućni aparati kod kojih se brzina visokobrzinskog pogonskog motora redukuje na manju brzinu potrebnu za pogon opterećenja, a pri tome povećava moment. Primena prenosnika je veoma česta u industriji.

Na Sl. 1.1 (c) dat je EMP u kome je motor preko pogonskog pretvarača povezan na izvor električne energije. U ovom slučaju pretvarač prilagođava ulazni oblik napona i struje primarnog izvora motoru tako da upravlja njegovim momentom, brzinom i/ili položajem. U savremenim EMP–ima ovaj pogonski pretvarač je pretvarač energetske elektronike koji obezbeđuje promenljiv jednosmerni ili naizmenični napon motoru. Primer ovakvih pogona je pogon promenljive brzine sa asinhronim motorom, kome se izlazni napon i učestanost menjaju po odnosu U/f=const. Ako pretpostavimo da i u ovom pretvaranju nema gubitaka u opštem slučaju se dobija jednačina bilansa snaga pogonskog pretvarača (pretvarač ima M priključaka ka izvoru i N ka motoru),

$$P_{el1} = \sum_{i}^{M} u_i \, i_i = P_{el2} = \sum_{i}^{N} u_i \, i_i \,. \tag{1.3}$$

1.1.2. Pojam regulisanog elektromotornog pogona

Regulisani elektromotorni pogon (REMP) je EMP kome je dodata nadređena regulaciona struktura pomoću koje je moguće regulisati izlazne veličine, moment, brzinu ili položaj rotora motora, Sl. 1.2.



Sl. 1.2. Blok dijagram regulisanog elektromotornog pogona

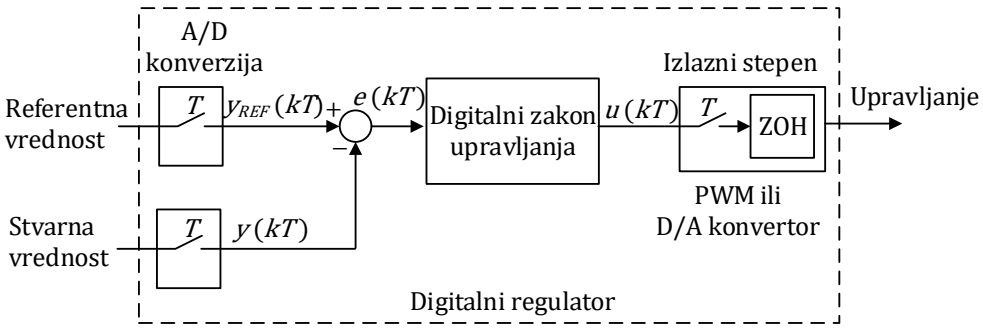
Pod regulacijom se smatra postizanje zadatih vrednosti na odgovarajući način (dovoljno brzo, bez ili sa prihvatljivim preskokom) i njihovo održavanje na zadatim vrednostima uprkos dejstvu poremećaja (promene momenta opterećenja ili napona napajanja). Osnovna karakteristika

REMP–a je da moment koji motor razvija postaje upravljačka promenljiva kojom regulator reguliše brzinu ili položaj. REMP sa Sl. 1.2 je složeni elektromehanički sistem koji se sastoji iz više delova:

1. **Izvor** daje električnu energiju pogonu;
2. **Pretvarač (aktuator)** prilagođava oblik ulazne električne snage motoru. U slučaju REMP–a pretvarač menja izlazne parametre napona i struje na osnovu komandi regulatora, koji te parametre zadaje prvenstveno u cilju generisanja potrebnog momenta, kojim se upravlja brzinom i položajem;
3. **Motor** je centralni element REMP–a, koji pretvara električnu energiju u mehaničku tako što razvija moment i vrši koristan rad pokretanjem opterećenja sa kojim je spregnut. Modernim REMP–ima se upravlja tako da motor postane linearni konvertor momenta, bez obzira na to da li se radi o pogonima jednosmerne ili naizmenične struje;
4. **Mehanički prenosnik** prilagođava oblik mehaničke energije motora opterećenju;
5. **Regulator** upravlja radom REMP–a koji time postaje sistem automatskog upravljanja (SAU). Regulator na svom ulazu prima referentnu vrednost izlaza koji želimo da ostvarimo, preuzima njegovu merenu vrednost, i na osnovu njihovog odstupanja generiše potrebne upravljačke signale. U REMP–u se obično regulišu brzina i/ili položaj vratila upravljanjem momentom koji motor razvija, čime moment motora postaje osnovna upravljačka veličina, a moment opterećenja poremećaj. Regulator REMP–a tipično sadrži više regulacionih struktura, a osim toga, on može da obavlja i dodatne funkcije kao što su zaštita elemenata REMP–a i komunikacija sa nadređenim sistemima upravljanja;
6. **Opterećenje** (teret) je mehanički sistem koji vrši koristan rad i sa mehaničke strane se suprostavlja momentu motora kojim upravljamo. Teret generiše moment opterećenja koji dejstvuje kao poremećaj u REMP-u, posmatranom kao SAU.

1.1.3. Pojam digitalno regulisanog elektromotornog pogona

Digitalno regulisani elektromotorni pogon (DREMP) je REMP u kome je upravljački sklop realizovan digitalno, [3], [4], kako je prikazano na Sl. 1.3.



Sl. 1.3. Blok dijagram digitalnog upravljačkog dela REMP–a

U digitalnom REMP–u signali se prvo diskretizuju po vremenu i po amplitudi, a zatim se dalje obrađuju diskretni ekvivalenti originalnih signala. Referentni i mereni signali se uvode u A/D konvertor koji jednom u periodi odabiranja sistema T konvertuje ulazne signale u diskretne povorke signala $y_{REF}(kT)$ i $y(kT)$. Zadatak digitalnog zakona upravljanja je da na osnovu razlike referentnog i merenog signala, tj. greške $e(kT)$, menja upravljačku promenljivu $u(kT)$ koja se zadržava konstantnom do sledeće periode. Izlazni stepen digitalnog sklopa se ponaša kao kolo zadrške nultog reda (eng. *Zero Order Hold* - ZOH) i zadržava konstantnu vrednost izlaznog signala između dve periode odabiranja. Tipičan primer izlaznog stepena je modulator širine impulsa (eng. *Pulse Width Modulator* - PWM) koji generiše impulsni upravljački signal čija je širina u toku jedne periode T proporcionalna $u(kT)$ u datoj periodi. U ovom slučaju upravljački izlazni signal je sama širina impulsa, koja se ne može menjati u toku jedne periode i time se zadržava na istoj vrednosti sve do sledeće periode T. Druga mogućnost, koja se danas veoma retko koristi, je D/A konvertor kao izlazni stepen koji generiše analogni upravljački signal proporcionalan $u(kT)$. I u ovom slučaju generisani izlazni analogni signal ostaje konstantan do sledeće periode.

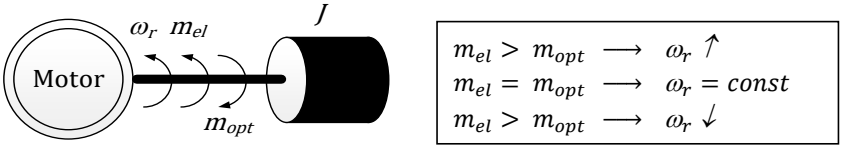
1.2. Princip rada elektromotornog pogona i mehanički podsistem

Osnovna svrha elektromotornog pogona je da obezbedi kontrolisano obrtno (rotaciono) kretanje određenog opterećenja. Princip rada je zasnovan na Njutnovom zakonu za obrtno kretanje po kojem je ugaono ubrzanje koje pri obrtnom kretanju dobija telo srazmerno rezultantnom obrtnom momentu koji na njega deluje:

$$m_{el} - m_{opt} = \frac{d}{dt}\left(J \cdot \omega_r\right) = \underbrace{\omega_r \frac{dJ}{dt}}_{=0} + J\frac{d\omega_r}{dt} = J\frac{d\omega_r}{dt} = J\alpha = J\frac{d^2\theta_r}{dt^2}\ , \tag{1.4}$$

gde su: m_{el} – elektromagnetni moment motora (Nm), m_{opt} – moment opterećenja ili otporni moment uz pridruženo trenje (Nm), J – ukupan moment inercije pogona (kg·m^2), ω_r –ugaona brzina rotora (rad/s), α – ugaono ubrzanje rotora (rad/s^2) i θ_r –ugao rotora (rad). U velikom broju EMP–a je moment inercije nepromenljiv, pa važi J = const.

Na vratilu se sukobljavaju moment motora kojim možemo da upravljamo, i moment opterećenja kao poremećaj, Sl. 1.4. Njihova razlika se naziva dinamički moment $m_d = m_{el} - m_{opt}$, koji je prema (1.4) proporcionalan ugaonom ubrzanju α i određuje dinamiku promene brzine.



Sl. 1.4. Pojednostavljana šema rada EMP–a

Iz jednačine (1.4) je očigledno da znak promene brzine rotora zavisi od dinamičkog momenta, odnosno odnosa momenta koji motor razvija i momenta opterećenja, i moguće su tri situacije:

- moment motora je na datoj brzini veći od momenta opterećenja, $m_{el} > m_{opt}$, u tom slučaju važi $J\frac{d\omega_r}{dt} > 0$ i tada brzina raste,

- moment motora je na datoj brzini manji od momenta opterećenja, $m_{el} < m_{opt}$, u tom slučaju važi $J\frac{d\omega_r}{dt} < 0$ i tada brzina opada,
- moment motora je na datoj brzini jednak momentu opterećenja, $m_{el} = m_{opt}$, u tom slučaju važi $J\frac{d\omega_r}{dt} = 0$, brzina je konstantna i važi stacionarno stanje pogona.

U neregulisanom pogonu se ne upravlja momentom m_{el} koji motor razvija, nego motor moment razvija na osnovu svoje prirodne karakteristike. U tom slučaju se situacija na vratilu ne kontroliše u potpunosti, jer promene momenta opterećenja dovode do neizbežnih promena brzine. Jasno je da je za potpunu kontrolu situacije na vratilu neophodno u svakom trenutku upravljati momentom koji motor razvija, što je upravo i slučaj u REMP–u. S druge strane, moment opterećenja m_{opt} zavisi isključivo od karakteristika opterećenja.

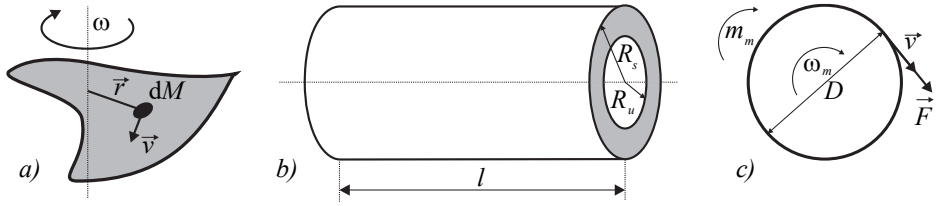
Ukupna inercija pokretnih masa u pogonu (motora i opterećenja) utiče na dinamiku promene veličina na vratilu. Kod obrtnih kretanja inercija se opisuje momentom inercije *J* koji zavisi od mase i oblika obrtnih delova. Definicija momenta inercije krutog tela je,

$$J = \int_0^m r^2 \mathrm{d}M\,, \tag{1.5}$$

gde je *r* udaljenost elementa elementarne mase d*M* od ose rotacije, a integral se računa po ukupnoj masi *m*, Sl. 1.5 (a). Za telo oblika šupljeg valjka, Sl. 1.5 (b), koji rotira po svojoj aksijalnoj osi simetrije, izraz za moment inercije (1.5) svodi se na,

$$J = \frac{\gamma\pi l}{2}(R_s^4 - R_u^4) = m\frac{R_s^2 + R_u^2}{2}, \tag{1.6}$$

gde su γ specifična masa [kg/m^3], *l* aksijalna dužina, a R_s i R_u spoljašnji i unutrašnji poluprečnik [m]. Za telo oblika punog valjka (R_u=0, R_s=*R*), npr. za rotor motora ili druge obrtne delove koji se obrće oko centralne aksijalne ose, dobija se $J=mR^2/2$, gde je *m* masa tela. Moment inercije raste proporcionalno aksijalnoj dužini i kvadratu prečnika *D*=2*R*, pa obrtni delovi koji treba da imaju mali moment inercije (npr. rotori servomotora) imaju veću dužinu, a manji prečnik za istu masu.



Sl. 1.5. Mehanički podsistem: a) definicija momenta inercije, b) šuplji valjak, c) veličine obrtnog i linearnog kretanja

U mehaničkom podsistemu pojedinih EMP–a i REMP–a sa Sl. 1.1 i Sl. 1.2 figuriše prenosnik koji prilagođava brzinu i moment motora potrebnoj brzini i momentu opterećenja. Mehanički prenosnik se u pogonima idealizuje, tako što se zanemaruju svi gubici snage, proklizavanja, i tzv. „mrtvi hod“ prenosnika.

Kada se gubici snage u prenosniku zanemare, važi,

$$P_{meh1} = P_{meh2}\,, \tag{1.7}$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = i\,, \tag{1.8}$$

gde je i prenosni odnos prenosnika. U savremenim elektromotornim pogonima najčešće se koriste prenosnici sa konstantnim prenosnim odnosom.

Zbog uticaja prenosnika dolazi i do promene momenta inercije opterećenja J_2 gledanog sa strane motora, koji se mora svesti na brzinu obrtanja vratila motora primenom zakona o održanju njegove energije, $W_1 = W_2$,

$$\frac{1}{2}J_1{\omega_1}^2 = \frac{1}{2}J_2{\omega_2}^2 \rightarrow \frac{J_1}{J_2} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2, \tag{1.9}$$

a ukupni moment inercije sveden na brzinu obrtanja vratila motora jednak je zbiru momenata inercije motora J_m, prenosnika J_p i svedenog momenta inercije opterećenja J_1:

$$J = J_m + J_p + J_1. \tag{1.10}$$

Po pravilu, podatak o momentu inercije prenosnika J_p se daje sveden na njegovo ulazno vratilo.

U nekim primenama EMP–a, npr. liftovima, pri podizanju tereta mase m, potrebno je obrtno kretanje motora pretvoriti u linearno, kako je prikazano na Sl. 1.5 (c). Sila linearnog kretanja F koja deluje na disk prečnika D stvara obrtni moment,

$$m_m = F\frac{D}{2} = mg\frac{D}{2}, \tag{1.11}$$

a odgovarajuća ugaona brzina motora računa se iz date linijske brzine v kojom se kreće teret:

$$v = \omega_m\frac{D}{2}. \tag{1.12}$$

Njutnova jednačina za pravolinijsko kretanje je:

$$f_e - f_{opt} = \frac{d}{dt}(M\cdot v) = \underbrace{v\frac{dM}{dt}}_{=0} + M\cdot\frac{dv}{dt} = M\cdot a\,, \tag{1.13}$$

gde je: f_e – pokretačka motorna sila, f_{opt} – otporna sila koja se suprotstavlja kretanju, M – masa tela, v – brzina kretanja tela i a – ostvareno ubrzanje tela. Izjednačavanjem kinetičkih energija obrtnog i linearnog kretanja dobija se veza između mase tela i prečnika rotacije sa odgovarajućim momentom inercije tog tela pri obrtnom kretanju:

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}Mv^2 \rightarrow J = M\frac{D^2}{4}\,. \tag{1.14}$$

Sve mehaničke veličine, i kod linearnih kretanja, se svode na vratilo motora na isti način – upotrebom prenosnog odnosa prenosnika.