## *Predgovor*

*Predmeti pod istim nazivom „Višemotorni električni pogoni“ su u planu Osnovnih akademskih studija i Doktorskih akademskih studija na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. I ako su nazivi isti, programi ovih predmeta su različiti, i prilagođeni nivou odgovarajućeg studijskog programa. Savremeni način studiranja omogućava studentima određenu slobodu kreiranja svog ličnog obrazovnog profila. Prilagođavanje nastave, a time sadržaja i forme odgovarajućih udžbenika ovom načinu studiranja, podrazumeva prikaz šireg skupa informacija iz obrađivane oblasti, sa ciljem stvaranja potrebne osnove za individualno usavršavanje kroz samostalan rad studenta. Polazeći od navedenih činjenica ova knjiga je formirana tako da može da bude dobra polazna osnova za izučavanje višemotornih električnih pogona na oba pomenuta nivoa akademskih studija, a da se konačan obim i sadržaj stečenog znanja formira individualno, kroz izradu nekog od završih radova.*

*Na Osnovnim akademskim studijama, Višemotorni električni pogoni se predaju u završnoj godini studija u kojoj se očekuje izvestan vid individualnog rada studenta, kao i priprema za izradu diplomskog rada. Na Doktorskim akademskim studijama, planom je predviđeno da se ovaj predmet predaje u drugoj godini studija na modulu Energetski pretvarači i pogoni, kada studenti pripremajući se za izradu doktorskog rada, treba da razviju svoje kreativne i istraživačke sposobnosti. Oblast koja se izučava u okviru predmeta Višemotorni električni pogoni, omogućava veliki izbor tema za izradu semestralnih, diplomskih, master i doktorskih radova, na koje će ova knjiga ukazati.*

*Predmet Višemotorni električni pogoni nastao je kao prirodna potreba za izučavanjem jedne oblasti koja se spontano formirala razvojem i usavršavanjem industrijskih procesa, i sve većom potrebom za složenim vidovima njihovog pokretanja i upravljanja. Zbog ove činjenice, baveći se dugi niz godina profesionalno elektromotornim pogonima, uočio sam potrebu da se ovaj predmet uvrsti u plan nastave na Fakultetu.*

*Sakupljeni materijal podelili smo u sedam poglavlja. U prvom poglavlju, izveli smo opšte definicije višemotornih električnih pogona.*

*Drugo poglavlje, posvećeno je regulisanim elektromotornim pogonima, kao elementu najvećeg broja višemotornih pogona. Sadržaj i način na koji je obrađena materija u drugom poglavlju, posebno je prilagođen potrebama izučavanja višemotornih električnih pogona.*

*Treće poglavlje se bavi višemotornim pogonima čija su pogonska vratila međusobno mehanički kruto povezana. U ovom poglavlju, obrađen je i uticaj zazora kod zupčastih prenosnika na ponašanje pogona.*

*Višemotorni pogoni sa izrazito elastičnim osobinama mehaničke veze između vratila, obrađeni su u četvrtom poglavlju.*

*Pogoni kod kojih je mehanička veza sa naglašeno viskoznom osobinom, obrađeni su u petom poglavlju.*

*Višemotorni pogoni bez neposredne veze pogonskih vratila, ali sa izraženom funkcionalnom zavisnošću, analizirani su u šestom poglavlju.*

*Posebni slučajevi višemotornih pogona, kod kojih u radu dolazi do promena koje se odražavaju na prirodu mehaničke veze, a time i način upravljanja, opisani su u sedmom poglavlju.*

*Oblast Višemotorni električni pogoni je u pravom smislu multidisciplinarna, jer obuhvata električne pogone i mašine, sisteme upravljanja, energetsku elektroniku, mašinstvo i mehaniku, tehnologiju različitih proizvodnih procesa, itd. Pravilan način izlaganja ovako složene materije, zahteva pre svega puno iskustva, na izučavanju, istraživanju, projektovanju i realizaciji sistema koji čine višemotorne pogone, a zatim jedan ozbiljan rad na sistematizaciji gradiva.*

*Autori su imali sreću i zadovoljstvo da pre svega u svom profesionalnom radu projektuju i realizuju veliki broj postrojenja koje pokreću višemotorni pogoni, implementirajući najnovija tehnološka dostignuća, i svoja originalna tehnička rešenja. Naš naučni i istraživački status nalagao nam je da svim ovim poslovima pristupamo kroz ozbiljnu i studioznu teorijsku analizu, što je sve zajedno rezultiralo većim brojem naučnih i stručnih radova. Knjiga „Višemotorni električni pogoni“ i predstavlja jedan od rezultata svih naših aktivnosti na ovom polju rada. Sve što je urađeno i na osnovu čega je sakupljen materijal za ovu knjigu ne bi bilo moguće bez pomoći većeg broja naših kolega i prijatelja. Neki od njih svakako moraju biti ovde pomenuti, kao što su Neša Rašić, Dragan Jevtić, Leposava Ristić, Ilija Mihailović, Mario Belinčević, Miodrag Milojević, Prvoslav Cvejić… Takođe, veliku zahvalnost dugujemo ljudima koji su imali poverenje i viziju da nam povere poslove od kojih su mnogi bili od šireg značaja.*

*Posebnu zahvalnost dugujemo Prof. Draganu Petroviću i Prof. Nebojši Mitroviću koji su nam svojim sugestijama i savetima pomogli da ova knjiga dobije svoj konačan oblik. Ilija Mihailović je osmislio i tehnički obradio najveći deo ilustracija i slika na čemu mu se posebno zahvaljujemo.*

*Kroz ceo svoj radni vek bavio sam se, i bavim se elektromotornim pogonima. Sve čemu su me učili, sve što sam naučio, i sve čemu sam učio druge, imao sam sreću i zadovoljstvo da praktično primenim.*

*Prirodne zakone ne treba proveravati, ali inženjeri treba stalno da proveravaju svoje poznavanje prirodnih zakona kroz praktičnu primenu.*

*Prof. Dr Borislav I. Jeftenić*

*Mart 2011.*

## *Sadržaj*


**1 *Uvod - Opšti pojmovi i definicije*** ..... **1**
1.1 Višemotorni pogoni – potrebe i razvoj ..... 1
1.2 Višemotorni pogon - definicija ..... 4
1.3 Povezanost pogona kroz proces ..... 5
1.4 Mehanička povezanost pogona ..... 5
1.4.1 Kruta veza ..... 14
1.4.2 Elastična veza ..... 15
1.4.3 Plastična veza ..... 16
1.4.4 Mehanički nepovezani pogoni ..... 17
1.4.5 Mehanička veza promenljive strukture ..... 18
1.5 Povezanost pogona preko izvora za napajanje električnom energijom ..... 19
1.6 Povezanost pogona preko zajedničkog upravljačkog sistema ..... 23
1.7 Primeri za vežbu ..... 24
1.8 Literatura ..... 25

**2 *Regulisani elektromotorni pogoni*** ..... **27**
2.1 Regulisani elektromotorni pogoni – opšti pojmovi ..... 27
2.2 Regulisani elektromotorni pogoni sa motorima jednosmerne struje ..... 35
2.2.1 Opšti model pogona sa motorom jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom ..... 35
2.2.2 Struktura regulisanog pogona sa motorom jednosmerne struje sa stalnom i nezavisnom pobudom ..... 39
2.2.3 Struktura regulisanog pogona sa motorom jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom u području slabljenja pobude ..... 41
2.3 Regulisani elektromotorni pogoni sa asinhronim motorima ..... 43
2.3.1 Opšti model pogona sa trofaznim asinhronim motorom ..... 44
2.3.2 Upravljanje asinhronim motorom orijentacijom fluksa ..... 51
2.3.2.1 Indirektno upravljanje asinhronim motorom orijentacijom fluksa ..... 53
2.3.2.2 Direktno upravljanje asinhronim motorom orijentacijom fluksa ..... 54
2.3.2.3 Integracija pogona sa asinhronim motorom upravljanim orijentacijom fluksa ..... 55
2.3.3 Direktna kontrola momenta asinhronog motora ..... 56
2.3.4 Poređenje algoritama upravljanja sa orijentacijom fluksa i direktnom kontrolom momenta ..... 64
2.4 Regulator procesa ..... 64
2.5 Praktična realizacija upravljačkih sistema i povezivanje sa teorijskim analizama ..... 65

2.6 Primeri za vežbu ... 67
2.7 Literatura ... 68

**3 *Višemotorni pogoni sa krutom mehaničkom vezom pogonskih vratila* ... 69**
3.1 Apsolutno kruto mehanički povezani pogon ... 69
3.2 Kruto mehanički povezani pogoni sa zupčastim prenosom ... 72
3.2.1 Zupčasti prenos ... 72
3.2.2 Pogon obrtne platforme ... 79
3.3 Primeri za vežbu ... 84
3.4 Literatura ... 84

**4 *Višemotorni pogoni sa izrazito elastičnom osobinom mehaničke veze pogonskih vratila* ... 85**
4.1 Pogoni sa elastično povezanim vratilima preko predmeta obrade ... 85
4.1.1 Paralelno i kaskadno upravljanje po brzini ... 86
4.1.2 Kombinovano upravljanje po brzini i momentu ... 94
4.1.3 Primena opisanih načina upravljanja ... 97
4.1.4 Pogon karton mašine – partija finalne obrade ... 101
4.1.5 Premotač ... 103
4.2 Elastično povezani pogoni preko konstruktivnih elemenata postrojenja ... 114
4.2.1 Pogon karton mašine – partija formera ... 115
4.2.2 Pogon transportera sa gumenom trakom ... 116
4.3 Prilog I ... 126
4.4 Prilog II ... 132
4.5 Primeri za vežbu ... 135
4.6 Literatura ... 135

**5 *Višemotorni pogoni sa izrazito viskoznom osobinom mehaničke veze pogonskih vratila* ... 137**
5.1 Višemotorni pogoni u funkciji plastične deformacije ... 137
5.1.1 Plastična deformacija materijala pomoću višemotornih pogona ... 137
5.2 Višemotorni pogoni sa nezavisnim funkcijama obrade ... 143
5.2.1 Pogon karton mašine – partija presa i sušnih grupa ... 146
5.3 Prilog ... 149
5.4 Primeri za vežbu ... 155
5.4.1 Primer ... 155
5.4.2 Primer ... 155
5.5 Literatura ... 155

**6 *Višemotorni pogoni bez mehaničke veze pogonskih vratila* ... 157**
6.1 Principi upravljanja kod višemotornih pogona čija vratila nisu mehanički povezana ... 157
6.2 Leteće makaze - poprečni rezač ... 161
6.2.1 Poprečni rezač kartona ... 174
6.3 Kontinualan transport komadnog materijala ... 177

6.3.1 Pogon dela linije za proizvodnju keksa ... 179
6.4 Bageri vedričari ... 180
6.5 Kranovi i dizalice ... 185
6.6 Primeri za vežbu ... 194
6.7 Literatura ... 195

7 ***Višemotorni pogoni sa promenljivim osobinama mehaničke veze pogonskih vratila*** ... **197**
7.1 Pogon transporta sa dve gusenice ... 197
7.1.1 Konstrukcija sistema transporta sa dve gusenice ... 198
7.1.2 Osnovne relacije transporta sa dve gusenice ... 199
7.1.3 Struktura upravljačkog sistema pogona transporta sa dve gusenice ... 200
7.1.4 Otpori kretanja pogona transporta sa dve gusenice ... 201
7.1.5 Opšti model pogona transporta sa dve gusenice ... 202
7.1.6 Analiza ponašanja transporta sa dve gusenice na primeru bagera SRs 400 ... 203
7.2 Pogon transporta sa više gusenica ... 206
7.2.1 Konstrukcija transporta sa više gusenica ... 206
7.2.2 Struktura upravljačkog sistema ... 208
7.3 Literatura ... 210

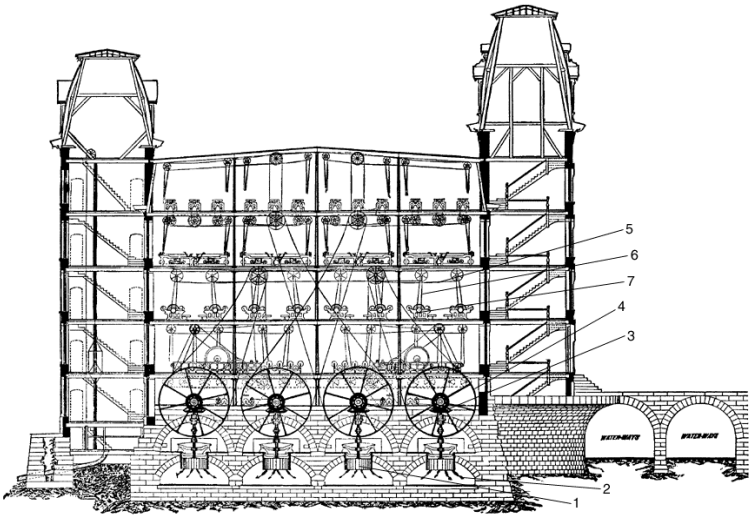
**8** ***Korišćene oznake*** ... **211**
8.1 Opšte napomene ... 211
8.2 Indeksi i eksponenti ... 211
8.3 Simboli ... 211

**9** ***Indeks pojmova*** ... **213**

# 1 Uvod - Opšti pojmovi i definicije

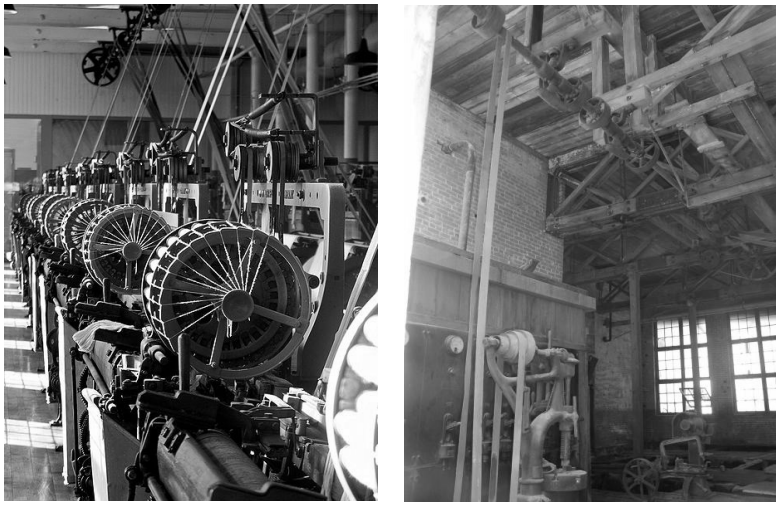
## 1.1 Višemotorni pogoni – potrebe i razvoj

Složeni tehnološki procesi za svoje izvršenje, pored ostalog zahtevaju određenu količinu mehaničke energije, koja će se u toku izvršenja procesa pretvoriti u mehanički rad, radi ostvarenja odgovarajućih kretanja. Mesta vršenja tog rada, odnosno pokretanja mogu biti prostorno raspoređena na različitim lokacijama koje su često udaljene jedna od druge. U fazi rane industrijalizacije, mehanička energija se dobijala pomoću vodenih turbina ili parnih mašina, a njena distribucija u okviru industrijskih procesa, fabrika i postrojenja, do mesta gde je nju trebalo pretvoriti u mehanički rad, bila je skopčana sa nizom teškoća. Sistemi prenosa mehaničke energije bazirali su se na korišćenju dugačkih vratila, tzv. linijskih vratila (*line shaft*), kaiševa i kaišnika, i zupčanika. Na Sl. 1.1.1 prikazano je postrojenje u fabrici za preradu pamuka iz XIX veka. Mehanička energija se dobijala pomoću četiri vodene turbine (1 i 2), i pomoću zupčanika (3), kaišnika (4) i kaiševa prenosila se do linijskih vratila (5) na svakom spratu. Sa linijskog vratila pomoću zasebnih kaiševa (6) i kaišnika mehanička energija se prenosila do pojedinih tekstilnih mašina. Na Sl. 1.1.2 prikazane su dve fotografije koje ilustruju način korišćenja linijskog vratila.

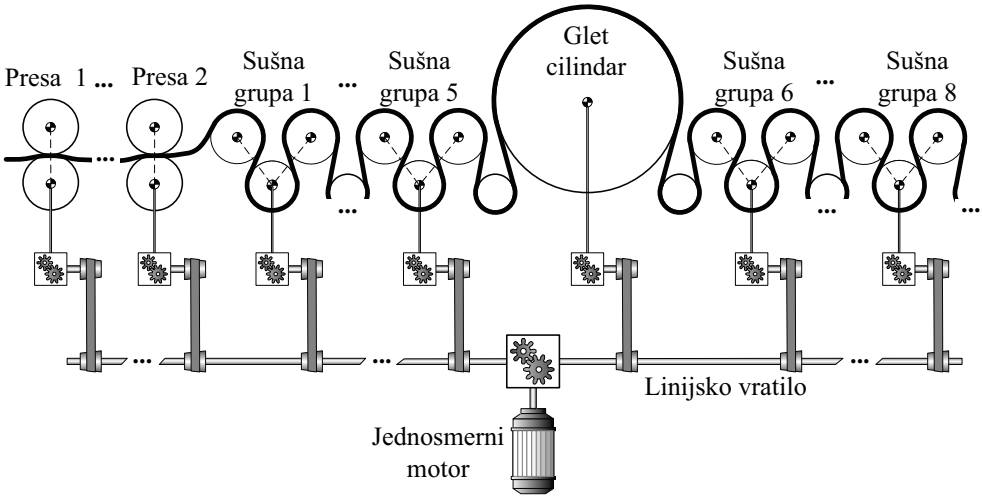



Sl. 1.1.1 Poprečni presek postrojenja za preradu pamuka
Manville, Rhode Island, USA iz 1874.

Razvoj tehnike, naročito elektrotehnike i uvođenje u upotrebu elektromotora učinio je da se opisani glomazni i komplikovani sistemi za prenos mehaničke energije zamene sa jednostavnijim i daleko efikasnijim sistemima prenosa i razvoda električne energije a mehanički rad se ostvarivao na mestu gde je to bilo potrebno pomoću elektromotora. Prvi elektromotorni pogoni bili su skromnih mogućnosti u pogledu upravljanja, tako da su mogli da se koriste u postrojenjima sa jednostavnijim zahtevima, odnosno u okviru tehnoloških procesa gde se nije zahtevala kontinualna koordinacija, odnosno sinhronizacija pojedinih kretanja. Tipični primeri su tkački razboji, mašina za obradu metala, i sl. Međutim, u procesima koji se odvijaju kontinualno, gde se pokretanje mora vršiti na više različitih mesta, i gde se zahteva sinhronizacija rada, električni pogoni bez mogućnosti preciznog upravljanja nisu mogli da zamene sisteme prenosa energije na bazi linijskih vratila. U takvim slučajevima dugi niz godina korišćeno je pokretanje pomoću dugačkih linijskih vratila. Tipični primer su mašine za proizvodnju papira.



Sl. 1.1.2 Linijsko vratilo u predionici (levo) i u alatnici (desno).

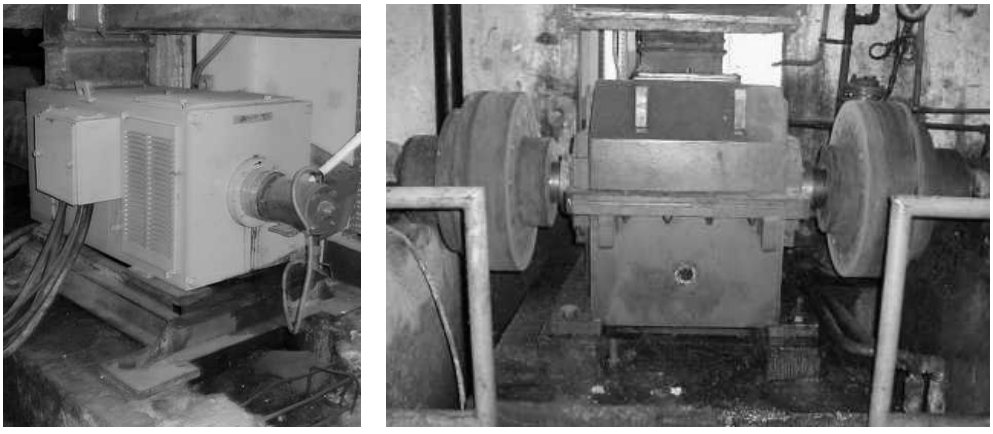



Sl. 1.1.3 Deo linije karton mašine sa pogonom preko linijskog vratila.

Kao ilustracija može da posluži primer karton mašine u fabrici kartona „Umka“ kod Beograda gde je 1969. pušteno u rad postrojenje za proizvodnju kartona, a pokretanje je ostvareno pomoću linijskog vratila dugačkog 100 m, koje je pokretano pomoću jednog jednosmernog motora od 550 kW. Na Sl. 1.1.3 je prikazan raspored pogonskih mesta ukupno 12, i način pokretanja preko linijskog vratila. Na Sl. 1.1.4 su fotografije delova linijskog vratila za pokretanje karton mašine. Pogonski motor se nalazio na sredini vratila, i preko reduktora sa izlazom na dve strane pokretao je linijsko vratilo Sl. 1.1.5. U skladu sa razvojem tehnologije pokretanja i upravljanja, pre svega energetske elektronike i računarskih sistema upravljanja, linijsko vratilo, pogonski motor, kaišnici i kaiševi su zamenjeni sa dvanaest pojedinačnih regulisanih pogona prilikom rekonstrukcije izvedene 2002.



Sl. 1.1.4 Linijsko vratilo za pokretanje karton mašine.



Sl. 1.1.5 Motor i reduktor za pokretanje linijskog vratila.

Nedostaci pokretanja sa linijskim vratilom su brojni [1, 2]:

- motorna jedinica je velika i skupa, te je zbog toga i teško zamenljiva;
- mehanički prenos ima loš stepen iskorišćenja;
- brojni ležajevi su podložni habanju i zahtevaju česte zamene;
- vibracije i buka;
- praksa je pokazala da su troškovi održavanja mehaničkih prenosa izuzetno veliki;
- ovaj način pokretanja predstavlja jedan od značajnih ograničavajućih faktora za povećanje brzine mašina, a time i povećanje kapaciteta;

- usklađivanje rada pojedinih pogonskih celina je teško i sporo, što predstavlja problem kod promene proizvodnog programa;
- nije moguće pojedinačno upravljanje pogonima, npr. kratkotrajno povećanje brzine zbog eliminisanja opuštanja trake;
- nije moguća promena smera obrtanja kod čišćenja nagomilane mase ili papira;
- poremećaji na jednom kraju mašine se usled uvijanja dugačkog vratila prenose na drugi kraj mašine što ima za posledicu kidanje trake.

Naravno postoje i neke dobre strane pokretanja sa linijskim vratilom:

- ako jedan pogon uspori zbog povećanja opterećenja na isti način usporavaju i svi ostali pogoni, tako da ne dolazi do kidanja trake [3];
- raspodela opterećenja između pogona u radu se prirodno ostvaruje preko linijskog vratila, tako da se instalirana snaga optimalno koristi [4];
- proklizavanja i elastičnost koja postoji kod kaiševa, omogućava da se amortizuju udarna opterećenja i izbalansira opterećenje između pogonskih celina koji su u mehaničkoj vezi, preko filca ili prese.

Imajući u vidu navedene nedostatke pokretanja pomoću linijskog vratila, sa pojavom pogona sa mogućnošću regulisanja brzine, postrojenja slična opisanoj karton mašini se realizuju sa pojedinačnim pogonima, za svaku celinu posebno.

## *1.2 Višemotorni pogon - definicija*

Skup više motornih pogona koji pokreću jedan tehnološki proces, odnosno obezbeđuju mehaničku energiju za vršenje potrebnog mehaničkog rada nazivamo *višemotorni pogon*. Ukoliko su pogoni sa elektromotorima onda je to *višemotorni električni pogon*. Kada su pogoni sa mogućnošću upravljanja, ili regulisanja brzine, momenta, ili neke procesne veličine, onda se to naziva *regulisanim višemotornim pogonom*.

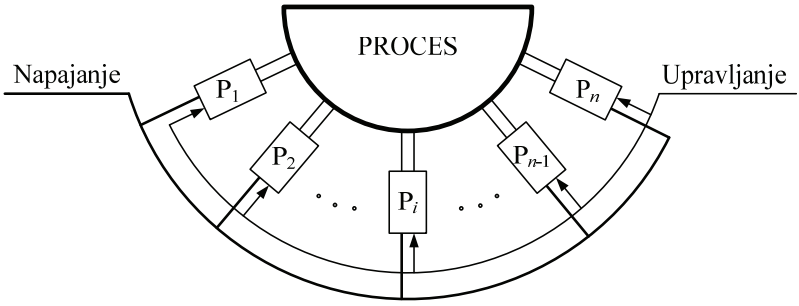
Osnovna osobina svih višemotornih pogona je da su pogoni koji ga čine međusobno funkcionalno povezani kroz tehnološki proces u kome učestvuju, odnosno za čije izvršenje obezbeđuju mehaničku energiju. Pored funkcionalne povezanosti pogona vratila motora u višemotornom pogonu mogu biti povezana i mehanički. Mehanička veza se ostvaruje preko mehaničkih sklopova, vratila, reduktora, kaiševa, lanaca, itd, ali može biti i ostvarena preko materijala koji je predmet obrade u okviru procesa, ingota, limova, papirnih traka, tekstila, različitih fluida, itd.

Električni pogoni u okviru jednog višemotornog električnog pogona se napajaju iz zajedničkog izvora električne energije, što ih dovodi u vezu preko sistema napajanja električnom energijom. Ova povezanost u nekim slučajevima može bitno da utiče na izbor strukture pogona, kao i druge pokazatelje, npr. ukupnu potrošnju energije.

Složeni tehnološki procesi zahtevaju precizno upravljanje procesnim veličinama, odnosno regulaciju procesa u vremenu i prostoru, u čemu pokretači procesa, tj. pogoni imaju značajnu ulogu, ponekad i odlučujuću. Zbog toga pogoni koji se koriste kao pokretači procesa moraju biti regulisani, međutim zbog međusobne koordinacije mora postojati i nadređeni upravljački sistem koji povezuje sve pogone u okviru procesa, a koji je sastavni deo sistema za upravljanje celim procesom. U ovakvim slučajevima pogoni u okviru višemotornog pogona su međusobno povezani i sa strane upravljanja, tj. preko upravljačkog sistema.

Na osnovu izloženog, može se zaključiti da pogoni u sastavu jedne skupine koja čini višemotorni pogon u opštem slučaju mogu biti povezani na četiri načina, kako je to simbolički prikazano na Sl. 1.2.1, a ti načini povezivanja su:

- Kroz proces, ili tehnološki;
- Mehanički;
- Preko izvora za napajanje električnom energijom;
- Preko zajedničkog upravljačkog sistema.



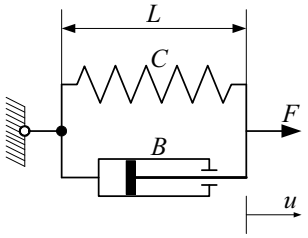

Sl. 1.2.1 Principijelni prikaz povezanosti pogona u sklopu višemotornog pogona.

## *1.3 Povezanost pogona kroz proces*

Prema definiciji višemotornih pogona oni su uvek funkcionalno povezani kroz tehnološki proces u čijem izvršenju učestvuju. Priroda i složenost procesa određuju stepen povezanosti pogona, njihovu funkcionalnu zavisnost u vremenu i prostoru. U svim daljim analizama, opisima, i objašnjenjima višemotornih pogona prvo će se polaziti od ove funkcionalne zavisnosti.

## *1.4 Mehanička povezanost pogona*

Povezanost pogona kroz tehnološki proces u velikom broju slučajeva praćena je i mehaničkom vezom između pogona, preciznije mehaničkom vezom između vratila njihovih motora. Mehanička veza ostvaruje se preko čvrstih tela, ili tela čije su fizičke osobine bliske osobinama čvrstih tela. U procesu ovi materijali su izloženi dejstvu mehaničkih sila koje su posledica rada pogona. Po zakonu akcije i reakcije uspostavljaju se i sile reakcije koje deluju na pogone, odnosno između pogona. Sva čvrsta tela pod dejstvom spoljnih sila se naprežu usled čega dolazi do privremenih (elastičnih) deformacija, ili trajnih (plastičnih) deformacija. Priroda i veličina deformacije zavise od dve bitne osobine materijala, elastičnosti i viskoznosti. Za izvođene potrebnih relacija koje određuju međusobnu zavisnost između spoljnih sila i materijala može da nam posluži Kelvin-Voigt-ov model [5]. Konačno mali element materijala se može predstaviti pomoću ovog modela kao što je prikazano na Sl. 1.4.1.




Sl. 1.4.1 Kelvin-Voigt-ov model.

Jednačine koje predstavljaju matematički model Kelvin-Voigt-ovog elementa su:

$$f = f_c = C \cdot u + B \cdot \frac{du}{dt} \tag{1.4.1}$$

$$C = \frac{E \cdot A}{L} \tag{1.4.2}$$

$$B = \frac{\eta \cdot A}{L} \tag{1.4.3}$$

gde su:

$f$ – sila koja deluje na element predstavljen modelom na Sl. 1.4.1 [N];
$f_c$ – sila usled naprezanja-deformacije materijala [N];
$E$ – Young-ov modul elastičnosti materijala [N/m$^2$];
$\eta$ – koeficijent viskoznosti materijala [N·s/m$^2$];
$u$ – promena dužine elementa [m];
$L$ – dužina elementa merena duž ose delovanja sile [m];
$A$ – površina preseka elementa upravno na osu delovanja sile [m$^2$];
$C$ – konstanta elastičnosti elementa [N/m];
$B$ – konstanta viskoznosti elementa [N·s/m].

U gornjem spisku korišćenih oznaka u uglastim zagradama su date jedinice u kojima se izražavaju navedene veličine u SI sistemu jedinica i mera.

Young-ov modul ($E$) i koeficijent viskoznosti ($\eta$) su karakteristike materijala. Na osnovu izraza (1.4.1) i (1.4.3) sledi da konstante elastičnosti ($C$) i viskoznosti ($B$) zavise i od karakteristike materijala, i od geometrijskog oblika, odnosno dimenzija elementa. Posmatrajmo sistem koji čine dva tela masa $M_1$ *i* $M_2$, i koja se kreću brzinama $v_1$ i $v_2$ respektivno, a koji je prikazan na Sl. 1.4.2. Ova dva tela su mehanički povezana preko štapa dužine $L$ i površine poprečnog preseka $A$, sa zanemarljivom masom u odnosu na mase tela. Na svako telo deluje po jedna spoljna sila $f_1$ i $f_2$, a otpori njihovom kretanju su $f_{m1}$ i $f_{m2}$ respektivno. Skup jednačina koje opisuje kretanje u opisanom sistemu predstavljen je sa (1.4.4) do (1.4.9).

$$M_1 \frac{dv_1}{dt} = f_1 - f_{c1} - f_{m1} \tag{1.4.4}$$

$$M_2 \frac{dv_2}{dt} = f_2 - f_{c2} - f_{m2} \tag{1.4.5}$$

$$\frac{du_1}{dt} = v_1 \tag{1.4.6}$$

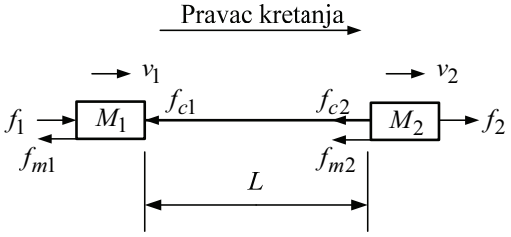
$$\frac{du_2}{dt} = v_2 \tag{1.4.7}$$

$$f_{c1} = C_{12}(u_1 - u_2) + B_{12}(v_1 - v_2) \tag{1.4.8}$$

$$f_{c2} = C_{21}(u_2 - u_1) + B_{21}(v_2 - v_1) \tag{1.4.9}$$

U jednačinama od (1.4.4) do (1.4.9) korišćene su sledeće oznake:

| | |
|---|---|
| $u_1$ i $u_2$ | pređeni putevi tela; |
| $v_1$ *i* $v_2$ | brzine tela; |
| $f_{c1}$ i $f_{c2}$ | sile usled naprezanja, deformacije štapa; |
| $C_{12}$ i $C_{21}$ | konstanta elastičnosti štapa; |
| $B_{12}$ i $B_{21}$ | konstanta viskoznosti štapa. |



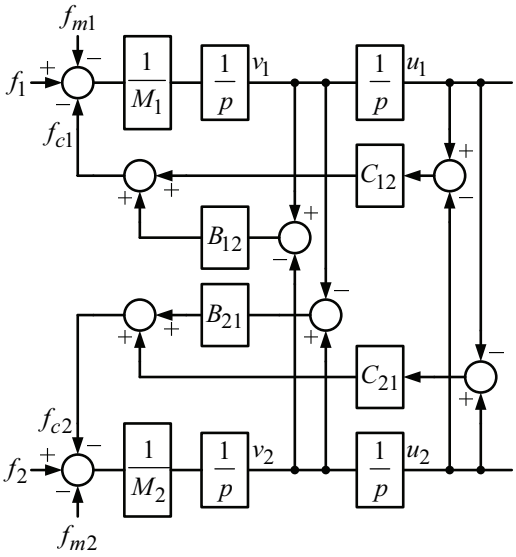

Sl. 1.4.2 Sistem dva tela u mehaničkoj vezi.

Diferencijalne jednačine (1.4.4) i (1.4.5) su Njutnove jednačine za pravolinijsko kretanje. Algebarske jednačine (1.4.8) i (1.4.9) definišu sile u materijalu koje nastaje pri njegovom naprezanju po osi kretanja sistema, a koje su definisane pomoću Kelvin-Voigt-ovog modela (1.4.1). Ove sile su srazmerne promeni dužine štapa koji povezuje tela, tj. razlici pređenih puteva posmatranih tela. Takođe, srazmerne su razlici brzina posmatranih tela. Konstante elastičnosti i viskoznosti u opštem slučaju mogu zavisiti od smera delovanja sila, međutim kod homogenih tela ovo nije slučaj, tako da se može napisati:

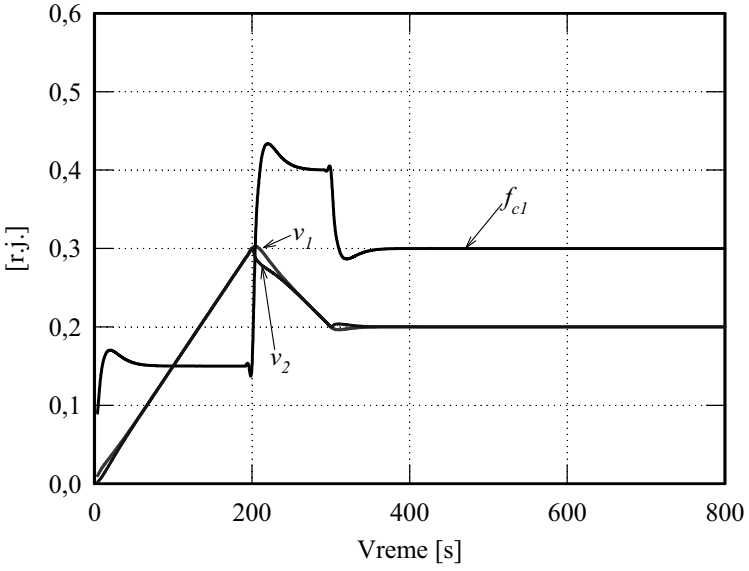
$$C_{12} = C_{21} = C \quad \text{i} \quad B_{12} = B_{21} = B \tag{1.4.10}$$

Strukturni blok dijagram opšteg matematičkog modela sistema prikazanog na Sl. 1.4.2 koji je dat izrazima od (1.4.4) do (1.4.9) prikazan je na Sl. 1.4.3.

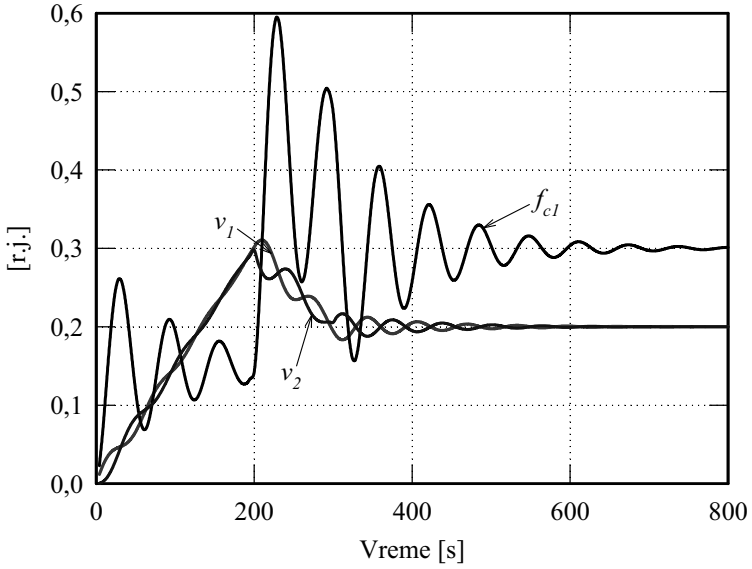
Na Sl. 1.4.4 i Sl. 1.4.5 prikazane su trenutne vrednosti karakterističnih veličina sistema prikazanog na Sl. 1.4.2, u toku procesa koji nastaje kada u početnom trenutku na prvo telo počinje da deluje pogonska sila $f_1$=0,8 r.j. (relativnih jedinica), i otporna sila $f_{m1}$=0,5 r.j. U $t_1$=200 s počinje da deluje sila $f_{m2}$=0,5 r.j., a u $t_2$=300 s počinje da deluje sila $f_2$=0,2 r.j. U toku prvih 200 s oba tela ubrzavaju jer je pogonska sila veća od otporne sile, s tim što drugo telo ubrzava pod dejstvom sile $f_{c2}$ koja se preko štapa prenosi sa prvog tela. Između $t_1$ i $t_2$ oba tela usporavaju, jer su ukupni otpori kretanja veći od pokretačke sile. Posle $t_2$ ukupna pokretačka sila je jednaka ukupnoj otpornoj sili, zbog čega su brzine tela stalne. Sile $f_{c1}$ i $f_{c2}$ su jednake ali suprotnog znaka. U prelaznim stanjima pri većoj vrednosti konstante viskoznosti promene ove sile su aperiodične, a pri manjoj vrednosti su oscilatorno-prigušene.




Sl. 1.4.3 Strukturni blok dijagram modela sistema sa Sl. 1.4.2.

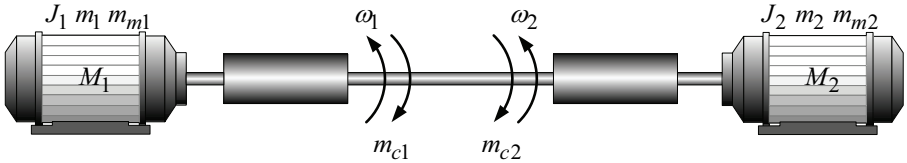



Sl. 1.4.4 Trenutne vrednosti brzina i sile $f_{c1}$ u štapu, za $C$=0,5 r.j., $B$=10 r.j.




Sl. 1.4.5 Trenutne vrednosti brzina i sile $f_{c1}$ u štapu, za $C$=0,5 r.j. i $B$=1 r.j.

U elektromotornim pogonima mnogo češće se analiziraju obrtna kretanja nego pravolinijska. Po analogiji sa izvedenom analizom za dva tela koja se kreću pravolinijski, mogu se postaviti relacije za dva pogona koja su spojena dugačkim vratilom, kod koga dolazi do uvijanja, tako da se pri analizi moraju uzeti u obzir elastičnost i viskozitet vratila. Uprošćeni prikaz ovakvog sistema je na Sl. 1.4.6.




Sl. 1.4.6 Dva pogona spojena dugačkim vratilom.

Ako zanemarimo inerciju vratila mogu se napisati relacije od (1.4.11) do (1.4.16) koje predstavljaju opšti matematički model sistema prikazanog na Sl. 1.4.6.

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = m_1 - m_{c1} - m_{m1} \tag{1.4.11}$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = m_2 - m_{c2} - m_{m2} \tag{1.4.12}$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1 \tag{1.4.13}$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2 \tag{1.4.14}$$

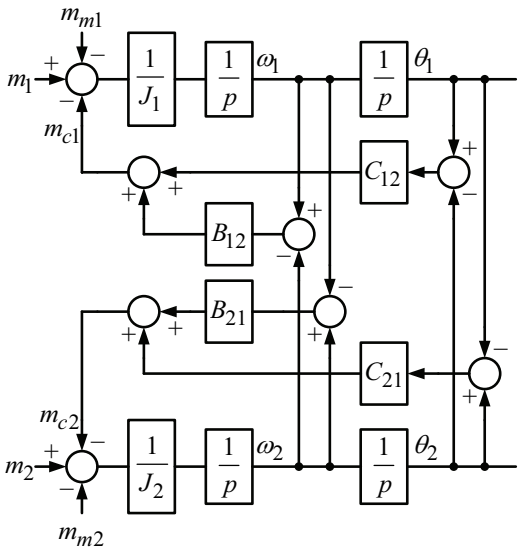
$$m_{c1} = C_{12}(\theta_1 - \theta_2) + B_{12}(\omega_1 - \omega_2) \tag{1.4.15}$$

$$m_{c2} = C_{21}(\theta_2 - \theta_1) + B_{21}(\omega_2 - \omega_1) \tag{1.4.16}$$

U jednačinama od (1.4.11) do (1.4.16) korišćene su sledeće oznake:

| | |
|---|---|
| $J_1$ i $J_2$ | momenti inercije; |
| $m_1$ i $m_2$ | momenti motora; |
| $m_{m1}$ i $m_{m2}$ | otporni momenti; |
| $m_{c1}$ i $m_{c2}$ | momenti usled naprezanja, deformacije dugačkog vratila; |
| $\theta_1$ i $\theta_2$ | uglovi koji određuju trenutni položaj vratila pogona 1 i 2; |
| $\omega_1$ i $\omega_2$ | trenutne ugaone brzine; |
| $C_{12}$ i $C_{21}$ | konstante elastičnosti vratila; |
| $B_{12}$ i $B_{21}$ | konstante viskoznosti vratila. |

Strukturni blok dijagram matematičkog modela sistema prikazanog na Sl. 1.4.6, koji je dat izrazima od (1.4.11) do (1.4.16) prikazan je na Sl. 1.4.7.




Sl. 1.4.7 Strukturni blok dijagram modela sistema sa Sl. 1.4.6.

Koristeći se analogijom potreban sistem jednačina za slučaj $n$ pogona koji su mehanički povezani moglo bi se u opštem slučaju napisati:

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = m_i - m_{ci} - m_{mi} \quad i = 1 \cdots n \tag{1.4.17}$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \quad i = 1 \cdots n \tag{1.4.18}$$

Da bi se uvažio međusobni uticaj pogona, odnosno definisao moment usled naprezanja materijala, tj. sredine preko koje se ostvaruje uticaj jednog pogona na drugi definisaćemo vektore promenljivih, momenata $\vec{m}_c$, brzina $\vec{\omega}$ i pozicija $\vec{\theta}$, kao i matrice konstanti elastičnosti $\mathbf{C}$ i viskoznosti $\mathbf{B}$.

$$\vec{m}_c = \left[ m_{ci} \right], \quad \vec{\omega} = \left[ \omega_i \right], \quad \vec{\theta} = \left[ \theta_i \right] \quad i = 1 \cdots n$$

$$\mathbf{C} = \left[ C_{i,k} \right], \quad \mathbf{B} = \left[ B_{i,k} \right] \quad i = 1 \cdots n, \quad k = 1 \cdots n$$

Sada se može napisati za $i = 1 \cdots n$:

$$\vec{m}_c = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} C_{1,i} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & & \cdots & 0 & \sum_{i=1}^{n} C_{n,i} \end{bmatrix} \cdot \vec{\theta} - \mathbf{C} \cdot \vec{\theta} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} B_{1,i} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & & \cdots & 0 & \sum_{i=1}^{n} B_{n,i} \end{bmatrix} \cdot \vec{\omega} - \mathbf{B} \cdot \vec{\omega} \tag{1.4.19}$$

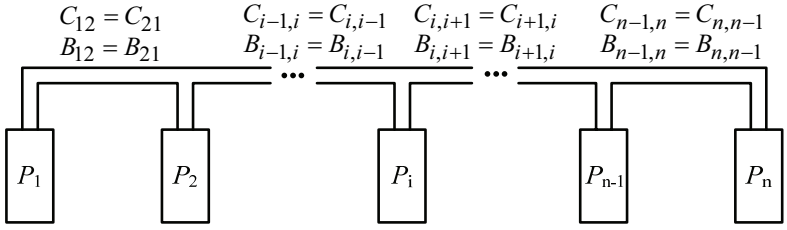
Važno je napomenuti da su zbog lakšeg predstavljanja potrebnih relacija uvedene i konstante $C_{i,k}$ i $B_{i,k}$ gde je $i=k$. Vrednosti ovih konstanti nemaju praktičnog značaja, jer se prema postavljenoj relaciji (1.4.19) one množe sa nulom (1.4.20), tako da se za vrednosti tih konstanti može staviti proizvoljan broj.

$$\theta_i - \theta_i = 0, \quad \omega_i - \omega_i = 0 \quad i = 1 \cdots n \tag{1.4.20}$$

Napisane relacije od (1.4.17) do (1.4.19) deluju vrlo komplikovano, ali treba imati u vidu da u realnim slučajevima ne postoji tako složena situacija kod koje postoji mehanička povezanost između svih pogona u sistemu, kao i da se u većini slučajeva mehanička povezanost ostvaruje preko homogenih materijala tako da važi:

$$C_{i,k} = C_{k,i} \quad i \quad B_{i,k} = B_{k,i} \quad i = 1 \cdots n, \quad k = 1 \cdots n \tag{1.4.21}$$

Da bi pokazali kako izgleda jedan realan slučaj povezanosti pogona u okviru sistema višemotornog pogona uzećemo primere kod koga je $n$ pogona u nizu, tako da su samo susedni pogoni mehanički povezani, kao što je prikazano na Sl. 1.4.8. Izraz (1.4.19) za posmatrani slučaj može se napisati u formi (1.4.22), pri čemu je većina elemenata matrica **C** i **B** jednaka nuli, osim onih koji su definisani sa (1.4.23), naravno uz uslov definisan sa (1.4.21).




Sl. 1.4.8 Višemotorni pogon sa $n$ pogona u nizu.

$$\vec{m}_c = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{2} C_{1,i} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & & \cdots & 0 & \sum_{i-1}^{n} C_{n,i} \end{bmatrix} \cdot \vec{\theta} - \mathbf{C} \cdot \vec{\theta} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{2} B_{1,i} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & & \cdots & 0 & \sum_{i-1}^{n} B_{n,i} \end{bmatrix} \cdot \vec{\omega} - \mathbf{B} \cdot \vec{\omega} \tag{1.4.22}$$

$$C_{i+1,i} \neq 0 \quad C_{i,i+1} \neq 0 \quad \text{i} \quad B_{i+1,i} \neq 0 \quad B_{i,i+1} \neq 0 \quad i = 1 \cdots n \tag{1.4.23}$$

Matrice **C** i **B** su date sa (1.4.24) i (1.4.25).

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & 0 & & & & & 0 & 0 & 0 \\ C_{2,1} & C_{2,2} & C_{2,3} & & \cdots & & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & & \vdots & & & & & \\ & & & C_{i,i-1} & C_{i,i} & C_{i,i+1} & & & & \\ & & & & \vdots & & & & & \\ & & & & 0 & & C_{n-1,n-2} & C_{n-1,n-1} & C_{n-1,n} & \\ 0 & 0 & \cdots & & 0 & & 0 & C_{n,n-1} & C_{n,n} & \end{bmatrix} \tag{1.4.24}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{1,1} & B_{1,2} & 0 & & & & & 0 & 0 & 0 \\ B_{2,1} & B_{2,2} & B_{2,3} & & \cdots & & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & & \vdots & & & & & \\ & & & B_{i,i-1} & B_{i,i} & B_{i,i+1} & & & & \\ & & & & \vdots & & & & & \\ & & & & 0 & & B_{n-1,n-2} & B_{n-1,n-1} & B_{n-1,n} & \\ 0 & 0 & \cdots & & 0 & & 0 & B_{n,n-1} & B_{n,n} & \end{bmatrix} \tag{1.4.25}$$

Na osnovu ranije izloženog, fizička povezanost pogona kroz proces u okviru jednog višemotornog pogona, ostvaruje se preko različitih mehaničkih elemenata, kao što su vratila, osovine, lanci i lančanici, kaiševi i kaišnici, i sl., ili preko materijala koji je predmet obrade. Ako se ograničimo na posmatranje samo radnih režima u kojima ne dolazi do trajnih oštećenja, ili uništenja elemenata preko kojih se ostvaruje ova povezanost pogona, može se napraviti podela načina fizičke povezanosti pogona kroz proces kao što je prikazano u tabeli 1.1. Konstante elastičnosti ($C$), i viskoznosti ($B$) nam definišu izvršenu podelu. Radi pojašnjenja izvršene podele može se napraviti sledeća analiza. Ako konačno velikom silom $f$ delujemo na jedan kraj štapa zanemarljive mase u pravcu njegove podužne ose u smeru istezanja, i ako je drugi kraj štapa čvrsto vezan za oslonac, kao što je prikazano na Sl. 1.4.9. dolazi do njegovog istezanja. Koristeći se izrazima od (1.4.1) do (1.4.3) može se napisati linearna diferencijalna jednačina (1.4.26).

$$f = f_c = C \cdot u + B \cdot \frac{du}{dt} \tag{1.4.26}$$

Rešavanjem jednačine (1.4.26) po promenljivoj $u$, gde je to promena dužine štapa, dobija se (1.4.27), gde je $T$ vremenska konstanta definisana sa (1.4.28).

$$u = \frac{f}{C}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \tag{1.4.27}$$

$$T = \frac{B}{C} = \frac{\eta}{E}. \tag{1.4.28}$$

Konačna vrednost promene dužine štapa određena je sa (1.4.29).

$$\lim_{t\to\infty} u = \frac{f}{C} \tag{1.4.29}$$

Ukoliko $C \to 0$ tada se jednačina (1.4.26) može napisati u obliku predstavljenim sa (1.4.30).

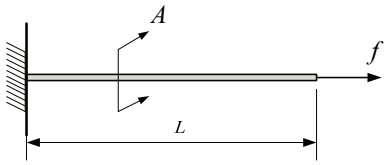
$$f = f_c = B\frac{du}{dt} \tag{1.4.30}$$

Rešavanjem (1.4.30) dobija se zavisnost (1.4.31).

$$u = \frac{f}{B}t \tag{1.4.31}$$

Na osnovu izvedene analize, odnosno relacija od (1.4.26) do (1.4.31) mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. U slučaju da $C \to \infty$ tada $u \to 0$, odnosno nema promene dužine, i tada se štap može smatrati apsolutno krutim.
2. U slučaju da $C$ ima neku realnu vrednost dolazi do elastične deformacije štapa, odnosno konačnog izduženja određenog sa (1.4.29). Parametri materijala $E$ i $\eta$, odnosno $T$ određuju vreme trajanja procesa istezanja.
3. Ukoliko $C \to 0$ nastupa plastična deformacija štapa, odnosno njegovo kontinualno izduženje u vremenu.




Sl. 1.4.9 Štap izložen dejstvu mehaničke sile.

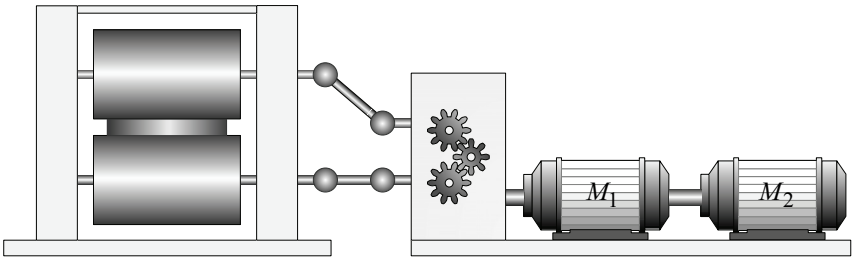
Na bazi izvedene analize su sistematizovane, i u tabeli 1.1 opisno prikazane moguće fizičke povezanosti pogona.

Tabela 1.1

| ***Vrsta mehaničke povezanosti pogona*** | ***Opis*** |
|---|---|
| Kruta veza | • Ne postoje promene u dimenzijama materijala preko koga je ostvarena povezanost.<br>• Konstanta elastičnosti se može smatrati jako velikom ($\rightarrow\infty$). |
| Elastična veza | • Postoji promena u dimenzijama materijala preko koga je ostvarena fizička povezanost, ali ona nije trajna.<br>• Konstanta elastičnosti ima konačnu vrednost.<br>• Konstanta viskoznosti može da ima različite vrednosti, i u većoj ili manjoj meri utiče na prelazne procese. |
| Plastična veza | • Promene u dimenzijama materijala preko koga je ostvarena fizička povezanost su trajne.<br>• Konstanta elastičnosti ima zanemarljivu vrednost.<br>• Konstanta viskoznosti bitno utiče na proces deformacije. |
| Pogoni koji nisu mehanički povezani | Kod ovih pogona ne postoji nekakav fizički uticaj jednog pogona na drugi. |
| Veza promenljive strukture | U toku izvršenja procesa dolazi do promene prirode mehaničke povezanosti pogona. |

### *1.4.1 Kruta veza*

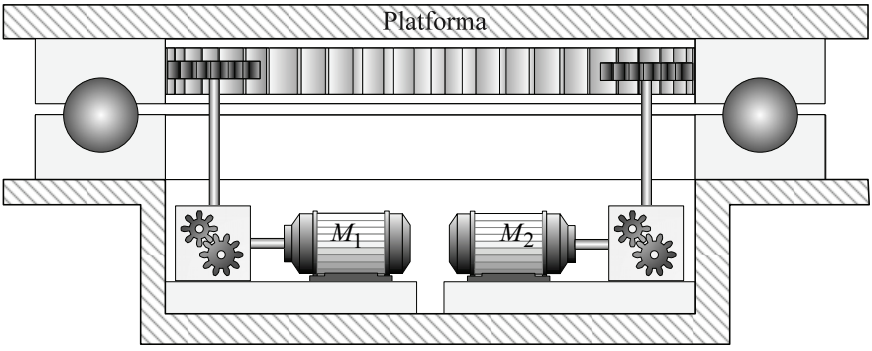
*Krutu vezu pogona* srećemo u slučajevima gde postoji potreba za većom instaliranom snagom pogona, a zbog konstruktivnih razloga se mora koristiti više pogonskih jedinica. Tipičan primer je pogon velikih valjaoničkih stanova gde se pogon ostvaruje sa dva motora na istom vratilu Sl. 1.4.10. Zbog male dužine vratila koje spaja motore konstanta elastičnosti teži velikoj vrednosti.




Sl. 1.4.10 Pogon valjaoničkog stana sa dva motora.

Drugi karakterističan primer ovakvog pogona je pogon kružnog kretanja platforme rotacionih bagera, kakvi se koriste na površinskim kopovima. Platforma se oslanja na donji deo bagera, preko horizontalno postavljenog aksijalnog kugličnog ležaja, prečnika od 10 do 20 m, u zavisnosti od veličine bagera. Okretanje platforme oko vertikalne ose, ostvaruje se preko sistema zupčanika, od kojih je veći zupčanik (čiji je prečnik istog reda veličine kao i prečnik ležaja) postavljen na platformi, a manji zupčanici su na vratilima pogonskih motora, ili odgovarajućih reduktora. Princip opisanog pokretanja prikazan je na Sl. 1.4.11. Da bi se platforma bagera pri okretanju zadržala u vertikalnoj osi, pogon mora da se ostvari sa dva, ili tri pogonska motora, raspoređena po obodu velikog zupčanika [6]. Kod ovakvih pogona zbog

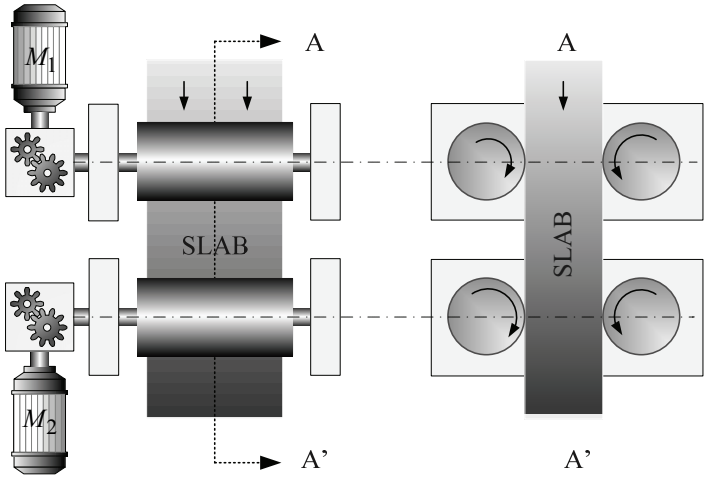
velikog koraka zubaca dolazi do izražaja i pojava zazora između zubaca, o čemu će biti više reči u jednom od narednih poglavlja.



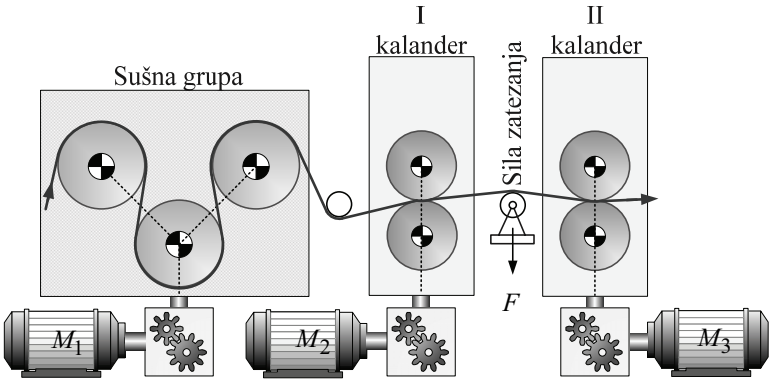

Sl. 1.4.11 Pogon obrtne platforme.

### *1.4.2 Elastična veza*

*Elastično povezani pogoni* su pogoni koji su povezani preko ekstremno dugih vratila, lanaca ili kaiševa, gde uvijanje i istezanje dolazi do izražaja. Međutim, sa praktične tačke gledišta, mnogo interesantniji su pogoni kod kojih je mehanička veza ostvarena preko materijala koji se obrađuje, trake, cevi, slabova u čeličanama, preko lima u hladnim valjaonicama, papira ili kartona kod papir mašina. Na Sl. 1.4.12 prikazan je principijelni raspored pogona u pogonu vertikalnog konti-liva za izlivanje slabova u čeličanama [7]. U završnim fazama formiranja papira i kartona kod papir mašina, kada je traka već suva i čvrsta, pogoni koji pokreću mašinu su u elastičnoj vezi preko trake. Na Sl. 1.4.13 prikazan je principijelan raspored pogona u ovoj fazi izrade papira [4, 8].



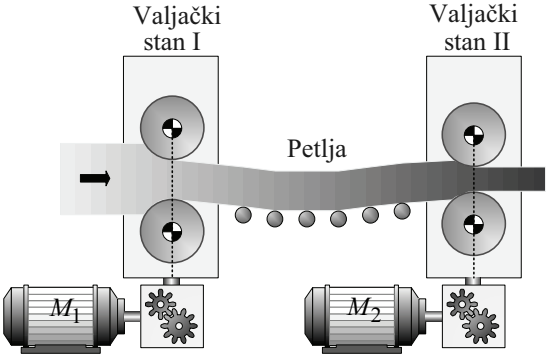

Sl. 1.4.12 Pogon konti-liva.



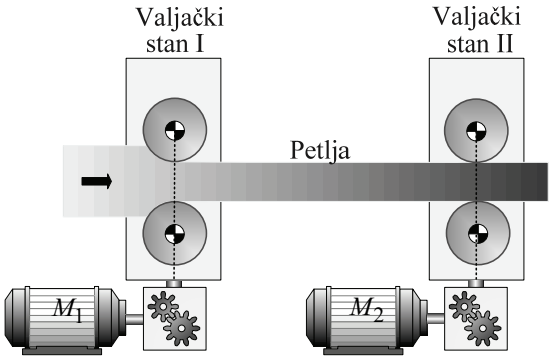

Sl. 1.4.13 Pogon papir mašine u sekciji sa suvom trakom.

### *1.4.3 Plastična veza*

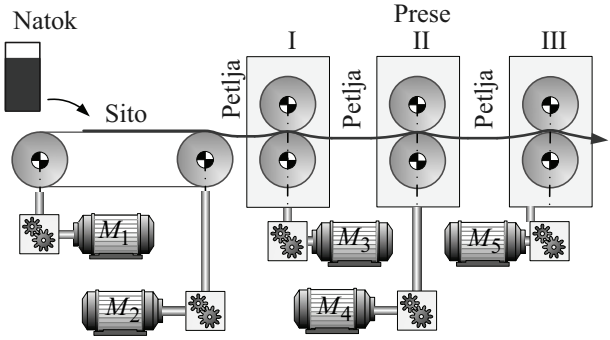
*Plastično povezani pogoni* se mogu smatrati pogoni kod kojih je mehanička veza ostvarena preko materijala koji se obrađuje, i koji se u toku obrade plastično deformiše. Na primer, pogoni za valjanje u toplim valjaonicama, gde se obrada vrši presovanjem, bez, ili sa istezanjem, ili pogoni papir mašina u početnim fazama izrade papira, dok je traka veoma vlažna. Na Sl. 1.4.14 prikazana je principijelna šema pogona za toplo valjanje bez istezanja koje čine dva valjačka stana, a na Sl. 1.4.15. pogon toplog valjanja sa istezanjem. Na Sl. 1.4.16 prikazana je sekcija papir mašine u fazi formiranja trake, u procesu ceđenja vode presovanjem. U toj fazi traka je jako vlažna i meka, pa ne sme da trpi nikakva podužna naprezanja.




Sl. 1.4.14 Postrojenje za valjanje presovanjem, bez istezanja.



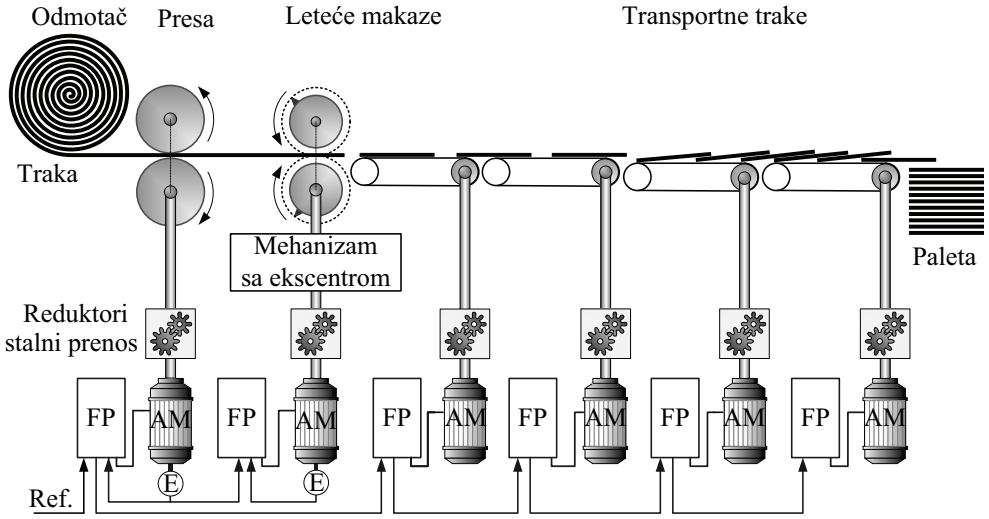

Sl. 1.4.15 Postrojenje za valjanje sa istezanjem.




Sl. 1.4.16 Pogon papir mašine u sekciji formiranja trake.

### *1.4.4 Mehanički nepovezani pogoni*

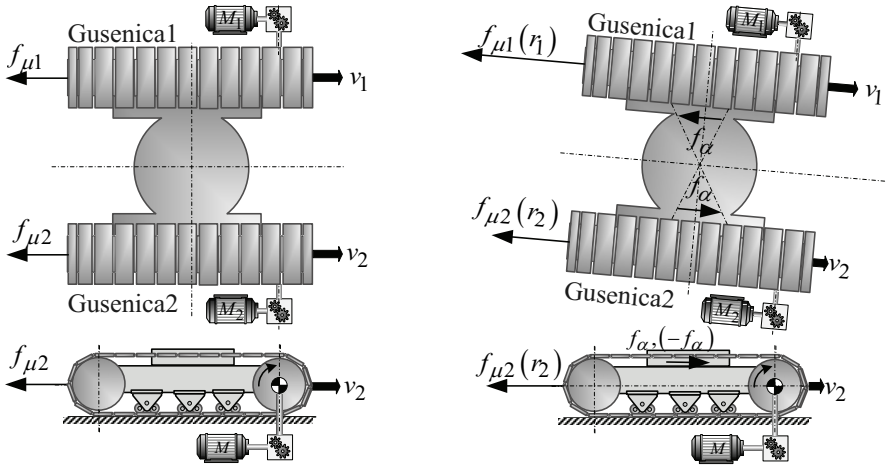
*Pogoni koji nisu mehanički povezani* kao što je već rečeno su pogoni u sastavu jednog procesa, i međusobno su povezani funkcionalno. Tipičan primer je postrojenje za kontinualno poprečno sečenje traka, tzv. leteće makaze, čiji je princip rada prikazan na Sl. 1.4.17 [9, 10]. Prvi u nizu pogona letećih makaza je pogon prese, koji željenom brzinom odmotava traku sa rolne i uvlači je između valjaka na kojima se nalaze noževi makaza. Teorijski gledano, ova dva pogona su u mehaničkoj vezi preko materijala, samo za vreme dok noževi seku materijal, međutim ako se sečenje pravilno izvršava praktično trenutnim razdvajanjem materijala na mestu sečenja, pogoni su realno nepovezani. Ostali pogoni na Sl. 1.4.17, pogoni traka, moraju takođe biti pravilno sinhronizovani radi slaganja odsečenih komada, međutim ni kod njih ne postoji mehanička povezanost. U ovu grupu višemotornih pogona mogu se svrstati pogoni dizalica i kranova, pogoni bagera za diskontinualno kopanje, sistema za transport komada ili paketa, itd.




Sl. 1.4.17 Pogon letećih makaza.
FP – frekventni pretvarač, AM – asinhroni motor.

### *1.4.5 Mehanička veza promenljive strukture*

*Pogoni sa promenljivom strukturom mehaničke povezanosti* su pogoni koji su u pojedinim fazama rada postrojenja, ili odvijanja procesa povezani na jedan od navedenih načina, a u nekim drugim fazama su povezani na drugi način. Na primer, kod papir mašine u toku pripreme za rad, odnosno proizvodnju, pogoni su mehanički nepovezani, ali tehnologija rada u tim periodima zahteva odgovarajuće odnose brzina pogona. Kada se uspostavi proizvodnja, odnosno papirna traka se provuče između valjaka kroz mašinu, između pojedinih grupa pogona uspostavlja se odgovarajuća mehanička veza zavisno od dela u procesu. Drugi karakterističan primer je pogon transporta sa gusenicama sa zasebnim elektromotornim pogonima za svaku gusenicu. Na primer, kod bagera se dve gusenice sa zasebnim pogonima, pri kretanju na pravcu obe gusenice, odnosno oba pogona moraju da imaju iste brzine. U tom režimu nema nikakvog uticaja jednog pogona na drugi. Međutim, kod kretanja kroz krivinu brzine gusenica, a time i pogona, moraju da budu različite. Usled toga, uspostavlja se mehanička veza između pogona gusenica preko konstrukcije mašine, zbog čega dolazi do uvijanja konstrukcije oko njene vertikalne ose. Ovo uvijanje konstrukcije prouzrokuje dodatne komponente opterećenja na pogonima gusenica, na spoljnoj gusenici opterećenje se povećava, a na unutrašnjoj opterećenje se smanjuje. Na Sl. 1.4.18 prikazano je kako deluju sile na gusenice kod pogona transporta sa dve gusenice. Na pravcu deluje po jedna sila na svaku gusenicu kao posledica otpora kretanja ($f_{\mu 1}$ i $f_{\mu 2}$). Ove sile mogu da budu različite, ali zbog istih brzina ne postoji nikakav uticaj jednog pogona na drugi. Kod kretanja kroz krivinu usled proklizavanja gusenica nastaje jedno dodatno trenje koje je zavisno od poluprečnika krivine ($r$), tako da je ukupna sila otpora kretanja sada $f_{\mu 1}(r_1)$ i $f_{\mu 2}(r_2)$. Takođe, zbog uvijanja konstrukcije javljaju se dve sile suprotnog smera koje deluju na gusenice ($+f_\alpha$ i $-f_\alpha$).




Sl. 1.4.18 Prikaz dejstva sila kod transporta sa dve gusenice na pravcu (levo), i u krivini (desno).

## *1.5 Povezanost pogona preko izvora za napajanje električnom energijom*

Višemotorni električni pogon, odnosno sistem pogona koji ga čine po pravilu se napaja električnom energijom iz jednog zajedničkog izvora napajanja, kao što je prikazano na Sl. 1.2.1. Tri osnovna aspekta koja se moraju razmotriti kada je napajanje električnom energijom u pitanju su:

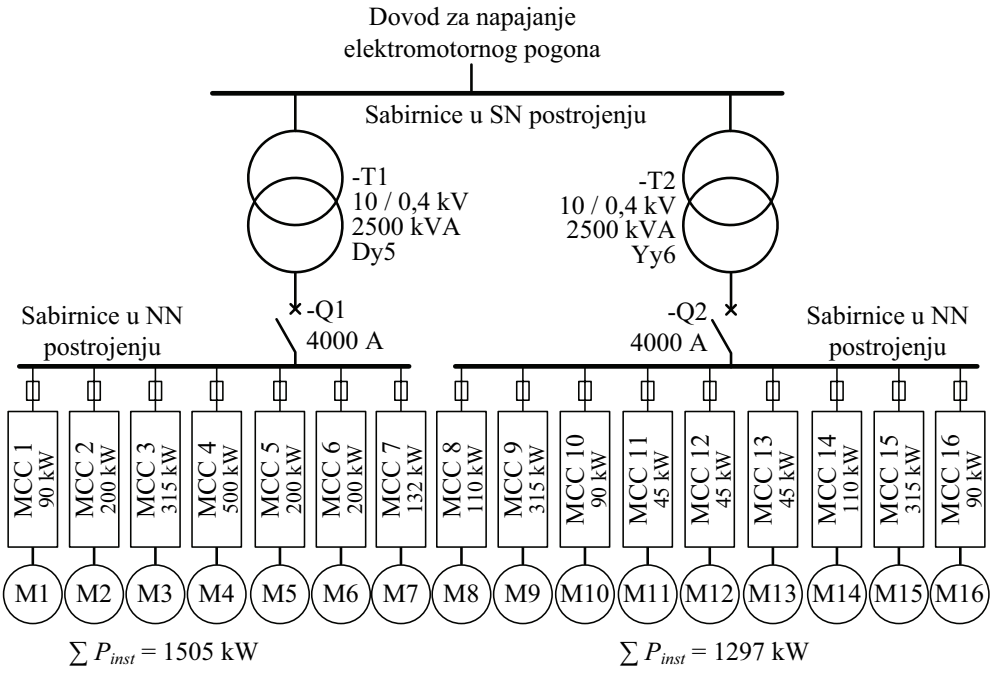
- Pouzdanost – kvalitet napajanja.
- Kvalitet potrošnje električne energije.
- Racionalizacija potrošnje električne energije unutar višemotornog pogona, odnosno procesa u kome se pogon koristi.

Pouzdanost napajanja električnom energijom u mnogome zavisi od konfiguracije mreže za napajanje. Sistem pogona koji čine jedan višemotorni pogon može biti smešten na jednom relativno malom prostoru, i u takvim slučajevima napajanje se vrši sa jednih sabirnica, relativno kratkim kablovskim linijama. Ako izuzmemo probleme u napajanju koji mogu nastati u distributivnoj mreži, jedini problem koji se može javiti u napajanju je pad napona na dovodnom vodu do sabirnica kod povećanog opterećenja, na primer kada se svi pogoni pokreću istovremeno. Kod postrojenja kakve su linije za proizvodnju papira, čije dužine mogu da budu i preko 200 m, gde broj pogona prelazi nekoliko desetina, za napajanje motora koriste se različiti tipovi pretvarača, a ukupna dužina kablova od pretvarača do motora može da bude i nekoliko kilometara, mogu da se jave problemi sa kapacitivnim strujama. Karakterističan primer za ovo je i pogon duvaljki kod tunelskih peći gde se preko stotinu motora napaja iz zasebnih pretvarača [11]. Ovom pitanju treba posvetiti pažnju kod projektovanja postrojenja, uz uvažavanje preporuka proizvođača pretvarača, i korišćenjem specijalnih oklopljenih (širmovanih) energetskih kablova.

Kada se koriste neregulisani elektromotorni pogoni za potrebe višemotornih pogona, to su po pravilu asinhroni motori, tako da ukupan faktor snage postrojenja može da bude mali. U takvim slučajevima obavezno se moraju koristiti uređaji za popravku faktora snage.

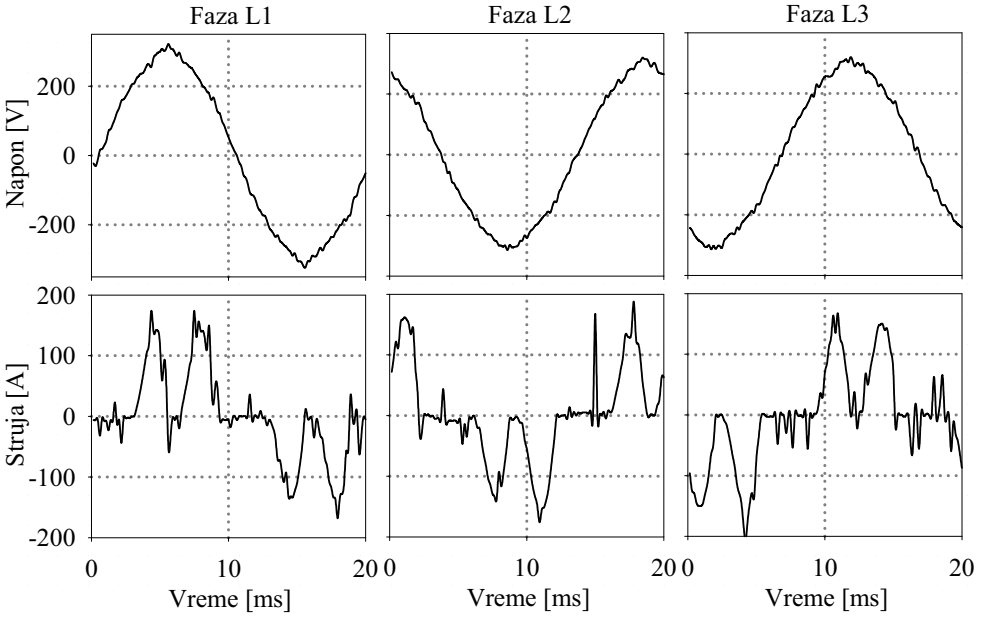
Takođe, treba voditi računa koliko je to god moguće, odnosno koliko tehnološki proces dozvoljava da se izbegnu velika vršna opterećenja, koja mogu nastati kada se veći broj motora pokreće istovremeno.

Višemotorni pogoni, koje čini veći broj regulisanih pogona, koriste za napajanje motora statičke pretvarače. Viši harmonici koji se javljaju na strani napajanja mogu izazvati ozbiljne smetnje u distributivnoj mreži. Propisi predviđaju sankcionisanja ovakvog načina potrošnje, zbog čega se prilikom projektovanja mora istražiti, i predvideti rešenje koje će omogućiti eliminaciju viših harmonika do nivoa koji je propisima dozvoljen. Za višemotorne pogone jedno od efikasnijih, a i ekonomičnijih rešenja je podela sabirnica sa kojih se napajaju pogoni na dva, ili više delova, koji će se napajati sa sekundara transformatora koji imaju različite sprege, tako da se ostvari fazni pomeraj napona sekundara. Moguće je da se svaki sabirnički sistem napaja sa zasebnog transformatora, ili u slučaju dva sabirnička sistema može se koristiti jedan transformator sa dva sekundara. Pogodne sprege su Dy5 i Yy6, ili na primer kod transformatora sa dva sekundara Dy11d0. Na Sl. 1.5.1 je prikazana jednopolna šema papir mašine sa 16 frekventno regulisanih pogona koji se napajaju sa dva sabirnička sistema, sa približno ravnomernom raspodelom instalirane snage.

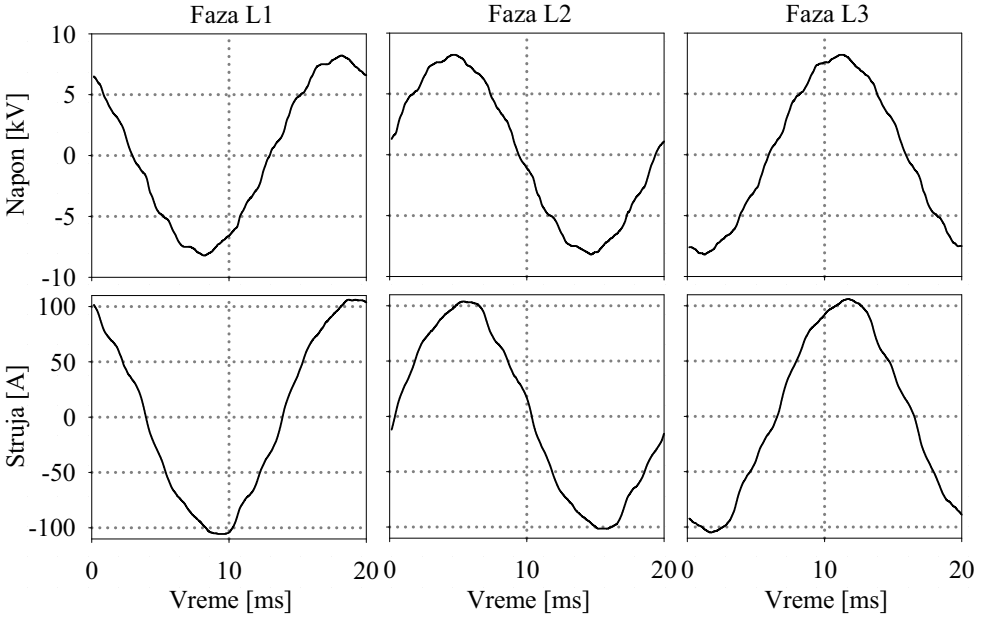



Sl. 1.5.1 Jednopolna šema višemotornog pogona.

Na Sl. 1.5.1 transformator T1 je sa spregom Dy5, a transformator T2 sa spregom Yy6. Zahvaljujući ovakvoj konfiguraciji u sistemu napajanja na strani srednjeg napona (10 kV) izobličenje talasnih oblika struje i napona je daleko manje nego na sekundarnoj strani, što se može videti na Sl. 1.5.2 i Sl. 1.5.3.

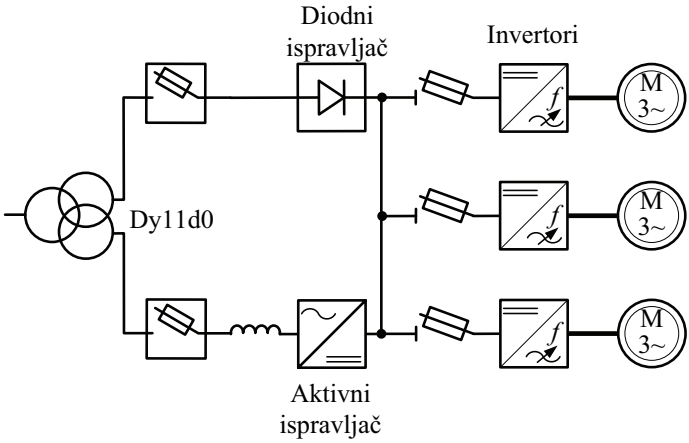



Sl. 1.5.2 Talasni oblik napona i struje pogona na sekundarnoj strani transformatora T1.



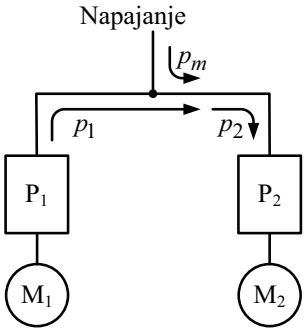

Sl. 1.5.3 Talasni oblik napona i struje na SN sabirnicama.

Na Sl. 1.5.4 prikazana je jednopolna šema jednog višemotornog pogona koji se napaja iz transformatora sa dva sekundara u sprezi Dy11d0. Ovaj pogon je sa tri frekventno regulisana motora, koji se napajaju iz zasebnih invertora. Jednosmerno međukolo se napaja sa dva ispravljača koji su vezeni na različite sekundare transformatora.




Sl. 1.5.4 Višemotorni pogon sa transformatorom sa dva sekundara.

Višemotorni pogoni mogu biti veliki potrošači energije, zato svaka racionalizacija potrošnje može biti od velikog značaja. U nekim tehnološkim procesima gde se koriste višemotorni pogoni, pojedini pogoni mogu da rade u različitim režimima. Na primer kod kranova za vreme spuštanja tereta pogon dizanja radi u režimu kočenja, a ako se istovremeno vrši neko od horizontalnih kretanja odgovarajući pogon radi u motornom režimu. Ukoliko bi se omogućilo da se potencijalna energija koja se oslobađa pri spuštanju preko sistema napajanja, prenese do pogona horizontalnog kretanja, ostvarila bi se ušteda energije. Najkarakterističniji primer za ovakvu razmenu energije su postrojenja premotača kakva se koriste u hladnim valjaonicama ili u industriji papira. Kod ovih postrojenja u toku izvršenja tehnološkog procesa, bar jedan od pogona radi u režimu kočenja, dok ostali rade u motornom režimu. Izborom odgovarajuće opreme i konfiguracijom sistema napajanja, može se omogućiti razmena energije između ovih pogona, tako da se potrošnja celog postrojenja svodi samo na pokrivanje gubitaka. Opisani režim rada u stručnoj literaturi naziva se „load sharing“. Na Sl. 1.5.5 prikazan je princip rada postrojenja gde se koristi „load sharing“. Motor $M_1$ radi u režimu kočenja, i vrši pretvaranje mehaničke energije u električnu. Da bi se ova energija mogla iskoristiti neophodno je da pretvarač $P_1$ bude reverzibilan, tj. da može da omogući kretanje energije u oba smera. Snaga kočenja $p_1$ je obično manja od snage $p_2$ potrebne za izvršenje procesa pogona sa pretvaračem $P_2$ i motorom $M_2$, zato je potrebna dodatna snaga $p_m$ iz mreže, kako bi se ta razlika nadoknadila.




Sl. 1.5.5 Princip rada postrojenja gde se koristi „load sharing“.

## *1.6 Povezanost pogona preko zajedničkog upravljačkog sistema*

Višemotorni pogoni po pravilu imaju nadređeni upravljački sistem koji koordinira funkcionisanje pojedinih pogona u cilju izvršenja tehnološkog procesa. Način realizacije, složenost i struktura upravljačkog sistema, zavise od potreba i namene višemotornog pogona odnosno procesa. Kod jednostavnijih aplikacija gde se koriste neregulisani pogoni, funkcija upravljačkog sistema se svodi na pravovremeno uključenje i isključenje pojedinih pogona, eventualno promenu smera obrtanja. Kao što je već rečeno u 1.5 u ovakvim slučajevima upravljački sistem može da izvršava svoje funkcije uvažavajući neke dodatne kriterijume. Kada tehnologija procesa to dozvoljava, može se na primer vreme uključivanja pojedinih pogona podesiti tako da se izbegne povećanje angažovane snage.

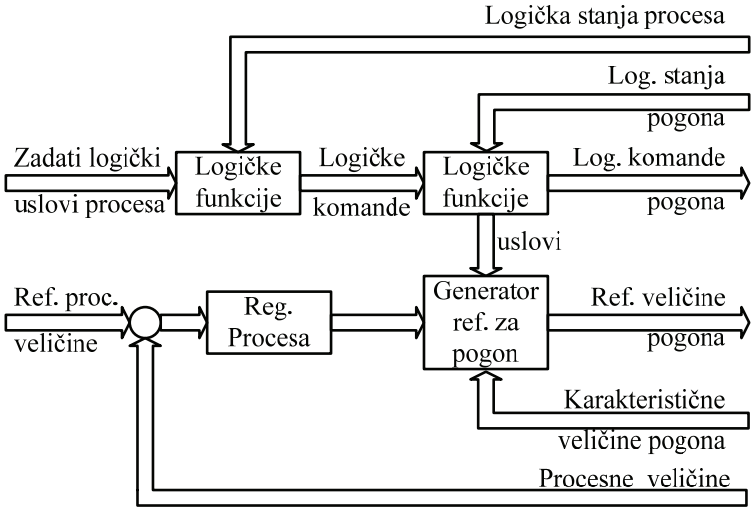
Višemotorni pogoni koje čini skup pojedinačnih regulisanih pogona, imaju mnogo složeniji nadređeni upravljački sistem, koji pored generisanja komandi za pokretanje i zaustavljanje pojedinih pogona, generiše i odgovarajuće referentne veličine u skladu sa zahtevima odvijanja procesa.

Nadređeni upravljački sistem svoje regulacione funkcije izvršava u zavisnosti od zadatih uslova, informacija o stanju u procesu, i izmerenih vrednosti procesnih veličina. Pod stanjem u procesu podrazumevaćemo skupove logičkih stanja, kao što su uključeno-isključeno, veće-manje, ima-nema, i sl. Izmerene vrednosti procesnih veličina mogu biti promenljive kao što su temperatura, pritisak, protok, vlažnost, težina, sila, itd., i one se dobijaju direktnim merenjem pomoću odgovarajućih davača, ili indirektno estimacijom ili pomoću opservera. Pored navedenih informacija nadređeni upravljački sistem koristi i informacije iz samih pogona, kao što su brzina, moment, struja i napon motora, ali i informacije o stanju u pogonu kao što su radi-ne radi, kvar, greška, različite vrste upozorenja.

Izlazne veličine iz nadređenog upravljačkog sistem su referentne veličine koje mogu biti referentne pozicije, referentne brzine ili referentni moment. Koje od navedenih referentnih veličina će se generisati u upravljačkom sistemu i prosleđivati pogonima, zavisi od potreba procesa i od strukture upravljačkog sistem pojedinih pogona, koji su u sastavu višemotornog pogona. Opšta struktura jednog nadređenog upravljačkog sistema je prikazana na Sl. 1.6.1.

Nadređeni upravljački sistem se može podeliti na dva funkcionalna dela, deo za upravljanje procesom i deo za upravljanje višemotornim pogonom. Ovi delovi upravljačkog sistema mogu biti fizički odvojeni. Funkcionalno i fizičko odvajanje ovih upravljačkih celina ima određene prednosti, pre svega u razgraničenju nadležnosti i odgovornosti pojedinih službi, kako u toku funkcionisanja procesa, tako i u fazama projektovanja, izgradnje i puštanja u rad postrojenja.

Kako je već navedeno nadređeni sistem koji upravlja višemotornim pogonom generiše referentne veličine za pojedine pogone, referentne pozicije, brzine ili momente, a u zavisnosti od potreba procesa, i načina realizacije upravljačkog sistema. U nekim slučajevima generiše se istovremeno više od jedne referentne veličine, na primer i referentna brzina i referentni moment. Definisanje referentnog momenta vrši se po kriterijumima koji treba da obezbede rešavanje važnog pitanja u upravljanju višemotornim sistemima, a to je raspodela opterećenja po pogonima, odnosno motorima srazmerno njihovim nominalnim momentima, ili snagama. Algoritmi koji se koriste zavise od vrste višemotornog pogona, načina mehaničkog povezivanja, strukture upravljačkog sistema pojedinačnih pogona. O ovim pitanjima i mogućim rešenjima, biće više reči kada budu vršene detaljnije analize pojedinih vrsta i tipova višemotornih pogona.




Sl. 1.6.1 Opšta struktura nadređenog upravljačkog sistema.

Funkcionisanje višemotornog pogona zahteva razmenu određenog broja podataka između pojedinih pogona i nadređenog sistema upravljanja. Samo kod jednostavnijih pogonskih sistema kod kojih se ne koriste regulisani pogoni, ova razmena se može vršiti putem klasičnih žičanih veza, višežilnim signalnim kablovima. Kod višemotornih pogona koje čini skup regulisanih pogona, broj informacija koje se moraju kontinualno razmenjivati je veliki, pri čemu su te informacije različitog tipa. Kao što je već pokazano te informacije su skup logičkih signala i skup promenljivih veličina. Upravljački sistemi savremenih višemotornih pogona baziraju se na primeni računarskih sistema za implementaciju nadređenog sistema upravljanja, i regulisanih pogona sa energetskim pretvaračima sa procesorskim sistemom internog nadzora i upravljanja. Ovakvi sistemi omogućavaju da se potrebna razmena velike količine informacija između pogona i nadređenog sistema upravljanja, vrši putem standardnih brzih komunikacionih protokola velikog kapaciteta, kao što su Modbus, Modbus Plus, Profibus, Industrijski Ethernet, Profinet, itd.

## *1.7 Primeri za vežbu*

Radi upotpunjavanja znanja i boljeg razumevanja i shvatanja izložene materije, korisno je proučiti zadatke broj 5, 6, 34, 35 i 84 iz [12].

## *1.8 Literatura*


[1] S.K.Pillai, *A First Course On Electrical Drives*. New Delhi: John Wiley & Sons, 1982.

[2] B. Jeftenić, M. Bebić, M. Milojević i L. Ristić, "Nova koncepcija pogona i načina upravljanja pogonom karton mašine u Fabrici kartona "Umka"," in *12th International Symposium on Power Electronics - Ee 2003*, Novi Sad, Srbija, 2003.

[3] M. A. Valenzuela i R. D. Lorenz, "Electronic line-shafting control for paper machine drives," *Industry Applications, IEEE Transactions on,* vol. 37, pp. 158-164, 2001.

[4] B. Jeftenić, M. Bebić i M. Krgović, "The Selection of Sectional Drives for Replacement of the Line Shaft Drive in a Paper Machine," in *7th Meeting of Pulp and Paper Industry of Balkan Countries*, Novi Sad, 2000.

[5] *Kelvin-Voigt material*. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin%E2%80%93Voigt_material

[6] B. Jeftenić, "Elektromotorni pogon rotacionog ekskavatora SRs1200," Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bograd, 1977.

[7] B. Jeftenić i M. Gvozdenović, "Synchronized Work of Two Controlled DC Drives with Resilient Mechanical Connection," *Publications of the Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade,* 1989.

[8] M. Bebić, B. Jeftenić i M. Belinčević, "Elektromotorni pogoni papir mašine," presented at the 11th International Symposium on Power Electronics - Ee 2001, Novi Sad, Srbija, 2001.

[9] B. I. Jeftenić, "Elektromotorni pogon letećih makaza," Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Beograd, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1972.

[10] B. Jeftenić, M. Bebić, D. Jevtić i M. Milojević, "Rekonstrukcija elektromotornog pogona poprečnog rezača na na bazi primene frekventnih pretvarača," in *VI jugoslovenski simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, CPAG*, Zlatibor, 2000, pp. 130-138.

[11] G. Skibinski, D. Dahl, K. Pierce, R. Freed i D. Gilbert, "Installation considerations for multi-motor AC drives and filters used in metal industry applications," in *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE*, 1998, pp. 2270-2278 vol.3.

[12] B. Jeftenić, V. Vasić, Đ. Oros, N. Mitrović, M. Petronijević, S. Štatkić i M. Bebić, *Elektromotorni pogoni zbirka rešenih zadataka*. Beograd: Akademska misao, 2003.