Utjecaj direktnih pogona na strukturu pogonskih mehanizama

Kostelac, Milan

Doctoral thesis / Disertacija

2006

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:039811

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

UTJECAJ DIREKTNIH POGONA NA STRUKTURU POGONSKIH MEHANIZAMA

Disertacija

Mentor:

Prof. dr.sc. Dragutin Ščap

Mr.sc. Milan Kostelac

Zagreb, 2006.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK:	62-11:62-13:621.313
Ključne riječi:	pogonski mehanizam, motor, direktni pogon, visoki moment vrtnje, pogon s niskim brzinama vrtnje
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, I. Lučića 5, 10000 Zagreb, RH
Mentor rada:	Dr.sc. Dragutin Ščap, red. prof.
Broj stranica:	128
Broj slika:	64
Broj tablica:	6
Broj jednadžbi:	25
Broj literaturnih navoda:	92
Jezik teksta:	hrvatski
Jezici sažetka:	hrvatski i engleski
Datum obrane:	20. srpnja. 2006 g.
Povjerenstvo:	Dr.sc. Milan Opalić, red., prof., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu - predsjednik
	Dr.sc. Dragutin Ščap, red. prof., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu - mentor
	Dr.sc. Zlatko Maljković, red. prof., Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu - član
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	FSB, Sveučilišta u Zagrebu
	Nacionalna i sveučilišna knjižnica

Zahvaljujem mentoru, profesoru dr.sc. Dragutinu Ščapu na podršci i korisnim savjetima.

Posebno bih zahvalio izv. prof. dr.sc. Zvonku Heroldu i doc. dr.sc. Jošku Deuru, kao i svim djelatnicima Katedre za strojarsku automatiku, na brojnim korisnim raspravama i savjetima, te nesebičnoj stručnoj i tehničkoj pomoći u izradi ove disertacije.

U grafičkoj opremi i uređenju rada puno su mi pomogli mr.sc. Nedjeljko Ćular i Vladimir Ivanović, dipl. inž. strojarstva, te im ovim putem želim izraziti veliku zahvalnost.

Zahvalio bih i mr.sc. Željku Goji iz poduzeća HSTEC Zadar na ideji teme doktorske disertacije.

Od srca se zahvaljujem svojoj djeci i supruzi na podršci i strpljenju pri izradi rada.

Ministarstvo znanosti i tehnologije Republike Hrvatske također je potpomoglo izradu ovog rada financiranjem projekta 0120 024 „Optimalno projektiranje mehanizama mobilnih konstrukcija“

.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA VI
POPIS TABLICA IX
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA X
PREDGOVOR XII
SAŽETAK XIII
SUMMARY XIV

1. UVOD 1-1
1.1 Uloga pogonskog stroja 1-1
1.2 Cilj i hipoteza rada 1-3
1.3 Metodologija istraživanja 1-5

2. GRANICE PRIMJENE DIREKTNIH POGONA S VISOKIM MOMENTOM VRTNJE ... 2-1
2.1 Definicija područja primjene 2-1
2.2 Značajke vrednovanja 2-3
2.3 Sistematizacija značajki s odabirom pogona 2-5
2.3.1 Hidraulički pogon 2-5
2.3.1.1 Radijalno klipni hidromotor 2-6
2.3.1.2 Aksijalno klipni hidromotor 2-6
2.3.2 Elektromotorni pogon 2-6
2.3.2.1 Asinkroni motori 2-7
2.3.2.2 Motori s uzbudom putem trajnih magneta 2-7
2.3.2.3 Reluktantni strojevi s obostrano izraženim polovima 2-9
2.4 Instalirana snaga frekvencijskog pretvarača 2-11
2.5 Dinamička karakteristika 2-12
2.6 Preopteretivost momentom vrtnje 2-12
2.7 Rezultati usporedbe značajki pogona 2-15
2.8 Daljnji razvoj elektromotornih pogona s visokim momentom vrtnje 2-20

3. DANAŠNJA PRIMJENA POGONA S VISOKOMOMENTNIM MOTORIMA 3-1
3.1 Uvod 3-1
3.2 Dizala 3-1
3.3 Alatni strojevi 3-2
3.4 Brizgalice 3-5
3.5 Strojevi za proizvodnju papira 3-6
3.6 Primjena u razvojnim istraživanjima 3-8

4. ASPEKTI TROŠKOVA U RAZVOJU DIREKTNIH POGONA S VISOKOMOMENTNIM MOTORIMA 4-1
4.1 Osnovna struktura troškova 4-1
4.2 Troškovi radnog vijeka 4-2
4.3 Vlastiti troškovi poduzeća 4-6
4.4 Troškovi proizvodnje 4-8
4.5 Elementi utjecaja na broj komada proizvoda 4-10
4.6 Uzroci pada troškova 4-11
4.7 Utjecaj veličine i dimenzija direktnih pogona 4-13
4.8 Troškovi materijala 4-17
4.9 Troškovi montaže 4-19

5. KONSTRUKCIJSKI PODSUSTAVI DIREKTNIH POGONA 5-1
5.1 Svojstva tehničkog proizvoda 5-1
5.2 Opće konstrukcijsko znanje 5-2
5.2.1 Konstrukcijsko znanje 5-4
5.2.2 Strukturiranje konstrukcijskog znanja 5-5
5.2.3 Strukturiranje znanja prema funkcijskim principima 5-5
5.3 Struktura direktnog pogona s visokomomentnim motorom 5-8
5.3.1 Sustav vođenja 5-9
5.3.2 Davač pozicije 5-11
5.3.3 Hlađenje visokomomentnog motora 5-14
5.3.4 Točnost pozicioniranja 5-15
5.3.5 Krutost direktnih pogona 5-16
5.3.6 Identifikacija i kompenzacija valovitosti momenta vrtnje 5-17
5.3.6.1 Trapezoidni EMF motori 5-18
5.3.6.2 Sinusoidni EMF motori 5-18
5.3.6.3 Harmonici u statorskom prorezu 5-19

5.3.6.4 Vremenski harmonici 5-19
5.3.6.5 Pregled metoda za smanjenje valovitosti 5-19

6. VERIFIKACIJA KONSTRUKCIJSKIH ZNAČAJKI POGONSKIH SUSTAVA S VISOKOMOMENTNIM MOTORIMA 6-1
6.1 Osnovni izbor pogona 6-1
6.2 Značajke direktnih pogona 6-3
6.2.1 Oblik i dimenzije 6-3
6.2.2 Prostor ugradnje 6-4
6.2.3 Dinamika pogona 6-5
6.2.4 Točnost pozicioniranja s ponovljivošću 6-7
6.2.5 Valovitost momenta vrtnje 6-8
6.2.6 Pouzdanost 6-9
6.2.7 Buka direktnih pogona 6-9
6.3 Zaključak 6-11

7. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA PARAMETARA VISOKOMOMENTNOG MOTORA 7-1
7.1 Opis pogona 7-1
7.2 Odziv momenta vrtnje 7-2
7.3 Moment inercije 7-4
7.4 Statičke karakteristike 7-7
7.5 Analiza valovitosti momenta vrtnje 7-8

8. ZAKLJUČAK 8-1
LITERATURA L-1
OZNAKE PROIZVOĐAČA L-6
KRATKI ŽIVOTOPIS L-7
SHORT BIOGRAPHY L-8

POPIS SLIKA:

Slika 1.1 Prilagodba pogona radnoj točki procesa 1-2

Slika 2.1 Direktni pogon valjaoničkog stana 2-1

Slika 2.2 Struktura pogona s pretvorbom energije....2-5

Slika 2.3 Princip izvedbe sinkronog motora s uzbudom putem trajnih magneta 2-7

Slika 2.4 Princip izvedbe višefaznog sinkronog motora s uzbudom putem trajnih magneta 2-8

Slika 2.5 Princip izvedbe pogonskog motora s aksijalnim poljem i uzbudom putem trajnih magneta 2-8

Slika 2.6 Princip izvedbe motora s transverzalnim protokom 2-9

Slika 2.7 Princip izvedbe reluktantnog motora....2-10

Slika 2.8 Princip izvedbe motora s transverzalnim protokom sa statorskom uzbudom .2-10

Slika 2.9 Princip izvedbe visokopolnog reluktantnog motora s efektom brida 2-10

Slika 2.10 Princip izvedbe hibridni motora s obostrano izraženim polovima i uzbudom putem trajnih magneta u statoru....2-11

Slika 2.11 Energetska bilanca pogona 2-11

Slika 2.12 Definicija radnih točaka pogonskog stroja i frekvencijskog pretvarača....2-14

Slika 2.13 Dimenzioniranje frekvencijskih pretvarača pri preopterećenju preko relativne struje kratkog spoja 2-14

Slika 2.14 Usporedba dimenzija i cijene za pogonske strojeve s prisilnim hlađenjem za istu pogonsku snagu 2-16

Slika 2.15 Usporedba stupnja korisnog djelovanja....2-17

Slika 2.16 Iskoristivost momenta vrtnje 2-18

Slika 2.17 Iskorištenje volumena....2-19

Slika 2.18 Klasifikacija prema području primjene 2-19

Slika 2.19 Očekivani razvoj višefaznog sinkronog motora s uzbudom putem trajnih magneta....2-21

Slika 2.20 Varijacije povezivanja napajanja sa statorskim namotima za dupli stator u daljnjem razvoju PPSM-a 2-22

Slika 3.1 Pogonski mehanizam lifta s vanjskim disk kočnicama....3-2

Slika 3.2 Obrada zupčanika sa strelastim zubima mase do 5000 kg na stroju s direktno pogonjenim okretnim stolom /7/....3-3

Slika 3.3 Obradni centar sa okretno–nagibnim stolom pogonjenog visokomomentnim motorima /8/ 3-4

Slika 3.4 Kombinacija CNC glodaćeg i tokarskog alatnog stroja /9/ 3-4

Slika 3.5 Pogon sklopa brizgaljke s dva visokomomentna motora, koji rade odvojeno kao pogon za plastifikaciju i pogon za brizganje /10/ 3-5

Slika 3.6 Stroj za proizvodnju papira /11/ 3-7

Slika 3.7 Pogonska konfiguracija stroja za papir 3-7

Slika 3.8 Eksperimentalno vozilo s ugrađenim direktnim pogonom u pogonskom kotaču 3-8

Slika 3.9 Sklop pogonskog kotača eksperimentalnog vozila 3-9

Slika 4.1 Raščlamba troškova 4-1

Slika 4.2 Troškovi za vrijeme radnog vijeka direktnog pogona 4-3

Slika 4.3 Struktura troškova radnog vijeka proizvoda 4-4

Slika 4.4 Smanjenje troškova smanjenjem broja varijanti [27] 4-7

Slika 4.5 Utjecajne veličine na troškove proizvodnje 4-9

Slika 4.6 „*Spirala utjecaja*“ za prijelaz s pojedinačne na serijsku proizvodnju 4-10

Slika 4.7 Opadanje troškova proizvodnje kod proizvoda s visokim/niskim udjelom troškova opremanja, ovisno o veličini serije 4-12

Slika 4.8 Opadanje troškova proizvodnje u ovisnosti od veličine serije (dijelom i efekta treninga) [37] 4-12

Slika 4.9 Porast troškova i njihovi udjeli povećanjem veličine kod pojedinačne proizvodnje 4-15

Slika 4.10 Ukupni troškovi u strojogradnji prema vrsti troškova [30] 4-17

Slika 4.11 Topološka optimizacija pogonskog uređaja lifta [12] 4-19

Slika 4.12 Struktura aktivnosti pri montaži strojogradnji u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji 4-20

Slika 5.1 Prikaz konstrukcijskog procesa prema [55] 5-3

Slika 5.2 Osnovna struktura oblikovanja direktnih pogona s visokomomentnim motorom 5-6

Slika 5.3 Visokomomentni motor 5-8

Slika 5.4 Izvedba visokomomentnog motor kao ugradbene cjeline /12/ 5-9

Slika 5.5 Aksijalno-radijalni valjkasti ležaj tip: YRT /20/ 5-11

Slika 5.6 Davači pozicije za primjenu u direktnim pogonima /22/ 5-12

Slika 5.7 Visokomomentni motor s rashladnim plaštom 5-15

Slika 5.8 Točnost pozicioniranja i točnost ponovljivost pozicije pogona 5-16

Slika 6.1 Strukture pogonskih mehanizama liftova 6-5

Slika 6.2 Strukture konvencionalnih pogona u usporedbi s direktnim pogonom 6-6

Slika 7.1 Fotografija motora 1FW6130-0PA10 („*kit*“ izvedba) 7-1

Slika 7.2 Odziv brzine vrtnje motora za skokovitu promjenu momenta vrtnje (a) i karakteristični detalj istog odziva (b). 7-3

Slika 7.3 Odziv fazne struje motora za skokovitu promjenu momenta vrtnje uz zakočeni rotor motora (n=0). 7-3

Slika 7.4 Karakteristika pokretanja i zaustavljanja pogonskog motora bez pričvršćene dodatne mase i vanjskog opterećenja 7-4

Slika 7.5 Procijenjeni parametri inercije motora s dodatnim masama i momenta trenja u funkciji brzine vrtnje.....7-6

Slika 7.6 Usporedni rezultati eksperimenta i simulacije odziva pokretanja i zaustavljanja za T_{em}=T_N 7-7

Slika 7.7 Procijenjena krivulja momenta vrtnje motora 7-8

Slika 7.8 Maksimalni moment vrtnje motora pri raznim brzinama vrtnje: (a) procijenjeno na vozilu, (b) iz dokumentacije motora. 7-8

Slika 7.9 Spektar amplituda momenta vrtnje motora u normiranoj frekvenciji N 7-10

Slika 7.10 Amplituda valovitost momenta vrtnje uslijed *Cogging* moda (detalj sa slike 7.9).....7-11

Slika 7.11 Viši harmonici *cogging* moda za male brzine vrtnje.....7-12

Slika 7.12 Valovitost momenta uslijed debalansa rotora motora (detalj slike 7.9).....7-12

POPIS TABLICA:

Tablica 2.1 Lista zahtjeva na pogon s visokim momentom vrtnje 2-2

Tablica 2.2 Granice primjene direktnih pogona s visokomomentnim motorima [6].....2-3

Tablica 2.3 Značajke za definiranje kriterija kakvoće za pogone s visokim momentom vrtnje 2-4

Tablica 2.4 Značajke za definiranje kvalitativni kriteriji za pogone s visokim momentom vrtnje 2-4

Tablica 5.1 Usporedba različitih mjernih principa primjenjivanih u direktnim pogonima 5-13

Tablica 6.1 Usporedba pogona 6-1

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

C_{din} - dinamička krutost direktnog pogona, N/ink
C_p - specifična toplina, J/kgK
C_{stat} - statička krutost direktnog pogona, N/ink
C_{tor} - torzijska krutost, Nm/rad
d - promjer, mm
f - frekvencija, Hz
F - sila, N
f_c - frekvencija *cogging* momenta, Hz
F_0 - obodna (zakretna) sila, N
I - moment tromosti mase, kgm^2
IC - indeks cijene
I_{dod} - moment tromosti dodatnih mase, kgm^2
I_{kot} - moment tromosti kotača, kgm^2
I_r - moment tromosti naplatka, kgm^2
I_F - fazna struja, A
I_K - struja kratkog spoja, A
I_N - nazivna struja, A
k - faktor preopterećenja pogona
k_{ink} - koeficijent integracije regulatora brzine
K_m - konstanata motora, $Nm/\sqrt{W}$
k_n - omjer brzina pogona
K_t - konstanta momenta vrtnje motora
m_{akt} - aktivna masa pogona, kg
N - ukupan broj komada
- broj pulzacija po okretaju, okr^{-1}
n - broj komada po seriji
- brzina vrtnje, min^{-1}
n^* - podešena brzina vrtnje na regulatoru, min^{-1}
$n_{lg\ drop}$ - brzina vrtnje pri kojoj dolaz do pada moment vrtnje, min^{-1}
$N_{s/p}$ - broj utora statora
p - broj pari polova
P - snaga, W
P_{fp} - snaga frekvencijskog pretvarača, W
P_{inst} - instalira snaga, W
P_{gubCu} - gubici u bakrenim namotima motora, W
R - radijus momenta vrtnje, m

r_{fp} - indeks snage frekvencijskog pretvarača
T - moment vrtnje, Nm
T_{ekv} - ekvivalentni moment vrtnje, Nm
TM - trošak materijala, kn
TI - trošak izrade, kn
T_{jed} - jednokratni troškovi, kn
TO - trošak opremanja, kn
TP - trošak proizvodnje, kn
T_{tr} - moment trenja, Nm
t_s - vrijeme uzorkovanja signala, ms
TUP - trošak uvođenja u proizvodnju, kn
U_F - fazni napon, V
U_Z - napon međukruga, V
v - brzina translatornog gibanja, ms^{-1}
V_{akt} - aktivni volumen pogona, m^3
z - broj faza
Δ - amplituda, diferencija
Δ_{Sink} - diferencija inkremenata pozicije
ε - kutno ubrzanje, $rads^{-2}$
η - stupanj korisnog djelovanja
ω - kutna brzina, $rads^{-1}$
ω^* - podešena brzina vrtnje na regulatoru, $rads^{-1}$
τ_w - specifična obodna sila, N
φ_L - skok dimenzija promjera
φ - fazni kut, ^{0}

INDEKSI

d - donji, najmanji
el - električni
em - elektromotorni
fp - frekvencijskog pretvornika
g - gornji
iz - izlazni
hid - hidraulička
ins - instalirana
ul - ulazna
max - maksimalna, najveća
meh - mehanička
N - nazivni, nominalni

PREDGOVOR

Izrada ove disertacije potaknuta je višegodišnjim radom na oblikovanju pogonskih mehanizama i to pogona liftova i okretnih stolova alatnih strojeva. Pogon koji bi neposredno pokretao radni član mehanizma trebao bi ostvarivati dovoljno veliki moment vrtnje, a u sustavu prijenosa informacija, od pogonskog do radnog člana, trebalo bi biti što manje konstrukcijskih elemenata koji svojom netočnošću izrade umanjuju točnost pozicioniranja radnog člana u tehnološkom procesu.

Primjena direktnih pogona zasniva se u osnovi na visokim momentima vrtnje i stabilnom širokom rasponu brzina vrtnje s velikim ubrzanjima i usporenjima. Dodatne karakteristike direktnih pogona kao visoki stupanj korisnog djelovanja, pogon bez zračnosti s visokom točnosti pozicioniranja i pri reverziranju rada, visoka specifična snaga, visoka torzijska krutost samo su dodatno pokazale potrebu za istraživanjem primjene takvih pogona u pogonskim sustavima.

Kako direktni pogoni danas nisu cjenovno konkurentni standardnim pogonima s prigonom, prvenstveno zbog pojedinačne i malo serijske proizvodnje u koju su ugrađeni visoki troškovi razvoja, povećanjem područja primjene, nužno će dovesti do uvođenja serijske proizvodnje, čime se očekuje značajni pad cijene.

Istraživačkim projektom broj: 0120 024 „Optimalno projektiranje mehanizama mobilnih konstrukcija“, predviđeno je istraživanje i kreiranje novih struktura pogonskih mehanizama s definiranjem tehničkih i teorijskih okvira njihove primjene. Utvrđivanjem strukture, vrste, količine i značaja informacija iz direktnih pogona, stvorit će se neophodna znanja za oblikovanje pogonskih naprednih mehanizama tehničkih sustava.

SAŽETAK

Napredak tehnologije, s primjenom u gradnji pogonskih motora i sustava upravljanja, omogućava danas velike promjene u oblikovanju pogonskih mehanizama tehničkih sustava. Neposredno povezivanje pogonskog motora i radnog člana mehanizma, bez mehaničkog prijenosnika kao posrednika, stoljetni je san vizionara u strojarstvu.

U radu su istražene moguće izvedbe direktnih pogona i njihov utjecaj na opći oblik pogonskih mehanizama tehničkih sustava. Predloženim oblikovanjem visokomomentnog motora željela se pronaći univerzalna izvedba sa širim spektrom primjene u pogonskim mehanizmima.

Provedena su istraživanja troškova u razvoju direktnih pogona, te su predložene smjernice za sniženja tih troškova.

Raščlambom strukture direktnog pogona postavljeni su principi oblikovanja pojedinih parcijalnih funkcija i definiran njihov utjecaj na sustav pogonskog mehanizma. Sintezom tehničke funkcije, strukture i veze s okolinom utvrđena je metoda preciznog definiranja pogona za određene namjene u tehničkim sustavima.

Pored istraženih i predloženih struktura pogonskih mehanizama s direktnim pogonom, u okviru rada je razvijen direktni pogon eksperimentalnog vozila, ugrađen u pogonski kotač standardnih dimenzija. Na direktnom pogonu eksperimentalnog vozila provedeni su eksperimenti s kontrolnim mjerenjima, a dobiveni rezultati potvrdili su njegovu primjenjivost i brojne visoke pogonske performanse (visoki moment vrtnje u širokom rasponu brzina, brzi odziv, zadovoljavajuću valovitost momenta vrtnje) takvih pogona u odnosu na klasične pogonske sustave.

Istraživanjem značajki novog pogonskog sustava s direktnim pogonom postavljeni su kriteriji, mjerila i pravila oblikovanja tog sustava, čime je stvorena i neophodna baza znanja za kreiranje tog sustava.

Ključne riječi: pogonski mehanizam, motor, direktni pogon, visoki moment vrtnje, pogon s niskim brzinama vrtnje

UDK: 62-11:62-13:621.313

INFLUENCE OF DIRECT DRIVE ON STRUCTURE OF DRIVE MECHANISMS

SUMMARY

The advances in technology of drive motor design and related control systems result in extensive changes in the design of drive mechanisms in various technical systems. Direct interconnection of the driving motor and the working parts of the mechanism, without any mechanical transmission, has always been a dream of visionaries in the field of mechanical engineering.

This thesis explores the possible implementations of direct drives and their impact on the general drive mechanism designs in technical systems. A design approach utilizing the high-torque electric motor was proposed in order to find a universal implementation concept which would be characterized by a broad spectrum of possible applications in drive mechanisms.

The cost-benefit analysis of the direct drive development has been carried out, and the guidelines for cost reduction have been proposed.

The structure of direct drive has been analyzed, thus forming the principles of the individual partial functions. This has defined their influence on the driving mechanism systems. The design of the technical functionality, structure and interface with the environment has been carried out. It has formed a method of precise defining of the drive for the specific objective in technical systems.

Apart from the explored and proposed driving mechanism structures utilizing the direct drive, this thesis comprises the development of a direct drive for an experimental electrical vehicle. The direct drive is built in the vehicle's front wheel with standard dimensions for automotive purposes. The drive identification experiments have been carried out, and the obtained results have confirmed its practical applicability and numerous high performance qualities (i.e. high motor torque within a relatively wide speed range, fast torque response, and low magnitude of torque ripple) of such drives compared to conventional drive systems.

By examining the characteristics of the novel drive system based on the direct drive, the appropriate criteria and rules have been set up for the design of such system, thus creating an expert knowledge base for the design of future similar systems.

Key words: drive mechanism, motor, direct drive, high motor torque, low-speed drive

UDK: 62-11:62-13:621.313

1. UVOD

1.1 Uloga pogonskog stroja

Temeljna zadaća u oblikovanju pogonskih mehanizama tehničkih sustava koji su namijenjeni obavljanju određenog tehnološkog procesa (kao što su transport, miješanje, usitnjavanje i sl.) jest iznalaženje za njih najprikladnijeg pogonskog sustava. Izvedba pogona iziskuje prilagođavanje radne točke pogonskog mehanizma, definirane nazivnim momentom i brzinom vrtnje s radnom točkom procesa [1]. Iako se općenito u najvećem broju rješenja prilagodba na radnu točku procesa obavlja pomoću mehaničkog prijenosnika, slika 1.1, tako da se moment i brzina vrtnje na odgovarajući način promijene, postavlja se pitanje, dali je pri oblikovanju pogonskog mehanizma, moguće izostaviti prilagodbu mehaničkim prijenosnikom, odnosno primijeniti pogonski uređaj koji neposredno pokreće radni član mehanizma.

Za procese koji zahtijevaju veliki moment pri malim brzinama vrtnje, danas se najčešće koriste brzohodni pogoni u kombinaciji s nadograđenim mehaničkim prijenosnikom, tvoreći pogon s prigonom. Alternativu pogonu s prigonom predstavlja takav pogon koji stvara dovoljno visoki moment vrtnje pri niskoj brzini, odakle mu i česti naziv sporohodni pogon. U slučaju primjene gdje je definirana relativno visoka brzina vrtnje i mali momenti vrtnje, primjenjuje se brzohodni pogon, što je cjenovno daleko povoljnije od pogona s prigonom.

Ako se radna točka procesa poklopi s pogonskom točkom, moguće je odreći se mehaničkog prijenosnika, a pogonski uređaj postaje direktni pogon[1]. U sporohodnom pogonu osnovu pogonskog mehanizma čini tzv. „*Torque motor* "- momentni motor, odnosno motor s visokim momentom vrtnje ili visokomomentni motor.

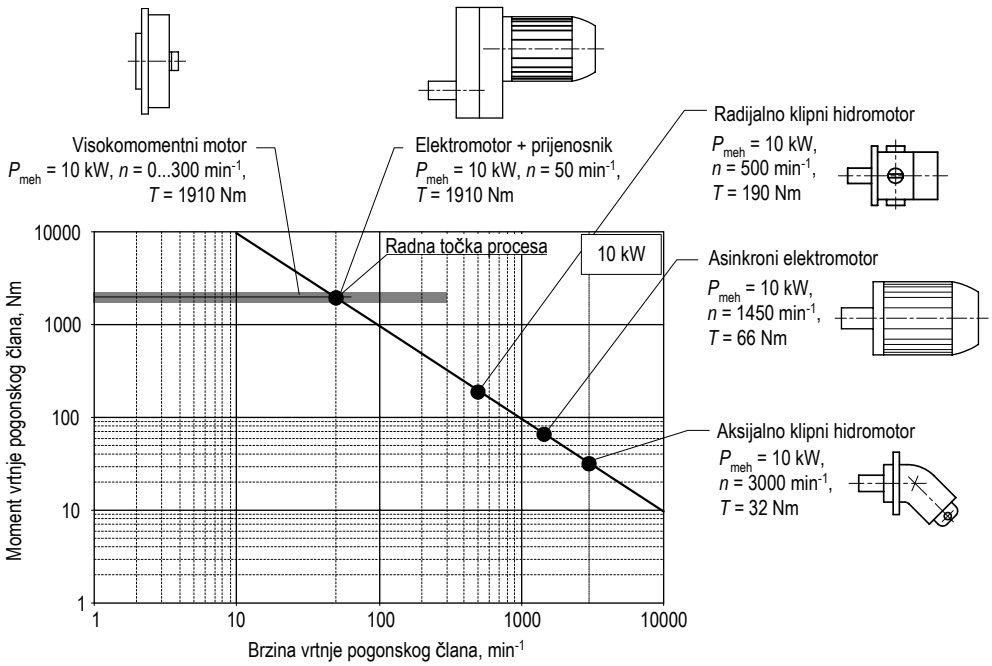
Široki raspon brzine vrtnje unutar kojeg je i radna brzina procesa uz traženi visoki moment vrtnje je osnovna značajka izbora i primjene direktnog pogona u pogonskom mehanizmu tehničkog sustava. Takva tehnička karakteristika daje dodatne mogućnosti u stvaranju fleksibilnijeg radnog sustava.

[1] Direktantrieb, Direct Rotary Drive

Istraživanja motivirana prvenstveno povećanjem produktivnosti tehničkih sustava, dovela su do stvaranja novih proizvodnih tehnologija naročito računalnih, novih tehničkih materijala, kako u cjelokupnom procesu proizvodnje tako i u odgovarajućoj primjeni u tehničkim sustavima [2].

Nove računalne tehnologije omogućile su razvoj, oblikovanje i izradu velikog broja složenih i vrlo zahtjevnih proizvoda, te njihovu adekvatnu primjenu u tehničkim sustavima, a upravo u to područje primjene ulaze i pogoni s visokim momentom vrtnje.

Razvoj direktnih pogona tek počinje, a zasniva se na iznalaženju novih rješenja u oblikovanju i izvedbi. S druge strane, u primjeni standardnih rješenja pogonskih mehanizama prevladava optimiranje postojećih izvedbi.



Slika 1.1 Prilagodba pogona radnoj točki procesa

1.2 Cilj i hipoteza rada

Tijekom razvoja i procesa konstruiranja direktnog pogona kao tehničkog proizvoda, obrađuje se i stvara najveći dio informacija o samom proizvodu. Da bi se zadovoljili postavljeni tehnički zahtjevi, odluka o izboru vrste, količine, značaja i prirode informacija, često puta je pridružena iskustvenom[2] konstrukcijskom znanju. Svakodnevno skraćenje vremena razvoja proizvoda uz neprekidni rast proizvodnje, poticaj su velikom broju istraživanja, koja bi trebala stvoriti datoteke potrebnih i potpunih informacija definirajući specifično konstrukcijsko znanje na prihvatljiv način.

Budući da danas većina sudionika u procesu oblikovanja direktnih pogona nema iskustvenih znanja potrebnih za trenutačno uključenje u rad [3], vrijeme utrošeno na njihovo obrazovanje, korištenjem rezultata istraživanja znatno bi se smanjilo.

Prikupljanje potrebnih informacija zahtjeva dosta utrošenog vremena unutar procesa oblikovanja i prema statističkim izvještajima danas se kreće na oko 1/6 radnog vremena [4], dok količina procijenjenih informacija koja se mora integrirati u tehnički proizvod, sa stanovišta vremena mora biti što kraće. Prema podatnosti informacija u formi CAD[3] i CIM[4] podloga, crteža, dijagrama, slika, uputa s tehničkim podacima, kontrolnog proračuna i dr. postavljaju se zahtjevi u procesu oblikovanja direktnih pogona na kvalitetu i količinu, potpunost, brzinu pribavljanja i aktualnost informacija.

Danas je nemoguće da se sudionik u procesu oblikovanja direktnih pogona tehničkih sustava održi na zadovoljavajućoj razini interesnog područja djelovanja, samostalno proradom svih dostupnih informacija. Specifične informacije koje nastaju ovim istraživanjem trebale bi znatno unaprijediti produktivnost i smanjiti troškove u procesu oblikovanja od koncipiranja, projektiranja pa do konstrukcijske razrade direktnog pogona s ciljem dobivanja cjenovno povoljnih izvedbi.

Utjecaji koji proizlaze iz sve kraćeg vremena trajanja pogonskih mehanizama kao i razvoja novih tehnologija i materijala, imaju za posljedicu da se vrijeme za izradu novih rješenja i varijanti sve više skraćuje odnosno razvoj se mora rješavati s postojećim kapacitetima brže nego što je to bilo ranije.

[2] Znanje stečeno radom u konstrukcijskom uredu (konstruirajući), u najvećem broju slučajeva nedostupno mladom inženjeru po završetku studija. Konstruktori to znanje posjeduju i teško ga prenose neiskusnim kolegama jer je to "meko" znanje. Ono što ekspert zna za njega je normalno da se zna (često se radi o podsvjesnom procesu misli) pa i ne pomišlja da veliki broj kolega iz struke to "jednostavno" znanje ne poznaju. Stoga vrlo često dolazi do prešućivanja važnih iskustvenih spoznaja (nenamjerno), čak i u procesu obrazovanja konstruktora.

[3] Computer Aided Design

[4] Computer Integrated Manufacturing

Naime, jedna od bitnih značajki konstrukcijskih znanja jest, da to znanje dolazi do izražaja tek u radu, odnosno tijekom konstruiranja. Iznalaženje novih konstrukcijskih znanja u oblikovanju pogonskih mehanizma kojima bi se proširile teorijske spoznaje i tehničke mogućnosti u kreiranju novih struktura s direktnim pogonima spadaju u novija područja tehničkog znanja, jer se direktni pogoni pojavljuju na prijelazu iz 20. u 21. stoljeće.

Rad se temelji na pretpostavci da pogonski mehanizmi s ugrađenim direktnim pogonom imaju takva svojstva i komparativne prednosti koja će ih dovesti do značajnije primjene u pogonima većine tehničkih sustava. Pored prednosti u tehničkim karakteristikama očekuje se i njihov povećani utjecaj na razvoj konstrukcija, te postavljanja novih mjerila i pravila u njihovom oblikovanju.

Primjena direktnih pogona zasniva se na stabilnom i ujednačenom širokom rasponu brzine vrtnje, velikim ubrzanjima i usporenjima, visokim nazivnim momentima vrtnje i momentima pokretanja. Dodatne prednosti direktnih pogona sastoje se u eliminiranju mehaničkih gubitaka prigona, visokoj torzijskoj krutosti pogonskog vratila, pogonu bez zračnosti s visokom točnosti pozicioniranja i ponovljivosti pozicije pogonskog člana. Njihova tehnička izvedba, nastala "*namatanjem*" linearnog motora na kružni vijenac, daje cilindričnu šuplju formu velikog promjera i male aksijalne duljine. Upravljanje ovih pogona zahtijeva brze računalne sustave s preciznim regulacijskim krugovima što upućuje na potencijalne nedostatke i prednosti ovih pogona.

Zahtjevi tržišta za primjenom direktnih pogona neprekidno rastu, dok istovremeno nema dovoljno teorijskih istraživanja koja bi objasnila promjene u novom pristupu oblikovanja pogonskih mehanizama, kao i posljedice na tijek procesa konstruiranja. Rješavanje postavljenog zadatka oblikovanja pogonskog mehanizma na tehničko-ekonomski prihvatljiv način, treba proizaći iz istraživanja značajki novog pogonskog sustava.

Hipoteza će se dokazati postavkom novih pravila u kreiranju struktura pogonskih mehanizama, te mjerila za ocjenu kvalitete rješenja temeljenih na kvalitativnim konstrukcijskim, tehnološkim i ekonomskim pokazateljima uporabe direktnih pogona u tehničkim sustavima. Postavkom novih pravila utvrditi će se struktura, vrsta, količina i značaj informacija koje tvore neophodna znanja u pristupu oblikovanju pogonskih mehanizama s direktnim pogonom.

Tako postavljena teza nužno uključuje i kreiranje specifičnih sustava konstrukcijskih znanja za utvrđivanje karakteristika i mogućih varijanti u oblikovanju rješenja.

1.3 Metodologija istraživanja

Kako je cilj rada usvajanje novih konstrukcijskih znanja, metodologija rada bazirat će se na strukturalnoj sintezi problema, istraživanju njegovih značajki i utvrđivanju prikladnih kvantitativnih i kvalitativnih značajki za ocjenu rješenja. Provedbom strukturalne sinteze utvrdila bi se načela primjenjivosti direktnih pogona u tehničkim sustavima.

Svrha istraživanja jest iznalaženje i razvijanje novih struktura pogonskih mehanizama s direktnim pogonom, te određivanje mogućnosti i načina približavanja realnim tehničkim rješenjima popraćenih izvedbama. Dodatni zahtjevi koji se postavljaju, posebno s gledišta primjene stečenih znanja koja će podržati rad konstruktora u sugeriranju, kreiranju i ažuriranju odgovarajućih mogućih rješenja pogonskih mehanizama, ima za cilj dobivanje niza novih tehničkih proizvoda odnosno sustava, pri čemu se podrazumijeva i njihova ekonomska opravdanost.

Metodološki rad obuhvaća sljedeće korake:

1. Sagledavanje sadašnjeg stanja razvoja i primjene pogona s visokim momentima vrtnje kao direktnih pogona pogonskih mehanizama, te mogući smjerovi razvoja.
2. Sinteza direktnih pogona i njihove strukture.
3. Utvrđivanje temeljnih postavki oblikovanja pogonskih mehanizama s direktnim pogonom.
4. Verifikaciju i ocjenu primjenjivosti rješenja s eksperimentalnom identifikacijom parametara pogona s visokim momentom vrtnje.
5. Zaključna razmatranja.

Rad je metodološki podijeljen u četiri dijela. U prvom dijelu rada, točnije u drugom poglavlju, istražuju se granice primjene direktnih pogona s visokim momentom. Usporedbom iz cijelog niza tehničkih rješenja pogona, dobivaju se moguće primjenjivi pogonski uređaji za određene namjene u direktnim pogonima tehničkih sustava. Kako nema univerzalnog pogonskog uređaja koji bi pokrivao sva područja primjene u strojogradnji, pokušale su se pronaći osnovne postavke oblikovanja pogona koji bi se mogao fleksibilnije konfigurirati.

U trećem poglavlju prvog dijela rada, sagledavaju se današnja stanja primjene pogona s visokim momentom vrtnje u pogonskim mehanizmima uređaja i tehnološkim postrojenjima. Predočene tehničke izvedbe direktnih pogona u usporedbi sa standardnim rješenjima pogonskih mehanizama s prigonom čine osnovu za nadogradnju specifičnog tehničkog znanja. Iz iznesenog se može zaključiti, da do sada iz dostignutih teorijskih i praktičnih spoznaja postoji realna mogućnost primjene direktnih pogona u velikom broju potencijalnih aplikacija.

Kako su direktni pogoni još uvijek ekonomski nekonkurentni za veliki broj primjena [5], razmatraju se utjecaji na cijenu koštanja direktnog pogona kao tehničkog proizvoda, u drugom dijelu rada obrađenom u četvrtom poglavlju. Iako se kroz cjelokupni proces oblikovanja utječe neposredno na troškove proizvodnje, materijala i montaže primjenjivanim rješenjima, dodatno su utvrđeni utjecaji na troškove radnog vijeka, troškove održavanja i zbrinjavanja[5] direktnog pogona kao tehničkog proizvoda.

U trećem dijelu rada, sažetom u petom poglavlju utvrđuju se temeljne postavke i tehničke značajke u oblikovanju direktnih pogona pogonskih mehanizama tehničkih sustava. Sukladno cilju rada predložene su smjernice, forme i načini strukturiranja parcijalnog i sveobuhvatnog konstrukcijskog znanja s primjenom na direktnim pogonima s visokomomentnim motorom.

U četvrtom dijelu rada kroz šesto, sedmo i osmo poglavlje dana je ocjena primjenjivosti rješenja s završnim razmatranjima, eksperimentalna identifikacija parametara izvedenog direktnog pogona na realnom sustavu eksperimentalnog vozila i zaključkom s prednostima i nedostatcima o implementaciji direktnih pogona u pogonske mehanizme tehničkih sustava.

[5] Odlaganje i recikliranje.

2. GRANICE PRIMJENE DIREKTNIH POGONA S VISOKIM MOMENTOM VRTNJE

2.1 Definicija područja primjene

Pod pojmom direktnog pogona s visokim momentom vrtnje podrazumijeva se pogon s malim brzinama vrtnje i visokim momentnim opterećenjem, koji se koristi za točno izvođenje radnji pozicioniranja s visokom dinamikom ili za obradu unutar tehnološkog procesa. Pogon valjaoničkog stana, slika 2.1, je tipičan primjer direktnog pogona. Budući da naziv *„Torque motor"*–momentni motor, uz koji je povezan termin „*visoki moment vrtnje*" nije normiran, u jezičnoj uporabi nema uvriježeno značenje. Međutim, potrebno je uz pojam direktni pogon nužno povezati i nisku brzinu vrtnje koja je karakteristična za sve sporohodne pogone. Izravni pogon kao jezično prihvatljivija terminologija, podrazumijeva najčešće brzohodni pogon tj. pogon visokim brzinama vrtnje pri relativno niskim momentima kao neposredni pogon ventilatora, crpke, kompresora, gramofona, i dr.



Slika 2.1 Direktni pogon valjaoničkog stana[6]

[6] Istosmjerni motor instalirane snage 3,5 MW pri brzini vrtnje od 80 min^{-1}.

Danas se i u području manjih snaga, npr. kod alatnih strojeva, dijagnostičke opreme, robota i manipulatora, postavljaju zahtjevi kao npr. visoka točnost pozicioniranja radnog člana s ponovljivošću pozicije, koje mogu zadovoljiti samo direktni pogoni. Pogoni s prigonom tj. mehaničkim prijenosnikom ovdje su često neprikladni jer unose vlastitu grešku kutne pozicije uslijed zračnosti i deformacija u sustavu, a reducirana masa pogona na radnom članu raste s kvadratom prijenosnog odnosa. Uz povećani trošak moguće ih je izraditi sa smanjenom zračnosti. Nasuprot tome, direktni pogon s razmjerno malim momentom tromosti rotirajućih masa, otvara mogućnost potpunog iskorištenja modernih elektronskih izvršnih sklopova, a zbog učinkovitosti danas raspoloživih senzora i regulacijske tehnike, moguće je izvođenje preciznih radnji pozicioniranja uz veliku točnost ponovljivosti pozicije pri promjeni smjera vrtnje.

Razgraničenje direktnih pogona s visokim momentom vrtnje od standardnih pogona s prigonom zahtjeva precizniju klasifikaciju područja primjene.

Loša strana elektromotornih pogona s visokim momentom vrtnje je u činjenici, da kod elektroničkih energetskih pretvarača, snaga pogona uvjetuje cijenu uređaja, a kod elektromotora moment vrtnje određuje volumen i masu, odnosno cijenu koštanja.

Uz elektromotorne pogone, razmatranje područja primjene prošireno je i na hidrauličke pogone, kao alternativu u mobilnim tehničkim sustavima. Stoga u slučaju primjene određenog tipa pogona treba dobro odvagnuti između cijene koštanja i zahtijevane tehničke funkcije.

Pored osnovnog zahtjeva visokog momenta i niske brzine vrtnje na direktni pogon, postavljaju se i dodatni zahtjevi, tablica 2.1.

Dinamički pogon	Visoka dinamika putem ograničenih aktivnih masa pogonskog uređaja.
Pogon za pozicioniranje	Visoka točnost pozicioniranja s minimalnim trenjem i bez kutne deformacije i zračnosti u sustavu s visokom ponovljivošću i pri reverziranju rada. Dostatni moment kočenja i pridržavanje s punim momentom u stanju mirovanja.
Visokoopteretivi pogoni	Visoka kratkotrajna preopteretivost uz visoku specifičnu snagu u nazivnoj točki pogona.
Dodatni zahtjev	Jednoliki moment vrtnje i pri niskim brzinama vrtnje.

Tablica 2.1 Lista zahtjeva na pogon s visokim momentom vrtnje

Iz velikog broja izvedbi elektromotornih pogona, potrebno je najprije procijeniti koja tehnička rješenja imaju osnovu za primjenu u direktnim pogonima pogonskih mehanizama. Zadatak studije [6] bila je međusobna usporedba elektromotornih pogona s visokim momentom vrtnje uz procjenu odabira pogona za određene namjene. Polazna točka istraživanja bila je granica primjene direktnih pogon s visokim momentom vrtnje, tablica 2.2, koju je utvrdio radni tim. Obradom tehničkih i ekonomskih karakteristika, pojedinih elektromotornih pogona dobivena su moguća područja primjene. Zbog specifičnog područja i sagledavanja moguće primjene u pogonskim mehanizmima, istraživanja u ovom poglavlju su dodatno proširena i na hidromotorme pogone, koji imaju identičnu primjenu u pogonskim mehanizmima kao i elektromotorni pogoni.

Iako su granice primjene direktnih pogona s visokomomentnim motorima određene, tablica 2.2, u realnim zahtjevima za primjenu mora se ići puno šire od vrijednosti uobičajenih u području servo-pogona, osobito u pogledu snage ili preopteretivosti momentom vrtnje.

Dodatni zahtjev je iznalaženje osnovne postavke za pogon s visokim momentom vrtnje, koji bi se dao fleksibilno konfigurirati za različita područja primjene u pogonskim mehanizmima tehničkih sustava.

Raspon snage	$5\ \text{kW} \le P \le 100\ \text{kW}$
Brzina vrtnje	$n \le 300\ \text{min}^{-1}$ ($\omega \le 31{,}4\ \text{rads}^{-1}$)
Vrsta pogona	hidraulički, električki[7]
Preopteretivost u radu	$T_{max} \le 3\ T_N$ za vrijeme ≤ 10 s

Tablica 2.2 Granice primjene direktnih pogona s visokomomentnim motorima [6]

2.2 Značajke vrednovanja

Za postavljeni kriterij ostvarenja visokog momenta pri malim brzinama vrtnje, koji je osnova za oblikovanje direktnih pogona, iz istraživanja proizlazi, da generalno dolaze u obzir pogonski strojevi kod kojih se mogu kombinirati dostatno veliki radijus momenta vrtnje s velikim specifičnim snagama pogona.

U tom smislu je između velikog broja izvedbi pogona, koje su na današnjem tržištu dostupne, učinjen je predodabir pogonskih strojeva s dobrim izgledima primjene u direktnim pogonima, a za koje su na temelju osnovnih tehničkih karakteristika učinjeni pojednostavnjeni grafički prikazi. Rezultati su uspoređeni pomoću relevantnih značajki kriterija kakvoće, tablica 2.3, i kvalitativnih kriterija, tablica 2.4.

[7] U studiji [6] koja se odnosila na regulirane elektromotorne pogone, pod vrstom pogona se podrazumijeva mogućnost 4-kvadrantnog rada, međutim zbog proširenja područja primjene na hidromotorne pogone podrazumijeva se 2 kvadrantni rad.

Daljnji važni kriteriji izbora slijede iz sustavnog istraživanja za regulirane elektromotorne pogone, a to su trošak za sam frekvencijski pretvarač s regulatorom, dinamička karakteristika pogona i maksimalni pad brzine vrtnje pri preopterećenju momentom vrtnje. Analogno provedenom istraživanju za regulirane elektromotorne pogone prema istim kvalitativnim i kvantitativnim kriterijima, provedeno je i istraživanje za hidromotorne pogone. Kako ne postoji analogija između cijene frekvencijskog pretvarača i cijene hidrauličkog agregata, cijena hidrauličkog agregata nije dodatno uspoređivana. Od bitnog utjecaja na rad direktnog pogona s visokomomentnim motorima je način i postupak hlađenja, koje omogućuje usporedbu iskorištenja volumena i momenta vrtnje pri prisilnom hlađenju.

Kako je definirano istraživanjem, nije moguće odabrati neki određeni univerzalni pogon, koji bi našao primjenu u gotovo svim aplikacijama pogonskih mehanizama tehničkog sustava, već odrediti koncepte i razraditi kriterije, koji omogućuju klasifikaciju s primjenom pogona ovisno o namjeni, te korisniku odnosno konstruktoru olakšati tehničku procjenu pogona koji dolaze u obzir za određene zadatke u tehničkim sustavima.

Stupanj korisnog djelovanja – iskoristivost	η
Specifična obodna (zakretna) sila	τ_w
Iskoristivost momenta vrtnje = specifična zakretna sila x radijus momenta vrtnje	$\tau_w \cdot R$
Aktivna masa pogona (masa rotora)	m_{akt}
Aktivni volumen pogona	V_{akt}
Moment tromosti pogona	I
Gustoća momenta vrtnje	T_N/V_{akt}
Gustoća gubitaka	P_g/V_{akt}
Dinamička karakteristika – maksimalno kutno ubrzanje	ε
Cijena pogona[8]	IC

Tablica 2.3 Značajke za definiranje kriterija kakvoće za pogone s visokim momentom vrtnje

Stupanj nejednolikosti momenta vrtnje - valovitost
Zahtjevi na izradu i posebnosti konstrukcije
Troškovi radnog vijeka

Tablica 2.4 Značajke za definiranje kvalitativnih kriterija za pogone s visokim momentom vrtnje

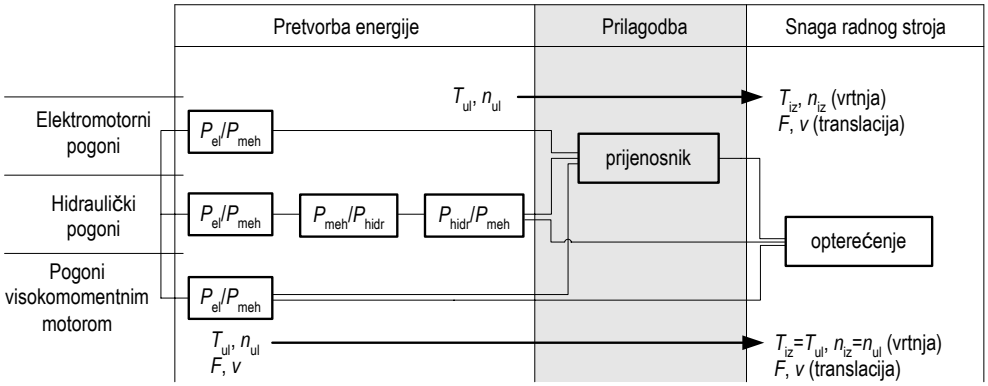
[8] Asinkroni motor p=10 s mrežnim napajanjem uzet je kao osnova pri analizi cijene pogona.

2.3 Sistematizacija značajki s odabirom pogona

2.3.1 Hidraulički pogon

Ocjenu tehničkih prednosti hidraulike najbolje daje svakodnevna praksa u projektiranju tehničkih sustava, konstrukciji i primjeni, koja se očituje u prijenosu velikih sila (snaga) malim gabaritima, kontinuiranoj promjeni brzine i opterećenju uz česte promjene smjera i pravca kretanja, mogućnosti automatizacije s regulacijom i dr. Svaki hidraulički sustav, bez obzira na složenost sastoji se iz pogonskog agregata (pretvarač električne, toplinske ili mehaničke energije u hidrauličnu), upravljačko–regulacijskih elemenata i radnih članova (pretvarač hidraulične u mehaničku energiju), slika 2.2.

Radni član hidrauličkog pogona tj. hidromotor pretvara hidrauličku energiju u mehaničku energiju rotacijskog gibanja izlaznog vratila, pri čemu se pretvorba energije akumulirane u fluidu ostvaruje u procesu pravolinijskog kretanja brtvljenog radnog elementa (klip, ploča) pod djelovanjem sile tlaka fluida. Drugim riječima, princip rada zasniva se na razlici između tlaka fluida na ulazu u hidromotor, koji je proporcionalan raspoloživoj potencijalnoj energiji, i tlaka fluida na izlazu iz hidromotora tj. gubitku u hidrauličkom sustavu od hidromotora do spremnika ulja. Stupanj transformacije energije u hidromotoru izražava se veličinom momenta vrtnje na izlaznom vratilu, koji je korigiran dijelom momenta vrtnje za savladavanje mehaničkih otpora u sustavu.



Slika 2.2 Struktura pogona s pretvorbom energije

Od više konstrukcijskih rješenja hidromotora kao što su zupčanički, krilni, radijalno klipni, aksijalno klipni i dr., prema granici primjene, tablica 2.2, uz provedenu usporedbu iz tehničkih podloga najvećih proizvođača hidrauličke opreme na domaćem tržištu /1/, /2/, /3/ moguću primjenu u direktnim pogonima imaju samo radijalno klipni i aksijalno klipni hidromotori.

2.3.1.1 Radijalno klipni hidromotor

U radijalno klipnom hidromotoru (kratica: RKHM) klipovi su radijalno raspoređeni u obliku zvijezde, pri čemu se njihove osi nalaze u istoj ravnini i sijeku u jednoj točki. Rasporedom klipova u više nizova može se postići veći moment vrtnje hidromotora, dok se smanjenje pulzacije brzine vrtnje osigurava konstrukcijskim rješenjima međusobnog kutnog zakreta nizova klipova. Kako je vidljivo iz konstrukcije, moment vrtnje hidromotora ovisan je o broju i promjeru klipova, veličini ekscentriciteta i razlici tlakova fluida ulaz-izlaz.

Iako postoji više konstrukcijskih rješenja, kao s ventilskim ili žljebnim razvodom, s konstantnim ili promjenjivim protokom, s unutrašnjim bregastim vratilom i vanjskim opterećenjem ili s vanjskim bregovima i unutrašnjim opterećenjem, najčešće se analizira radijalno klipni hidromotor s vanjskim bregovima promjenjivog protoka. U području visokih momenata vrtnje, koje je veoma značajno u pogonskim mehanizmima mobilnih transportnih uređaja (dizalice, vitla, građevinski strojevi i dr.) danas se najčešće koriste ovi hidromotori. Iz prilagodbe ovih pogona radnoj točki procesa, slika 2.2, koja je daleko povoljnija od navedenih pogonskih uređaja, mogu se očekivati izvedbe u graničnom području brzina vrtnje, tablica 2.2.

Radijalno klipni hidromotor je pogodan za primjenu kao direktni pogon, jer postiže prikladan momente vrtnje do 43000 Nm uz male brzine vrtnje do 3 min^{-1}.

2.3.1.2 Aksijalno klipni hidromotor

Aksijalno klipni hidromotor (kratica: AKHM) danas je zbog niza izvanrednih svojstava, najčešće korišteni tip pogona u hidrauličkim sustavima. Glavna prednost je kompaktna konstrukcija s velikim mogućnostima nadogradnje i proširenja sustava za regulaciju pogona. Osnovni princip aksijalno klipnog motora s konstantnom brzinom vrtnje je podloga za oblikovanje sporohodnog hidromotora. Takve sporohodne izvedbe mogu raditi s najmanjim brzinama vrtnje od 3-7 min^{-1} i momentima vrtnje do 1500 Nm, dok standardne izvedbe rade s brzinama vrtnje do 50 min^{-1} i nazivnim momentom do 500 Nm. Za pogon vitla autodizalice za potezne sile do 50 kN, najčešće korišteni sporohodni aksijalno klipni hidromotori ugrađuju se u unutrašnjost bubnja.

2.3.2 Elektromotorni pogon

Predodabir mogućih elektromotornih pogona koji se mogu koristiti kao direktni pogoni u pogonskim mehanizmima tehničkih sustava, a koji su dostupni na današnjem tržištu, ograničava se na pogone bez četkica, kao tehnički opće prihvaćena rješenja elektromotornih pogona napajanih preko frekvencijskih pretvarača. Predodabrani elektromotorni pogoni svrstani su u tri osnovne grupe:

- asinkroni motori;
- motori s uzbudom putem trajnih magneta;
- reluktantni strojevi s obostrano izraženim polovima.

2.3.2.1 Asinkroni motori

Asinkroni strojevi na današnjem nivou tehničkog razvoja, su općenito, najrasprostranjenija vrsta elektromotornih pogona. Kod primjene u reguliranim pogonima istiskuju istosmjerne pogone, slika 2.1, iz nekoliko razloga:

- jednostavnija konstrukcija opće poznate strukture;
- veća maksimalna snaga i brzina vrtnje:
- pogon bez iskrenja (bitan za rad u eksplozijskim atmosferama) tj. motor bez elemenata koji se troše u radu kao četkice ili klizni prsteni;
- svakodnevni pad cijena frekvencijskih pretvarača i dr.

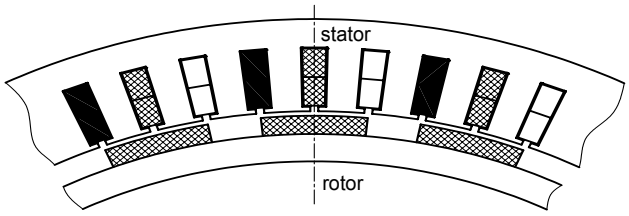
Asinkroni motor (kratica: ASM_{50Hz}) s mrežnim napajanjem uzima se kao osnova za usporedbu svih predodabranih elektromotornih pogona. Asinkroni motor s mrežnim napajanjem može omogućiti stupnjevanu regulaciju brzine vrtnje, pri čemu se potrebna mala brzina vrtnje namješta pomoću broja pari polova statora ($p \geq 10$).

Kod *asinkronih motora napajanih frekvencijskim pretvaračem* (kratica: ASM_{fp}), preko odabranog broja pari polova i frekvencije napona, može se dodatno optimirati pogon obzirom na brzinu vrtnje, potrebnu jalovu snagu, odnosno dimenziju i masu pogona.

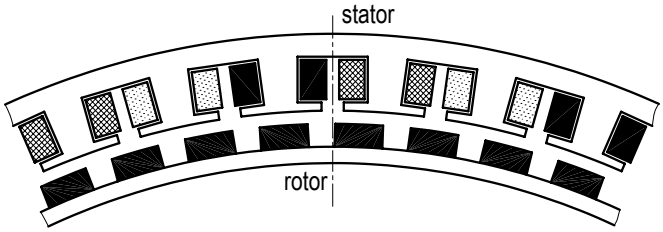
2.3.2.2 Motori s uzbudom putem trajnih magneta

Sinkroni strojevi s uzbudom putem trajnih magneta (kratica: PMSM), slika 2.3, poznati su i pod nazivom elektronički komutirani motori, a zbog dinamičkih svojstava popraćenih stabilnom sinkronom brzinom vrtnje u cjelokupnom području rada, imaju veliko značenje s primjenom kod servo-pogona.

Višefazni sinkroni stroj s uzbudom putem trajnih magneta (kratica: PPSM), slika 2.4, naziva se po nekim autorima i *modularni stroj s trajnim magnetima* (kratica: MDM). Osnovna konstrukcijska karakteristika, koja ih razlikuje od većine elektromotornih pogona, jest različiti broj polova u statorskom i rotorskom dijelu. Moment vrtnje ovi elektromotorni pogoni stvaraju putem drugog, višeg harmoničkog vala magnetske indukcije u zračnom rasporu između armature i strujne obloge. Zbog posebnog rasporeda i oblika magnetskog polja mogući su mali polni koraci i osobito visoke specifične snage.

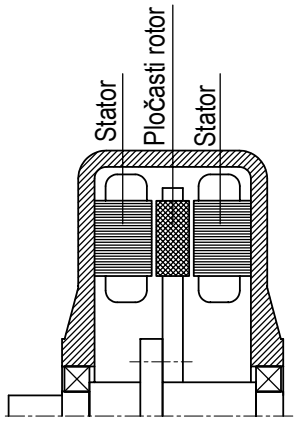


Slika 2.3 Princip izvedbe sinkronog motora s uzbudom putem trajnih magneta



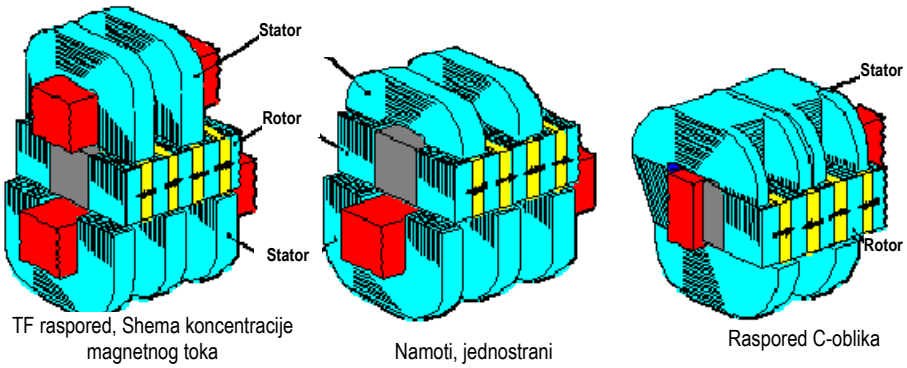
Slika 2.4 Princip izvedbe višefaznog sinkronog motora s uzbudom putem trajnih magneta

Motor s aksijalnim poljem i uzbudom putem trajnih magneta (kratica: axPMSM), slika 2.5, konstrukcijski odgovaraju sinkronim motorima s uzbudom putem trajnih magneta, s tim da se pločastom izvedbom rotora s obostranim statorom, postiže kraća konstrukcija uz dobro iskorištenje volumena pogona.



Slika 2.5 Princip izvedbe pogonskog motora s aksijalnim poljem i uzbudom putem trajnih magneta

Pogonski motor s transverzalnim magnetnim tokom i uzbudom putem trajnih magneta (kratica: TFM), slika 2.6. Zbog specifične strukture magnetskog toka, koji teče poprečno na smjer vrtnje i bez ograničenja kotvenog protoka, moguće ih je izvesti jedino uz ekstremno male polne korake. Zato se takvi pogonski strojevi ističu osobito velikim specifičnim snagama. Raspored trajnih magneta između polova statorskih namota, koncentrira magnetni tok, što ima za posljedicu veliko odstupanje magnetskog toka u rubnim zonama popraćeno padom brzine vrtnje pri preopterećenju.



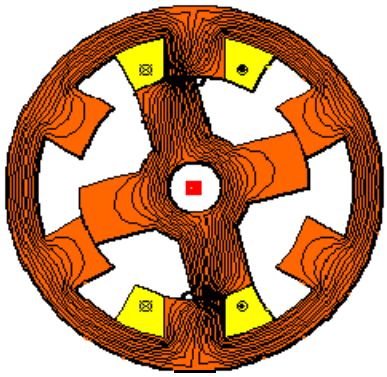
Slika 2.6 Princip izvedbe motora s transverzalnim protokom

2.3.2.3 Reluktantni strojevi s obostrano izraženim polovima

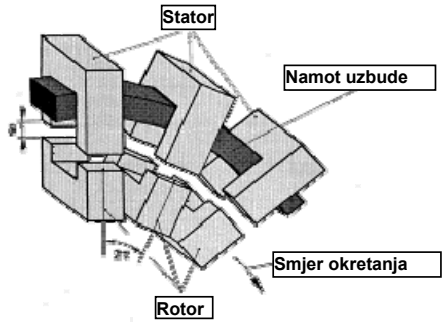
Reluktantni strojevi ovog tipa konstrukcije izvedeni su od koračnih motora poznatih iz servo tehnologije. Tehnološka prednost ovakvih strojeva je u vrlo jednostavnoj izvedbi rotora, koji se može izraditi slaganjem u niz jednostavnih štancanih limova bez rotorskih namota i trajnih magneta. Svi strojevi ovog tipa konstrukcije zahtijevaju dodatnu jalovu snagu magnetizacije preko statora, iz čega se može zaključiti o povećanoj cijeni frekvencijskog pretvarača. *Reluktantni stroj s efektom brida* (kratica: SRM), slika 2.7, poznat je pod nazivom "*Switched Reluctance Machine*", konstrukcijski je najjednostavnije izrade od svih analiziranih elektromotornih pogona, a time i najjeftiniji za proizvodnju. Tijekom zadnjih dvadesetak godina nalazi sve značajniju primjenu unutar reguliranih pogonskih mehanizama tehničkih sustava.

Električni stroj s transverzalnim protokom (kratica: TFE), slika 2.8, konstrukcijski odgovara u magnetskom smislu reluktantnim strojevima s efektom brida, ali s transverzalnim elektromagnetskim tokom. Imaju mogućnost povećanja specifične snage smanjenjem polnog koraka.

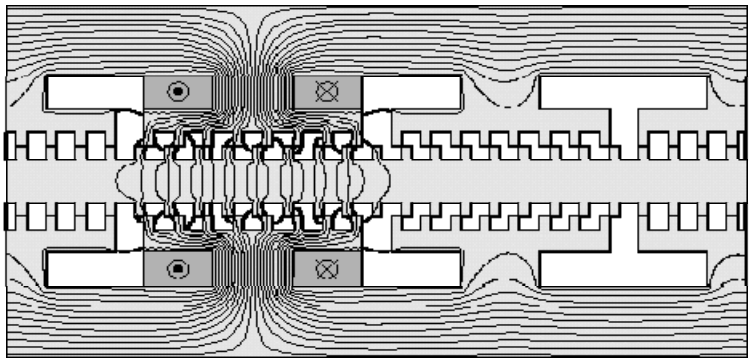
Kod *visokopolnog reluktantnog stroja s efektom brida* (kratica: MTQ) ili motora s mega momentom vrtnje, slika 2.9, sva primijenjena konstrukcijska rješenja nastoje povećati bridove koji stvaraju elektromagnetnu silu, a istovremeno i poboljšati volumensku iskoristivost višekratnom uporabom aktivnih površina. Zbog jednostavnosti, polja magnetskog toka prikazana su u pravokutnim koordinatama, odakle je vidljiva dvostruka iskoristivost pločastog rotora smještenog između dva statora.



Slika 2.7 Princip izvedbe reluktantnog motora

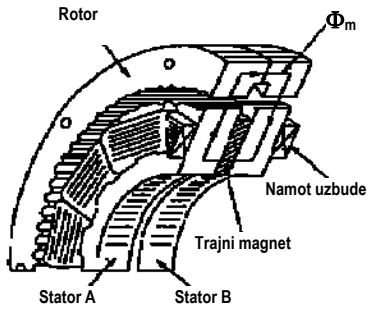


Slika 2.8 Princip izvedbe motora s transverzalnim protokom sa statorskom uzbudom



Slika 2.9 Princip izvedbe visokopolnog reluktantnog motora s efektom brida

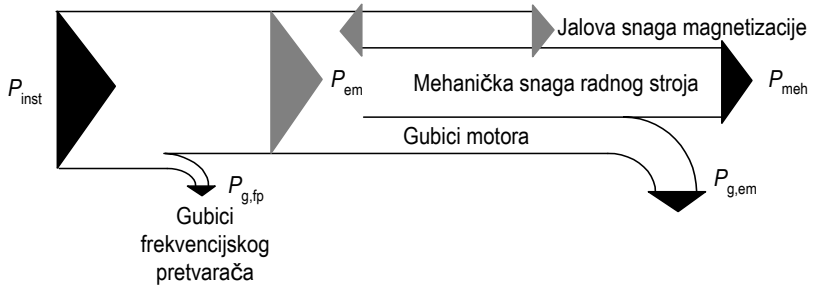
Hibridni motor s obostrano izraženim polovima i uzbudom putem trajnih magneta u statoru (kratica: PMRM), slika 2.10, predstavlja kombinaciju stroja s transverzalnim protokom i uzbudom putem trajnih magneta i koračnog motora. Poznati su pod trgovačkim imenom „*Dynaserv*“. Uz adekvatnu regulaciju, oni omogućavaju vrlo točno pozicioniranje, a u beznaponskom stanju pokazuju dostatni moment kočenja i pridržavanja s punim momentom u stanju mirovanja.



Slika 2.10 Princip izvedbe hibridnog motora s obostrano izraženim polovima i uzbudom putem trajnih magneta u statoru

2.4 Instalirana snaga frekvencijskog pretvarača

Osim što za pogonski elektromotor osigurava električnu energiju u traženom obliku i potrebnu jalovu snagu magnetizacije, sam pretvarač također stvara i gubitke koji nastaju u radu.



Slika 2.11 Energetska bilanca pogona

Iz ukupne energetske bilance, slika 2.11, vidljivo je da instalirana snaga frekvencijskog pretvarača P_{inst} mora uvijek biti veća od snage pogonskog elektromotora P_{em}, odnosno nazivne snage radnog stroja $P_{meh,N}$. Stoga poluvodičke komponente u sustavu moraju biti energetski dimenzionirane za sveukupnu snagu koju osigurava frekvencijski pretvarač. Budući se ovdje uspoređuju pogonski strojevi koji zahtijevaju sinusoidno napajanje sa strojevima koji imaju pravokutni ili trapezni strujni tok, nije se moguće poslužiti često korištenim produktom kakvoće $\eta_{em} \cdot \cos\varphi$. Za opis troška frekvencijskog pretvarača uvodi se indeks snage r_{fp} kao odnos između instalirane snage uređaja i nazivne snage pogonskog stroja.

Indeks snage frekvencijskog pretvarača: $r_{fp} = \dfrac{P_{inst}}{P_{meh,N}}$ (2.1)

Instalirana snaga frekvencijskog pretvarača dobiva se prema vrsti spoja, a za 4-kvadrantne frekvencijske pretvarače u mosnom spoju (ostali spojevi nisu uobičajeni u ovom području snage, pa ih ne treba uzeti u obzir) računa se prema izrazu:

$$P_{\text{inst}} = z \cdot \frac{U_z}{2\sin\left(\frac{\pi}{z}\right)} \cdot I_{\text{F,max}} \tag{2.2}$$

Postaje jasno da instaliranu snagu frekvencijskog pretvarača obilježavaju veličine koje određuju odabir komponenti odnosno poluvodiča, čime su istovremeno obuhvaćene i veličine koje određuju cijenu. Ovo je važno zato što, kao i uvijek, najveći dio u ukupnom trošku elektromotornog pogona predstavlja trošak frekvencijskog pretvarača.

Analogijom se ista usporedba može provesti i za hidraulički pogon, samo što umjesto frekvencijskog pretvarača imamo hidraulički agregat, za čiji se opis troškova također može koristiti odnos između instalirane snage hidrauličkog agregata i nazivne snage pogonskog stroja.

2.5 Dinamička karakteristika

Općenito kod hidrauličkih ili elektromotornih pogonskih strojeva pod dinamičkom karakteristikom ili dinamičkim „*ponašanjem*“ [7] podrazumijeva se vrijeme do uspostave nazivnog momenta vrtnje u radnom stroju nakon poremećaja. Za razliku od hidrauličkih pogonskih strojeva gdje dinamička karakteristika ovisi o raspoloživoj akumuliranoj energiji u sustavu, u elektromotornim pogonima dinamička karakteristika se utvrđuje putem djelatnih indukcija motora i rezervne snage koja postoji u frekvencijskom pretvaraču ovisno o pogonskoj točki. Kod asinkronih strojeva to je rasipna indukcija, a kod sinkronog stroja to je sinkrona reaktivnost. Odgovarajućim predimenzioniranjem frekvencijskog pretvarača moguće je naravno i pogonskom motoru s velikom induktivnošću pridružiti određenu dinamiku u radu.

Iz uvjeta gibanja, kao daljnja karakteristična veličina za procjenu dinamičkog ponašanje pogona je moment tromosti masa pogona tj. rotora čija veličina zajedno s momentom tromosti radnog stroja neposredno utječe na kutno ubrzanje radnog člana pogonskog mehanizma.

2.6 Preopteretivost momentom vrtnje

Bitan kriterij koji se postavlja na elektromotorni pogon s frekvencijskim pretvaračem, kao i na hidraulički pogon s agregatom jest preopteretivost momentom vrtnje. Za pogon ovo znači odgovarajuće predimenzioniranje električnog sustava tj. magnetskog polja, odnosno hidrauličkih elemenata i strojnih dijelova. Pri kratkotrajnom preopterećenju dolazi do

povećanog zagrijavanja pogonskog sustava. Do neke granice (najčešće termička otpornost izolacije namotaja) može se koristiti termička tromost komponenata pogonskog stroja. Kod pogonskih strojeva s uzbudom putem trajnih magneta potrebno je dodatno povesti računa da se magneti ne bi razmagnetizirali uslijed protu djelovanja struje armature. Ovo neumitno vodi do većeg troška za magnetni materijal koji treba biti legiran lantanidima, no što je to slučaj sa standardnim elektromotornim pogonima.

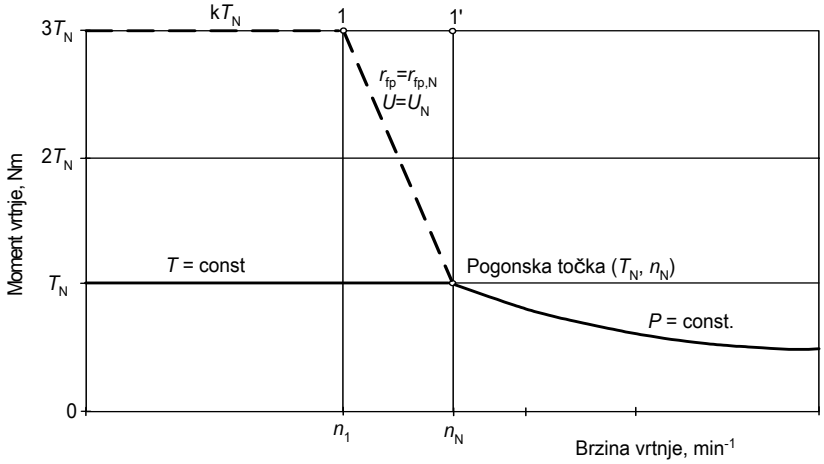
Ako se za osnovna promatranja u prvoj aproksimaciji uzmu sinusoidne veličine, tada snagu frekvencijskog pretvarača među ostalim, određuje fazni kut φ između struje i napona motora. Tako zajedno sa stupnjem korisnog djelovanja η dobiva i poznati uvjet za dimenzioniranje frekvencijskog pretvarača:

$$P_{\text{inst}} = \frac{P_{\text{meh,max}}}{\eta \cdot \cos\varphi} \tag{2.3}$$

Razmatranja u [6] ograničena su na standardni frekvencijski pretvarač uobičajen za dano područje snage, tablica 2.2, u 4-kvadrantnom spoju. Frekvencijski pretvarači su u ovom području snaga najčešće opremljeni poluvodičkim sklopkama koje se ne smiju dugotrajno termički preopteretiti, osim u vrlo kratkom vremenskom razdoblju do 10 sekundi. To znači da najmanja instalirana snaga frekvencijskog pretvarača proizlazi iz umnoška maksimalne fazne struje kod preopterećenja i maksimalnog faznog napona u pogonu. Za zadovoljenje dodatnih zahtjeva na dinamiku u području preopterećenja treba dodatno povećati instaliranu snagu frekvencijskog pretvarača.

U slučaju preopterećenja, kad se pogon nalazi u nazivnoj radnoj točki (T_{N}, n_{N}), slika 2.12, dolazi do povećanja fazne struje na pogonskom stroju, što ima za posljedicu, kod svih varijanti pogonskih strojeva, povećani pad napona na otpornicima i reaktancijama stroja. Ovo je moguće jedino, ako se ili poveća fazni napon ili ako se pri konstantnom naponu (pogon na granici napona, U=U_{N}) nazivna brzina vrtnje n_{N} smanji na brzinu vrtnje n_1. Instalirana snaga frekvencijskog pretvarača odgovara tada snazi potrebnoj za nazivnu točku pogona. Nasuprot tome, ako se brzina vrtnje i pod preopterećenjem mora održati konstantnom, potreban je frekvencijski pretvarač s primjereno velikom rezervom snage namijenjene povećanju dinamike sustava. Potvrđuje se da je za dimenzioniranje frekvencijskog pretvarača za slučaj preopterećenja i ovaj put dominantna veličina struje kratkog spoja.

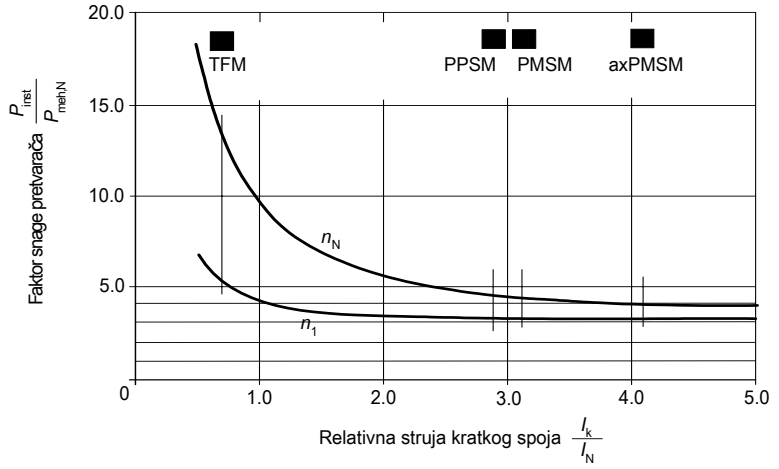
Vrednovanje izraza (2.1), (2.2) i (2.3) dovodi do dijagrama, slika 2.13, gdje je na primjeru sinusoidnog napajanja prikazano potrebno predimenzioniranje frekvencijskog pretvarača, u ovisnosti o tome da li je potrebno održati brzinu vrtnje n_{N} ili dopustiti opadanje brzine vrtnje na n_1.



Slika 2.12 Definicija radnih točaka pogonskog stroja i frekvencijskog pretvarača

Variranjem preopterećenja pogonskog stroja između k=1-4, relativna struja kratkog spoja varira između vrijednosti $\frac{I_k}{I_N} \approx 0{,}5$ kod vrlo "*mekih pogonskih strojeva*" do $\frac{I_k}{I_N} \approx 3$ kod "*tvrdih pogonskih strojeva*". Postaje jasno da minimalni trošak na povećanju snage frekvencijskog pretvarača zbog preopterećenja momentom vrtnje imamo kod strojeva s $\frac{I_k}{I_N} \geq 5$.

Područje brzine vrtnje moguće je pod preopterećenjem momentom, konstrukcijski ograničiti kod strojeva s relativno visokom reaktancijom, tj. strojeva s manjom strujom kratkog spoja. Upravo ovi "*meki pogonski strojevi"* osobito su prikladni za regulaciju pogon slabljenjem magnetske uzbude putem fazne regulacije struje statora.



Slika 2.13 Dimenzioniranje frekvencijskih pretvarača pri preopterećenju preko relativne struje kratkog spoja

2.7 Rezultati usporedbe značajki pogona

Istraživanja su pokazala da su u pogledu načina i vrste hlađenja trendovi isti kod svih navedenih elektromotornih pogona, tako da je za procjenu dovoljno međusobno usporediti pogonske strojeve s istim tipom hlađenja. Stoga su sve usporedbe obavljene za pogonske strojeve s vodenim prisilnim hlađenjem s jednim rashladnim plaštom oko statora. Kako rashladni sustavi s vodom imaju najmanje dimenzije, za očekivati je njihovu praktičnu primjenu u direktnim pogonima s visokomomentnim motorima.

Iz pregleda dimenzija predloženih koncepata pogonskih strojeva (za istu snagu), slika 2.14, i troškova frekvencijskih pretvarača, uočavaju se razlike u odnosu na površinski zrakom hlađeni asinkroni motor napajan iz mreže, koji je odabran kao referentna veličina za usporedbu.

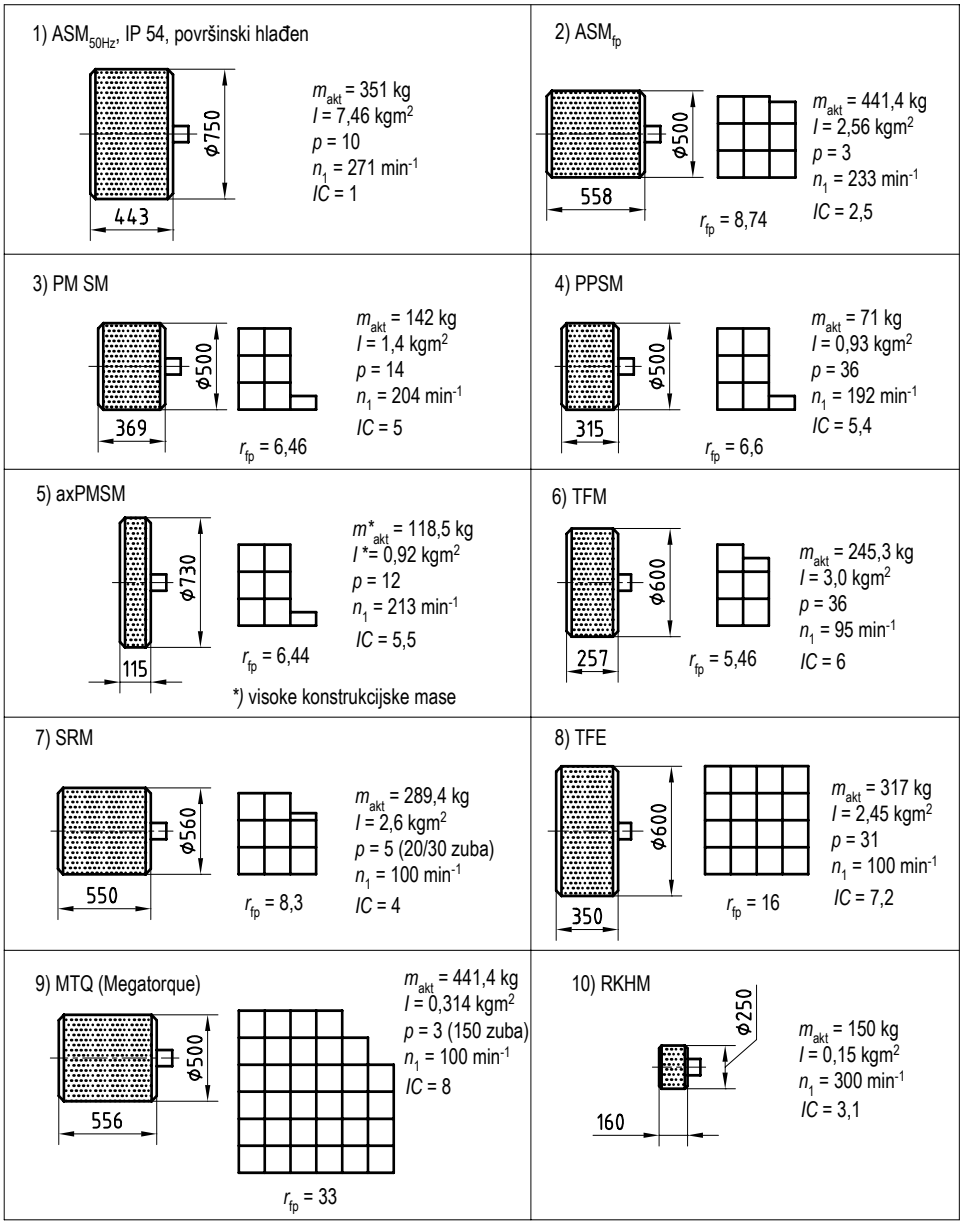
Dok su glavne dimenzije pogonskih strojeva iste nazivne snage navedene neposredno, trošak frekvencijskog pretvarača prikazan posredno indeksom snage r_{fp}. U idealnom slučaju trebalo bi kod preopteretivosti 3-strukim momentom vrtnje (k=3) očekivati i 3-struko veći indeks snage. Nadalje su navedene mase aktivnog materijala tj. rotora, momenti tromosti rotora i brzine vrtnje koja se postiže pod opterećenjem. Vidljivo je da uslijed visokog momenta vrtnje, čak i kod vodenog hlađenja, svi koncepti pogonskih motora iste snage spadaju približno unutar jedne IEC veličine motora. Površinski hlađeni asinkroni motor (ASM_{50Hz}) napajan iz mreže, doseže za dva razreda veću IEC veličinu. Cijena pogonskog uređaja s frekvencijskim pretvaračem odnosno hidrauličkim agregatom je prikazana indeksom cijene *IC* tj. relativnim odnosom cijene asinkronog motora napajanog iz mreže (ASM_{50Hz}) i cijene uspoređivanog pogona s frekvencijskim pretvaračem.

Stoga se mogu donijeti tri bitna zaključka:

1. Za masu i dimenzije pogonskog motora odlučujuće je traženo preopterećenje, koje uvjetuje izvedbu magnetskog toka. Nasuprot tome, rashladni sustav s prisilnim hlađenjem, kao sekundarni efekt uvjetuje samo dimenzije namota statora i težinu bakra u elektromotornom pogonu.

2. Sveukupno gledano, grupa pogonskih strojeva s uzbudom putem trajnih magneta (pozicija 3, 4, 5 i 6, slika 2.14) ne samo da ima najmanje dimenzije i masu, već i najmanji trošak frekvencijskog pretvarača.

3. U grupi reluktantnih strojeva (pozicije 7, 8 i 9, slika 2.14) pokazuje se da značajno raspršivanje magnetskog polja, osobito kod visokopolnih koncepata izvedenih od koračnih motora, dovodi do nepovoljnih dimenzija i enormnog porasta troška frekvencijskog pretvarača. Najpovoljniji rezultati dobiveni su s 10-polnim reluktantnim strojem s efektom brida. Nasuprot tome, koncept hibridnog motora pokazuje nepovoljne zakonitosti rasta tako da više jednostavno nije bilo smisla raditi koncept za ovu snagu.

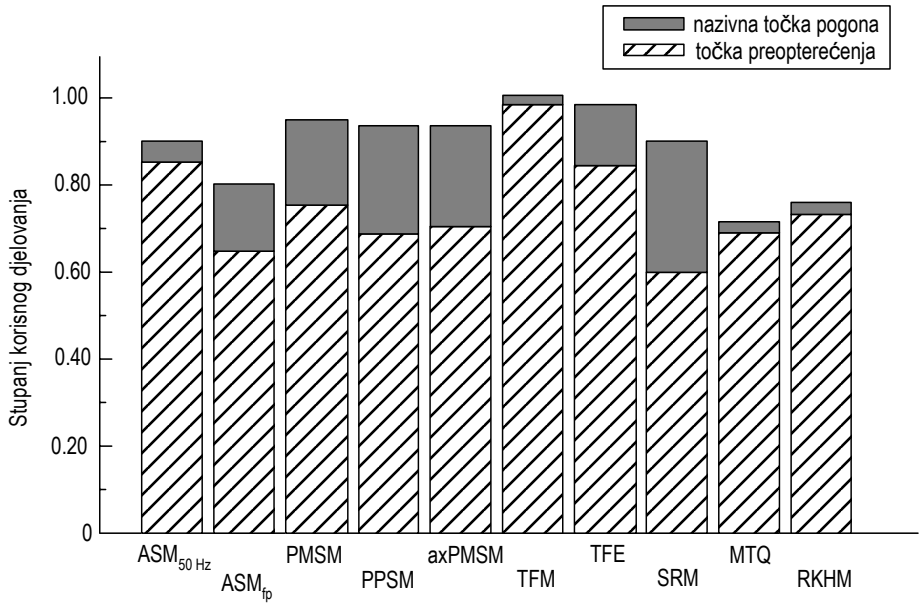


Slika 2.14 Usporedba dimenzija i cijene za pogonske strojeve s prisilnim hlađenjem za istu pogonsku snagu

Daljnje diferenciranje rezultata dobiva se promatranjem stupnja korisnog djelovanja, slika 2.15, iskoristivosti momenta vrtnje, slika 2.16 i volumena pogonskog stroja, slika 2.17.

Kod stupnja korisnog djelovanja, slika 2.15, pokazuje se kao prvo, da pogonski strojevi ASM_{50Hz}, ASM_{fp}, PMSM, PPSM s većim brzinama vrtnje pri preopterećenju uslijed povećanja potrebne fazne struje pokazuju odgovarajuće povećanje gubitaka. Strojevi s malom strujom kratkog spoja TFM načelno pokazuju povoljnije tendencije povećanja iskoristivosti, ukoliko pri zahtjevu na preopterećenje momentom vrtnje ne moraju biti visokozasićeni, kao što je to primjerice slučaj kod pogonskih strojeva SRM i MTQ. Pogonski stroj s transverzalnim protokom ovdje postiže vidno najbolje rezultate. Nasuprot tome, kod visokopolnih reluktantnih strojeva s efektom brida sveukupno loš stupanj korisnog djelovanja je posljedica znatnog raspršivanja visokopolnog magnetskog polja i potrebnog visokog zasićenja. Budući je svaki koncept zapravo uvijek kompromis između oprečnih zahtjeva, alternativno bi naravno bilo moguće odabrati jednu izvedbu magnetnog polja, manje zasićenu, no time se dolazi do vrlo nepraktičnih dimenzija.

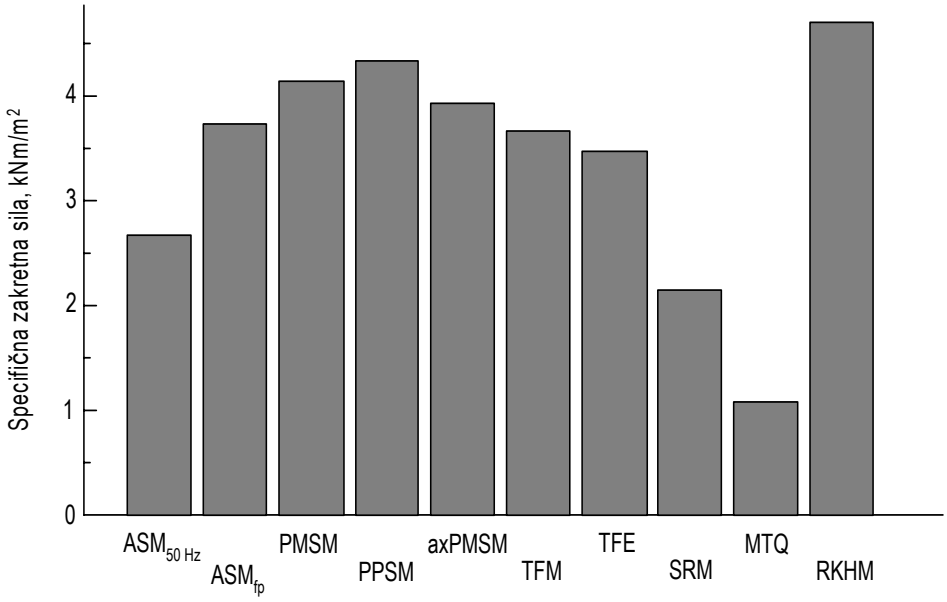
Hidraulički pogon s radijalno klipnim hidromotorom pokazuje zavidne rezultate korisnog djelovanja, koji su istog reda veličina kao i kod asinkronog motora napajanog frekvencijskim pretvaračem.



Slika 2.15 Usporedba stupnja korisnog djelovanja

Vezano za iskoristivost momenta vrtnje, slika 2.16, pogonski strojevi s uzbudom putem trajnih magneta PMSM, PPSM, axPMSM, koji su smješteni neposredno u zračnom rasporu (konstrukcija s plosnatim magnetima), na prvom su mjestu, a uz tijesan razmak slijede ih asinkroni motori ASM_{50Hz} i ASM_{fp}, te motori s transverzalnim protokom TFM i TFE. Ovo treba dovesti u vezu s mogućim konstrukcijski izvedivim velikim radijusom rotora koji stvara moment vrtnje.

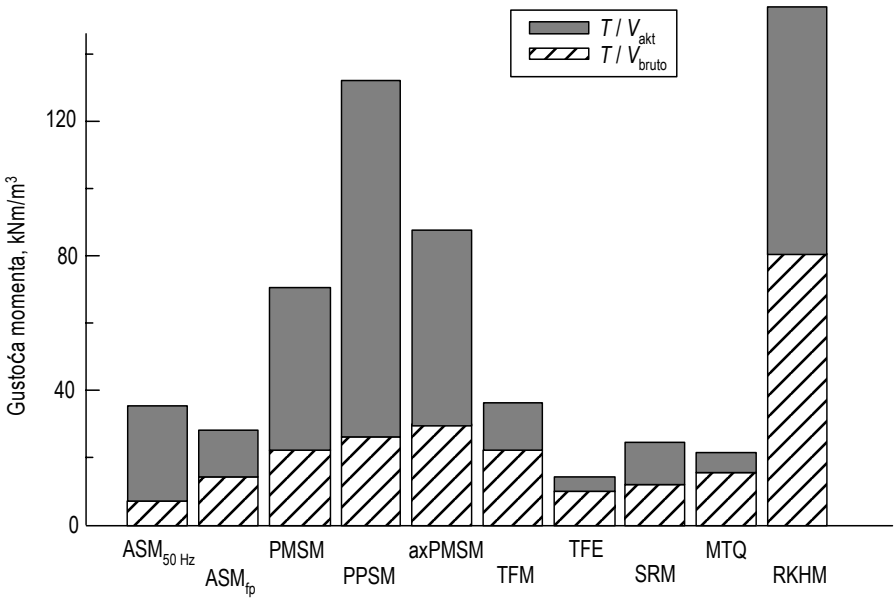
Reluktantni koncepti SRM i MTQ pokazuju načelno manju specifičnu zakretnu silu, pa se tu mora računati s manjim vrijednostima. Ovaj nedostatak moguće je kompenzirati jedino kod strojeva s transverzalnim protokom s uzbudom putem statora TFE, i to pomoću povoljnijeg radijusa koji stvara moment vrtnje.



Slika 2.16 Iskoristivost momenta vrtnje

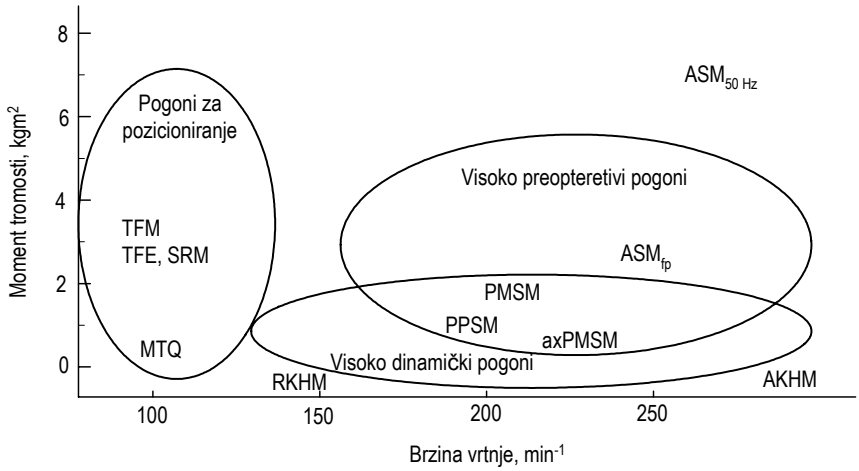
Gustoća momenta vrtnje, slika 2.17, promatrana je s aspekta aktivnog materijala tj. volumena rotora i s aspekta bruto volumena pogonskog motora.

Daleko najbolju iskoristivost volumena pokazuje radijalni klipni hidromotor RKHM, dok kod elektromotornih pogona najbolju iskorištenost aktivnog materijala pokazuju pogonski motori s uzbudom putem trajnih magneta PPSM, PMSM i axPMSM, u izvedbama s plosnatim magnetom. Razlog tome leži u konzistentno malim polnim koracima i uslijed toga mogućim malim dimenzijama jarma. Ovdje je na prvom mjestu PPSM. Nasuprot tome, ako se promatra iskorištenje ugrađenog prostora, vrijednosti za sve pogonske strojeve se međusobno približavaju. Reluktantni strojevi SRM, MTQ i FTE ovdje osobito slabo prolaze, iako su upravo radi stupnja korisnog djelovanja vrlo povoljni.



Slika 2.17 Iskorištenje volumena

Promatranjem koncepata pogona obzirom na moment tromosti rotacionih masa i nazivnu brzinu vrtnje pod preopterećenjem dolazimo do raspodjele po području primjene, slika 2.18. Vrlo se jasno raspoznaje grupiranje pogonskih strojeva s visokom relativnom strujom kratkog spoja u području visokodinamičkih pogona tj, pogona za ubrzanje, odnosno visoko opteretivih pogona. Pogonski strojevi s malom relativnom strujom kratkog spoja smjestili su se više u području pogona za pozicioniranje. Nešto niže se nalazi visokopolni reluktantni stroj MTQ koji se izdvaja vrlo malim momentom tromosti rotora, dok drugi ekstrem predstavlja visokopolni mrežno napajani asinkroni stroj, koji uslijed napajanja iz krute mreže pokazuje najmanji pad broja okretaja.



Slika 2.18 Klasifikacija prema području primjene

Može se konstatirati da zahtjevima iz osnovne specifikacije generalno najbolje mogu udovoljiti strojevi s uzbudom putem trajnih magneta, jer oni pokazuju najbolje iskorištenje i najmanje dimenzije uz istovremeni najmanji trošak za frekvencijski pretvarač.

U ovoj grupi se za *višefazni sinkroni stroj s uzbudom putem trajnih magneta* može zaključiti sljedeće:

- □ - najbolje iskorištenje aktivnog materijala;
- □ - najmanji moment tromosti aktivnih masa;
- □ - jednostavna izvedba namota statora, s malim glavama namota;
- □ - primjena jednostavne konvencionalne tehnologije izrade za statorski i rotorski paket limova;
- □ - iskorištenje aktivnog volumena pogona nije zadovoljavajuće;
- □ - kolebanje brzine i momenta vrtnje može se popraviti optimiranjem frekvencijskog pretvarača.

Gotovo jednako kvalitativno vrijedan pogonski *stroj s aksijalnim poljem s uzbudom putem trajnih magneta* također pokazuje sljedeće:

- □ - visoki stupanj iskorištenja;
- □ - visoki udjel konstrukcijski uvjetovane aktivne mase i momenta tromosti rotirajućih dijelova;
- □ - mogućnosti poboljšanja iskorištenja aktivnog volumena već su iscrpljene;
- □ - tehnologija izrade pločastih statora je skuplja.

Daljnje mogućnosti optimizacije specifične za određenu namjenu proizlaze iz odabira parametara *struja–vrijeme–tijek napona* frekvencijskog pretvarača. Isti se primjerice, bez preopterećenja frekventnog pretvarača, mogu tako odabrati da se dobije veći moment vrtnje, ako to stroj termički dopušta [7] ili kod strojeva s većim udjelom reluktantnih sila, odabrati tako, da gubici budu minimalni [8].

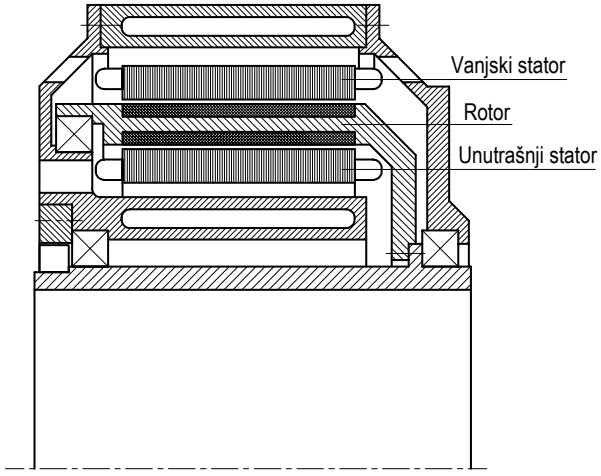
2.8 Daljnji razvoj elektromotornih pogona s visokim momentom vrtnje

U procesu oblikovanja direktnih pogona pogonskih mehanizama poželjno bi naravno bilo rješenje, koje bi pokrilo sva područja primjene s jednim konceptom pogonskog stroja, a koji bi se dao po potrebi modificirati i složiti po sistemu dogradnih jedinica [9], [10]. Za to bi

bio potreban elektromotorni pogon s malim momentom tromosti aktivne mase, velikom strujom kratkog spoja i malim aktivnim volumenom izvedbe. Najveći potencijal za razvoj u tom smislu, prema provedenim analizama, možemo naći kod višefaznog sinkronog stroja s uzbudom putem trajnih magneta.

Za predočenje ovih mogućnosti dan je prijedlog, slika 2.19, koji prikazuje višefazni sinkroni stroj s uzbudom putem trajnih magneta s jednostavno savijenom radnom plohom. Ovakvo predloženo konstrukcijsko rješenje dovodi do znatnog povećanja iskorištenja volumena, tj. dužina modela stroja, slika 2.14, gotovo bi se prepolovila.

Iskorištenjem prednosti ovakve koncepcije postojeći volumen može se pomoću zvonaste konstrukcije rotora, te iznutra i izvana položenim statorom s namotima, bitno bolje iskoristiti. Šuplje vratilo pritom osigurava potpunu integraciju u radni stroj uz uštedu prostora. Ovisno o rasporedu trajnih magneta na rotoru, jaram rotora služi za zatvaranje magnetskog toka, a varijante izvedbe statora mogu ići od dva statora kao nezavisnih pogona, do statora kao nositelja trajnih magneta, tj. stanja kada su oba statora magnetski spojena jarmom. Moment tromosti rotora pritom lagano varira, ali sveukupno gledano ostaje minimalan.

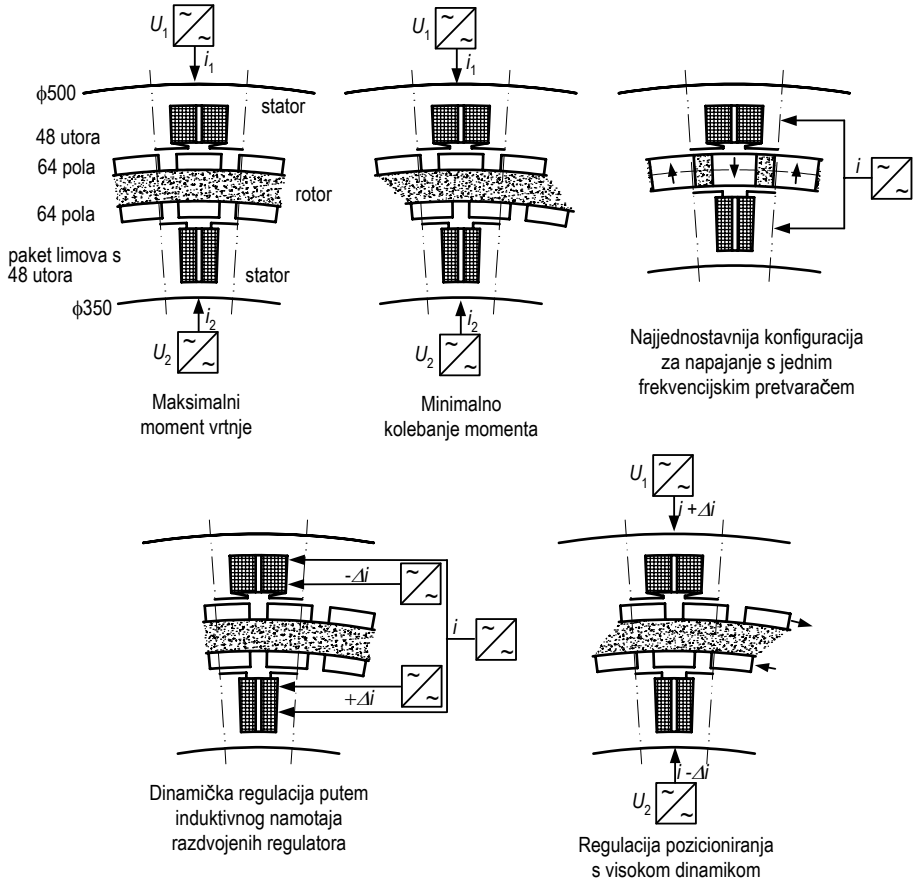


Slika 2.19 Očekivani razvoj višefaznog sinkronog motora s uzbudom putem trajnih magneta

Ovisno o rasporedu trajnih magneta, dobivaju se različiti stupnjevi slobode u variranju napajanja oba statora, što će ovisiti o namjeni pogona.

Na taj način, neovisno o mogućnostima optimizacije koji proizlaze iz odabira faktora pokrivenosti polova i oblika statorskih polova, mogao bi se sustav magneta dodatno optimizirati konstrukcijskim rasporedom trajnih magneta i statorskih namota, kako za maksimalni ili srednji moment vrtnje, tako i za minimalnu valovitost momenta. Napajanje frekvencijskim pretvaračem i spoj namota, mogu se mijenjati od najjednostavnije varijante s jednim pretvaračem frekvencije do više pretvarača za veću dinamiku pogona ili točnije pozicioniranje s visokom ponovljivosti pozicije, slika 2.20.

Za dinamičke zadatke pozicioniranja mogu se statori navoditi i u suprotnom smjeru vrtnje, čime se omogućava diferencijalna regulacija, koja dovodi do udvostručenja dinamike u usporedbi s jednostavno navođenim pogonskim strojem. Ovisno o tome koja je regulacijska rezerva potrebna, nazivni moment vrtnje pogonskog stroja treba naravno sukladno tome reducirati.



Slika 2.20 Varijacije povezivanja napajanja sa statorskim namotima za dupli stator u daljnjem razvoju PPSM-a

3. DANAŠNJA PRIMJENA POGONA S VISOKOMOMENTNIM MOTORIMA

3.1 Uvod

Iz marketinških natpisa poput *„Susrećete li se kao konstruktor u strojogradnji s problemom gdje s konvencionalnim pogonskim rješenjima, a vezano uz preciznost izvršenja određene* radnje*, dinamike gibanja, održavanja ili komfornosti pogona, dolazite do granice mogućeg? Ili ste došli do nekog rješenja koje je ekonomski neodrživo? U oba slučaja isplati se pogledati što nudi i….*“ [11], dobiva se spoznaja o sve većoj prisutnosti visokomomentnih motora na tržištu, a istovremeno se otvara mogućnost šire primjene u konstrukciji direktnih pogona u tehničkim sustavima.

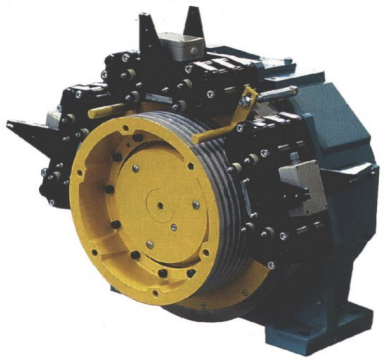
Iz sve većeg interesa proizašlog iz svakodnevnog povećanja primjene u najrazličitijim uređajima, visokomomentni motori zauzimaju sve značajniji segment u pogonskim mehanizmima tehničkih sustava. Iako su potekli iz vojne namjenske industrije za pogone radarskih sustava, postali su neizostavni konstrukcijski segment u razvoju tehnološke opreme i uređaja novije generacije.

Primjena translacijskih pogona kao direktnih pogona za linearno pozicioniranje je ograničena većinom na alatne strojeve i dijagnostičke uređaje, dok interesno područje ovog istraživanja predstavljaju rotacijski direktni pogoni.

3.2 Dizala

Izvedbe pogonskih mehanizama liftova od sredine 19. stoljeća do danas su različite u pogledu vrste pogona, te tehnoloških parametara kao što su nosivost, brzina i visina dizanja, te arhitektonskim rješenjima izvedbe unutrašnjosti i vanjštine zgrade. Smanjenje prostora ugradnje uz povećanje ili zadržavanje pogonske pouzdanosti i sigurnosti u eksploataciji, nametnuto je zahtjevima arhitekata, koje su prihvatili vodeći proizvođači pogona liftova /4/, /5/. Arhitektonskim rješenjima zgrada, odnosno voznog okna nastoji se istisnuti „*klasična*“ strojarnica, a pogonski mehanizam smjestiti u prostor koji ne narušava izvedbu zgrade npr. u samo vozno okno, na kabinu lifta ili u jamu voznog okna zbog dodatnog prigušenja buke.

Upotrebom visokomomentnih motora dobiva se cilindrična šuplja forma male aksijalne duljine, unutar koje su smješteni elementi pogona i kontrole, slika 3.1. Rotor elektromotora izveden je zajedno s pogonskom užnicom u cjelini bez elemenata spajanja čime je povećana mehanička pouzdanost. Kako je smanjen broj ugradbenih rotirajućih dijelova u mehanizmu, povećana je pogonska pouzdanost uz popratno smanjenje trošenja i potrebe za održavanjem [12], [13]. Provedenom topološkom optimizacijom /5/ pored zahtijevanog smanjenja dimenzija pogonskog mehanizma lifta, popratno dolazi i do smanjenja mase pogonskog mehanizma na 25-30% mase standardnih pogona s polnopreklopivim asinkronim motorom napajanim iz mreže i mehaničkim prijenosnikom.



Slika 3.1 Pogonski mehanizam lifta s vanjskim disk kočnicama

3.3 Alatni strojevi

Vjerojatno najbolji način za ilustriranje značaja primjene direktnog pogona u alatnim strojevima je prikaz nekih stvarnih primjera iz industrijske prakse. Generalno gledajući, prednosti direktnih pogona najviše dolaze do izražaja kod dvije vrste primjena u alatnim strojevima [14], [15]:

- kada su potrebna velika ubrzanja masa uz visoku točnost pozicioniranja s ponovljivošću pozicije uz istovremeno razvijanje velikih momenata pri malim brzinama vrtnje;
- kada je potrebno ugrađivati precizne elemente prigona (zupčanike, valjne ležaje, vratila, i dr.), koji zahtijevaju učestalo održavanje i zamjenu dotrajalih i istrošenih konstrukcijskih elemenata u trenutku gubitka točnosti stroja.

Precizno brušenje zupčanika zahtijeva strojeve visoke točnosti i dinamičkih performansi koji će omogućiti produkciju točnih profila ozubljenja. Zupčanici će u svom radu stvarati neugodnu buku ukoliko točnost njihovih profila i završna obrada bočnih površina nije na potrebnoj, traženoj razini kvalitete. U ovom se tipu preciznog alatnog stroja, slika 3.2, direktni pogon s visokomomentnim motorom koristi kako bi kružno pogonio radni stol s obradkom, dok se na njemu izvodi zahvat skidanja strugotine za generiranje ozubljenja. Korištenje visokomomentnih motora u formi direktnih pogona omogućava proizvodnju *„tiših*" zupčanika.

Direktni pogoni omogućavaju okretnim stolovima postizanje kutnih odstupanja do 0,0002º (0,72 arcs) s greškom ponovljivosti pozicije do 1 arcs, pri brzini vrtnje stola od 100-400 min^{-1} koja je tipična brzina vrtnje pri brušenju zupčanika.



Slika 3.2 Obrada zupčanika sa strelastim zubima mase do 5000 kg na stroju s direktno pogonjenim okretnim stolom /7/

Visoko produktivni obradni centar, koji istovremeno obrađuje dva identična obradka s dva vretena u tzv. dvo-sinkroniziranom glodanju, uključuje konfiguraciju okretno-nagibnog stola, čije su osi direktno pogonjene visokomomentnim motorima, slika 3.3. Izvedeni okretni stolovi s kontinuiranim punim okretanjem, promjera 480 mm s T-utorima mogu prihvatiti obradke promjera do 775 mm, dok nagibni stol može osigurati kontinuirano zakretanje ±90°, čime je omogućena obrada s 5 strana. Tipična primjena takvih strojeva sa više okretnih stolova je za obradu turboventilatora, i drugih kompleksnih dijelova.



Slika 3.3 Obradni centar sa okretno–nagibnim stolom pogonjenog visokomomentnim motorima /8/

Inovativna primjena diretknih motora demonstrirana je u novom načinu gradnje obradnog centra koji implementira visokomomentne motore u cilju povećanja svestranosti u obradi, što prije s konvencionalnim pogonima nije bilo moguće. U ovom slučaju primjena visokomomentnih motora omogućava izvedbu alatnog stroja, koji je sposoban u isto vrijeme izvoditi višeosnu CNC obradu glodanja i tokarenja, ima mnoge prednosti među kojima je najvažnija povećana produktivnost.



Slika 3.4 Kombinacija CNC glodaćeg i tokarskog alatnog stroja /9/

3.4 Brizgalice

Brizgalice se već desetljećima koriste u proizvodnji oblikovanih komada od plastične mase, pri čemu su se pogonski uređaji na tom području znatno promijenili, od ručnih uređaja do modernih programabilnih izvedbi. U biti se danas kod brizgalica za plastične mase koriste tri koncepcije pogona [5]. Uvjerljivo najčešće se koristi pogon s uljnom hidraulikom, s centralnim hidrauličkim sustavom za sve glavne i sporedne funkcije stroja. Rješenje s električnim pojedinačnim pogonima u usporedbi s hidrauličkim pogonom znatno je skuplje, te je stoga razvijeno međurješenje tkz. hibridna koncepcija pogona koja ima i pojedinačne električne pogone i jedan mali centralni pogon za "*preostalu hidrauliku*" za izvršenje sporednih funkcija. Pojedinačni električni pogoni visokomomentnim motorima, zadnjih se godina sve češće koriste kod brizgalica u području uklopne sile od 300 do 3000 kN. S tehničkog aspekta mogu se navesti sljedeće prednosti pojedinačnih električnih pogona visokomomentnim motorima:

- mogućnost preciznog upravljanja i regulacije, osobito u pogledu točnosti reprodukcije;
- visoka dinamika kod postupka brizganja;
- mogućnost reguliranog pomaka i gibanja svih vratila;
- manji utrošak energije.



Slika 3.5 Pogon sklopa brizgaljke s dva visokomomentna motora, koji rade odvojeno kao pogon za plastifikaciju i pogon za brizganje /10/

Daljnje prednosti s aspekta zaštite okoliša, jesu ta što nema hidrauličnog ulja ili je njegova uporaba znatno smanjena, a time i problem njegova zbrinjavanja u procesu održavanja stroja kao i niska razina buke u radu ≤65 dB(A). Slika 3.5 prikazuje pogonski sklop brizgalice s direktnim pogonom, koji se sastoji od dva visokomomentna motora. Premda su ovi motori povezani istim kućištem, rade neovisno jedan od drugoga kao pogon za brizganje i plastificiranje. Pogoni s visokomomentnim motorom moraju osigurati, bez prijenosnika, relativno velike momente vrtnje uz razmjerno mali broj okretaja na vratilu.

Kod jedinica za brizganje kružno kretnje motora najprije je potrebno pretvoriti u linearno kretanje, pomoću vretena čime se kod ovog pogona smanjuje ukupni stupanj učinkovitosti, i to za stupanj korisnog djelovanja vretena. Kod kugličnih vretena male zračnosti stupanj korisnog djelovanja kreće se u rasponu od 0.85 do 0.90. Za ukupni stupanj korisnog djelovanja, dobivaju se vrijednosti, koje se nalaze u području oko 0.7 za rad s djelomičnim opterećenjem i oko 0.9 za rad pod punim opterećenjem.

Nadalje, motori s visokim momentom vrtnje pružaju, za razliku od hidrauličkih rješenja, veću dinamiku, premda im je vlastiti moment tromosti zbog velikog promjera rotora relativno velik. Vremena ubrzavanja od stanja mirovanja do radne brzine vrtnje, uz uvažavanje momenata tromosti opterećenja, nalaze se u području ≤ 5 ms i usporediva su s onima kod standardnih servo-pogona. Visoka "dinamika stroja", a time i kratko vrijeme ciklusa rada popraćeno odgovarajućim povećanjem produktivnosti, proizlazi iz mogućnosti da se više radnih članova pokreće istovremeno uz kontrolu PLC-om.

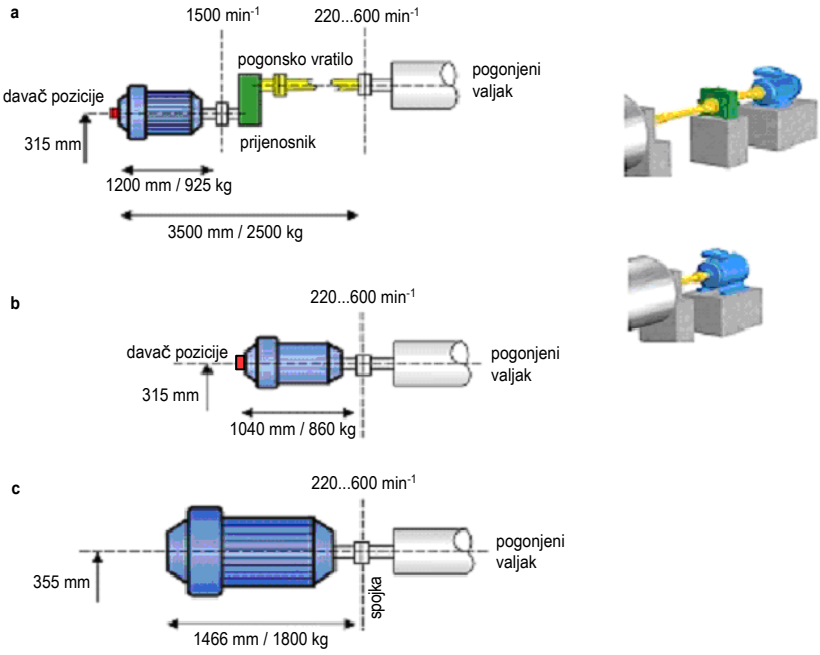
3.5 Strojevi za proizvodnju papira

Novo tehničko rješenje pogona valjaka stroja za proizvodnju papira, slika 3.6, s direktnim pogonom pomoću sinkronog motora s uzbudom putem trajnih magneta našlo je primjenu u proizvodnji od 2003. godine. Razvijena familija motora tipa M2BJ…. u 6 različitih IEC veličina (280….400) instalirane snage 25 - 500 kW, hlađenih vodom /11/ potpuno je zamijenila konvencionalno rješenje asinkronog motora (ASM_{50Hz}) mrežno napajanog s mehaničkim prijenosnikom, slika 3.7a, odnosno standardni asinkroni elektromotor (ASM_{fp}) napajan frekvencijskim pretvaračem, slika 3.7b. Kompletno rješenje od pogonskog visokomomentnog motora do frekvencijskog pretvarača s upravljanjem i kontrolnim software-ima garantira siguran 24-satni rad.

Iz provedenih usporedbi, slika 3.7, uočava se pored znatnog smanjenja prostora ugradnje, odnosno mase instalirane opreme, da proizvođač garantira bolju iskoristivost kapaciteta stroja preko manjeg broja zastoja i poremećaja u radu uz manje troškove ulaganja, te uštedu energije.



Slika 3.6 Stroj za proizvodnju papira /11/



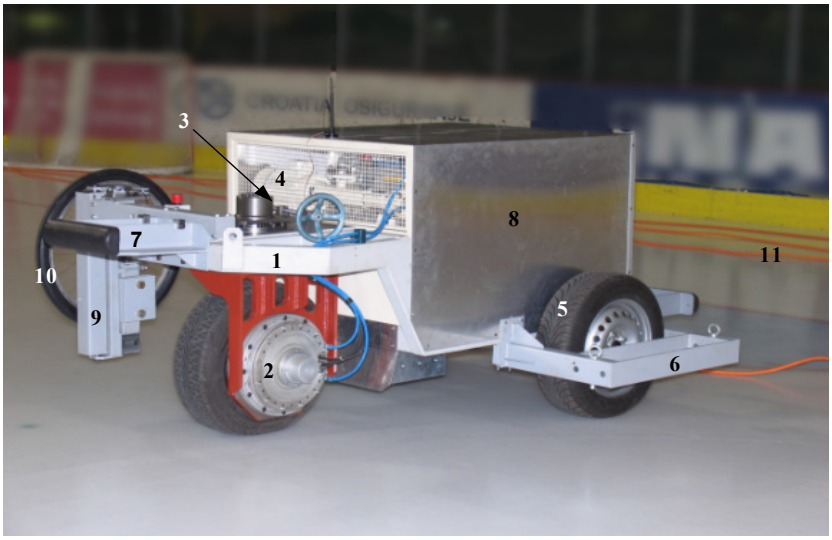
Slika 3.7 Pogonska konfiguracija stroja za papir

a) Konvencionalni pogon ASM_{50Hz} s mehaničkim prijenosnikom b) Direktni pogon s visokomomentnim motorom
c) Pogon standardnim asinkronim motorom upravljan frekvencijskim pretvaračem (ASM_{fp})

3.6 Primjena u razvojnim istraživanjima

Jedna od značajnih primjena pogona s visokomomentnim motorom je direktni pogon kotača eksperimentalnog vozila, [16], [17]. Prikazano eksperimentalno električno vozilo, slika 3.8, razvijeno je uz glavni zahtjev da predstavlja realni model vozila s krutim ovješenjem. Opremljeno je s tri jednaka standardna kotača, dva stražnja i jednim prednjim pri čemu je prednji kotač pogonski.

Glavni zahtjev bio je realizacija pogona visokomomentnim motorom ugrađenim u pogonski kotač standardnih dimenzija visokih dinamičkih značajki, koji je u mogućnosti razviti maksimalnu longitudinalnu silu gume od oko 2500 N, uz minimalnu zračnost u sustavu prijenosa momenta vrtnje. Pogonski motor ujedno se koristi kao uređaj za kočenje tzv. generatorsko kočenje pri čemu se energija uslijed kočenja pretvara u toplinu u otpornicima smještenim ispod glavnog nosivog okvira vozila. Pogonski visokomomentni motor ima izvedeno dodatno hlađenje vodom prema preporuci proizvođača.



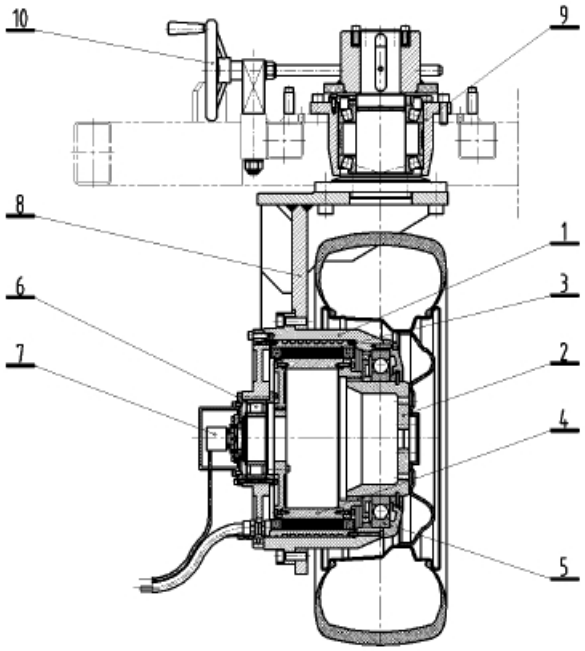
1. Glavni nosivi okvir
2. Prednji pogonski kotač s ugrađenim visokomomentnim motorom
3. Mehanizam za ručno skretanje
4. Rashladni sustav
5. Stražnji kotač
6. Bočni nosač utega na stražnjem kotaču
7. Nosač utega na prednjem kotaču
8. Zaštitni poklopac
9. Nosač redundantnog kotača
10. Redundantni kotač
11. Energetski kabel s integriranim signalnim vodovima

Slika 3.8 Eksperimentalno vozilo s ugrađenim direktnim pogonom u pogonskom kotaču

Cijeli sklop prednjeg pogonskog kotača, slika 3.9, podijeljen je u tri cjeline: pogonski visokomomentni motor s 15" naplatkom i automobilskom gumom 195/60 R15 Good Year UG 6 M+S (1-7), konzolu kotača (8) i gornji ležaj (9) s mehanizmom za ručno skretanje (10). Navedena struktura koncepcijski je predviđena da se u nastavku projekta ugradi dodatni direktni pogon za skretanje vozila.

Konzola kotača (8) predstavlja nosač motora i pogonskog kotača, spajajući ih s nosivim okvirom vozila. Sklop gornjeg ležaja (9) je povezan s nosivim okvirom prirubničkim spojem i omogućuje zakretanje pogonskog kotača oko vertikalne osi. S namjerom da se omogući upravljanje i izvođenje eksperimenata s fiksnim kutom zakreta i manevriranja u slučaju isključenog motora, ugrađen je mehanizam (10) za ručno skretanje.

Ugrađeni elektromotor (1) baziran je na kupovnom motoru 1FW61300PA10 isporučenom u *„kit“* izvedbi /12/. Radi se o višefaznom sinkronom motoru s uzbudom putem trajnih magneta, koji se sastoji od statora s namotom (3) i rotora s trajnim magnetima (4). Po vanjskom obodu statora nalaze se kanali za dodatno prisilno hlađenje. Kanali se zatvaraju ugrađivanjem statora s brtvama (O prsteni) u kućište, na kojem su izvedeni priključci za rashladnu tekućinu. Osim kupovnih dijelova statora i rotora, pogonski motor se sastoji od glavčine kotača (2) vijčano spojene na rotor u formi prirubničkog spoja, kućišta (1), uležištenja (5,6), te davača pozicije (7).



1. Kućište motora
2. Glavčina kotača
3. Stator motora s rashladnim kanalima
4. Rotor s trajnim magnetima
5. Glavni ležaj
6. Ležaj davača pozicije
7. Davač pozicije
8. Konzola kotača
9. Sklop gornjeg ležaja
10. Mehanizam za ručno skretanje

Slika 3.9 Sklop pogonskog kotača eksperimentalnog vozila

4. ASPEKTI TROŠKOVA U RAZVOJU DIREKTNIH POGONA S VISOKOMOMENTNIM MOTORIMA

4.1 Osnovna struktura troškova

Unatoč jednostavnoj i kompaktnoj konstrukciji, direktni pogoni s visokomomentnim motorom s trajnim magnetima, danas nisu cjenovno konkurentni standardnim pogonima s mehaničkim prijenosnikom, prvenstveno zbog pojedinačne i malo serijske proizvodnje u koju su ugrađeni visoki troškovi razvoja [13]. Povećanje količinskih potreba od strane tržišta, nužno će dovesti do uvođenja serijske proizvodnje, čime se očekuje značajniji pad cijene i šira primjena ovih visokomomentnih motora u direktnim pogonima u industriji.

S aspekta troškovnog opterećenja učinkovitog razvoja direktnih pogona s visokomomentnim motorima prije svega su interesantni troškovi samog proizvoda, o kojima se mora voditi računa od samog početka koncipiranja zadatka, konstrukcijske i tehnološke razrade pa do zbrinjavanja proizvoda na kraju radnog vijeka [18]. Bitno je napomenuti da proces konstruiranja ima najveći utjecaj na troškove proizvodnje [19], [20].

U tom smislu, općenita raščlamba troškova, slika 4.1, pokazala se utemeljenom [21]. Jezgru cijene koštanja, koja se odnosi na gotov proizvod čine troškovi proizvodnje, u prvom redu troškovi izrade proizvoda s pridodanim troškovima materijala, dakle oni troškovi koji se mogu direktno pripisati proizvodnom procesu proizvoda. Osim navedenih, tu su još i troškovi poduzeća kao dio prodajne cijene, koji ulaze u troškove radnog vijeka proizvoda i na njih se u procesu razvoja proizvoda u principu ne može značajno utjecati.



Slika 4.1 Raščlamba troškova

U osnovi, ovdje postoji suprotstavljenost između interesa korisnika tehničkog proizvoda i njegovog proizvođača. Primarni interes proizvođača je osigurati što veću dobit svojoj tvrtki. Pojednostavnjeno rečeno, dobit nastaje kao razlika između prodajne cijene proizvoda i troškova poduzeća proizvođača. Stoga proizvođač putem razvoja troškovno povoljnijih proizvoda i internom racionalizacijom prvenstveno teži tome da koliko god je moguće smanji vlastite troškove poduzeća. Osim o vlastitim troškovima, proizvođač mora voditi računa i o troškovima radnog vijeka proizvoda direktnog pogona, budući da se time poboljšava njegova konkurentnost na tržištu.

4.2 Troškovi radnog vijeka

Troškovi radnog vijeka[9] su troškovi koji nastaju kod korisnika proizvoda kao zbroj svih troškova, od same kupovine, preko razdoblja korištenja direktnog pogona sve do njegovog zbrinjavanja. Ti se troškovi generalno mogu raščlaniti na sljedeće vrste troškova:

- troškovi nabave, koji se u biti sastoje od kupovne cijene proizvoda. Na kraju razdoblja eksploatacije proizvoda, moguće je troškove nabave eventualno umanjiti za cijenu rabljenog proizvoda ili cijenu sekundarne sirovine (obično obračunato u tekuće troškove kao amortizacija s dodanim kamatama);

- jednokratni troškovi, kao npr. troškovi transporta s osiguranjem, montaže, puštanja u probni rad, edukacije i školovanja osoblja i troškovi zbrinjavanja koji u najvećem broju slučajeva prema regulativama EU idu na teret proizvođača;

- operativni troškovi, npr. tekući troškovi za energente tj. pogonsko gorivo s uračunatim troškovima transporta i skladištenja, kao i plaće osoblja koje radi s proizvodom;

- troškovi održavanja i servisiranja - stalni i povremeni nadzor, periodički pregledi, redovno održavanje i remont, popravci;

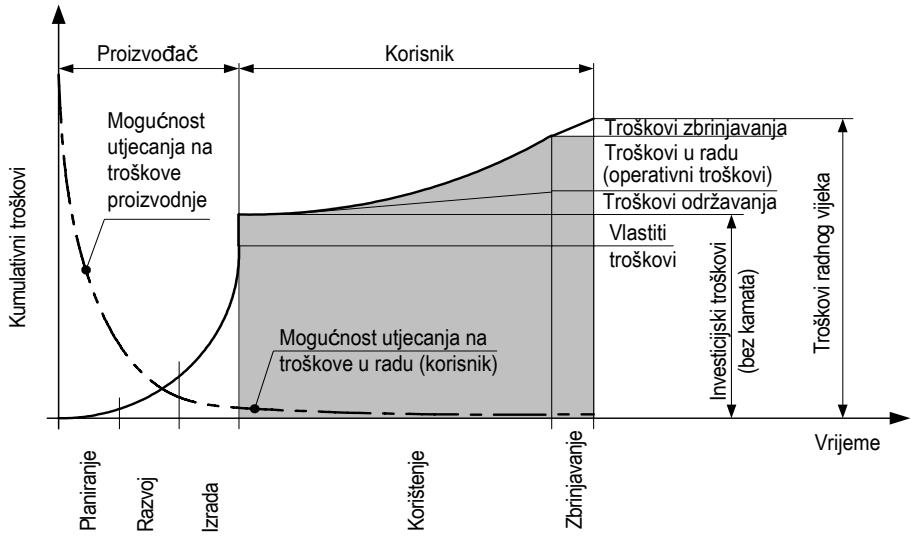
- ostali troškovi, u koje spadaju npr. kamate na kapital, porezna opterećenja, osiguranja i troškovi zastoja.

Za korisnika direktnog pogona troškovi radnog vijeka su kriterij prema kojem se može mjeriti isplativost proizvoda. Ovaj strogo ekonomski aspekt odnosa korištenja proizvoda i troškova u radu proizvoda postaje sve važniji u području investicijskih roba. Troškovi radnog vijeka su središnji argument prilikom prodaje, a kupac može tražiti da se isti utvrde i u ugovoru. Nasuprot tome, u području roba široke potrošnje, kod odlučivanja o kupovini često neke druge stvari igraju važnu ulogu. Striktno ocjenjivanje proizvoda prema

[9] Life – Cycle - Costs

očekivanom radnom vijeku nije uobičajeno, premda i taj aspekt sve više dobiva na značenju.

Slika 4.2 pojednostavnjeno prikazuje tijek nastajanja troškova s parcijalnim troškovima u svim fazama radnog vijeka direktnog pogona. Preko radnog vijeka navedeni su i svi kumulativni troškovi (investicijski troškovi korisnika ovdje su navedeni kao fiksni iznos bez kamata). Na početku razvoja proizvoda, ukupni troškovi su još mali, jer su to ustvari troškovi samo za ideje koje se prenose "*na papir*" tj. troškovi razvoja konstrukcije. Usprkos tome, već se u početnom periodu razvoja utvrđuju troškovi proizvoda i grubo procjenjuju troškovi njegova korištenja u radnom vijeku.

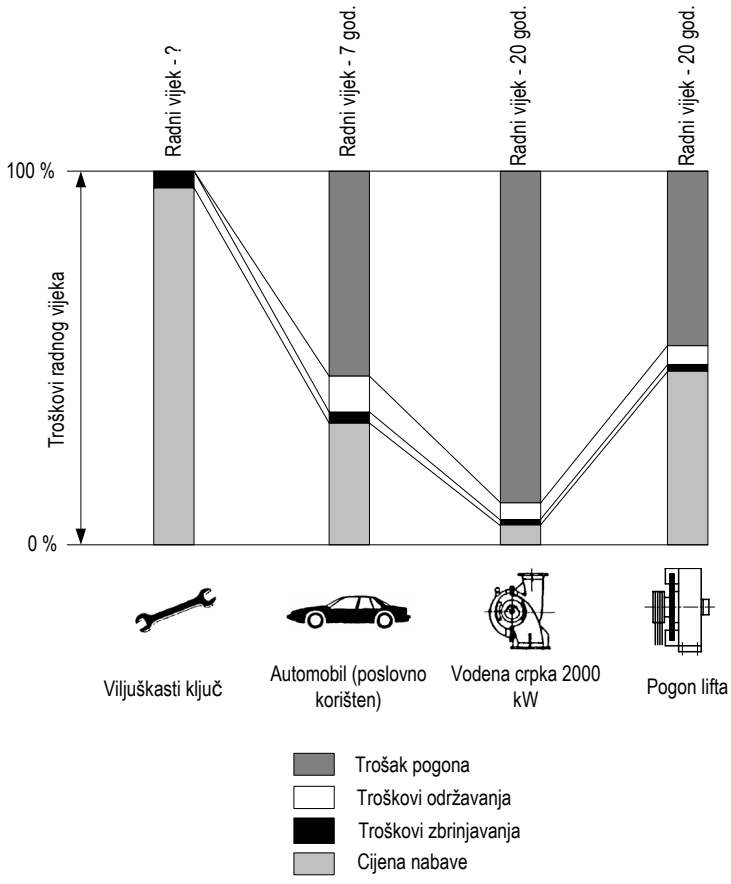


Slika 4.2 Troškovi za vrijeme radnog vijeka direktnog pogona

Nabavkom repromaterijala i sirovina, gotovih komponenata i podsklopova, izradom dijelova direktnog pogona, te montažom u cjelinu nastaju troškovi izrade proizvoda, tj. kada se „*papir s konstrukcijom"* u tehnološkom slijedu "*preoblikuje*" u dijelove gotovog proizvoda. Pri prodaji proizvoda, kroz ostvarenu dobit i osiguranje od rizika (troškovi garancije i servisa u garantnom roku) kod proizvođača nastaje cjenovni skok, a formirana cijena je ustvari kupoprodajna cijena kod korisnika, koju prikazuje kao investicijski trošak. Jednokratni troškovi korisnika za transport, montažu, podešavanje i puštanje u rad, edukaciju itd. se također iskazuju. U toku rada s proizvodom nastaju u daljnjem tijeku operativni troškovi i troškovi održavanja koji rastu sve do kraja korištenja, a mogu biti do nekoliko puta veći od početne investicije. Minimalizacija ovih troškova, koji nastaju kod korisnika, trebala bi biti prvenstveni cilj troškovno osviještenog razvoja direktnih pogona [22], [23], [24].

Svaka grupa proizvoda ima do jednog znanog stupnja prepoznatljivu strukturu troškova radnog vijeka, sastavljenih iz troška pogona, troškova održavanja, troška nabave–investicije i troška zbrinjavanja. Kod jednostavnih aparata kao npr. viljuškasti ključ i ostali

ručni alati, cijena nabave ima najveći udio, dok troškova održavanja u pogonu nema. Za razliku od osobnih vozila i pogonskih uređaja, kod kojih su svi troškovi od značaja i kod kojih u razvoju treba dodatno voditi računa o udjelu pojedinih troškova, čija je optimalizacija vrlo kompleksna. Trošak radnog vijeka npr. vodene crpke velike snage i broja uključenja, sadrži kao dominantan trošak cijenu električne energije naspram cijene nabave s troškovima održavanja [25]. Trošak električne energije kod instalirane snage od 2000 kW i godišnji rad od 8000 h ima 96% udjela u trošku radnog vijeka. Shodno tome traži se što bolji stupanj korisnog djelovanja što ima za posljedicu višu početnu cijenu. Povećanjem stupnja korisnog djelovanja od 0.2% kod velikih snaga, cijena investicije se udvostručuje. Razlog ovakvog povećanja investicije treba biti predmet procjene svih troškova i ne treba „*nasjedati*" pri kupnji, jer u konačnici sve plaća kupac. Stoga, težište utjecaja na troškove radnog vijeka nije vezano samo uz vrstu proizvoda, već dodatno zavisi i od trajanja uporabe.



Slika 4.3 Struktura troškova radnog vijeka proizvoda

Za poznati proizvod poznato je trajanje uporabe prema [24] i VDI 497, dok za novi proizvod kao što je direktni pogon visokomomentnim motorom, treba dodatno istražiti na zahtjev kupca i dati mu procijenjene podatke koji će dodatno opravdati investiciju kao npr. troškovi održavanja, troškovi energenata i dr.

Udio u investicijskom trošku je i godišnja stopa otpisa - amortizacije ovisna o zakonski propisanoj stopi za navedenu vrstu proizvoda (npr. za osobni automobil 5 godina, 2 godine za računalnu opremu, itd.). Za automobil s malom prevaljenom kilometražom glavnina troška radnog vijeka je amortizacija s propisanim kamatama, dok je pri prevaljenoj kilometraži iznad 40000 km/god, to trošak energenta. Analogno, za pogonski mehanizam teretnog lifta s radom do 100 h/god težište troškova je na amortizaciji s propisanim kamatama, dok je za osobne liftove s radom iznad 1000 h/god to trošak energenata.

Utjecaji na trošak radnog vijeka mogu biti odlučujući za razvoj proizvoda i konstrukciju i oni moraju biti usklađeni sa željama i zahtjevima kupca kao:

- vrsta proizvodnje (uključuje veličinu serije kao pojedinačna, serijska ili masovna proizvodnja);
- konstrukcijski princip (mehanički, električni ili hidraulički npr. hidraulički imaju manju iskoristivost od mehaničkih);
- okolina korištenja ili mjesto ugradnje obzirom na radni vijek (radna okolina s prašinom i prljavštinom, korodirajući mediji, temperatura i vlaga, i dr.);
- servisiranje i održavanje čija kvaliteta može ovisiti o korisniku, ali i o proizvođaču ili o trećim osobama npr. dostupnost rezervnih dijelova, detekcija kvarova i pogrešaka s daljinskim nadzorom, učestalost i kvaliteta servisa;
- struktura troškova kod korisnika npr. ako niske plaće u regiji čine veliki trošak, automatizacija u tehničkom proizvodu je besmislena;
- troškovi utrošene energije i materijala npr. skupa goriva, pomoćni materijali, maziva, dijelovi koji se habaju u radu mogu biti bitni za konstrukciju;
- vijek trajanja proizvoda i pogonska pouzdanost, budući su „*dugovječni proizvodi*“ odgovarajuće pouzdanosti često povoljniji u pogledu troškova radnog vijeka, za razliku od kratkoročnih plasiranih varijanti koje su trenutno u modi;
- dugoročni trendovi kao relativni porast troškova posluživanja i održavanja naspram nabave, racionalizacije proizvodnje, rastućeg pritiska konkurencije ili rasta troškova energenata;

- zakonski propisi i akti u formi prireza i davanja, kao porez na motorna vozila, na mineralna otpadna ulja, propisi vezani uz inspekcijske nadzore, zbrinjavanje otpada i dr.;

- vremensko trajanje, jer kraći procesi smanjuju troškove („*vrijeme je novac*“);

- politika cijena kod kupca ili u određenoj branši. Zbog imovinskih i psiholoških razloga često je mjerodavna aktualna nabavna cijena. npr. kod amortizera za osobne automobile proizvođači automobila zahtijevaju niske cijene za prvo opremanje vozila. Dobit dobavljača se realizira tek u isporuci rezervnih dijelova.

4.3 Vlastiti troškovi poduzeća

Vlastiti troškovi su zbroj *troškova proizvodnje, razvoja i konstrukcije, kao i troškova upravljanja, marketinga i prodaje.* Pojedinačni troškovi dodjeljuju se direktno svakom proizvodu, a zajednički troškovi poduzeća raspodjeljuju se putem ključa.

Primarni cilj rukovodstva poduzeća kod mjera rezanja troškova je smanjenje fiksnih troškova. Time se s jedne strane teži cilju poboljšanja prihoda poduzeća, budući da u fiksnim troškovima postoji znatan udio rezervi, često više od 50% vlastitih troškova. Istovremeno se snižava granični broj komada iznad kojega poduzeće ostvaruje prihod, a povećava se fleksibilnost. Time poduzeće dobiva veći manevarski prostor na tržištu, a postaje i otpornije na oscilacije konjunkture.

Naravno, svi dijelovi poduzeća uključeni u razvoj proizvoda snose u potpunosti dio troškovne odgovornosti za proces i razvoj proizvoda. Ovi troškovi samog razvojnog procesa direktnog pogona pribrajaju se nakon diferencirajuće dodatne kalkulacije, kako je najčešće slučaj u strojogradnji, kao dio zajedničkih troškova u gotovom proizvodu. Pa iako razvoj proizvoda, u prosjeku sudjeluje sa oko 9% u ukupnim troškovima poduzeća, rijetko kada ostaje pošteđen u programima rezanja troškova.

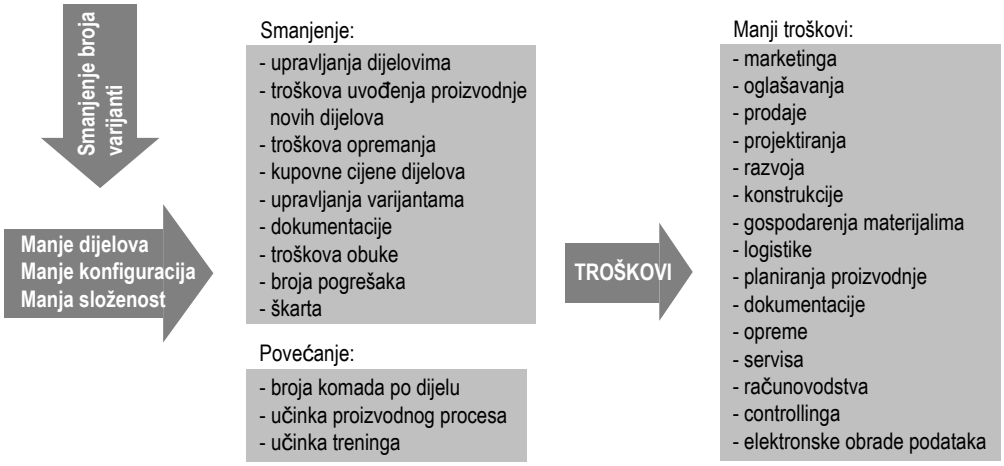
Osim toga, razvoj proizvoda ima utjecaj na nastajanje troškova u cijelom nizu daljnjih procesa u poduzeću, što se ne smije podcijeniti. Tu prije svega valja spomenuti proces izrade, a u ovom poglavlju se uzima u obzir samo utjecaj razvoja proizvoda na zajedničke troškove u izradi. Nadalje usluge logistike i servisa koje se odvijaju u poduzeću, su troškovi koji također znatno ovise o odlukama tijekom razvoja proizvoda.

Važan preduvjet za sve ove aspekte je raspoloživost korisnih informacija o stvarnoj troškovnoj situaciji. Problematični momenti troškovne informiranosti o kojima je u gornjem tekstu već bilo riječi ukazuju na to da sustavi obračuna troškova obično nisu usmjereni na takav zadatak. Često su varijabilni dijelovi troškova proizvodnje relativno točni, no ostali udjeli su tek ugrubo naznačeni. Obračunski sustavi moraju udovoljiti brojnim zahtjevima, zbog čega specifični zahtjevi tek uvjetno mogu biti uzeti u obzir. Predstavljene teme

podržane su obračunom procesnih troškova, pa ipak je njegova primjena u poduzećima više izuzetak nego pravilo - uvjetovano i dodatnim troškovima.

Troškovi organizacijske jedinice razvoja, projektiranja i konstrukcije u mnogim se poduzećima smatraju troškovima razvoja proizvoda odnosno vlastitim troškovima poduzeća. Međutim, za izračun veličine troška u razvoju proizvoda kao što je direktni pogon, potrebni su troškovi i svih dodatnih procesa i aktivnosti vezanih uz razvoj i održavanje proizvoda u njegovom proizvodnom vijeku. Ti procesi i aktivnosti obuhvaćaju raznovrsne izdatke u marketingu i procjeni tržišta, planiranju proizvodnje, nabavi, vanjskim stručnim i znanstvenim uslugama i drugim funkcijama unutar poduzeća. Organizacija rada na razvoju projekata, vezana za predviđeni budžet, te projektnu kontrolu u konačnici i međufazama, morala bi pratiti troškove procesa, iako je u industrijskoj praksi često slučaj da se započne s istraživačkim i projektnim radom, a da prethodno nisu stavljene na raspolaganje troškovne informacije vezane za projekt. Na taj su način pojedinci zaduženi za projekt prisiljeni na improvizaciju [26].

Istraživanja provedena u industriji [27], [28], vezana uz smanjenje broja varijanti u razvoju proizvoda, kao visokomomentnih motora, ima za posljedicu smanjenje vlastitih troškova poduzeća za 10-20%. Najveće uštede su u razvoju, projektiranju i konstrukciji, koje se višestruko manifestiraju u troškovima proizvodnje, slika 4.4. Optimalna proizvodna struktura definirana brojem varijanti, mora se dobiti procjenom potreba tržišta, gdje želje kupca imaju dominantnu ulogu. Iznalaženjem kompromisa, između svih želja kupca, koje često puta nisu ostvarive s jedne strane i spoznaje da su želje kupca često podloga za inovacije, razvijaju se i optimiraju različiti pristupi u koncepcijskim razvojima proizvoda kao npr. *„Baukastensystem“.*



Slika 4.4 Smanjenje troškova smanjenjem broja varijanti [27]

4.4 Troškovi proizvodnje

Općenito troškovi proizvodnje direktnih pogona, o kojima se mora voditi računa kroz cijeli proces razvoja i oblikovanja proizvoda, grupiraju se u tri cjeline, *trošak materijala, trošak proizvodnje dijelova i trošak montaže* [29].

Iz mnoštva utjecaja i proizvođačkih troškova, često puta je nemoguće izdvojiti samo najutjecajnije, jer gotovo svi sektori u poduzeću imaju utjecaja na troškove. Kako je naznačeno, skupovi razvoja i konstrukcije te izrada predstavljaju dominantan udio u troškovima proizvodnje. Presjek skupova pokazuje da većina navedenih odluka mora biti donesena u uskom suglasju između proizvodnje i razvoja.

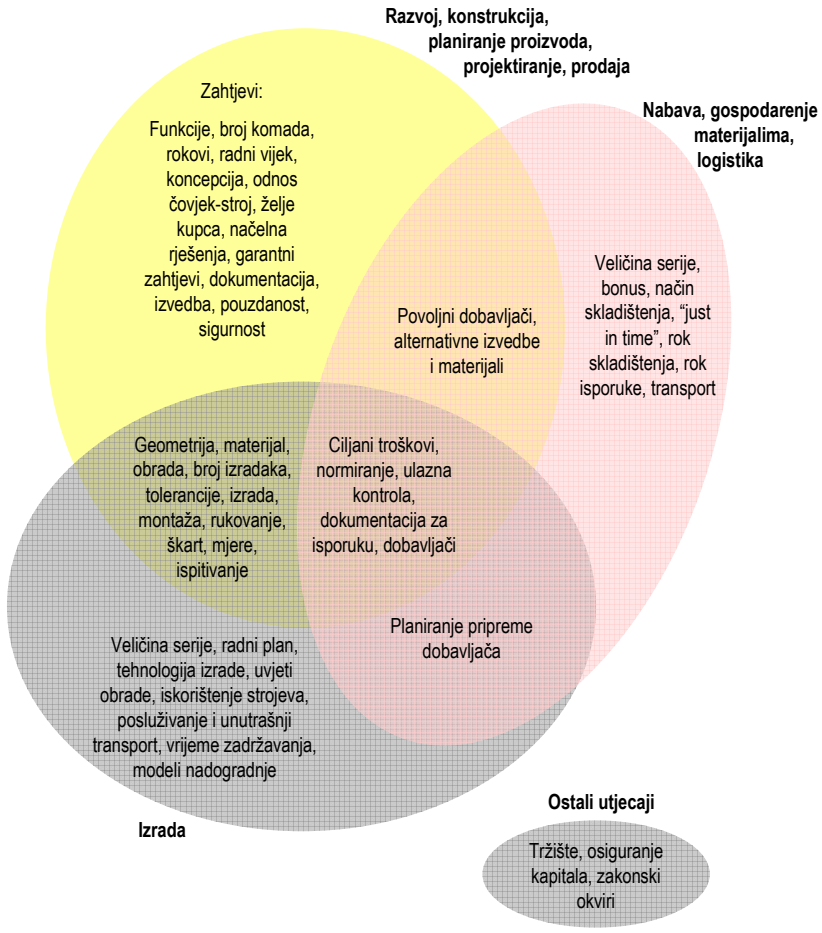
Koncept proizvoda tj. osnovni princip funkcioniranja direktnog pogona definiran za razvoj proizvoda, određuje troškove. Primjeri potiskivanja starih principa kao npr. motor s unutrašnjim izgaranjem potiskuje parni stroj, kemijska olovka istiskuje nalivpero, računala istiskuju mehaničke računske strojeve ili direktni pogon istiskuje standardni pogon s prigonom, izvode se radi troškovno povoljnijih rješenja. Jasno je da su varijante prijašnjih koncepata "*nemoćne*" i ne odgovaraju današnjem stupnju tehničkih zahtjeva. Jasno je da promjena principa funkcioniranja ili promjena zadatka na nižem stupnju zahtjeva, dovodi i do promjene troškova. Npr. potpuna automatizacija rada transportnog lifta je zbog zahtjeva na automatiku skuplja od ručno upravljive verzije. Postavke zadataka ili želje kupca, mogu se u dodatnim kontaktima s kupcem još znatno izmijeniti.

Konstruktivni utjecaji na troškove direktnog pogona mogu biti:

- postavljeni zadaci odnosno zahtjevi na proizvod;
- koncepcija (princip funkcioniranja, npr. fizikalni princip s vrstom materijala, broj i vrsta djelatnih površina, složenost);
- veličina (npr. mjere, količina materijala);
- broj komada, a time i standardizacija, normizacija, posebice kod pojedinačne proizvodnje i proizvodnje u malim serijama;
- tehnologija izrade i montaže, na koju jako utječu materijal, broj komada i veličina.

Kada nije moguće promijeniti ove utjecaje, što je često slučaj, tada u prvi plan stupaju neki drugi utjecaji, npr. tolerancije, stanje površine i detalji oblikovanja dijelova direktnog pogona. Za sudionike u procesu oblikovanja ovi utjecaji pretvaraju se tada u glavne čimbenike utjecaja na troškove.

Utjecaji na oblikovanje direktnog pogona mogu se podijeliti ne samo po veličinama utjecaja, već i prema vrstama troškova na koje se utječe, odakle je vidljivo da se i zajednički troškovi poduzeća i udjeli vlastitih troškova mogu mijenjati putem konstruktivnih mjera.



Slika 4.5 Utjecajne veličine na troškove proizvodnje

Dominantan utjecaj broja komada istovrsnih proizvoda prema [18] na troškove postaje jasniji predočenjem koliko su skupi nekoć bili automobili, televizori ili elektronski džepni programabilni kalkulatori koji su se proizvodili u malim količinama i serijama. Mali broj kupaca mogao je sebi priuštiti luksuz da ih posjeduje. Uglavnom kroz racionalizirane, učinkovite postupke proizvodnje i njima prilagođenu konstrukciju, smanjili su se troškovi, a time dugoročno i cijene, pa je nekadašnja roba za privilegirane postala nešto samo po sebi razumljivo.

Međutim, postupak proizvodnje kojim se režu troškovi moguć je samo kada se proizvodi veliki broj komada nekog proizvoda. Slika 4.6 pokazuje "*spiralu utjecaja*" za prijelaz s pojedinačne na serijsku proizvodnju. Za prijelaz na veći broj komada koji se mogu plasirati na tržište, potrebno je prethodno provesti preoblikovanje konstrukcije radi racionalnije proizvodnje, čime je dodatno omogućeno snižavanje cijena koje povećava

tržišnu šansu. Načelno, ova shema vrijedi i za izradu u malim serijama. Preoblikovanje konstrukcije za veći broj komada moguće je primjenom prikladnih postupaka proizvodnje i/ili putem interne standardizacije.



Slika 4.6 „*Spirala utjecaja*“ za prijelaz s pojedinačne na serijsku proizvodnju

4.5 Elementi utjecaja na broj komada proizvoda

Troškovi razvoja (novog) proizvoda za ukupno proizvedeni broj komada proizvoda *N*, obračunavaju se proporcionalno broju komada prema diferencirajućoj dodatnoj kalkulaciji uobičajenoj u strojogradnji [30]. Sveobuhvatni troškovi, koji su mjerodavni za razvoj proizvoda kao npr.: trošak planiranja, analiza tržišta, koncept direktnog pogona s izradom dokumentacije, vanjske usluge, kontrolni proračuni, izrada prototipa, specijalne proizvodne investicije (izrada modela, alat, naprava za montažu) i dr. prema [31] nazivaju se *troškovi uvođenja u proizvodnju*[10] (*TUP*). Ovakav trošak mora se izraziti preko ukupnog broja produciranih proizvoda *N* i on je mjerodavan element kalkulacije za ukupni trošak proizvodnje tj. trošak uvođenja u proizvodnju po proizvodu:

$$TUP_1 = \frac{TUP}{N} \tag{4.1}$$

Troškovi proizvođača kod proizvodnje serije veličine *n* nekog proizvoda definirani su kao jednokratni troškovi koji se sastoje od direktnih troškova u proizvodnji vezanih uz opremanje stroja/strojevima tj. *troškova opremanja*[11] (*TO*) i indirektnih troškova u izradi nakupljenih iz prethodnih razdoblja npr. razvoj konstrukcije, priprema proizvodnje, eventualno troškovi nabave s uključenim logističkim troškovima, troškovi izvršenja narudžbe idr. Obračun troškova po proizvodu pri proizvodnji serije veličine *n* svodi se na:

- troškove opremanja ili troškove izrade iz vremena opremanja po proizvodu;

[10] Einführungskosten

[11] Fertigungskosten aus Rüstzeiten (Rüstkosten)

- jednokratnih troškova po proizvodu;
- fiksnih troškova lansiranja serije.

Smanjenje troškova kroz rast broja proizvoda npr. direktnih pogona u praksi, samo se djelomično uzima u obzir. I danas je još uvijek uobičajeno da se troškovi uvođenja u proizvodnju paušalno pridodaju u prodaju, razvoj, projektiranje i konstrukcijsku razradu, pripremu rada i gospodarenje materijalom, kao zajednički troškovi, pa su tako svi proizvodi, bez obzira na broj komada u seriji, u jednakoj mjeri time pokriveni.

Odvojeno se prikazuju i vezuju za broj komada samo troškovi modela, uređaja i posebnih operativnih sredstava tj. posebnih pojedinačnih troškova izrade[12]. Pad troškova izrade danas dakle nastaje kod dodatne kalkulacije jedino time što se uzimaju u obzir troškovi opremanja, koje treba dijeliti s veličinom serije.

Tendencija u izračunu troškova, je da se obračunom troškova proizvođača bolje uzimaju u obzir uzroci nastajanja troškova [32], [33].

4.6 Uzroci pada troškova

Za pad troškova kod rastućeg broja reproduciranih proizvoda zaslužna su prije svega 4 uzroka:

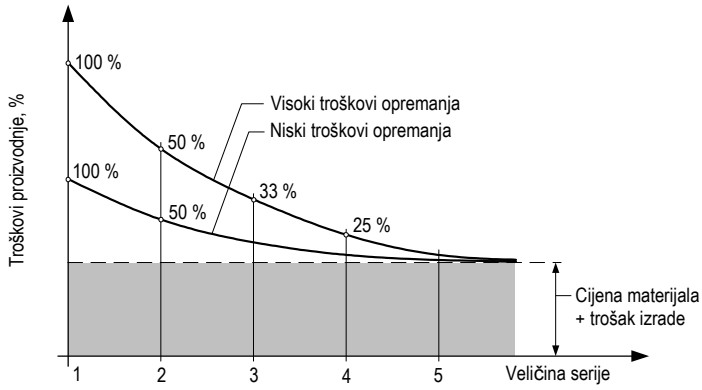
a) *Smanjenje troškova uslijed podjele jednokratnih troškova*

Troškove uvođenja u proizvodnju i jednokratne troškove (T_{jed}) treba podijeliti s pripadajućim brojem komada, odnosno veličinom serije n, te ako se uzmu u obzir troškovi opremanja, proizlaze s uračunatim pojedinačnim troškovima izrade sljedeći ukupni troškovi proizvodnje po komadu (TP_n):

$$TP_n = \frac{TO}{n} + TI + TM \tag{4.2}$$

Troškovi opremanja po izratku opadaju približno po hiperboli i zbrajaju se s troškovima izrade, koji se iznova javljaju za svaki proizvedeni komad, tj. zbrajaju se s pojedinačnim troškovima izrade (*TI)* i troškovima materijala (*TM*), slika 4.7. Ovisno o tome kako izgleda struktura troškova za proizvodnju jednog komada, opadanje troškova uslijed povećanja broja komada treba dodatno istražiti. Udjel od 80% troškova opremanja kod pojedinačne proizvodnje dakle znači da je kod izrade dva jednaka komada svaki jeftiniji za 40%. Ako udio troškova opremanja iznosi samo 20%, tada će kod izrade dva jednaka komada svaki biti samo 10% jeftiniji. Iz ovakvih struktura troškova može se očitati visina udjela troškova opremanja i osjetljivost na pad broja komada.

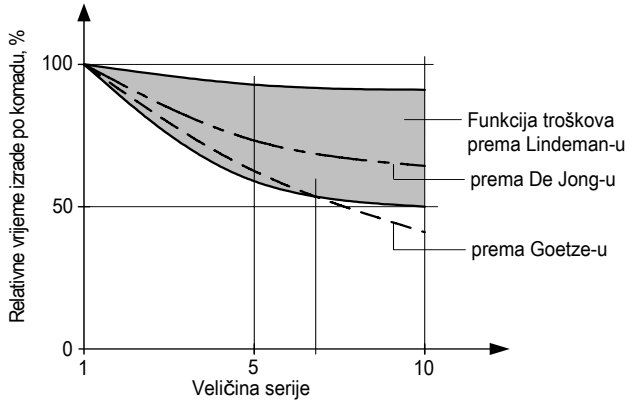
[12] Sondereinzelkosten der Fertigung



Slika 4.7 Opadanje troškova proizvodnje kod proizvoda s visokim/niskim udjelom troškova opremanja, ovisno o veličini serije

b) *Pad troškova uslijed „efekta treninga“*

Poznato je da određeni radni postupak, isprva neobičan, s vremenom i uz ponavljanje ide sve lakše („*ide od ruke*“), budući se u psihičkom i fizičkom smislu postiže utreniranost. To vrijedi za sve djelatnosti: za proces konstrukcije, prodaju, nabavu, izradu radnih planova, za provedbu postupka montaže ili za pakiranje strojnih dijelova [34], [35], [36]. Kako je vidljivo, ovaj čimbenik može biti vrlo velik, slika 4.8, gdje je kod desetog ponavljanja postupka, utrošak vremena samo je 50-60% prvobitnog utrošenog vremena.



Slika 4.8 Opadanje troškova proizvodnje u ovisnosti o veličini serije (dijelom i efekta treninga) [37]

Ovaj utjecaj se kod kalkulacije u tehničkim sustavima rijetko ili nedovoljno uzima u obzir. No, iz iskustva se zna da je prototip uglavnom skuplji nego što je u početku procijenjeno, a poznato je da se nakon provedbe probne serije troškovi često smanjuju u odnosu na prethodnu kalkulaciju. S tim u skladu, koriste se pojmovi poput „*opadanje s uvježbanošću*" i „*zaletna krivulja*".

Prema snimljenim vremenima [36] kod svakog udvostručenja broja komada proizvoda u proizvodnom ciklusu potrebno vrijeme pada za 20% od prethodnog vremena uz očekivano područje rasipanja 15-25%.

c) *Pad troškova uslijed podobnosti proizvodnog postupka* i

d) *Pad troškova preko količinskog popusta* u pojedinačnoj proizvodnji nema veliki značaj, ali uvođenjem serijske proizvodnje treba izvršiti dodatnu analizu u cilju smanjenja troškova, jer prema [34], [35], [38] ukupno smanjenje može iznositi 20-30% za svaki pojedini uzrok.

4.7 Utjecaj veličine i dimenzija direktnih pogona

Podjednako velik utjecaj na troškove proizvoda, kao koncepcija ili broj komada proizvoda, ima i veličina proizvoda. Staro je inženjersko pravilo da se teži smanjenju veličine, tj. sitnijoj konstrukciji, čime se smanjuju i troškovi. S time je često povezana i manja masa, tako da kod lakše izvedbe proizlazi i smanjenje troškova, ukoliko ista ne zalazi u ekstremno područje (npr. kod aviona, trkaćih automobila, raketa i satelita), gdje troškovi razvoja, ispitivanja, prototipa i troškovi posebnih postupaka izrade opet podižu srezane troškove materijala. U tim slučajevima su često potrebni i skupi specijalni materijali, tako da je reducirana samo masa, ali ne i troškovi. Nešto skuplji materijali koji su toplinski obrađeni u kombinaciji s visokim kvalitetama obrade (npr. brušene naležne površine) sveukupno smanjuju troškove proizvodnje sa stanovišta mase i dimenzija, odnosno vlastitih troškova proizvoda.

Očigledno je da troškovi materijala nekog proizvoda u prvoj aproksimaciji rastu proporcionalno s volumenom materijala, dakle na treću potenciju karakteristične mjere. Općenito se uzimaju dužinske mjere, a kako se kod direktnih pogona radi većinom s rotacionim oblicima karakteristična mjera procjene mase je promjer s malim visinama ugradnje, te se kao odnos stupnjevitog skoka u porastu dimenzija familije proizvoda uzima $\varphi_L=d_1/d_0$. Ovo vrijedi za geometrijski slične konstrukcijske dijelove, pod uvjetom da su troškovi materijala po volumenu konstantni. Oni to u stvarnosti nisu, budući da s jedne strane troškovi izrade za proizvodnju materijala (npr. poluproizvoda) rastu manje od φ_L^3 (npr. proporcionalno s površinom, dakle s φ_L^2), a kod nabavke većih količina materijala u serijskoj proizvodnji daje se i količinski popust - rabat. S druge strane, za izradu vrlo velikih dijelova, osnovni materijali moraju se drugačije izrađivati: npr. kod osovina kovanjem predoblika umjesto iz vučenog materijala. Dakle, troškovi materijala po komadu proizvoda računaju se polazeći od nulte veličine (ishodišne serije-veličine) tj. iz polaznog proizvoda, poznate veličine s utvrđenim troškovima:

$$TM_1 = TM_0 \cdot \varphi_L^{2.4...3} \tag{4.3}$$

Analogijom iz procjene troškova zupčanika (bez izrade ozubljenja) [39], dobiveni su troškovi materijala za jednostavne rotacione forme izrađene od čelika za poboljšavanje

42CrMo4 (Č4732) s porastom troškova ovisnih o masi s $\approx \varphi_L^{2.4}$ za promjere izradaka 50-200 mm odnosno s $\approx \varphi_L^{3.0}$ za promjere 600-1500 mm.

Pojedinačni troškovi izrade (TI_1) za obradu skidanjem strugotine rastu s tehnološkim zahtjevom korištenja finih završnih obrada npr. finog tokarenja, brušenja, honovanja odnosno proporcionalno s površinom obrade tj. s φ_L^2. Kod grube obrade pojedinačni trošak izrade proporcionalan je odstranjenom volumenu, dakle s φ_L^3. Prema Bronner-u [34] odnosno [40], [41], može se utvrditi:

$$TI_1 = TI_0 \cdot \varphi_L^{1.8...2} \tag{4.4}$$

Eksponent 1.8 trebao bi prema Bronner-u vrijediti za masovnu proizvodnju, dok 2.2 za pojedinačnu proizvodnju. Međutim, prema Lindemann-u [42], za pojedinačnu proizvodnju kod CNC upravljanog tokarskog stroja proizlazi eksponent od 1.8 (s malo strugotine) do 2.0 (s puno strugotine). Kod [39] pri analizi pojedinačnih troškova izrade zupčanika, proizlazi kod manjih promjera obradka od 50-200 mm u pojedinačnoj proizvodnji eksponent od 1.8, a kod velikih promjera od 200-1000 mm eksponent je 1.9.

Očigledno kod manjih promjera dominiraju neproduktivna radna vremena koja tek neznatno rastu s veličinom izvedbe. Kod ovih, više paušalnih, analiza uzima se, da se svi udjeli pojedinačnog vremena izrade mijenjaju na isti način. Budući se u industriji glavno vrijeme i neproduktivno radno vrijeme rijetko zasebno iskazuju, već se računa uglavnom s pojedinačnim vremenom izrade, teško je moguće provesti tako detaljno ispitivanje blisko praksi.

Troškovi opremanja za izradu dijelova direktnog pogona uglavnom nisu jasno utvrđeni kao gore navedeni troškovi izrade putem tehnološkog postupka, već znatnije mogu odstupati [43], [44], [45]. Jasno je da troškovi opremanja rastu s veličinom radnog komada, zato što veći strojevi i veće naprave uvjetuju više vremena za pripremu proizvodnje, npr. veliki radni komadi mogu se pokretati samo pomoću dizalice. Sukladno tome, oni ne rastu konstantno, već skokovito u ovisnosti od materijala korištenog za izradu.

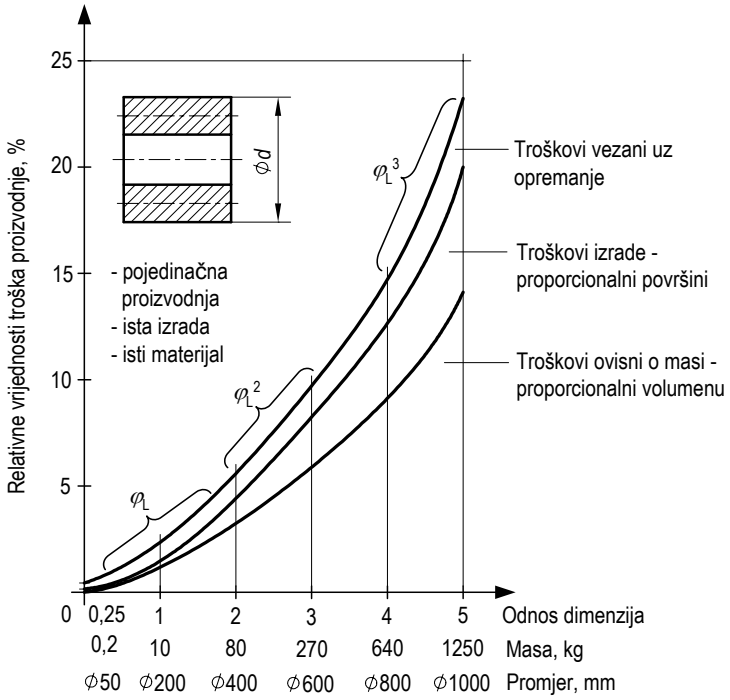
Iz vlastitih ispitivanja [43], za dijelove koji se izrađuju skidanjem strugotine (rotacione forme, zupčanici, kola, remenice) od nekoliko kg do 1500 kg mase proizašla je srednja vrijednost:

$$TO_1 = TO_0 \cdot \varphi_L^{0.5} \tag{4.5}$$

Eksponent kod zupčanika odnosno rotacionih formi raste s veličinom promjera [39], [43]. Kod promjera 50-200 mm on iznosi 0.14, kod promjera 200-1000 mm 0.56, a kod promjera 1000-1500 mm čak 1.8. Prema ispitivanjima [46] on s kreće od 0 do 0.5.

Ako bi se grafički objedinile procjene troškova za rotacione forme, a vezano za utjecaj veličine izradka, tada se za sve procjene dobiva srednja vrijednost troškova, slika 4.9. Sljedeće tvrdnje vrijede strogo uzevši samo za pojedinačnu proizvodnju zupčanika. Međutim, ispostavilo se da su isti primjenljivi i na druge slično zahtjevne dijelove, grupe i

proizvode (npr. rotori kod crpki, dijelovi turbina, dijelovi elektromotora), ukoliko kod njih postoji standardna izrada, odnosno u osnovi slična tehnologija izrade.



Slika 4.9 Porast troškova i njihovi udjeli povećanjem veličine kod pojedinačne proizvodnje

Kako je u prethodnom poglavlju pokazano, veličina izradka u različitoj mjeri utječe na tri sastavna dijela troškova: troškove izrade iz vremena opremanja, troškove izrade iz pojedinačnih vremena i troškove materijala. Sa svoje strane, broj komada u seriji *n* izrazito mijenja troškove opremanja po komadu, budući da iste treba naprosto podijeliti sa brojem komada. Tako proizlazi tijesna povezanost dvaju čimbenika u području pojedinačne proizvodnje i proizvodnje u malim serijama. Razmatranja se ovdje odnose uglavnom na alatne strojeve s ili bez NC/CNC upravljanja. Ako troškovima opremanja pribrojimo i izradu programa, tada upravo kod NC/CNC izrade nastaju znatno povećani troškovi. Troškovi neproduktivnog radnog vremena (transportni put, vrijeme mjerenja) kod NC/CNC programa su reducirani i time se svrstavaju u jednokratne troškove.

Kombinacijom izraza (4.2) s izrazima (4.3) i (4.4) mogu se dobiti troškovi proizvodnje po komadu proizvoda za neku veličinu izvedbe kod izrađene serije veličine *n* pri pojedinačnoj proizvodnji i proizvodnji u malim serijama:

$$TP_1 = \frac{TO_0}{n} \cdot \varphi_L^{0,5} + TI_0 \cdot \varphi_L^2 + TM_0 \cdot \varphi_L^3 \qquad (4.6)$$

Pritom je uvjet da se postupak proizvodnje ne mijenja (konvencionalna izrada skidanjem strugotine) i da jednokratni troškovi (T_{jed}) nastaju samo kao troškovi opremanja.

U stvarnosti će utjecaj broja komada biti još veći, s obzirom troškovi izrade iz pojedinačnih vremena opadaju s brojem komada (efekt treninga, drugi postupci izrade) i budući se i troškovi materijala smanjuju s brojem komada. Moguće je dakle napraviti jedan opći zaključak koji se može posebno prilagoditi za određeni postupak izrade.

Generalno se može zaključiti da na povoljniju cijenu razvoja i oblikovanja direktnog pogona kao tehničkog proizvoda utječu:

a) *Vrlo veliki komadi i proizvodi*, težine 1000 kg i više uglavnom imaju dominantne troškove materijala (i toplinske obrade). Treba ostvariti uštede na materijalu ili primijeniti jeftiniji materijal. Međutim, troškovi izrade iz pojedinačnih vremena koji su u prvom planu, moraju se smanjiti, i to npr. tako da se izbjegnu neke faze u izradi ili da se racionalizira postupak izrade. Također treba ispitati i odabir materijala, tj. koristiti materijal koji se lakše obrađuje. Utjecaj broja komada jedva da još postoji, pod uvjetom da se zadrži postupak izrade, te da nema novih troškova uvođenja u proizvodnju. Dijelovi se mogu individualno oblikovati i izraditi. Grupe dijelova, konstrukcije s montažnim elementima ili tipskim modelima igraju ulogu onda kada se time utrošak rada u razvoju, konstruiranju i pripremi rada može racionalizirati ili kada se mogu primijeniti postupci i tehnologije (npr. izrada modela kod lijevanja ili alata kod oblikovanja limova) koji imaju visoke troškove uvođenja u proizvodnju.

b) *Mali komadi i proizvodi*, težine ispod nekoliko kilograma kod pojedinačne proizvodnje tipskih modela i montažnih elemenata uglavnom imaju dominantne troškove izrade iz vremena opremanja, a oni se mogu znatno reducirati većim serijama. Oblikovanje jednakih dijelova, izgradnja grupa proizvoda, oblikovanje s montažnim elementima ili tipskim modelima najvažnije su sredstvo rezanja troškova. Daljnje sredstvo kod izrade skidanjem strugotine je smanjenje faza u izradi, npr. integralnom izvedbom. Time se smanjuju troškovi opremanja. Uštede na troškovima materijala kod pojedinačne izrade malih komada se inače ne isplate.

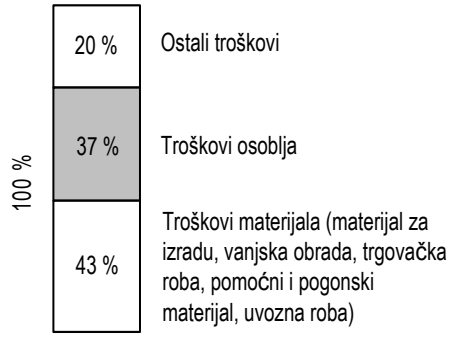
c) *Struktura troškova malih i srednje velikih komada i proizvoda*, približava se kod proizvodnje u velikim serijama strukturi troškova kod velikih komada u pojedinačnoj proizvodnji. Troškovi materijala i izrade iz pojedinačnih vremena prevladavaju, a troškovi izrade iz vremena opremanja postaju mali gledano po komadu. Međutim, gledano na cjelokupni broj komada nisu zanemarivi.

d) S *povećanjem specifičnog opterećenja* može se smanjiti veličina proizvoda, a time uglavnom i troškovi njegove proizvodnje. To je često moguće putem materijala s većom opteretivošću ili odgovarajućom obradom površine. Pritom treba paziti da troškovi radnog vijeka ne narastu uslijed smanjenje pouzdanosti dijelova u sustavu.

4.8 Troškovi materijala

Pod troškovima materijala misli se, u skladu s pogonskim obračunom posebice na troškove poluproizvoda (npr. sirovina i repromaterijala) i na dijelove, podsklopove i sklopove koji se kupuju. Težište ovog poglavlja u tom smislu stavljeno je na troškove sirovina i repromaterijala. Troškovi materijala uključujući i troškove za kupljene dijelove, u strojogradnji sudjeluju s velikim udjelom od oko 43% (15-60% prema [30]) ukupnih troškova (vlastitih troškova), slika 4.10.

Kod velikih proizvoda, uređaja i strojeva u pojedinačnoj proizvodnji troškovi materijala, u formi sirovine i repromaterijala, rastu do 50-70% troškova proizvodnje. Tendencija „*outsourcing*"-a, tj. koncentracija na osnovne kompetencije, dijelova i procesa, dovode do rasta troškova materijala, pri čemu onda kupljeni dijelovi dobivaju na značaju. No, i jedna druga činjenica gura troškove materijala u prvi plan: to su gotovo jedini pravi varijabilni troškovi na koje sudionik u oblikovanju proizvoda uistinu može utjecati. Nema direktnijeg i bržeg utjecaja na troškove od npr. nekupovine određenog dijela, predviđanja tanjeg lima ili niže kvalitete materijala. Zbog socijalnog zakonodavnog okvira, troškovi plaća za poduzeće u cjelini kratkoročno jedva da se mogu smanjiti. Moguće ih je jedino prebaciti s jednog proizvoda na drugi (možda neki proizvod koji se do sada pribavljao izvana).



Slika 4.10 Ukupni troškovi u strojogradnji prema vrsti troškova [30]

Što se tiče značaja troškova materijala koji su u strojogradnji trostruko do četverostruko veći u odnosu na troškove plaća zaposlenih, nastojanja rukovodstva poduzeća oko racionalizacije proizvodnje pojavljuju se sada u nešto drugačijem svjetlu. Sukladno tome, treba težiti puno tješnjoj suradnji između nabave i logistike, pripreme rada i razvoja proizvoda s konstrukcijom. Značaj nabave za troškove materijala je velik. Već kod standardnog čelika npr. čelik za cementiranje 16MnCr5 (Č4321) nabavne cijene osciliraju od dobavljača do dobavljača gotovo dvostruko. Kod drugih, ne tako čestih materijala ili kupljenih dijelova, razlike su još i puno veće. Sada, baš kao i prije, vrijedi pravilo: "*Dobit se krije u nabavi*".

Veliki broj komada omogućava smanjenje troškova, pa tako veliki kupci npr. valjnih ležajeva dobiju rabat i do 80-90%. Što su manji troškovi materijala u troškovima izrade, to će cijena manje reagirati na broj komada (nabavne količine).

Troškovi materijala su visoki kod velikih, jednostavnih strojeva, tj. strojeva kod kojih razmjerno malo otpada na samu izradu. Dizalice u troškovima proizvodnje imaju oko 78% udjela u troškovima materijala, a željeznički teretni vagoni oko 68% [47]. Suprotnost tome je kod crtaćeg pribora (šestar) s oko 25% udjel troškova materijala. Kod konstrukcijskih elemenata težište utjecaja na troškove proizlazi iz strukture troškova (troškovi materijala odnosno troškova izrade iz pojedinačnih vremena odnosno vremena opremanja).

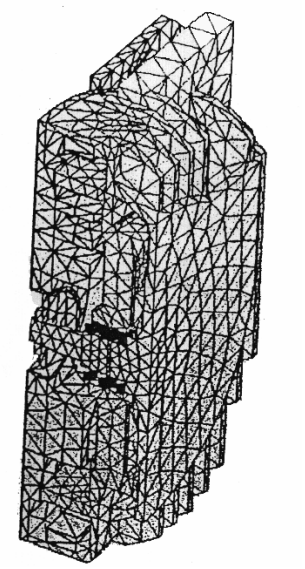
Mogućnosti smanjenja troškova sirovine i materijala proizlaze iz obračuna troškova materijala diferencirajućom dodatnom kalkulacijom [30]. Troškovi materijala u biti proizlaze iz volumena materijala (bruto volumen) i specifičnih troškova materijala T_v (cijena/volumen). Naravno da se troškovi materijala mogu povezati s masom. Međutim, u obračunskom smislu, kod oblikovanja se prvenstveno radi o volumenu. Općenito nije stvar samo u tome da se koristi najjeftiniji materijal po volumenu, tj. da se što više snizi cijena specifičnih troškova materijala, budući da jedan skupi materijal visoke čvrstoće može smanjiti volumen u tolikoj mjeri da usprkos višoj cijeni materijala, troškovi materijala $V \cdot T_V$ u konačnici budu niži.

Mjerodavni su očigledno troškovi materijala prema vrijednosti čvrstoće R_m. To prije svega vrijedi za čisto vlačno opterećenje. Ako se za različite čelike uspostavi vrijednost: T_V/R_m tada za tipske čelike veće čvrstoće, proizlazi da su nešto povoljniji nego oni niske čvrstoće. Jednaka tendencija proizlazi i kod vijčanih spojeva, gdje su vijci visoke čvrstoće jeftiniji od onih niske čvrstoće.

Međutim, ovo vrijedi samo uz velike rezerve, budući da vrijednosti čvrstoće, baš kao i troškovi, pokazuju velike različitosti. Ako uzmemo u obzir daljnje zahtjeve, poput žilavosti (čelici niske čvrstoće uglavnom imaju veću žilavost), otpornosti na habanje, dobre obradivosti ili mogućnosti zavarivanja, tada nisu moguće prethodne općenite tvrdnje.

Ako primjerice imamo samo jednu vrstu iskorištenja čvrstoće na rubnim zonama nekog konstrukcijskog dijela, kao što je slučaj npr. s opterećenjima kod savijanja i torzije, tada troškovi materijala koji se odnose na volumen postaju važniji. Ovo još više vrijedi kada konstrukcijski dio jedva da je izložen opterećenjima sila, već samo služi za vizualno ili prostorno odjeljivanje (primjer: kućišta, armaturne stjenke) ili ako se radi o ograničenom deformiranju, pa se odabire niska opteretivost.

Razvojem računalnih programa, prvenstveno topoloških metoda, uštedu materijala je moguće dobiti u skoro svim segmentima strojogradnje. Tako /6/ provodi na kućištu, kočnici, nosačima ležaja itd. pogonskih uređaja liftova pogonjenih visokomentnim motorom optimiranje oblika i dimenzija u cilju smanjenja ukupne mase, slika 4.11. Provedenom strukturalnom sintezom [12] masa pogona za 37 kW model je smanjena na oko 300 kg, što je za 33% niže od prethodnog modela istih karakteristika.



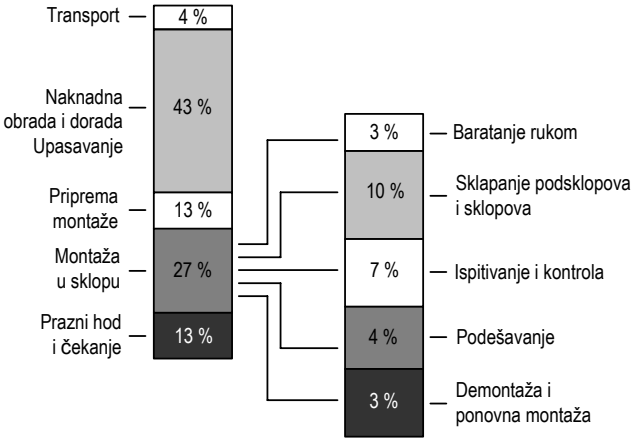
Slika 4.11 Topološka optimizacija pogonskog uređaja lifta [12]

4.9 Troškovi montaže

Iz istraživanja [14], provedenih u proizvodnji CNC alatnih strojeva, pri usporedbi montaže standardnog elektromotornog pogona s prigonom povećane točnosti okretnog stola alatnog stroja iznosi 88 sati, dok montaža direktnog pogona za istu namjenu iznosi svega 12 sati.

Najveći doprinos smanjenom vremenu montaže sklopa u cjelinu, kako se navodi, je mali broj ugradbenih dijelova. Cijena montaže kao direktni trošak, nastao zbog sklapanja dijelova u cjelinu, tj. uvjetovane montaže s malim brojem dijelova u sklopu niže ili srednje kompleksnosti vezane uz rotacione forme visoke preciznosti, može iznositi do 20% od ukupne cijene koštanja gotovog proizvoda [48], [49]. Za montažu sustava s velikim brojem dijelova ili sustava visoke kompleksnosti i složenosti (mjerni uređaji, alatni strojevi, roboti i manipulatori, i dr.), udio cijene montaže penje se i do 50% cijene izrade proizvoda. Visokomomentni motor, koji je u principu formiran s malim brojem dijelova, sa sličnim ili identičnim montažnim zadacima i uvjetima može se znatno automatizirati u serijskoj i masovnoj proizvodnji čime se stvara osnovni uvjet za smanjenje cijene proizvoda.

Slika 4.12, prema [48], prikazuje strukturu aktivnosti pri montaži za ovakvu vrstu proizvoda.



Slika 4.12 Struktura aktivnosti pri montaži u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji

Naknadna obrada, dorada i upasivanje vezano uz nedovršene dijelove, neprikladne tolerancije mjera, greške oblika i položaja uzimaju se s oko 43% svih montažnih aktivnosti, slika 4.12. Konstruktorski zahtjev „*pri montaži upasati*“, u principu je jako skupa montažna aktivnost, koja proizlazi iz neprikladnih tolerancija unutar montažnog lanaca. Sam postupak sklapanja dijelova u cjelinu iznosi svega 10% ukupnog vremena montaže.

Već u postavljanju liste zahtjeva i koncipiranja zadatka, usporedbe svih potrebnih informacija, izrade projekta s konstrukcijskom razradom, postavlja preko broja ugradbenih dijelova s njihovim međusobnim spojevima i vezama sam tijek i vrstu sklapanja, usmjerava i definira mogućnost međusobnog postavljanja u podsklopove i sklopove s međukontrolom i kontrolom u cilju osiguranja ispravnosti i pouzdanosti tehničkog sustava. Stoga svaki sudionik u procesu oblikovanja direktnog pogona kao proizvoda mora svojim konstrukcijsko–proizvodnim i montažerskim iskustvom samostalno ili u timu s rukovoditeljem (predradnikom) montaže, analizirati i razraditi u svim detaljima, kako redoslijed i postupak sklapanja tako i pomoćna sredstva za rad (standardni i specijalni alat, naprave i uređaje, mjerni i kontrolni alat i dr.), do završnog podešavanja i ispitivanja, te po potrebi i demontaže. Prema [48], [49], [50], [51] smanjenje troškova montaže provodi se kroz dva osnovna principa:

- pojednostavljenje postupka montaže preko montažno-tehnički povoljnih rješenja i detalja s obzirom na geometriju izradaka u tehničkom sustavu (veća dopuštena odstupanja mjera, prikladni postupci spajanja, jednostavni oblici za rukovanje) i materijal, ergonomski prilagođeno sklapanje, te takvim oblikovanjem da je moguća primjena tehničkih pomagala (naprave, električni ili pneumatski alat, uređaji i automati za montažu);

- smanjenje opsega montaže i to naročito preko smanjenja broja dijelova, povećanjem ugradnje gotovih kupljenih i već ispitanih komponenata, podsklopova i sklopova.

Međutim kod konstrukcije je cilj u traženju kompromisa između cijene proizvodnje dijelova i komponenti tehničkog sustava i cijene montaže u cjelinu (npr. upotrebom odgovarajućih sustava toleriranih mjera izbjegava se upasivanje pri montaži), demontaže, održavanja u eksploataciji, repature, te obnovljivosti (recikličnosti).

Montaža dijelova i gotovih podsklopova u cjelinu jednostavnog ili srednje kompleksnog tehničkog sustava cjenovno zavisi o:

- sustavnim utjecajnim veličinama (broj dijelova i njihov utjecaj na montažu, oblikovanje dijelova, površinska obrada i zaštita, materijal, broj ugradbenih sklopova i njihova povezanost s drugim dijelovima i podsklopovima, postupak odnosno tehnologija spajanja, i dr.);

- tehničkom problemu manipulacije i rukovanju dijelovima (ekstremno velike mase i dimenzije, grube odnosno fine tolerancije, isprepletenost različitih formi (kablovi, hidraulički vodovi, opruge, spojnice, sigurnosti elementi i dr.), visoka osjetljivost na oštećenja, ekstremna fizikalna[13] i kemijska svojstva i dr.);

- montažno pogodnim izvedbama (grupiranje dijelova u montažno-tehnološke grupe, razbijanje ukupnog procesa montaže u predmontaže i završnu montažu, grupiranje u montažne grupe sa zajedničkim materijalom, kontrolom, ljudima i dr.).

Troškovi montaže u prvom redu ovise o sljedećim čimbenicima :

- broju dijelova i njihovoj osobini sklapanja u cjelinu, na temelju geometrije, kvalitete površine i materijala;

- broju montažnih podsklopova i sklopova i njihove osobine sklapanja na sučeljima prema drugim montažnim sklopovima i dijelovima;

- postupku spajanja u cjelinu.

Prema [52], [53], prilikom montaže direktnog pogona moguće je postaviti plan tijeka operacija u slijedu, s ciljem smanjenja nepotrebnih hodova, a time i smanjenja troška montaže na cijenu gotovog proizvoda.

Tehničke probleme, a time i povećane troškove uzrokuju dijelovi kojima se teško manipulira, a koji se odlikuju sljedećim osobinama:

[13] Magnetska indukcija trajnih magneta rotora visokomomentnog motora direktnog pogona je veća od 1T, što predstavlja rad pri montaži u vrlo jakom magnetskom polju nekoliko stotina puta većem od normalnog. Potencijalno zakazivanje rada elektronskih uređaja posebno je istaknuto s naglaskom na učesnike s ugrađenim simulatorom rada srca (pacemaker).

- ekstremna masa (težina);
- ekstremne dimenzije, odnosno razlike u dimenzijama;
- grube tolerancije;
- isprepleteni oblici (npr. opruge, spone, sigurnosni prsteni, kabeli);
- visoka osjetljivost;
- ekstremne fizikalne ili kemijske osobine.

Isprepleteni oblici i dijelovi često se mogu izbjeći odgovarajućim oblikovanjem. Isprepleteni dijelovi najčešće se sastoje od žice ili lima (npr. sigurnosni prsteni kod osovina, spone, spiralne opruge). Prorezi i provrti trebali bi biti manji od debljine materijala. Treba izbjegavati oštre bridove i oštre kutove.

Organizacijski problemi međutim imaju puno značajniji utjecaj na troškove, kako proizlazi iz istraživanja [54]. Tako npr. jedna od najznačajnijih smetnji u troškovnom smislu kod pojedinačne proizvodnje ili proizvodnje u malim serijama predstavlja nedostatak raspoloživosti dijelova za dogovoreni termin montaže. Kod pokrenute serijske montaže ova vrsta smetnje otpada, a druge stupaju u prvi plan.

U svrhu smanjenja tehničkih i organizacijskih problema, u praksi su se dobrima pokazale sljedeće mjere:

- razvoj i oblikovanje usmjereni na lakšu montažu u timskom radu sa stručnjacima za montažu;
- raspodjela cjelokupnog procesa montaže na predmontažu i završnu montažu. Sukladno tome, potrebno je konstruirati montažne sklopove prikladne za predmontažu, koji se mogu zasebno ispitati. Time se smanjuje složenost montaže.
- osnivanje samostalno odgovornih grupa za montažu, u suradnji s kojima se mogu optimirati tijek materijala, vremenski tijek i kontrola kvalitete.

5. KONSTRUKCIJSKI PODSUSTAVI DIREKTNIH POGONA

5.1 Svojstva tehničkog proizvoda

Direktni pogon pogonskog mehanizma je tehnički proizvod takvih svojstava i prednosti, koji nalazi sve veću primjenu u projektiranju pogona tehničkih sustava. Takav direktni pogon kojeg u osnovi tvori visokomomentni motor, može se općenito prikazati kao tehnički proizvod (TP) određene količine različitih svojstava i potpuno opisati karakteristikama svakog pojedinog svojstva. Razmatrajući tehnički proizvod kao sustav pokušavaju se otkriti njegove unutrašnje zakonitosti pridružujući im konvencionalna i iskustvena znanja, koja općenito mogu biti formulirana kao:

$$TP = f\{\text{okoline, tehničke funkcije, strukture}\}$$

Svaki tehnički proizvod koji postoji kao materijalna, a ne kao apstraktna tvorevina, konkretnog stanja, može se opisati u glavnim crtama s više ili manje konstrukcijskih detalja. Za vrijeme procesa koncipiranja i razvoja tehničkog proizvoda ili u fazi konstrukcijske i tehnološke razrade, potrebno se pridržavati njegovih tehničkih svojstava, koja u tehničkoj dokumentaciji moraju sezati do te mjere, da izrada može biti provedena. Rezultat, koji bi trebao proizaći iz cijelog procesa oblikovanja, je sam materijalni proizvod odnosno u našem slučaju direktni pogon s visokomomentnim motorom.

Važnost *okoline* i njezin odnos prema direktnom pogonu mora biti definiran, jer bez uspostavljenog odnosa tehnički proizvod ne bi imao značenje tj. potpunom izoliranošću od okoline tehnički proizvod postoji samo teorijski. Odnosi tehničkog proizvoda s okolinom uvijek se mogu prikazati kao odnos između određene količine ulaznih – *input* i izlaznih veličina – *output.* Odnosi[14] s okolinom tehničkog proizvoda mogu biti neophodni za određivanje ukupne funkcije, o kojima treba voditi računa već pri koncipiranju. Mnogi odnosi iz kategorije funkcionalno tehnički irelevantnih kao npr. estetsko oblikovanje ili vanjski poremećaji (trešnja temelja objekta, mrežno napajanje smanjenim naponom i dr.) ukoliko nisu posebno istaknuti u koncipiranju, izostavljaju se.

[14] Odnosi prema okolini mogu biti funkcionalno relevantni (značajni, važni, istaknuti, bitni, itd.) ili irelevantni.

Tehnička funkcija je svojstvo tehničkog sustava odnosno direktnog pogona korištenog za određenu namjenu, koja će ulazne veličine prevesti u izlazne veličine pod određenim uvjetima tj. tehnički proizvod temeljem osnovnih projektiranih svojstava mora svoju operativnu namjenu izvršiti traženom transformacijom unutar sustava. Najvažnija svojstva funkcije tehničkog proizvoda, o kojima se mora voditi računa unutar procesa razvoja s oblikovanjem su:

- funkcija se sastoji od odnosa s okolinom preko izraženih utjecajnih parametara tehničkog proizvoda;
- između funkcije i strukture tehničkog proizvoda postoji određeni odnos;
- pri određivanju funkcije izuzimaju se funkcionalno sporedne (nevažne) veličine;
- između transformacijskih procesa i uvjeta izlaznih veličina iz tehničkog proizvoda postoje odnosi koji mogu biti važni za funkciju ili ponašanje tehničkog proizvoda.

Pri oblikovanju tehničkog proizvoda prolazi se kroz razne stupnjeve razvoja, a za opis funkcija mogu se koristiti razna sredstva (naziv, verbalni opis, tabele vrijednosti, dijagrami, blok sheme, crteži, matematičke jednadžbe, matrice i sl.).

Struktura direktnog pogona je ustvari njegova unutrašnja građa, koja je određena količinom elemenata i međusobnim odnosima elemenata. Struktura konkretnog tehničkog proizvoda opisana je kao geometrijsko–materijalni aspekt koju karakteriziraju ugradbeni elementi. Između pojedinih elemenata tehničkog sustava osim geometrijskih odnosa postoje i funkcionalne relacije, poredak[15] i povezivanje[16], koje su neophodne za proces konstruiranja.

5.2 Opće konstrukcijsko znanje

Pri procesu oblikovanja tehničkog proizvoda svaki sudionik se koristi iskustvenim znanjem, formalnim znanjem stečenim obrazovanjem, te intuitivnim znanjem i talentom. Prikupljanje i obrada informacija potrebnih u procesu oblikovanja proizvoda, slika 5.1, jedan je od važnijih čimbenika. Odluke koje se moraju donositi u kombinaciji s upotrebljenim konstrukcijskim rješenjima ovise o kvaliteti dostupnog znanja, odnosno o informacijama. Prilikom donošenja odluka od vitalne je važnosti da su informacije dostupne: u pravo vrijeme, u potrebnoj količini i u ispravnom obliku.

Oblikovanje je između ostalog i proces upravljanja, manipulacije i obrade informacija [55]. Sudionik u procesu oblikovanja tijekom procesa konstruiranja koristi velike

[15] Poredak je relacija između dva ugradbena elementa koja opisuje relativni geometrijski položaj.

[16] Povezivanje je relacija između elemenata koja omogućuje prijenos energije, informacija ili materijala između dva elementa.

količine informacija u cilju ispunjenja zadanog zadatka. Količina i oblik tih informacija, koje su sastavni dio konstrukcijskog znanja, ovisi o više parametara koji su neposredno vezani za fazu procesa konstruiranja.



Slika 5.1 Prikaz konstrukcijskog procesa prema [55]

Proširenje mogućnosti trenutno dostupnih informacija u svrhu pomoći u procesu oblikovanja proizvoda bio bi značajan odmak u smjeru kreiranja kvalitetnijih rješenja izvedbi i razumijevanja nastanka postojećih konstrukcijskih rješenja pogonskih sustava, te unapređenja komunikacije između sudionika unutar istog projekta. Znanje je općenito podijeljeno prema ulozi u tehničkom sustavu u tri kategorije:

- konstrukcijsko znanje;
- operativno znanje;
- proceduralno znanje.

Konstrukcijsko znanje je najvažnija kategorija navedenih znanja. Ovo znanje je vezano za proces oblikovanja tj. sadrži informacije potrebne za oblikovanje kompletnog ili nekog segmenta direktnog pogona kao tehničkog proizvoda.

Operativno znanje vezano je s konstrukcijskim znanjem na taj način što dodaje informacije vezane za vrijeme i mjesto nastanka konstrukcijskog znanja. Također sadrži informacije o korisniku koji je kreirao konstrukcijsko znanje, te informacije o organizaciji u kojoj se korisnik nalazi. Ovaj dio informacija, operativnog znanja, naziva se znanje o znanju[17] [56], [57] i sadrži, osim informacija o znanju kreiranom u sustavu i informacije o načinu uporabe pojedinog znanja.

[17] U nekim radovima ovo znanje se naziva i mega-znanje

Proceduralno znanje je vezano za sustav upravljanja i manipulacije konstrukcijskim znanjem. Ovo znanje sadrži informacije o mjestu pohrane i načinu pristupa pojedinim informacijama neophodnim za inicijalizaciju ili ispravan rad sustava.

5.2.1 Konstrukcijsko znanje

Kako je prethodno naglašeno, u procesu oblikovanja treba imati na raspolaganju velike količine informacija prikazanih na različite načine, kao tehničke podloge s crtežima, katalozi dobavljača, priručnici, stručna literatura, interne i opće norme, standardi, propisi, tehnološki postupci itd. To su ustvari znanja koja će se kvalitativno i kvantitativno implementirati u tehnički proizvod. Općenito gledano, u procesu oblikovanja treba koristiti cjelokupno znanje kojim raspolaže okruženje[18] u kojem se odvija razvoj tehničkog proizvoda.

Za područje strojarskih konstrukcija, poglavito njegovih dijelova i funkcionalnih sklopova svaki sudionik u procesu oblikovanja treba pokušati složiti neophodna znanja koja trebaju činiti bazu strukovnog znanja, s izdvojenim zasebnim grupama po kriteriju osnovnog tehničkog principa[19]. Svako stručno područje koje je ugrađeno u tehnički proizvod stalno se proširuje novim spoznajama i rezultatima istraživanja, a njihova primjena daje mogućnost nadopunjavanja konstrukcije i daljnjeg razvoja. Potpun i cjelovit sustav znanja za oblikovanje direktnih pogona ne postoji kao samostalno tehničko područje, već se dostupno znanje javlja većinom u fragmentiranom obliku isto kao i brojna nastojanja istraživača, iz različitih znanstvenih područja, da ta znanja približe korisnicima.

Znanje koje danas treba za područje direktnih pogona s visokomomentnim motorima i koje će se koristiti u budućnosti, uglavnom je već otkriveno znanje, ali je ono pohranjeno na raznim mjestima ili raspršeno u relevantnim znanstvenim disciplinama i često puta nedostupno. U velikom broju slučajeva, to je tehničko znanje, veoma često tek puko osobno “iskustvo” pojedinaca, koje nije bilo integrirano u tehnički sustav. Stoga je napredak i transfer znanja u druge specijalnosti bio izuzetno rijedak i često puta kompliciran, jer su spoznaja i iskustvo pojedinca bili glavni izvor znanja.

To znači da se konkretna i specifična znanja iz područja direktnih pogona, koja su potrebna u procesu oblikovanja ponekad trebaju izvesti i usvojiti iz općeg tehničkog znanja. Područja istraživanja stoga se temelje na fundamentalnim i tehničkim znanostima, a isto tako na iskustvenom znanju i normama. Također treba naglasiti da neka obilježja ili svojstva tehničkog sustava ne mogu biti sadržana i obuhvaćena samo jednim znanstvenim područjem.

Oblikovanje za proizvodnju [58], [59], što je cilj svakog razvoja, a završava realizacijom tehničkog proizvoda, vezano je uz strukovna odnosno potrebna znanja za svojstva proizvoda, tehničku funkciju, proizvodnju, isporuku, uporabu u radnom vijeku, za

[18] Grana industrije, proizvodno poduzeće ili projektni ured određenog strukovnog područja.

[19] Misli se na tehničku funkciju strojnog dijela ili sklopa.

odnos čovjek-proizvod, za regulaciju, ekonomiju, itd. Za praksu su ta znanja veoma važna i trebaju služiti kao pouzdan izvor potrebnog znanja pri oblikovanju kako tehničkog proizvoda tako i elemenata istog. Prema tome, tehnologično oblikovanje [58] mora predstavljati okosnicu, ali i sponu između različitih znanja potrebnih u procesu konstrukcijskog definiranja forme budućeg proizvoda.

Strukovno znanje je konkretan oblik općeg tehničkog znanja. Njegovo širenje stoga treba očekivati u onim granama industrije gdje je i područje njegove najčešće uporabe. Prenošenje potrebnog strukovnog znanja može biti provedeno na različite načine, ovisno o važnosti pojedinih značajki u konkretnoj situaciji. Prvo treba pronaći koje će značajke imati presudan utjecaj na tehnički proizvod, pa tek nakon toga, tako odabrane primarne značajke mogu biti primijenjene. Ako, na primjer treba biti dominantan oblik tehničkog proizvoda, tada je sasvim jasno da tehnologičnost forme ima primarni utjecaj na proces proizvodnje. Za osnovni kriterij tehničke funkcije, oblikovanje forme samo je popratni kriterij, odnosno proces proizvodnje u tom slučaju mora biti izabran osnovom traženih funkcijskih značajki tehničkog proizvoda. Također, ima značajki koje mogu sadržavati konkretne preporuke, što je poznato kao "*konstruiranje za zahtijevana svojstva*", a mogu služiti širem krugu korisnika s ograničenim specijalnostima, iako su one utemeljene i razvijene na općim načelima konstruiranja.

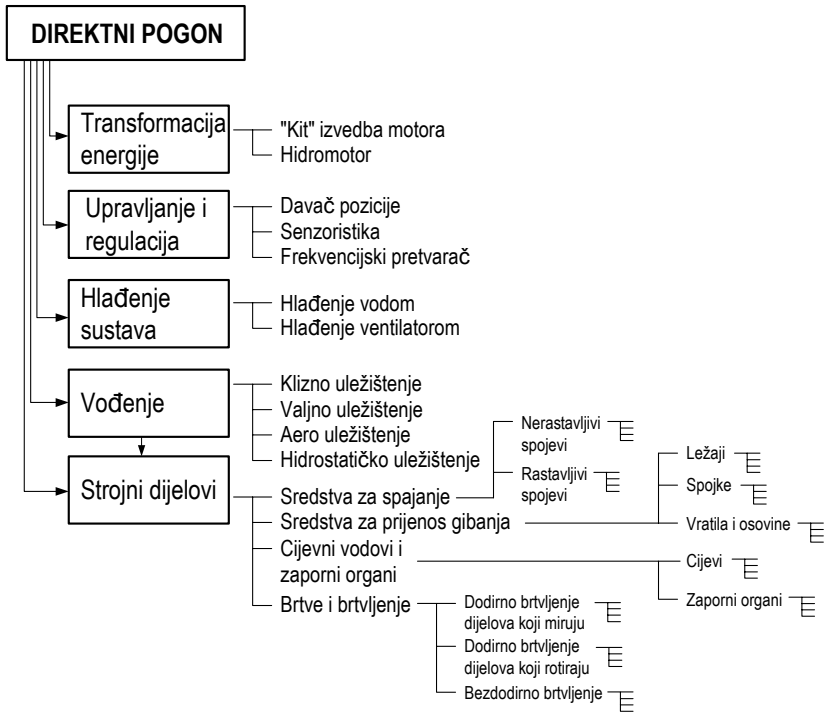
5.2.2 Strukturiranje konstrukcijskog znanja

Za područje strojarskih konstrukcija u čiju domenu spadaju i direktni pogoni pogonskih mehanizama, poglavito njihove funkcionalne sklopove i sastavne dijelove, trebalo bi složiti strukturu znanja, koja treba činiti osnovu za izradu potrebne baze strukovnog znanja. Upravo izdvajanje bitnih cjelina znanja po kriteriju tehničke funkcionalnosti direktnog pogona ili dijela omogućuje pregledno i brzo pretraživanje područja znanja, a time i njegovu implementaciju u tehnički proizvod od postupka koncipiranja, razvoja, konstruiranja pa do tehničko-tehnološke razrade. Stručna područja na kojima se bazira znanje za područje direktnih pogona s visokomomentnim motorima vrlo je opsežno i stalno se proširuje novim spoznajama i rezultatima istraživanja (naročito iz područja elektrotehnike s elektromotornim pogonima), tako da predočena načela i principi oblikovanja nisu konačni, već postoji daljnja mogućnost nadopunjavanja i razvoja.

5.2.3 Strukturiranje znanja prema funkcijskim principima

Struktura tehničkog znanja temeljena na funkcionalnim principima u potpunosti prati opći model građe strukovnog znanja [60], koje se grana i širi od općeg tehničkog principa[20] prema konkretnom oblikovnom tehničkom rješenju, slika 5.2.

[20] Najviši stupanj apstrakcije.



Slika 5.2 Osnovna struktura oblikovanja direktnih pogona s visokomomentnim motorom

Osnovna struktura oblikovanja, slika 5.2, treba poslužiti kao model za izradu baze znanja iz direktnih pogona pogonskih mehanizama. Važno je naglasiti da su navedena znanja neujednačene složenosti kao i različite zastupljenosti u stručnoj literaturi. Naime dio znanja je obuhvaćen tehničkim normama i pridružen uz određene funkcijske sklopove i strojne dijelove, a dio je vezan za proizvodnju i proizvodna poduzeća. Međutim, za svaku pojedinu funkcionalnu cjelinu, treba obuhvatiti sva potrebna kvalitativna i kvantitativna znanja bitna u procesu oblikovanja direktnih pogona. Stoga se iza svakog naslova kao "*Vođenje*" ili podnaslova „*Davač pozicije*" krije nova struktura[21] tipova i vrsta tehničkih normi i podataka, elemenata proračuna i načina izbora, oblikovanja, kao i gotovih sklopova i elemenata[22]. Naime, sve podjele mogu biti izvedene na nekoliko razina, a time se prema kompleksnosti područja prikazane strukture, više ili manje razlikuju po finoći podjele znanja, ovisno o složenosti tehničkog detalja koji opisuju.

Oblikovanjem strojnih dijelova za direktni pogon pogonskih mehanizama javljaju se, uz uvjete vezane za tehničku funkciju, tri važna pitanja na koja treba dati odgovore:

[21] Slijedi daljnja podjela, novo grananje do najsitnijih detalja vezanih za vijčane spojeve strojnih dijelova.

[22] Misli se na standardni proizvodni program proizvođača.

1. Kojem je opterećenju strojni dio izložen?

2. Koji materijal najbolje odgovara zahtjevima funkcije i opterećenja?

3. Koja je tehnologija izrade strojnog dijela ekonomski opravdana?

Među utjecaje koje treba uzeti u obzir, već u prvoj razradi direktnog pogona, nalaze se zahtjevi vezani uz izradu i obradbu strukturnih dijelova i ugradbenih cjelina, jer su to zahtjevi koji imaju važnu, a često i presudnu ulogu u oblikovanju svake konstrukcije. To je zapravo, tehničko područje koje dijelom seže u proizvodnju, a osnovna materija obuhvaća tehnološki ispravno oblikovanje. Područje ispravnog tehnologičnog oblikovanja strojnih dijelova vrlo je široko i obuhvaća sve tehnologije izrade i obrade važne u strojarskoj proizvodnji, međutim, to je samo parcijalni dio ukupnog procesa oblikovanja.

Pri tome, kada je riječ o tehnološki ispravnom oblikovanju strojnih dijelova, misli se uglavnom na one dijelove koji nisu obuhvaćeni paletom gotovih normiranih dijelova koje možemo kupiti. Naime, za strojne dijelove koji su većim dijelom normirani, dane su glede ispravnog oblikovanja, potrebne smjernice u okviru obrazovanja konstruktora, ali i kroz tehničke normative u vidu standardnih procedura izrade, te načina i kakvoće obrade.

Međutim, u ovom će poglavlju biti naznačene samo osnove ispravnog tehnologičnog oblikovanja strojnih dijelova iznoseći temeljna pravila i smjernice, i to samo za one tehnologije koje u direktnim pogonima imaju posebnu važnost. Ovdje se mogu istaći sljedeće skupine znanja pridruženog raznim tehnologijama, a potrebna su u procesu stvaranja oblika budućeg proizvoda, odnosno direktnog pogona s visokomomentnim motorom [61]:

- ispravno tehnologično oblikovanje prema opterećenju;
- ispravno tehnologično oblikovanje prema izmjenjivosti;
- ispravno tehnologično oblikovanje prema montaži i demontaži;
- ispravno tehnologično oblikovanje dijelova predviđenih za obradu skidanjem čestica;
- ljevački ispravno konstrukcijsko oblikovanje odljevaka.

Osim nabrojanih područja bitnih za ispravno tehnologično oblikovanje, pri konstruiranju direktnih pogona s visokomomentnim motorima, odnosno ugrađenih strojnih dijelova, potrebno je isto tako voditi računa i o drugim zahtjevima za ostvarivanje željenih svojstava unutar tehničkog sustava kao ergonomska i estetska svojstva, utjecaj na okoliš, zbrinjavanje, distribucijska svojstva i dr.

Sve skupine znanja potrebne pri tehnologičnom oblikovanju su isto tako bitne za konstrukcijski proces, te u izradi baza strukovnih znanja. Na takvim znanjima treba za svaku

tehnologiju i za svaku tehničku domenu graditi i razvijati konkretnu strukturu znanja u području pojedinačnih detalja.

5.3 Struktura direktnog pogona s visokomomentnim motorom

Osnovu direktnog pogona čini visokomomentni motor ili tzv. „*kvazi linearni motor*“ koji je nastao „*namatanjem“* linearnih motora na kružni vijenac, a koristi se za rotaciona gibanja unutar tehničkih sustava. Osnovna karakteristika direktnih pogona definira se pojmom: *veliki pogonski moment pri malim brzinama vrtnje*, što proizlazi iz primjene elektromotornih pogona s velikim brojem pari polova ($p \leq 300$) [62], [63], [64], [65]. Istraživanja o mogućnosti primjene i hidrauličkih pogona, poglavlje 2.3.1, u direktnim pogonima, pokazala je velike nedostatke njihove primjene u reguliranim pogonima, iako hidraulički pogoni imaju generalno široku primjenu u općoj strojogradnji.

Ponuda visokomomentnih motora na tržištu, u oko 90…95% slučajeva, svodi se na tzv. „*kit“* ili *„bezokvirnu“* izvedbu /12/, /13/, /14/, /15/, /16/, i dr., koja se sastoji iz statorskog dijela s namotima i rotora s trajnim magnetima, slika 5.3.



Slika 5.3 Visokomomentni motor

Zadatak u procesu oblikovanja, je konstrukcijski integrirati stator i rotor visokomomentnog motora zajedno s podsustavima i njihovim komponentama, slika 5.2, kao što su uležištenje, mjerni sustav ili sustav hlađenja u pogonski mehanizam. Ovakav pristup konstrukcijskom oblikovanju pogonskog mehanizmima idealan je za aplikacije kod kojih je prostor ugradnje ograničen ili je kritična ukupna masa stroja. Ovi pogonski elektromotori znatno su skuplji od standardnih motora s prigonom, jer je u cijelom procesu realizacije, od koncipiranja pogona do završnog ispitivanja, utrošeno vrijeme nekoliko desetaka puta dulje od vremena za integraciju standardnog motora. Nezgodna strana visokomemntnih motora u slučaju kvara u sustavu je dosta složena i komplicirana procedura izmjene samog motora, mjernog uređaja ili bilo koje komponente. Kao rezultat svega navedenog, može se reći da visokomomentni motori nisu prikladni za svaku primjenu.

U zadnjih nekoliko godina proizvođači /17/, /18/, /19/ i dr. na tržište plasiraju visokomomente motore kao ugradbene cjeline, slika 5.4, čime se njihova izvedba konstrukcijski približava standardnim motorima.



Slika 5.4 Izvedba visokomomentnog motor kao ugradbene cjeline /12/

5.3.1 Sustav vođenja

Općenito je sustav vođenja visokomomentnog motora (ili linearnog motora) najčešće poznat pod nazivom uležištenje. To je neizostavna mehanička komponenta direktnih pogona, koja omogućava relativno gibanje primarnog i sekundarnog dijela pogona, i da pritom prenosi nastalo radno opterećenje na temelj, kućište ili ostale strojne komponente u tehničkom sustavu [66]. Na sustav uležištenja postavljaju se, pored različitih tehničkih zahtjeva kao velike brzine vrtnje pri visokim ubrzanjima, dugi vijek trajanja, visoka točnost okretanja, velika krutost ili prigušenje, i dodatni zahtjevi kao prostor ugradnje, točnost montaže (ravnost, paralelnost ili samopodesivost), toplinska otpornost i dr. Za uležištenje direktnih pogona na raspolaganju su različite izvedbe, od valjnih ležaja (radijalno-aksijalni valjkasti ležaji, kuglični i križni valjkasti ležaji), kliznih ležaja, hidrostatičkih ležaja, zračnih (aerostatičkih) ležaja do magnetskih ležaja.

Jedna od bitnih dodatnih značajki za izbor tipa uležištenja je krivulja trenja, koja daje zavisnost sile trenja od relativne brzine vrtnje primarnog i sekundarnog dijela visokomomentnog motora. Naročito kod preciznih pogona (okretni stolovi CNC strojeva, mjerni uređaji, roboti) treba voditi računa o prijelaznim pojavama između trenja mirovanja (statičkog) i trenja gibanja tzv. *Stick-Slip* efekt. Iz toga proizlazi primjena uležištenja koja nemaju izraženo trenje mirovanja kao npr. magnetsko uležištenje, zračno ili hidrostatičko uležištenje. Daljnji zahtjev je krutost uležištenja, koje ovisi o vrsti i predzatezanju valjnih tijela sa stazama valjanja u uležištenju.

Klizni ležaji za rad na suho interesantni su u primjenama kod nižih zahtjeva na preciznost i nosivost, a pored pogodnosti za rad bez buke imaju visoku otpornost na udare pri radu [66]. Zbog izraženog trenja mirovanja, u njihovoj primjeni mora se voditi računa o *Stick-Slip* efektu. Prednost ove vrste uležištenja je nepotrebno podmazivanje u radu zbog primjene modernih kliznih materijala iz plastičnih kompozita, koja dolaze u trgovačku mrežu pod nazivom „*ugradi i zaboravi*“, te njihova neosjetljivost na nečistoće u radu.

Osnovna karakteristika takvih materijala je u smanjenju lokalnog trenja koje je ostvareno mikroskopski malim česticama čvrstog maziva inkorporiranog u osnovnu strukturu, koje se pri kretanju oslobađaju u malim količinama [67]. Ovakvi novi ležajni materijali s akceptiranim gubitcima uslijed trenja, rabe se u direktnim pogonima gdje preciznost i nosivost nije prioritetna, a svojom povoljnom cijenom i radom bez podmazivanja nalaze sve veću primjenu u pogonskim mehanizmima tehničkih sustava niže zahtjevnosti.

Valjni ležaji danas imaju najčešću primjenu u direktnim pogonima pogonskih mehanizama pri nižim i srednjim brzinama vrtnje uz dobru krutost i izvrsnu nosivost, moraju imati i dobar stupanj korisnog djelovanja uz neosjetljivost na udarce i trešnje u radu. Osjetljivost na nečistoće i prašinu u radu imaju za posljedicu dodatne tehničke zahtjeve na brtvljenje ležaja. Križni valjni ili radijalno-aksijalni valjni ležaji imaju veliku nosivost zbog linijskog kontakta valjnog tijela po stazi valjanja. Kuglični su ležajevi jeftiniji, ali budući da imaju točkasti kontakt, njihova je nosivost i krutost smanjena u odnosu na križne valjkaste ležajeve, te je stoga njihova primjena ograničena na manje nosivosti. Kako kuglični ležaji nisu prezategnuti njihova radijalna odnosno aksijalna zračnost definirana iz geometrije, mora se dodatno analizirati za svaki pojedini slučaj ugradnje, jer dolazi do smanjene točnosti pozicioniranja uz povećanu grešku ponovljivosti. Pored toga nastali ekscentricitet rotora prema statoru ima dodatno djelovanje na izbalansiranost magnetnog toka, čime dolazi do povećane valovitosti momenta vrtnje.

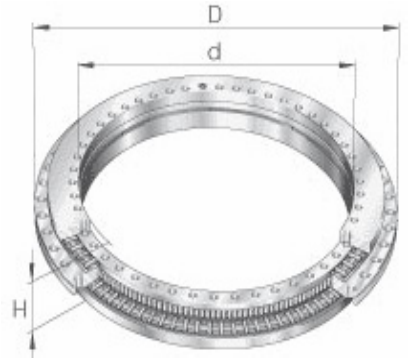
Aksijalno radijalno valjkasto uležištenje, slika 5.5, /20/, /21/ je najčešće korišteno uležištenje u visokomomentnim motorima. Njegov oblik, veliki promjer i mala ugradbena visina, prilagođena je ugradnji u rotacione tehničke sustave (okretne stolove, planske ploče, mjerne i ispitne uređaje) koji zahtijevaju preuzimanje aksijalnog i radijalnog opterećenja, te momenata prevrtanja[23] u svim smjerovima uz povećanu točnost.

Osnovna karakteristika ovog uležištenja je velika radijalna i aksijalna krutost uz povećanu nosivost, te visoka točnost vrtnje u odnosu na ostale tipove valjnjih ležaja (standardna isporuka je u tolerancijskoj klasa P4 prema DIN 620). Aksijalni dio izveden je iz dva nasuprotna valjkasta aksijalna ležaja, koji su na unutarnjem i vanjskom prstenu tako podešeni, da se kod pritezanja vijcima u cjelinu postiže ciljano aksijalno predzatezanje radi poništenja aksijalne zračnosti. Radijalni dio ležaja je tvornički izrađen s dosjednom prisnošću, čime se poništava zračnost i u radijalnom smjeru. Da bi se dobio kruti spoj s

[23] Kippmoment.

priključnom konstrukcijom, vijci za pričvršćenje moraju biti odabrani i montirani sukladno preporuci proizvođača.

Moment trenja aksijalno radijalnog valjkastog ležaja je u prvom redu ovisan o aksijalnom predzatezanju. Rastuće predzatezanje uzrokuje i rastući moment trenja ležaja koje kod nekih ležaja i velikih promjera može dostići vrijednosti i do 300 Nm. Radi toga je kod montaže osobito važno paziti na pritegnutost vijaka. Odstupanje od potrebnih momenata pritezanja vijaka, djeluje na visoko rasipanje predzatezanja i momenta trenja ležaja.



Slika 5.5 Aksijalno-radijalni valjkasti ležaj tip: YRT /20/

Hidrostatički ležaji, zračni (aerostatički) ležaji i magnetski ležaji nude najvišu mehaničku preciznost, ali cjenovno nisu povoljni u prvom redu zbog vrlo skupe prateće opreme koja je neizostavni dio uležištenja. Imaju brojne prednosti u odnosu na prethodne ležajeve među kojima su najvažnije: bezdodirni pogon koji eliminira trošenje i trenje. Budući da rotacioni dijelovi zapravo *„lebde“* nad precizno obrađenom površinom, njihovim je korištenjem moguće postići mikronske geometrijske točnosti. Dodatna prednost ovih uležištenja je sljedeća:

- nema momenta trenja zbog izostanka statičkog trenja;
- vrlo visoka ponovljivost pozicije;
- nema trošenja u radu čime se omogućava potpuno iskorištenje performansi stroja;
- tih i miran rad (valjkasti i kuglični ležajevi pri radu proizvode buku i vibracije);
- ekstremno visoke brzine.

5.3.2 Davač pozicije

Neophodan za rad visokomomentnog motora direktnog pogona je mjerni sustav, kojeg čini davač pozicije kutnog položaja rotora [68], [69]. Iz precizno izmjerenog kutnog

položaja određuje se i brzina vrtnje. Izvedba mjernih sustava prilagođena je direktnoj ugradnji od najmanjih pogonskih uređaja (mjerni sustavi s integriranom spojkom aksijalno ili radijalno montirani), do najvećih pogonskih uređaja promjera nekoliko metara (mjerni sustavi s fleksibilnom mjernom trakom), slika 5.6.

Kod direktnih pogona primjenjuju se različiti principi mjerenja od magnetskih, induktivnih, optičkih ili drugih principa, čija primjena ovisi o traženim karakteristikama i zahtjevima, tablica 5.1. Kapacitivni mjerni sustav danas još nema neku značajniju primjenu, dok optički mjerni sustav s visokom razlučivosti i točnosti, iako ekonomski nepovoljan nalazi primjenu u direktnim pogonima. Davači pozicije na magnetskoj i induktivnoj osnovi imaju nižu razlučivost i točnost, ali su stoga ekonomski povoljniji od optičkih davača.

Dakle, kvaliteta direktnog pogona je jako ovisna o izboru mjernog sustava. Optički davači pružaju najveće prednosti u pogledu točnosti, stabilnosti brzine i termičkog ponašanja direktnog pogona, te su stoga najčešći izbor za ugradnju u takve pogone [11], [70]. Direktni pogoni zahtijevaju davače pozicije s kratkim periodima između signala i visokom kvalitetom signala.



Slika 5.6 Davači pozicije za primjenu u direktnim pogonima /22/

Mjerni princip	Hallova sonda	Magneti	Induktivni	Geometrijska optika	Difrakcijska optika
Max. točnost	± 250 μm/m	± 10 μm/m	± 5 μm/m	± 2 μm/m	± 0,1 μm/m
Korak podjele	10 – 70 mm	0,5 – 4 mm	1 mm	0,02 – 0,1 mm	0,0005 – 0,04 mm
Perioda sin-cos signala	10 – 70 mm	0,5 – 4 mm	0,04 – 1 mm	0,02 – 0,1 mm	0,0001 – 0,001 mm
Max. brzina	10 m/s	10 m/s	20 m/s	10 m/s	1,2 m/s
Max. mjerna duljina	neograničeno	90 m	30 m	30 m	3 m
Prašina, ulje, rashladno sredstvo	neosjetljiv	osjetljiv	neosjetljiv	osjetljiv	osjetljiv
Željezo, magnetična prašina	neosjetljiv	osjetljiv	neosjetljiv	osjetljiv	neosjetljiv
Magnetsko polje	osjetljiv	osjetljiv	neosjetljiv	neosjetljiv	neosjetljiv
Kvaliteta regulacije	mala do srednja	srednja	srednja do visoka	visoka	vrlo visoka

Tablica 5.1 Usporedba različitih mjernih principa primjenjivanih u direktnim pogonima

Danas se obično koriste visokorazlučivi inkrementalni davači pozicije s harmoničkim izlaznim signalom tzv. SIN-COS davač i dodatnim tragom apsolutne vrijednosti (npr. ECN 1313 /22/ i sl.). Informacija o apsolutnoj vrijednosti u pravilu je potrebna za rad sinkronih strojeva s uzbudom putem trajnih magneta, budući za egzaktno strujno napajanje pogonskog motora, mora biti poznat apsolutni kut rotora s magnetnim polovima u odnosu na namot statorskog paketa. Izlazni signal pozicije iz davača pored toga što daje apsolutnu poziciju, koristi se i u regulacijskom sustavu za regulaciju pozicije, regulaciju brzine vrtnje i regulaciju fazne struje tj. momenta vrtnje elektromotora. Da bi se dobila što točnija informacija o brzini vrtnje kod visokomomentnih motora, izlazni harmonički signal davača pozicije vodi se na interpolacijski električni sklop koji množi broj impulsa davača i do 1024 puta (npr. IK121 kartica za PC računalo /22/).

Ako je iz bilo kojih razloga potrebna zamjena mjernog sustava na pogonskom motoru, potrebno je kalibrirati novi. Uobičajeno je da za tu svrhu pogonski stroj mora biti u rasterećenom stanju tzv. *„praznom hodu“.*

Kod liftova, primjerice, treba rasteretiti nosivo uže [70]. To je ogroman trošak, pa kod modernih frekvencijskih pretvarača sve češće nailazimo na opciju „*određivanja apsolutnog položaja*“ u stanju mirovanja pogona (čvrsto zakočeno stanje). Moderniji pretvarači idu i korak dalje i koriste različite jalove otpore motora za utvrđivanje kuta, te ne zahtijevaju signal apsolutne vrijednosti u davaču. Time im je dostatan visokorazlučivi SIN-

COS davač. Tako zamjena mjernog sustava postaje zahvatom koja ne treba zahtjevne procedure i postupke.

5.3.3 Hlađenje visokomomentnog motora

Kod direktnih pogona s visokomomentnim motorom nastaju električni i mehanički gubici koji dovode do zagrijavanja primarnog i sekundarnog dijela motora, uležištenja i ostalih mehaničkih dijelova u sustavu. Vrste gubitaka na pogonskom elektromotoru su gubici na bakru, gubici uslijed vrtložnih struja, gubici zbog histereze, kao i mehanički gubici uslijed trenja koji pri gibanju nastaju u uležištenju. Unos topline kod visokomomentnog motora ima neposredan utjecaj na točnost, budući je motor često sastavni dio tehničkog sustava. Prisilnim (aktivnim) hlađenjem pogonskog motora povećava se dopušteni trajni učinak motora (zaštita od pregrijavanja), poboljšava vijek trajanja sustava za vođenje, te povećava točnost pozicioniranja direktnog pogona.

Sustav hlađenja visokomomentnih motora temelji se istovremeno na prijenosu topline toplinskom vodljivošću (npr. s bakrenog namota na stator, te na postolje uređaja), prijelazu topline s površine motora na zrak ili rashladni medij i toplinskim isijavanjem - zračenjem.

Najjednostavnija varijanta za hlađenje visokomomentnog motora je kombinirana primjena odvođenja topline prirodnom konvekcijom i toplinskim isijavanjem. Na taj način, sniženje temperature je određeno prvenstveno veličinom rashladne površine, koju je kod istog volumena konstrukcije moguće bitno povećati dodatnim rashladnim rebrima. Daljnje poboljšanje moguće je postići pomoću ventilatora što se često koristi kod standardnih elektromotora.

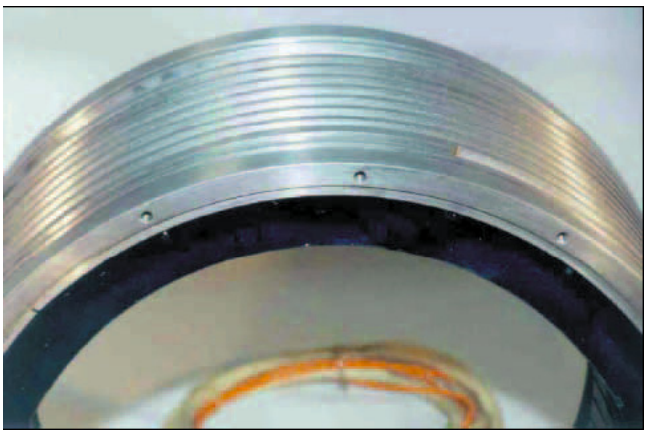
Iako prema [71], kod hlađenja direktnih pogona s visokomomentnim motorom, udio hlađenja isijavanjem i toplinskom vodljivošću iznosi 10-22% ukupnih gubitaka pri nazivnom momentu vrtnje, zbog jednostavnosti proračuna rashladnog sustava, njihov utjecaj se može zanemariti.

Kod prisilnog hlađenja visokomomentnih motora direktnih pogona, rashladna tekućina ispunjava kanale (najčešće demineralizirana voda), koji se nalaze neposredno iza ili u magnetnom polju primarnog dijela motora, slika 5.7. Budući se toplina odvodi neposredno kod toplinskog izvora, a rashladna tekućina se odlikuje vrlo dobrim osobinama prijenosa topline (voda ima visoku specifičnu toplinu C_p= 4.19 kJ/kgK), ovom metodom hlađenja moguće je postići najviše trajne učinke uz mali protok, a time i mali poprečni presjek kanala. Dodatno hlađenje tekućine rashladnim agregatima, omogućuje aktivnu regulaciju temperature, čime se negativni utjecaji na točnost pozicioniranja[24] (otklon uslijed

[24] Analizom na direktnom pogonu CNC okretnog stola obradnog centra [71] vanjski prsten radijalno-aksijalnog ležaja čvrsto je povezan s kućištem (unutrašnjeg promjer Ø 270 mm, te debljine paketa 20 mm) uslijed dodatnog zagrijavanja u radu pri prijenosu topline putem statora za 6 K prema unutrašnjem prstenu ležaja, proizlazi radijalno odstupanje od 0.019 mm, što odgovara mogućem aksijalnom pomaku osovine od 0.003 mm.

temperature), toplinsko produljenje (termičko širenje) i vijek trajanja ležaja održavaju u potrebnim granicama.

Kod metode hlađenja komprimiranim zrakom, rashladnim kanalima struji zrak umjesto rashladne tekućine. Ova vrsta hlađenja predstavlja jeftiniju alternativu za produljenje vijeka trajanja osnovnog dijela, osobito kod manjih ili srednjih područja učinka, odnosno kod intermitirajućeg rada uz postojeću infrastrukturu. Putem regulacije tlaka i protoka zraka, u usporedbi s hlađenjem tekućinama, moguće je u ograničenom opsegu utjecati na temperaturu visokomomentnog motora. Povećanje trajnog učinka koje se može postići zračnim hlađenjem bitno je manje nego kod hlađenja tekućinama.



Slika 5.7 Visokomomentni motor s rashladnim plaštom

U svrhu pridržavanja visoko postavljenih zahtjeva na kvalitetu i učinak današnjih direktnih pogona, neophodno je gubitak snage, odnosno u radu razvijenu toplinu u potpunosti apsorbirati i odvesti prikladnim sustavom hlađenja. Kako je vidljivo, poznavanje podataka o učinku rashladnog sustava i onoga što iz njih proizlazi uz pridržavanja konstantne temperature direktnog pogona odnosno cijelog tehničkog sustava, odlučujući su za funkciju pogona.

5.3.4 Točnost pozicioniranja

Pojam točnosti pozicioniranja ili pojam točnosti, slika 5.8, kod električnih pogona različito se koristi, ali je jednoznačno definiran u odgovarajućim normama za razna područja primjene [72], [73], [74].

Podaci koji se odnose na točnost direktnih pogona uzimaju se iz DIN EN ISO 9283 "Industrijski roboti - karakteristične brojke za učinak i pripadajuće ispitne metode[25]" [72]. Kod činjenica vezanih za točnost direktnih pogona, mora se uočiti razlika između gibanja od

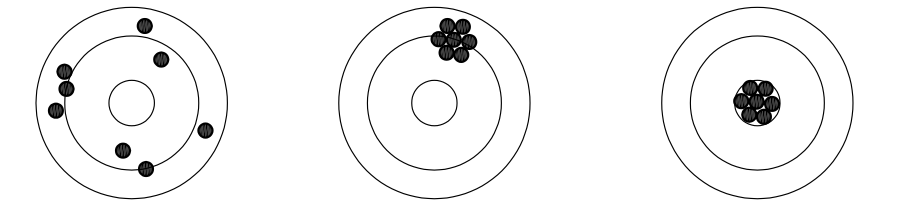
[25] Industrieroboter – Leistungkenngrößen und zugehörige Prüfmethoden.

točke do točke i gibanja po određenoj putanji. Pritom točnost putanje određuje kolike su greške za neki direktni pogon nastupile u odnosu na traženu putanju.

Za točnosti gibanja točka-točka važne su sljedeće definicije:

- točnost položaja je definirana kao srednje odstupanje stvarnog položaja od željenog položaja;
- točnost ponavljanja položaja definirana je kao srednja širina odstupanja položaja s kojom se neki položaj, na koji je već izvršeno pozicioniranje, može ponavljati. Podatak o točnosti ponavljanja pozicije položaja mjerodavan je samo ako se istovremeno navede i vrijeme stabiliziranja položaja (vrijeme između prvog dosizanja prozora točnosti ponavljanja položaja i konačnog zadržavanja). Točnost ponavljanja uvijek je bolja od točnosti pozicioniranja, u koju primjerice ulazi i točnost sustava za mjerenje položaja.

Gore navedeni podaci vezani za točnost ne sadrže utjecaj otklona položaja uslijed porasta temperature. Otklon karakterističnih veličina pozicije položaja pokazuje razliku između hladnog i toplog pogona. Nadalje treba voditi računa o tome da podatak o točnosti položaja ne uzima u obzir ponavljano uključivanje i isključivanje sustava. Stoga osobito treba uzeti u obzir utjecaj referenciranja sustava kod primjene inkrementalnih mjernih sustava. Za postizanje visoke točnosti položaja, čak i kod višekratnih uključivanja i isključivanja tehničkog sustava, potreban je referentni signal visoke točnosti. Inače ona ovisi uglavnom o točnosti uključenja korištenog inicijatora.



Slika 5.8 Točnost pozicioniranja i ponovljivosti pozicije pogona

5.3.5 Krutost direktnih pogona

Kod direktnog pogona od posebnog je značaja prilagodljivost regulacijskog sustava nastalim poremećajima i devijacijama u radu [69]. Zbog nedostatka mehaničke redukcije masa tromosti i malih sila trenja, ubrzanje je bitno veće nego kod standrdnih pogona. Kod poremećaja u radu razlikujemo statičku i dinamičku torzijsku krutost.

Statička krutost C_{stat} direktnog pogona s visokomentnim motorom usporediva je s torzijskom krutošću mehaničke opruge, a definirana je kutnim otklonom opruge uslijed opterećenja. Kod direktnih pogona statička krutost predstavlja odnos između trajne najveće obodne sile $F_{O,max}$ motora i razlike inkrementa položaja Δs_{ink} signala davača pozicije:

$$C_{stat} = \frac{F_{O,max}}{\Delta s_{ink}} \tag{5.1}$$

Za ispitivanje statičke krutosti kod direktnog pogona, regulirani visokomomentni motor mora se postaviti u čvrsti položaj tj. zakočiti. Do trajne obodne sile $F_{O,max}$ rotor motora se može regulatorom brzine držati na željenom položaju, unutar prozora tolerancije inkrementa položaja Δs_{ink}. Do postizanja najmanje sile F_{ink}, koja zakreće osnovni dio motora upravo za inkrement položaja Δs_{ink}, djeluje samo mehanička vlastita elastičnost između točke hvatišta poremećajne sile i senzorne glave mjernog uređaja pozicije. Ova vlastita elastičnost reducira teorijski dostižnu statičku krutost C_{stat}.

Dinamička krutost C_{din} izračunava se iz odnosa amplitude skokovite promjene poremećajne sile i time izazvanog maksimalnog odstupanja položaja rotora motora u zatvorenom regulacijskom krugu. Maksimalno odstupanje od željenog položaja opada s rastućom dinamikom regulacije. Prema [69], približno vrijedi za dinamičku krutost:

$$C_{din} \approx k_{ink} \tag{5.2}$$

U biti se dinamička krutost utvrđuje pomoću koeficijenta integracije regulatora brzine k_{ink}. Na taj način nastaje tijesna međuovisnost između dinamičke krutosti nekog direktnog pogona i rezervne vremenske konstante frekvencijskog regulatora pogona. Krutost direktnog pogona tim je veća, što je manja rezervna vremenska konstanta zatvorenog regulacijskog kruga.

5.3.6 Identifikacija i kompenzacija valovitosti momenta vrtnje

Trajni nedostatak sinkronih motora s permanentnim magnetima je neujednačenost razvijenog momenta vrtnje, koji se periodički mijenja promjenom kutne pozicije rotora tijekom rotacije. Problemu neravnomjernosti momenta vrtnje treba posvetiti dodatnu pažnju [11], [12], [75], [76], jer se posljedica očituje u kolebanju brzine vrtnje, koja, iako malog iznosa, pogoršava performanse pogona u zahtjevnim primjenama.

Efekti valovitosti momenta vrtnje su posebno nepoželjni u zahtjevnim mehaničkim primjenama poput CNC alatnih strojeva. Pored toga neravnomjernost momenta vrtnje može izazvati rezonanciju u mehaničkom dijelu pogonskog sustava, proizvesti dodatnu buku, a kod primjene u alatnim strojevima ostaviti vidljive tragove obrade na fino obrađenim površinama.

Rezultirajuća valovitost momenta vrtnje prouzročena je promjenama distribucije magnetske indukcije u zračnom rascjepu, greškama u izvedbi namota statora, te promjenjivom otporu magnetskog toka zračnog raspora nastalih uslijed statorskih utora.

Frekvencijski pretvarač, čiji je zadatak transformacija trofaznog ulaznog izmjeničnog napona u napon napajanja motora uz podešavanje napona unutar određenih granica po visini i frekvenciji, također pridonosi valovitosti momenta vrtnje, prvenstveno zbog vremenskih harmonika u strujnom signalu i vremenski promjenjivom slijeđenju između upravljačkog i stvarnog toka. Prema [77] *„ne postoji način koji u potpunosti može eliminirati prisutnost ovih brzih prijelaza momenta vrtnje u svim radnim uvjetima*“.

Motori s permanentnim magnetima i uzbudom putem trajnih magneta grupiraju se u dvije osnovne skupine u ovisnosti o valnom obliku inducirane elektromotorne sile, koji može biti trapezoidnog ili sinusoidnog oblika.

5.3.6.1 Trapezoidni EMF[26] motori

Učvršćeni i aksijalno paralelno poravnati trajni magneti u obliku magnetskih traka na površini rotora formiraju individualne polove motora. Gustoća magnetnog toka u zračnom rascjepu ispod polova je konstantna, dok se mijenja između dva pola tj. između susjednih polova prolazi kroz nulu kako bi se postigao suprotni smjer polja između dva susjedna pola. Idealni bi elektromagnetski tok trebao biti raspoređen trapezoidno u namotu statora s okomitim signalom fazne struje kako bi stvorio moment vrtnje konstantan i neovisan o kutnom položaju rotora s trajnim magnetima. U realnim izvedbama rubni dijelovi elektromagnetskog polja na krajevima polova uzrokuju devijacije od idealnog trapeznog oblika elektromagnetskog toka koje se upotpunjuju strujama kroz stator koje nisu idealno okomite na magnetsko polje. Komutacija između faza statorskih namotaja zahtjeva konačne vremenske intervale tijekom kojih se značajno mijenja veličina momenta vrtnje. Pad veličine momenta vrtnje može dostići do 25% nazivnog momenta [78]. Promjena momenta vrtnje događa se periodički u sinkronizaciji s brzinom vrtnje rotora.

5.3.6.2 Sinusoidni EMF motori

Sinusni oblik distribucije gustoće magnetskog toka oko zračnog raspora je teško postići kod motora s trajnim magnetima. Pritom je važno naglasiti, da je rezultirajući magnetski tok i u ovisnosti o izvedbi statorskog namota. Njegova prostorna raspodjela se može podesiti odgovarajućom geometrijom namota statora, tako da se postigne sinusoidni oblik vala induciranog napona sa zadovoljavajućom točnošću. Za razliku od trapezoidnih motora s trajnim magnetima, ovi motori rade na principu okretnog magnetskog polja, te stoga zahtijevaju sinusoidni valni oblik faznog napona i struje u statorskom namotaju. Odstupanje magnetnog polja rotora izaziva kolebanje momenta vrtnje malog intenziteta. Dodatno postoje i harmonijske komponente momenta vrtnje koje su rezultat viših harmonika i distorzije aktualnog oblika vala.

[26] Electromagnetic Flux

Sveukupna valovitost momenta vrtnje ovih pogonskih motora je znatno manja nego kod trapezoidnih motora, te im je stoga dana prednost u pogonima kod kojih se zahtijevaju vrhunske performanse.

5.3.6.3 Harmonici u statorskom prorezu

Drugi uzrok nastajanja harmonika vrtnje je varijabilna magnetska reluktancija u zračnom rasporu, koja se periodički mijenja kada utor statora prolazi pored rubova magneta rotora. Naginjanjem statorskih utora može se efikasno smanjiti valovitost momenta vrtnje. Zaostale pojave pulzacije momenta vrtnje događaju se pri frekvenciji, koja se povećava s kutnom brzinom vrtnje rotora. Harmonici momenta vrtnje niže frekvencije rezultat su interakcije neizbalansirane magnetizacije individualnih polova rotora s ekscentricitetom rotora. Prema [79] ekscentricitet rotora je povezan s greškama koaksijalnosti uslijed tehnologije izrade odnosno s radijalnom zračnošću ležaja.

Harmonici magnetnog toka mogu dostići vrijednost 3-4% nazivnog momenta vrtnje, dok je kod reluktantnih harmonika oko 3%. Raspored harmonika momenta može se znatno razlikovati i pri usporedbi s identičnim strojevima iz iste proizvodne serije. Raspored harmonika zračnog procjepa i statorskih proreza mijenja se s temperaturom, odnosno proces ide reverzibilno u slučaju trajnih magneta NdFeB ili nakon preopterećenja strujom.

S obzirom da se kolebanje brzine vrtnje zbog niske frekvencije valovitosti momenta vrtnje automatski kompenzira djelovanjem upravljačkog sustava, područje kritičnih harmonika momenta vrtnje je tipično od 100 Hz do 2 kHz. Harmonici viših frekvencija se povoljno poništavaju inercijom rotora.

5.3.6.4 Vremenski harmonici

Vremenski harmonici su uzrokovani distorzijama oblika vala struje u frekvencijskom pretvaraču. Za smanjenje njihovog efekta sklopna frekvencija pretvarača mora biti visoka, a u modulaciji se trebaju izbjegavati podharmonijske struje [80].

5.3.6.5 Pregled metoda za smanjenje valovitosti

Valovitost momenta vrtnje u sinusoidnim motorima s trajnim magnetima može se smanjiti primjenom specifičnih raspodjela statorskih namotaja. Odgovarajuća širina magnetskih polova i profil zračnog raspora ispod polova imaju utjecaj na prostornu distribuciju magnetskog toka, te dovodi do smanjenja neželjene valovitosti momenta vrtnje [81].

Varijacije momenta vrtnje niske frekvencije se pouzdano eliminiraju djelovanjem regulacijskog sustava. Harmonici momenta vrtnje viših frekvencija mogu se u principu kompenzirati generiranjem inverzne komponente momenta vrtnje odgovarajućom modulacijom struje statora. Struja kompenzacije može se dobiti na različite načine, a većina postojećih rješenja zasniva se na identifikaciji valnog oblika inducirane elektromotorne sile motora.

Drugi pristup je zasnovan na Fourier-ovoj analizi jednadžbe momenta vrtnje iz koje se dobivaju potrebni izrazi tražene struje kompenzacije ili na Fourier-ovoj analizi povratnog elektromagnetskog toka oblika vala. Izračuni se vrše *off–line* temeljem podataka uređaja mjerenih na ispitnom stolu. Projektirana kompenzacija vrijedi samo za taj pogonski stroj.

Za praktičnu primjenu implementacije potrebni su vrlo brzi regulatori struje, jer se frekvencije harmonika momenta vrtnje povećava proporcionalno s brzinom vrtnje. Konvencionalni PI regulatori nisu pogodni za pokrivanje cijelog područja frekvencija vala uslijed nedostatne brzine djelovanja ovih regulatora. Primjenom tehnike predupravljanja nastoje se izbjeći ograničenja brzine odziva PI regulatora struje. Predupravljački signali se čitaju iz memorijskih tablica [82].

Postojeće metode ostavljaju sljedeće probleme nerješivima:

1. Harmonici momenta vrtnje izazvani statorskim utorima i ekscentričnošću rotora ne odražavaju se na inducirani napon i stoga ih je teže kompenzirati.

2. Tolerancija proizvodnje istih strojeva iz iste proizvodne serije će se razlikovati po svojim induciranim naponima.

3. Svojstva trajnih magneta variraju temperaturom i njihova magnetiziranost može se promijeniti uslijed reakcije armature u određenim slučajevima preopterećenja.

4. Kompenzacija visokofrekvencijske valovitosti momenta vrtnje zahtjeva teško izvedivo proširenje granične frekvencije sustava regulacije struje motora.

6. VERIFIKACIJA KONSTRUKCIJSKIH ZNAČAJKI POGONSKIH SUSTAVA S VISOKOMOMENTNIM MOTORIMA

6.1 Osnovni izbor pogona

Za donošenje odluke o izboru vrste pogona, a da se ne podlegne marketingu proizvođača pogona, moraju se usporediti sve moguće tehničke izvedbe koje imaju primjenu u pogonskim mehanizmima tehničkih sustava, tablica 6.1, te osnovom toga donijeti konačna odluka o izboru.

	Pogon		
Tip pogona	**Standardni pogon s mehaničkim prijenosnikom**	**Direktni pogon**	**Hidraulički pogon**
Prednosti	- visoka prilagodljivost (veliki broj varijanti) - povoljna cijena nabave - dobra / visoka iskoristivost	- kompaktna izvedba - visoka iskoristivost - vrlo dobra upravljivost s visokom dinamikom rada - mala količina ugradbenih komponenti - niska emisija buke - visoka upravljivost pogona - komfornost pogona	- visoka specifična snaga - povoljna masa i volumen uređaja - srednja do visoka emisija buke (bez hidroagregata)
Nedostatci	- nekompaktna izvedba - velika buka u radu - kompleksno održavanje - utjecaj elastičnosti i histereze u pogonu	- nije standardiziran - visoka nabavna cijena - dug rok isporuke	- loša / dobra iskoristivost - visoko vrijeme odziva - kompleksno održavanje - problemi brtvljenja

Tablica 6.1 Usporedba pogona

U današnjoj proizvodnji zadaci manipulacije zahtijevaju sve kraće i kraće cikluse pozicioniranja, dok je istovremeno cijeli tehnološki proces uvjetovan točnošću pozicioniranja s ponovljivosti pozicije. Prema ovim zahtjevima, ograničavajući faktori primjene pogona s mehaničkim prijenosnikom su ekonomično rješenje u pogledu elastičnosti, zračnosti ili istrošenja uslijed habanja u radu. Mehaničko povezivanje pogona s/bez mehaničkog prijenosnika s elementima prijenosa gibanja (spojka, vratilo, zupčasti remen, lanac, i dr.) u niz, manifestira se preko deformacija pojedinih elemenata, čime se ograničava područje dinamike regulacije. Proizvođači visokomomentnih motora nude sasvim drukčija, "*direktna*" rješenja, pri čemu pogonski elementi omogućavaju kruto povezivanje s radnim članom [83], [84].

Princip djelovanja visokomomentnih motora zasniva se na primjeni rotacijskog magnetskog polja visoke gustoće toka između statorskog dijela i rotora izvedenog s trajnim magnetima legiranih rijetkim zemljama-lantanidima (npr. NdFeB). Cilindrična forma oblikovanja statorskog paketa limova s namotima i rotorskog paketa s trajnim magnetima[27] u kombinaciji s visokim brojem pari polova daje osnovnu značajku, visoki specifični moment vrtnje (u trajnom radu 2.2 - 2.7 Nm/kg, odnosno 8.3 - 9 Nm/kg za vršne okretne momente) i pri niskim brzinama vrtnje uz dodatne konstrukcijske značajke pogona.

Dimenzioniranje uz odabir visokomomentnog motora u osnovi se *ne razlikuje od dimenzioniranja standardnih pogona.* Većina proizvođača visokomomentnih motora daju na raspolaganje određene tehničke karakteristike motora koje su mjerodavne pri međusobnom razmatranju i uspoređivanju pojedinih tipova motora, a sve u cilju dobrog marketinga, da kupac na kraju bude zadovoljan svojim izborom. Iako svaki konstruktor za prvi korak u odabiru pogonskog motora, ustanovljuje potrebni moment vrtnje i brzinu vrtnje koji će biti potrebni u primjeni direktnog pogona, međutim naročitu pažnju treba obratiti parametrima koji su povezani s generiranjem topline u visokomomentnom motoru, jer producirana toplina od strane motora mora biti odvedena sustavom hlađenja kako bi se izbjeglo zagrijavanje elemenata i sklopova motora i cijelog pogonskog sustava.

Kod uspoređivanja dvaju ili više različitih visokomomentnih motora istih ili različitih proizvođača, pri oblikovanju direktnog pogona, mora se oslanjati na dostupne informacije od proizvođača, među kojima je i konstanta motora [15], [85]:

$$K_{\mathrm{m}} = \frac{T_{\max}}{\sqrt{P_{\mathrm{gubCu}}}} \tag{6.1}$$

koja nam služi za usporedbu relativne iskoristivosti, a kao pokazatelj vrijednosti pojedinog motora. Ona zapravo pokazuje vezu između pogonskog momenta vrtnje i rezultirajućeg gubitka snage u bakrenim namotima statora. Ako motor ima veliku vrijednost konstante K_{m} znači da je visoko iskoristiv generator momenta vrtnje. Može se konstatirati prema tome, da konstanta motora K_{m} predstavlja najvažniji faktor kod usporedbe momenta vrtnje motora

[27] Poznati pod nazivima: sinkroni motori s permanentnim magnetima ili DC motori bez četkica.

koji su namijenjeni za primjenu u alatnim strojevima, iako proizvođači motora istu predlažu i za druge aplikacije.

Iako se u literaturi pojavljuje i konstanta momenta vrtnje K_t, koja je od presudnog značaja kod usklađivanja motorskih servopojačala, ona ne daje informaciju o iskoristivosti sustava.

Iz dobivene snaga gubitaka:

$$P_{gub} = \left(\frac{T_{ekv}}{K_m} \right)^2 \tag{6.2}$$

treba procijeniti daljnje konstrukcijske zahvate na direktnom pogonu.

6.2 Značajke direktnih pogona

6.2.1 Oblik i dimenzije

Moglo bi se reći da se tehnički najzanimljivija dodatna značajka direktnog pogona s visokomentnim motorima odnosi na njegove dimenzije. Iz kratke aksijalne duljine i relativno velikog promjera, koji je nastao „*namatanjem*“ linearnih motora na kružni vijenac uočava se u pogledu fizičkih proporcija, da istovremeno imaju vrlo veliki vanjski, ali i unutrašnji promjer, što im daje osnovni oblik tankog prstena. Analogno tome iz navedenih karakteristika proizlazi zaključak da im je masa kao funkcija promjera vrlo mala, jer se izrađuju sa šupljim rotorom čiji unutrašnji promjer omogućava niz tehničkih rješenja koja puna vratila ne mogu kao npr. provođenje pneumatskih, hidrauličkih crijeva i kabela ili smještaj davača pozicije.

Veliki unutrašnji promjer rotora visokomomentnog motora je dodatna prednost u primjeni u raznim područjima strojogradnje, jer daje veliku fleksibilnost u oblikovanju direktnih pogona pogonskih mehanizama i integraciju u viši tehnički sustav bez dodavanja prekomjernih pokretnih masa. Iz osnovne prstenaste strukture visokomomentnog motora, osnovom baze strukovnog znanja, moguće je optimalno postaviti strukturu pogona s obzirom na vođenje (uležištenje s nosačima), mehanizme povratne sprege unutar regulacijskog kruga, te radno opterećenje za određene namjene. Za dani promjer visokomomentnog motora fleksibilnost primjene je dodatno povećana dostupnošću izvedbi u nekoliko aksijalnih duljina, što dopušta konstruktoru da bira iz širokog spektra varijanti, veličina motora, kako bi zadovoljio postavljene zahtjeve za potrebnim momentom vrtnje.

Izvedenim korakom polova 10-40 mm statorskog namotaja dobivaju se konstrukcije pogodne za primjenu u realnim tehničkim sustavima, čime visokomomentni motori postaju dostupni u širokom rasponu veličina, od promjera manjih od 100 mm, pa do onih s promjerima većim od 2000 mm. Treba međutim napomenuti da se u strojogradnji (alatni strojevi, procesna oprema, pogoni transportnih uređaja) obično primjenjuju motori promjera

od 200-1200 mm. Promjeri visokomomentnih motora iznad 1200 mm se vrlo rijetko primjenjuju, a do sada najveći izvedeni promjer visokomomentnog motora od 3000 mm koristi se za pogon teleskopa.

6.2.2 Prostor ugradnje

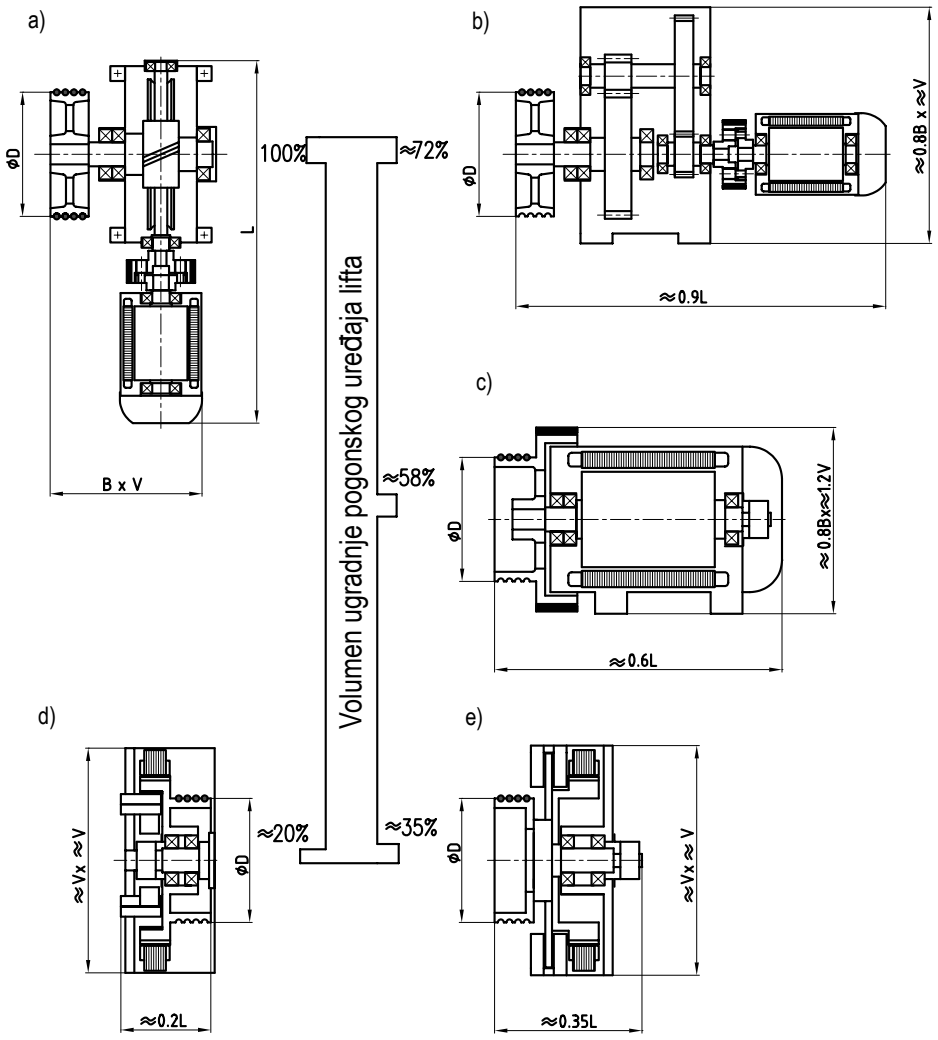
Smanjenje prostora ugradnje uz zadržavanje i moguće povećanje broja tehničkih funkcija, pogonske pouzdanosti i sigurnosti u tehničkim sustavima, nametnuto je kao dodatni zahtjev u razvoju pogonskih mehanizama. Iz područja alatnih strojeva, zahtjev na prostor ugradnje proširio se na cjelokupnu strojogradnju, gdje je već prihvaćen od vodećih proizvođači liftova.

Najbolji primjer smanjenja prostora ugradnje prikazan je na primjeru izvedbe pogonskog uređaja lifta, slika 6.1. Arhitektonskim rješenjima zgrada odnosno voznog okna nastoji se istisnuti „*klasična*“ strojarnica, a pogonski mehanizam lifta smjestiti u prostor koji ne narušava izvedbu zgrade npr. u samo vozno okno, na kabinu lifta ili u jamu voznog okna.

U 80% najčešće korištenih elektromehaničkih izvedbi, tzv. standardne izvedbe pogona s prigonom električkih liftova, pogonska užnica, mehanički pužni ili zupčanički prijenosnik, kočnica i pogonski elektromotor čine sklop koji zauzima veliki prostor ugradnje, slika 6.1a,b. Ovakva struktura određuje potrebno mjesto i način ugradnje u objektu.

Izvedba 80-tih godina 20. stoljeća sa standardnim asinkronim ili istosmjernim elektromotornim pogonom u obliku direktnog pogona, slika 6.1c, nije našla značajniju primjenu zbog velikih instaliranih pogonskih snaga, te glomaznih i skupih regulatora, iako se ovom izvedbom postiglo smanjenje mase na 40-45% mase standardnih pogona s prigonom.

U daljnjem razvoju pogonskih mehanizama cilj je postići što manju, a time i kompaktniju izvedbu sa svim elementima pogona integriranim u jednu ugradbenu cjelinu, slika 6.1d,e. Upotrebom visokomomentnih motora, osnovne karakteristike visokog pogonskog momenta pri niskim brzinama vrtnje u pogonskom mehanizmu, dobiva se šuplja forma male ugradbene duljine, unutar koje su smješteni elementi pogona (užnica i kočnica), što je dovoljan uvjet smanjenja prostora ugradnje.



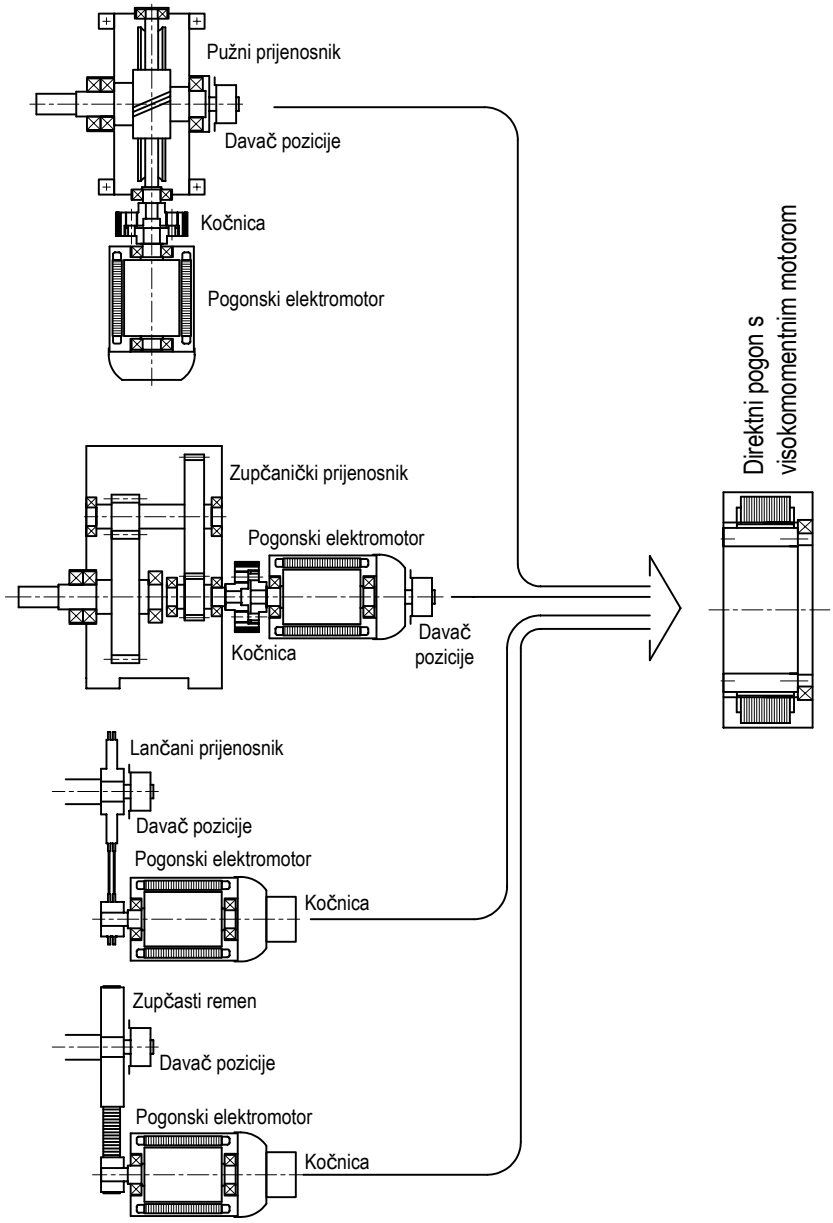
Slika 6.1 Strukture pogonskih mehanizama liftova

a), b) Standardni pogonski uređaj s prigonom c) Direktni pogon sa standardnim asinkronim elektromotorom s $p \geq 10$ frekvencijski reguliran d), e) Direktni pogon s visokomomentnim motorom

6.2.3 Dinamika pogona

Visokomomentni motori su konstruirani da bi se koristili kao direktni pogoni, čime se eliminira primjena zupčaničkih, pužnih, remenskih, lančanih prijenosnika, ali i drugih prijenosnih mehaničkih elemenata, te omogućava direktno spajanje rotora motora[28] s radnim strojem, odnosno korisnim teretom u tehnološkom procesu, slika 6.2.

[28] Spoj je najčešće izveden u formi prirubničkog spoja.



Slika 6.2 Strukture konvencionalnih pogona u usporedbi s direktnim pogonom

Kako u mehaničkom lancu prijenosa momenta vrtnje nema elemenata s „*malom*“ torzijskom i fleksijskom krutošću omogućen je pogon s brzim dinamičkim odzivom bez histereze tj. kašnjenja. Torzijska - kutna krutost pogona koja je direktno povezana s radnim članom može biti ekstremno visoka $C_{tor} \geq 10 \cdot 10^6$ Nm/rad.

Značaj krutosti direktnog pogona definiran statičkom C_{stat} i dinamičkom krutošću C_{din}, poglavlje 5.3.5, povezan je uz prilagodljivost regulacijskog sustava nastalim poremećajima i devijacijama u radu. Zbog izuzimanja mehaničke redukcije tromosti masa između radnog i pogonskog člana i malih sila trenja, ubrzanje i usporenje koje nastaje u radu je znatno veće nego kod standardnih pogona s prigonom. Kako je dinamička karakteristika, poglavlje 2.5, vezana za vrijeme uspostave momenta vrtnje u motoru, u slučaju poremećaja, bitnu ulogu igra i frekvencijski pretvarač. Vrlo mala vremenska električna konstanta u većini danas razvijenih električnih sustava je manja od 3 ms, što daje brzi dinamički odziv momenta vrtnje (ili raspoloživa hidraulička energija iz hidroakumulatora) s velikim ubrzanjima i usporenjima, uslijed povećanog poteznog momenta $T_{max} \approx 3T_N$.

Za usporedbu dinamičkih karakteristika potezni moment visokomomentnog motora je 2.5 - 4.5 puta veći od poteznog momenta vrtnje asinkronog motora p=2 iste snage, čime se osigurava tražena preopteretivost u radu.

Nadalje visokomomentni motori, za razliku od hidrauličkih rješenja pogona s radijalno klipnim hidromotorima, imaju veću dinamiku, premda im je vlastiti moment tromosti rotacionih masa zbog velikog promjera rotora relativno velik. Vrijeme ubrzanja od stanja mirovanja do radne brzine vrtnje, uz uzimanje u obzir momenta tromosti opterećenja s radnim momentom, nalazi se u području 5-20 ms i usporedivo je s onima kod standardnih servo-pogona. Visoka dinamika direktnog pogona, a time i kraće vrijeme ciklusa gibanja uz pozicioniranje u tehnološkom procesu ima za posljedicu povećanje produktivnosti, koja se dodatno može uvećati istovremenim radom više „*osovina*“ [5].

6.2.4 Točnost pozicioniranja s ponovljivošću

Kod primjene standardnih mehaničkih prijenosnika u reguliranim pogonima točnost pozicioniranja vezana je uz točnost kružnog prenošenja[29] cijelog lanca unutar prijenosa momenta vrtnje odnosno informacije pozicioniranja.

Naročito veliki nedostatak standardnih prijenosnika je ponovljivost pozicije pri reverziranju rada uslijed nastale zračnosti i histereze u elementima tehničkog sustava. Prednost primjene direktnih pogona dolazi do izražaja jedino ako je rad visokomomentnog motora, sustava uležištenja i davača pozicije ispravno usklađen, jer direktni pogoni postavljaju visoke zahtjeve na točnost izrade mehaničkih dijelova, osnovnu strukturu velike krutosti, te kvalitetu i oblik pozicijskog signala. Dakle, efikasnost direktnog pogona je jako ovisna o izabranoj točnosti davača pozicije, koji je direktno ugrađen na pogonski odnosno radni član.

[29] Točnost kružnog prenošenja mehaničkog prijenosnika prvenstveno je povezana s kružnom zračnošću ozubljenja. Kod prijenosnika opće namjene moguće je ostvariti kružnu zračnost od 0.015-0.050 mm po stupnju prijenosa, što daje grešku kružnog prenošenja od 5-12 arcmin, što nije dovoljno precizno za regulirane pogone. Smanjenjem kružne zračnosti <0.010 mm cijena mehaničkog prijenosnika dvostruko raste. Ukupna greška pozicioniranja prijenosnika ovisi također i o elastičnim deformacijama elemenata u sustavu kao deformacijama zubi zupčanika u zahvatu, uvijanju i progibu uslijed savijanja vratila, elastičnosti uležištenja, uvijanju spojke i deformacijama kućišta.

Međutim, naročitu pažnju treba posvetiti pravilnom tehnološkom oblikovanju uležištenja, poglavlje 5.3.1, koje može unijeti značajne greške pozicioniranja[30] unutar sustava, što se može dodatno nepovoljno manifestirati na rad pogona, posebno na ponovljivost pozicije koje neće biti unutar propisanih zahtjeva [72], [73], [74].

Da bi se osjetile sve prednosti visokomomentnih motora sustav mjerenja i regulacije mora udovoljiti visokim zahtjevima. Krutost direktnih pogona, poglavlje 5.3.5, uglavnom ovisi o identifikaciji stvarne pozicije rotora, budući da davač pozicije bitno više utječe na kvalitetu rješenja pogona no što je to slučaj u standardnim konstrukcijskim rješenjima pogona s prigonom. Stoga upotreba mjerača broja okretaja, čak kada su i u visokopolnoj izvedbi, u praksi često ne dovodi do zadovoljavajućih rezultata. Uslijed njihovog velikog broja perioda po okretaju rotora, ovdje su se pokazali prikladniji davači pozicije tipa sin-cos s interpolacijom pozicije.

Optički mjerni davači, tablica 5.1, dali su najbolje rezultate točnosti kutnog pozicioniranja koja može iznositi unutar $\pm 0.0005^0$. Iako su zbog tehnologije izrade ograničeni dimenzijama i pored toga što su vrlo skupi, nalaze veliku primjenu kod zahtjevnih pogona.

Sustavi s magnetskim principima mjerenja, iako ne postižu višu točnost pozicioniranja od $\pm 0.005^0$, našli su primjenu u manje zahtjevnim sustavima u težim uvjetima rada jer nisu podložni utjecaju onečišćenja. Daljnja je prednost međutim što se proizvode s unutrašnjim promjerima po zahtjevu kupca, odnosno razvijene duljine do 90 m. Ukoliko zahtjevi porastu, preporuča se uporaba dodatnog senzora ubrzanja. Time se povećavaju troškovi nabave ali i trošak puštanja u rad, a stvara se i dodatni izvor eventualne pogreške. Na kraju će za odluku o korištenju određenog sustava biti presudni zahtjevi u primjeni pogona, od slučaja do slučaja.

6.2.5 Valovitost momenta vrtnje

Kod jeftinije izvedbe direktnog pogona s visokomomentnim motorom korisnik visoki specifični moment vrtnje često plaća povećanom valovitošću momenta. Ako se pritom radi samo o visokom momentu vrtnje, to više nije važno. Međutim, ako se traži ravnomjeran hod pogonskog mehanizma u zahtjevnim pogonima, tada treba ili izmijeniti oblikovanje motora ili treba u frekvencijskom regulatoru unijeti posebne algoritme koji omogućavaju smanjenje valovitost momenta vrtnje. Ovo drugo je troškovno povoljnija varijanta, pa se tome teži u praksi.

Razloge valovitosti momenta vrtnje, poglavlje 5.3.6, nije potrebno dodatno objašnjavati, ali konstruktor i korisnik, moraju voditi računa o veličini valovitosti koja općenito iznosi 4-5%, dok kod zahtjevnih pogona mora iznositi do 1%.

[30] Provedenim mjerenjem na pogonu eksperimentalnog vozila, poglavlje 3.6, gdje je glavni ležaj izveden s kugličnim ležajem (oznake 16036) normalne zračnosti C0, radijalna zračnost iznosi 0.048 mm, što je unutar deklariranih vrijednosti od 0.020-0.060 mm. Uslijed radijalne zračnosti dolazi do aksijalnog pomaka prstena za 0.41mm, odnosno dolazi do međusobnog zakretanja vanjskog i unutrašnjeg prstena ležaja za 0.115^0.

6.2.6 Pouzdanost

Pouzdanost direktnog pogona s visokomomentnim motorom je vjerojatnost da u radnom vijeku proizvoda pod određenim uvjetima rada neće doći do pojave neispravnosti uslijed greške, ispada radi neispravno vođenog procesa, štete ili havarije. Kod direktnog pogona u tehničkom sustavu kad nastane kvar – neispravnost, rad sustava mora se prekinuti dok se ne otkloni kvar. Pouzdanost direktnog pogona od posebnog je značaja za održavanje [86], [87], ali i za razvoj u oblikovanju proizvoda. Da bi se u eksploataciji osigurala potpuna sigurnost u radu, bez mogućnosti da dođe do neispravnosti u radu, direktni pogon bi bio vrlo skup, prevelikih dimenzija i mase, neracionalan za eksploataciju i sl. Pri oblikovanju se preuzima određeni rizik u smislu pouzdanosti odnosno nepouzdanosti konstrukcije, radi dobivanja racionalnije izvedbe, a da se pritom ne ugrozi tehnička funkcija, struktura ili odnos s okolinom. S tim u vezi, pouzdanost je jedan od važnih pokazatelja kvalitete tehničkog proizvoda.

Pouzdanost je prijelazna pojava između potpune sigurnosti tehničkog sustava gdje nema vjerojatnosti da nastupi lom zbog velikog faktora sigurnosti i pojave sigurnog razaranja.

Pouzdanost je od višestrukog značaja i definira se na osnovi rizika nastanka nepravilnosti ograničenog broja dijelova ili podsklopova tehničkog sustava tj. havarije, odnosno loma. Određuju se na osnovi dopuštenih naprezanja ili deformacija dijelova u sustavu. Neki dijelovi se već u procesu oblikovanja predviđaju za povremenu zamjenu kao npr. brtve, ležajevi, a od drugih se očekuje potpuna sigurnost u radnom vijeku tehničkog proizvoda.

Lom uslijed zamora materijala ili lom u području vremenske čvrstoće, lom uslijed nastanka i širenja pukotina ili površinsko razaranje čija je posljedica oštećenje površinskog sloja, su kriteriji koji se moraju istražiti pri oblikovanju dijelova tehničkog sustava.

Iako u literaturi nema procjene pouzdanosti pogona s visokomomentnim motorima, prema [70] kritični dio sustava se odnosi na pouzdanost izolacije namotaja. Ako se promotri naponski impuls iz frekvencijskog regulatora, uočava se da pored ekstremne brzine prirasta napona ≥6 kV/μs, mogu dosegnuti dvostruko visinu nominalnog napona. Za izolaciju namotaja, to predstavlja ogromno opterećenje, koji se smanjuje ugradnjom u krug napajanja filtra i motorske prigušnice. Kada se pri izradi namotaja ne bi primjenjivali najmoderniji postupci impregnacije i izolacijski materijali, brzo bi dolazilo do oštećenja namota tj. pouzdanost direktnog pogona bi bila ispod dopuštene pouzdanosti strojarskih dijelova u proizvodu.

6.2.7 Buka direktnih pogona

Buka je po definiciji nelagodan zvuk, koji najčešće nastaje u tehničkim sustavima. Buci kao jednom od utjecajnijih zagađivača životne i radne sredine mora se pristupati s više aspekata. To je u prvom redu mehanizam nastajanja i izolacija buke, koji se odnosi na

razvoj tehničkih sustava, pri čemu se mora stvoriti mirniji i tiši proizvod. Drugi aspekt koji se odnosi na komunalnu buku i buku u prostorima za rad i stanovanje, te treći aspekt koji podrazumijeva utjecaj buke na čovjeka i zaštitu čovjeka od djelovanja buke, iako nemaju utjecaj na izvedbu direktnog pogona, treba ih razjasniti i uzeti u obzir u pravom trenutku procesa oblikovanja tehničkog sustava.

Buka je pokazatelj kvalitete rada tehničkog sustava, pokazatelj stanja, odnosno rezultat stanja koje je definirano pri oblikovanju tehničkog sustava i rezultat je promjene stanja u dijelovima i sklopovima u toku rada u radnom vijeku.

Buka u tehničkim sustavima može biti strukturalna i zračna [88], [89]. Strukturalnu buku predstavljaju valovi koji se prostiru kroz elastičnu sredinu strojnih dijelova tehničkog sustava, dok zračnu buku čine valovi koji se prostiru kroz zrak u okolini i u praznim prostorima u unutrašnjosti tehničkog sustava. O strukturalnoj buci koja nastaje u direktnom pogonu, uslijed poremećaja kao što su sudari, kotrljanja, klizanja, strujanje i vrtloženje fluida u kanalima i vodovima i dr., već u razvoju konstrukcije treba procijeniti sva moguća mjesta nastanka buke. Primijenjenim rješenjima oblikovanja treba pokušati smanjiti buku na propisanu razinu. Emisija buke može biti umanjena, ako se poremećajna energija priguši umjesto da se pojača i ako se onemogući širenje zvučnih valova s vanjskih površina.

Intenzitet sudara se otklanja smanjenjem zračnosti unutar uležištenja, povećanjem točnosti izrade dijelova, povećanjem otpornosti na trošenje površina u dodiru. Kotrljanje neravnih i oštećenih površina ili ako su kontaktni pritisci na dodirnim površinama visoki, također su uzroci nastanka buke u direktnom pogonu.

Može se zaključiti da se efekti poremećajnih procesa koji izazivaju buku u direktnom pogonu ublažavaju povećanjem kvalitete točnosti izrade dijelova, otpornosti na trošenje površinskih slojeva dijelova i povećanjem krutosti. Iako sva predložena rješenja poskupljuju izradu, efekti na snižavanje razine buke ne moraju uvijek biti zadovoljavajući.

Buka i vibracije nastaju istovremeno kao posljedica istih uzroka pri poremećajima u radu, u direktnim pogonima. Valjni ležajevi i strujanje rashladne tekućine kroz kanale glavni su izvor buke. Pravilnim izborom uležištenja može se utjecati na razinu buke. Primjena kliznih ležaja kod direktnih pogona nižih zahtjeva na točnost pozicioniranja i nosivosti npr. u perilicama rublja pokazala se odlučujućom za rad bez buke. Brzina strujanja rashladnog medija kroz rashladne kanale oko statora motora dodatni je uzrok nastanka buke i prema preporuci proizvođača rashladnih sustava, brzina strujanja rashladnog medija mora biti do 1 m/s.

Razina buke kod direktnih pogona u usporedbi s hidrauličkim sklopovima znatno je niža. Tipične vrijednosti za visokomomentne motore se kreću do 65 dB(A). U usporedbi s tim, razina buke hidrauličkog sklopa npr. u brizgalicama je oko 72 dB(A). Porast od 6 dB(A) znači udvostručenje razine buke [5].

6.3 Zaključak

Za mnoge industrijske namjene gdje se traže regulirani pogoni koji uz male brzine vrtnje traže visoke momente, direktni pogoni s visokomomentnim motorom s uzbudom putem trajnih magneta su novo rješenje za pogonske mehanizme tehničkih sustava.

Povećavanjem broja zahtjeva i pooštravanjem kriterija primjene od strane kupca, nužno dolazi do kvalitetnijih rješenja pogonskih mehanizama tehničkih sustava, unutar kojih je i direktni pogon s visokomomentnim motorom.

Forma oblikovanja statorskog paketa limova s namotajima i rotorskog paketa s trajnim magnetima u kombinaciji s visokim brojem pari polova p>20 daje osnovnu značajku pogona: *visoki moment vrtnje pri niskim brzinama.* Dodatne značajke pogona koje od koncipiranja zadatka, razvoja pa do konstrukcijske razrade daju veliki broj mogućih varijanti preko:

- velikog promjera statorskog i rotorskog paketa šuplje izvedbe uz malu aksijalnu ugradbenu duljinu;
- visokog specifičnog momenta vrtnje u trajnom radu od 2.2 - 2.7 Nm/kg, odnosno 8.3 - 9 Nm/kg za područje preopterećenja momentom, čime se u konačnici znatno smanjuje masa pogona i prostor ugradnje u usporedbi sa standardnim pogonom s prigonom istih karakteristika;
- visokog stupnja korisnog djelovanja;
- pogona bez zračnosti zbog direktnog spajanja mjernog davača pozicije na pogonski član motora;
- točnosti pozicioniranja s ponovljivosti, koja se treba uskladiti sa zahtjevima pogona;
- vrlo male vremenske električne konstante, a time i brzog dinamičkog odziva unutar 10 ms, s velikim ubrzanjima i usporenjima;
- pogona vrlo velike torzijske i savojne krutosti, zbog direktnog povezivanja pogonskog člana s opterećenjem u tehničkom sustavu;
- porast temperature nastale uslijed toplinskih gubitaka u statorskim namotima, mora se držati unutar granica koje dopušta izolacija namota odnosno točnost tehničkog sustava. Nastala toplina mora se odvoditi prisilnim hlađenjem ili struju kroz statorske namote držati u granicama dopuštenog zagrijavanja;
- regulirane frekvencije napona pomoću frekvencijskog pretvarača postiže se promjena brzine vrtnje u traženim granicama što pridonosi komfornosti pogona;

- smanjenja broja ugradbenih mehaničkih dijelova u direktnom pogonu, povećava se pogonska pouzdanost i sigurnost, a održavanje postaje jednostavnije i jeftinije;

- smanjenja broja pokretnih dijelova, intenzitet buke u radu može se držati u granicama ≤65 dB(A) jednostavnim konstrukcijskim intervencijama.

Istraživanja su provedena osnovom trenutno dostupnih informacija poduprtih tehničkim podacima samostalno konstrukcijski oblikovanih i realiziranih direktnih pogona u konkretnim slučajevima primjene u tehničkim sustavima. Međutim nova tehnička rješenja i daljnji razvoj direktnih pogona pogonskih mehanizama tehničkih sustava zasniva se na:

- primjeni novih konstrukcijskih materijala i tehnologija izrade s ciljem poboljšanja karakteristika i smanjenja proizvodnih troškova;

- novim koncepcijama izvedbi direktnih pogona nastalim iz zahtjeva potencijalnih kupaca;

- poboljšanju konstrukcije i izrade elemenata pogonskog mehanizma u cilju poboljšanja pogonske pouzdanosti i sigurnosti, smanjenja razine buke i vibracija u samom proizvodu i neposrednoj okolini;

- upotrebi savršenijih sustava upravljanja primjenom suvremenih dostignuća iz područja mikroprocesorske tehnike;

- pokušaju standardizacije i unifikacije kako cijelog sustava tako i dijelova pogonskog mehanizma u cilju povećanja kvalitete izrade, te smanjenja cijene koštanja;

- oblikovanju pogonskog mehanizma kao i ostalih elementa tehničkog sustava primjenom suvremenih računalnih programa i metoda.

7. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA PARAMETARA VISOKOMOMENTNOG MOTORA

7.1 Opis pogona

Pogonski sustav eksperimentalnog vozila, poglavlje 3.6, potpuno je razvijen[31] u sklopu ovog istraživanja i izveden od strane domaćih proizvođača, izuzev kupovnog motora u „*kit*“ izvedbi oznake: 1FW6130-0PA10, slika 7.1, /12/, s reguliranom brzinom vrtnje od 0 do 300 min^{-1} i maksimalnim momentom od 880 Nm.

Iz rezultata provedene usporedbe primjene direktnih pogona, poglavlje 2.7, izabrani motor je višefazni sinkroni motor s uzbudom trajnim magnetima s 33 para statorskih polova, i on po svojim prednostima i karakteristikama u potpunosti zadovoljava tražene uvjete provedbe eksperimenata na vozilu. Zbog specifičnosti izvedbe, cjelokupni pogonski uređaj izrađen je kao prototip i smješten u standardni naplatak Ø14“ odnosno Ø15“, a koncepcijska struktura s tehnološkom razradom bazirana je na principu pojedinačne proizvodnje.



Slika 7.1 Fotografija motora 1FW6130-0PA10 („*kit*“ izvedba)

[31] Konstruktor direktnog pogona M. Kostelac - Katedra za transportne uređaje i konstrukcije FSB Zagreb.

Eksperimenti identifikacije pogonskog uređaja prikazani u ovom poglavlju su provedeni s podignutim prednjim kotačem tj. u praznom hodu motora, tako da je vanjsko opterećenje momentom vrtnje, odnosno silom trenja koja se javlja u kontaktu gume s podlogom jednaka nuli.

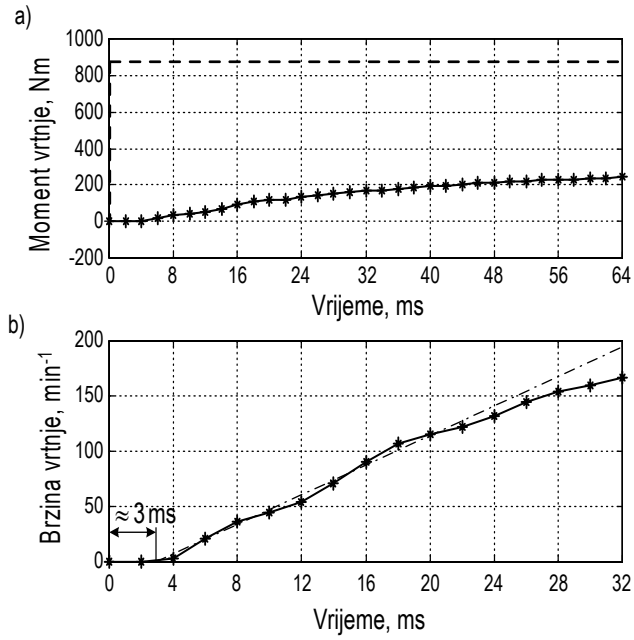
7.2 Odziv momenta vrtnje

Kako je dinamička karakteristika, poglavlje 2.5, vezana za vrijeme uspostave momenta vrtnje u pogonu, u slučaju poremećaja, eksperimenti na pogonskom motoru trebaju utvrditi unutar kojeg vremenskog perioda imamo očekivano vrijeme odziva povećanog momenta vrtnje. Generalno, vremenska električna konstanta frekvencijskog pretvornika, kojim napajamo visokomomentni motor, daje red veličine vremena odziva momenta vrtnje unutar tehničkog sustava pogonskog mehanizma.

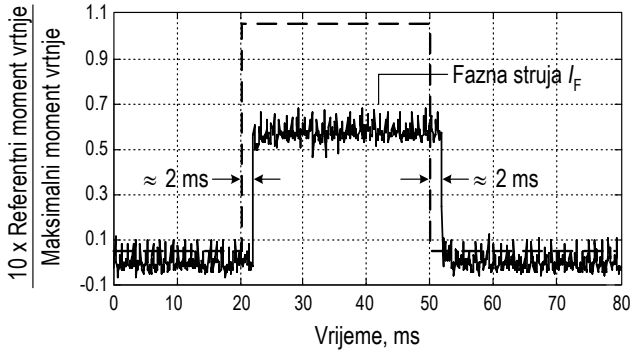
U nedostatku senzora momenta vrtnje, dinamički odziv momenta pogonskog motora može se rekonstruirati iz mjerenog signala brzine vrtnje i mjerenog signala fazne struje motora.

Slika 7.2a prikazuje odziv brzine vrtnje pogonskog motora na skokovitu promjenu reference momenta vrtnje s vrijednosti 0 na maksimalni moment vrtnje od 880 Nm. Nakon određenog početnog mrtvog vremena, odziv brzine vrtnje je približno linearan sve do brzine od 120 min^{-1}. Razlog tome je moment vrtnje motora koji je u tom području konstantan (nema zasićenja napona motora) i isto tako je puno veći od momenta trenja motora T_{tr}. Slika 7.2b prikazuje početno mrtvo vrijeme odziva brzine vrtnje pogonskog motora uključujući linearnu aproksimaciju (crta-točka-crta linija). Ova slika pokazuje da je početno, odnosno čisto mrtvo vrijeme odziva približno jednako 3 ms. Budući je ekvivalentno mrtvo vrijeme mjerenja brzine vrtnje (bazirano na vremenskoj derivaciji mjerenog signala pozicije) jednako $t_S/2$=1 ms (t_S=2 ms – vrijeme uzorkovanja mjernog signala) [90], mrtvo vrijeme odziva momenta vrtnje je približno jednako 2 ms.

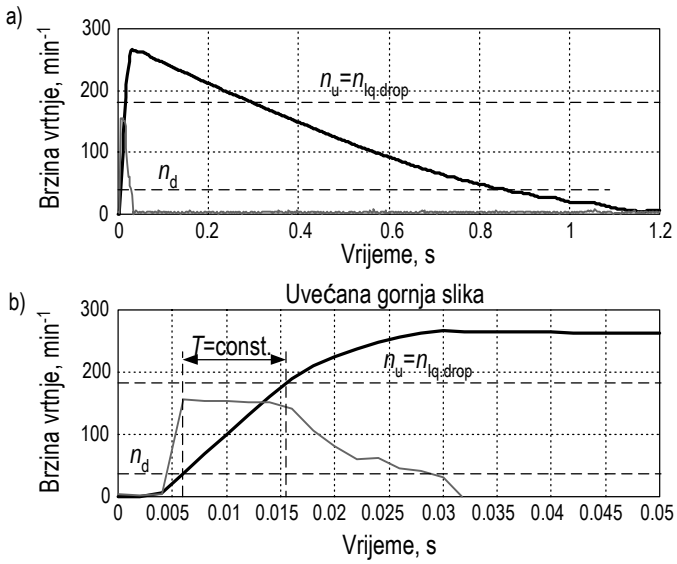
Slika 7.3 prikazuje odziv mjerenog signala fazne struje motora pri skokovitoj promjeni reference momenta vrtnje pogonskog motora. Odziv se odnosi na blokirani tj. zakočeni rotor ($n = 0$). U ovom slučaju fazna struja motora ima DC oblik i proporcionalna je momentu vrtnje motora [91], [92]. Prikazani odziv, slika 7.4, potvrđuje da je kašnjenje odziva struja / moment vrtnje oko 2 ms.



Slika 7.2 Odziv brzine vrtnje motora za skokovitu promjenu momenta vrtnje (a) i karakteristični detalj istog odziva (b).



Slika 7.3 Odziv fazne struje motora za skokovitu promjenu momenta vrtnje uz zakočeni rotor motora (n=0).



Slika 7.4 Karakteristika pokretanja i zaustavljanja pogonskog motora bez pričvršćene dodatne mase i vanjskog opterećenja

7.3 Moment tromosti

Moment tromosti masa i moment trenja su procijenjeni prema proceduri koja se bazira na eksperimentima pokretanja i zaustavljanja pogonskog motora, kako je pokazano u [92]. Jednadžbe pokretanja (7.1) i zaustavljanja (7.2) pogonskog motora dane su s:

$$K_t \cdot T - T_{tr} = I_{em} \cdot \frac{d\omega_1}{dt} \tag{7.1}$$

$$T_{tr} = -I_{em} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} \tag{7.2}$$

Kako bi se odredile nepoznanice I_{em}, T_{tr} i K_t, a isto tako i moment tromosti dodatnih rotacionih masa I_{dod}, eksperimenti pokretanja i zaustavljanja mogu se ponoviti za slučaj kada je dodatna masa pričvršćena na rotor motora. To je definirano izrazima:

$$K_t \cdot T - T_{tr} = (I_{em} + I_{dod}) \cdot \frac{d\omega_1^*}{dt} \tag{7.3}$$

$$T_{tr} = -(I_{em} + I_{dod}) \cdot \frac{d\omega_2^*}{dt} \tag{7.4}$$

Sustav jednadžbi (7.1) i (7.2) predstavlja homogeni linearni sustav s reduciranim rangom jednakim 3, te stoga sustav nema jedno rješenje za nepoznate parametre I_{em}, I_{dod}, T_{tr} i K_t, osim ako jedan od tih parametara nije unaprijed poznat. Ako se pretpostavi da je I_{dod} unaprijed poznat moment tromosti dodanog vanjskog opterećenja npr. zamašnjaka koji se može pričvrstiti na pogonski motor, krajnje rješenje sustava navedenih jednadžbi glasi:

$$I_{em} = \frac{I_{dod}}{k_n} \tag{7.5}$$

$$T_{tr} = -\frac{I_{dod}}{k_n} \cdot \dot{\omega}_2(\omega) \tag{7.6}$$

$$K_t = \frac{I_{dod}}{T_N \cdot k_n} \cdot (\dot{\omega}_1 - \dot{\omega}_2) \tag{7.7}$$

gdje je k_n karakteristični omjer brzina dan s:

$$k_n = \frac{\dot{\omega}}{\dot{\omega}_1^*} - 1 \tag{7.8}$$

Kako bi se odredio moment tromost kotača eksperimentalnog vozila I_{kot}, proveden je dodatni eksperiment pokretanja motora s kotačem pričvršćenim na pogonski motor. Zamjenom parametra I_{dod} u jednadžbi (7.4) s I_{kot}, pritom označivši odziv pokretanja s n_{1kot} (ω_{1kot}) i koristeći izraz (7.2) proizlazi:

$$I_{kot} = I_{em}\left(\frac{\dot{\omega}_1}{\dot{\omega}_{1kot}} - 1\right) \tag{7.9}$$

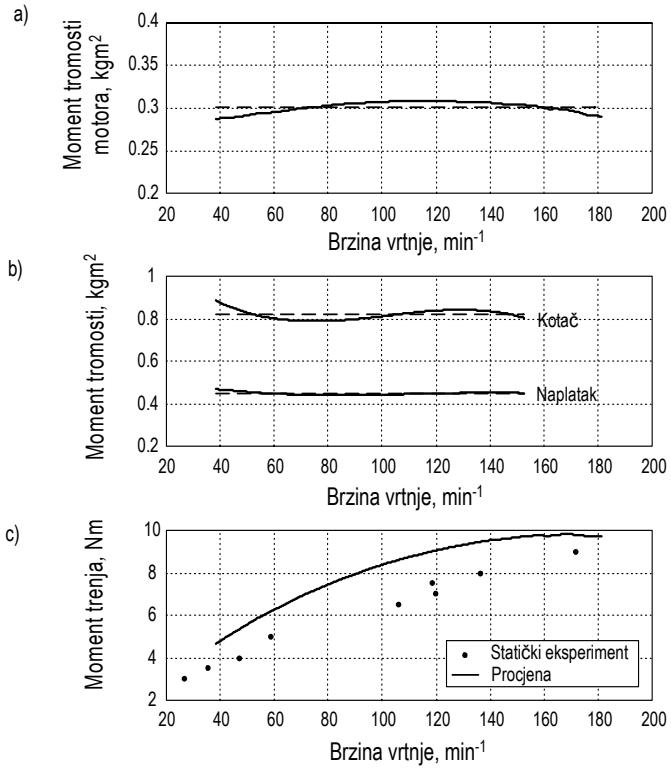
Moment tromosti naplatka I_r pogonskog kotača, kao i svih ostalih rotirajućih masa može se odrediti na sličan način s dodatnim eksperimentom.

Snimljeni odzivi brzine vrtnje motora $n(t)$ u eksperimentima pokretanja i zaustavljanja motora, slika 7.4, su interpolirani polinomom četvrtog stupnja u području brzina vrtnje pogonskog motora [n_d, n_g][32] pri konstantnom momentu vrtnje, slika 7.3. Ovo područje brzine vrtnje [n_d, n_g] je određeno prema tzv. momentu – fazna struja odziva I_F, koja je proporcionalna momentu vrtnje motora i raspoloživa kao analogni izlaz iz frekvencijskog pretvarača.

Koeficijenti polinoma se tada koriste za izračunavanje vremenske derivacije odziva brzine vrtnje $\dot{n}(t)$. Kako je moment trenja T_{tr} u jednadžbama (7.1) – (7.4) funkcija brzine vrtnje, odzivi u vremenskoj domeni $\dot{n}(t)$ transformiraju se u odzive u domeni brzine vrtnje $\dot{n}(n)$ koristeći linearnu interpolaciju. Odzivi u domeni brzine vrtnje se koriste za izračunavanje parametara motora prema jednadžbama (7.5), (7.6) i (7.9).

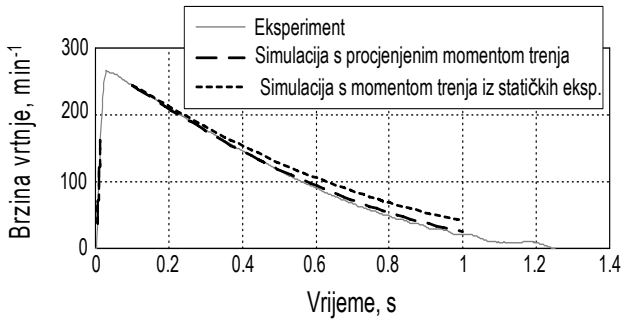
[32] Moment vrtnje motora nije konstantan za $n<n_d$ zbog kašnjenja regulacijskog kruga fazne struje i isto tako nije konstantan za $n>n_g$ zbog efekta zasićenja napona motora.

Slika 7.5 prikazuje krajnje rezultate identifikacije momenata tromosti rotacijskih masa. Rezultati su dobiveni identificiranim krivuljama za više od 10 eksperimenata s referencom momenta vrtnje od T_N i $T_N/3$ (T_N = 373 Nm – nominalni moment vrtnje). Krivulje $I_{em}(n)$, I_{kot} (n) i $I_r(n)$ pokazuju relativno malu devijaciju od ≈0.6%, ≈2.1% i ≈0.7%, što ukazuje na konzistentnost procijenjenih parametara. Srednje vrijednosti procijenjenih značajki momenata tromosti su: I_{em} = 0.320 kgm^2 i I_{kot} = 0.820 kgm^2



Slika 7.5 Procijenjeni parametri tromosti motora s dodatnim masama i momenta trenja u funkciji brzine vrtnje

Moment trenja T_{tr} raste od 4 do 10 Nm s porastom brzine vrtnje motora n (utjecaj viskoznog trenja). Moment trenja je stoga manji od 1.2% maksimalnog momenta vrtnje motora T_{max}. Dijagram momenta trenja, slika 7.5, sadrži također i rezultate direktne metode identifikacije, bazirane na stacionarnim odzivima motora u otvorenom krugu s malim konstantnim referencama momenta vrtnje $T=T_{tr}$. Maksimalna greška procjene momenta trenja prema izrazu (7.6) je 1.7 Nm, što je mala vrijednost u usporedbi s punom skalom momenta vrtnje od 880 Nm korištenom u eksperimentima pokretanja i zaustavljanja. Usporedni eksperimentalni i simulacijski rezultati, slika 7.6, potvrđuju točnost pokazane metode identifikacije.



Slika 7.6 Usporedni rezultati eksperimenta i simulacije odziva pokretanja i zaustavljanja za $T_{em}=T_N$

7.4 Statičke karakteristike

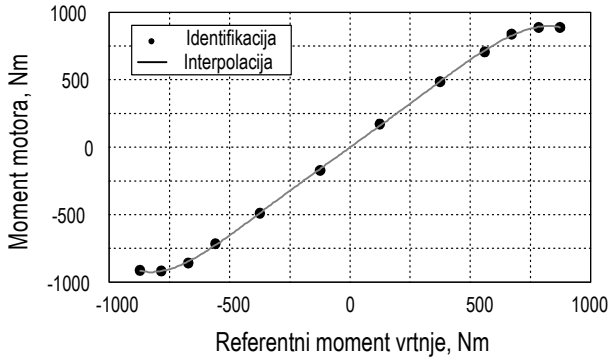
Faktor skaliranja momenta vrtnje $K_t(n)$, procijenjen iz krivulja pokretanja i zaustavljanja za različite referentne momente vrtnje prema izrazu (7.7), može se kao srednja vrijednost u funkciji brzine vrtnje koristiti za procjenu statičkih krivulja motora $T_{em} = K_t.T = f(T)$.

Iz statičke krivulje momenta vrtnje, slika 7.7, uočava se da pogonski motor zaista razvija maksimalni moment vrtnje od približno 880 Nm u oba smjera vrtnje. Statička krivulja je linearna do momenta vrtnje od 500 Nm, a u području od 500 do 880 Nm ima malo manji gradijent prirasta. Ova karakteristika je u skladu s dokumentacijom motora[33].

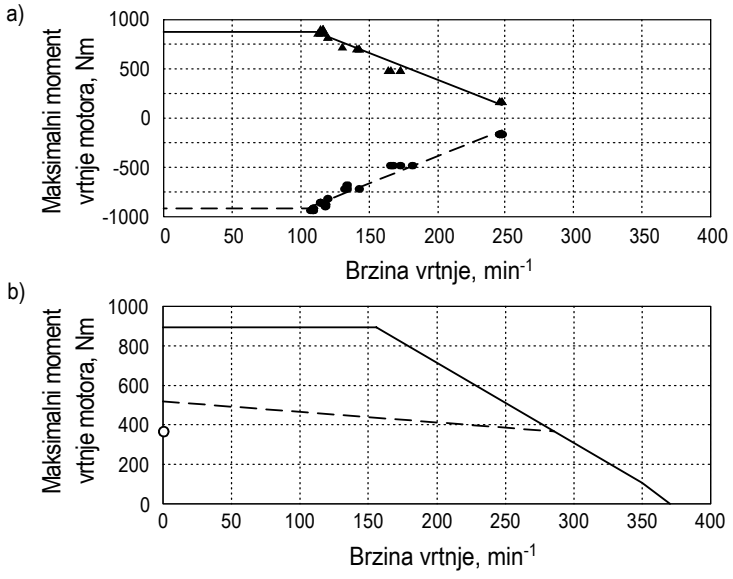
Za potrebe on-line korekcije referentnog momenta vrtnje u kontrolnom programu (tj. on-line linearizaciji krivulje momenta vrtnje), invertirana statička krivulja $T(T_{em})$ je interpolirana polinomom petog stupnja, slika 7.7.

Iz eksperimenata je vidljivo da pogonski motor gubi moment vrtnje na visokim brzinama vrtnje, slika 7.2 i 7.4. To se događa zbog efekta zasićenja napona motora. Krivulja koja daje odnos maksimalnog momenta vrtnje u funkciji brzine vrtnje može se procijeniti iz eksperimenata pokretanja za razne referentne momente vrtnje, slika 7.4b, kao $T_{em}(n_{lq,drop}) = f(T\,(n_{lq,drop}))$, slika 7.8a. Krivulja ima sličan padajući trend kao i odgovarajuća krivulja iz dokumentacije motora, slika 7.8b. Osnovna razlika je da se u ovom konkretnom slučaju primjene gubi više momenta pri visokim brzinama, što je vjerojatno posljedica pada napona na kablu napajanja duljine 100 m.

[33] "Built-in Torque Motors 1FW6", Simodrive Planning Guide, Siemens AG, Germany, May 2003.



Slika 7.7 Procijenjena krivulja momenta vrtnje motora



Slika 7.8 Maksimalni moment vrtnje motora pri raznim brzinama vrtnje: (a) procijenjeno na vozilu, (b) iz dokumentacije motora.

7.5 Analiza valovitosti momenta vrtnje

Karakteristika sinkronog motora s trajnim magnetima je generiranje parazitne pulzacije u momentu koja se prenosi kao i u signalu brzine vrtnje. Valovitost momenta vrtnje pogonskog motora nastaje kao posljedica više efekata (poglavlje 5.3.6) od kojih su promatrana dva dominantna uzroka:

1. Nesinusoidalne razdiobe gustoće magnetskog toka[34];

2. Međudjelovanja trajnih magneta rotora u statorskom prorezu tj. promjenjiva magnetska reluktancija[35].

Nesinusoidalne razdiobe gustoće magnetskog toka javljaju se kao posljedica devijacije sinusoidalne gustoće magnetskog toka unutar zračnog raspora. Amplituda je proporcionalna faznoj struji I_F. Dominantan utjecaj imaju komponente na frekvencijama šest i dvanaest puta većim od statorske frekvencije tj. na frekvencijama $pn/10$ i $pn/5$, gdje je p = 33 broj pari polova. Glavne komponente ovog poremećaja se javljaju sa $6p$ = 198 i $12p$ = 396 pulzacija po okretu rotora. Za standardne izvedbe visokomomentnih motora s trajnim magnetima, tipične amplitude ovog poremećaja mogu doseći 2-4% nazivnog momenta vrtnje motora.

Valovitost momenta vrtnje uslijed promjenjive magnetske reluktancije, poznata kao *cogging* moment, ne ovisi o struji motora već je povezana s promjenjivom reluktancijom magnetskog toka duž zračnog raspora. Frekvencija oscilacija *cogging* momenta je dana kao:

$$f_c = \frac{2p \cdot n}{60} \cdot N_{s/p} \tag{7.10}$$

Amplitude *cogging* momenta mogu doseći vrijednosti do 3 % nazivnog momenta vrtnje motora.

FFT[36] analiza signala brzine vrtnje motora omogućila je detaljnu analizu valovitosti momenta motora. Odnos između amplituda pulzacija u momentu motora ΔT_{em} i amplituda pulzacija brzine Δn pri frekvenciji f je dana izrazom:

$$\Delta T_{em} = \frac{\pi^2}{15} \cdot I_{em} \cdot \Delta n \cdot f \tag{7.11}$$

Broj pulzacija u momentu vrtnje motora povezan je s brzinom vrtnje, pa je zbog toga poželjno prikazati modove oscilacija momenta motora u normiranoj frekvencijskoj domeni tj. kutnoj domeni. Frekvencija pulzacija momenta i brzine vrtnje mijenjaju se brzinom vrtnje motora, ali je broj pulzacija po okretu konstantan. Normirana frekvencija je izračunata prema izrazu:

$$N = \frac{60 \cdot f}{n} \tag{7.12}$$

Za analizu pulzacija momenta vrtnje motora korišteni su odzivi motora dobiveni iz statičkih eksperimenata. Signalu brzine je oduzet DC pomak dobiven iz interpolirane krivulje

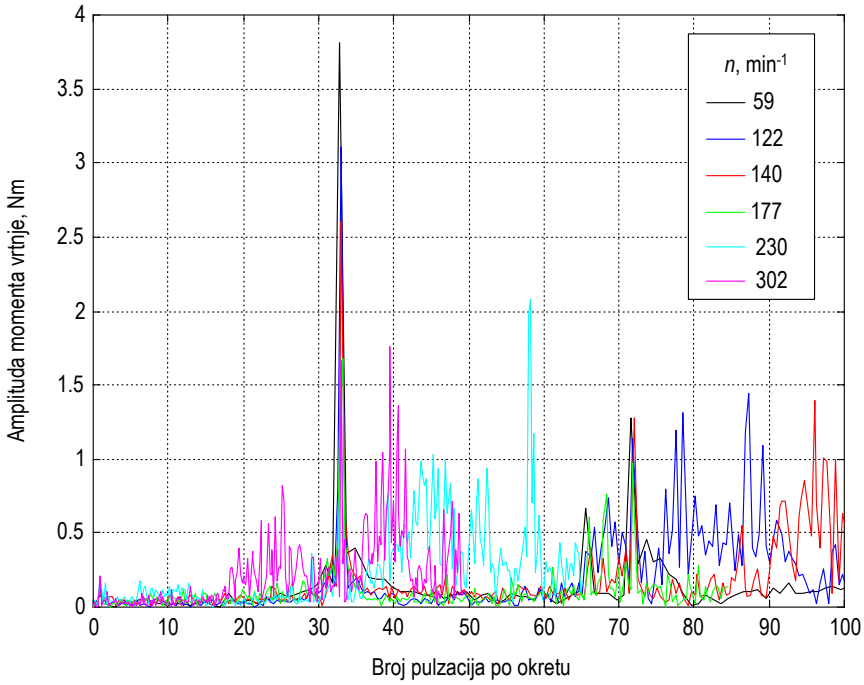
[34] Riple torque.

[35] Cogging torque.

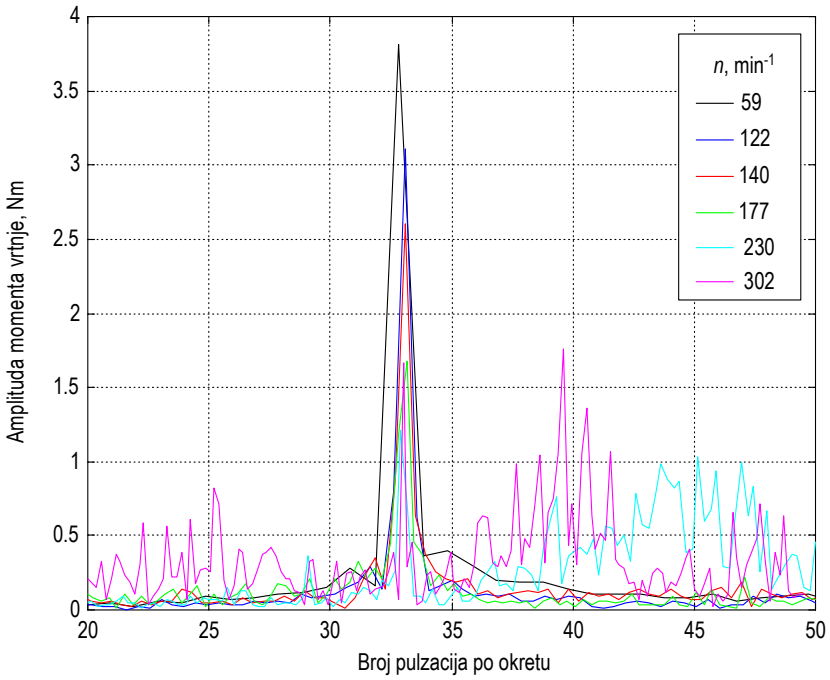
[36] Fast Fourier Transformation.

brzine vrtnje motora. Preko izračunatih amplituda spektra signala brzine, korištenjem Fourierove transformacije, dobivena je ovisnost amplitude brzine o frekvenciji. Primjenom izraza (7.11) i (7.12) na tako dobivenu amplitudu i frekvenciju dobiva se ovisnost amplitude modova momenta vrtnje motora, slika 7.9, s karakterističnim detaljima, slika 7.10, 7.11 i 7.12, u ovisnosti o broju pulzacija po okretu.

Slika 7.9 pokazuje da postoje dva dominantna moda oscilacija momenta na N=1 okr^{-1} i N = 33 okr^{-1}. Prvi mod s amplitudama do 0.2 Nm odnosno 0.02 % maksimalnog momenta je vezan uz debalans motora, slika 7.12. Drugi mod na 33 okr^{-1} odgovara cogging momentu. Broj statorskih utora po polu bi u ovom slučaju trebao biti $N_{s/p}$ = 0.5. Amplituda ovog moda iznosi 4 Nm tj. 0.45 % nazivnog momenta vrtnje motora, slika 7.10.

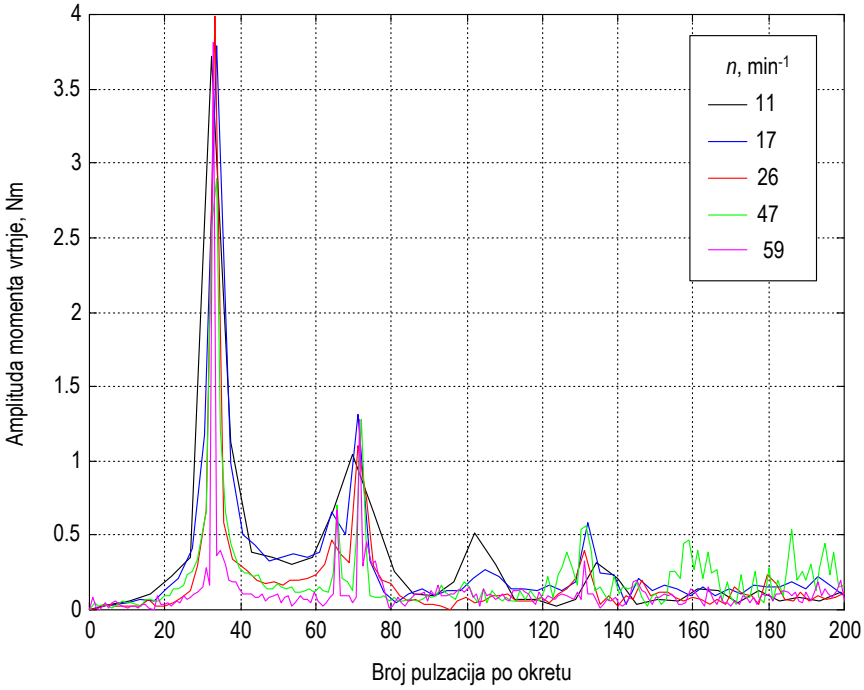


Slika 7.9 Spektar amplituda momenta vrtnje motora u normiranoj frekvenciji

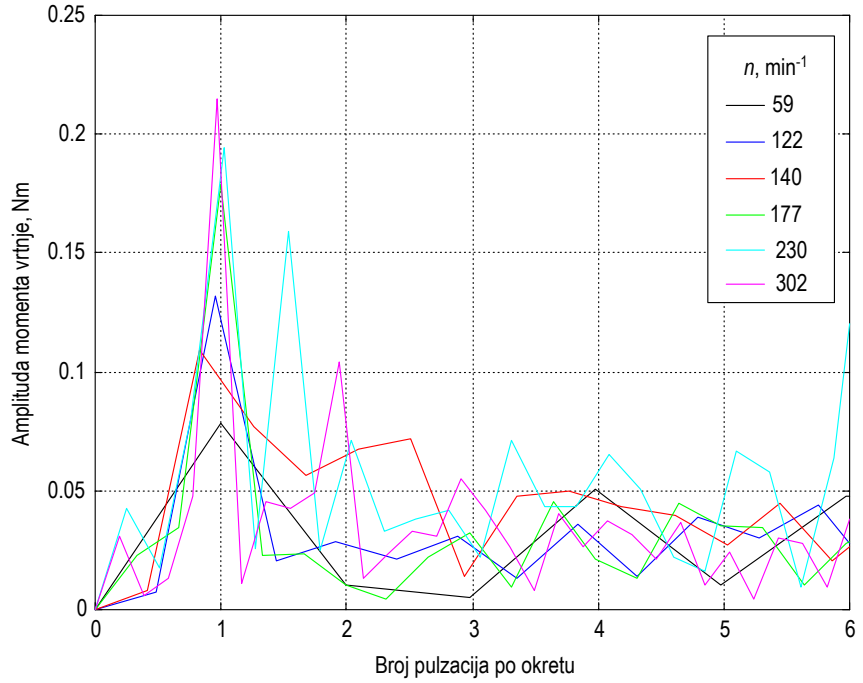


Slika 7.10 Amplituda valovitosti momenta vrtnje uslijed Cogging moda (detalj sa slike 7.9)

Glavni *ripple* mod bi se trebao pojaviti na normiranoj frekvenciji $6p$=198 okr^{-1}. Taj mod nije zamijećen u amplitudnom spektru zbog rada u praznom hodu odnosno malih faznih struja I_F. Vidljivo je da postoje viši harmonici (parni i neparni) *cogging* momenta, slika 7.11, koji su uočljiviji na nižim brzinama vrtnje motora. Utjecaj tih modova je od manjeg značaja u odnosu na već spomenuta dva dominantna moda uslijed *debalansa* rotora, slika 7.12, motora i osnovnog *cogging* moda.



Slika 7.11 Viši harmonici *cogging* moda za male brzine vrtnje



Slika 7.12 Valovitost momenta uslijed debalansa rotora motora (detalj slike 7.9)

8. ZAKLJUČAK

U prvom dijelu rada najprije je utvrđena i definirana razlika između termina direktnog odnosno izravnog pogona, koja je povezana s brzinom i momentom vrtnje pogona. Pod pojmom direktnog pogona podrazumijeva se pogon s razmjerno malim brzinama vrtnje ($n \leq 300$ min^{-1}) i visokim momentnim opterećenjem, za razliku od izravnih pogona gdje se podrazumijeva pogon s visokim brzinama i relativno malim momentima vrtnje.

Iz dodatnih zahtjeva na odabir direktnog pogona, iz područja elektromotornih i hidrauličkih pogona, procijenjeno je koji su od njih potencijalno primjenjivi u direktnim pogonima. Pored elektromotornih pogona s asinkronim motorom, sinkronih motora s uzbudom putem trajnih magneta i reluktantnih motora s obostrano izraženim polovima u procjenu su ušli i hidraulički pogoni s radijalno klipnim hidromotorom. Vrednovanje izvedbe za određena područja primjene kvalitativnim i kvantitativnim kriterijima kao što su stupanj korisnog djelovanja, iskoristivost momenta vrtnje, gustoća momenta vrtnje, cijena pogona s pogonskim uređajem, najveću pogodnost primjene u direktnim pogonima ima višefazni sinkroni stroj s uzbudom putem trajnih magneta i motor s aksijalnim poljem i uzbudom putem trajnih magneta. Područja primjene određenog pogona za pozicioniranje, kao i za visoko opteretive pogone i pogone s visokom dinamikom rada određena su prema momentu inercije rotora pogonskog člana.

Kako su posljednjih godina direktni pogoni postali sve interesantniji i svojom rasprostranjenošću zauzimaju sve značajniji segment u tehničkim sustavima primjena direktnih pogona s visokomomentnim motorima našla je primjenu u širokom području strojogradnje od liftova, alatnih strojeva pa sve do dijagnostičkih i mjernih uređaja. Iako su poznati i pod nazivom specijalni pogoni, može se sa sigurnošću konstatirati da će proširenjem njihove primjene nužno doći i do smanjenja cijena takvog pogona u tehničkim sustavima.

U procesu projektiranja i razvoja direktnog pogona kroz sve faze, od koncipiranja, konstruiranja pa do tehnološko-tehničke razrade mora se voditi računa i o troškovima gotovog proizvoda. Važnost troškova ne treba posebno isticati, jer svaki proizvod koji se smatra tehnički savršen, a nema tržišnu konkurentnost je čista utopija. Strukturiranje i analiza troškova od troškova proizvodnje, vlastitih troškova poduzeća pa do troškova u radnom vijeku, mora dati informacije za oblikovanje direktnih pogona u procesu konstruiranja i tijekom tehničko-tehnološke razrade na kojim se mjestima može uštedjeti, a da se ne naruši osnovnu funkciju direktnog pogona. Iako se ne može utjecati na vlastite troškove poduzeća, ispravnim tehnološkim oblikovanjem prema opterećenju, izradi skidanjem strugotine, lijevanju, montaži i demontaži može se direktno utjecati na troškove

proizvodnje. Kvalitetna konstrukcijska rješenja direktnog pogona mogu biti odlučujuća za troškove radnog vijeka proizvoda.

U središnjem dijelu obrađen je visokomomentni motor kao okosnica reguliranog direktnog pogona tehničkog sustava koji se može formulirati kao skup tehničkih funkcija i strukture koji imaju određeni odnos prema okolini. Iako se danas pri oblikovanju daje mogućnost uporabe gotovih visokomomentnih motora kao ugradbenih cjelina, primjena *„kit“* ili *„bezokvirnih“* izvedbi daje daleko veću mogućnost primjene direktnih pogona u tehničkim sustavima. Tehničke funkcije i struktura od koje se sastoji direktni pogon daju principijelno rješenje koje se mora integrirati u cjelinu. Kako se direktni pogon sastoji iz malenog broja tehničkih funkcija, to mu daje izravnu prednost pri oblikovanju kroz malen broj funkcijskih dijelova.

Kreiranje struktura pogonskih mehanizama s direktnim pogonom se svodi na izvedbe bez mehaničkog prijenosnika i elemenata povezivanja. Do sada je unutar tehničkog sustava, prilagođavanje pogonske točke radnoj točki procesa obavljano mehaničkim prijenosnikom. Kako je kod direktnih pogona pogonski član izravno spojen s radnim članom, karakteristike pogona moraju odgovarati radnim karakteristikama.

Šuplja izvedba vratila pogonskog člana direktnog pogona, kratke aksijalne duljine predstavlja pogodnu strukturu koja se može integrirati u male prostore ugradnje. Višestruko preopterećenje momentom vrtnje u kratkom vremenskom periodu daje veliku dinamiku u radu direktnih pogona. Kratka vremena pri pokretanju i zaustavljanju daju ovakvim pogonima izvanrednu mogućnost vrlo brzih odziva u vođenim tehnološkim procesima. Točnost kutnog pozicioniranja je svakako značajka koja proizlazi iz davača pozicije koji je sastavni dio regulacijsko-upravljačkog kruga, dok ponovljivost isključivo ovisi o točnosti cjelokupne izrade elemenata direktnog pogona.

Ispravnim oblikovanjem pozicija direktnog pogona u kombinaciji s kupovnim pozicijama (stator i rotor motora) renomiranih proizvođača dobivamo povećanu pogonsku pouzdanost čime se znatno smanjuje održavanje pogona. Kako se radi o pogonima koji imaju buku ≤60 dB(A) njihova ugradnja se može očekivati u svim zahtjevnijim područjima strojogradnje.

U budućnosti se očekuje sve veća primjena direktnih pogona zbog korištenja novih konstrukcijskih materijala i tehnologija izrade s ciljem poboljšanja karakteristika i smanjenja proizvodnih troškova. Upotrebom suvremenih dostignuća iz područja računalne tehnologije u sustavu upravljanja direktnog pogona, moguće je ostvariti programabilnost u radu postrojenja s tim motorima s neograničenim mogućnostima.

Verifikacija hipoteze provedena je tijekom izvedbe posve nove strukture pogona eksperimentalnog vozila kroz samostalni razvoj, oblikovanje i ugradnju direktnog pogona u standardni pogonski kotač vozila. Međutim, provedenim eksperimentima i mjerenjima na realnom tehničkom sustavu vozila dobiveni rezultati su potvrdili primjenjivost i brojne pretpostavljene prednosti direktnih pogona s visokomomentnim motorima.

LITERATURA

[1] Zimmer D., Böcker J., Schmidt A., Schultz B., Direktantriebe passend ausgewählt, Antriebtechnik, Vol. 2/2005, S. 40-45, 2005.

[2] Bangemann M., Europe and the Global Information Society – Recommendations to the European Council, Brussels, 36. May 1994.

[3] Wallmeier S., Badke-Schaub P., Stempfle J., Brikhofer H., Empirical Diagnoses and Training in Design Departments, Proceedings of third international symposium on Tools and methods of competitive engineering, pp. 439 – 450, Delft, April 2000.

[4] Oberšmit E., Nauka o konstruiranju, metodičko konstruiranje i konstruiranje pomoću računala, SNL Liber, Zagreb, 1985.

[5] Storath A., Wenn Hohlheit bei Technikern gefragt ist – Torquemotoren sorgen für hohe Drehmomente bei klein Drehzahl, Publikation, Siemens AG – A&D MC EWN Bad Neustadt, 2002.

[6] Canderes W.R., Laube F., Mosebach H., Vorstudie Technologien und Grenzen von „High Torque“ Antrieb, Abschlussbereicht zum FVA Forschungsvorhaben 352, FVA Forschungsheft 586, 1999.

[7] Mosbach H., Canders W. R., Average thrust of permanent magnet excited linear synchronous motors for different stator current waveforms, Proc ICEM 1998, 2-4 September 1998. Istanbul, Turkey

[8] May H., Canders W.R., Palka R., Loss reduction in synchronous machines by appropriate feed-ing patterns, Proc ICEM 1998, 2-4 September 1998. Istanbul, Turkey

[9] Borowski K.H., Das Baukastensystem in der Technik, Berlin Göttingen Heidelberg , Springer Verlag, 1961.

[10] Beitz W., Pahl G., Baukastenkonstruktionen, Konstruktion Vol. 26, 1997.

[11] Meyer N., Direkt ist einfach, Konstruktion & Entwicklung, Vol. 8/2002, S. 30-35, 2002.

[12] Inoue K., Miyake N., Daikoku A., Hashiguchi N., Yosue M., Neue Antrieb für Triebswerksraumlose Aufzüge, Lift-Report, Heft1, S. 4-8, 2005.

[13] Kostelac M., Herold Z., Maljković Z., Direct Drive-Trend in modern Elevators, International Design Conference – DESIGN 2006, Dubrovnik S. 277- 282, 2006.

[14] Holzknecht A., Direct Drive Torque Motors for Machine Tool Applications, ETEL Inc., Schaumburg, USA,

[15] Zirn O., Baldini G., Direkt Drives in Maschine Tools (Direktantriebe in Werkzeugmaschinen), Werksatt und Betriebe, Vol. 130, Nr. 4, Carl Hansen Verlag, Munich, Germany, 1997.

[16] Deur J., Kostelac M., Herold Z., Ivanovic V., Pavkovic D., Troulis M., Hrovat D., "An Experimental Electrical Vehicle with In-wheel Motor", CD Proc. of 13th Int. Conference on Electrical Drives and Power Electronics, (EDPE 2005), Dubrovnik, Croatia, Sep 2005.

[17] Ivanović V., Deur J., Kostelac M., Herold Z., Troulis M., Miano C., Hrovat D., Asgari J., Higgins D., Blackford J., Koutsos V., "Experimental Identification of Dynamic Tire Friction Potential on Ice Surfaces", XIX IAVSD Symposium (to appear in 2006 Vehicle System Dynamics Supplement), Milan, Italy, Aug/Sep 2005. Istraživači s FSB-a, dobili su prestižnu nagradu za najbolji članak (*Best Paper Award*). Rad je nastao u suradnji FSB istraživačke grupe s Fordovim istraživačkim centrima u Dearbornu i Aachenu i Sveučilištem u Edinburghu.

[18] Ehrlenspiel K., Kiewert A., Lindemann U., Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Berlin, Heidelberg, New York: Springer - Verlag, ISBN 3-540-66134-4, 2000.

[19] Barhes J-P. A., Do we have the technology for supporting knowledge intensive CAD in large design projects?, Knowledge Intensive CAD Volume 1, pp. 23. - 33. Chapman & Hall, New York, 1995.

[20] Hubka V., Theorie der Konstruktonsprozesse, Springer Verlag, 1976.

[21] Ullman G. D., The Mechanical Design Process, McGraw-Hill, 1992.

[22] Coenenberg A.G., Fischer T., Schmitz J., Target Costing und Product Life Costing als Instrumente des Kostenmanagements, Zeitschrift für Planung Nr. 5, S. 1-38, 1994.

[23] Fischer J., Koch R., Schmidt-Faber B., Hauschulte K., Gemeistkostenvermeiden durch entwucklungsbegleitende Prozesskostenkalkulation. Ein Ansatz zur Prozeßsyncronen Prognose von Lebenszykluskosten, Marknähe und Kosteneffizienz schaffen, Stuttgart, S. 259-274, 1993.

[24] VDMA: Total Profit Management, Frankfurt/M, Maschinenbau-Verlag, 1998.

[25] Franke H., Berücksichtigung der Produkt- Gesamtkosten bei Konzeption und Gestaltung von Maschinen und Geräten, Düsseldorf, VDI-Verlag, S. 71-77 (VDI-Berichte 457), 1982.

[26] Lindemann U., Zeit – Kostenmanagement – Herausforderung und Hilfe für Konstrukteur. In. Praxiserprobte Methoden erfolgreicher Produktenwicklung , Düsseldorf , VDI-Verlag (VDI-Berichte 457), 1992.

[27] Eversheim W., Schuh G., Caesar C., Variantenvielfalt mit Kostenfunktion in der Einzel – und Kleinserienfertigung, Berlin, Beuth, 1997.

[28] Schuh G., Gestaltung und Bewertung von Produktionarten, Aachen, TH, Dissertation 1989.

[29] Koller R., Konstruktionlehrne für Maschinenbau , Berlin, Springer Verlag, 1994.

[30] VDMA: Kennenzahlenkompaß 1994, Frankfurt/M, Maschinenbau-Verlag, 1995.

[31] Ehrleneinspiel K., Kostengünstig Konstruieren, Berlin, Springer Verlag, 1985.

[32] Schmidt A., Projektkostenschätzung. Kostenermittlung in der frühen Phasen von technischen Auftragprojekten, Wiesbaden, Gabler, 1995.

[33] Stößer R., Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellunksprossen, Aachen, Schäker – Konstruktiontechnik München, Band 33, 1999.

[34] Bronner A., Zukunft und Entwicklung der Betriebe im Zwang der Kostengesertze, Werksattstechnik 56, S. 80-89, 1996.

[35] Botta V., Mitlaufende Kalkulationen für ein frühzeitiges Kostenmanagement, Krp 1, S. 39-52,1996.

[36] De Jong J.R., Fertigkeit, Stückzahl und benötigte Zeit, REFA –Nachr., Sonderheft, Darmstadt, 1956.

[37] BaumannG., Systemstudie für die Erstellung eines Kostenfrüherkennungsverfahrens in der Einzelfertigung, München, TU, Lehrstuhl für Konstruktion in Maschinenbau, Unveröffentlichte Diplomarbeit, 1978.

[38] Derndineger H. O. Einfluss der Massenfertigung auf die konstruktive Gestaltung, W-Zeitschrift Industrial Fertigung Nr. 61. S. 284-287, 1971.

[39] Fisher D., Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung, München, TU Dissertation, 1983.

[40] Bronner A., Angebots - und Projektkalkulation – Leitfaden für Praktiker, Berlin, Heidelberg, New York: Springer - Verlag, 1996.

[41] VDI-Richtlinie 2234: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren – Methoden und Hilfen, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993.

[42] Lindemann U., Systematische Betrachtung des Konstruktionprozesses unter besondere Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlagen der Gestalt, Düsseldorf , VDI-Verlag, 1992.

[43] Ehrlenspiel K, Fisher D., Relativkosten von Stirnrädern in Einzel- und Kleinserienfertigung, Abschlußbericht Teil I und II, FVA Forschungsvorhaben Nr.: 61, Heft 116 und 146, Frankfurt/M, Forschungsverein. Antriebtechnik e.V. 1982./1983.

[44] Käser A., Wo stehen wir auf dem Gebiet der Vorbestimmung der Schnittdaten und der Arbeitzeit in der spannenden Fertigung?, REFA – Nachschrift 27, S. 21-32, 1974.

[45] Langeneinricht G., Rationelle und sicherte Vorkalkulation nach Rechneneprogrammen mit elektronischen Tischrechner, Werkstatt und Betrieb Nr.: 105, S.21-27, 1972.

[46] Rieg F., Kostenwachstumsgesetze für Baureichem, Darmstadt, Technische Hochschule, Dissertation, 1982.

[47] VDI-Richtlinie 2225, Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Blatt 2, Düsseldorf, VDI Verlag, 1977 .

[48] Stöferle Th., Dilling H., Rauschenbach Th., Rationelle Montage – Herausforderung an der Ingenieur, VDI-Z 117, S. 715-719, 1975.

[49] Gleich R., Target Costing für montierende Industrie, München Vahlen, 1996, Zugl. Stuttgart: Universität, Dissertation, 1966.

[50] Gairola A., Montagegerechtes Konstruiren- Ein Beitrag Konstruktionsmethodik, Darmstadt TU, Dissertation, 1981.

[51] Lotter B., Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik, Düsseldorf, VDI Verlag, 1986.

[52] Andresen U., Die Rationalisierung der Montage beginnt in Konstruktionsbüro, Konstruktion Nr.: 27, S. 478-484, 1975.

[53] Pahl G., Beelich K.H., Ermittlung von Herstellkosten für ähnliche Bauteile, Düsseldorf, VDI – Verlag, VDI-Berichte 347, S. 155-164, 1979.

[54] Huber Th., senken von Montagenzeit und –kosten in Getriebebau, Hanser Verlag München, (Konstruktiontechnik München Band 20), München TU, Dissertation, 1994.

[55] Merkamm H., Information Management in the Design Process - Problems, Approaches and Solutions, Designers, the key to successful product development, Springer, Berlin, 1998.

[56] Suh N. P., The Principles of Design, Oxford Univeristy Press, Oxford, 1990.

[57] Eder W. E., Systematic Conceptualizing – With Computational Tools, Knowledge Intensive CAD, Volume 1, pp. 205. – 224, Chapman & Hall, Padstow, 1996.

[58] Andreasen M. M., Kähler S., Lund T., Swift K.G., Design for Assembly (2. ed.), London: IFS Pub., and Berlin / Heidelberg: Springer - Verlag, 1988.

[59] Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W., Product Design for Manufacture and Assembly, New York: Marcel Dekker, 1991.

[60] Hubka V., Eder W.E., Design Science, Berlin, Heidelberg, New York: Springer - Verlag, 1996.

[61] Oberšmit E., Osnove konstruiranja - Tehnološki ispravno konstrukcijsko oblikovanje strojnih dijelova, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1983.

[62] Gißler J., Elektrische Direktantriebe – Vorteile Direktantriebtechnik praktisch nutzen, Franzis Verlag, ISBN 3-7723-5007-0, 2005.

[63] Hopper E.: Direktantriebstechnik – wann lohnt sie sich?, A&D Kompendium Automation & Drives, 200-203, 2000.

[64] Maschine Design Magazine: Direct Drive Motors - Fast and Accurate, Basic of Design Engineering, 1999.

[65] Schröder D., Elektrischeantribe – Grundlagen 2. Aufgabe, ISBN 3-540-66846-2, Springer Verlag, Heidelberg, 2000.

[66] Roloff H., Matek W., Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung, Vieweg Verlag Braunschweig, ISBN 3-528-74028-0, 1995.

[67] Baus G., Nicht vor kurzer Dauer – Für jede Anwendung das richtige Kunsthofflager, KEM, Konradin Verag Leinfelden, S. 30-32, 2005.

[68] Ernst A., Digitale Längen- und Winkelmesstechnik: Positionmessysteme für den Maschinenbau und die Elektroindustrie, Bibliothek der Technik, 165. Verlag Moderne Industrie, Landberg, ISBN 3-478-93264, 2001.

[69] Heinemann G., Papiernik W., Lineare Direktantriebe als Vorschubantriebe für Werkzeugmaschinen. Tagungsband SPS/IPC/Drives 97, S. 335-346, Huthig Verlag Heidelberg, 1997.

[70] Schultze M., Synchron unter Spannung, Lift Report , Heft 6, S.46-48, 2005.

[71] Müller E., Kuhlunksysteme für hochgenaue Antriebsysteme, www. olear.ch, 2002.

[72] DIN EN ISO 9283: Industrieroboter – Leistungkenngrößen und zugehörige Prüfmethoden, Beth-Verlag, Berlin, 1999.

[73] VDI 286: Montage – Handhabungstechnik, Blatt 2: Kenngrößen für Industrieroboter – Einsatzspezifische Kenngrößen, 1988., Blatt 3: Kenngrößen für Industrieroboter – Prüfung der Kenngrößen, Beth-Verlag, Berlin,1990.

[74] DIN ISO 230-2: Prüfregeln für Werkzuegmaschinen, Teil 2: Bestimmung der Positionierunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteurten Achsen, Beth-Verlag, Berlin, 2000.

[75] Holz J., Springob L., Identification and Compensation of Torque Ripple in High-Precision Permanent Magnet Motor Drives, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, 1996.

[76] Brock S., Deskur J., A Practical Approach to Compensation of Torque Ripple in High-Precision Permanent Magnet Motor Drives, EDPE Dubrovnik, Croatia, , September 2005.

[77] Jahns T. M., Motion Control with Permanent Magnet AC Machines, Proc. IEEE, Vol.82, No.8, pp. 1241-1252, 1994.

[78] Cros J. et al., A Novel current Control Strategy in trapezoidal EMF Actuators to minimize Torque Ripples due to Phase Commutation, EPE Eur. Conf. Power Electron., Application (EPE), Brihton, UK, Vol.4, pp.266-271, 1993.

[79] Maschine Design Magazine, Direct Drive Motors - Fast and Accurate, Basic of Design Engineering, 1999.

[80] Murai Y., Watanabe T., Iwasaki H., Waveform Distortions Correction circuit for PWM Inverters with Switching Lag-Time, IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 23, No.5, pp. 410-420, 1993.

[81] Marinescu, Influence of Magnet Pole Size and air gap Dimensions on Torque Ripple in permanent Magnet synchronous Motors, Ph. D. dissertation, Aachen, Germany, 1991.

[82] Le-Huy H., Slimani K., Viarogue P., A Productive current Controller for synchronous servo Drives, Eur. Conf. Power Electr. Applications (EPE) Florence, Italy, pp. 2114-2119, 1991.

[83] Giβler J., Hochdynamische Direktantriebe, WEKA Verlag, Poing, Teil 1: Übersicht und Anwendungen. Elektronik, !/2004, S. 56-61, 2004.

[84] Baumert S., Giβler J., Amend G., Servoreglerfuktionen eröffnen neue Möglichkeiten für die Direktantriebe, Tagungsband SPS/IPC/DRIVES 03, VDE Verlag Berlin Offenbach, S.799-809, 2003.

[85] Hodges C. C., Levant M., D.B. Marks, Electromagnetic Engineering Design Group- Motion Corporation, Bruschless DC Motors in Space, pp.1-12, 2005.

[86] Leicht R., Reliability Analysis for Engineers – An Introduction, Oxford scientific Publications, Oxford University Press, 1995.

[87] Heibach E., Betriebsfestikeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, VDI Verlag, 1990.

[88] Broch J. T. Mechanical Vibration and Shock Measurements, Published by Bruel & Kjaer, Danmark, 1984.

[89] Kurtović H., Osnovi tehničke akustike, Naučna knjiga Beograd, 1990.

[90] Perić, N.: Digital Measurement of Angular Speed (in Croatian), Automatika, Vol. 31, No. 3-4, pp. 123-128, 1990.

[91] Leonhard, W.: Control of Electrical Drives, Springer, 3rd Edition, Berlin, 2001.

[92] Deur, J., Božić, A., Perić, N.: "Control of Electric Drives with Elastic Transmission, Friction, and Backlash - Experimental System, Automatika, Vol. 40, No. 3-4, pp. 129-137, 1999.

OZNAKE PROIZVOĐAČA

/1/ Bosch Rexroth AG (ex. Mannesmann Rexrot AG), Stuttgart, Germany, www.boschrexroth.de

/2/ Dynex/Rivett Inc.Pewaukee, USA, www.dynexhidraulics.com

/3/ Parker Hannifin GmbH & Co., Köln, Germany, www.parker.com/de

/4/ System Antriebstechnik GmbH, Dresden, Germany, www.sadgmbh.de

/5/ Kone Oyj, Espo, Finland, www.kone.com

/6/ Mitsubischi Electric Corporation, Japan, www.mitschubischi.com

/7/ Courtesy Hoefler Maschinenbau GmbH, Ettlingen, Germany

/8/ Oficine Mechaniche Venete Srl, Caltana di S. Maria di Sala, Italy, www.italianmachinetools.com

/9/ Gildemeister GmbH, Geretsried, Germany, www.gildemeister.com

/10/ Krauss Maffei Kunsthofftechnik GmbH, Munich, Germany, www.krauss-mafei.com

/11/ ABB Inc. Autmation Products GmbH, Standard Drives, Manheim, Germany, www.abb.com

/12/ Siemens Linear Motor Systen GmbH & Co.KG, Munich Germany, www.siemens.de

/13/ Parker Hannifin GmbH & Co. KG, Ofenburg, Germany, www.parker-eme.com

/14/ Torque Tec GmbH, Julich, Germany, www. torquetec.de

/15/ INA – Drives & Mechatroniks GmbH & C., Suhl, Germany, www.ina-dam.de

/16/ ALXION Automatique & Produktique, Colombes Cadex, France, www.alxion.com

/17/ Oswald Elektromotoren GmbH, Miltenberg, Germany, www.oswald.de

/18/ Danaher Motion GmbH, Dusseldorf, Germany, www.danahermotion.net

/19/ Baumühler GmbH, Nürnberg, Germany, www.baumuhler.de

/20/ INA Wälzlger Schaeffler GmbH, Herzogenurach, Germany, www.ina.de

/21/ R.A. Rodriguez GmbH, Eschweiler, Germany, www.rodriguez.de

/22/ Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut, Germany, www.heidenhain.de

KRATKI ŽIVOTOPIS (CURRICULUM VITAE)

Ime:	Milan Kostelac
Datum rođenja:	28. listopad 1959.
Mjesto rođenja:	Otočac, RH
Naobrazba:	Srednja strojarska tehnička škola “Marko Orešković”, Lički Osik, 1975-1978. Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Strojarski smjer-mehaničke konstrukcije, Medalja Fakulteta za izvanredan uspjeh na studiju, 1978-1983. Poslijediplomski studij FSB Sveučilišta u Zagrebu, područje strojarstvo, smjer “Teorija konstrukcija“, magistrirao 2000.
Zaposlenja:	1984.-1986., Autoprijevoz Otočac, RJ Remont i održavanje, samostalni tehnolog održavanja – projektant; 1986.-1989., Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, asistent; 1989.-1993., Specijalni alatni strojevi (SAS) Zadar, konstruktor alatnih strojeva II kategorije; 1993.-1994., Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, asistent 1994.-1997., IPIM Zagreb, tehnički direktor, samostalni projektant procesne opreme; 1997.-1999., ARAL Zagreb, konstruktor-projektant opreme za preradu otpada; 1999.- 2000., TEH – CUT Velika Gorica, konstruktor, voditelj razvoja; 2000.- 2002., NAT-MAT Zagreb, konstruktor-projektant opreme za zbrinjavanje otpada; 2002.- 2002., Konstrukcije-Kostelac Zagreb, konstruktor-projektant opreme 2002.- Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, znanstveni novak.
Specijalnost:	projektiranje i konstrukcija uređaja i naprava za transport; konstrukcija specijalnih alatnih strojeva; konstrukcija pribora, uređaja i naprava prema potrebama kupaca; konstrukcija tehnološke opreme za procesnu industriju.
Osobni podaci:	oženjen, dvoje djece (sin i kćer); jezik: njemački (govori i piše), engleski pasivno.
Članstvo:	ovlašteni projektant s pravom potpisa (registarski broj: 110, HKAIG – razred strojarstva).

BIOGRAPHY (CURRICULUM VITAE)

Name and Surname: Milan Kostelac
Date of birth: 28th October1959
Place of birth: Otočac, Croatia

Education: 1975-1978 technical secondary schools “Marko Orešković” Lički Osik;
1978-1983 Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecure (FMENA), University of Zagreb, Department of design, “Medal of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture” for the best students;
Postgraduate Study, FMENA, University of Zagreb, Field: Mechanical Engineering, “Theory of Design “, MA obtained in 2000.

Work experience: 1984-1986 Autoprijevoz Otočac, RJ Remont i održavanje, maintainance engineer - designer;
1986 - 1989 FMENA, University of Zagreb, research assistant;
1989 - 1993 Specijalni alatni strojevi (SAS) Zadar, machine tool designer;
1993 - 1994 FMENA, University of Zagreb, research assistant;
1994 - 1997 IPIM Zagreb, technical director, freelance designer of process engineering equipment;
1997 - 1999 ARAL Zagreb, designer of recycling equipment;
1999 - 2000 TEH – CUT Velika Gorica, designer, Head of Development;
2000 - 2002 NAT-MAT Zagreb, designer of waste disposal equipment;
2002 - 2002 Konstrukcije-Kostelac Zagreb, equipment designer;
2002 - FMENA, University of Zagreb, research assistant.

Specialised in: Design of transportation systems equipment and devices;
Design of special machine tools;
Design of custom-made equipment and devices;
Design of process equipment.

Personal details: Married, two children (son and daughter);
Languages: German (spoken and written), English (passive).

Memberships: Certified designer (Reg.No: 110 HKAIG – class: mechanical engineering).