

*Dr. sci. Matco Milković*

# BRODSKI ELEKTRIČNI UREDAJI I SUSTAVI

I. dio



DUBROVNIK, 1996.

## PREDGOVOR

*Dugo godina osjeća se potreba za udžbenikom kojim bi se studentima pomorskih visokih učilišta olakšao studij iz područja brodske elektroenergetike. Razlog je tomu činjenica da do danas nema udžbenika na hrvatskom jeziku koji obrađuje ovu važnu problematiku na jednomu mjestu, a pogotovo nema udžbenika prilagođenoga nastavnom planu i programu koji se izvodi na studiju pomorstva.*

*Predoči li se brod kao zatvoreni električni krug, onda se može uočiti da je on definiran izvorom i trošilima te elementima koji ih spajaju, uključuju ili isključuju, zaštićuju i njima upravljaju. U tom strujnom krugu posebno mjesto pripada brodskim električnim strojevima kojima se na brodu koristi kao izvorima (generatori) ili trošilima (elektromotori). Zbog toga je u udžbeniku posebna pozornost posvećena opisu tih električnih strojeva. Problemi u svezi s razvodom i razdiobom električne energije (brodski vodovi i kabeli, brodske mreže, sklopni uređaji i aparati, mjerni uređaji, električna zaštita itd.) opisan će se u udžbeniku "Brodski električni uređaji i sustavi II. dio" ovog autora.*

*Udžbenik je podijeljen u šest poglavlja, a svako od njih završava pitanjima i zadacima za provjeru znanja iz obrađene teme.*

*U prvom je poglavlju sažetak povijesnog razvoja elektrifikacije broda, definiran je brod kao zatvoreni strujni krug, a sažeto su opisane i osnovne značajke električnih strojeva na brodu.*

*U drugom su poglavlju dane osnove električnih strojeva s naglaskom na teoretsko tumačenje načina njihova rada, opis osnovnih elemenata električnog stroja, zagrijavanje i hlađenje te njihova pogonska stanja.*

*U trećem su poglavlju prikazani električni strojevi kojima se koristi na brodu, pri čemu su posebno opisane njihove pogonske karakteristike. To se odnosi na energetske transformatore te sinkrone, asinkrone i istosmjernje strojeve.*

*U četvrtom je poglavlju opisana proizvodnja električne energije na brodu, tj. osnovni izvori (turbinski, dizelski i osovinski generatori) i izvori za napajanje u opasnosti (dizelski generator za nužno napajanje, akumulatorske baterije, neprekidno napajanje i priključak na kopno).*

*U petom je poglavlju ukratko opisana električna propulzija broda, tj. pogon propelera elektromotorima istosmjernje i izmjenične struje.*

*U šestom su poglavlju opisana veća trošila električne energije na brodu, tj. elektromotorni pogoni, toplinska i svjetlosna trošila.*

*Na kraju je udžbenika dan popis električnih i neelektričnih veličina i jedinica, te je priložen indeks oznaka iz teksta i popis literature s kojom se služilo pri izradi udžbenika.*



*Iako je udžbenik namijenjen studentima brodske elektroenergetike na studiju pomorstva, on može korisno poslužiti i ostalomu tehničkom osoblju broda kao korisna informacija.*

*Želim zahvaliti recenzentima, gospodi prof. dr. sci. Dragu Banu s Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, prof. dr. sci. Anti Munitiću s Pomorskog fakulteta u Splitu i prof. dr. sci. Ivanu Vlahiniću s Pomorskog fakulteta u Rijeci, za uloženom trudu pri čitanju rukopisa i za korisne sugestije, te mr. sci. Antunu Česku, profesoru Pomorsko-tehničke škole u Dubrovniku za obavljenu lekturu. Kolegici Jeleni Mijoč s Pomorskog fakulteta u Dubrovniku, zahvaljujem za pomoć pri izradi slika.*

*Na kraju, želim naglasiti da ovo prvo izdanje nije bez pogrešaka i nedostataka pa će stoga svaka sugestija i primjedba biti od koristi i primljena sa zahvalnošću.*

U Dubrovniku, 1996.

Autor

# SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Povijesni razvoj elektriifikacije broda	1
1.2. Brod kao zatvoreni električni strujni krug	2
1.3. Neke specifičnosti za brodске električne strojeve	4
1.4. Pitanja i zadaci za provjeru znanja	5
2. OSNOVE ELEKTRIČNIH STROJEVA	6
2.1. Osnovna podjela električnih strojeva	6
2.2. Teorija električnih strojeva	9
2.2.1. Zakon elektromagnetske indukcije	11
2.2.2. Zakon protjecanja	14
2.2.3. Sile na vodiče u magnetskom polju	16
2.3. Načelo rada elementarnog električnog stroja	18
2.4. Osnovni dijelovi električnog stroja	20
2.4.1. Magnetski krugovi električnih strojeva	22
2.4.2. Namoti električnih strojeva	24
2.5. Zagrijavanje i hlađenje električnih strojeva	26
2.6. Pogonska stanja električnih strojeva	31
2.7. Pitanja i zadaci za provjeru znanja	33
3. ELEKTRIČNI STROJEVI NA BRODU	37
3.1. Energetski transformatori	37
3.1.1. Jednofazni transformatori	40
3.1.1.1. Jednofazni idealni transformator	41
3.1.1.2. Jednofazni realni transformator	45
3.1.2. Trofazni transformatori	54
3.1.3. Paralelni rad transformatora	63
3.1.4. Neke specifičnosti za transformatore na brodu	64
3.2. Asinkroni motori	66
3.2.1. Trofazni asinkroni motori	67
3.2.1.1. Trofazni asinkroni kavezni motori	71
3.2.1.1.1. Način rada	71
3.2.1.1.2. Momentna karakteristika	76
3.2.1.1.3. Pokretanje motora	77
3.2.1.1.4. Regulacija brzine vrtnje	83
3.2.1.2. Trofazni asinkroni kolutni motor	86

3.2.1.3. Gubici i korisnost trofaznog asinkronog motora	90
3.2.2. Jednofazni asinkroni motori	92
3.3. Sinkroni strojevi	96
3.3.1. Sinkroni generatori	97
3.3.1.1. Načelo rada sinkronoga generatora	105
3.3.1.2. Pogonska stanja sinkronoga generatora	107
3.3.1.3. Samostalni rad sinkronoga generatora	114
3.3.1.4. Paralelni rad sinkronih generatora	116
3.3.1.5. Gubici i korisnost sinkronoga generatora	122
3.3.1. Sinkroni motori	124
3.4. Istosmjerni strojevi	126
3.4.1. Istosmjerni generatori	136
3.4.1.1. Neovisno uzbudeni generator	136
3.4.1.2. Paralelno uzbudeni generator	138
3.4.1.3. Serijski uzbudeni generator	140
3.4.1.4. Kompaundni (složeno uzbudeni) generator	141
3.4.1.5. Paralelni rad istosmjernih generatora	143
3.4.2. Istosmjerni motori	144
3.4.2.1. Neovisno uzbudeni motor	146
3.4.2.2. Paralelno uzbudeni motor	148
3.4.2.3. Serijski uzbudeni motor	149
3.4.2.4. Kompaundni (složeno uzbudeni) motor	150
3.4.3. Gubici i korisnost istosmjernog stroja	151
3.5. Strojevi posebne namjene	152
3.5.1. Davači položaja	153
3.5.2. Tahogeneratori	155
3.6. Ispravljači ili usmjerivači	156
3.6.1. Poluvodičke diode	156
3.6.2. Tiristori	160
3.7. Pitanja i zadaci za provjeru znanja	163
<b>4. IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU</b>	174
4.1. Osnovni izvori električne energije	176
4.1.1. Turbinski generatori	176
4.1.2. Dizelski generatori	177
4.1.3. Osovinski generatori	188
4.2. Izvori za napajanje u nenormalnim pogonskim stanjima	191
4.2.1. Dizelski generator za nužno napajanje	192
4.2.2. Akumulatorske baterije	193

4.2.3. Neprekidno napajanje	199
4.1.2. Priključak na kopno	200
4.3. Pitanja i zadaci za provjeru znanja	202
<b>5. ELEKTRIČNA PROPULZIJA BRODA</b>	<b>204</b>
5.1. Pogon propelera motorom istosmjerne struje	206
5.1.1. Spoj s konstantnim naponom	206
5.1.2. Spoj s konstantnom strujom	207
5.1.3. Ward-Leonardov spoj	208
5.1.3. Spoj dizelskog sinkronoga generatora i istosmjernog motora	210
5.2. Pogon propelera motorom izmjenične struje	211
5.3. Perspektive primjene električne propulzije broda	212
5.4. Pitanja i zadaci za provjeru znanja	214
<b>6. TROŠILA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU</b>	<b>215</b>
6.1. Elektromotorni pogoni na brodu	215
6.1.1. Osnovna statička i dinamička stanja elektromotornih pogona	217
6.1.2. Vanjske (mehaničke) karakteristike elektromotora	221
6.1.3. Karakteristična svojstva radnih strojeva	222
6.1.4. Tipični elektromotorni pogoni na brodu	225
6.1.4.1. Pogon brodskih vitala	225
6.1.4.2. Pogon brodskih pumpa	229
6.1.4.3. Pogon brodskih ventilatora	230
6.1.4.4. Pogon brodskih kompresora	231
6.1.4.5. Pogon brodskih centrifuga	232
6.2. Toplinska trošila na brodu	232
6.3. Svjetlosna trošila na brodu	233
6.3.1. Osnovne definicije	233
6.3.2. Svjetlosne veličine i jedinice	235
6.3.3. Električni izvori svjetlosti na brodu	237
6.3.3.1. Izvori svjetlosti sa žarnom niti	239
6.3.3.2. Izvori svjetlosti na električno pražnjenje	243
6.3.4. Svjetiljke na brodu	250
6.3.5. Brodska rasvjeta	252
6.3.5.1. Opća ili normalna rasvjeta	253

6.3.5.2. Pomoćna rasvjeta	253
6.3.5.3. Rasvjeta u opasnosti	254
6.3.5.4. Pojačana rasvjeta	254
6.3.5.5. Dekorativna rasvjeta	255
6.3.5.6. Signalno-navigacijska rasvjeta	255
6.4. Pitanja i zadaci za provjeru znanja	256
Električne i neelektrične veličine i jedinice	259
Literatura	269
Popis indcksa i oznaka	271

# I. UVOD

## I.1. Povijesni razvoj elektrifikacije broda

Elektrifikacija broda počinje s ugradnjom prve električne žarulje u teretni brod "COLUMBIA". Taj brod s 115 žarulja, izgrađen 1880. godine, i teretni brod "OREGON" s 500 žarulja, izgrađen 1883. godine, prvi su poznati primjeri iz povijesti brodogradnje kad je iskorištena električna energija na brodu. Od tada je primjena električne energije na brodu znatno narasla, pa je danas nezamisliv brod bez električnog pogona pomoćnih strojeva strojamice, palubnih strojeva, gospodarskih uređaja i uređaja radionice, te bez električnog grijanja, hlađenja, klimatizacije, navigacijskih uređaja, signalizacije, rasvjete i slično.

U prvoj fazi, kad je na brodu bio samo istosmjerni izvor, propulzija broda bila je stapni parni stroj, a svi pomoćni strojevi bili su na parni pogon. Prvi izvor električne energije na brodu bio je dinamo (generator istosmjerne struje), ugrađen 1880. godine, a 1896. godine brod je dobio kao rezervu akumulatorsku bateriju.

U drugoj fazi, kad se na brodu počelo koristiti i generatorom izmjenične struje, propulzija broda prešla je s parnih na dizelske motore, a pomoćni strojevi sve više su na električni pogon. Tako je 1914. godine na putničkom brodu "WATERLAND" ugrađeno 15 000 žarulja, kojima je, zajedno s ostalim električnim trošilima na brodu, napon osiguravalo pet generatora ukupne snage 1.400 kW. Od 1918. do 1940. godine glavni izvor električne energije postaje alternator (izmjenični sinkroni generator), koji sve više potiskuje istosmjerni izvor, pa kao trofazni sinkroni generator, od 1955. godine, postaje najvažnijim odgovorom na velike zahtjeve pri osiguravanju energije za razna brodska trošila.

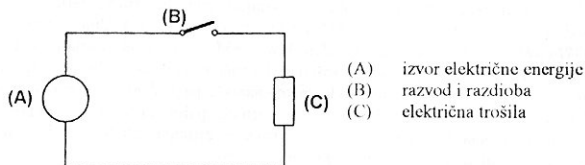
Od 1965. godine do danas, a posebno u novije doba, izvedbe velikih trofaznih sinkronih samouzbuđenih kompaundiranih generatora, s vrlo brzom regulacijom napona, osiguravaju električnu energiju svim elektromotornim pogonima na brodu, uz posebnu mogućnost ugradnje velikih trofaznih asinkronih motora, dok istosmjerni izvor postaje pomoćni izvor na brodu ili se zadržao kao osnovni izvor na malim brodovima.

S ugradnjom sve većeg broja električnih trošila na brodu znatno su se usavršili sklopni uređaji i aparati, brodska mreža postala je složenija, a nagli razvoj i visoki stupanj brodske elektronike, ubrzali su prijelaz od neautomatiziranog prema poluautomatiziranom ili potpuno automatiziranom sustavu napajanja i razvodu električne energije. To je razlog da se bitno smanjio broj posade, ljudski faktor postao je manje važan (produžila se životna dob strojeva), povećana je sigurnost pogona, omogućena je ekonomičnija plovidba i, općenito, olakšan je život posade na brodu, a putnicima je pružena veća udobnost pri plovidbi.

Povijesni razvoj elektrifikacije broda pratila je velika skrb za povećanu sigurnost i zaštitu života posade i putnika. Zbog toga su doneseni mnogi međunarodni propisi i propisi pojedinih pomorskih država koji se u načelu svode na to da se svi ugrađeni električni strojevi, uređaji i aparati, odnosno ukupna brodska električna instalacija moraju izvesti tako da i u najtežim uvjetima plovidbe rade pouzdano i da nisu opasni za posadu i putnike.

## 1.2. Brod kao zatvoreni električni strujni krug

Svaki brod može se promatrati kao zatvoreni električni strujni krug koji ima svoj izvor i trošila te elemente koji ih spajaju, uključuju ili isključuju, reguliraju, zaštićuju i njima upravljaju. Na slici 1.2.1. predočena je shema takva strujnog kruga.



Sl. 1.2.1. Pojednostavnjena shema brodskega električnog strujnog kruga

*Izvori* električne energije na brodu (A) mogu biti: generatori, akumulatorske baterije, solarne ćelije, električni pretvarači i priključak na kopno.

Osnovni izvor električne energije na brodu čine *generatori*. U početku bili su to istosmjerni generatori, a njih su zamijenili izmjenični generatori, odnosno trofazni samouzbudni sinkroni generatori. Danas se u brodove najčešće ugrađuju trofazni samouzbudni kompaundirani beskontaktni generatori, kojima se postiže zadovoljavajuća brzina regulacije napona i frekvencije i stabilnost rada neovisno o mogućim naglim velikim opterećenjima trošila na brodske mreže.

Ovisno o vrsti pogona brodskega generatora, razlikuju se dizelski, osovinski i turbinski generatori, a sva proizvodnja električne energije na brodu obavlja se na jednomu mjestu u električnim centralama ili s pomoću pojedinačnih agregata.

Budući da mnoga brodska trošila izmjenične struje moraju raditi pri različitim naponima, odnosno pri naponima koji su (obično) manji od napona izvora (generatora), to za takve potrebe služe jednofazni ili trofazni brodski *energetski transformatori*. Osim njih u brodove se ugrađuju i mjerni transformatori, kojima je, preko mjernih instrumenata, moguće neizravno mjeriti jake struje (*strujni mjerni transformatori*) ili visoke napone (*naponski mjerni transformatori*).

Manja količina energije na brodu dobiva se iz *akumulatorskih baterija* (olovni ili kiselinski akumulatori i čelični ili alkalijski akumulatori). Oni služe kao izvor istosmjerne električne energije za: pričuvu, za napajanje pokretača motora s unutarnjim izgaranjem, kao izvori u spoju s osovinskim generatorom, na manjim jedinicama za napajanje brodske mreže za vrijeme mirovanja u luci, za neprekidno napajanje elektroničkih uređaja za potrebe navigacije, komunikacije, automatike, alarma i slično. Istosmjerni napon može se na brodu osigurati i preko *ispravljača (usmjerivača)*. To su obično silicijski ispravljači u jednofaznom ili trofaznom Graetsovom spoju, odnosno danas najčešće upotrebljavani tiristorski ispravljači u mosnom spoju.

*Priključak na kopno* brodu služi kad se nalazi u brodogradilištu ili u luci (kad ne rade generatori). Pri tome dovod s kopna može zadovoljiti samo minimalne potrebe na brodu (obično polovicu snage pomoćnog, odnosno lučkoga generatora).

Dimenzioniranje izvora električne energije na brodu određuje se tzv. bilancom električne energije. Potrebna instalirana snaga izvora električne energije izračunava se uzimajući u obzir različita brodska pogonska stanja (plovidbu, manevar, uplovljavanje, isplavljanje, ukrcaj i iskrcaj tereta, mirovanje u luci i slično), zone plovidbe (hladne i tople), dnevnu plovidbu (dan i noć), te uzimajući u obzir tehničke i iskustvene podatke (priključnu snagu trošila, faktor opterećenja, faktor istodobnosti, pad napona, odnosno gubitke u mreži i slično).

*Razvod i razdiobu* električne energije na brodu (B) omogućuju vodovi i kabeli, kabelska mreža s priključnim priborom te sklopni uređaji i aparati.

Sva proizvedena električna energija na brodu od izvora do trošila prenosi se vodovima i kabelima, odnosno kabelskom mrežom i priključnim priborom. Sustav razdiobe električne energije može biti:

a) za istosmjernu struju:

- jednovodni (s uporabom broskog trupa kao povratnog vodiča - samo za napon do 50 V),
- dvovodni izolirani (s dva izolirana voda na koje je priključeno trošilo),
- trovodni (koji ima dva izolirana voda (krajnja), a umjesto trećega (srednjeg) služi brodski trup);

b) za jednofaznu izmjeničnu struju:

- jednovodni (s uporabom broskog trupa kao povratnog vodiča - samo za napon do 50 V),
- dvovodni izolirani (s dva izolirana voda na koje je priključeno trošilo);

c) za trofaznu izmjeničnu struju:

- trovodni izolirani (s tri izolirane faze),
- trovodni s uzemljenim zvjezdištem (s tri izolirane faze),
- trovodni izolirani (s tri izolirane faze i nul-vodom),
- trovodni s uzemljenim nul-vodom (s tri izolirane faze i nul-vodom koji je priključen na zvjezdište izvora).

Za razvod električne energije na tankerima mogu se primijeniti samo sustavi:

- dvovodni izolirani za istosmjernu struju,
- dvovodni izolirani za jednofaznu izmjeničnu struju,
- trovodni izolirani za trofaznu izmjeničnu struju

Središnje mjesto električnog sustava na brodu jest glavna sklopna ploča, jer se na nju dovodi električna energija iz generatora (ili transformatora) i odvodi prema trošilima izravno ili preko ostalih sklopnih uređaja kao što su: pomoćne sklopne ploče, uputnici, razdjelnici, upravljački ormari i pultovi. Ti sklopni uređaji osim različitih konstrukcijskih dijelova sadrže sklopne aparate, tj. sklopke, pokretače, programatore, osigurače i regulacijske elemente (okidače i releje), električne mjerne uređaje (mjerne transformatore i instrumente) te električnu i svjetlosnu zvučnu signalizaciju.

*Trošila* električne energije na brodu (C) mogu se podijeliti na elektromotorni pogon, toplinska trošila, električnu rasvjetu te na navigacijske i komunikacijske uređaje.



Na trgovačkim brodovima srednjih veličina oko 80% potrošnje električne energije otpada na elektromotorne pogone pomoćnih strojeva (sidrena i pritezna vitla, dizalice, pumpe, kompresore i slično) i na pogon gospodarskih uređaja. Za grijanje i hlađenje te toplinska trošila troši se cca 15%, za rasvjetu (opću ili normalnu, pomoćnu, pojačanu i dekorativnu rasvjetu i rasvjetu za nuždu) 3 - 4%, a za napajanje navigacijskih i komunikacijskih uređaja 1 - 2%.

Na putničkim brodovima računa se prosječno za elektromotorni pogon oko 75% električne energije, za grijanje i hlađenje 12%, za rasvjetu 11% i 2% za sva ostala trošila.

Na temelju ovako jednostavnog prikaza elemenata zatvorenoga električnog strujnog kruga može se pretpostaviti s kojim se problemima valja suočiti pri uporabi električne energije na brodu. Zbog toga su u ovom udžbeniku opisani brodski elektromehanički i električni pretvarači energije kojima se koristi kao izvorima i trošilima električne energije, dok su razvod i razdioba električne energije opisani u drugom udžbeniku.

### 1.3. Neke specifičnosti za brodske električne strojeve

Brodski električni strojevi, odnosno generatori i motori uglavnom se u pogledu pogonskih karakteristika ne razlikuju od strojeva za sličnu primjenu na kopnu. Zbog toga se načelna teoretska razmatranja električnih strojeva mogu primijeniti i u ovom slučaju.

Svi brodski električni strojevi priključeni su uglavnom izravno na strojeve koje pogone ili koji ih pogone. Uporaba remena je rjeda, i to samo za osovinske generatore i kompresore. Manji i srednji agregati na zajedničkom su postolju, a veći imaju posebne temelje koji su dio brodske konstrukcije.

Kućišta električnih strojeva uglavnom su zavarena, od lijevanog su željeza i robustne izvedbe, ali su dopušteni i motori s kućištima od lakih metala otpornih na morsku vodu i pogodno zaštićeni od korozije, tako da se postiže ušteda na težini i do 25%. Na najnižim mjestima moraju imati otvore za istjecanje kondenzata, a protiv rošenja često se ugrađuju električni grijači koji se automatski uključuju kad strojevi prestanu raditi.

Ljuljanje, posrtanje broda na valovima i neizbježive vibracije zahtijevaju posebna mehanička rješenja i učvršćenja. Zbog brodskih vibracija ležaji stroja koji miruje dodatno su opterećeni, pa su ponekad posebno mehanički blokirani. Radi manjeg dodatnog opterećivanja ležaja vodoravni strojevi moraju se smjestiti paralelno s brodom uzdužnom osi.

Generatori su obično jednoležajni radi manjih dimenzija čitavog agregata i manjih torzijskih napona osovine generatora koji nastaju zbog nejednolikog hoda dizelskog motora. Elektromotori mogu imati vodoravnu ili okomitu osovinu. Okomiti elektromotori najčešće se rabe za pogon: pumpa, kompresora, kormilarskih uređaja, sidrenog vitla itd. Brodski palubni strojevi, zbog specifičnih uvjeta rada i montaže na palubi, imaju posebne karakteristike, oblike i zaštitu.

Prostorije u kojima su smješteni električni strojevi moraju se dobro ventilirati da se u njima ne bi skupljali zapaljivi plinovi, a sami strojevi moraju biti dovoljno

udaljeni od zapaljivih materijala (u okomitom smjeru 120 cm, a u vodoravnom 30 cm).

Svaki električni stroj također mora imati mehaničku zaštitu od prodiranja ulja i uljnih para, a dijelovi pod naponom moraju se osigurati od slučajnog dodira ako je istosmjerni napon veći od 120 V ili efektivna vrijednost faznog napona veća od 50 V. Svi strojevi moraju se solidno uzemljiti (spojiti na glavnu brodsku masu).

Brzina vrtnje električnih strojeva ovisi o njihovoj namjeni. Danas se sve više rabe strojevi s većim brzinama vrtnje jer imaju male dimenzije i malu težinu. Najčešće su u upotrebi oni koji imaju pri 50 Hz sinkrone brzine vrtnje 1000 i 1500  $\text{min}^{-1}$  ili pri 60 Hz 1200 i 1800  $\text{min}^{-1}$ .

Svi dijelovi električnih strojeva koji vode struju moraju biti od bakra ili od mesinga, a svi ostali dijelovi od nerđajućeg materijala ili prevučeni zaštitom od korozije (galvanskim metalnim slojem ili lakom). Radi uklanjanja radio-smetnja moraju se strojevi koji iskre blokirati na odgovarajući način.

Radi povećanja sigurnosti broda i zaštite života posade i putnika doneseni su posebni propisi za gradnju i izvedbu električnih strojeva. U skladu s Međunarodnom konvencijom o sigurnosti života na moru i Hrvatska je donijela svoje propise (HRB - Hrvatski registar brodova) kojima se propisuje kako električni strojevi mogu i u najtežim uvjetima plovidbe pouzdano raditi.

#### 1.4. Pitanja i zadaci za provjeru znanja

Uz točku 1.1.:

1. Kada počinje elektrifikacija broda?
2. Koji je prvi izvor električne energije ugrađen u brod?
3. Kojim se danas sustavom električne energije na brodu koristi?

Uz točku 1.2.:

1. Promatra li se brod kao zatvoreni električni strujni krug, koji su osnovni dijelovi toga kruga?
2. Kako se mogu podijeliti izvori električne energije na brodu?
3. Što čini razvod i razdiobu električne energije na brodu?
4. Kako se mogu podijeliti trošila električne energije na brodu?

Uz točku 1.3.:

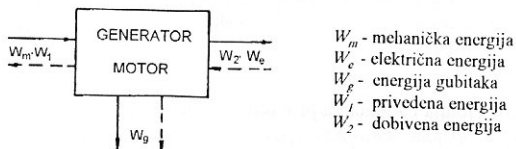
1. Što propisuje Hrvatski registar brodova (HRB) za električne strojeve na brodu?
2. Razlikuju li se električni strojevi na brodu od onih za slične primjene na kopnu u pogledu pogonskih karakteristika?
3. Koju mehaničku i električnu zaštitu moraju imati električni strojevi na brodu?

## 2. OSNOVE ELEKTRIČNIH STROJEVA

### 2.1. Osnovna podjela električnih strojeva

Električni strojevi pretvaraju jedan oblik energije u drugi oblik na načelu elektromagnetske indukcije. Iz toga se može zaključiti da barem jedna od energija mora biti električna. Pri tom pretvaranju jedan dio energije prelazi u toplinsku, koja nepovratno odlazi u okolni prostor. Taj je dio zauvijek izgubljen za proces pretvaranja, pa se zove gubitak energije.

Pod električnim strojevima u užem smislu uvijek se misli samo na one u kojima se elektromehaničko pretvaranje energije obavlja posredovanjem mehaničkog (obično rotacijskog) gibanja. Ovisno o pretvorbi energije iz jednog oblika u drugi, takav električni stroj može raditi kao generator ili motor, kako je shematski predočeno na slici 2.1.1.



Sl. 2.1.1. Shematski proces pretvorbe energije u električnom stroju

*Električni generatori* su strojevi koji pri svome radu pretvaraju mehaničku energiju u električnu. Mehaničku energiju dobivaju na svoje vratilo od pogonskog stroja (na brodu je to parna ili plinska turbina, dizelski motor, osovina propelera), a električnu energiju predaju trošilima preko svojih stezaljki (priključnica).

*Električni motori* su strojevi koji pri svome radu pretvaraju električnu energiju u mehaničku. Električna energija dovodi se na motorne stezaljke (priključnice) iz električne mreže, ili iz posebnog izvora. Mehanička energija predaje se s kraja vratila preko spojke, remena ili zupčanika pokretanom radnom stroju, odnosno mehanizmu.

Posebni tip električnih strojeva su *električni pretvornici (pretvarači)*. To su rotacijski strojevi koji pri svome radu pretvaraju električnu energiju jednih parametara u električnu energiju drugih parametara na načelu elektromagnetske indukcije. U njima se električna energija pretvara ponovno u isti oblik, ali se mijenjaju neke karakteristike (npr. vrsta struje, napona ili frekvencija i slično).

U električne strojeve u širem smislu ubrajaju se i *električni transformatori* iako nemaju pokretnih dijelova. To su statičke naprave koje pri svome radu pretvaraju električnu energiju jednih parametara u električnu energiju drugih parametara.

Posebni električni uređaji u kojima se, jednako kao i u transformatoru, električna energija pretvara u električnu, zovu se *ispravljači (usmjerivači)*. Za razliku od transformatora u njima se struja ispravlja, tj. izlaznu električnu energiju karakterizira istosmjerni napon i struja za razliku od ulazne, koju karakterizira

izmjenični napon i struja. Proces u ispravljačima redovito nije reverzibilan, ali se reverzibilnost postiže posebnim spojevima (*invertori*).

Ovisno o pretvorbi energije iz jednog oblika u drugi, u tablici 2.1.1. naznačene su vrste električnih strojeva kojima se obavlja pretvorba.

Tabl. 2.1.1. Pretvorba energije u električnom stroju.

Električni stroj	Oblik privedene energije	Oblik dobivene energije
GENERATORI	mehanička	električna
MOTORI	električna	mehanička
PRETVORNICI i TRANSFORMATOR	električna	električna

Električni strojevi rabe se ili pojedinačno ili kombinirano u skupini. U kombiniranoj uporabi razlikuju se motorgeneratori, kaskade i električne osovine.

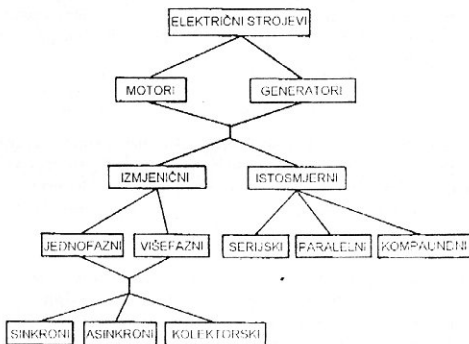
*Motorgenerator* se sastoji od motora i jednog ili više generatora izravno vezanih mehanički. Motor je obično izmjenični, a generator istosmjerni stroj.

*Kaskada* je sastavljena od dva rotacijska stroja koja su međusobno električki i mehanički spojena. Takve kaskade obično služe za pogone promjenljive brzine vrtnje.

*Električna osovina* je takva kombinacija električnih strojeva u kojoj su oba stroja napajana iz iste mreže, a sekundarni su namoti međusobno električki povezani. Na taj način ostvaruje se potpuna podudarnost u vrtnji obaju strojeva.

Osim spomenutih strojeva razlikuju se i razni specijalni strojevi, kao npr. *amplidini, selsini, tahogeneratori* itd.

Redovito se pod električnim strojevima misli samo na *rotacijske električne strojeve*. Oni se mogu podijeliti s obzirom na vrstu struje, načine napajanja i prema načelu rada, a osnovna shema podjele vidi se na slici 2.1.2.



Sl. 2.1.2. Shema podjele (rotacijskih) električnih strojeva

Prema vrsti struje električni strojevi mogu biti istosmjerni i izmjenični.

*Istosmjerni (kolektorski) stroj* je onaj kojemu kroz priključne vodove teče istosmjerna struja, iako kroz armaturni namot teče izmjenična. Kroz uzbudni namot

tih strojeva također teče istosmjerna struja. Prema vrsti uzbude dijele se na *ovisno* i *neovisno* uzbuđene, a ovisno uzbuđeni strojevi, prema spoju uzbuđnog namota, mogu biti *serijski*, *paralelni* i *kompaundni* (mješoviti).

*Izmjenični stroj* je onaj kojemu kroz priključne vodove teče izmjenična struja. Prema izvedbi mogu biti *jednofazni* i *višefazni*, a ti se dalje dijele prema principu rada i pogonskim karakteristikama na *sinkrone*, *asinkrone* i *kolektorske*. U sinkronih strojeva teče kroz uzbuđni namot istosmjerna struja, a kroz armaturni (radni) namot izmjenična struja. U asinkronih i kolektorskih strojeva izmjenične struje teče kroz oba namota izmjenična struja. S obzirom na brzinu vrtnje rotora, frekvencije struja obaju namota obično su različite.

Svaki od spomenutih izmjeničnih strojeva može se dalje podijeliti s obzirom na izvedbu rotora (rotor s istaknutim polovima ili cilindrični rotor u sinkronih strojeva, kavezni ili kolutni rotor u asinkronih strojeva) ili s obzirom na spoj i način napajanja u kolektorskih strojeva.

Osim dane podjele električni strojevi mogu se još podijeliti prema drugim kriterijima. Tako se razlikuju strojevi prema: izvedbenom obliku, mehaničkoj zaštiti, načinu hlađenja, nazivnoj brzini vrtnje, veličini, načinu pokretanja itd.

Za električne strojeve karakteristična su zajednička svojstva:

a) mogu raditi u oba smjera pretvorbe električne energije, tj. rad električnih strojeva je *reverzibilan*. To znači da će električni rotacijski stroj kojemu se dovodi mehanička energija, davati uz određene uvjete električnu energiju i raditi kao generator, a ako se tom istom stroju dovodi električna energija, on će davati uz određene uvjete mehaničku energiju i raditi će kao motor. Jednako tako, jednoarmaturni pretvornik ovisno o smjeru energije pretvara izmjenični napon u istosmjerni, i obratno, a transformator može transformirati niži napon na viši, ili obratno, ovisno o priključku transformatora, odnosno smjeru energije;

b) iz stroja dobivena energija manja je od stroju privedene energije. Samo u idealnom slučaju (za idealne strojeve) bila bi privedena energija  $W_1$  jednaka dobivenoj energiji  $W_2$ , tj. vrijedi da je:

$$W_1 = W_2. \quad (2.1)$$

U realnim strojevima uvijek se dobiva nešto manje korisne energije od one koja se stroju privodi. Razlog tomu je taj što materijal od kojeg su strojevi izrađeni ne vodi idealno dobro električnu struju i magnetske silnice, a također pri rotaciji strojeva javlja se trenje, pa nastaju gubici energije  $W_g$ . U tom slučaju vrijedi da je:

$$W_2 = W_1 - W_g. \quad (2.2)$$

Razumije se da gubitak energije  $W_g$  nije nestao. On je samo izgubljen pri transformaciji, jer se nije pretvorio u onaj oblik energije koji se od stroja želio dobiti.

Za rad električnih strojeva od neobične je važnosti da gubitak energije  $W_g$  bude što manji poradi ekonomskih razloga i životne dobi električnog stroja.

Jedna od veličina koja karakterizira ekonomičnost stroja je njegov *stupanj iskoristivosti* (*korisnost*), koji je definiran kao:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1}. \quad (2.3)$$

U idealnog stroja taj je odnos jednak jedinici ili, izražen u postocima, korisnost mu je 100 %-na. U realnog stroja korisnost je manja od jedan i određuje se prema:

$$\eta = \frac{W_1 - W_R}{W_1} = 1 - \frac{W_R}{W_1} \quad (2.4)$$

Za električne strojeve korisnost se može izraziti omjerom dobivene (predane)  $P_2$  i privedene (primljene)  $P_1$  snage:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} < 1. \quad (2.5)$$

Mjerenje električne snage jednostavnije je od mjerenja mehaničke snage, pa se obično korisnost računa s pomoću električne snage  $P_1$  (za motor), odnosno snage  $P_2$  (za generator) i gubitaka snage  $P_g$ . Korisnost motora je:

$$\eta_m = \frac{P_1 - P_g}{P_1} = 1 - \frac{P_g}{P_1}, \quad (2.6)$$

a korisnost generatora:

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_2 + P_g} = 1 - \frac{P_g}{P_2 + P_g}. \quad (2.7)$$

Iako realni električni strojevi imaju gubitke, oni su ipak vrlo ekonomični strojevi. Kod njih se postiže, u odnosu na druge strojeve, vrlo povoljna korisnost, koja u transformatora najvećih snaga iznosi i do 0,99, kod najvećih rotacijskih strojeva nešto je manja, a u strojeva srednje snage iznosi približno 0,95.

*Životna dob* električnog stroja bit će zadovoljavajuća ako se on pri eksploataciji ne zagrijava iznad dopuštene nadtemperature. Gubici energije  $W_g$  koji nastaju u električnom stroju pretvaraju se pretežito u toplinu, zbog koje se povisuje temperatura stroja. Da bi se spriječilo brzo "starenje" izolacije namota električnih strojeva, i time osigurala njegova životna dob, moraju se električni strojevi hladiti.

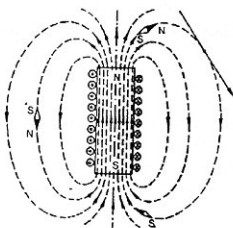
Gubici u stroju koji se pretvaraju u toplinu mogu nastati na raznim mjestima. Ti su gubici:

- električni gubici zbog prolaska struje kroz namot određenog otpora; to su tzv. *gubici u bakru (u namotu)*;
- gubici u magnetskom krugu zbog pojave histereze i vrtložnih struja; to su *gubici u željezu*,
- gubici u izolaciji koji se pojavljaju kod vrlo visokih napona, pa se uzimaju u obzir samo u transformatora najvećih snaga i vrlo visokih napona; to su tzv. *dielektrički gubici*,
- mehanički gubici koji nastaju u rotacijskih strojeva; to su *gubici trenja i ventilacije*.

## 2.2. Teorija električnih strojeva

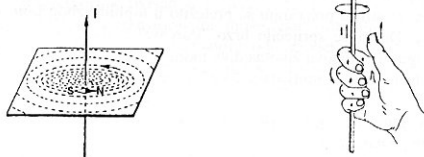
Poznato je da električna struja nastaje u vodiču zbog napona, tj. zbog razlike potencijala koja vlada između pojedinih točaka na vodiču. Istodobno će se zbog te potencijalne razlike u okolišnom izolacijskom prostoru oko vodiča stvoriti električno polje. Kad kroz vodič prolazi električna struja, stvorit će se u okolišu vodiča (i u samome vodiču) i magnetsko polje. Ta su polja dvije komponente rezultirajućeg polja koje se zove *elektromagnetsko polje*.

Predodžbu o magnetskom polju u okolišu elektromagneta moguće je dobiti tako da se ispituje prostor oko elektromagneta. To polje predočeno je magnetskim silnicama, tj. crtama koje su same u sebe zatvorene bez ikakva početka i svršetka, kako se vidi na slici 2.2.1.



Sl. 2.2.1. Magnetske silnice elektromagneta

Oblik magnetskog polja, odnosno magnetskih silnica, ovisi o obliku vodiča kojim protječe električna struja, njegov smjer ovisi o smjeru struje, a njegova jakost o jakosti kroz  $I$ , broju zavoja  $N$  i o srednjoj dužini silnica  $l$ . Na slici 2.2.2. predočen je oblik magnetskog polja ravnog vodiča protjecanog strujom i način određivanja smjera tog polja prema pravilu prstiju desne ruke.

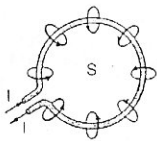


Sl. 2.2.2. Magnetsko polje ravnog vodiča protjecanog strujom

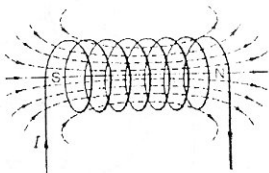
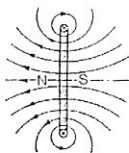
Budući da magnetsko polje naglo slabi što je veća udaljenost od vodiča kojim protječe struja, u praksi se za stvaranje jakih magnetskih polja ne rabe ravni vodiči. Ako se umjesto ravnog vodiča protjecanog strujom uzme vodič savinut u jedan zavoaj, prilike se bitno mijenjaju. U tom će slučaju sve magnetske silnice biti prisiljene da prolaze kroz površinu  $S$  što je okružuje zavoaj, jer se ni jedna silnica ne može zatvoriti izvan te površine. Time je gustoća silnica na površini  $S$  znatno povećana, pa se dobiva znatno jače magnetsko polje. Još jače magnetsko polje dobit će se ako se umjesto jednog zavoaja uzme svitak s  $N$  zavoja. Tu se magnetska polja svih zavoja potpomažu pa je jakost ukupnog polja rezultat djelovanja svih zavoja. Ako su zavoji gusto namotani jedan do drugoga, magnetske silnice su paralelne i jedino u sredini unutar svitka predočuju homogeno polje. Izvan svitka se razilaze na sve strane, pa je izvan svitka polje nehomogeno.

Oblici i smjerovi magnetskih polja zavoja i svitka protjecanih električnom strujom predočeni su na slici 2.2.3.

a)



b)



Sl. 2.2.3. Oblik i smjer magnetskog polja: a) zavoja i b) svitka protjecanih električnom strujom

Opisana tri primjera magnetskih polja što ih je stvorila struja prolazeći kroz različito oblikovane vodiče, pružaju samo kvalitativan uvid u odnos struje i stvorenog magnetskog polja. Da bi se spoznali kvantitativni odnosi između jakosti struje kao uzroka i magnetskog polja kao posljedice, treba obaviti razna mjerenja. Pri tome valja znati da veliku teškoću pri mjerenju prčinja nehomogenost magnetskog polja, koja je karakteristična za električne strojeve.

Rad električnih strojeva temelji se na trima osnovnim zakonima elektrotehnike: o elektromagnetskoj indukciji, o elektromagnetskom protjecanju i o sili na vodiče u magnetskom polju.

## 2.2.1. Zakon elektromagnetske indukcije

*Elektromagnetska indukcija* je pojava da se u zatvorenoj konturi (zavoju) stvara ili inducira napon  $e$  ako se mijenja magnetski tok  $\Phi$  što ga obuhvaća ta kontura. Veličina tog napona ovisi samo o brzini kojom se mijenja magnetski tok, pa se prema tome može izraziti jednačinom:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.8)$$

Značenje predznaka minus u toj jednačini objašnjava *Lenzov zakon*, koji kaže da je smjer induciranog napona uvijek takav da se od toga napona stvorena struja svojim magnetskim učinkom protivi promjeni magnetskog toka  $d\Phi$ , zbog kojeg je došlo do induciranja napona.

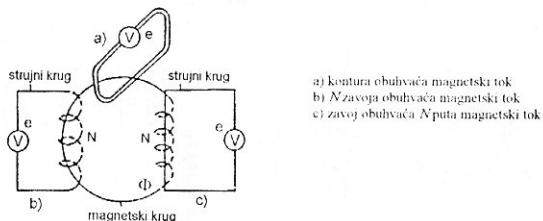
Ako kontura ima  $N$  zavoja ili ako magnetski tok prođe kroz istu konturu  $N$  puta, tada kroz plohu omeđenu tom konturom (svitak) prolazi ulančeni magnetski tok  $\Psi = N\Phi$ , pa je u tom slučaju inducirani napon:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.9)$$

Izraz (2.9) predstavlja *Faradayev zakon*, koji kaže da je inducirani napon u strujnom krugu jednak brzini kojom se mijenja magnetski tok ulančeni strujnim krugom.



Na slici 2.2.4. predložen je način induciranja napona.



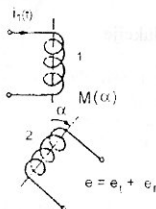
Sl. 2.2.4. Način induciranja napona

Opći oblik zakona elektromagnetske indukcije ne pokazuje kako nastaju promjene magnetskog toka. Te se promjene mogu ostvariti:

a) pri konstantnom iznosu magnetskog toka i gibanju strujnog kruga u odnosu na magnetski. U električnih strojeva gibanje je uglavnom rotacijsko, pa se napon induciran takvom promjenom magnetskog toka zove *napon rotacije*;

b) promjenom uzbudne struje koja stvara promjenljivo magnetsko polje uz mirovanje magnetskog kruga u odnosu na strujni krug. Napon induciran takvom promjenom magnetskog toka zove se *napon transformacije*. Na tom načelu zasniva se rad transformatora.

Postoje strojevi i prijelazna stanja u kojima se induciraju naponi na oba načina. To se pojednostavljeno može objasniti prema slici 2.2.5.



Sl. 2.2.5. Induciranje napona transformacije i rotacije

Dva strujna kruga, 1 i 2, na slici 2.2.5., međusobno su povezana međusobno induktivitetom  $M$ , pri čemu je krug 1 protjecan strujom  $i_1(t)$ , a krug 2 može mijenjati položaj u odnosu na krug 1. Ukupni ulančeni magnetski tok  $\Psi$  u krugu 2 koji nastaje djelovanjem struje  $i_1(t)$  u krugu 1, može se izraziti s pomoću međusobne induktiviteta  $M$  (ovisi o geometrijskim odnosima između ta dva strujna kruga, a nije ovisan o struji), pa je:

$$\Psi = M i_1(t). \quad (2.10)$$

Prema (2.9) inducirani napon u krugu 2 iznosi:

$$e = - \frac{d\mathcal{P}}{dt} = - M \cdot \frac{di_1}{dt} - i_1(t) \cdot \frac{dM}{dt} = e_t + e_r. \quad (2.11)$$

Prvi član u (2.11) je *napon transformacije*  $e_t$ , koji se inducira samo onda kad uzbudna struja nije konstantna, a drugi član je *napon rotacije*  $e_r$ , koji se inducira samo onda ako geometrijski odnosi jednog kruga prema drugom nisu konstantni.

Napon transformacije javlja se između ostalog i kod prolaska izmjenične sinusoidne struje kroz namot. Efektivni iznos inducirano napona  $E$  računa se tad iz:

$$E_{\max} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = \Phi_{\max} \cdot \cos \omega t$$

$$E_{\max} = N \cdot \omega \cdot \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t$$

$$E_{\max} = N \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t$$

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t$$

pa konačno iznosi:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi, \quad (2.12)$$

gdje je  $\Phi = \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t$  magnetski tok,  $f$  je frekvencija, a  $N$  broj zavoja u namotu.

Napon rotacije nastaje pri relativnom gibanju vodiča (zavoja ili svitka) u odnosu na magnetski tok. Pri tome je svedjedno giba li se vodič (zavoj ili svitak), a magnetski tok miruje, ili obratno. Također valja znati da se napon inducira samo na onom dijelu vodiča (zavoja ili svitka) kojim je taj vodič (zavoj ili svitak) presijecao magnetske silnice, a ostali dijelovi, koji nisu u dodiru sa silnicama magnetskog toka, ili samo klize uz silnice, ali ih ne sijeku, smatraju se neaktivnim u procesu induciranja napona.

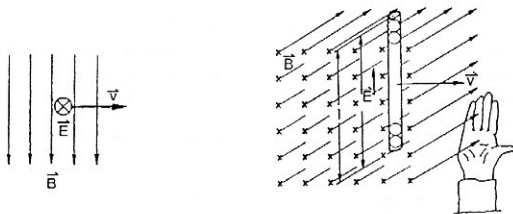
Ako se vodič dužine  $l$  giba brzinom  $v$  u homogenom polju magnetske indukcije  $B$ , tada je iznos i smjer inducirano napona ovisan o usmjerenim vektorskim veličinama  $v$ ,  $B$  i  $l$ , i može se napisati u vektorskom obliku:

$$E = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}. \quad (2.13)$$

Budući da su u električnih strojeva redovito tri vektora iz (2.13) međusobno okomita, može se za inducirani napon koristiti skalarnom jednažbom:

$$E = B \cdot l \cdot v. \quad (2.14)$$

Smjer inducirano napona  $E$  u (2.14) određuje se *pravilom desne ruke*, kako je predočeno na slici 2.2.6.: postavi li se desna ruka tako da magnetske silnice ulaze u dlan, a ispruženi palac označuje smjer brzine, tada preostali ispruženi prsti pokazuju smjer inducirano napona.



Sl. 2.2.6. Određivanje smjera induciranog napona

U općenitom slučaju, ako je vodič bilo kakva oblika i ako se giba u nehomogenom magnetskom polju, (2.13) i (2.14) treba primijeniti na infinitezimalno mali dio vodiča  $d\vec{l}$  u kojem je, dakako, onda induciran samo jedan dio napona  $dE$ . I tu je smjer induciranog napona  $dE$  u svakom elementu  $d\vec{l}$  određen Lenzovim zakonom, a budući da taj smjer ovisi o usmjerenim vektorskim veličinama  $v$ ,  $B$  i  $l$ , može se napisati da je:

$$dE = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}. \quad (2.15)$$

Za cijelu zatvorenu konturu  $I$  bit će inducirani napon u svakom trenutku jednak zbroju svih elementarnih napona:

$$E = \oint_I (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}. \quad (2.16)$$

## 2.2.2. Zakon protjecanja

Između električnih i magnetskih pojava postoji uska povezanost, tj. nema električnih pojava bez magnetskih, i obratno. Električne struje i magnetski tokovi povezani su zakonom protjecanja.

Poznato je da se prolaskom struje kroz ravni vodič stvara u vodiču i oko njega magnetsko polje (vidi sliku 2.2.3.). Svakoj točki u tom magnetskom polju pripada određena *jakost magnetskog polja*  $H$ , koja je definirana i po smjeru i po iznosu.

Jakost homogenog magnetskog polja računa se iz izraza:

$$H = \frac{I \cdot N}{l}, \quad (2.17)$$

gdje je  $I$  jakost struje,  $N$  broj zavoja (za ravni vodič  $N = 1$ ), a  $l$  srednja dužina puta zatvaranja magnetskih silnica.

Može se zaključiti da je zbog magnetomotorne sile  $I \cdot N$  prostor oko vodiča magnetski uzbuđen, a mjera te uzbuđenosti u pojedinim točkama tog prostora je veličina  $H$ . Magnetomotorna sila će već prema permeabilnosti  $\mu$  prostora u promatranoj točki

toga prostora stvoriti magnetsko polje gustoće  $B$ . *Gustoća magnetskog polja*, odnosno *magnetska indukcija  $B$ , povezana je s magnetskom uzбудom  $H$  izrazom:*

$$B = \mu H. \quad (2.18)$$

Budući da je stvorena gustoća  $B$  vektor, a faktor  $\mu$  skalar, mora se i veličini  $H$  pripisati vektorski karakter, pa se (2.18) može pisati u obliku:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (2.19)$$

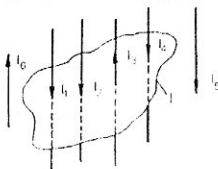
Iz (2.17) slijedi da je  $H \cdot l = I \cdot N$ , pri čemu lijeva strana tog izraza predstavlja *magnetski napon*  $V$ , koji djeluje na cijeloj dužini  $l$  magnetskog toka, tj.

$$V = H \cdot l. \quad (2.20)$$

U nehomogenim poljima mijenja se  $B$  po cijeloj dužini silnice, pa prema tome ima  $H$  od točke do točke različite vrijednosti. Jakost magnetskog polja, ili potrebna uzbuđa za stvaranje tog polja, može se odrediti *zakonom protjecanja* koji glasi: zatvoreni linijski integral magnetske uzbuđe  $H$  po bilo kakvoj zatvorenoj krivulji  $l$  jednak je algebarskom zbroju struja  $I$  obuhvaćenih tom krivuljom. Matematički izraženo taj se zakon može napisati:

$$\oint_l H dl = \int_S I dS = \Sigma I = \Theta. \quad (2.21)$$

Linijski integral  $\oint_l H dl$  zove se *magnetski napon nehomogenog polja*, a odnosi se na zatvorenu krivulju  $l$  plohe površine  $S$ . Plošni integral  $\int_S I dS$  gustoće struje  $I$  po površini  $S$  zove se *strujno protjecanje*  $\Theta$  i predstavlja zbroj svih struja obuhvaćenih promatranom zatvorenom krivuljom, kako je za jedan primjer predloženo na slici 2.2.7.



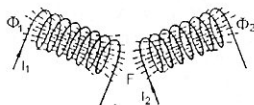
Sl. 2.2.7. Uz objašnjenje zakona protjecanja

Prema slici 2.2.7., struje  $I_1$ ,  $I_2$ , i  $I_3$  računale bi se s jednim predznakom, struja  $I_4$  sa suprotnim, dok se struje  $I_5$  i  $I_6$  ne bi uzimale u obzir jer su izvan konture  $l$ . S obzirom na pravilne geometrijske oblike električnih strojeva i s obzirom da obično kroz  $N$  zavoja teče ista struja  $I$ , zakon protjecanja daje se u jednostavnijem obliku:

$$\Sigma I l = I N = \Theta \quad (2.22)$$

### 2.2.3. Sile na vodiče u magnetskom polju

Medusobnim djelovanjem dvaju elektromagneta, kako je predočeno na slici 2.2.8., kojima kroz svitke prolaze struje  $I_1$  i  $I_2$ , stvorit će se sila  $F$ . Sila nastaje zbog toga što magnetski tokovi  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  svojim polovima na svicima djeluju jedan na drugoga prema poznatom pravilu da se istoimeni polovi odbijaju, a raznoimeni privlače.



Sl. 2.2.8. Načelni prikaz stvaranja sile  $F$  medusobnim djelovanjem dvaju elektromagneta

Kad su svici obaju elektromagneta oblikovani i u prostoru smješteni bilo kako, ne može se ukupna sila odrediti (izračunati) jednostavnim načinom. To ukupno djelovanje može se, međutim, shvatiti kao rezultat svih elementarnih sila kojima magnetsko polje jednog svitka djeluje na elemente vodiča drugog svitka koji su protjecani strujom.

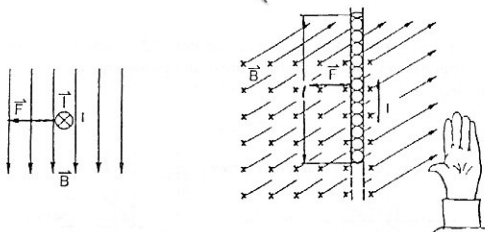
Osobito jednostavne i mjerenju pristupačne prilike dobivaju se ako se uzme samo jedan dio drugog svitka, i to ravni vodič dužine  $l$  koji se nalazi u homogenom magnetskom polju prvog svitka, te ako je vodič okomito položen na magnetske silnice. Sila kojom magnetsko polje djeluje na taj vodič protjecan strujom može se izmjeriti, pa pokusi pokazuju da je sila  $F$  izravno proporcionalna gustoći magnetskih silnica  $B$ , jakosti struje  $I$  koja prolazi kroz vodič i dužini  $l$  na kojoj je vodič u dodiru s magnetskim silnicama. Ta sila može se odrediti po veličini i smjeru iz vektorskog izraza:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}). \quad (2.23)$$

U električnih strojeva redovito su  $B$  i  $I$  medusobno okomiti pa se može upotrebljavati skalarna jednadžba:

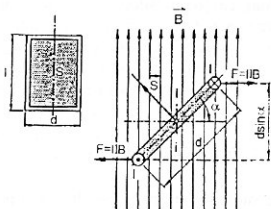
$$F = I \cdot B \cdot l. \quad (2.24)$$

Smjer sile okomit je na ravninu koju tvori smjer struje i smjer magnetskih silnica, a određuje se *pravilom lijeve ruke*, koje glasi: postavi li se lijeva ruka tako da magnetske silnice udaraju u dlan, a ispruženi prsti pokazuju smjer struje, onda ispruženi palac pokazuje smjer sile, kako je predočeno na slici 2.2.9.



Sl. 2.2.9. Određivanje smjera sile na vodič protječan strujom u magnetskom polju

Ako se u magnetsko polje umjesto ravnog vodiča postavi zavoj protječan strujom, na zavoj će djelovati moment vrtnje  $M$ , kako je prikazano na slici 2.2.10.



Sl. 2.2.10. Moment vrtnje koji djeluje na zavoj protječan strujom u magnetskom polju

Prema slici 2.2.10. moment vrtnje dobiva se iz izraza:

$$M = F \cdot d \cdot \sin \alpha, \quad (2.25)$$

gdje je sila  $F = I \cdot B \cdot l$ , pa je  $M = I \cdot l \cdot d \cdot B \cdot \sin \alpha$ , pri čemu je  $l \cdot d = S$  površina što je obavlja zavoj (kontura strujnog kruga), te (2.25) poprima oblik:

$$M = I \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha. \quad (2.26)$$

Usmjerenoj površini  $S$  može se pridati vektorski karakter, pa će biti:

$$M = I \cdot (\vec{S} \times \vec{B}). \quad (2.27)$$

### 2.3. Načelo rada elementarnog električnog stroja

Ako se primijeni (2.14) za inducirani napon i (2.24) za silu na vodič protječan električnom strujom u magnetskom polju, može se opisati načelo rada elementarnog stroja prema slici 2.3.1.



Sl. 2.3.1. Načelo rada elementarnog električnog stroja

Gibanjem vodiča (nekom vanjskom silom) brzinom  $v$  u polju magnetske indukcije  $B$  inducira se u vodiču napon  $E = B \cdot l \cdot v$  kojemu je smjer određen pravilom desne ruke. Ako je strujni krug zatvoren, poteci će struja  $I$  istog smjera kao što je inducirani napon, zbog čega se javlja sila  $F = I \cdot B \cdot l$ . Smjer sile (određen pravilom lijeve ruke) suprotan je smjeru gibanja vodiča (vidi sliku 2.3.1.a). U vremenu  $dt$  obavljen električni rad iznosi:

$$dW_e = E \cdot I \cdot dt = v \cdot B \cdot l \cdot I \cdot dt \quad (2.28)$$

Napon i struja djeluju u istom smjeru pa je obavljeni rad pozitivan. Istodobno će sila  $F$  obaviti mehanički rad koji je negativan (sila  $F$  djeluje suprotno gibanju vodiča):

$$dW_m = -F \cdot ds = -F \cdot v \cdot dt = -I \cdot l \cdot B \cdot v \cdot dt \quad (2.29)$$

Uspoređujući (2.28) i (2.29) vidi se da je:

$$dW_e = -dW_m \quad (2.30)$$

tj. dobiveni električni rad morao se dovesti mehaničkim gibanjem vodiča. To je princip rada generatora.

Ako se na krajeve vodiča priključi napon koji će protjerati struju u suprotnom smjeru od one na slici 2.3.1.a) (vidi sliku 2.3.1.b), stvara se sila  $F = I \cdot B \cdot l$  smjera suprotnoga onomu na slici 2.3.1.a) (prema pravilu lijeve ruke). Zbog djelovanja sile vodič se giba brzinom  $v$ , zbog čega se u njemu inducira napon  $E = B \cdot l \cdot v$  kojemu je smjer (određen pravilom desne ruke) suprotan smjeru struje, odnosno priključenom naponu. Inducirani napon je protunapon koji drži ravnotežu priključenom naponu. Posljedica toga je da je električni rad negativan, pa je:

$$dW_e = -E \cdot I \cdot dt = -v \cdot B \cdot l \cdot I \cdot dt \quad (2.31)$$

Međutim, dobiveni mehanički rad je pozitivan (sila  $F$  djeluje u smjeru gibanja vodiča) i iznosi:

$$dW_m = F \cdot ds = F \cdot v \cdot dt = I \cdot l \cdot B \cdot v \cdot dt. \quad (2.32)$$

Vidi se da opet vrijedi (2.30), odnosno može se pisati da je

$$-dW_e = dW_m, \quad (2.33)$$

tj. privedeni električni rad pretvorio se u mehanički. *To je načelo rada elektromotora (motora).*

Pri spomenutim pretvorbama pojavljuje se s jedne strane električna snaga:

$$P_e = E \cdot I = v \cdot B \cdot l \cdot I, \quad (2.34)$$

a s druge strane mehanička snaga:

$$P_m = F \cdot v = I \cdot l \cdot B \cdot v. \quad (2.35)$$

I jedna i druga snaga mogu se dovesti ili odvesti iz stroja ako postoji:

- *magnetsko polje* indukcije  $B$ ;
- *vodič* koji dužinom  $l$  leži u polju indukcije;
- mogućnost *relativnog gibanja* vodiča prema silnicama magnetskog polja nekom brzinom  $v$ ;
- *priključci* vodiča na vanjski strujni krug preko kojih se može vodiču dovesti ili od njega odvesti struja  $I$ ;
- *mehanički uređaj* za prijenos sila i momenata od vodiča do osovine, ili obratno.

U rotacijskom gibanju između snage  $P$  i energije  $W$  postoji odnos:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\vec{M} \cdot d\vec{\alpha}}{dt} = \vec{M} \cdot \vec{\omega}, \quad (2.36)$$

gdje je  $M$  moment vrtnje,  $\alpha$  kut zakreta, a  $\omega$  kutna brzina.

Budući da su u električnih strojeva vodiči smješteni na obodu rotora koji se može slobodno vrtjeti moment vrtnje  $M$  definiran je izrazom:

$$M = F \cdot r, \quad (2.37)$$

gdje je  $F$  sila na vodič, a  $r$  polumjer rotora.

Kutna brzina  $\omega$  mjeri se radijanima u sekundi (rad/s), jer brzina vrtnje  $n$  predstavlja  $n/60$  punih okretaja u jednoj sekundi, a svaki puni okretaj predstavlja  $2\pi$  radijana, tako da je:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (2.38)$$

Brzina kojom se vrti vodič na obodu relativno prema silnicama koje miruju, tzv. obodna brzina  $v$  (m/s), računa se iz činjenice da svaka točka oboda prevali pri jednom punom okretaju put  $D \cdot \pi$  ( $D = 2r$  je promjer rotora), pa je:

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (2.39)$$



Iz izraza (2.36) može se napisati da je:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2.40)$$

gdje je kut  $d\alpha$  iskazan u radijanima, pa je razumljivo da u svim računima te vrste kut treba uvrštavati u radijanima, bez obzira na to što je kut bezdimenzijska veličina (vidite prilog u udžbeniku).

Pri mehaničkom opterećenju motora mora se uzimati iz izvora električna energija kako bi se savladao moment tereta, dok se pri električnom opterećenju generatora pojavljuje mehanički protumoment na osovini, zbog čega se generatoru mora dovoditi mehanička energija.

Uspoređujući načelo rada generatora i motora prema slici 2.2.11., vidi se da je prijelaz iz generatorskog u motorni rad (ili obratno) moguć bez zaustavljanja pogona. Smjer gibanja (smjer vrtnje) u oba je slučaja isti, a mijenja se samo predznak struje, zbog čega i električni i mehanički rad mijenjaju predznak, što dovodi do prijelaza iz generatorskog u motorni rad, ili obratno.

## 2.4. Osnovni dijelovi električnog stroja

Svaki električni stroj mora nužno sadržavati dva osnovna dijela:

- *magnetski dio*, koji je obično izveden u obliku jezgre od feromagnetskog materijala i
- *električni dio*, izveden od dva ili više namota.

Magnetsko polje magnetskog kruga i električno polje u zavojima namota međusobno su povezani i čine jedinstveni elektromagnetski sustav električnog stroja.

Kvaliteta električnog stroja, njegova ekonomičnost i pouzdanost u radu bitno ovise o kvaliteti materijala od kojih je izrađen. Za izradbu se rabe magnetski, vodljivi i izolacijski materijali (služe za izradu magnetskog i električnog dijela stroja), koji čine *aktivni dio*, jer se s pomoću njih ostvaruje pretvorba energije, i konstrukcijski materijali, koji služe za smještaj aktivnog dijela stroja i za prenošenje mehaničkih djelovanja.

*Magnetski materijali* služe za izradu magnetskih krugova. Za transformatore uzimaju se specijalni transformatorski limovi (s 4 - 5% silicija), dok se za rotacijske strojeve rabe dinamo limovi, čelični limovi itd., legirani s 2 - 3 % silicija. Radi smanjenja gubitaka zbog vrtložnih struja, limovi se međusobno izoliraju vodenim staklom i drugim izolacijskim materijalima.

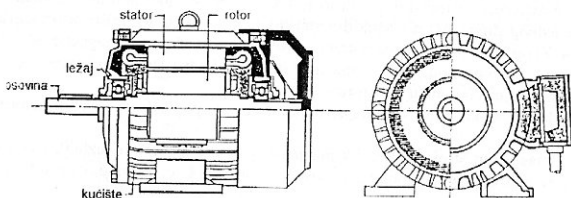
*Vodljivi materijali* (uglavnom bakar, a za kavezne motore aluminij) služe za izradbu namota. Kod manjih presjeka bakrenog namota odabiru se vodiči okruglog presjeka, a kod većih vodiči profilnog pravokutnog presjeka.

*Izolacijski materijali* upotrebljavaju se za međusobnu izolaciju vodljivih dijelova i izolaciju vodljivih dijelova prema drugim dijelovima transformatora i rotacijskih strojeva. Kvaliteta tih materijala diktira dopuštenu nadtemperaturu namota, a s time i opterećenje aktivnog materijala električnom strujom.

*Konstrukcijski materijali* su lijevano željezo i čelik, te aluminij i njegove legure, od kojih su izrađeni kotlovi uljnih transformatora i kućišta rotacijskih strojeva.

Energetski transformatori koji nemaju pokretnih dijelova sastoje se od željezne jezgre sastavljene od transformatorskih limova, dva ili više namota smještenih oko željezne jezgre i izoliranih međusobno i prema jezgri te od ostalih dijelova (kotao i pribor) koji služe za hlađenje, mehaničko učvršćenje konstrukcije, transport i prijenos transformatora itd.

Za pretvorbu mehaničke energije u električnu, ili obratno, potrebno je relativno gibanje vodiča prema magnetskom polju. Zbog toga se električni rotacijski strojevi sastoje od dva osnovna dijela: nepomičnog dijela ili *statora* i pomičnog dijela ili *rotora*. Da se omogući gibanje, nalazi se između statora i rotora *zračni raspor*. Stator se nalazi u *kućištu* koje se opire o podnožje i prenosi moment na krutu okolinu. Rotor je pričvršćen na *osovinu* koja se vrti u *ležajima*. Oni mogu biti pričvršćeni na kućište ili izravno na podnožje na kojem čitav stroj stoji. Mehanička snaga dovodi se ili odvodi s osovine preko spojke, remenice, zupčanika ili sličnog elementa za mehanički prijenos snage. Shematski presjek jednog rotacijskog stroja prikazan je na slici 2.4.1.



Sl. 2.4.1. Shematski presjek rotacijskog (asinkronog) stroja

Stator stroja sastavljen je od aktivnog željeza, kućišta, namota s izolacijom i priključka. Aktivna željezna jezgra (zove se i paket limova statora) predstavlja magnetski krug statora, a izvedena je ovisno o vrsti stroja. Statorski paket nalazi se u kućištu, kojemu je funkcija da nosi i štiti stroj. Kućište malih asinkronih strojeva obično je lijevano od aluminijske ili željezne, dok je kućište istosmjernih strojeva zavarene konstrukcije, ili je odliveno od lijevanog čelika. Statorski namot s izolacijom izvodi se ovisno o izvedbi stroja, kako je opisano u točki 2.4.2. Na kućištu se nalazi priključna kutija u koju su izvedeni na stezaljke krajevi statorskog namota preko kojih se stroj priključuje na električnu mrežu.

Rotor stroja sastavljen je od aktivnog željeza, namota s izolacijom, kliznih kontakata, ventilatora i osovine. Izvedba rotora pojedinih vrsta strojeva može se znatno razlikovati, jer je za elektromehaničku pretvorbu potpuno svejedno miruje li magnetsko polje (uzbudni dio), a armaturni namot se giba (kako je to izvedeno u istosmjernih strojeva), ili obratno: da se magnetsko polje giba, a vodiči miruju (kako je to obično izvedeno u sinkronih strojeva). Preko kliznih koluta (u kolutnih asinkronih i sinkronih strojeva) ili preko kolektora (u kolektorskih strojeva) i četkica dovode se i odvođe struje rotorskog namota. Preko elemenata za prijenos mehaničke snage povezuje se osovinu stroja s pogonskim stajem kad radi kao generator, ili s radnim stajem kad radi kao motor.

### 2.4.1. Magnetski krugovi električnih strojeva

Magnetski krug električnog stroja sastoji se od feromagnetskog (pretežito) i neferomagnetskog (djelomično) materijala te zračnog raspora. Kroz magnetski krug prolazi korisni magnetski tok (tzv. glavni tok) o kojemu ovisi veličina induciranog napona. Glavni magnetski tok zajednički uzbuđuju svi namoti u stroju svojim rezultirajućim protjecanjem. Budući da su rotacijskim strojevima namoti smješteni na statoru i rotoru, silnice glavnog magnetskog toka prolaze kroz zračni raspor.

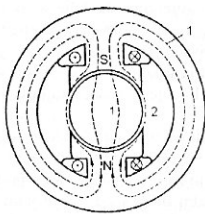
Osim glavnog magnetskog toka javljaju se i rasipni tokovi, koji se djelomično zatvaraju unutar magnetskog kruga, a djelomično izvan njega. Rasipni magnetski tokovi ne pridonose induciranju aktivnog napona.

Da bi se u električnom stroju proizvela potrebna indukcija  $B$  sa što manjim strujama u uzbudnom namotu, dio puta magnetskih silnica u zraku mora biti što kraći. (To je zbog toga što je permeabilnost zraka  $\mu_0$  konstantna i manja je stotinu do nekoliko tisuća puta - ovisno o jakosti polja - od permeabilnosti željeza. Za postizanje iste indukcije u željezu i zraku, potrebna je mnogostruko veća jakost polja u zraku  $H_0$  od one u željezu.). U transformatora to je lako postići jer nije potrebno mehaničko gibanje jednog dijela stroja prema drugom dijelu, kao što je to nužno u rotacijskih strojeva. Zbog toga se povećava potrebno protjecanje za stvaranje magnetskog polja, pa je struja praznog hoda (struja magnetiziranja, uzbudna struja) relativno veća u rotacijskih strojeva od one u transformatora.

Magnetski krug transformatora objasniti će se u poglavlju o transformatorima na brodu.

Rotacijskim strojevima oblik magnetskog kruga može biti različit, ovisno o broju pari polova, izvedbi polova i ovisno o tome je li uzbudni dio na rotoru ili statoru.

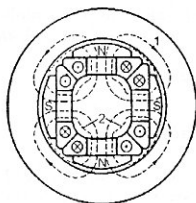
Na slici 2.4.2. predložen je shematski presjek dvopolnog stroja (jedan par polova,  $p = 1$ ) s *istaknutim polovima* na statoru. Oko polova smješten je uzbudni namot. Najveći dio silnica zatvara se kroz rotor tako da ih vodiči rotora sijeku pri gibanju, poput onih označenih s 1, a manji dio zatvara se od pola na pol mimo rotorskog namota, poput onih označenih s 2. Prve silnice čine *korisni magnetski tok* ili *glavni tok*, a druge *rasipni magnetski tok*. Takva izvedba primjenjuje se u istosmjernim strojevima.



Sl. 2.4.2. Shematski presjek dvopolnog stroja s istaknutim polovima na statoru

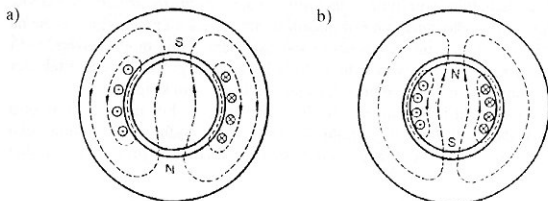
Shematski presjek četveropolnog stroja (dva para polova,  $p = 2$ ) s istaknutim polovima na rotoru predložen je na slici 2.4.3. Iz uertane jedne silnice glavnog i jedne

rasipnog magnetskog toka može se lako zamisliti slika cijelog magnetskog toka. Takva izvedba često se primjenjuje u sporohodnih sinkronih generatora (hidrogeneratori).



Sl. 2.4.3. Shematski presjek četveropolnog stroja s istaknutim polovima na rotoru

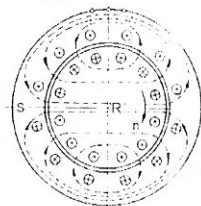
Stroj ne mora imati istaknute polove, već mogu stator i rotor biti *cilindrični*, s utorima za smještaj namota. I tu uzbudni namot može biti smješten ili na statoru ili na rotoru kako je shematski predočeno na slici 2.4.4.



Sl. 2.4.4. Shematski presjek dvopolnog stroja cilindrične izvedbe s uzбудom na: a) statoru i b) rotoru stroja

Izvedba stroja s cilindričnim polovima na rotoru primjenjuje se u brzohodnih sinkronih generatora (turbogeneratori).

Za razliku od ostalih rotacijskih električnih strojeva, asinkroni strojevi nemaju uzbuđu izvedenu s posebnim uzbudnim namotom, već je jedini izvor uzbuđe mreža na koju je priključen statorski namot. Na slici 2.4.5 shematski je prikazan presjek magnetskog kruga jednog takva stroja.



Sl. 2.4.5. Shematski presjek magnetskog kruga asinkronog stroja

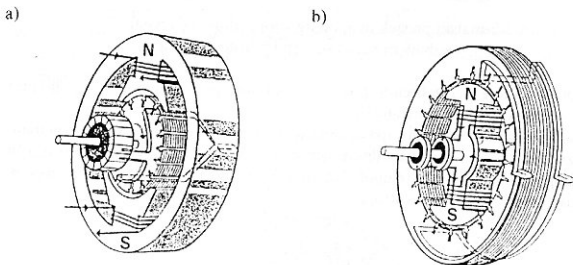
Smjerovi struja u uzbudnom namotu (odnosno u statorskom namotu asinkronog stroja) moraju biti takvi da se po obodu stroja naizmjenice uzbuđuju polovi N - S - N - S itd. Zanimljivo je zapaziti da je smjer struje u prostoru između susjednih polova na oba pola jednak. Simetrala između susjednih polova dijeli zbroj svih struja u tom prostoru na dva jednaka dijela, a okomita je na sve silnice, tj. po toj je simetrali  $\int \vec{H}_l \cdot d\vec{l} = 0$ .

#### 2.4.2. Namoti električnih strojeva

Električni stroj bi bio vrlo slabo iskorišten kad bi se na stator ili rotor smjestio samo jedan ili samo nekoliko vodiča. Raspoloživi prostor valja što potpunije iskoristiti pa se po obodu razmješta više vodiča koji se međusobno tako spajaju da bi se dobilo što racionalnije slaganje njihovih napona u ukupni napon i njihova struja u ukupnu struju, odnosno njihovo protjecanje u ukupno protjecanje. Svi tako spojeni vodiči čine *namot statora* ili *namot rotora*.

Svaki namot električnog stroja stvara magnetsko polje kad kroz njega prolazi struja. Oni namoti kojima je osnovna namjena stvaranje magnetskog polja u stroju zovu se *uzbudni namoti*, a oni kojima je osnovna namjena da se u njima inducira napon i izravno sudjeluju u pretvorbi energije zovu se *radni* ili *armaturni namoti*. Armaturni namoti se preko stezaljka priključuju na izvor električne energije, ili se na njih priključuju trošila. U asinkronom stroju statorski namot ima ulogu i uzbuđnog i radnog namota, jer on daje osnovnu uzbuđu kada kroz njega prolazi struja, a također se u njemu inducira napon pa može primiti ili predati električnu snagu.

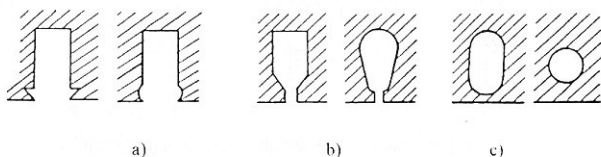
Ovisno o namjeni i vrsti stroja, izvedba namota može biti različita. Namot u kojeg su svi vodiči smješteni u jednom velikom utoru, odnosno namotani oko željezne jezgre, zove se *konzentrirani namot*, kako je shematski predloženo na slici 2.4.6.



Sl. 2.4.6. Shema stroja s koncentriranim uzbuđnim namotom na a) statoru i b) rotoru stroja

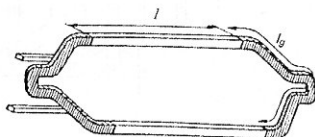
Namot kojema su vodiči smješteni u više utora po obodu statora ili rotora zove se *raspodijeljen namot*. Takav je namot redovito radni namot stroja.

Vodiči raspodijeljenog namota ulažu se u *utore* štancane u željezne limove koji čine statorski ili rotorski paket. Prema obliku utori mogu biti otvoreni, poluzatvoreni i zatvoreni, kako je prikazano na slici 2.4.7.



Sl. 2.4.7. Oblici utora: a) otvoreni; b) poluzatvoreni; c) zatvoreni

Prema obliku utora primjenjuju se različiti tehnološki postupci u izvedbi vodiča i njihovu ulaganju u utore. U raspodijeljenom namotu svaki se zavoj sastoji od dva vodiča smještena u dva različita utora i međusobno spojena u čenoj strani. Ako su vodiči zavoja smješteni u utovima tako da se svaki vodič nalazi pod suprotnim magnetskim polom, tada se njihovi naponi i sile stvorene protjecanjem struje kroz oba vodiča potpomažu. Više u seriju namotanih zavoja (s izvedenim početkom prvog i svršetkom zadnjeg zavoja) koji imaju istu magnetsku os i mehanička su cjelina, čine *svitak*, kako je predočeno na slici 2.4.8.

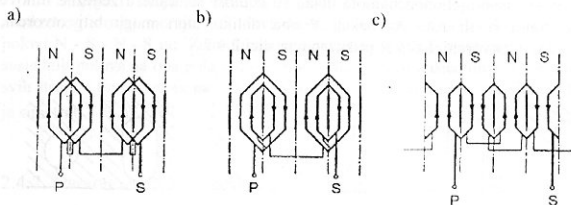


Sl. 2.4.8. Svitak rotacijskog električnog stroja

Svaki svitak ima aktivni i neaktivni dio. *Aktivni dio* svitka je onaj u kojem se inducira napon, tj. to su *strane svitka* (vodiči) koje se nalaze u utoru. U (2.14) i (2.24)  $l$  je upravo dužina vodiča koja je povezana s magnetskim poljem, tj. koja se nalazi u utoru. Dio svitka koji se ne nalazi u utoru, već samo povezuje strane svitka (vodiče) u zavoje, neaktivan je i zove se *čenoj strana*, odnosno za čitav namot *glava namota*. Zbog njih se povećavaju otpor i gubici u stroju.

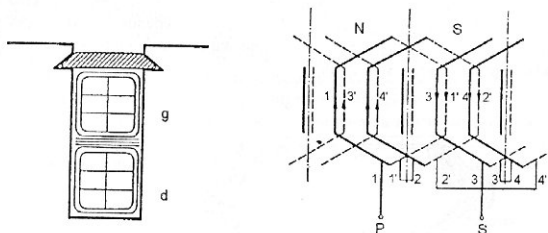
Različiti svici smješteni su u različitim utovima i mogu se spajati serijski (češće) ili paralelno. *Međusobno spojeni svici čine namot*. Ukupni inducirani napon, odnosno ukupna sila na obodu stroja, proporcionalni su ukupnom broju zavoja

Namot se može izvesti s *jednakim svicima* ili s različitim koncentričnim svicima, kako je predočeno na slici 2.4.9. (gdje je P početak, a S svršetak svitka), pri čemu strana jednog svitka ispunjava čitav jedan utor. Ako su svi utori ispunjeni, broj je svitaka jednak polovici broja namotanih utora. Takav namot zove se *jednoslojni namot*.



Sl. 2.4.9. Namot sa skupinom: a) jednakih svitaka; b) koncentričnih svitaka po paru polova; c) s grupom svitaka po polu

Vrlo često upotrebljava se dvoslojni namot, u kojega se u svakom utoru nalaze dvije strane dvaju različitih svitaka, jedna u gornjem, a druga u donjem sloju utora. Svaki svitak takva namota jednom je stranom u gornjem  $g$ , a drugom u donjem  $d$  sloju, kako je predočeno na slici 2.4.10. Svi su svici međusobno jednaki, što je povoljno. Broj svitaka dvoslojnog namota jednak je broju namotanih utora.



Sl. 2.4.10. Utor s dvoslojnim namotom i svici dvoslojnog namota

## 2.5. Zagrijavanje i hlađenje električnih strojeva

Pri radu električnog stroja ne pretvara se ukupno dovedena energija u željeni oblik. Jedan dio energije troši se na pokrivanje gubitaka i taj se dio na kraju pretvara u toplinu. Zbog toga dolazi do porasta temperature; najprije na mjestima gdje gubici nastaju, a zatim se prijenosom topline zagriju i ostali dijelovi stroja. Najveća razvijena toplina je u vodičima namota, a s njih se prenosi na izolaciju, koja je obično u usporedbi s ostalim materijalima u stroju, najosjetljivija na utjecaj viših temperatura.

Dopušteno zagrijavanje namota propisano je ovisno o kvaliteti izolacije. Tako su u tablici 2.5.1. predočene granične temperature za pojedine klase izolacije (prema IEC standardu. Publ. 505/1975 i Publ.216/1974).

Tabl. 2.5.1. Toplinske klase izolacijskog materijala

Klasa izolacije	Y	A	E	B	F	H	C
Granična temperatura u (°C)	90	105	120	130	155	180	više od 180

Dopušteno zagrijavanje namota električnog stroja određuje njegovu nazivnu snagu. Da bi se iz električnog stroja dobila što veća snaga, strojevi se konstruiraju tako da hlađenje, tj. odvođenje razvijene topline iz stroja, bude što djelotvornije, a da pri tome korisnost i povećani troškovi zbog boljeg hlađenja budu zadovoljavajući.

Velika većina strojeva hladi se zrakom. U malih strojeva odvodi se toplina preko površine statora. Za efikasnije hlađenje služi ventilator koji manjim rotacijskim strojevima postavlja s vanjske strane statora tako da on tjera zrak preko vanjskog kućišta statora, a u strojeve srednjih snaga ugrađuju se ventilatori koji tjeraju zrak kroz stroj.

Za odvođenje 1 kW gubitaka potrebna je količina zraka od cca 3 m<sup>3</sup>/min, odnosno 0,05 m<sup>3</sup>/s uz porast temperature zraka za 18 °C. Za poznatu snagu  $P_2$  (W) električnog stroja i njegovu korisnost  $\eta$  potreban kapacitet ventilatora  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) određuje se približno iz izraza:

$$Q = 5 \cdot 10^{-5} \cdot P_2 \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (2.41)$$

Osim ventilatorima vrlo veliki strojevi hlade se vodom s pomoću ugrađenih hladnjaka, odnosno pumpe tjeraju vodu kroz ejevode, hladnjake i namot stroja.

Iako električni stroj nije homogeno tijelo, jer je sastavljen od mnogih dijelova, ipak se može (osim pri velikim preopterećenjima) zagrijavanje i hlađenje električnog stroja promatrati kao zagrijavanje i hlađenje homogeno tijela.

Poznato je da je osnovni parametar *zagrijavanja* namota strujno opterećenje vodiča namota i s njim u vezi uvjeti odvođenja topline stroja. Strujno opterećenje (gustoća struje) općenito se definira kao struja  $I$  (A) koja protječe jedinicom presjeka vodiča  $S$  (mm<sup>2</sup>), što se izražava kao:

$$\Gamma = \frac{I}{S} \quad (2.42)$$

Ako struja prolazi namotima stroja, onda će se u njima razviti Joulova toplina prema poznatom zakonu:

$$Q = P \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.43)$$

Da bi se mogla stvoriti jasna slika o utjecaju strujnog opterećenja na zagrijavanje stroja, valja razmotriti opće toplinske zakonitosti pri opterećenju samog vodiča. Tako će proizvedena toplina zbog strujnog opterećenja u vremenu  $dt$  iznositi:

$$dQ = P \cdot dt \quad (2.44)$$

Od te topline  $dQ$  jedan se dio neposredno odvodi prijenosom topline na okolinu, a ostali dio utječe na porast temperature vodiča, čime se povećava efekt



odvođenja topline, i na nekoj temperaturi nastaje stabilizacija. U promatranom vremenu  $dt$  bit će količina odvedene topline:

$$dQ_1 = S \cdot \lambda \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \cdot dt, \quad (2.45)$$

gdje je:

- $S$  površina zagrijavanog vodiča preko koje se toplina odvodi ( $m^2$ ),
- $\lambda$  toplinski koeficijent odvođenja topline ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),
- $\vartheta$  temperatura zagrijanog vodiča ( $^\circ C$ ),
- $\vartheta_0$  temperatura okoline ( $^\circ C$ ).

Preostala toplina koja nije odvedena u vremenu  $dt$  bila bi:

$$dQ_2 = dQ - dQ_1, \quad (2.46)$$

odnosno toplina koja će djelovati na porast temperature vodiča za iznos  $d\vartheta$  jednaka je:

$$dQ_2 = m \cdot c \cdot d\vartheta, \quad (2.47)$$

gdje je:

- $m$  masa zagrijavanog vodiča ( $kg$ ),
- $c$  specifična toplina vodiča ( $Ws/kg$ ).

Unošenjem izraza (2.44), (2.45) i (2.47) u (2.46) dobiva se diferencijalna jednadžba:

$$P \cdot dt = S \cdot \lambda \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \cdot dt + m \cdot c \cdot d\vartheta. \quad (2.48)$$

Stacionarno stanje dobiva se za  $t \rightarrow \infty$  kad temperatura vodiča više ne raste, dakle ako je:

$$dQ_2 = m \cdot c \cdot d\vartheta = 0$$

i pri tome jednadžba stanja (2.48) dobiva oblik:

$$P \cdot dt = S \cdot \lambda \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \cdot dt. \quad (2.49)$$

Iz jednadžbe (2.49) za stacionarno stanje izlazi da je  $\vartheta = \vartheta_{max}$  ili:

$$P = S \cdot \lambda \cdot (\vartheta_{max} - \vartheta_0),$$

odnosno:

$$\vartheta_{max} = \vartheta_0 + \frac{P}{S \cdot \lambda}, \quad (2.50)$$

pa maksimalno zagrijavanje ili nadtemperatura vodiča iznosi:

$$\vartheta_{n \ max} = \vartheta_{max} - \vartheta_0 = \frac{P}{S \cdot \lambda}. \quad (2.51)$$

Međutim, osim stacionarnog stanja potrebno je analizirati i prijelaznu pojavu, jer je vrlo često u praksi samo režim prijelazne pojave, a da pri tome do stacionarnog stanja neće ni doći.

Zakonitost porasta temperature u prijelaznom stanju može se dobiti riješivši diferencijalnu jednadžbu (2.48). Podijeli li se (2.48) s  $S \cdot \lambda$ , dobiva se:

$$\frac{P}{S \cdot \lambda} dt = \frac{m \cdot c}{S \cdot \lambda} d\vartheta + (\vartheta - \vartheta_0) dt. \quad (2.52)$$

Izraz  $\frac{P}{S \cdot \lambda} = \vartheta_{n \max}$  je nadtemperatura vodiča, a konstanta:

$$\frac{m \cdot c}{S \cdot \lambda} = \tau \quad (2.53)$$

ima dimanziju vremena i zove se *vremenska konstanta zagrijavanja* ili *toplinska vremenska konstanta*.

Uvrštenjem (2.51) i (2.53) u (2.52) izlazi:

$$\vartheta_{n \max} \cdot dt = \tau \cdot d\vartheta + (\vartheta - \vartheta_0) \cdot dt, \quad (2.54)$$

odnosno:

$$dt = \frac{d\vartheta}{(\vartheta_{n \max} - \vartheta_n)} \cdot \tau, \quad (2.55)$$

gdje je  $\vartheta_n = \vartheta - \vartheta_0$ .

Nakon integriranja (2.55) i uvrstivši integracijske konstante za  $t = 0$ , dobiva se konačni izraz zagrijavanja u prijelaznom stanju:

$$\vartheta_n = \vartheta_{n \max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (2.56)$$

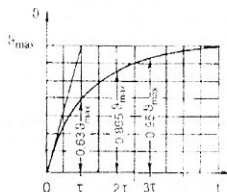
Iz ovih razmatranja može se zaključiti, da se zagrijavanje odvija po eksponencijalnom zakonu. To znači da će u početku temperatura brzo rasti, a zatim će se (uz pretpostavku nepromijenjenih uvjeta zagrijavanja i hlađenja) asimptotski približavati maksimalnoj (stacionarnoj) vrijednosti.

Sve promjenjive vrijednosti (površina, specifična toplina i uvjeti odvođenja topline) sadržane su u vremenskoj konstanti  $\tau$ . Numeričke relativne vrijednosti zagrijavanja za  $\vartheta_{n \max} = 1$  i za  $t = k\tau$  ( $k = 1, 2, 3, 4$  i  $5$ ) navedene su u tablici 2.5.2.

Tabl. 2.5.2. Numeričke relativne vrijednosti zagrijavanja

t	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$
$\vartheta_n / \vartheta_{n \max}$	0,632	0,865	0,950	0,981	0,993

Predoče li se vrijednosti iz tablice 2.5.2 grafički, dobit će se krivulja zagrijavanja strojeva u prijelaznom stanju do stacionarnog stanja, kako se vidi na slici 2.5.1.



Sl. 2.5.1. Zagrijavanje homogenog tijela (električnog stroja)

U prosječnim električnim strojevima i uređajima s izoliranim vodičima, vremenska konstanta ima vrijednost cca 1 sata. Međutim, u jednostavnim uređajima, grijačim tijelima itd. vremenska konstanta iznosi nekoliko minuta, a i manje. Iz toga, a i prema podacima u tablici 2.5.2., očito je da se stacionarno stanje postiže za nekoliko sati. Obično se smatra da se praktički stacionarno stanje uspostavlja nakon 5 do 8 sati.

Radi ocjene strujnog opterećenja osim zagrijavanja valja razmotriti i proces hlađenja, dakle ono što se događa s temperaturom stroja nakon prestanka strujnog opterećenja, odnosno kad je:

$$P \cdot dt = 0, \quad (2.57)$$

pri čemu diferencijalna jednadžba (2.48) ima oblik:

$$S \cdot \lambda \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \cdot dt + m \cdot c \cdot d\vartheta = 0. \quad (2.58)$$

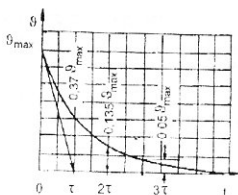
Na osnovi njezina rješenja, uz pretpostavku da je kod promatranja  $t = 0$  bilo stacionarno stanje, dakle maksimalna nadtemperatura vodiča  $\vartheta = \vartheta_{n \max}$ , i uz uvođenje temperaturne konstante, dobiva se nadtemperatura pri hlađenju vodiča:

$$\vartheta_n = \vartheta_{n \max} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.59)$$

Jednadžba (2.59) predstavlja prijelazno stanje hlađenja homogenog tijela (električnog stroja), a temperatura će se kretati ovisno o vremenu kao u tablici 2.5.3., odnosno po krivulji predloženoj na slici 2.5.2.

Tabl. 2.5.3. Numeričke relativne vrijednosti hlađenja

t	$\tau$	2 $\tau$	3 $\tau$	4 $\tau$	5 $\tau$
$\vartheta_n / \vartheta_{n \max}$	0,368	0,135	0,050	0,019	0,007



Sl. 2.5.2. Hlađenje homogenog tijela (električnog stroja)

Kao i pri zagrijavanju vremenska se konstanta može grafički odrediti, tj. ona odgovara vremenu  $t = \tau$  koje siječe tangenta krivulje u početku prijelazne pojave, i to od vrijednosti stacionarnog stanja.

Bez obzira na to gdje je prijelazna pojava počela (zagrijavanje ili hlađenje), tangente početka krivulje imaju uvijek isti kut koji je kod hlađenja preslikan od zagrijavanja s obzirom na vremensku os.

## 2.6. Pogonska stanja električnih strojeva

Osnovno pogonsko stanje električnog stroja je opterećenje. Ono se kreće od praznog hoda, kada stroj nije opterećen, preko djelomičnog i nazivnog opterećenja te preko preopterećenja do kratkog spoja. Često se poznavanjem karakteristika stroja u dva krajnja pogonska stanja - u praznom hodu i kratkom spoju - može zaključivati o ponašanju stroja za vrijeme opterećenja.

*Prazni hod* električnog stroja je njegovo krajnje pogonsko stanje u kojem nema korisnog pretvaranja energije zbog toga što trošila nisu priključena, ali je stroj spreman da preuzme opterećenje. U rotacijskih strojeva to je i prijelazno stanje između motorskog i generatorskog procesa rada.

Transformator se nalazi u praznom hodu kad je priključen na nazivni ulazni napon (primar), a izlazne stezaljke (sekundar) su otvorene, tj. nema struje opterećenja. Za pokrivanje gubitaka praznog hoda transformator uzima iz mreže radnu energiju, a jalovu za uzбудu.

Generator radi u praznom hodu onda kad se vrti pod utjecajem pogonskog stroja, uzbuđen je, na stezaljkama ima nazivni napon, ali nema priključena trošila, tj. struja opterećenja jednaka je nuli. Gubici praznog hoda generatora pokrivaju se energijom pogonskog stroja.

Motor radi u praznom hodu kad je priključen na nazivni napon, a na osovini (pri zanemarivo malom momentu trenja) ne razvija nikakav okretni moment, jer nema mehaničkog opterećenja. Njegova brzina vrtnje praznog hoda može biti jednaka (sinkroni motor) ili znatno veća (istosmjerni serijski motor) od nazivne brzine vrtnje. Za pokrivanje gubitaka praznog hoda motor uzima energiju iz električne mreže.

Korisnost električnih strojeva u praznom hodu jednaka je nuli ( $\eta = 0$ ) jer je dovedena snaga (u transformatora i motora to je električna, a u generatora mehanička) jednaka gubicima.

*Opterećenje* električnog stroja nastaje kad se priključenjem odgovarajućih trošila koristi energijom pretvorenom u stroju. Kod transformatora i generatora priključuju se trošila električne energije (motori, toplinska trošila, rasvjetna tijela itd.), a kod motora priključuju se trošila mehaničke energije (razni radni strojevi na brodu: pumpe, kompresori, ventilatori, vitla itd.).

Pri opterećenju električni stroj uzima energiju (transformator i motor iz mreže, a generator od pogonskog stroja) potrebnu za rad priključenog trošila, i za pokrivanje gubitaka. Pri opterećenju pojavljuju se osim gubitaka praznog hoda i gubici zbog opterećenja.

Opterećenje električnog stroja može biti različito. Pri *djelomičnom* opterećenju stroj nije potpuno iskorišten, a *preopterećenje* izaziva zagrijavanja viša od dopuštenog i štetno je. Zbog toga električni stroj mora raditi pri *nazivnom* opterećenju, odnosno opterećenju za koje je izgrađen i koje je označeno na *natpisnoj pločici* za određenu vrstu pogona (trajni, kratkotrajni, intermitirani itd.).

Na natpisnoj pločici navedeni su *nazivni podaci* električnog stroja, kako je predočeno na slici 2.6.1.

1			
Typ 2			
3	4	Nr.	5
6		7 V	8 A
9	10 S	11 $\cos \varphi$	12'
13		14 /min	15 Hz
16		17 V	18 A
Isol.-Kl. 20		IP 21	22 kg
23			

- 1 - ime proizvođača
- 2 - oznaka tipa dopunjena veličinom i oblikom izvedbe
- 3 - vrsta struje
- 4 - vrsta stroja
- 5 - tvornički broj
- 6 - oznaka načina spoja namota
- 7 - nazivni napon
- 8 - nazivna struja
- 9 - nazivna snaga
- 10 - jedinica snage
- 11 - vrsta pogona
- 12 - faktor snage
- 13 - smjer vrtnje
- 14 - nazivna brzina vrtnje
- 15 - nazivna frekvencija
- 16 - riječ "uzbuda" za istosmjerne i sinkrone, a "rotor" za asinkrone strojeve
- 17 - način spoja rotorskog namota
- 18 - uzbudni napon za istosmjerne i sinkrone strojeve, a napon mirovanja rotora za motore s kolutnim rotorom
- 19 - uzbudna struja za istosmjerne i sinkrone strojeve, a rotorska struja za motore s kolutnim rotorom
- 20 - klasa (razred) izolacijskog materijala
- 21 - vrsta zaštite
- 22 - masa
- 23 - broj i godina proizvodnje

### Sl. 2.6.1. Natpisna pločica za električne strojeve

Valja znati da se svi naznačeni podaci (i drugi nenaznačeni) ne nalaze na svim natpisnim pločicama, već samo oni koji su potrebni za određenu vrstu stroja i karakter njegova rada.

*Kratki spoj* električnog stroja je njegovo krajnje pogonsko stanje u kojem zbog prevelikog opterećenja prestaje korisna pretvorba energije. Nastaje onda kad se kratko spoje (premoste) sekundarne stezaljke transformatora ili stezaljke generatora vrlo malim otporom, ili ako se preopterećenjem (velikom protumomentom) spriječi vrtnja motora tako da se on zakoči. U tom pogonskom stanju stroj je prikladan za svu energiju koju primi (jer je više ne predaje trošilu) sam potroši, tj. sva se dovedena energija troši na gubitke u stroju, koji zbog toga može biti toplinski preopterećen.

Kratki spoj motora također je prijelazno stanje između motorskog rada i kočnog (protustrujnog) rada koje se upotrebljava u elektromotornim pogonima.

Korisnost u kratkom spoju jednaka je nuli ( $\eta = 0$ ) jer je korisna snaga jednaka nuli (u transformatora i generatora zbog toga što je izlazni napon jednak nuli, a u motora zbog toga što je brzina vrtnje jednaka nuli), pa je privedena radna snaga jednaka gubicima.

Iako je u praznom hodu i kratkom spoju krajnji vanjski efekt jednak (ne predaje se nikakva korisna energija i korisnost je nula), velika je razlika u toplinskom opterećenju stroja (najmanje je u praznom hodu, a najveće u kratkom spoju) pa se rad

stroja u kratkom spoju obično ne dopušta i mora se što prije prekinuti. Zbog toga električni strojevi moraju imati zaštitu od kratkog spoja.

Iz podataka dobivenih pokusom praznog hoda i kratkog spoja može se približno zaključiti o gubicima pri opterećenju i zaključiti hoće li stroj moći podnijeti opterećenje. Valja znati da se zbog velikog termičkog opterećenja pokus kratkog spoja izvodi u transformatora i motora obično pri sniženom naponu, a u generatora pri sniženoj uzbudi.

## 2.7. Pitanja i zadaci za provjeru znanja

Uz točku 2.1.:

1. Što su električni strojevi i kako se mogu podijeliti?
2. Opišite pretvorbu energije u električnom stroju.
3. Kako se mogu podijeliti rotacijski električni strojevi?
4. Što znači da je rad električnih strojeva reverzibilan?
5. Gdje nastaju gubici energije u električnom stroju?
6. Kako se definira stupanj iskoristivosti (korisnost) stroja? Kako se računa korisnost generatora, a kako motora?

Uz točku 2.2.:

1. Objasnite pojmove: magnetskog polja, magnetskog toka, indukcije magnetskog polja, ulančenog magnetskog toka, induktiviteta i međuinaktiviteta.
2. Što je elektromagnetsko polje i kako se predočuje?
3. O čemu ovisi oblik, smjer i jakost magnetskog polja ravnog vodiča, zavoja i svitka protjecanih električnom strujom?
4. Na kojima se trima osnovnim zakonima elektrotehnike temelji rad električnih strojeva?
5. Što je elektromagnetska indukcija, kako glasi Faradayev i Lenzov zakon?
6. Objasnite kako nastaju i kako se računaju napon transformacije i napon rotacije. Koje su fizikalne veličine potrebite za izračunavanje iznosa tih napona?
7. Pokažite kako se izvodi poznati izraz za osnovni harmonik induciranog napona  $E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi$ . Što znače pojedine oznake u tom izrazu?
8. O čemu govori pravilo desne, a o čemu pravilo lijeve ruke?
9. O čemu ovisi jakost magnetskog polja, a o čemu magnetski napon?
10. Kako glasi zakon protjecanja?
11. Označite točne odgovore:
  - a) veličina induciranog napona u vodiču koji se giba u magnetskom polju ovisi o dužini vodiča;
  - b) sila je na vodič kojim teče struja veća kad se vodič brže giba u magnetskom polju.
  - c) sila na vodič kojim teče struja bit će u polju dvostruke indukcije dvostruko unatoč zasićenju magnetskog kruga;

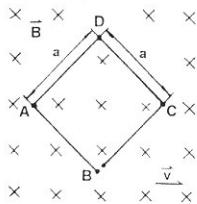
d) kad se vodič giba u magnetskom polju, na njega djeluje sila proporcionalna induciranom naponu;

e) da bi na vodič u magnetskom polju djelovala sila, mora struja kroz vodič biti istosmjerna.

[a); c)]

12. Metalni žičani kvadrat stranice  $a = 10 \text{ cm}$  giba se konstantnom brzinom  $v = 3 \text{ m/s}$  u ravnini okomitoj na homogeno magnetsko polje indukcije  $B = 0,5 \text{ T}$  (vidite sliku). Koliki je inducirani napon između točaka A-B, A-C, A-D i C-D?

[ $E_{AB} = 0,106 \text{ V}$ ;  $E_{AC} = 0, \text{ V}$ ,  
 $E_{AD} = 0,106 \text{ V}$ ;  $E_{CD} = 0,106 \text{ V}$ ]

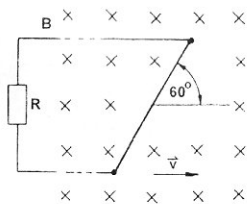


13. U homogenomu magnetskom polju nalazi se ravni vodič okomit na silnice. Vanjski izvor tjera vodičem struju  $I$ . Ako se vodič giba tako da je smjer gibanja okomit na vodič, a paralelan sa silnicama, koliki je inducirani napon i sila na vodič?

[ $E = 0 \text{ V}$ ;  $F = I l B$ ]

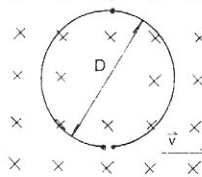
14. Ravni vodič dužine  $l = 0,8 \text{ m}$  giba se brzinom  $v = 2 \text{ m/s}$  okomito na silnice homogenog magnetskog polja indukcije  $B = 0,6 \text{ T}$ . Krajevi vodiča zaključeni su otporom  $R$  prema slici (izvan polja) tako da je ukupni otpor kruga  $1,2 \Omega$ . Koliki je inducirani napon u vodiču i kolikom je silom potrebno djelovati na vodič da se ostvari to gibanje?

[ $E = 0,831 \text{ V}$ ;  $F = 0,288 \text{ N}$ ]



15. Metalni žičani krug promjera  $D = 15 \text{ cm}$  giba se brzinom  $v = 10 \text{ m/s}$  okomito na smjer magnetskog polja konstantne indukcije  $B = 1 \text{ T}$  (vidite sliku). Koliki se inducira napon između točaka A-B, te kakva je njegova vremenska ovisnost  $u(t)$ ?

[ $E_{AB} = 1,5 \text{ V}$ ;  $u(t) = \text{konst.}$ ]

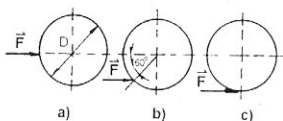


16. Okomito na smjer homogenog magnetskog polja indukcije  $B = 1 \text{ T}$  vrti se metalni disk promjera  $D = 0,5 \text{ m}$  brzinom  $n = 1000 \text{ r/min}$ . Koliki je napon između dvije točke dijagonalno smještene na disku, a koliki između točke na obodu i središta vrtnje diska?

[ $E = 0 \text{ V}$ ;  $E = 6,54 \text{ V}$ ]

17. Na valjak promjera  $D = 1 \text{ m}$  djeluje sila  $F = 50 \text{ N}$  usmjerena prema oznakama na slici. Koliki je moment sile prema slici a), b) i c)?

[a)  $M = 0 \text{ Nm}$ ; b)  $M = 21,65 \text{ Nm}$ ;  
 c)  $M = 25 \text{ Nm}$ ]



Uz točku 2.3.:

1. Objasnite skicom i opisom pretvorbu mehaničke energije u električnu na modelu elementarnog električnog stroja.
2. Objasnite skicom i opisom pretvorbu električne energije u mehaničku na modelu elementarnog električnog stroja.
3. O čemu ovisi okretni moment električnog stroja?
4. Može li električni stroj prijeći iz generatorskog u motorski rad (ili obratno) bez zaustavljanja pogona? Što se pri tome mijenja?
5. Kako se definira snaga električnog generatora, a kako elektromotora?
6. Moment  $M = 500 \text{ Nm}$  zakrene osovinu za 10 punih okretaja. Koliki je iznos izvršenog rada izražen u osnovnim jedinicama SI sustava?  
[ $W = 31,416 \text{ kJ}$ ]
7. Rotor motora promjera  $D = 40 \text{ cm}$  vrti se brzinom  $n = 1400 \text{ r/min}$  i razvija snagu  $P_2 = 50 \text{ kW}$ . Koliko iznosi razvijeni moment u zračnom rasporu, razvijena obodna sila, kutna brzina i obodna brzina, ako se gubici zanemare?  
[ $M = 341 \text{ Nm}$ ;  $F = 1705 \text{ N}$ ;  $\omega = 146,6 \text{ r/s}$ ;  $v = 29,3 \text{ m/s}$ ]
8. Koliku snagu na osovini daje motor kojemu je zbroj obodnih sila  $F = 240 \text{ N}$ , promjer  $D = 0,4 \text{ m}$ , pri brzini vrtnje  $n = 980 \text{ r/min}$ ? Pri nazivnoj brzini vrtnje gubici trenja i ventilacije iznose  $P_g = 360 \text{ W}$ .  
[ $P_2 = 4566 \text{ W}$ ]
9. Elektromotor opterećen momentom  $M = 80 \text{ Nm}$  vrti se brzinom vrtnje  $n = 970 \text{ r/min}$ . Koliku snagu motor daje na osovini, a koliku uzima iz mreže ako je  $\eta = 85\%$ ?  
[ $P_2 = 8126 \text{ W}$ ;  $P_1 = 9560 \text{ W}$ ]

Uz točku 2.4.:

1. Koje osnovne dijelove mora imati električni stroj?
2. Koji se dijelovi stroja izrađuju lamelirano i zašto? Kolike su približno debljine limova?
3. Što je stator, a što rotor električnog rotacijskog stroja?
4. Može li električni rotacijski stroj pretvarati električnu energiju u mehaničku (ili obratno) ako nije nigdje pričvršćen na podlogu?
5. Što čini magnetski krug električnog stroja?
6. Nacrtajte shematski presjek dvopolnog električnog rotacijskog stroja: s istaknutim polovima na statoru, s istaknutim polovima na rotoru i presjek cilindrične izvedbe.
7. Objasnite na konkretnom modelu ulogu uzbuđnog i armaturnog dijela električnog rotacijskog stroja.
8. Ustanovite zbog kojih se razloga namoti armature električnih rotacijskih strojeva stavljaju u utore?
9. Skicirajte dio oboda u zračnom rasporu električnog rotacijskog stroja s po 2 utora: otvorena, poluzatvorena i zatvorena.
10. Što je aktivni, a što neaktivni dio namota električnog rotacijskog stroja?
11. Što je jednoslojni, a što dvoslojni namot električnog rotacijskog stroja?



12. Je li, pri jednakoj električnoj snazi na stezaljkama električnog rotacijskog stroja, veća mehanička snaga koju prenosi osovina u generatora ili u motora?  
[u generatora]
13. Neki brzohodni elektromotor razvija jednaku snagu kao drugi sporohodni. Kojemu su elektromotoru elektromehaničke sile koje djeluju na kućište veće?  
[sporohodnomu]

Uz točku 2.5.:

1. Objasnite kako nastaje toplina u električnom stroju i zašto je treba odvoditi. Kako se odvodi toplina iz električnog stroja?
2. O čemu ovisi dopušteno zagrijavanje namota električnih strojeva?
3. Što je vremenska toplinska konstanta električnih strojeva?
4. Kakav oblik ima krivulja zagrijavanja, a kakav krivulja hlađenja električnog stroja (kao krutog tijela)?
5. Ako se pretpostavi jednaka količina gubitaka po jedinici volumena električnog stroja, je li lakše održati istu temperaturu manjeg ili većeg stroja?  
[većeg]

Uz točku 2.6.:

1. Koje je osnovno pogonsko stanje električnog stroja?
2. Što je prazni hod, a što kratki spoj transformatora, generatora i elektromotora?
3. Koliki je stupanj iskoristivosti (korisnost) u praznom hodu, a koliki u kratkom spoju električnog stroja?
4. Što su nazivni podaci električnog stroja?
5. Koje podatke sadrži natpisna pločica električnog stroja?

### 3. ELEKTRIČNI STROJEVI NA BRODU

Veliki je broj različitih električnih strojeva koji se upotrebljavaju na brodu. Sve te strojeve moguće je podijeliti u tri osnovne skupine:

1. transformatori;
2. električni strojevi s elektromehaničkim pretvaranjem;
3. električki pretvarači.

*Transformatori* mogu biti energetske (transformatori snage), regulacijski, mjerni, laboratorijski (ispitni), autotransformatori (transformatori u štednom spoju) i specijalni. Budući da se u ovom udžbeniku obrađuje elektroenergetski dio broda, proučavat će se samo *energetski transformatori ili transformatori snage*.

U skupinu *električnih strojeva s elektromehaničkim pretvaranjem* ubrajaju se:

1. asinkroni strojevi;
2. sinkroni strojevi;
3. kolektorski strojevi (istosmjerni strojevi i kolektorski strojevi izmjenične struje);
4. pretvarači i regulacijske skupine.

Zbog važnosti primjene na brodu, u udžbeniku *su najdetajnije opisani asinkroni motori i sinkroni generatori*, dok se za *istosmjerne strojeve* daju samo njihove osnovne karakteristike jer se oni sve manje rabe na brodu.

Iako ne pripadaju električnim strojevima, u udžbeniku su opisane i osnovne karakteristike *ispravljača (usmjerivača)* jer je njihova uporaba na suvremenim brodovima velika.

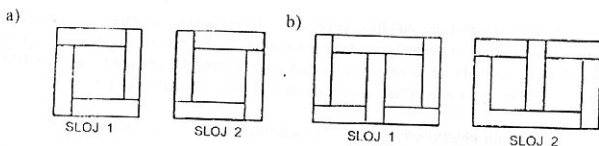
#### 3.1. Energetski transformatori

*Energetski transformatori ili transformatori snage* statičke su elektromagnetske naprave ili najjednostavniji električni strojevi bez okretnih dijelova koji povisuju, odnosno snižuju izmjenični napon na principu elektromagnetske indukcije. Pri transformaciji napona frekvencija se ne mijenja.

Svaki transformator sastoji se od *željezne jezgre, namota i ostalih dijelova i pribora* (kotla u uljnih transformatora, te pripadnih uređaja za priključak i mehaničko učvršćenje i zaštitne naprave). Željezna jezgra tako je načinjena da čini zatvoreni magnetski krug, a oko jezgre postavljaju se namoti koji su međusobno i prema jezgri izolirani. Jezgra i namot zovu se *aktivni dijelovi*, jer oni izravno sudjeluju u procesu transformacije. Izvedba ostalih dijelova transformatora obično ovisi o njegovoj veličini, namjeni i načinu hlađenja.

Željezna transformatorska jezgra sastavljena je iz međusobno izoliranih legiranih limova da bi se smanjili gubici zbog vrtložnih struja koji nastaju u željezu pri izmjeničnom magnetiziranju. Ti transformatorski limovi služe se u paket tako da zračni raspored u jezgri bude što manji kako bi i potrebna struja magnetiziranja (užbudna struja) bila što manja. Praktički se smanjenje struje magnetiziranja rješava prekrivanjem limova pri slaganju jezgre.

Ovisno o veličini transformatora i vrsti limova, oblik izrezanih limova, a s tim i slaganje jezgre, može biti različito. Na slici 3.1.1. predočeni su slojevi limova jednofaznog i trofaznog transformatora. Izmjeničnim slaganjem limova u *paket* (tako da na sloj 1 dolazi sloj 2) postiže se da uvijek puno željezo u parnom sloju prekriva zračni raspored u neparnom, i obrnuto, a konačno se dobiva traženi oblik jezgre.

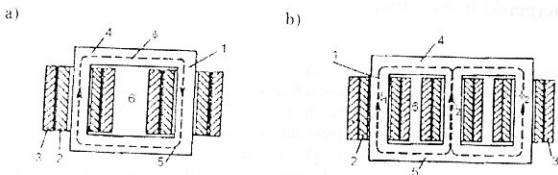


Sl. 3.1.1. Slaganje limova jezgre: a) jednofaznog i b) trofaznog transformatora

Isolacija limova izvodi se jednostrano ili dvostrano, i to s pomoću svilenog papira, laka, vodenog stakla, oksida itd. Izolacija, nejednolika debljina limova (od 0,3 do 0,5 mm) i hrapavost površine lima uzrokuju smanjenje aktivnog presjeka jezgre, pa je odnos čistog presjeka željeza  $S'_{Fe}$  prema ukupnom presjeku jezgre  $S_{Fe}$  manji od jedan. Taj odnos zove se *faktor punjenja paketa* i iznosi 0,85 - 0,97.

Prema obliku jezgre transformatori se dijele na *jezgraste* (stupnci) i *ognute* (oklopljene). Zbog ekonomskih i praktičnih razloga najčešći je jezgrasti oblik.

Na slici 3.1.2. predočena je načelna izvedba *jezgrastog* tipa jednofaznog i trofaznog transformatora. Jezgra se sastoji od *stupova* (1) koji nose *donjonaponski* (2) i *gornjonaponski* (3) namot te *gornjeg* (4) i *donjeg* (5) *jarma* koji povezuje stupove, a služi za zatvaranje magnetskog toka. Otvor između stupova i jarmova zove se *prozor jezgre* (6) i služi za smještaj namota.

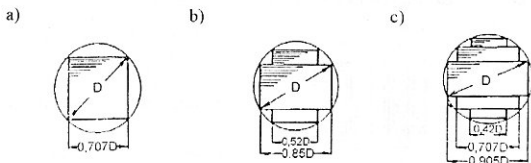


Sl. 3.1.2. Jezgrasti: a) jednofazni i b) trofazni transformator

Presjek stupa može imati različite geometrijske oblike, a neki su predočeni na slici 3.1.3. Tehnološki je najjednostavnije napraviti stup s pravokutnim presjekom (prema slici 3.1.3.a) jer je širina svili limova jednaka (za najmanje transformatore).

Za veće snage transformatora izrađuje se presjek stupa s većim brojem različitih širina limova (prema slici 3.1.3.b) i c)).

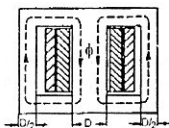
Presjek jarma obično je pravokutan ili kvadratni u manjih jezgrastih transformatora, a veći imaju stuboliki oblik. Obično je 10 - 15% veći od presjeka stupa jer je manja indukcija u jarmu, a s tim je manja i ukupna struja praznog hoda, odnosno manji su gubici u željezu.



Sl. 3.1.3. Oblici presjeka transformatorskog stupa:  
a) kvadratni, b) križni i c) stubasti

Željezna jezgra mora biti kruto učvršćena da ne dolazi do brujanja limova. Zato se limovi međusobno stežu podložnim pločama i vijcima od magnetskog materijala koji su izolacijskim valjkom dobro izolirani od limova.

U *ogrnutom* tipu transformatora, prema slici 3.1.4., kroz stup se zatvara magnetski tok  $\Phi$ , a kroz jarmove  $\Phi/2$ . Da bi indukcije u stupu i jarmu bile približno jednake, presjek je stupa približno dva puta veći. Taj tip jezgre rabi se za transformatore male snage ili samo u specijalnim slučajevima.



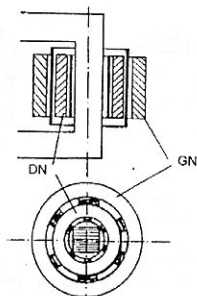
Sl. 3.1.4. Ogrnuti jednofazni transformator

*Namoti* transformatora nalaze se namotani oko stupova. Obično se izrađuju od čistog elektrolitskog bakra, okruglog ili pravokutnog presjeka vodiča. Ovisno o načinu hlađenja (suhi ili uljni), vodiči se izoliraju različitim izolacijom. Budući da na brodu treba ugrađivati samo suhe transformatore, ta izolacija može biti od pamuka impregnirana lakom na bazi umjetnih smola, ili od staklenog prediva impregnirana lakom na bazi umjetnih smola, ili impregnirana silikonskim lakom.

Kad je poznat smjer prenošenja energije, razlikuje se *primarni (ulazni)* i *sekundarni (izlazni) namot*. Prema visini napona namot se dijeli na *namot nižeg napona (donjonaponski - DN namot)* i *namot višeg napona (gornjonaponski - GN namot)*. Ti namoti postavljaju se uvijek oko istog stupa (a ne razdvojeni) jer je tada

rasipanje magnetskog toka najmanje. Zbog izolacijskih razloga, oko stupa postavlja se prvo *DN* namot, a onda na njega *GN* namot.

Prema položaju *DN* i *GN* namota, te njihovu oblikovanju, transformatorski namot može biti *koncentričan* i *plosnat*. Obje izvedbe imaju prednosti i nedostatke. Za energetske transformatore rabi se koncentrični namot, tj. koncentrični položaj *DN* i *GN* namota, kako je predočeno na slici 3.1.5.

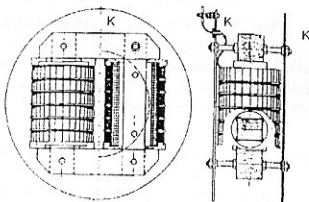


Sl. 3.1.5. Transformatorski koncentrični namot

Za napajanje raznih trošila, priključenih na brodsku mrežu, služe jednofazni i trofazni transformatori. Ti transformatori, hlađeni zrakom ili suhim dielektrikom, moraju osigurati napajanje trošila u svim plovidbenim uvjetima.

### 3.1.1. Jednofazni transformatori

U brodove se često ugrađuju jednofazni zračni ili suhi transformatori oblika prema slici 3.1.6. Da bi se poboljšalo hlađenje, stavljaju se između namota bakreni ili cinčani limovi koji su razrezani da ne tvore kratko spojene zavojice i da se u njima ne stvaraju velike vrtložne struje. Pričvršćuju se na dva koluta *K* radi sigurnosti pri valjanju broda, rijetko se dodatno hlade ventilatorima, a smješteni moraju biti tako da se sprječi kontakt s prašinom i vlagom.

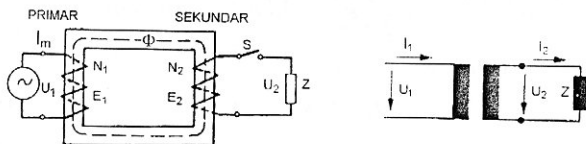


Sl. 3.1.6. Jednofazni zračni ili suhi transformator

Da bi se pojednostavnilo tumačenje načelo rada jednofaznih (pa i višefaznih) transformatora, može poslužiti *idealni* transformator.

### 3.1.1.1. Jednofazni idealni transformator

Pretpostavlja se da *idealni* transformator ima takvu željeznu jezgru koja omogućuje da se cijeli magnetski tok zatvara kroz sve zavojice oba namota; da je magnetska permeabilnost takve jezgre konstantna veličina vrlo visokog iznosa (pa je za stvaranje magnetskog toka u jezgri potrebna mala struja magnetiziranja); da su gubici u željezu i bakru te pad napona zanemarivo mali. Tim pretpostavkama odgovara transformator prikazan na slici 3.1.7.



Sl. 3.1.7. Načelna shema jednofaznog idealnog transformatora

Ako se primarni namot s  $N_1$  zavoja priključi na jednofazni izmjenični napon  $U_p$ , poteći će kroz namot izmjenična struja. Ta struja, tzv. *uzbudna struja* ili *struja magnetiziranja* ( $I_m$ ), s primarnim zavojima stvorit će protjecanje koje će uzbuditi magnetski tok  $\Phi$ . Budući da je i taj magnetski tok izmjeničan, prema zakonu elektromagnetske indukcije inducirat će se u primarnom namotu napon  $E_1$ , a u sekundarnom namotu napon  $E_2$ . Veličine tih induciranih napona određuju se prema II. Kirchhoffovu zakonu, koji kaže da zbroj svih napona u strujnom krugu mora biti jednak nuli. Uzevši u obzir pretpostavku za idealni transformator da u strujnom krugu nema padova napona, za primarnu stranu može se pisati da je:

$$U_1 + E_1 = 0,$$

odnosno:

$$E_1 = -U_1, \quad (3.1)$$

a za sekundarnu stranu:

$$E_2 = U_2. \quad (3.2)$$

Iz izraza (3.1) i (3.2) vidi se da je inducirani napon primara  $E_1$  *protunapon* koji drži ravnotežu naponu izvora  $U_p$ , dok je inducirani napon sekundara  $E_2$  *aktivni napon* koji će potjerati struju kroz trošila ako se sklopkom  $S$  označenom na slici 3.1.7. zatvori strujni krug.

Svaki od induciranih napona  $E_1$  i  $E_2$  može se predočiti kao funkcija vlastitog broja zavoja, jer je magnetski tok  $\Phi$  i njegova brzina promjene u oba slučaja jednaka:

$$E_1 = -N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.3)$$

$$\text{odnosno: } E_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.4)$$

Ako se podijeli izraz (3.3) s (3.4), dobiva se:

$$E_1 : E_2 = N_1 : N_2 \quad (3.5)$$

Izraz (3.5) vrijedi za svaki transformator, dok za *idealni* transformator također vrijedi:

$$U_1 : U_2 = N_1 : N_2 \quad (3.6)$$

Za idealni transformator mogu se zanemariti gubici, što energetski znači da je ulazna snaga  $U_1 I_1$  jednaka izlaznoj snazi  $U_2 I_2$ , pa vrijedi:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.7)$$

Iz izraza (3.6) i (3.7) slijedi:

$$I_1 : I_2 = N_2 : N_1 \quad (3.8)$$

$$\text{odnosno: } I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (3.9)$$

Izrazi (3.6) i (3.8) *osnovne* su ili *glavne jednadžbe* transformatora. One znače da se naponi primara i sekundara odnose kao njihovi brojevi zavoja, a struje primara i sekundara odnose se obrnuto proporcionalno njihovim brojevima zavoja. Iz izraza (3.9) slijedi da će namot određen za viši napon (*GN* namot) biti onaj koji ima više zavoja kroz koje teče slabija struja, a namot predviđen za niži napon (*DN* namot) bit će onaj koji ima manje zavoja kroz koje teče jača struja. Prema tome, *GN* namot ima više zavoja tanje žice, a *DN* namot ima manje zavoja deblje žice.

Budući da je osnovna karakteristična veličina pri procesu transformacije omjer  $E_1 : U_2$  koji se zove *omjer prenošenja* ili *prijenosni odnos* transformatora, za jednofazni idealni transformator taj se odnos može, prema izrazu (3.6), prikazati *koeffcijentom transformacije*:

$$k_{12} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.10)$$

odnosno, ako se primijeni izraz (3.7):

$$k_{21} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.11)$$

Za napomenuti je da su inducirani naponi i struje u namotima električnih strojeva *skalarne veličine*, vremenski promjenljive prema sinusnom zakonu. Često se simbolički prikazuju kao *lazori*, tj. *simbolički vektori*, a u udžbeniku su označeni strelicom iznad slovnog simbola. Kolike su trenutne vrijednosti napona i struja i koliki je vremenski pomak između njihovih prolazaka kroz maksimum, pokazuje *fazorski dijagram*.

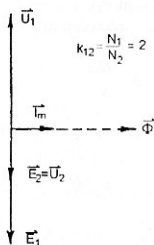
Za jednofazni idealni transformator karakteristična su dva pogonska stanja:

- prazni hod;
- opterećenje.

a) *Prazni hod* jednofaznog idealnog transformatora je njegovo granično pogonsko stanje, pri čemu je njegov primarni namot priključen na napon (poglavito nazivni napon), a sekundarni namot je otvoren (sklopka *S* na slici 3.1.7. nije uključena). Priključkom na izvor napona  $U_1$  kroz primarni namot poteći će vrlo mala struja koja zaostaje za naponom za  $90^\circ$ . Ta struja  $I_m$  uzbudit će magnetski tok  $\Phi$  koji je s njom u fazi. U sekundarnom namotu ne teče struja jer je otpor sekundara beskonačno velik.

Zbog vremenske promjene magnetskog toka  $\Phi$  inducirat će se u primarnom namotu protunapon  $E_p$ , a u sekundarnom namotu napon  $E_s$ . Ti su naponi u fazi, jer ih inducira isti magnetski tok, a njihovi su iznosi proporcionalni brojevima zavoja namota prema izrazu (3.5).

Na slici 3.1.8. prikazan je fazorski dijagram jednofaznog idealnog transformatora u praznom hodu uz pretpostavku da je broj zavoja primara dvostruko veći od broja zavoja sekundara, pa su tako nacrtani i iznosi induciranih napona.



Sl. 3.1.8. Fazorski dijagram jednofaznog idealnog transformatora u praznom hodu

b) *Opterećenje* transformatora nastupa u trenutku kad je primarni namot priključen na nazivni napon, a na sekundarni namot priključeno je trošilo (sklopka *S* na slici 3.1.7. je zatvorena).

Za vrijeme opterećenja transformatora kroz primarni namot teče primarna struja  $I_1$  koja se sastoji od dvije komponente. Jednu komponentu te struje, tzv. *struju magnetiziranja* ili *struju uzbuđene*  $I_m$ , stvara primarni napon  $U_p$ . Ta struja kasni iza napona  $U_1$  za  $90^\circ$  i sudjeluje u stvaranju magnetskog toka  $\Phi$ . Drugu komponentu primarne struje, tzv. *struju opterećenja*  $I_p$ , transformator uzima iz mreže za pokriće gubitaka pri opterećenju (obično je transformator opterećen istodobno radnim i induktivnim trošilom). Prema tome, može se pisati da je:

$$I_1 = I_m + I_p \quad (3.12)$$

Zbog inducirano sekundarnog napona  $E_s$ , poteći će kroz sekundarni strujni krug struja opterećenja  $I_s$ . Iznos struje  $I_2$  i njezin fazni pomak  $\phi_2$  određeni su priključenim trošilom pa je:

$$I_2 = \frac{E_s}{Z} = \frac{E_s}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3.13)$$



odnosno faktor snage:

$$\cos \varphi_2 = \frac{R}{Z}, \quad (3.14)$$

gdje je  $R$  omski, a  $X$  induktivni otpor trošila.

Budući da struja  $I_2$  teče i kroz sekundarne zavojne  $N_2$  s kojima stvara protjecanje  $I_2 N_2$ , narušit će se u primarnom strujnom krugu prvobitno stanje ravnoteže prema izrazu (3.1). U stacionarnom stanju mora postojati ravnoteža, pa transformator sam poništava djelovanje protjecanja sekundara  $I_2 N_2$  tako da zbog  $E_1 \neq -U_1$  iz mreže uzima komponentu struje  $I_p$ . Ta struja s primarnim zavojima  $N_1$  stvara protjecanje  $I_p N_1$  koje poništava djelovanje sekundarnog protjecanja, tj. mora biti ispunjen uvjet:

$$I_p N_1 = I_2 N_2 \quad (3.15)$$

Može se zaključiti da u stacionarnom stanju struja opterećenja ne utječe na iznos magnetskog toka u transformatorskoj jezgri, tj. magnetski tok je konstantan, neovisno o tome je li transformator opterećen ili radi u praznom hodu.

Iz izraza (3.15) slijedi:

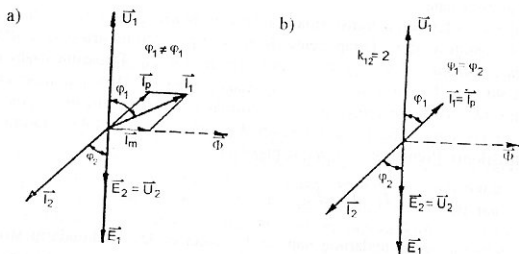
$$I_p = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1}, \quad (3.16)$$

pa je izraz (3.12) u toj prilici  $I_1 = I_m + I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1}$ , odnosno može se pisati da je:

$$I_1 \cdot N_1 = I_m \cdot N_1 + I_2 \cdot N_2. \quad (3.17)$$

Uspoređujući izraze (3.17) i (3.9) može se zaključiti da umnožak struje  $I_m$  i ukupnog broja zavoja primarnog namota  $N_1$  predstavlja ono protjecanje koje proizvodi magnetski tok  $\Phi$ . Ako se zancmari  $I_m$  izraz (3.17) prelazi u (3.9).

Fazorski dijagram opterećenog jednofaznog idealnog transformatora predložen je na slici 3.1.9. (na slici a) uz  $I_m \neq 0$ , a na slici b) uz  $I_m = 0$ ) uz pretpostavljeni koeficijent transformacije  $k_{12} = 2$ .



Sl. 3.1.9. Fazorski dijagram opterećenog jednofaznog idealnog transformatora

Kad se crta fazorski dijagram opterećenja jednofaznog idealnog transformatora, mora se paziti na smjer struje  $I_2$  koji ovisi o karakteru trošila (omsko, induktivno, kapacitivno, odnosno njihove kombinacije).

Ako se promatra rad jednofaznog idealnog transformatora s energetskog gledišta, polazeći od izraza (3.12) dobiva se :

$$U_1 \cdot I_1 = U_1 \cdot I_m + U_1 \cdot I_p, \quad (3.18)$$

a uzevši u obzir izraze (3.6) i (3.15) slijedi:

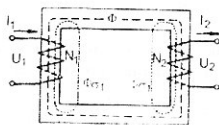
$$U_1 \cdot I_1 = U_1 \cdot I_m + U_2 \cdot I_2. \quad (3.19)$$

Iz izraza (3.19) može se zaključiti da opterećeni jednofazni idealni transformator uzima iz mreže potrebnu jalovu snagu za magnetiziranje željezne jezgre i prividnu snagu koju sekundarno predaje trošilu.

### 3.1.1.2. Jednofazni realni transformator

Tumačenja koja se odnose na jednofazni idealni transformator mogu se primijeniti i za jednofazni *realni* transformator, ali se kod realnog transformatora moraju uzeti u obzir sve stvarne karakteristike materijala od kojih je on izrađen. To znači da valja voditi računa o omskim otporima namota (na kojima pri prolasku struje nastaju padovi napona i gubici u bakru), permeabilnosti željezne jezgre (koja nije beskonačno velika, pa dolazi do izražaja magnetska vodljivost zraka, te se nastaju rasipni tokovi), magnetskoj vodljivosti željeza (koja nije konstantna, zbog čega i uz sinusoidni magnetski tok struja magnetiziranja nije posve sinusoidna) itd.

Kad se promatraju prilike u jednofaznom realnom transformatoru, posebno se mora uzeti u obzir da željezna jezgra ne vodi idealno magnetske silnice, pa se jedan dio magnetskog toka zatvara kroz zrak, odnosno svuda oko transformatora, kako je predočeno na slici 3.1.10. Magnetske silnice koje se zatvaraju kroz zavoje primarnog i sekundarnog namota čine *glavni magnetski tok*  $\Phi$  i on je elektromagnetska veza između obaju namota. Silnice koje se zatvaraju samo oko zavoja primarnog namota predstavljaju *rasipni magnetski tok primara*  $\Phi_{\sigma 1}$ , a silnice koje se zatvaraju oko sekundarnog namota oblikuju *rasipni magnetski tok sekundara*  $\Phi_{\sigma 2}$ .



Sl. 3.1.10. Magnetski tokovi jednofaznog realnog transformatora

Rasipni magnetski tok  $\Phi_{\sigma 1}$  u fazi je sa strujom  $I_1$ , a tok  $\Phi_{\sigma 2}$  u fazi je sa strujom  $I_2$  i oni uzrokuju gubitke u željezu. Glavni magnetski tok  $\Phi$  inducira u primarnom namotu napon  $E_p$ , a u sekundarnom namotu napon  $E_s$ . Ti naponi imaju u realnog transformatora isto značenje kao i u idealnog. Magnetski tok  $\Phi_{\sigma 1}$  inducira u primarnom namotu napon  $U_{\sigma 1}$  koji zaostaje za  $90^\circ$  za tokom  $\Phi_{\sigma 1}$ , a magnetski tok  $\Phi_{\sigma 2}$  inducira u sekundarnom namotu napon  $U_{\sigma 2}$  koji zaostaje za  $90^\circ$  za tokom  $\Phi_{\sigma 2}$ .

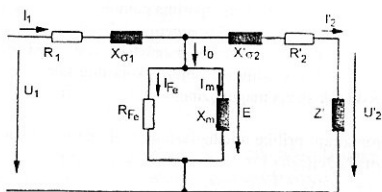
Da bi se moglo analitički odrediti ponašanje jednofaznog realnog transformatora kod opterećenja i nacrtati točan fazorski dijagram služi se njegovom nadomjesnom shemom, kao na slici 3.1.11. Poprečna grana u nadomjesnoj shemi obuhvaća prilike kod magnetiziranja željezne jezgre. Struja praznog hoda  $I_0$  rastavljena je na dvije komponente: struju u željezu (struja gubitaka)  $I_{Fe}$  i struju magnetiziranja (uzbudnu struju)  $I_m$ , koje prolaze kroz dva paralelno spojena nadomjesna otpora - omski  $R_{Fe}$  i induktivni  $X_m$ . Omski otpor  $R_{Fe}$  je takva iznosa da su njegovi ekvivalentni strujni gubici jednaki gubicima u željezu transformatora  $P_{Fe}$ :

$$I_{Fe}^2 R_{Fe} = P_{Fe} = \left( \frac{E}{R_{Fe}} \right)^2 R_{Fe},$$

odnosno: 
$$R_{Fe} = \frac{E^2}{P_{Fe}}. \quad (3.20)$$

Induktivni otpor  $X_m$  određuje se s pomoću poznatog induciranog napona  $E$  i struje magnetiziranja  $I_m$ :

$$X_m = \frac{E}{I_m}. \quad (3.21)$$



Sl. 3.1.11. Nadomjesna shema jednofaznog realnog transformatora

U nadomjesnoj shemi na slici 3.1.11. nisu prikazane stvarne sekundarne veličine, već sekundarne veličine reducirane na primarni broj zavoja (pretpostavlja se da je omjer transformacije jednak jedinici). Te veličine zovu se *reducirane*, a za razliku od stvarnih veličina označuju se crticom.

Sekundarni naponi reduciraju se na primarni broj zavoja tako da se pomnože koeficijentom transformacije, pa za jednofazni realni transformator iznose:

$$U'_2 = U_1 = U_2 \cdot k_{12} = U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2}, \quad (3.22)$$

odnosno:

$$E'_2 = E_1 = E_2 \cdot k_{12} = E_2 \cdot \frac{N_1}{N_2}. \quad (3.23)$$

Sekundarna struja reducira se na primarni broj zavoja tako da se podijeli koeficijentom transformacije  $k_{12}$ , odnosno pomnoži recipročnom vrijednošću  $k_{21}$ :

$$I'_2 = I_1 = I_2 \cdot k_{21} = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1}. \quad (3.24)$$

Na takav način reducirana snaga ostaje jednaka stvarnoj snazi, što odgovara načelu održavanja energije:

$$P_2' = U_2' \cdot I_2' = U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} = U_2 \cdot I_2 = P_2. \quad (3.25)$$

Sekundarni djelatni otpor reducira se na primarni broj zavoja tako, da se pomnoži kvadratom koeficijenta transformacije:

$$R_2' = \frac{U_2'}{I_2'} = \frac{U_2 \cdot k_{12}}{I_2 \cdot k_{21}} = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = R_2 \cdot k_{12}^2. \quad (3.26)$$

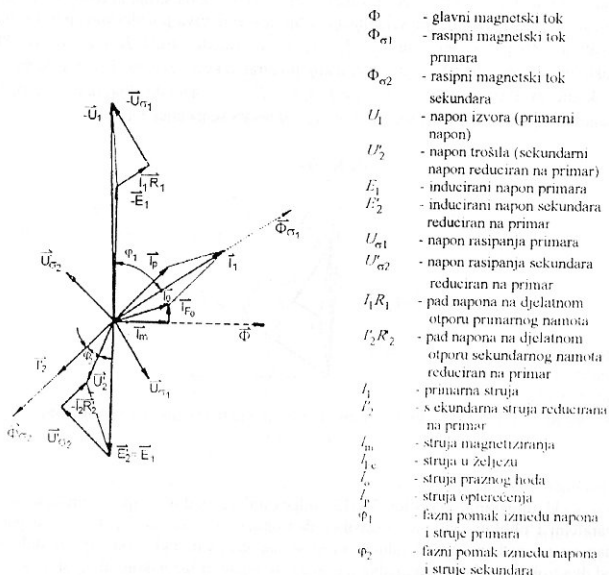
Jednako tako vrijedi za prividni otpor:

$$X_{\sigma 2}' = X_{\sigma 2} \cdot k_{12}^2, \quad (3.27)$$

odnosno za impedanciju:

$$Z' = Z \cdot k_{12}^2. \quad (3.28)$$

Uzimajući u obzir utjecaj pojedinih veličina, vodeći računa o smjeru pojedinih fazora i poštujući osnovna načela elektrotehnike, fazorski dijagram opterećenja jednofaznog realnog transformatora predložen je na slici 3.1.12.



Sl. 3.1.12. Fazorski dijagram opterećenja jednofaznog realnog transformatora

Na temelju II. Kirchhoffova zakona mogu se izračunati iznosi napona na stezaljkama primara i sekundara. Za primarni napon vrijedi:

$$U_1 + E_1 + U_{\sigma 1} = I_1 R_1,$$

odnosno:

$$U_1 = -E_1 - U_{\sigma 1} + I_1 R_1, \quad (3.29)$$

dok je za sekundarni napon:

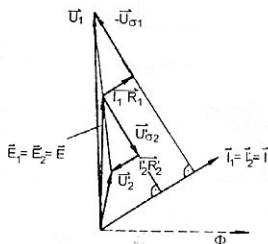
$$E_2 + U_{\sigma 2} = I_2' R_2 + U_2 = I_2' R_2 + I_2' Z',$$

odnosno

$$U_2 = I_2' Z' = E_2 + U_{\sigma 2} - I_2' R_2. \quad (3.30)$$

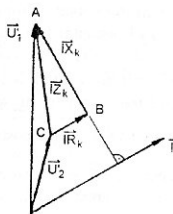
Pri tome je napon na sekundarnim stezaljkama  $U_2$  jednak padu napona na trošilu ( $I_2' Z'$ ).

Da bi se dobila preglednija slika o utjecaju padova napona u jednofaznom realnom transformatoru, može se zanemariti relativno mala struja praznog hoda (koja iznosi od 3 do 10% nazivne vrijednosti struje) pa se dobiva pojednostavljeni fazorski dijagram. Zbog toga postaje  $I_2' = I_1 = I$ , a kut između struja  $I_2'$  i  $I_1$  iznosi  $180^\circ$ . Također, ako se sekundarni dio fazorskog dijagrama koji se nalazi ispod apscisne osi zaokrene za  $180^\circ$ , postaje  $E_1 = E_2' = E$  i  $I_1 = I_2' = I$ . Fazorski dijagram opterećenja jednofaznog realnog transformatora uz  $I_0 = 0$  nalazi se na slici 3.1.13.



Sl. 3.1.13. Fazorski dijagram opterećenja jednofaznog transformatora pri  $I_0 = 0$

U dijagramu na slici 3.1.13. odgovarajući padovi napona međusobno su paralelni i oblikuju stranice pravokutnih trokuta. Ako se algebarski zbroje padovi napona na omskom otporu, odnosno padovi napona na induktivnom otporu, dobiva se od dva trokuta pada napona jedan u pojednostavljenom fazorskom dijagramu, kako je prikazano na slici 3.1.14. Pri tome više nije potrebno označavati magnetski tok i inducirane napone.



Sl. 3.1.14. Pojednostavnjeni fazorski dijagram jednofaznog transformatora

Pojedine stranice pravokutnog trokuta  $ABC$  na slici 3.1.14. predočavaju padove napona određene kao umnožak struje s rezultirajućim otporima (označenima indeksom  $k$ ). Tako ukupni pad napona na omskom otporu iznosi

$$U_R = I_1 R_1 + I_2' R_2' = I(R_1 + R_2') = IR_k. \quad (3.31)$$

Na jednak način dobit će se za pad napona na induktivnom rasipnom otporu:

$$U_X = I_1 X_{\sigma 1} + I_2' X_{\sigma 2}' = I(X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}') = IX_k, \quad (3.32)$$

pa je ukupni pad napona određen izrazom:

$$U_k = \sqrt{U_R^2 + U_X^2} = I\sqrt{R_k^2 + X_k^2} = IZ_k. \quad (3.33)$$

Pri nazivnom opterećenju (nazivne struje) padovi su napona nazivnog iznosa. U toj prilici obično se padovi napona izražavaju u postocima nazivnog napona pa je:

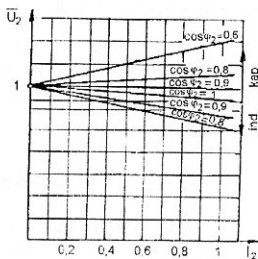
$$u_R = \frac{U_R}{U_n} \cdot 100\%, \quad u_X = \frac{U_X}{U_n} \cdot 100\% \quad \text{i} \quad u_k = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100\%.$$

Iz prikazanog se vidi da se padovi napona u jednofaznom realnom transformatoru, koji su uzrokovani omskim i induktivnim otporom namota, mogu zajednički promatrati kao ukupni pad napona zbog kojeg dolazi do promjene napona na sekundarnoj strani transformatora. Zbog toga je pri opterećenju transformatora općenito  $U_1$  različito od  $U_1^0$ .

Ukupni pad napona  $U_k$  može se izraziti kao umnožak struje  $I$  i ukupnog otpora  $Z_k$ , pa se u jednofaznog realnog transformatora može smatrati da su svi padovi napona nastali u nekom kompleksnom otporu  $Z_k$  (koji se sastoji od primarnog i sekundarnog omskog otpora te primarnog i sekundarnog induktivnog otpora). Prema tome,  $Z_k$  odgovara ukupnom unutarnjem otporu jednofaznog realnog transformatora.

Trokut  $ABC$  na slici 3.1.14. zove se *Kappov trokut pada napona*. Na temelju njega moguće je konstrukcijski odrediti pad napona u realnom transformatoru.

Promjena struje opterećenja mijenja pad napona u realnom transformatoru i napon na njegovim sekundarnim stezaljkama. Promjena napona stezaljka sekundara u ovisnosti o struji opterećenja za konstantni faktor snage  $\cos \varphi_2$  približno je linearna. Karakteristike definirane kao  $\bar{U}_2 = f(\bar{I}_2)$  uz  $\cos \varphi_2 = \text{konst.}$ , zovu se *vanjske karakteristike* realnog transformatora, a predložene su na slici 3.1.15. Na toj slici koordinate predstavljaju reducirane vrijednosti sekundarnog napona  $\bar{U}_2$ , odnosno sekundarne struje  $\bar{I}_2$  na njihove nazivne vrijednosti ( $\bar{U}_2 = \frac{U_2}{U_{2n}}, \bar{I}_2 = \frac{I_2}{I_{2n}}$ ). U pogledu utjecaja karaktera opterećenja realnog transformatora vidi se da induktivno opterećenje smanjuje reducirani napon na stezaljkama sekundara, a kapacitivno opterećenje ga povećava.

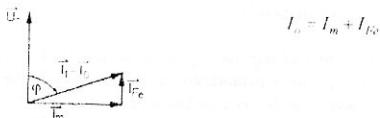


Sl. 3.1.15. Vanjske karakteristike realnog transformatora

Za jednofazni realni transformator važna su njegova dva granična pogonska stanja: *prazni hod* i *kratki spoj*. Pokusima praznog hoda i kratkog spoja moguće je odrediti, odnosno izmjeriti neke njegove osnovne podatke.

a) Opis *praznog hoda* jednofaznog realnog transformatora odgovara opisu za jednofazni idealni transformator (vidi točku 3.1.1.1.) s tom razlikom što se u ovom slučaju moraju uzeti u račun sva tamo naznačena pojednostavnjenja.

Zbog gubitaka u željezu uzrokovanih pojavom histereze i vrtložnih struja teče u praznom hodu osim struje magnetiziranja  $I_m$  (čista bezvatna komponenta) i struja u željezu  $I_{Fe}$  (vatna komponenta) koja je u fazi s naponom  $U_1$ . Zbog toga će fazor ukupne struje praznog hoda  $I_0$  zatvarati s fazorom napona  $U_1$  kut  $\varphi_0$  manji od  $90^\circ$ . Fazorski dijagram struje praznog hoda realnog transformatora vidi se na slici 3.1.16.

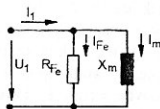


Sl. 3.1.16. Fazorski dijagram struje praznog hoda realnog transformatora

Apsolutna vrijednost struje praznog hoda  $I_0$  određuje se s pomoću izraza:

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_{Fe}^2} \quad (3.34)$$

Budući da je u praznom hodu  $R_{Cu} \ll R_{Fe}$  i  $X_\sigma \ll X_m$ , nadomjesna shema realnog transformatora u praznom hodu može se predočiti kao na slici 3.1.17.



Sl. 3.1.17. Nadomjesna shema realnog transformatora u praznom hodu

Ukupni gubici jednofaznog realnog transformatora u praznom hodu  $P_o$  su:

$$P_o = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_d, \quad (3.35)$$

gdje su:

- $P_{Cu1}$  - gubici u bakru primarnog namota (zbog struje koja protječe kroz zavoje),
- $P_{Fe}$  - osnovni gubici u željezu (zbog pojave histereze i vrtložnih struja);
- $P_d$  - dodatni gubici u željezu (zbog promjena pri mehaničkoj obradi limova željezne jezgre, nejednolikosti magnetske indukcije na mjestu spojeva stupova i jarmova jezgre itd.).

Ako se zanemare gubici u bakru  $P_{Cu1}$  (jer iznose cca 2% ukupnih gubitaka u praznom hodu), tada je:

$$P_o = P_{Fe} + P_d = (1,15 - 1,20)P_{Fe}. \quad (3.36)$$

Snaga  $P_{Fe}$ , kako je već rečeno, dovodi se u transformator komponentom struje  $I_{Fe}$  pa je:

$$P_{Fe} = U_1 \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o = U_1 \cdot I_{Fe}. \quad (3.37)$$

Iz (3.37) može se odrediti struja u željezu (struja gubitaka) i faktor snage praznog hoda  $\cos \varphi_o$ :

$$I_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{U_1}, \quad (3.38)$$

odnosno:

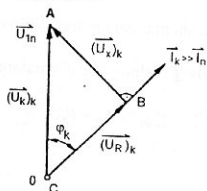
$$\cos \varphi_o = \frac{P_{Fe}}{U_1 I_o}. \quad (3.39)$$

Kad bi se spojio vatmetar u primarni strujni krug, tada bi on mjerio u praznom hodu vrlo malu snagu. Ta snaga potrebna je za pokriće gubitaka u željezu. Budući da su gubici u primarnom namotu zanemarivo mali, *gubici u željezu zovu se i gubici praznog hoda*. Gubitke u željezu realnog transformatora moguće je odrediti *pokusom praznog hoda*.



b) *Kratki spoj* je takvo pogonsko stanje jednofaznog realnog transformatora u kojemu je primarni namot priključen na napon  $U_1$  (najčešće nazivni napon), a sekundarne su stezaljke kratko spojene (impedancija trošila jednaka je nuli). Priključkom na nazivni napon  $U_{1n}$  namotima će poteći jako velika struja kratkog spoja  $I_k$  koja uzrokuje ukupni pad napona u transformatoru jednak primarnom naponu, tj. sekundarni napon jednak je nuli ( $U_2 = 0$ ).

Veličina struje kratkog spoja unaprijed će se odrediti ako se zna tzv. *napon krakog spoja*  $U_k$  transformatora. To je napon koji se mora spojiti na primarnu stranu transformatora ( $U_{1n} = U_k$ ) i koji će, uz kratkospojeni sekundarni namot, namotima primara i sekundara potjerati nazivnu struju  $I_n$ . Fazorski dijagram za kratki spoj realnog transformatora sadrži slika 3.1.18.



Sl. 3.1.18. Fazorski dijagram za kratki spoj realnog transformatora

Napon krakog spoja manji je od nazivnog primarnog napona (napona mreže) i često se označava u postotnom iznosu nazivnog napona. U tom slučaju *postotni napon krakog spoja*  $u_k$  dobiva se iz izraza

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 100\%, \quad (3.40)$$

a naznačen je na natpisnoj pločici transformatora. Za male i srednje jednofazne realne transformatore iznosi od 2,5 do 4%, a za velike od 4 do 10%.

Struja pogonskog kratkog spoja realnog transformatora znatno je veća od nazivne struje i računa se iz izraza:

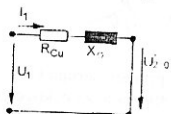
$$I_k = I_n \frac{U_{1n}}{U_k} 100\%, \quad (3.41)$$

odnosno primjenom izraza (3.40):

$$I_k = I_n \frac{100}{u_k} \quad (3.42)$$

Vidi se da će struja pogonskog kratkog spoja biti toliko puta veća od nazivne struje koliko je puta postotni napon kratkog spoja manji od 100%.

Budući da su u kratkom spoju  $R_{\Sigma}$  i  $X'_{\Sigma}$  zanemarivi nadomjesna shema realnog transformatora u kratkom spoju može se predočiti kao na slici 3.1.19.



$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2, \quad R_1 \approx R_2'$$

$$X'_{\Sigma} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}$$

Sl. 3.1.19. Nadomjesna shema realnog transformatora u kratkom spoju

Kad bi se spojio vatmetar u primarni strujni krug pri kratkom spoju realnog transformatora, tada bi on mjerio *snagu kratkog spoja*  $P_k$  toga transformatora. Snaga  $P_k$  troši se samo na toplinske gubitke u omskom otporu primarnog i sekundarnog namota ( $P_{Cu1}$  i  $P_{Cu2}$ ), jer je ukupni magnetski tok malen pa su gubici u željezu zanemarivo maleni. Zbog toga može se napisati da je:

$$P_k = P_{Cu1} + P_{Cu2} = P_{Cu}, \quad (3.43)$$

odnosno *gubici u bakru jednaki su gubicima kratkog spoja*. Gubitke u bakru realnog transformatora moguće je odrediti *pokusom kratkog spoja*.

Također, moguće je izračunati faktor snage pri kratkom spoju realnog transformatoru iz izraza:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{Cu}}{U_k I_n}. \quad (3.44)$$

Ako se pokusom praznog hoda odrede gubici u željezu ( $P_{Fe}$ ), a pokusom kratkog spoja gubici u bakru ( $P_{Cu}$ ) realnog transformatora, tada ukupni gubici opterećenog transformatora iznose:

$$P_g = P_{Cu} + P_{Fe}. \quad (3.45)$$

Budući da je:

$$P_1 = P_2 + P_g = P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}, \quad (3.46)$$

dobiva se da je korisnost realnog transformatora:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + P_{Fe}}. \quad (3.47)$$

Također je:

$$P_2 = P_1 - P_g = P_1 - P_{Cu} - P_{Fe}, \quad (3.48)$$

pa za korisnost izlazi:

$$\eta = \frac{P_1 - P_g}{P_1} = 1 - \frac{P_g}{P_1} = 1 - \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{P_1} = 1 - \frac{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + P_{Fe}}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}. \quad (3.49)$$

Ako su u izrazima (3.47) i (3.49) nazivne vrijednosti, tada dobiveni rezultati izračunavaju nazivnu korisnost  $\eta_n$ .

Uz konstantni iznos i frekvenciju priključnog napona *gubici u željezu su konstantni* i ne mijenjaju se s promjenom opterećenja. Naprotiv, *gubici u bakru mijenjaju se s kvadratom promjene struje* (opterećenja), te kod promjene opterećenja od nazivne vrijednosti  $P_{2n}$  na neku drugu vrijednost  $P_2 = xP_{2n}$ , nastaje i promjena

gubitaka u bakru od vrijednosti  $P_{Cun}$  na vrijednost  $P_{Cu} = x^2 P_{Cun}$ , zbog čega se korisnost mijenja s promjenom opterećenja.

Pri bilo kojem opterećenju  $x P_{2n}$  korisnost se određuje prema izrazu:

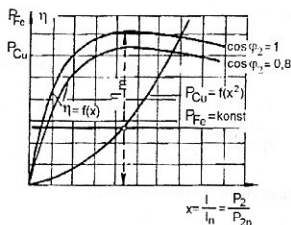
$$\eta_x = \frac{x P_{2n}}{x P_{2n} + x^2 P_{Cun} + P_{Fe}}, \quad (3.50)$$

gdje je  $x = \frac{P_2}{P_{2n}}$ , tj. *relativno opterećenje*.

Ako se derivira izraz (3.50) po  $x$  i izjednači s nulom, slijedi da će se maksimalna korisnost  $\eta_m$  postići pri onom opterećenju kod kojeg promjenjivi gubici u bakru postaju jednaki stalnim gubicima u željezu, tj. vrijedi da je:

$$x = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{Cun}}}. \quad (3.51)$$

Na slici 3.1.20. predočena je ovisnost gubitaka u bakru i gubitaka u željezu te korisnosti (za različiti faktor snage) o opterećenju realnog transformatora.



Sl. 3.1.20. Ovisnost gubitaka i korisnosti o opterećenju realnog transformatora

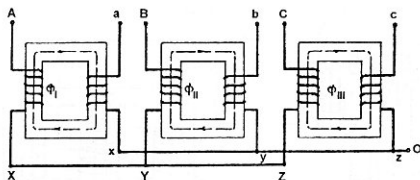
Jednofazni realni transformatori koji trajno rade opterećeni nazivnim opterećenjem ( $x = 1$ ) imat će najpovoljniju korisnost prema (3.51) ako je  $P_{Cun} = P_{Fe}$ . Međutim, većina energetskih transformatora projektira se tako da je  $P_{Cun} = (2 - 5) P_{Fe}$ , čime se postiže najpovoljnija godišnja korisnost. Jednako tako uz nepromijenjene nazivne gubitke u transformatoru korisnost  $\eta$  postaje manja uz manji faktor snage  $\cos \varphi_2$ .

### 3.1.2. Trofazni transformator

Transformacija napona u trofaznoj brodskoj mreži ostvaruje se na dva načina:

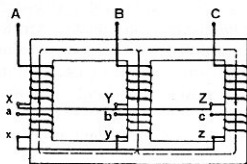
- ugradnjom tri jednofazna transformatora, odnosno na američki način;
- ugradnjom jednog trofaznog transformatora, odnosno na europski način.

*Američki način transformiranja napona* ostvaruje se ugradnjom tri odvojena jednofazna transformatora, kako je skicirano na slici 3.1.21.



Sl. 3.1.21. Skica američkog načina transformiranja napona

*Europski način transformiranja napona* ostvaruje se ugradnjom jednog trofaznog transformatora, kako je skicirano na slici 3.1.22.



Sl. 3.1.22. Skica europskog načina transformiranja napona

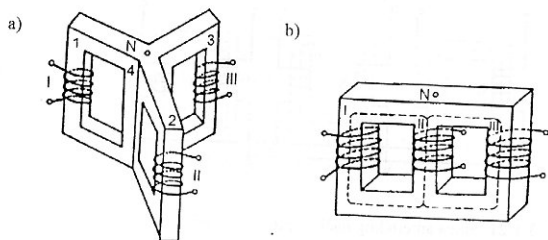
Poradi svojih prednosti, na brodovima se rabe oba načina transformiranja napona.

Jednofazni transformator opisan je u točki 3.1.1., pa se ovdje opisuje samo trofazni transformator.

*Trofazni transformator* nastao je spajanjem triju jednofaznih transformatora tako da je po jedan njihov stup vezan u zajednički. Takva trofazna jezgra zove se *simetrična s povratnim magnetskim putem*, kako se vidi na slici 3.1.23.a). Fazni namoti postavljeni su na stupove 1, 2 i 3, i oni prolaskom struje stvaraju svoje magnetske tokove koji se zatvaraju kroz zajednički stup 4. Budući da su namoti na svakom stupu izvedeni s istim brojem zavoja i simetrično su raspoređeni, to su pri simetričnom opterećenju i struje magnetiziranja, a po njima i uzbuđeni magnetski tokovi, međusobno jednaki i pomaknuti za  $120^\circ$ . U tom će slučaju zbroj triju magnetskih tokova u svakom trenutku biti jednak nuli, tj.:

$$\Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III} = 0. \quad (3.52)$$

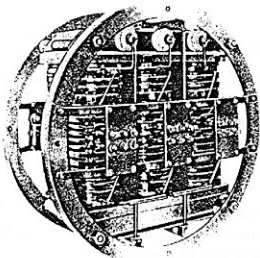
Budući da je rezultirajući magnetski tok u četvrtom stupu jednak nuli, može se napraviti jezgra bez toga stupa. Takva trofazna jezgra (bez povratnog stupa) također je simetrična jer je nul-točka  $N$  jednako udaljena od sva tri stupa.



Sl. 3.1.23. Oblik: a) simetrične i b) nesimetrične jezgre trofaznog transformatora

Oblik jezgre prema slici 3.1.23.a) neprikladan je za izvedbu pa se danas jezgre izvode tako da su sva tri stupa u jednoj ravnini, kako je predočeno na slici 3.1.23.b). Na taj način jezgra je postala *nesimetrična*, jer dužine svih tokova do zvjezdišta  $N$  nisu više jednake. Zbog toga je struja magnetiziranja za srednji stup nešto manja od struje magnetiziranja za ostala dva stupa, ali se razlike u normalnom pogonu mogu zanemariti (struja magnetiziranja iznosi svega nekoliko postotaka nazivne struje).

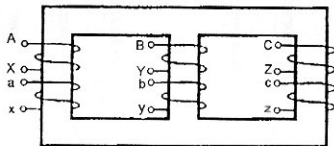
Na slici 3.1.24. vidi se jedan brodski trofazni transformator.



Sl. 3.1.24. Jedan brodski trofazni transformator

Za tumačenje trofaznog transformatora poslužit će skica prema slici 3.1.25. Pri tome koristit će se oznakama prema propisima IEC, koji se i u nas primjenjuju. To znači da će se počeci faznih GN namota označavati slovima  $A$ ,  $B$  i  $C$ , svršeci slovima

X, Y i Z, a nul-točka (zvjezdšte) slovom N. Za DN namot vrijede iste oznake, samo malim slovima.

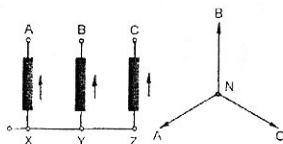


Sl. 3.1.25. Skica trofaznog transformatora

Namoti za pojedine faze trofaznog transformatora mogu se spojiti u *zvijezdu*, *trokut* ili *razlomljenu zvijezdu (cik-cak)*.

*Spoj u zvijezdu* (oznaka Y za GN namot, a y za DN namot) je takav spoj u kojem su tri istoimene stezaljke faznih namota (tri početka ili tri svršetka faznog namota) međusobno povezane u nul-točku (zvjezdšte), a ostale tri stezaljke služe za priključak trofazne mreže (ako se radi o GN namotu transformatora) ili trošila (ako je to DN namot transformatora). Načelno spajanje trofaznog namota u spoj u zvijezdu i fazorski dijagram induciranih napona pokazani su na slici 3.1.26. Kod spoja u zvijezdu, linijska struja  $I_l$  (struja u vodiu) jednaka je faznoj struji  $I_f$  (struja u svakom faznom namotu), a linijski napon  $U_l$  (međufazni napon) jednak je fazorskoj razlici dvaju faznih napona  $U_f$  pa se može pisati da je:

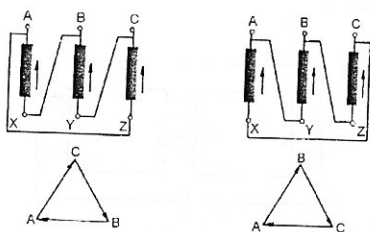
$$I_l = I_f \quad U_l = \sqrt{3}U_f.$$



Sl. 3.1.26. Shema trofaznog namota spojenoga u zvijezdu i odgovarajući fazorski dijagram napona

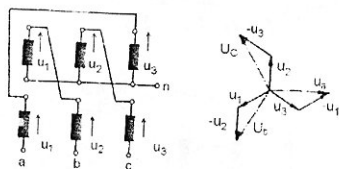
*Spoj u trokut* (oznaka D za GN namot, a d za DN namot) takav je spoj u kojem su sva tri fazna namota spojena u serijski spoj prema slici 3.1.27. Uz spoj namota predočen je fazorski dijagram induciranih napona. Kod spoja u trokut, linijski napon  $U_l$  jednak je faznom naponu  $U_f$  a linijska struja  $I_l$  jednaka je fazorskoj razlici dviju faznih struja  $I_f$  pa se može pisati da je:

$$U_l = U_f \quad I_l = \sqrt{3}I_f.$$



Sl. 3.1.27. Shema trofaznog namota spojenoga u trokut i odgovarajući fazorski dijagram napona

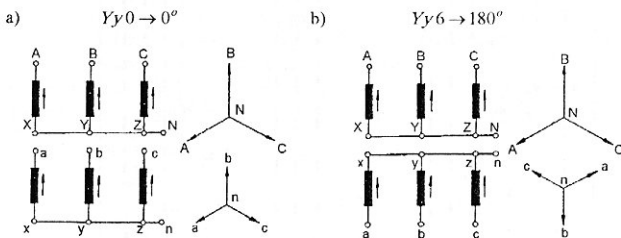
*Razlomljena zvijezda* ili *cik-cak spoj* (oznaka Z za GN namot, a z za DN namot) takav je spoj u kojem je namot svake faze razdijeljen na dvije polovice, od kojih se jedna nalazi na jednom stupu, a druga polovica iste faze na drugom stupu. Zbog toga taj spoj ima ukupno šest polunamota, i to na svakom stupu po dva, a svaki pripada drugoj fazi. Namot jedne faze dobiva se serijskim protuspojem objiju polovica. To znači da se obje polovice namota moraju međusobno spojiti istoimenim krajevima. Shema spoja razlomljene zvijezde trofaznog namota i odgovarajući fazorski dijagram vide se na slici 3.1.28.



Sl. 3.1.28. Shema trofaznog namota spojenoga u razlomljenu zvijezdu i odgovarajući fazorski dijagram napona

Napon pojedine faze u spoju razlomljena zvijezda dobiva se kao fazorska razlika dvaju napona međusobno pomaknutih za  $120^\circ$ . Uspoređujući napon spoja u zvijezdu i napon spoja razlomljena zvijezda (pri istom broju zavoja) dolazi se do zaključka da je napon spoja razlomljena zvijezda manji za  $\sqrt{3}/2$  puta. Ako se želi kod spoja razlomljena zvijezda dobiti isti napon kao kod spoja u zvijezdu, potrebno je  $2/\sqrt{3}$  puta više zavoja, što iznosi približno 15,5%. Iako se iz rečenog može zaključiti da spoj razlomljena zvijezda nije ekonomičan, tim spojem koristi se često samo na DN strani gdje su moguća nesimetrična opterećenja.

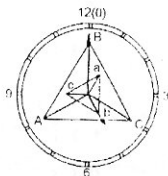
Dvonamotni trofazni transformatori mogu imati različite vrste spojeva namota, odnosno različit spoj GN i DN namota. Uobičajene su sljedeće vrste spoja: Yy, Yd, Yz, Dy, Dd i Dz. Međutim, samo označavanje nije dovoljno da se električki potpuno definiira spoj, jer je moguće da dva transformatora koji imaju potpuno jednaku vrstu spoja ne budu električki potpuno jednaki. Tako se npr. prema slici 3.1.29. vidi da iako su vrste spoja iste (Yy), ipak postoji razlika u kutu zaostajanja fazora napona DN strane prema istoimenim fazoru napona GN strane. Na slici 3.1.29.a) taj pomak iznosi  $0^\circ$ , a na slici 3.1.29.b) iznosi  $180^\circ$ .



Sl. 3.1.29. Grupe spoja a)Yy 0 i b)Yy 6 trofaznog transformatora

Spomenuti kutovi zaostajanja fazora napona DN strane za istoimenim fazorom napona GN strane međusobno se razlikuju za  $30^\circ$  ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ... do  $360^\circ$ ) i uvijek su takva iznosa da podijeljeni s 30 daju jedan od brojeva 0, 1, 2, ... do 11. Ti se brojevi zovu *satni brojevi* jer i kut dviju susjednih brojaka na brojičaniku sata iznosi također  $30^\circ$ . Na taj način jednoznačno je definiran kut zaostajanja, pa vrsta spoja sa satnim brojem čine *grupu spoja* trofaznog transformatora.

U prikazivanju gupe spoja s pomoću satnog brojičanika pretpostavlja se da fazor faznog napona GN strane (velika kazaljka sata) pokriva brojku 12, a istoimeni fazor faznog napona DN strane (mala kazaljka sata) pokriva na brojičaniku satni broj. Slika 3.1.30. pokazuje satni broj 5 kod kojega fazor napona DN strane zaostaje za istoimenim fazorom napona GN strane za kut  $\varphi = 5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ .



Sl. 3.1.30. Satni broj za grupu spoja Yd 5 trofaznog transformatora

U tablici 3.1.1. naznačene su grupe spoja i svojstva spojeva trofaznih transformatora.



Tabl. 3.1.1. Grupe spoja energetskih trofaznih transformatora

Broj	Dd i Dy	Yy i Yd	Dz i Yz
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

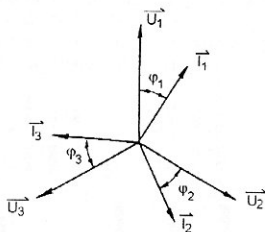
Svaki trofazni transformator može se opteretiti na sekundarnim stezaljkama *simetrično* ili *nesimetrično*.

Pri *simetričnom opterećenju* svaka je faza opterećena jednakom impedancijom  $Z$ , pa uz simetrični trofazni napon brodske mreže i struje trošila čine simetrični trofazni sustav. To ujedno znači da je zbroj trenutnih vrijednosti struja jednak nuli. Prema tome, za simetrično opterećenje vrijedi :

$$I_1 = I_2 = I_3 \quad \Sigma I = 0 \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3. \quad (3.53)$$

Simetrično opterećenje trofaznog transformatora uvjetuje da se on ponaša kao jednofazni. Sekundarno opterećenje svake faze stvara sekundarno protjecanje (amperzavoji sekundara  $I_2 N_2$ ), koje se mora poništiti primarnim protjecanjem (amperzavoji primara  $I_1 N_1$ ). Zbog toga svaka faza primara povuče iz mreže struju opterećenja koja s namotom primara stvara amperzavoje kojima se poništava djelovanje sekundarnih amperzavoja.

Za trofazni simetrični sustav fazorski dijagram predložen je na slici 3.1.31.



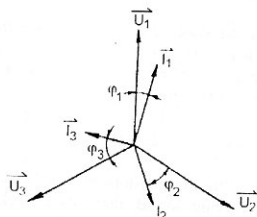
Sl. 3.1.31. Fazorski dijagram simetričnog trofaznog sustava

Pri simetričnom opterećenju nije bitno koju grupu spoja ima trofazni transformator. Radi jednostavnosti proizvodnje najčešće se odabire spoj  $Yy 0$ . U tom zvijezda-zvijezda spoju izolacija je najslabije opterećena, jer je fazni namot naponski naprežan samo s  $\sqrt{3}$  puta manjim naponom od linijskog. Za vrlo velike snage uzima se spoj  $Dy 5$ , jer trokut spoj na GN strani uvjetuje bolje prilike u pogledu struje magnetiziranja.

*Nesimetrično opterećenje* trofaznog transformatora je takvo opterećenje u kojem je makar i jedna faza opterećena drugim iznosom impedancije ili/i drugim karakterom opterećenja. U tom slučaju, iako je priključni napon simetričan, iznosi struja, ili/i njihovi fazni pomaci nisu više isti. To znači da svi, ili bilo koji znak jednakosti u izrazima (3.53) više ne vrijedi. Prema tome, pri nesimetričnom opterećenju nije zbroj struja svakog trenutka jednak nuli, tj. u tom je slučaju:

$$\Sigma I \neq 0. \quad (3.54)$$

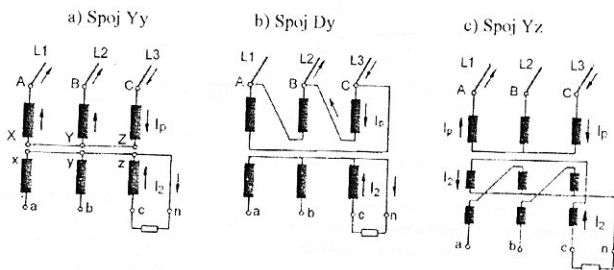
Za trofazni nesimetrični sustav fazorski dijagram prikazan je na slici 3.1.32.



Sl. 3.1.32. Fazorski dijagram nesimetričnog trofaznog sustava

Najnepovoljniji slučaj nesimetričnog opterećenja trofaznog transformatora je *jednofazno opterećenje*. Rad transformatora je moguć ako je kod jednofaznog opterećenja postignuto da na primaru teče struja samo kroz onu fazu koja je na sekundaru opterećena. To znači da je zatvoren strujni krug *izvor - primarni namot sekundarno opterećene faze - izvor*. U tom će slučaju struja opterećenja primara sa svojim amperzavojima poništiti djelovanje amperzavoja sekundarno opterećene faze.

Na slici 3.1.33. vide se neki primjeri jednofazno opterećenog trofaznog transformatora.



Sl. 3.1.33 Nesimetrično (jednofazno) opterećenje trofaznog transformatora

U spoju *zvijezda - zvijezda* (Yy), prema slici 3.1.33.a), struja opterećenja mora teći i kroz ostale dvije neopterećene faze primara. Struje u neopterećenim fazama djeluju kao struje magnetiziranja, jer nemaju amperzavoje na sekundarnim stranama koje bi poništile. Na taj način potpuno se poremeti simetrija induciranih napona, pa taj spoj *nije pogodan za nesimetrično opterećenje*.

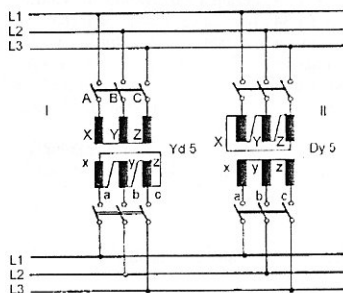
Spoj *trokut - zvijezda* (Dy), prema slici 3.1.33.b), pogodan je za *nesimetrično opterećenje* i često se upotrebljava. Jednofazno sekundarno opterećenje prenosi se primarno na odgovarajuću fazu i struja opterećenja može teći iz izvora u spomenutu fazu i vratiti se u izvor, a da pri tome ne prolazi kroz ostale dvije neopterećene faze.

Spoj *zvijezda - razlomljena zvijezda* (Yz), prema slici 3.1.33.c), *dopušta* također *nesimetrično opterećenje*. Budući da svako jednofazno opterećenje izaziva na

sekundarnoj strani prolazak struje kroz dvije polufaze koje su smještene na dva stupa, na primarnoj strani može struja opterećenja teći iz izvora jednim vodom, a prema izvoru drugim. Na taj će način amperzavoji primarne struje opterećenja poništiti djelovanje amperzavoja sekundarne strane.

### 3.1.3. Paralelni rad transformatora

Ako jedan transformator nije dostatan da daje određenu snagu (energiju) priključenim trošilima na brodu, takvu transformatoru treba *paralelno* priključiti jedan ili više transformatora. Dva ili više transformatora rade paralelno kad se na ulaznoj (primarnoj) strani napajaju s *istih* sabirnica, a na izlaznoj (sekundarnoj) strani napajaju *zajedničke* sabirnice, odnosno zajednička trošila kao što se vidi na slici 3.1.34. za dva trofazna transformatora.



Sl. 3.1.34. Paralelni spoj dva trofazna transformatora

Da bi dva ili više transformatora radili paralelno, oni moraju imati:

a) *jednake prijenosne odnose napona* (jednake koeficijente transformacije), a također i jednake ili približno *jednake nazivne napone*. Nazivni naponi mogu se eventualno neznatno *razlikovati* (+ 2,5%), ali prijenosni odnosi moraju biti jednaki. Nejednakost prijenosnog odnosa *izaziva* struje izjednačenja koje bi tekle između transformatora i dodatno ih *zagrijavale*, dok nejednakost nazivnih napona ima za posljednicu da je jedan transformator naponski prenapregnut, što dovodi do magnetskog preopterećenja jezgre;

b) *jednake napone kratkog spoja*, odnosno smiju se *razlikovati* najviše 10% od neke srednje vrijednosti kratkog spoja  $u_k$  svih paralelno spojenih transformatora. U slučaju da se naponi kratkog spoja *znatnije razlikuju*, transformatori u kojih je  $u_k < u_k$  bivaju preopterećeni, a oni kojima je  $u_k > u_k$  samo su djelomično opterećeni. Također, ako naponi kratkog spoja paralelno spojenih transformatora nisu jednaki, tada je *povoljnije* da manji transformator ima veći napon kratkog spoja, i

obratno, jer relativno veće opterećenje preuzima transformator koji ima manji napon kratkog spoja. Ako su naponi kratkog spoja paralelno spojenih transformatora nejednaki, postrojenje treba rasteretiti tako da srednji napon kratkog spoja  $u_k$  bude jednak najmanjem naponu kratkog spoja, tj. transformator s najmanjim  $u_k$  smije se opteretiti nazivnim opterećenjem;

c) *jednake grupe spoja* (za trofazne transformatore). Pri tome je *bitan* kut zaostajanja fazora napona DN strane, odnosno *satni broj*. To znači da se mogu paralelno spojiti na istu sabirnicu istoimene stezaljke samo transformatori istog satnog broja (npr. 0 i 0; 5 i 5 itd.). Ako su transformatori različitih satnih brojeva (npr. 0 i 5; 6 i 11 itd.), tada se kod paralelnog spoja na DN strani ne spajaju zajedno na istoimene stezaljke već različito (ovisno o grupama spoja) kako bi se postigao navedeni uvjet;

d) odnos nazivnih snaga transformatora koji nije veći od 1 : 3.

Ako su uvjeti za paralelni rad transformatora ispunjeni, može se prići tzv. stavljanju transformatora u fazu, tj. spajaju se sve primarne stezaljke transformatora na primarnu mrežu, a nakon toga ispita se postoji li napon između sekundarnih stezaljka transformatora (*a*, *b*, *c*) i stezaljka odgovarajućih sabirnica (*a*, *b*, *c*). Postupak kontrole, prema slici 3.1.34., obavlja se tako da se jedna stezaljka (npr. *a*) spoji na fazu mreže i kontrolira imaju li stezaljke *b* i *c* u odnosu na stezaljku *a* napon. Ako je grupa spoja takva transformatora (II) jednaka kao u već priključenog transformatora (I), tada između stezaljka (npr. između stezaljke *b* i faze *L1*, odnosno stezaljke *c* i faze *L3*) i istih faza mreže *nema* napona (što se provjerava voltmetrom), pa se te stezaljke (*b*, *c*) mogu spojiti s mrežom.

Uključivanje (i isključivanje) transformatora za paralelni rad obavlja se prekidačem na primarnoj i sekundarnoj strani svakog transformatora.

### 3.1.4. Neke specifičnosti za transformatore na brodu

Energetski transformatori na brodu rabe se za napajanje većih trošila koja rade pri nižim naponima od onog što ga daje izmjenični izvor. Ti su naponi općenito standardni, odnosno propisuju ih razna klasifikacijska društva. Tako prema HRB-u (Hrvatski registar brodova) veliki trofazni elektromotori (i grijanje tankova) rade pri naponu 380 i 440 V, a rasvjeta i jednofazna trošila pri 220 V (rasvjeta na tankerima pri 110 V). Također, propisi nekih klasifikacijskih društava ne dopuštaju za trošila koja su spojena na sekundarnu stranu transformatora napon prema trupu (masi) broda više od 150 V.

Smanjenje nesimetričnih opterećenja i odgovarajući dopušteni napon prema brodskom trupu postižu se najčešće s pomoću transformatora primarno spojenih u trokut, a sekundarno u zvijezdu (npr. za sekundarni napon 220 V dobiva se napon prema brodskom trupu 127 V). Najčešće se koristi trofaznim transformatorima u spoju Dy 5, u kojih je zvjezdšte potpuno opteretivo. Zbog dodirnog napona, zvjezdšte se na sekundarnoj strani transformatora redovito uzemljuje (izravno ili preko male impedancije).

Na brodu, gdje se rasvjeta i druga mreža bitnih služba napaja preko transformatora, moraju se osigurati najmanje dva transformatora takve snage da, pri ispadu iz rada najvećega transformatora, ostali budu u stanju osigurati punu potrebnu

električnu energiju pri svim ujetima rada na brodu. Na brodovima ograničenog područja plovidbe (osim putničkih) dopuštena je ugradnja samo jednog transformatora.

Prema Pravilima o gradnji pomorskih brodova koja je propisao HRB, na jednofaznim i trofaznim transformatorima promjene napona pri radnom opterećenju u području između praznog hoda i nazivnog opterećenja, ne smiju prekoračiti 5% na transformatorima snage do 5 kVA po fazi, ili 2,5% na transformatorima većih snaga. Također, transformatori hlađeni zrakom ili suhim dielektrikumom, moraju izdržati sva 10%-na preopterećenja u trajanju od 1 sata i 50%-na preopterećenja u trajanju od 5 minuta.

Svi transformatori koji se ugrađuju u brod podliježu ispitivanjima. Prema propisima HRB-a to se odnosi na:

- pregled i provjeravanje dokumentacije;
- mjerenje otpora izolacije;
- ispitivanje izolacije na otpornost protiv vlage;
- provjeravanje spoja stezaljka;
- provjeravanje prijenosnog odnosa;
- provjeravanje grupe spoja namota;
- ispitivanje pri nazivnom opterećenju i mjerenje temperature;
- ispitivanje na preopterećenja;
- provjeravanje promjena napona;
- ispitivanje na udarnu struju kratkog spoja;
- ispitivanje električne čvrstoće izolacije;
- ispitivanje električne izolacije između zavoja namota;
- provjeravanje antikorozijskih prevlaka;
- provjeravanje stupnja zaštite kućišta.

Provedena ispitivanja moraju dati propisane veličine električnih i mehaničkih parametara transformatora od kojih su najvažniji otpor izolacije prema brodskom trupu, odnosno fazama namota, struje kratkog spoja na sekundarnom namotu i dopušteni porast temperature pri nazivnom opterećenju.

Prema propisima HRB-a najmanji otpor izolacije pri temperaturi okoline od  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  i normalnoj vlažnosti kod transformatora na brodu u hladnom stanju mora biti  $5\text{ M}\Omega$ , a u ugrijanom stanju  $2\text{ M}\Omega$ .

Transformator mora bez oštećenja izdržati struje kratkog spoja na sekundarnom ili sekundarnim namotima pri nazivnom naponu primara i naponu kratkog spoja u vremenu kako je navedeno u tablici 3.1.2.

Tabl. 3.1.2. Parametri kratkog spoja transformatora u kratkom spoju prema propisu HRB-a

Napon kratkog spoja transformatora $u_k(\%)$	Trajanje kratkog spoja $t(\text{s})$	Efektivna vrijednost simetrične struje kratkog spoja koju mora izdržati transformator
4 ili manje	2	$25 \times I_n$
više od 4	3	$100 \times I_n$

Porast temperature transformatora koji rade pri nazivnim opterećenjima i temperaturi okoline od 45 °C, ne smije biti veći od vrijednosti danih u tablici 3.1.3.

Tabl. 3.1.3. Dopušteni porast temperature transformatora prema propisu IIRB-a

Dio transformatora	Način mjerenja	Dopušteni porast temperature za klasu izolacije				
		A	E	B	F	H
Namoti	Otporom	55 °C	65 °C	75 °C	95 °C	120 °C
Jezgre i drugi dijelovi	Termometrom	Porast temperature ne smije biti veći od temperature koja je dopuštena za okolni materijal				

### 3.2. Asinkroni motori

Stroj kojemu rotor nikada ne postiže brzinu vrtnje kojom se okreće magnetsko polje statora zove se *asinkroni stroj*.

Svaki asinkroni stroj može raditi kao generator ili motor. Ako se rotor asinkronog stroja pogoni *nadsinkronom brzinom vrtnje* (rotor ima veću brzinu vrtnje od okretnog magnetskog polja statora), tad stroj radi kao *generator*, a ako se pogoni *podsinkronom brzinom vrtnje* (rotor ima manju brzinu vrtnje od okretnog magnetskog polja statora), tad stroj radi kao *motor*.

Asinkroni generator u praksi se rijetko susreće jer redovito može raditi kad je priključen na mrežu koja se istodobno napaja sinkronim generatorom. To je zbog toga što asinkroni generator vuče iz mreže struju magnetiziranja za stvaranje svoga vlastitog okretnog magnetskog polja, pa kada na mreži ne bi radio sinkroni generator, asinkroni generator ne bi se uzbudio ni ako se vrti nadsinkronom brzinom. Asinkroni generator može se ipak i sam uzbuditi s pomoću kondenzatora priključenih na stezaljke statora, jer u tom slučaju kondenzatori dobivaju potrebnu jalovu struju za uzbudu. Ti generatori sa samouzbuđenjem s pomoću kondenzatora nisu postigli širu primjenu jer je cijena potrebnih kondenzatora suviše velika.

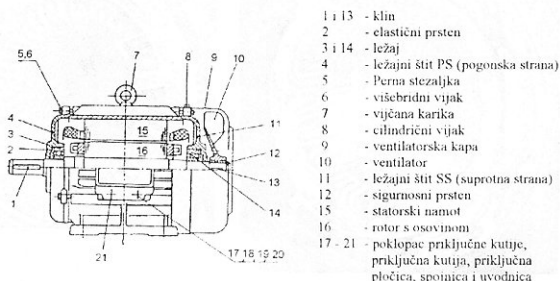
Na brodu se upotrebljavaju samo *asinkroni motori*. Zovu se još i *indukcijski* jer se energija iz statora na rotor prenosi elektromagnetskim putem, tj. indukcijom. To znači da nema nikakve električne (galvanski vodljive) veze između statora i rotora niti između rotora i vanjske mreže, pa je zbog toga asinkroni motor sličan transformatoru.

Asinkronom motoru primarni namot nalazi se na statoru, koji se spaja na mrežu. Da bi okretno polje statora induciralo napone u vodičima rotora (sekundarni namot), mora biti neka relativna brzina između okretnog polja statora i rotora. Kad bi njihove brzine vrtnje bile jednake, u rotoru se ne bi inducirali naponi, ne bi potekle struje, a bez struje u rotoru ne bi se razvijao moment. U tom slučaju, pri sinkronoj brzini vrtnje, takav motor ne bi mogao pretvarati energiju

Ovisno o tome na koju je brodsku mrežu priključen statorski namot, odnosno za koju je brodsku mrežu građen asinkroni motor on je trofazni ili jednofazni.

### 3.2.1. Trofazni asinkroni motori

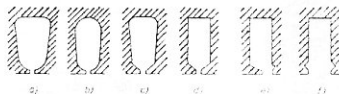
Trofazni asinkroni motor je najjednostavniji elektromotor, koji se sastoji od dva glavna dijela (statora i rotora) i drugih dijelova predočenih na slici 3.2.1.



Sl. 3.2.1. Presjek i sastavni dijelovi trofaznog asinkronog motora

Namoti su najvažniji sastavni dijelovi asinkronog motora. Tehničke vrijednosti kao što su korisnost, faktor snage, zaletna svojstva, preopterativost, zagrijavanje i magnetska buka, ovise o prikladnom izboru i izvedbi namota statora i rotora. Pogonska sigurnost i vijek trajanja ovise u velikoj mjeri o kvalitetnoj izradi namota.

*Statorski trofazni namot* izraden je od izoliranih bakrenih ili aluminijevskih vodiča, a sastoji se od svitaka koji se ulažu u utore. Najčešće korišteni oblici statorskih utora asinkronih motora predočeni su na slici 3.2.2.



Sl. 3.2.2. Oblici statorskih utora asinkronih motora

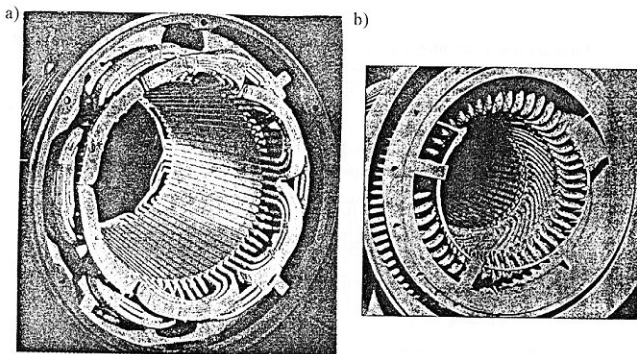
Prema obliku svitaka namoti mogu biti petljasti ili valoviti, a prema smještaju u utore jednoslojni ili dvoslojni. Trofazni asinkroni motori imaju na statoru najčešće dvoslojni trofazni namot petljastog ili valovitog tipa, a spojeni su u zvijezdu ili trokut. Na slici 3.2.3. predočeni su statori s jednoslojnim i dvoslojnim trofaznim namotom.

Valja znati da se u svim prilikama nakon ulaganja u utore namoti učvršćuju utorskim klinovima ili kapama (npr. klin ili traka od tvrdog papira - prešpana), a zatim se natope izolacijskim lakom i osuše.

Oblikovani svici imaju veliku mehaničku čvrstoću koja se još povećava učvršćivanjem glava namota. Veliki asinkroni motori primaju pri pokretanju i

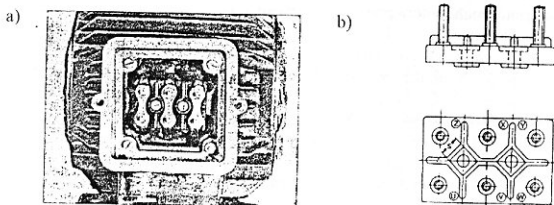


preklapanju velike udarne struje koje uzrokuju znatno mehaničko naprezanje glava namota pa se zbog toga glava namota učvršćuju.



Sl. 3.2.3. Statorski jednoslojni a) i dvoslojni namot b) trofaznog asinkronog motora

Krajevi statorskog namota spojeni su na priključnu kutiju motora. U niskonaponskih motora normalne izvedbe, s prigradnim mjerama prema standardu IEC, normalni je položaj priključne kutije na desnoj strani motora, gledano s pogonske strane. Svi drugi položaji priključne kutije moraju se pri narudžbi motora posebno zatražiti. Normalne priključne kutije potpuno su zatvorene poklopcem, a imaju jedan ili dva otvora s uvodnicima za priključak, kako je predočeno na slici 3.2.4.



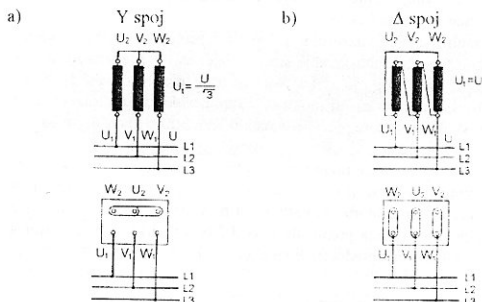
Sl. 3.2.4. Priključna kutija a) i pločica b) trofaznog asinkronog motora

Razmaci i strujne staze u priključnoj kutiji moraju se tako dimenzionirati da se unutar nje može nesmetano ugraditi priključna pločica sa stezaljkama za priključak krajeva namota. Standardne izolacijske pločice imaju 6, a polno preklopivi motori obično 9 ili 12 stezaljka.

Kvarovi elektromotora na brodu često se događaju upravo u priključnoj kutiji. Zbog toga proizvođači asinkronih motora posebnu pozornost poklanjaju pravilnoj izradi priključnih stezaljka, jer se time znatno pridonosi pogonskoj sigurnosti.

Preskokom električne iskre ili prekidom dovoda zbog slabo dimenzioniranih priključnih stezaljka počinju često veća oštećenja.

Namot statora moguće je u priključnoj kutiji prespajati u zvijezdu Y (npr. za napon 380 V) ili u trokut  $\Delta$  (npr. za napon 220 V), kako je predočeno na slici 3.2.5.

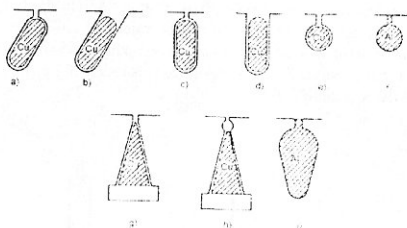


Sl. 3.2.5. Prespajanje statorskog namota u priključnoj kutiji

Oznake dovoda mreže trofaznog sustava su  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ , statorske stezaljke namota označuju se s  $U1$ ,  $V1$  i  $W1$ , a krajevi namota u statoru s  $U2$ ,  $V2$  i  $W2$ . Ako nema šest izvoda u priključnoj kutiji počeci namota označeni su slovima  $U$ ,  $V$  i  $W$ , a krajevi s  $X$ ,  $Y$  i  $Z$ .

Prema izvedbi *rotorskog namota* trofazni asinkroni motori dijele se na *kavezne* i *kolutne*.

Ako je namot neizoliran smješten u utore (nema izolacije između štapova i utora, odnosno jezgre rotora), prema slici 3.2.6., međusobno spojen na čeonim stranama kratkospojenim prstenom, dobiva se *kratkospojeni rotor*. Budući da rotorski namot ima oblik kaveza, takav se trofazni asinkroni motor zove *kavezni motor*.



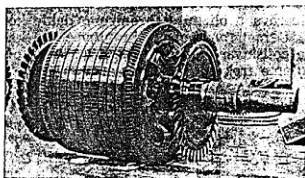
Sl. 3.2.6. Oblici utora kaveznih rotora asinkronih motora

Kavezni rotori grade se uvijek kao rotori s potiskivanjem struje, osim u motorima malih snaga, do cca 15 kW (1500 mm<sup>3</sup>). Djelovanje rotora s potiskivanjem struje osniva se na činjenici da se masivnim rotorskim štapovima zbog poprečnog utorskog polja induciraju vrtložne struje. One uzrokuju neravnomjernu raspodjelu

struje po presjeku štapa, tako da se struja u štapu potiskuje prema otvoru utora i zbog toga nastaju povećani gubici. Zato su omski otpor rotorskog namota i potezni moment veći nego pri jednolikoj razdiobi struje. To djelovanje povećava se s povećanjem frekvencije rotora i visine štapa, a iščezava u blizini sinkronizma, tj. kod nazivnog opterećenja. Još veće potiskivanje struje pojavljuje se u kočnom području, jer je tamo frekvencija rotora viša nego mrežna frekvencija.

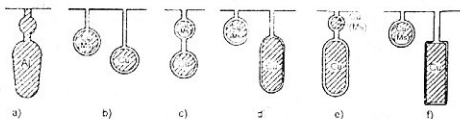
Kavezi rotora malih snaga jednostruki su kavezi s relativno malom visinom štapova. Oni ne pokazuju znatnije potiskivanje struje. Najčešće se lijevaju zajedno s kratkospojnim prstenima od čistog aluminija, koji se ulije u željezni paket. Slike 3.2.6. f) i i) predočuju oblike utora malih motora. U izradi srednjih motora bakreni (ili mjedeni) štapovi utiskuju se u uture predočene na slikama 3.2.6. a) do e) i tvrdo se zaleme s oba kratkospojna prstena.

U rotora s potiskivanjem struje razlikuju se uglavnom dvije izvedbe: kavezni rotor s visokim štapovima i dvokavezni rotor. Kavezni rotor s visokim štapovima ima razmjerno uzak i visok štap u utoru. Za razliku od njih, za veće motore uzimaju se pretežno klinasti štapovi s utorima prema slikama 3.2.6. g) i h). Kavezni rotor s klinastim štapovima i ventilatorima predočen je na slici 3.2.7.



Sl. 3.2.7. Kavezni rotor s ventilatorima

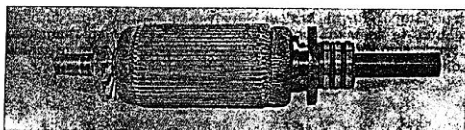
Još bolje karakteristike postižu se primjenom dvokaveznog rotora. Lijevani dvokavezni lijevaju se najčešće od aluminija i imaju dva kratkospojna prstena s izlivenim ventilacijskim lopaticama. Kod većih dvokaveza u donjem dijelu utora leže bakreni štapovi, iznad toga štapovi od bakra ili mjedi. Lemljenjem četiriju kratkospojnih prstena nastaju dva odvojena kaveza s različito visokim otvorima. Gornji kavez koji ima viši otpor zove se zaletni kavez. Na slici 3.2.8. prikazane su različite izvedbe utora dvokaveznih rotora.



Sl. 3.2.8. Oblici utora dvokaveznih rotora

Ako rotor ima sličan namot kao i stator, tj. ako je trofazni namot tložen u uture (zavoji) namota međusobno su izolirani, a također su izolirani i prema utorima,

odnosno jezgri rotora) i spojen u zvijezdu kojoj su tri izvoda spojena na prstenove, onda se takvi motori zovu *trofazni asinkroni kolutni motori*. Pri tome je važno napomenuti da na prstenove dosjedaju četkice koje su spojene na priključnu kutiju rotora. Na slici 3.2.9. predočen je rotor trofaznog kolutnog motora.

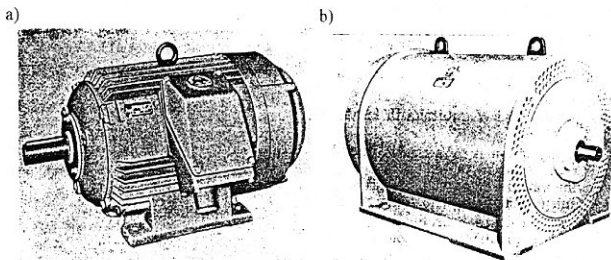


Sl. 3.2.9. Kolutni rotor trofaznog motora

Asinkroni motor s kolutnim rotorom znatno je skuplji od motora s kaveznim rotorom, manje je pouzdan u radu i zahtijeva zamršenije i skuplje održavanje. Zbog toga se sve manje izrađuje i sve rjeđe upotrebljavaju. Danas se još uvijek zadržala njegova primjena na brodu za dizalični pogon ili pogon brodskih vitala.

### 3.2.1.1. Trofazni asinkroni kavezni motori

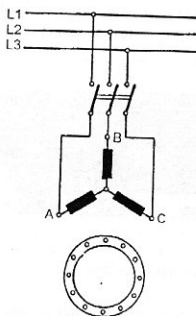
Izgled trofaznog asinkronog kaveznog motora koji se ugrađuje u brod vidi se na slici 3.2.10.



Sl. 3.2.10. Trofazni asinkroni kavezni motor niskog a) i visokog b) napona

#### 3.2.1.1.1. Način rada

Način rada trofaznog asinkronog kaveznog motora može se opisati prema načelnoj spojnoj shemi na slici 3.2.11.



Sl. 3.2.11. Načelna spojna shema za trofazni asinkroni kavezni motor

Ako se stator kaveznog motora priključi na brodsku mrežu trofaznog napona, struje koje poteku iz mreže u namote statora bit će, zbog simetrije, međusobno razmaknute u fazi, kao i naponi, za kut od  $120^\circ$ . Takve simetrične struje u simetričnome trofaznom namotu daju okretno protjecanje  $\Theta$  koje stvara u zračnom rasporu okretno polje magnetske indukcije  $B$ . Raspored indukcije u rasporu (koji je, pretpostavlja se, sinusoidni) inducira u namotima statora trofazni sustav napona  $E_1$ ,  $E_2$  i  $E_3$  koji mora biti upravo takav da drži ravnotežu trofaznom sustavu napona mreže  $U_1$ ,  $U_2$  i  $U_3$ . Kad bi se i tu zanemarili padovi napona u djelatnom otporu  $R_1$  i rasipnoj reaktanciji statorskih namota  $X_{\sigma 1}$ , dobio bi se model idealnog stroja. U tom slučaju moraju naponi biti jednaki:

$$E_1 = U_1 \quad E_2 = U_2 \quad \text{i} \quad E_3 = U_3 \quad (3.55)$$

Taj uvjet ravnoteže napona određuje struje u namotima. Okretno polje indukcije u rasporu, koje je rezultat djelovanja svih struja zajedno, mora biti upravo toliko da u namotima inducira napone  $E$ .

Padovi napona, zbog struja u statorskom namotu, u trofaznom asinkronom kaveznom motoru su znatni, i bitno utječu na rezultate u kvantitativnim razmatranjima, pa uvjet ravnoteže napona (bez zanemarenja) glasi:

$$E = U - I(R_1 + jX_{\sigma 1}), \quad (3.56)$$

gdje je  $R_1$  djelatni otpor, a  $X_{\sigma 1}$  rasipna reaktancija statorskih namota.

Budući da se rotor trofaznog asinkronog kaveznog motora ne napaja iz vanjskog izvora, u njemu teku samo struje što ih inducira okretno polje stvoreno u zračnom rasporu. Da bi te struje mogle poteći, namoti rotora moraju biti zatvoreni strujni krugovi, a da bi struje u rotorskom namotu dale okretno protjecanje, mora taj namot biti višefazan. Za postići simetričan višefazni sustav, broj faza statora i rotora ne mora biti jednak, već namot mora biti raspoređen simetrično, a broj polova statorskog i rotorskog namota mora u svakom slučaju biti jednak.

Ako je stator priključen na brodsku mrežu, a rotorski je namot otvoren i ne vrti se s rotorom, isto okretno polje koje inducira napone u namotima statora inducirat će napone i u namotima rotora. Brzina kojom se to okretno polje vrti prema vodičima statora ista je kao i prema vodičima rotora, tj. frekvencije su jednake:

$$f_2 = f_p \quad (3.57)$$

Napone u statoru i rotoru inducira jedan te isti magnetski tok. Jedino se razlikuje broj zavoja  $N$  i faktor namota  $\xi_m$ , koji za stator i za rotor mogu biti po fazi različiti. Ako se podijele izrazi za inducirane napone rotora  $E_2$  i statora  $E_1$ , dobiva se:

$$E_2 : E_1 = N_2 \xi_2 : N_1 \xi_1, \quad (3.58)$$

tj. inducirani napon po fazi rotora i napon po fazi statora stoje u *čvrtinom odnosu* tako dugo dok rotor miruje.

Ako se zatvore rotorski namoti, ali i dalje rotor miruje, inducirani naponi potjerat će u rotoru struje. Struja svake faze neće biti u fazi s naponom, već će za njim zostajati za kut  $\varphi_2$  koji ovisi o odnosu reaktancije i radnog otpora rotorskog namota. Prema tome, sekundarno (rotorski) inducirani napon  $E_2$  preko impedancije rotorskog namota:

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2}^2} \quad (3.59)$$

protjerat će struju:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2}^2}}, \quad (3.60)$$

gdje je  $R_2$  djelatni otpor, a  $X_{\sigma 2}$  rasipna reaktancija rotorskog namota.

Ta struja u rotoru s magnetskim tokom okretnog polja  $\Phi$  uzbudnim od statorskih struja stvara silu u pojedinim vodičima rotora, a time i okretni moment u smjeru vrtnje okretnog polja. Tako stvoreni moment sila proporcionalan je struji  $I_2$ , magnetskom toku  $\Phi$  i kosinusu kuta pomaka struje i napona rotora:

$$M = k \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \cos \varphi_2. \quad (3.61)$$

Ako rotor nije zakočen, početak će se okretati. Brzina vrtnje rotora rast će i približavat će se sinkronoj brzini vrtnje. *Brzina okretnog polja rotora  $n_2$  bit će uvijek jednaka brzini okretnog protjecanja koje ga je stvorilo.*

$$n_2 = n_s(1-s) + s \cdot n_2 = n_s = \frac{60}{p} \cdot f_1, \quad (3.62)$$

gdje je  $p$  broj pari polova motora, a  $s$  klizanje definirano izrazom (3.63).

Povećanjem brzine vrtnje smanjuje se zaostajanje rotora za okretnim poljem, a s time i brzina kojom okretno polje sa svojim silnicama siječe vodiče u rotorskim utornima. To zaostajanje rotora za okretnim poljem definira se kao *klizanje*, koje se označuje slovom  $s$ , a određuje iz izraza:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \text{ili} \quad s\% = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100. \quad (3.63)$$

Kad rotor stoji ( $n = 0$ ), klizanje je jednako jedan ( $s = 1$ ). Kad mu se brzina povećava, klizanje opada i postaje nula ( $s = 0$ ) onda kada se rotor vrti sinkronom brzinom ( $n = n_s$ ), tj. kad je brzina rotora jednaka brzini okretnog polja.

Klizanje  $s$  određuje ne samo brzinu vrtnje već i frekvencije, napone, struje, tj. cijelo pogonsko stanje asinkronog stroja. Ono je najprikladniji parametar za definiranje tog stanja.

Kad rotor stoji, frekvencija  $f_2$  u rotoru induciranog napona  $E_2$  jednaka je statorskoj (primarnoj) frekvenciji  $f_1$ . Ako se rotor vrti u smjeru okretnog polja, sve manje zaostaje za njim, pa frekvencija rotora (sekundara)  $f_2$  pada proporcionalno s klizanjem, tj. iznosi:

$$f_2 = s \cdot f_1. \quad (3.64)$$

Omjer statorskog (primarnog) i rotorskog (sekundarnog) induciranog napona, ovisan o frekvencijama je:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \xi_1}{4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \xi_2} = \frac{N_1 \cdot \xi_1}{s \cdot N_2 \cdot \xi_2}, \quad (3.65)$$

gdje je  $N_1$  i  $N_2$  broj zavoja statorskog i rotorskog namota, a  $\xi_1$  i  $\xi_2$  namotni faktor statora i rotora.

Označi li se rotorski napon u mirujućem stanju rotora ( $s = 1$ ) s  $E_{20}$ , uz stator priključen na napon  $E_1$  dobiva se:

$$E_{20} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \xi_2, \quad (3.66)$$

pa je odnos tog napona prema naponu statora:

$$\frac{E_{20}}{E_1} = \frac{N_2 \cdot \xi_2}{N_1 \cdot \xi_1} \quad (3.67)$$

Budući da je inducirani napon na rotoru  $E_2$  proporcionalan frekvenciji u rotoru  $f_2$ , bit će pri klizanju  $s$ :

$$E_2 = s \cdot E_{20}. \quad (3.68)$$

*Inducirani napon rotora i njegova frekvencija izravno su proporcionalni klizanju.* Proporcionalno s povećanjem brzine vrtnje pada klizanje  $s$ , a pada i napon rotora  $E_2$ . Pada li napon, pada i struja, a s njezinom radnom komponentom pada i okretni moment motora. Motor će se prema tome ubrzavati tako dugo dok se pri određenom klizanju ne izjednače moment motora  $M$  i moment tereta  $M_p$ , i time se uspostavi ravnoteža.

Kad nema tereta, motor se vrti u praznom hodu. On tada nema korisnog momenta, ali još uvijek mora svladavati moment trenja u vlastitim ležajima, moment trenja rotora o zrak i moment ventilacije. Za svladavanje tih momenata potrebna je neka vrlo mala struja  $I_2$ , a s tim i vrlo mali napon  $E_2$  i vrlo malo klizanje  $s_0$  koje ipak nije nula, iako je jako maleno. Zato asinkroni motor bez vanjske pomoći ne može postići sinkronu brzinu vrtnje. U sinkronizmu ( $s = 0$ ) ne inducira se uopće nikakav napon, pa u rotoru nema ni struja koje bi u magnetskom polju stvarale moment. Motor očito ne može raditi pri sinkronoj brzini vrtnje.

Kad se mijenja frekvencija rotora, mijenja se i induktivni otpor rotora  $X_{\sigma 2}$ , prema izrazu:

$$X_{\sigma 2} = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_{\sigma 2} = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_{\sigma 2} = s \cdot X_{\sigma 2}, \quad (3.69)$$

gdje je  $L_{\sigma 2}$  induktivitet, a  $X_{\sigma 2}$  induktivni otpor rotora kad se on ne vrti. Prema izrazima (3.60) i (3.68) dobiva se rotorska struja:

$$I_2 = \frac{s \cdot E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_{\sigma 2})^2}}. \quad (3.70)$$

Ako se izraz (3.70) podijeli sa  $s$ , dobiva se ekvivalentni izraz:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{\sigma 2}^2}} \quad (3.71)$$

koji pokazuje da se može, mijenjajući veličinu djelatnog otpora s  $R_2$  na  $R_2/s$ , dobiti u mirujućem stanju rotora ista vrijednost struje  $I_2$ , kakva bi se dobila u stvarnom pogonskom stanju kod klizanja  $s$ .

Ako se usporede zaostajanja fazora struje  $I_2$  za naponom  $E_2$  dobit će se za rotor u vrtnji:

$$\tan \varphi_2 = \frac{s \cdot X_{\sigma 2}}{R_2}, \quad (3.72)$$

a za mirujući rotor:

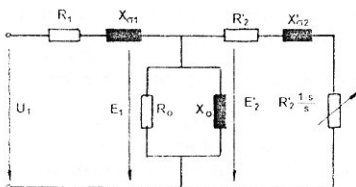
$$\tan \varphi_2 = \frac{X_{\sigma 2}}{R_2} = \frac{s \cdot X_{\sigma 2}}{R_2} \cdot \frac{1}{s}, \quad (3.73)$$

tj. kutovi zaostajanja  $\varphi_2$  se ne razlikuju u oba slučaja.

Frekvencije rotorske struje se svakako razlikuju, ali ta razlika ne utječe na snagu, a niti na moment vrtnje.

Već je rečeno da je asinkroni motor u biti transformator, pa za njega vrijedi nadomjesna shema koja je definirana na slici 3.1.11. (naravno, uz uvjet da se rotor ne vrti). Izraz (3.71) omogućuje da nadomjesna shema posluži i za asinkroni motor tako da se za djelatni otpor rotorskog namota unese vrijednost  $R_2/s$ . Budući da je stvarni otpor rotorskog namota  $R_2$ , to je u shemi na slici 3.2.12. unosen odvojeno fiktivni dodatni otpor:

$$R_{2f} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \cdot \frac{1-s}{s}. \quad (3.74)$$



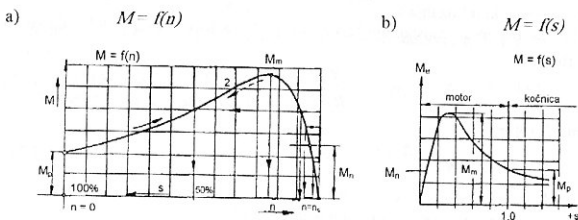
Sl. 3.2.12. Nadomjesna shema asinkronog motora



Analogno kao u transformatora, u nadomjesnoj shemi asinkronog motora sve vrijednosti u rotorskom (sekundarnom) krugu preračunane su na statorsku (primarnu) stranu. Te vrijednosti označene su crticom do simbola.

### 3.2.1.1.2. Momentna karakteristika

*Momentna karakteristika* ili *vanjska karakteristika* trofaznog asinkronog motora pokazuje kako se mijenja okretni moment motora u ovisnosti o brzini vrtnje  $M=f(n)$ , odnosno klizanju motora  $M=f(s)$ . Te karakteristike mogu se, osobito u području zaleta, međusobno znatno razlikovati, ovisno o izvedbi rotora, odnosno ovisno o djelovanju utjecajnih faktora na karakteristiku momenta. Na slici 3.2.13. predočene su momentne karakteristike trofaznog asinkronog motora. One su nacrtane nakon analitičkog proračuna na osnovi nadomjesne sheme motora (slika 3.2.12.) ili s pomoću njegova kružnog dijagrama (slika 3.2.15.).



Sl. 3.2.13. Momentne karakteristike trofaznog asinkronog motora

Prema slici 3.2.13. dade se uočiti da motor priključen na napon razvija u mirovanju ( $n = 0$ ,  $s = 1$ ) *potezni* (ili *pokretni*) moment  $M_p$  koji pokrene rotor. Taj moment u mirovanju također se zove *moment kratkog spoja*. Vrtjom rotora iz stanja mirovanja počinje *zalet motora*. Moment raste s porastom brzine i najčešće pri 70 do 90 % sinkrone brzine vrtnje postiže maksimalnu vrijednost. Taj moment zove se *maksimalni* (ili *prekretni*) moment  $M_{nr}$  a pripadno klizanje *maksimalno* (ili *prekretno*) klizanje  $s_m$ . U toj točki pogona motor prelazi iz područja zaleta u područje *stacionarnog pogona*, gdje ima asinkroni motor *tvrdi karakteristiku*, tj. brzina vrtnje neznatno se mijenja s promjenom opterećenja. Kod još većih brzina rotora ( $s < s_m$ ) naglo se smanjuje moment, a kad njegov rotor postigne zadanu ili nazivnu brzinu vrtnje  $n_n$  pokretanje je završeno i nastupa vrijeme normalnog (stacionarnog) rada motora.

Nazivni moment motora  $M_n$  računa se iz podataka s natpisne pločice s pomoću izraza:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega} = \frac{60 \cdot P_n}{2 \cdot \pi \cdot n_n} \quad (3.75)$$

gdje je  $P_n$  nazivna snaga motora u (W), a  $n_n$  nazivna brzina vrtnje u (r min<sup>-1</sup>).

Vrlo često karakteristika momenta nema minimalni moment u trenutku pokretanja, nego pri nekoj brzini vrtnje tijekom zaleta. Taj *minimalni moment* u

zalatu zove se *moment sedla*. Od motora se zahtijeva da ima dovoljno veliki potezni moment  $M_p$  kako bi mogao pokrenuti opterećeni motor, da ima propisani maksimalni moment  $M_m$  ( $M_m > 1,6 M_p$ ) da može svladavati kratkotrajno mehaničko preopterećenje i da moment sedla ne sprečava motor da postigne punu brzinu vrtnje.

U trenutku pokretanja motora ( $s = 1$ ) struja koju motor uzima iz mreže je maksimalna (struja kratkog spoja  $I_k$ ) i ona se smanjuje s porastom brzine vrtnje, a u praznom hodu ( $s = 0$ ) jednaka je struji praznog hoda  $I_0$ . Struja kratkog spoja obično se izražava kao višekratnik nazivne struje, a ovisna je o broju pari polova, o izvedbi rotora i veličini motora. Pri nazivnom naponu je obično  $I_k = (3 - 8) I_n$ .

### 3.2.1.1.3. Pokretanje motora

Pri svakom pokretanju motora statorski namot povuče iz mreže struju kratkog spoja (što povećano zagrijava motor) i uzrokuje pad napona u mreži. To može izazvati nepoželjne posljedice na druga trošila priključena na brodsku mrežu. Da bi se taj negativan utjecaj smanjio, potrebno je primijeniti razne postupke pokretanja motora, ovisno o veličini motora, vrsti zaleta i kvaliteti same brodske mreže. Pri tome valja znati da ni jedan mogući način pokretanja trofaznog asinkronog kaveznog motora (osim priključka motora na izvor promjenjive frekvencije) ne može povećati potezni moment, već samo smanjuje struju pokretanja. Upravo snižavanjem napona na stezaljkama motora za vrijeme pokretanja smanjuje se proporcionalno i struja, a istodobno smanjuje se i potezni moment (smanjuje se s kvadratom napona).

Propisi za električne strojeve određuju da se motor opterećen nazivnom snagom ne smije pregrijati pri promjeni napona mreže za  $\pm 5\%$ . Ako se motor građen za nazivni napon  $U_n$  priključi na neki drugi napon  $U'$ , mijenja se struja proporcionalno naponu. Magnetski tok motora mijenja se također proporcionalno naponu (zanemareno zasićenje), pa je:

$$\frac{\Phi'}{\Phi_n} = \frac{U'}{U_n} = \frac{I'}{I} \quad (3.76)$$

Budući da je potezni moment  $M_p$  proporcionalan umnošku magnetskog toka i struje, odnosno mijenja se s kvadratom promjene napona, bit će:

$$M_p' = M_p \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \quad (3.77)$$

Pri konstantnoj brzini vrtnje, ne uzimajući u obzir krivulju protumomenta, nova snaga iznosi:

$$P' = P \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \quad (3.78)$$

Budući da se motor može opteretiti nazivnom strujom, moguće je povećati snagu u obrnutom omjeru promjene napona, tako da motor nakon zaleta dava snagu:

$$P'' = P \cdot \frac{U}{U_n} \quad (3.79)$$

Pri promjeni napona mijenja se potezni moment, prekretni moment i moment sedla s kvadratom napona.

Zahtijeva li se pri manjem naponu mreže od motora isti pokretni moment tereta kao i pri punom naponu, raste struja rotora, jer motor daje traženi moment sve

dok se ne prekorači njegov prekretni moment. Veća rotorska struja uzrokuje povećano zagrijavanje. Zbog toga se motor kod prevelikih padova napona pregrijava.

Napon  $U$  proporcionalan je magnetskom toku  $\Phi$ , broju zavoja statorskog namota  $N_1$  i frekvenciji mreže  $f$ , odnosno:

$$U = k \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi. \quad (3.80)$$

Vidi se da pri porastu frekvencije pada magnetski tok, jer se ni napon ni broj zavoja ne mijenjaju. Obrnuto, rad sa smanjenom frekvencijom uvjetuje povećanje magnetskog toka, što općenito nije dopušteno. Ako se zanemari utjecaj zasićenja, mijenja se i struja praznog hoda obrnuto proporcionalno s promjenom frekvencije.

Potezni moment  $M_p$  mijenja se obrnuto proporcionalno s kvadratom promjene frekvencije, odnosno:

$$M_p' = M_p \cdot \left(\frac{f}{f'}\right)^2. \quad (3.81)$$

Brzina vrtnje u praznom hodu, a približno i brzina vrtnje pod opterećenjem, mijenjaju se proporcionalno frekvenciji, pa snaga  $P$  iznosi:

$$P' = P \cdot \frac{f}{f'}. \quad (3.82)$$

Ako se ne uzmu u obzir moguće promjene opterećenja do kojih dolazi zbog promijenjene snage ventilacije pri novoj brzini vrtnje, može se motor opteretiti nazivnom strujom i stoga raditi s nazivnom snagom.

Asinkroni motor može se opteretiti nazivnom snagom ako je mrežna frekvencija viša od nazivne frekvencije. Pri znatnijem smanjenju mrežne frekvencije nastupa opasnost da se motor pregrijava zbog lošijeg hlađenja.

Prematanjem motora od 50 Hz na 60 Hz i priključivanjem na mrežu frekvencije od 60 Hz dobiva se rast nazivne snage od oko 15%, a ne 20 %, koliko iznosi povećanje frekvencije. To je zbog toga što s porastom frekvencije rastu i gubici u željezu, pa je za taj iznos potrebno smanjiti dobivenu snagu.

Ako se promijene napon i frekvencija u istom omjeru, ne mijenjaju se magnetski tok  $\Phi$  i struja praznog hoda  $I_o$ , tj. vrijedi da je:

$$I_o' = I_o \cdot \frac{f}{f'} \cdot \frac{U}{U_n} = I_o, \quad (3.83)$$

odnosno

$$\Phi' = \Phi \cdot \frac{I_o'}{I_o} = \Phi. \quad (3.84)$$

Ostale vrijednosti struje  $I$  ostaju također konstantne, tj. struja kao funkcija postotne vrijednosti brzine vrtnje ostaje nepromijenjena. Na taj način i krivulja momenta kao funkcija promjene brzine vrtnje je konstantna, tj. vrijedi da je:

$$M' = M \cdot \frac{\Phi'}{\Phi} \cdot \frac{I'}{I} = M. \quad (3.85)$$

Nasuprot ovim konstantnim iznosima mijenja se apsolutna brzina vrtnje proporcionalno frekvenciji. Pri određivanju brzine vrtnje pod teretom, u slučaju promjene napona i frekvencije, treba uzeti u obzir krivulju protumomenta tereta.

Ako se trofazni asinkroni kavezni motor vrti potpuno neopterećen, tj. u praznom hodu, struja ni u kojem slučaju ne pada na nulu. Tada motor uzima struju

praznog hoda  $I_0$  koja u malih motora može iznositi od 40 do 60%, a srednjih i velikih motora od 20 do 30% nazivne struje.

Struja praznog hoda sastoji se od dvije komponente: jedne, djelatne komponente, koja služi za pokrivanje gubitaka praznog hoda, i druge, struje magnetiziranja, koja služi za stvaranje uzbuđene okretne magnetske polja i ne obavlja rad. Ta je druga komponenta struja praznog hoda u svakom od tri voda brodske mreže.

Ako je motor opterećen nazivnim teretom, tad on uzima iz mreže struju jednaku nazivnoj struji motora ( $I_f = I_n$ ). I ta struja može se rastaviti u dvije komponente: djelatnu, koja je ovisna uglavnom o opterećenju i povećava se s porastom opterećenja, i jalovu, koja raste s porastom rasipnog polja namota. Svaka od tih komponenta utječe na djelatnu, odnosno jalovu snagu motora.

Odnos djelatne snage (djelatne struje) motora prema prividnoj snazi (struji brodske mreže) označava se kao faktor snage  $\cos \varphi$ . Faktor snage pri nazivnom opterećenju ovisi o veličini i naponu motora i iznosi približno 0,75 do 0,90. Veći motori s istim brojem polova imaju bolje faktore snage. Jednako tako, brzohodni imaju bolje faktore snage nego sporohodni.

S padom opterećenja smanjuje se faktor snage i osobito je nepovoljan uz opterećenja manja od polovice nazivnoga.

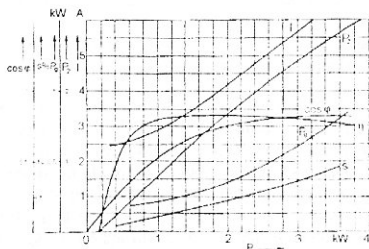
Omjer predane i primljene djelatne snage predstavlja korisnost motora  $\eta$ . Predana snaga jednaka je primljenoj djelatnoj snazi, smanjenoj za ukupne gubitke motora. Korisnost je u širokom području konstantna, tako da je i pri polovici nazivnog tereta zadržan njezin puni iznos. U srednjih trofaznih asinkronih kaveznih motora korisnost iznosi od 0,80 do 0,90, dok kod velikih raste i do 0,95, a kod malih pada do 0,70.

Poznavajući faktor snage  $\cos \varphi$  i korisnost  $\eta$ , može se izračunati struja koju motor uzima iz mreže primjenom izraza:

$$I = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U}, \quad (3.86)$$

gdje je  $P_2$  djelatna snaga na osovini motora.

Tipične krivulje opterećenja jednog trofaznog asinkronog kaveznog motora (zatvorene izvedbe, 5 kW, 380 V i 950 r min<sup>-1</sup>) predočene su na slici 3.2.14.



Sl. 3.2.14 Krivulje opterećenja trofaznog asinkronog kaveznog motora

Pokretanje trofaznog sinkronog kaveznog motora ostvaruje se izravno i neizravno.

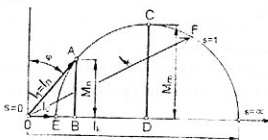
*Izravno pokretanje* ostvaruje se izravnim priključkom statorskog namota na puni napon brodske mreže. Taj način pokretanja (koji je popraćen relativno velikom strujom i mehaničkim trzajem zbog velikog poteznog momenta) na brodu se upotrebljava samo ako odgovara Pravilu o gradnji pomorskih brodova (ograničava ga pad napona u mreži za vrijeme zaleta, snaga i struja pri pokretanju). Budući da je za svaki elektromotor snage od 0,5 kW i više potrebna odgovarajuća naprava za pokretanje i regulaciju, na brodu se i ne rabi izravan način pokretanja.

*Neizravno pokretanje* ostvaruje se različitim napravama koje su ugrađene između statorskog namota i brodske mreže. Sve one imaju zadaću da smanje struje pokretanja gotovih motora (ne mogu se poduzeti više nikakvi konstrukcijski zahvati), tj. da se motoru dovede smanjeni napon za vrijeme zaleta.

S obzirom na brodsku mrežu i uklopne uređaje, struju kratkog spoja pri pokretanju motora moguće je smanjiti samo u određenim granicama, jer premala struja kratkog spoja  $I_k$  djeluje nepovoljno na ostale karakteristike motora. To se u prvom redu odnosi na potezni i maksimalni (prekretni) moment i nazivni faktor snage, dok je neznatan utjecaj na korisnost.

Na slici 3.2.15. predložen je u pojednostavnjenom kružnom dijagramu, uz zanemarenje gubitaka, utjecaj struje kratkog spoja  $I_k$  na maksimalni moment motora. Nazivni i maksimalni moment predloženi su dužinama AB i CD, dok struja praznog hoda  $I_0$  i struja kratkog spoja  $I_k$  odgovaraju dužinama OE i OF. Omjer maksimalnog i nazivnog momenta tada je:

$$\frac{M_m}{M_n} = \frac{I_k - I_0}{2 \cdot I_n \cdot \cos \varphi} \quad (3.87)$$



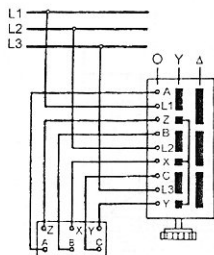
Sl. 3.2.15. Pojednostavnjeni kružni dijagram trofaznog asinkronog kaveznog motora

S obzirom na svojstva motora u trajnom radu, nije preporučljivo pri projektiranju motora smanjivati struju ispod 4,5 do 5  $I_p$ , jer bi se znatno smanjio potezni moment. Ako prilike u mreži zahtijevaju još manju struju kratkog spoja, tada se valja poslužiti pokretanjem s pomoću sklopke zvijezda-trokut ili pokretanje obaviti s pomoću transformatora ako to dopušta protumoment radnog stroja. Potezni moment smanjuje se, naime, s kvadratom smanjenja struje kratkog spoja  $I_k$ . Označe li se struja kratkog spoja i potezni moment motora u jednom slučaju s  $I_k$  i  $M_p$ , a u drugom s  $I_k''$  i  $M_p''$ , vrijedi, uz nepromijenjene ostale uvjete

$$\frac{M_p''}{M_p} = \left( \frac{I_k''}{I_k} \right)^2 \quad (3.88)$$

Pokretanje *preklopom zvijezda-trokut* može se upotrijebiti samo za pokretanje motora namijenjenih za trajni rad u spoju trokut. Osniva se na činjenici da statorski namot spojen u zvijezda-spoj dobiva za  $\sqrt{3}$  puta manji napon nego spojen u trokut-spoj. Proporcionalno naponu smanjuje se i struja, no istodobno smanjuje se i potezni moment, i to proporcionalno naponu na kvadrat.

Na slici 3.2.16. shema je spoja preklopke zvijezda-trokut.



Sl. 3.2.16. Shema spoja preklopke zvijezda-trokut

U trenutku pokretanja motora, prema slici 3.2.16., prebacuje se preklopka iz položaja 0 u položaj Y i zbog toga se statorski namot motora preko kontakata preklopke spaja u spoj zvijezda. Svaka faza tada dobiva za  $\sqrt{3}$  puta manji napon u odnosu prema trokut-spoju. Istodobno je struja pokretanja u spoju zvijezda 3 puta manja u usporedbi sa strujom kod izravnog priključka na mrežu (spoj trokut). To je osnovni razlog zbog čega se veći trofazni asinkroni kavezni motori često pokreću preklopom zvijezda-trokut.

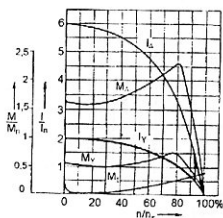
Međutim, budući da je moment proporcionalan kvadratu napona, smanjuje se tim načinom pokretanja također i potezni moment tri puta. Na taj način postignut je lakši zalet (bez trzaja) u neopterećenih ili neznatno opterećenih motora u trenutku pokretanja, ali zbog velikog smanjenja poteznog momenta pri pokretanju, preklopka zvijezda-trokut ne može poslužiti u elektromotornim pogonima gdje je potreban veliki potezni moment.

Nakon što je završen zalet motora, prebacuje se preklopka u položaj Δ, čime se namot motora spaja preko kontakata preklopke u spoj trokut i motor dobiva puni napon.

Na natpisnoj pločici motora naznačeni su podaci o nazivnom naponu (to je napon brodske mreže na koji se motor priključuje) i spoju (zvijezda ili trokut). Motor namijenjen za rad pri nazivnom naponu u zvijezda spoju ne smije se priključiti na isti napon spojen u trokut. U tom bi slučaju napon po svakom faznom namotu bio  $\sqrt{3}$  puta veći, što bi izazvalo nedopustivo visoka zasićenja u željezu i pregrijavanje motora. Obratno, motor određen za rad u spoju u trokut smije se priključiti na mrežu istog napona spojenog u zvijezdu. Napon je po fazi pri tome  $\sqrt{3}$  puta manji, pa motor nije zasićen. Snaga koju motor može tada dati je manja, pa je takav priključak dopušten samo privremeno.

Pokretanje preklopkom zvijezda-trokut ispunjava svoju svrhu samo onda kad se motor zavrti u zvijezda spoju do blizu nazivne brzine vrtnje, odnosno kad se radni stroj može rasteretiti. Ako se to ne može postići, motor se nastavi vrtjeti malom brzinom i pri preklapanju nastaje kratkotrajan udarac struje, približno jednak udarcu struje izravnog pokretanja, tako da se ne postiže djelovanje preklopke zvijezda-trokut.

Na slici 3.2.17. predočene su karakteristike momenta i struje pri pokretanju preklopkom zvijezda-trokut.



Sl. 3.2.17. Karakteristike momenta i struje pri pokretanju preklopkom zvijezda-trokut

Na slici 3.2.17. karakteristike momenta  $M_Y$  i struje  $I_Y$  su one kad je preklopka u spoju zvijezda, a karakteristike momenta  $M_\Delta$  i struje  $I_\Delta$  kad je preklopka u spoju trokut. Preklapanje na spoj u trokut izvršeno je nakon zaleta do u blizinu nazivne brzine vrtnje u spoju zvijezda. Struja preklapanja približno odgovara 1,5-struko nazivnoj struji.  $M_V$  je karakteristika jednog centrifugalnog kompresora na brodu, koji pokreće trofazni asinkroni kavezni motor.

Veći potezni moment pri pokretanju i veći broj stupnjeva pokretanja omogućuje pojačani spoj zvijezda-trokut. U tom se spoju namot motora odvoji u sredini svake faze. Motor ima devet stezaljka za priključak. Moguće je izvesti i više odvojaka, tako da se postigne finija zaletna momentna karakteristika nego kod odvojka samo u sredini namota.

Pokretanje s dijelom namota moguće je samo ako je statorski namot za vrijeme nazivnog pogona spojen u dvije ili više paralelnih grana. Pri uključivanju na brodsku mrežu najprije se priključi dio statorskog namota (zaletni namot). Odgovarajućim dimenzioniranjem toga dijela namota smanjuje se struja pokretanja na vrijednost dopuštenu u brodskoj mreži. Nakon pokretanja priključuje se, preko dodatne sklopke paralelno sa zaletnim namotom, preostali dio namota.

Treba li potezni moment motora smanjiti s obzirom na radni stroj može se uključiti jednofazni otpor (posebno se dimenzionira) u bilo koji od tri mrežna dovoda. Nakon završenog zaleta otpor se kratko spaja. Spomenuti spoj često se zove kusa-spoj.

Ostali načini pokretanja u kojima se smanjuje struja dovodenjem manjeg napona statorskom namotu (npr. pokretanje autotransformatorom, s pomoću prigušnice, s pomoću statorskog predotpora) također imaju nedostatak, jer se smanjuje potezni moment. Novorazvijeni elektronički uređaji za "mekano pokretanje" zovu se "soft-start" uređaji i sve više su u uporabi za pokretanje.

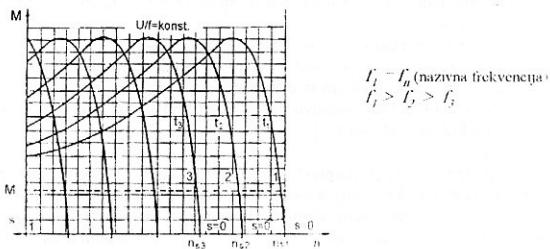
### 3.2.1.1.4. Regulacija brzine vrtnje

Brzina vrtnje svakom asinkronom kaveznom motoru može se regulirati mijenjanjem jedne od veličina o kojoj ona ovisi, odnosno mijenjanjem jedne od veličina o kojoj ovisi oblik njegove vanjske karakteristike. Iz izraza (3.63) može se napisati da je brzina vrtnje asinkronog motora:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{f}{p} \cdot (1 - s), \quad (3.89)$$

tj. brzina vrtnje može se mijenjati *promjenom sinkrone brzine*, a ona se mijenja *promjenom frekvencije* i *promjenom broja pari polova*, te *promjenom klizanja* koje kod određenog momenta tereta ovisi o *priljučenom napanu*.

*Promjenom frekvencije* brodske mreže mijenja se sinkrona brzina vrtnje okretnog polja, a s tim i brzina vrtnje rotora. Budući da je frekvencija brodske mreže konstantna, takav način regulacije brzine vrtnje dolazi u obzir samo onda ako se između brodske mreže i asinkronog motora uključi pretvornik frekvencije (tiristorski sklop) koji će davati napon promjenjive frekvencije ( $U/f = \text{konst.}$ ). Takva regulacija frekvencijom i naponom omogućuje kontinuiranu promjenu brzine vrtnje u granicama od nule do trostruke nazivne brzine vrtnje, sigurnost regulacije je velika, ali sklop ima vrlo visoku cijenu, što mu je jedina mana zbog koje se na brodu i ne rabi. Na slici 3.2.18. predočene su momentne karakteristike pri regulaciji frekvencijom i naponom jednog trofaznog asinkronog kaveznog motora, dobivene uz zanemarenje statorskog otpora i rasipne reaktancije. Također se vidi da je maksimalni moment konstantan (s promjenom frekvencije mijenjao se i napon), da je pri manjim frekvencijama potezni moment veći i da je praktički moguće postići potezni moment jednak maksimalnom (prekretnom).

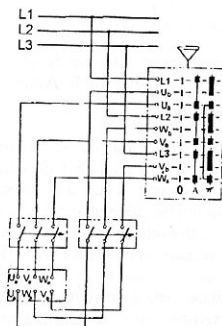


Sl. 3.2.18. Momentne karakteristike trofaznog asinkronog kaveznog motora pri promjeni frekvencije i napona

Regulacija brzine vrtnje ostvaruje se i *promjenom broja pari polova* na statoru motora. To se izvodi na dva načina: s dva neovisna statorska namota različitog broja pari polova ili s jednim statorskim namotom koji se prespaja na različite brojeve pari polovova. Također je uobičajena može i kombinacija ta dva načina.



Ima više mogućnosti spajanja namota kojim se dobiva različiti broj pari polova. Najpoznatiji je *Dahlanderov spoj*, koji daje promjenu broja pari polova u odnosu 1 : 2. Kod tog odnosa broja pari polova, statorski se namot spaja u razne spojeve, čime se postiže npr. ili konstantna snaga, ili konstantni moment kod obje brzine vrtnje, ili obje različito. Preklapanje broja pari polova izvodi se specijalnim preklopkama. Preklopka za Dahlanderov spoj vidi se na slici 3.2.19.



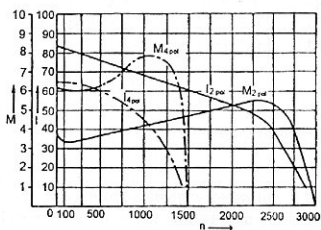
Sl. 3.2.19. Preklopka za Dahlanderov spoj

Motori kojima se mijenja brzina vrtnje promjenom broja pari polova zovu se *polno-preklopivi*. Njihove izvedbe mogu biti s:

- jednim namotom u Dahlanderovom spoju za dobivanje dviju brzina vrtnje u odnosu 1 : 2;
- dva odvojena namota za dvije po volji uzete brzine vrtnje;
- jednim namotom u Dahlanderovu spoju i jednim odvojenim namotom za tri brzine vrtnje od kojih su dvije u odnosu 1 : 2;
- dva namota u Dahlanderovu spoju za četiri brzine vrtnje od kojih su dva para brzina u odnosu 1 : 2.

Pogodno je da se polno-preklopivi motori pokreću s uključenim većim brojem pari polova (manjom brzinom), a nakon toga prespajaju na manji broj polova (veću brzinu vrtnje). Na taj način smanjuju se gubici pri pokretanju. Također, pri zaustavljanju s veće brzine vrtnje, prvo se uključi namot na manju brzinu vrtnje, a tek nakon njezina postizanja isključuje se motor s mreže. U području između veće i manje brzine vrtnje elektromotorni pogon generatorski koči.

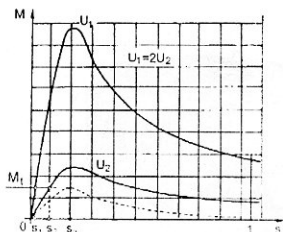
Na slici 3.2.20. predočene su snimljene momentne i strujne karakteristike dvobrzinskog motora koji je čest na brodu. Uočava se da se s promjenom brzine vrtnje mijenja potezni moment i maksimalni (prekretni) moment. Ako broj pari polova raste, odnosno brzina vrtnje pada, raste potezni i maksimalni moment motora. Iako je brzina vrtnje skokovita, regulacija brzine vrtnje je ekonomična i vrlo jednostavna.



Sl. 3.2.20. Karakteristike dvobrzinskog motora

Regulacija brzine vrtnje trofaznog ainkronog kaveznog motora daje se postići *promjenom klizanja*, odnosno promjenom priključenog napona. U tom slučaju momentna karakteristika motora ima oblik kako se vidi na slici 3.2.21. Promjena napona  $U_1$  na  $U_2 = 1/2 U_1$ , pri istom teretu  $M_p$ , uvjetovala je promjenu klizanja od  $s_1$  na  $s_2$ . Također se može zaključiti da će se klizanje na taj način moći mijenjati samo u granicama od  $s = s_n$  do  $s = s_m$  jer bi kod tog posljednjeg klizanja maksimalni moment bio jednak momentu tereta. Pri daljnjem snižavanju napona moment tereta bio bi veći od maksimalnog momenta, pa bi motor stao.

Regulacija brzine vrtnje trofaznog asinkronog motora promjenom napona, uz spomenuto ograničenje područja regulacije, skupo je, ali ima prednost u tome što se može brzina vrtnje regulirati kontinuirano, za razliku od regulacije preklapanjem broja pari polova.



Sl. 3.2.21. Momentna karakteristika trofaznog asinkronog motora pri promjeni napona

Normalni smjer vrtnje motora je udesno, gledano s pogonske strane. Postiže se priključivanjem stezaljka motora  $U$ ,  $V$  i  $W$  u priključnoj kutiji na faze mreže  $L_1$ ,  $L_2$  i  $L_3$ . Smjer vrtnje može se promijeniti zamjenom dvaju mrežnih priključaka (npr.  $L_1$  i  $L_2$ ). Motori koji imaju pločicu sa strelicom za smjer vrtnje na ležajnom štitu ili oplati motora smiju se vrtjeti samo u označenom smjeru.

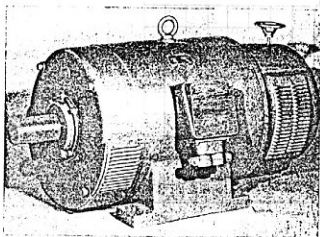
U motora gdje je potrebno reverziranje, tj. promjena smjera vrtnje, dugo se rabila dvopolna ili trolpolna preklopka za reverziranje. U suvremenim elektromotornim pogonima to se danas obavlja ugradnjom sklopnika za reverziranje (opisano u udžbeniku "Brodski električni uređaji i sustavi" II. dio).

### 3.2.1.2. Trofazni asinkroni kolutni motor

*Kolutni asinkroni motor (ili motor s namotanim rotorom)* uglavnom se gradi kao trofazni. Rotorski namot takva motora izveden je po istim načelima kao što je izveden i njegov statorski namot, a broj faza i broj pari polova statorskog i rotorskog namota je jednak.

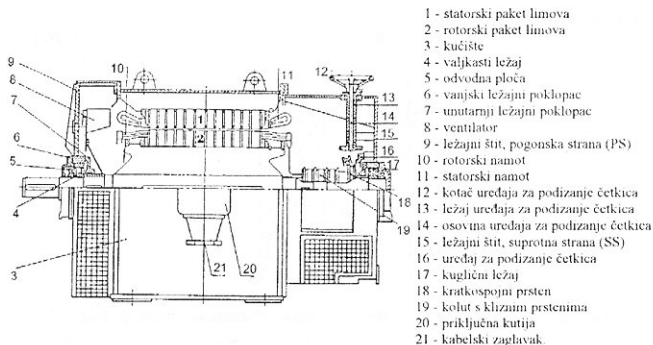
Fazni namoti rotora spajaju se u spoj zvijezda ili u spoj trokut. U spoju zvijezda počeci namota spojeni su na *tri klizna prstena*, a krajevi su namota kratko spojeni. U spoju trokut svršetak namota jedne faze spojen je s početkom namota sljedeće faze itd., a spojna mjesta vezana su na klizne prstene (kolute). Po prstenima klize *četkice* smještene u *držačima*, tako da četkice i klizni prsteni zatvaraju strujni krug rotorskog namota preko tzv. *rotorskog pokretača* koji se postavlja izvan motora. Da bi se smanjili električni i mehanički gubici, a četkice se ne bi nepotrebno trošile, u nekim izvedbama kolutnih motora izvodi se uređaj za kratko spajanje namota na kliznim prstenima i za podizanje četkica nakon što pri pokretanju motor dostigne nazivnu brzinu vrtnje.

Tipični trofazni asinkroni kolutni motor za napon od 380 V, frekvencije od 50 Hz koji se ugrađuje u brod prikazan je fotografijom na slici 3.2.22.



Sl. 3.2.22. Trofazni asinkroni kolutni motor

Pojednostavnjeni montažni crtež takva trofaznog asinkronog kolutnog motora predočuje slika 3.2.23.



Sl. 3.2.23. Montažni crtež trofaznog asinkronog kolutnog motora

Trofazni asinkroni kolutni motori prikladni su ondje gdje nisu dopušteni veliki udarci struje pokretanja, gdje su teški uvjeti pokretanja koji zahtijevaju veliki potezni moment motora i gdje je potrebna kontinuirana regulacija brzine vrtnje u uskom području bez posebnih izvora promjenjive frekvencije.

Da bi se smanjio strujni udarac u brodskoj mreži pri pokretanju kolutnog motora, potrebno je povećati otpor u njegovu rotorskom krugu. To se obavlja tako da se u seriju sa svakim faznim namotom rotora uključi po jedan vanjski otpornik. Ako je otpor faznog namota  $R_{20}$ , pa se u seriju doda vanjski dodatni otpor  $R_{2d}$ , bit će ukupna vrijednost otpora  $R_2$ , po fazi koja određuje karakteristike motora:

$$R_2 = R_{20} + R_{2d} \quad (3.90)$$

Veličina struje u rotoru  $I_2$  linearno je ovisna o naponu na koji je motor priključen (a njemu je proporcionalan napon u fazi rotora  $E_{20}$ ), ali je ovisna i o omskom otporu  $R_{20}$  i reaktanciji  $X_{\sigma 2}$ . Promijeni li se otpor u rotorskom krugu, budući da se nije promijenila vrijednost reaktancije  $X_{\sigma 2}$ , dobit će se jednake vrijednosti struje kod drugih vrijednosti klizanja, tj. uvijek onda kad omjer  $R/s$  bude isti:

$$R_{20}/s_0 = R_2/s \quad (3.91)$$

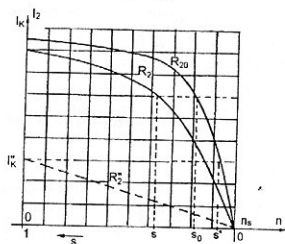
Ista struja koja se dobila bez dodatnog otpora, samo uz otpor namota  $R_{20}$  i uz klizanje  $s_0$ , dobit će se i pri otporu povećanom na vrijednost  $R_2$ , s klizanjem  $s$  koje je povećano u istom omjeru:

$$s'' : s_0 = R_2 : R_{20} \quad (3.92)$$

Karakteristika koja prikazuje struju  $I_2$  ovisno o klizanju, prema slici 3.2.24., predočuje kako povećanje otpora u rotorskom krugu s  $R_{20}$  na  $R_2$  smanjuje strujni udarac pri uključivanju zaustavljenog motora na mrežu. Ako se želi da taj udarac struje uz klizanje  $s = 1$  ne prijeđe vrijednost npr.  $I_4$  koja bi se normalno pojavila uz

neko klizanje  $s''$ , treba ukupni otpor u rotorskom krugu povećati na takvu vrijednost  $R_2$  da bude:

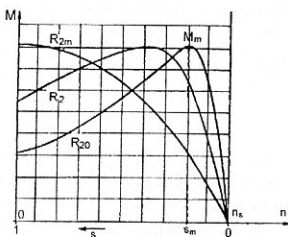
$$1 : s'' = R_2 : R_{20} \quad (3.93)$$



Sl. 3.2.24. Ovisnost rotorske struje o otporu i klizanju kolutnog motora

Uključivanjem otpora  $R_{2d}$  u rotorski krug mijenja se i njegova momentna karakteristika, kako je predloženo na slici 3.2.25. Uz poznatu momentnu karakteristiku pri otporu  $R_{20}$  koji ima sam namot rotora, dobit će se karakteristika za bilo koji drugi ukupni otpor  $R_2$  u krugu rotora, tako da će se za svaku vrijednost momenta rasti klizanje u omjeru povećanja otpora:

$$s = s_0 \frac{R_2}{R_{20}} \quad (3.94)$$



Sl. 3.2.25. Utjecaj otpora na momentnu karakteristiku kolutnog motora

Prema slici 3.2.25. očito je da se dodavanjem otpora u rotorski krug povećava potezni moment  $M_p$  sve do vrijednosti maksimalnog (prekretnog) momenta  $M_p$  koji uz otpor  $R_{20}$  nastupa pri maksimalnom (prekretnom) klizanju  $s_m$ . Želi li se da maksimalni moment nastupi pri klizanju  $s = 1$ , valja povećati rotorski otpor do vrijednosti:

$$R_2 = R_{20} \frac{1}{s_m} \quad (3.95)$$

Veličina potrebnog dodatnog otpora  $R_{2d}$  za traženi potezni moment  $M_p$  i željeno klizanje  $s$  daje se odrediti s pomoću klizanja  $s_n$  (normalno ili nazivno pogonsko klizanje motora pri poteznom momentu) i otpora rotorskog namota  $R_2$ :

$$R_{2d} = R_2 \frac{s - s_n}{s_n}. \quad (3.96)$$

Pri pokretanju je  $s = 1$ , pa (3.126) prelazi u izraz:

$$R_{2d} = R_2 \frac{1 - s_n}{s_n}. \quad (3.97)$$

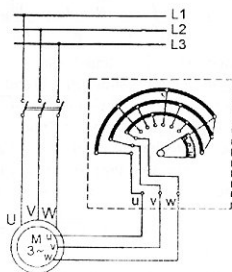
Treba li npr. trofazni asinkroni kolutni motor s nazivnim klizanjem 5% pokretati s nazivnim momentom, dobiva se:

$$R_{2d} = R_2 \frac{1 - 0,05}{0,05} = 19 R_2.$$

Ako se ne može odčitati s natpisne pločice motora rotorska struja  $I_2$ , ona se približno izračunava iz predane djelatne snage  $P_2$  (W), rotorskog napona u stanju mirovanja  $U_{20}$  (mjereno između dva klizna prstena) i korisnosti  $\eta$ :

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_{20}} \cdot \frac{2}{1 + \eta}. \quad (3.98)$$

Pojava da se uključivanjem otpora u rotorski krug smanjuje struja pokretanja i povećava potezni moment, iskorištena je za pokretanje trofaznih asinkronih kolutnih motora. S pomoću tzv. pokretača (uputnika, upuštača) namješta se otpor rotorskom krugu, i to obično u stupnjevima, a rjeđe kontinuirano. Načelna shema spoja trofaznog asinkronog kolutnog motora s ručnim pokretačem prikazana je na slici 3.2.26.



Sl. 3.2.26. Spoj trofaznog kolutnog asinkronog motora s ručnim pokretačem

Da bi se ispravno pokrenuo trofazni asinkroni kolutni motor, važno je da poluga pokretača bude u nultom položaju (otpor  $R_2$  je maksimalan), jer tada četkice prilježu na klizne prstene, a uređaj za kratko spajanje je isključen. Nakon što se sklopkom spoji statorski namot na mrežu, postupno se isključuju otpori pokretača, zbog čega se rotor pokrene i ubrzava, što se kontrolira ampermetrom ili pak sluhom. Kad je rotor postigao nazivnu brzinu vrtnje, okreće se poluga uređaja za kratko spajanje (kratko se spoji namot rotora) i podizačem se četkice podignu iznad kliznih prstena da se ne troše trenjem. Nakon toga se rotorski pokretač vraća u početni

položaj. Budući da je pokretač dimenzioniran za kratkotrajan rad, tj. za vrijeme pokretanja, ne smije se ni jedan stupanj otpora ostaviti spojen duže vremena u rotorskom krugu jer bi izgorio.

Trofazni asinkroni kolutni motor zaustavlja se na taj način da se sklopkom isključi s mreže, a zatim okrene poluga podizača četkica, kako bi četkice ponovno prilegle na klizne prstene, a rotorski namot istodobno se odspoji iz kratkog spoja.

Uz pravilno dimenzionirane dodatne otpore u rotorskom krugu kreće motor npr. s nazivnim momentom i istodobno uzima iz mreže samo nazivnu struju. Najčešće se pokretači ugadaju tako da motor razvija potezni moment jednak 50%, 100% ili kod teških zaleta 200% nazivnog momenta. Pri pokretanju motora pokretač se obično postavlja tako da se održi srednji potezni moment i odgovarajuća srednja struja.

Pri puštanju u pogon trofaznog asinkronog kolutnog motora treba paziti da se odmah nakon uključivanja statorske sklopke rotorski pokretač dovede u stupnjevima u pogonski položaj. Pri zaustavljanju motora moraju se statorska sklopka i rotorski pokretač isključiti neposredno jedan iza drugoga. Da bi se spriječile pogreške u pogonu, preporuča se mehanički ili električki (npr. zaštitom) povezati sklopku i rotorski pokretač.

Brzina vrtnje opterećenog trofaznog asinkronog kolutnog motora daje se smanjiti uključivanjem otpornika u rotorski strujni krug, i to samo za one kojima su četkice i rotorski otpornik dimenzionirani za trajan rad. Brzina vrtnje može se regulirati samo u području ispod nazivne brzine vrtnje, a finoća regulacije ovisi o broju stupnjeva otpornika i o odgovarajućem opterećenju.

Da bi se pravilno dimenzionirali otpornici za pokretanje  $R_{2d}$  mora biti poznata momentna karakteristika radnog stroja. Iznos otpora toga otpornika izračunava se primjenom izraza:

$$R_{2d} = \frac{U_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_2} \cdot \frac{n_s - n_{sm}}{n_s} \cdot \frac{M_n}{M_{sm}}, \quad (3.99)$$

gdje je  $U_{20}$  napon rotora između kliznih prstena u stanju mirovanja (V),  $n_{sm}$  smanjena brzina vrtnje ( $r \text{ min}^{-1}$ ), a  $M_{sm}$  moment pri smanjenoj brzini vrtnje (Nm).

U motora s vlastitom ventilacijom pogoršava se hlađenje ako se smanjuje brzina vrtnje. Planiranu regulaciju brzine vrtnje treba uzeti u obzir pri dimenzioniranju motora ili se mora smanjiti njegova nazivna snaga.

Pri regulaciji brzine vrtnje motora od prirodne brzine vrtnje pod opterećenjem  $n$  na smanjenu brzinu vrtnje  $n_{sm}$  smanjuje se korisnost na iznos koji se približno računa prema izrazu:

$$\eta_{sm} = \eta \cdot \frac{n_{sm}}{n}, \quad (3.100)$$

gdje je  $\eta$  korisnost bez dodatnih otpora u rotorskom krugu.

### 3.2.1.3. Gubici i korisnost trofaznog asinkronog motora

Nadomjesna shema na slici 3.2.12. mora zadovoljavati i energetske odnose u trofaznom asinkrom motoru. Umnožak  $m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = m_2 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2'$  izražava gubitke Joulove topline u rotorskom namotu, tj. električnu snagu  $P_r'$ . Budući da je prema (3.74) otpor  $R_2 \cdot \frac{1-s}{s}$  u nadomjesnoj shemi fiktivan i u pogonskom stanju asinkronog motora ne postoji, može se zaključiti da su gubici Joulove topline u tom fiktivnom

otporu  $m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \frac{1-s}{s}$  ekvivalent za mehaničku snagu  $P_m$  koju motor razvija. Može se napisati da je:

$$\frac{P_e}{P_m} = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \frac{1-s}{s}} = \frac{s}{1-s}. \quad (3.101)$$

Na temelju izraza (3.101) dolazi se do vrlo važnog zaključka za asinkroni motor: da se snaga koja se preko okretnog polja prenosi iz statora u rotor preko zračnog raspora (snaga okretnog polja  $P_{okr}$ ), dijeli na električnu i mehaničku snagu u omjeru  $s : (1 - s)$ . Porastom klizanja  $s$  raste udio električne snage  $P_e$  u rotorskom krugu i sve je manja razvijena pogonska snaga  $P_m$ . Prema tome je:

$$P_{okr} = P_e + P_m = P_e + P_e \cdot \frac{1-s}{s}. \quad (3.102)$$

Odatle slijedi da je:

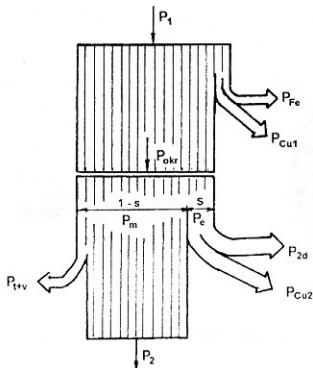
$$P_e = s \cdot P_{okr}, \quad (3.103)$$

$$P_m = (1-s) \cdot P_{okr}. \quad (3.104)$$

Osim otpora rotorskog namota  $R_2$  može se u rotorski krug preko kliznih koluta uključiti dodatni djelatni otpor  $R_{2d}$  (i to stvarni otpor, a ne onaj fiktivni iz nadomjesne sheme).

Električna snaga utrošena u rotorskom namotu predstavlja gubitak i uvjetuje zagrijavanje rotora. Nasuprot tome može se električna snaga utrošena u dodatnom otporu korisno upotrijebiti (npr. električno grijanje) i ona ne grije motor.

Na osnovi definiranog od (3.101) do (3.104) daje se sastaviti bilanca snage asinkronog motora kako se vidi na slici 3.2.27.



Sl. 3.2.27. Bilanca snage asinkronog motora

Ukupni gubici asinkronog motora su:



$$P_g = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_{2d} + P_{t+vr}, \quad (3.105)$$

gdje su  $P_{Cu1}$  gubici u bakru statora,  $P_{Fe}$  gubici u željezu statora i  $P_{Cu2}$  gubici u bakru rotora, a  $P_{2d}$  je snaga koja se uzima preko kliznih koluta i  $P_{t+vr}$  snaga pretvorena u gubitke trenja i ventilacije.

Mehanička snaga na osovini asinkronog motora bit će:

$$P_2 = P_1 - P_g. \quad (3.106)$$

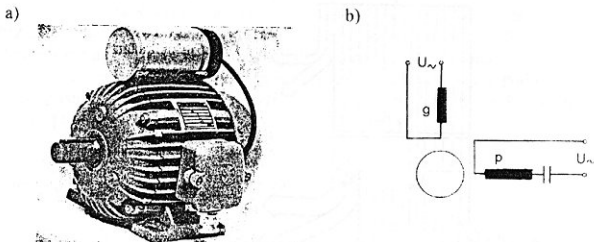
Korisnost  $\eta$  asinkronog motora računa se prema izrazu:

$$\eta_m = \frac{P_1 - P_g}{P_1} = 1 - \frac{P_g}{P_1}. \quad (3.107)$$

### 3.2.2. Jednofazni asinkroni motori

Jednofazni asinkroni motori imaju samo jedan namot na statoru (koji se priključuje na jednofazni izmjenični napon) i kavezni rotor.

Da bi jednofazni asinkroni motor mogao *krenuti sam*, potrebno mu je dodati na statoru još jedan namot, tako da stator ima dvije faze: namot *glavne faze* ili *radni namot g*, koji je smješten u 2/3 ukupnog broja statorskih utora i namot *pomoćne faze* ili *pomoćni namot p*, koji je smješten u preostalu 1/3 utora. Osi ta dva namota prostorno su pomaknute za električni kut od  $90^\circ$ , odnosno za geometrijski kut od  $90^\circ/p$ , kako je to na slici 3.2.28.



Sl.3.2.28. Fotografija a) i shema b) jednofaznog asinchronog motora

U trenutku priključka statorskog namota na jednofazni napon motor se ne bi sam pokrenuo jer je za pokretanje rotora potrebno stvoriti okretno magnetsko polje (koje stvara potezni moment  $M_p$ ). Zbog toga je potrebno fazno pomaknuti struju u pomoćnom namotu  $I_p$  prema struji u glavnom namotu  $I_g$ . Da bi se osigurao najveći potezni moment, valja osigurati simetrično okretno polje koje nastaje kada je

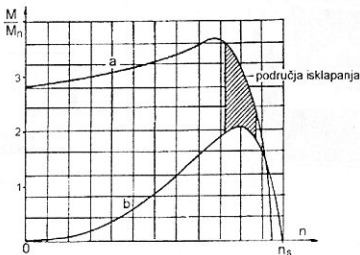
prostorni električni kut pomaka faza ( $90^\circ$ ) jednak vremenskom pomaku struja u tim fazama ( $90^\circ$ ).

Vremenski pomak struje u pomoćnoj fazi  $I_p$  prema struji u glavnoj fazi  $I_g$  može se dobiti dodavanjem *radnog otpora*, *induktivnog otpora*, ili *kapacitivnog otpora* u seriju s namotom pomoćne faze.

Prvi način daje relativno mali vremenski pomak faze. Rješenje je jeftino, jer se pomoćna faza napravi od tanje žice ili materijala većeg specifičnog električnog otpora (npr. mesinga umjesto bakra).

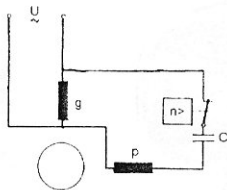
Drugi načina izvedbe pomoćne faze ne upotrebljava se jer je skuplji od prvog, a ne daje bolje pogonske karakteristike.

Najbolje rješenje daje uključivanje kondenzatora u pomoćnu fazu, jer je tom izvedbom moguće postići vremenski pomak struja faza od električnih  $90^\circ$ . Na taj način može se dobiti i simetrično okretno polje. Na slici 3.2.29. predočena je momentna karakteristika jednofaznog asinkronog motora s pomoćnom fazom za zalet a) i bez nje b).



Sl. 3.2.29. Primjer momentne karakteristike motora s pomoćnom fazom za zalet a) i bez nje b)

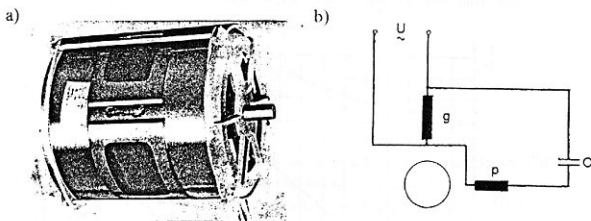
Ako pomoćna faza služi samo za pokretanje, ona i kondenzator tako su i dimenzionirani. Nakon što se motor zaletio i dostigao oko 2/3 nazivne brzine vrtnje (oko 70 do 80% sinkrone brzine vrtnje), *pomoćna faza za zalet automatski se isključuje* malom centrifugalnom sklopkom na osovini motora ili strujnog (termičkog) releja u glavnoj fazi. Na slici 3.2.30. shematski je predočen način isključivanja pomoćne faze za zalet.



Sl. 3.2.30. Shema spoja motora za isključivanje pomoćne faze za zalet

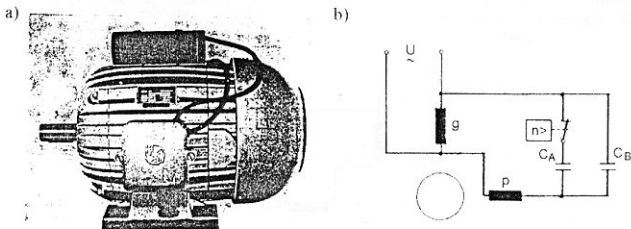
Motor kojemu je kondenzator s pomoćnom fazom trajno uključen zove se *kondenzatorski motor*. Taj motor ne treba uređaj za isključenje pomoćne faze, odlikuje se odličnim faktorom snage  $\cos \varphi$  (više od 0,85), dobrom korisnošću  $\eta$  (više od 0,85) i tihim radom. Pogonski kondenzator s metalnim elektrodama naparenim na tanku foliju od papira ili sintetičkog materijala dimenzioniran je za nazivno opterećenje (na trajan rad, a ne za pokretanje), pa je potezni moment  $M_p$  relativno malen (oko 40 do 60%  $M_n$ ). Porast kapaciteta kondenzatora povećava potezni moment, ali istodobno povećava gubitke motora pri malim opterećenjima.

Ti motori mnogo se upotrebljavaju na brodu za pogon strojeva za pranje rublja. Izrađuju se obično za dvije brzine vrtnje (dva odvojena namota), pri čemu veća brzina služi za centrifugiranje, a s manjom brzinom motor reverzira i pri tome pere rublja. Na slici 3.2.31. predočen je tipičan kondenzatorski motor stroja za pranje rublja.



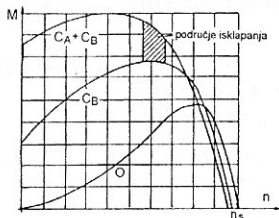
Sl. 3.2.31. Fotografija a) i shema spoja b) dvobrzinskog kondenzatorskog motora za trajan rad

Veliki potezni moment kondenzatorskom motoru može se postići ako se trajno uključenom kondenzatoru kapaciteta  $C_B$  paralelno priključi elektrolitski kondenzator kapaciteta  $C_A$  koji se nakon zaleta automatski isključuje, kako je predočeno na slici 3.2.32. Pri tome se neće pokvariti dobre radne karakteristike motora, već takav *dvokapacitetni motor* ima veliki potezni moment  $M_p$ , male gubitke i malo smanjenje brzine vrtnje pri normalnom (nazivnom) opterećenju.



Sl. 3.2.32. Fotografija a) i shema spoja b) dvokapacitetnog kondenzatorskog motora

Elektrolitski kondenzator  $C_A$  ima približno 2,5-struki kapacitet pogonskog kondenzatora i mora se nakon završenog pokretanja isključiti. Za te motore ponekad se prigraduje sklopka koja služi za uklapanje i isklapanje motora s brodske mreže. Na slici 3.2.33. predočena je momentna karakteristika jednofaznog asinkronog motora s pogonskim i zaletnim kondenzatorom.

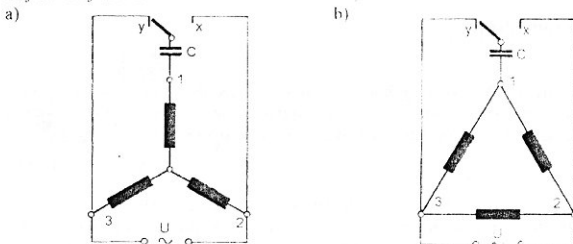


Sl. 3.2.33. Momentna karakteristika dvokapacitetnog kondenzatorskog motora

Smjer vrtnje može se promijeniti zamjenom priključka samo jednog namota. Time je os tog namota zakrenuta za kut  $\pi$ , što daje suprotan smjer vrtnje jer se rotor uvijek vrti od osi namota u kojem struja prethodi prema osi namota u kojemu ona zaostaje. Promjena smjera vrtnje obavlja se s dvopolnom preklopkom.

Ako pri radu jednofaznog asinkronog motora nastane prekid jedne faze trofaznog priključka, rotor će se i dalje vrtjeti, tj. motor će raditi kao jednofazni. Struju preopterećenja preuzimaju preostale dvije faze i postoji opasnost da namot motoru pregori ako je opterećenje veće od približno 58% nazivnoga.

Ako se motor zaustavi, ne može se više pokrenuti bez treće faze ili zahvata kakvi se izvode pri njegovu pokretanju. Kad nema trofazne mreže ili jednofaznog asinkronog motora, može poslužiti više spojeva za postizanje različitih karakteristika. Najčešće se trofazni asinkroni motor priključuje na jednofaznu mrežu ugradnjom pogonskog kondenzatora. Uporabom kondenzatora postiže se ne samo da motor kreće sam već se on može i reverzirati na vrlo jednostavan način (ugradnjom jedнопolne preklopke). Takav Steinmetzov spoj daje se primijeniti na motor spojen u trokut ili spojen u zvijezdu, kako je predočeno na slici 3.2.34. Spoj s  $x$ -položajem preklopke odgovara lijevom smjeru vrtnje, a spoj s  $y$ -položajem preklopke odgovara desnom smjeru vrtnje rotora.



Sl.3.2.34. Trofazni asinkroni motor spojen u zvijezdu a) i trokut b) u Steinmetzovu spoju

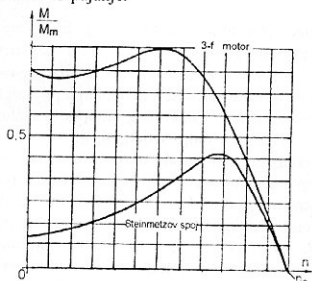
Karakteristika takva motora slična je karakteristici jednofaznog asinkronog motora s trajno uključenom pomoćnom fazom. Motor ima dobar faktor snage, dobru korisnost, ali relativno mali potezni moment. Da bi se povećao potezni moment, može se uz pogonski kondenzator uključiti i kondenzator za pokretanje koji se nakon završenog pokretanja isključuje preko sklopke. Potrebni kapacitet pogonskog kondenzatora, ovisno o snazi trofaznog asinkronog motora, određuje se prema izrazu:

$$C = \frac{P}{2\pi \cdot f \cdot U}, \quad (3.108)$$

gdje za napon  $U = 220$  V, frekvenciju  $f = 50$  Hz i snagu trofaznog asinkronog motora  $P$  u W, kapacitet kondenzatora u  $\mu\text{F}$  iznosi:

$$C = \frac{P}{15,2}. \quad (3.109)$$

Priključkom na jednofaznu mrežu smanjuje se snaga trofaznog asinkronog motora za 20 - 30%. Također, smanjuje se i njegov potezni moment, pa se na slici 3.2.35. vidi da je momentna karakteristika trofaznog asinkronog motora na jednofaznoj mreži, unatoč upotrebi kondenzatora, znatno niža no što bi za isti motor bila uz simetrično trofazno napajanje.



Sl.3.2.35. Momentne karakteristike motora priključenog trofazno i priključenog jednofazno u Steinmetzovu spoju

### 3.3. Sinkroni strojevi

Električni rotacijski stroj kojemu se rotor vrti jednakom brzinom vrtnje kao i okretno magnetsko polje statora zove se *sinkroni stroj*. Brzina vrtnje rotora ili okretnog magnetskog polja statora jednaka je tzv. *sinkronoj brzini vrtnje*  $n_s$ :

$$n_s = \frac{60f}{p}, \quad (3.110)$$

gdje je  $f$  frekvencija mreže, a  $p$  broj pari polova sinkronog stroja. Što je manja sinkrona brzina vrtnje, to za određenu (konstantnu) frekvenciju induciranog napona sinkroni stroj mora imati veći broj pari polova.

Rad sinkronog stroja je reverzibilan (pa može u načelu raditi ili kao motor ili kao generator), ali se pretežno upotrebljava kao generator (najčešće kao trofazni).

*Sinkroni generator ili alternator* je pretvornik koji pretvara mehaničku energiju u električnu. Mehaničku energiju dobiva od pogonskog stroja, a na brodu je to parna ili plinska turbina (*turbinski generator*), dizelski motor (*dizelski generator*) ili osovina glavnog propulzijskog stroja (*osovinski generator*).

Vrsta pogonskog stroja određuje nazivnu brzinu vrtnje i izvedbu rotora sinkronog generatora. Prema tome razlikuju se, pri frekvenciji mreže od 50 Hz :

a) *brzohodni*, s brzinom vrtnje od 750 do 3000 r min<sup>-1</sup>, odnosno 8, 6, 4 i 2 pola i cilindričnim rotorima (rotori s neistaknutim polovima) (turbinski generatori i suvremeni brodski dizelski generatori);

b) *srednjih brzina*, s brzinom vrtnje od 300 do 600 r min<sup>-1</sup>, odnosno od 20 do 10 polova i rotorima s istaknutim polovima (brodski dizelski generatori i brodski osovinski generatori te hidrogenatori na kopnu);

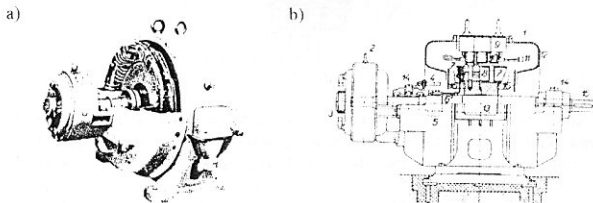
c) *sporohodni*, s brzinom vrtnje manje od 300 r min<sup>-1</sup>, odnosno više od 20 polova i rotorima s istaknutim polovima (brodski osovinski generatori i hidrogenatori na kopnu).

*Sinkroni motor* je pretvornik koji pretvara električnu energiju u mehaničku. Primjenjuje se u pogonima gdje nije potrebno regulirati brzinu vrtnje niti se zahtijeva veći broj pokretanja i zaustavljanja. Na brodovima se rijetko koriste velikim sinkronim motorima, a mali su posebne namjene, kao što su tahogeneratori i selsini.

Posebna vrsta sinkronih strojeva su *kompensatori*, koji rade bez pogonskog stroja. Ti strojevi ne služe za elektromehaničku pretvorbu energije, nego daju elektroenergetskom sustavu jalovu energiju. Grade se u velikim jedinicama sa šest ili osam polova, 1000 ili 750 r min<sup>-1</sup> (na mreži frekvencije od 50 Hz), a na brodovima se ne rabe.

### 3.3.1. Sinkroni generatori

*Sinkroni generator* je osnovni izvor električne energije na brodu. Njegovi su glavni dijelovi *stator s namotom* i *rotor s namotom*. Svaki stariji sinkroni generator ima i *uzbudnik*, koji je u suvremenim sinkronim generatorima zamijenio *elektronički sklop*. Na slici 3.3.1. predložen je stariji brodski sinkroni generator s uzбудnikom.



Sl. 3.3.1. Fotografija: a) i presjek b) sinkronoga generatora s uzбудnikom

Na slici 3.3.1.b) sinkroni generator označen je s 1, a uzбудnik (uzbudni stroj) s 2. Iz kolektora 3 uzbudnika 2 teče struja na četkice koje se nalaze u držačima 4, a zatim na dva prstena 5 i od njih s pomću dva dovoda 6 do uzbudnih svitaka 7 magneta rotora 8. Kućište 9 s paketom limova 10 i armaturnim namotom 11 čini stator koji je zaštićen oklopom. Na oklopu se nalazi ploča sa stezaljkama 13. Kroz dva ležaja 14 prolazi osovina 15 na koju je ugrađen uzбудnik. Dva ventilatora 16 hlade generator.

Namoti sinkronoga generatora su *uzbudni*, *armaturni* i *prigušni*. Većina velikih sinkronih generatora ima sva tri namota.

*Uzбудni namot* najčešće se ugrađuje u rotor. Kroz njega se propušta istosmjerna struja, tako da svojim protjecanjem stvara magnetsko polje u generatoru prijeko potrebno za elektromagnetsku pretvorbu.

*Armaturni namot* je onaj preko kojega se prenosi ukupna snaga stroja pa se pri izradi njemu poklanja velika pozornost. Zbog velikih struja i visokih napona najpogodnije je da se armaturni namot ugrađuje u stator.

*Prigušni namot* ili *kavez* ugrađuje se najčešće u rotor sinkronih generatora koji imaju lamelirani rotor ili samo lamelirano polno stopalo (nastavak). Ako se očekuje izrazitije nesimetrično opterećenje, prigušni se namot ugrađuje u turbinske generatore kojima je tijelo rotora izrađeno od masivnog čelika.

Za induciranje izmjeničnog napona u sinkronom generatoru potpuno je svejedno okreće li se armaturni namot u kojem se inducira napon, a uzbudni dio stroja miruje, ili da rotira uzbudni dio, a armaturni (radni) namot miruje. U oba slučaja vodiči armaturnog namota sijeku magnetske silnice na jednak način i inducirani napon je isti.

*Statorski paket* (stator) izveden je u obliku šupljeg valjka koji je sastavljen od međusobno izoliranih limova. Na unutrašnjem obodu nalaze se u uzdužnom smjeru u jednakom razmaku utori (otvoreni ili poluzatvoreni) u koje se ulaže *statorski namot*. Dijelovi statorskog paketa između utora zovu se *zubi*, a preostali dio statora čini *jaram*. Fotografija statora trofaznog sinkronoga generatora vidi se na slici 3.3.2.

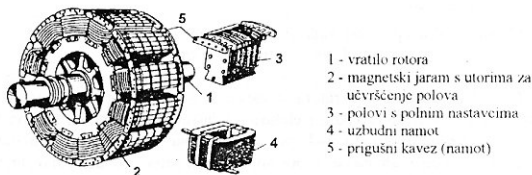


Sl. 3.3.2. Fotografija statora u trofaznog sinkronoga generatora

Namot na statoru (*statorski* ili *armaturni namot*) složeniji je nego u rotoru sinkronoga generatora. Onaj dio namota koji se nalazi u utorima čini aktivni dio (u njima se inducira napon), a čeonu prednji i stražnji spojevi su neaktivni dijelovi namota.

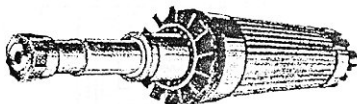
*Rotor* je uzbudni dio stroja i izrađuje se u dvije izvedbe: s istaknutim i neistaknutim polovima.

*Rotor s istaknutim polovima* sastoji se od elektromagneta smještenih na valjku kako je predočeno na slici 3.3.3. Jezgre polova sastoje se obično od limova, a njihov oblik ima utjecaj na raspodjelu magnetskog toka u zračnom rasporu, a time i na inducirani napon. Na jezgri polova koncentriran je *rotorski* (uzbudni) *namot* koji je tako izveden da po obodu izmjenično slijedi N (sjeverni) i S (južni) magnetski pol. Osim jezgre svaki pol ima *polno stopalo* (nastavak) koje zatvara namot s vanjske strane i posreduje pri prolasku magnetskog toka iz rotora preko *zračnog raspora*  $\delta$  u stator. Budući da je uzbudni namot smješten od osovine relativno daleko, te da je pri većoj obodnoj brzini rotora opterećen velikom centrifugalnom silom, namot se mora brižljivo konstruirati i učvrstiti. Zato se takvi rotori grade za male i srednje brzine vrtnje. Za sinkrone generatore s rotorom koji ima istaknute polove vrijedi da je  $\delta \neq konst.$



Sl. 3.3.3. Rotor sinkronog generatora s istaknutim polovima

*Rotor s neistaknutim polovima* (cilindrični rotor) ima oblik valjka s radijalnim ili paralelnim utorima, u koje je smješten uzbudni namot, kako je predočeno na slici 3.3.4. Uzbudni namot je koncentričan, a njegova raspodjela u utorima po obodu rotora mora biti takva da magnetsko polje u zračnom rasporu, odnosno inducirani napon u statoru sinkronog generatora, ima oblik sinusoide. Takva konstrukcija rotora omogućuje velike brzine vrtnje. Za sinkrone generatore s rotorom s neistaknutim polovima vrijedi da je  $\delta = konst.$

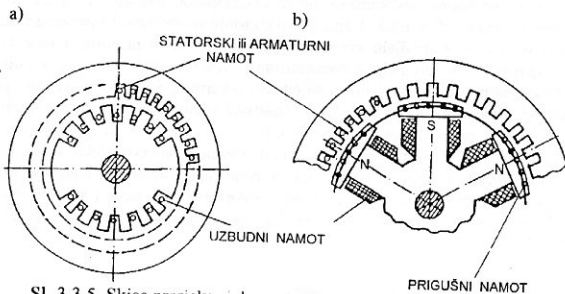


Sl. 3.3.4. Rotor sinkronog generatora s neistaknutim polovima

Radi otklanjanja smetnji u prijelaznim stanjima u rotor se često ugrađuje tzv. *prigušni namot*. U sinkronih generatora s istaknutim polovima taj namot izveden je metalnim štapovima koji prolaze kroz uture u uzdužnom smjeru polnih nastavaka i s obje su strane međusobno povezani kratkospojenim prstenima. U sinkronih generatora s neistaknutim polovima prigušni namot sastoji se od metalnih klmova koji zatvaraju uture i koji su na bočnim stranama također kratko spojeni. Takav prigušni namot za obje vrste sinkronih generatora predstavlja *kratkospojeni kavez* koji je sastavni dio rotora.

Na slici 3.3.5. predočena je skica presjeka sinkronog generatora s neistaknutim a) i istaknutim b) polovima rotora.

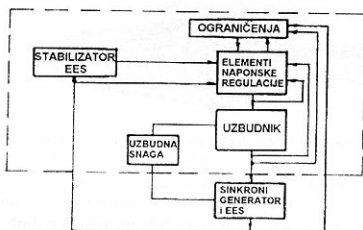




Sl. 3.3.5. Skica presjeka sinkronoga generatora s: a) nestaknutim i b) istaknutim polovima

*Uzbuda* sinkronoga generatora ostvaruje se s pomoću opreme koja, uključujući upravljačko - regulacijske uređaje i električnu zaštitu, čini uzbudni sustav. Osnovni zahtjevi koje uzbudni sustavi trebaju ispuniti jesu pouzdanost i ekonomičnost, regulacija uzbudnog napona u propisanim granicama, te dovoljno brzi porast uzbudnog napona u trenutku naglog pada napona u mreži koju napaja sinkroni generator. Pri radu sinkronoga generatora na vlastitoj mreži (kao na brodu) regulacijom uzbuđuje regulira se mrežni napon, dok se u radu generatora na krutoj mreži (kao na kopnu) regulira jalova snaga koju sinkroni stroj daje (generator) ili uzima (motor) iz mreže. Trajnom regulacijom uzbuđuje postiže se bolja statička stabilnost rada i brže smirivanje oscilacija.

Funkcijska blokovska shema uzbudnog sustava sinkronih generatora pri radu na krutoj mreži vidi se na slici 3.3.6. U slučaju rada generatora na vlastitoj mreži (na brodu) izostaje blok stabilizatora elektroenergetskog sustava (EES), a umjesto EES postoje trošila (na brodu), odnosno vlastita (brodska) mreža.



Sl. 3.3.6. Funkcijska blokovska shema uzbudnog sustava u sinkronim generatorima

Iako je ovaj udžbenik namijenjen studentima za proučavanje brodskih generatora, na ovom se mjestu opisuju i različiti načini uzbuđivanja sinkronih generatora koji se na brodu rijetko rabe

Prema vrsti osnovne komponente, tj. prema vrsti uzбудnika, najčešća je podjela na sustave uzbuđe s *rotacijskim uzbudnikom* i *statičke sustave* kako je predočeno na slici 3.3.7.

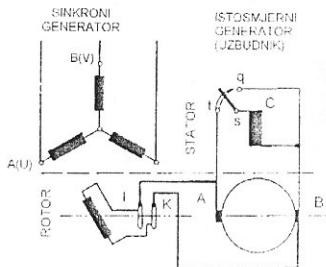


Sl. 3.3.7. Blokvska shema podjele sustava uzbuđe prema vrsti uzbudnika

Prema načinu uzbuđivanja uzbuđni sustavi dijele se na *neovisne* i *samouzbuđne*. Neovisno uzbuđeni sustavi mogu se napajati iz stranog izvora ili izravno s pogonskog stroja. Ponekad se pod neovisnim razumijeva onaj sustav u kojem se uzbuđnik vrti zajedno s generatorom, pa mu je dovod energije neovisan od drugih izvora (npr. energiju dobiva iz turbine), dok je sustav sa starnom uzbuđom onaj u kojega je uzbuđnik pogonjen posebnim dizelskim ili električnim motorom.

Klasični rotacijski uzbuđnici su istosmjerni generatori najčešće smješteni na istoj osovinu sa sinkronim generatorom. U većim sinkronim generatorima istosmjerni uzbuđnik uzbuđen je pomoćnim istosmjernim uzbuđnikom.

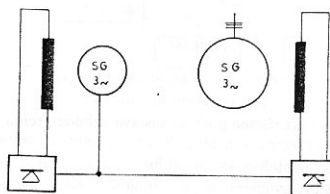
Na slici 3.3.8. vidi se shema spoja trofaznog sinkronoga generatora s uzbuđnikom koji se prije upotrebljavao na brodu. Uzbuđnik (*budilica*) je istosmjerni paralelni (poredni) generator, tj. klasični izvor istosmjerne struje koja se dovodi u uzbuđni namot. Veličina te struje određuje veličinu induktivnih struja u statoru, pa je uzbuđnu struju potrebno ugoditi tako da se postigne stanje opterećenja jalovom snagom koja se želi. Uzbuđna struja iz uzbuđnika dovodi se u uzbuđni namot preko kliznih prstena (kliznog koluta) i četkica, a regulira se tako da se napon uzbuđnika regulira ručnim ili automatskim regulatorom u njegovu uzbuđnom krugu, gdje teku relativno male struje.



Sl. 3.3.8. Shema spoja trofaznog sinkronoga generatora s uzbuđnikom

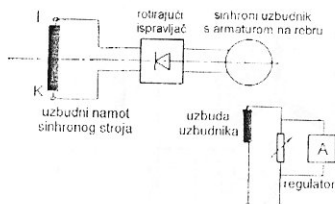
Zbog skupog održavanja i problema vezanih uz kolektor, ali i skupih istosmjernih uzбудnika, danas se istosmjerni uzbudnici više ne ugrađuju u nove jedinice. Također, postojeći se uzbudnici najčešće zamjenjuju izmjeničnim sinkronim uzbudnicima. Taj uzbudnik može se izvesti kao klasični sinkroni generator s trofaznom armaturom na statoru ili kao inverzni sinkroni uzbudnik.

Klasičnim sinkronim uzbudnikom napaja se uzbuda preko tiristorskog mosta, kako se vidi na slici 3.3.9. Uzбудnik je najčešće na istoj osovini sa sinkronim generatorom, a uzbuda glavnoga generatora regulira se upravljivim tiristorskim usmjerivačem.



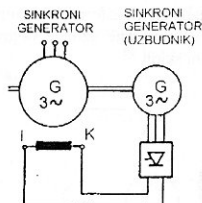
Sl. 3.3.9. Shema spoja sustava uzbude sa sinkronim uzbudnikom

Uzbuda s *rotirajućim ispravljačima* prema slici 3.3.10. potpuno isključuje i kolektor i klizne kolute. Kao uzбудnik služi mali sinkroni generator, tj. *inverzni sinkroni uzbudnik*, u kojem su zamijenjene uloge statora i rotora. Armatura toga izmjeničnog uzbudnika vrti se na istoj osovini s rotorom glavnog sinkronoga generatora i s njegovim uzbudnim namotom. Na istoj osovini vrte se i ispravljači koji nisu upravljivi, pa nisu potrebni nikakvi vanjski priključci. Napon armature sinkronog uzbudnika spojen je preko tih ispravljača s uzbudnim namotom glavnog sinkronoga generatora čvrstim priključcima bez ikakvih kliznih koluta, jer se cijeli taj sklop vrti na istoj osovini. Polovi sinkronog uzbudnika, ovaj puta na statoru, miruju, pa za njihovu uzbudu također služe čvrsti dovodi. Regulacijom te relativno male struje upravlja se naponom sinkronog uzbudnika, a preko njega i ispravljenom strujom koja teče u uzbudnom namotu glavnog sinkronoga generatora. Takav sinkroni uzbudnik jedan je od rijetkih primjera gdje sinkroni stroj ima armaturu na rotoru, a polove na statoru.



Sl. 3.3.10. Uzbudni sustav s rotirajućim ispravljačem

Za razliku od rotacijskog, *statički sustav uzbude* ima tiristorske usmjerivače preko kojih se napaja uzbuda sa stezaljka sinkronoga generatora (preko uzbuđnog transformatora) ili iz stranog izvora. Tako se u novije vrijeme koristi uzbuđnim sustavom prema slici 3.3.11. Struja iz izmjeničnog (trofaznog) izvora ispravlja se upravljivim tiristorskim ispravljačem (ili ispravljačem sa silicijskim diodama) na koji djeluje regulator. Time se zaobišla uporaba kolektorskog uzbuđnika, ali je valjalo osigurati izvor izmjeničnog napona za napajanje uzbude.



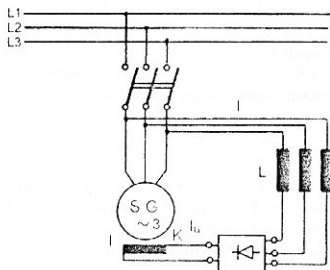
Sl. 3.3.11. Uzbuđni sustav sa stacionarnim ispravljačem

Danas se u praksi sve više susreću i tzv. *samouzbuđni trofazni sinkroni generatori*, koji se, na osnovi pojave remanentnog magnetizma, sami uzbuđuju. Načelo samouzbuđbe može se objasniti s pomoću slike 3.3.12. (na brodu se danas više ne rabi). Uzbuđni namot sinkronoga generatora spojen je preko ispravljačkog sklopa (IS) i prigušnice (L) na stezaljke sinkronoga generatora. Kad se zavrti rotor sinkronoga generatora (SG), u namotu armature inducirat će se napon  $E$  zbog remanentnog magnetizma. Kroz zatvoreni strujni krug poteći će u ispravljač struja  $I$  koja, uz zanemarenje otpora ispravljača, iznosi:

$$I = \frac{E}{\sqrt{3} X} \quad (3.111)$$

Proporcionalno tome povećat će se na izlazu iz ispravljača struja uzbude sve dok se ne ispuni uvjet da je napon na stezaljkama sinkronoga generatora  $U$  jednak:

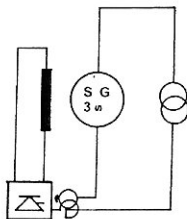
$$U = \sqrt{3} I X \quad (3.112)$$



Sl. 3.3.12. Načelna shema spoja samouzbuđnog sinkronoga generatora

Da bi napon  $U$  ostao nepromijenjen pri promjeni opterećenja, opisani samouzbudni sinkroni generator mora imati još i automatski regulator napona. O tome je više rečeno u točki 4.1.

Ako se osim naponskog izvora za napajanje uzbudnog namota rabi i strujnim, dobiva se kompaundni generator, odnosno statički samouzbudni kompaundni sustav uzbuđe kao na slici 3.3.13. Budući da je otpao rotacijski uzbuđnik, cijeli agregat postaje kraći, ali treba ugraditi uzbuđni transformator kojim se prilagođava napon napajanja uzbuđe. U slučaju te kombinirane uzbuđe dograđuje se i kompaundni transformator, odnosno kompaundni sklop.



Sl. 3.3.13. Načelna shema spoja statičkog samouzbudnog kompaundnog sustava uzbuđe

Osim opisanih sustava uzbuđe postoje slični sustavi koji se općenito mogu pridijeliti jednoj od naznačenih vrsta.

Najvažnije karakteristike uzbuđnog sustava su brzina odziva i faktor forsiranja uzbuđe.

Brzina odziva uzbuđnika definirana je približno izrazom:

$$\frac{dU_u}{dt} = 0,632 \cdot \frac{U_{u\max} \cdot U_{un}}{U_{un} \cdot t}, \quad (3.113)$$

gdje je  $U_u$  napon uzbuđnika,  $U_{un}$  nazivni napon uzbuđnika,  $U_{u\max}$  maksimalni napon uzbuđnika i  $t$  vrijeme odziva.

Brzina odziva uzbuđnika ovisi o visini maksimalnog napona uzbuđnika, vremenskim konstantama uzbuđnog kruga uzbuđnika i vrsti sustava uzbuđe. Obično iznosi oko  $2U_{un}/s$  ili više.

Točnija definicija brzine odziva sustava uzbuđe određena je IEC preporukom (IEC 34-16-1/1991).

Brzina reguliranja napona sinkronog generatora ovisit će o brzini odziva uzbuđnika, brzini djelovanja regulatora i vremenskoj konstanti uzbuđnog kruga sinkronog generatora koja vrijedi za zadano prijelazno stanje.

Faktor forsiranja uzbuđe  $k_f$  određuje se prema izrazu:

$$k_f = \frac{U_{u\max}}{U_{un}} \quad (3.114)$$

i iznosi od 1,2 do 2. Veći faktor forsiranja uzbude zahtijeva skuplji uzбудnik, pa se upotrebljava samo u iznimnim prilikama.

### 3.3.1.1. Načelo rada sinkronoga generatora

Prema temeljnim zakonima elektrotehnike (točke 2.2.1., 2.2.2. i 2.2.3.), na kojima se zasniva i rad sinkronoga generatora, jasno je da je za pretvorbu energije u generatoru potrebno formirati magnetsko polje. Uobičajeno je govoriti o magnetskom polju (iako je to elektromagnetsko polje), zato što je akumulirana magnetska energija u generatoru znatno veća od akumulirane električne energije.

Formiranje magnetskog polja ostvaruje se protjecanjem struje kroz uzbudne namote (elektromagnet), tj. uzbuđom. Konstantnoj uzbuđi odgovara konstantna slika polja koje se ne mijenja s vremenom, a ako se mijenja struja, mijenja se i protjecanje  $\Theta$ , i to proporcionalno struji. Ako teče sinusna izmjenična struja kružne frekvencije  $\omega$ , mijenja se i protjecanje po istom zakonu. Zbog toga protjecanja mogu biti *mirujuća*, nastala istosmjernom strujom, *pulzirajuća*, nastala jednofaznom izmjeničnom strujom, i *rotirajuća*, nastala višefaznom, najčešće trofaznom, strujom u višefaznom (trofaznom) namotu.

Prostorna raspodjela protjecanja može biti sinusna, ali najčešće treba računati i s višim harmonicima neparnog reda jer su oni parnog reda zanemarivi zbog simetrične raspodjele namota po polovima.

Prema zakonu protjecanja (2.22), ako se zanemari magnetski pad napona u željezu, na nekom mjestu  $x$  oboda generatora vrijedi da je:

$$H_x \cdot \delta_x = \Theta_x. \quad (3.115)$$

Primjenom izraza (2.18) može se napisati da je jakost magnetskog polja:

$$H_x = \frac{B_x}{\mu_o}, \quad (3.116)$$

pa će indukcija na mjestu  $x$  biti:

$$B_x = \mu_o \cdot \frac{\Theta_x}{\delta_x}. \quad (3.117)$$

Ako je zračni raspor  $\delta$  jednolik, raspodjela indukcije dobiva se preslikavanjem raspodjele protjecanja. Ako se zračni raspor mijenja, mijenja se i indukcija obrnuto proporcionalno veličini zračnog raspora.

Uz istosmjernu uzbuđu dobit će se raspored indukcije u zračnom rasporu koji se ne mijenja. Vrti li se istosmjerno uzbuđeni rotor, vrtjet će se s njim i polje indukcije, koje se pri tom ne mijenja. Pri uzbuđi istosmjernom strujom koja je u vrtnji, svi se harmonici vrte istom kutnom brzinom.

Za razliku od toga, izmjenična uzbuđa dat će raspodjelu indukcije u zračnom rasporu koja pulzira. Kod simetrične višefazne izmjenične uzbude raspodjela indukcije u rasporu sadrži harmonike od kojih se svaki vrti vlastitom brzinom. To znači da će se oblik krivulje indukcije u zračnom rasporu mijenjati od trenutka do trenutka unatoč konstantnom zračnom rasporu i simetričnom višefaznom protjecanju.

Kroz uzbudni namot sinkronoga generatora uvijek se propušta istosmjerna struja, tako da svojim protjecanjem stvara magnetsko polje u generatoru prijeko potrebno za elektromagnetsku pretvorbu. Kad se rotor sinkronog generatorane vrti, u statorskom namotu ne inducira se napon, jer nema promjene magnetskog toka. Jednako tako, napon u statoru neće se inducirati ako se vrti neuzbudeni rotor, jer nema stvorenog magnetskog toka. Tek protokom istosmjerne (uzbudne) struje kroz uzbudni namot stvorit će se konstantno magnetsko polje (kojem tok miruje kad se rotor ne vrti). Vrtnjom rotora sinkronog generatora nekim pogonskim strojem (npr. turbinom, dizelskim motorom itd.) vrti se i magnetski tok polova koji presijeca vodiče statorskog (armaturnog) namota, u kojima se inducira izmjenični napon. Taj je napon karakteriziran oblikom, smjerom, frekvencijom i iznosom.

Sinkronim generatorima brzina je vrtnje u stacionarnom stanju konstantna pa će vremenska promjena induciranog napona u svakom vodiču odgovarati prostornoj raspodjeli indukcije u zračnom rasporu generatora. *Oblik induciranog napona* u armaturnom namotu sinkronoga generatora trebao bi biti *sinusni*. Da bi se to postiglo, potrebno je da se magnetska indukcija  $B$  u zračnom rasporu mijenja po zakonu sinusoida, što se može približno postići raznim oblicima polnih nastavaka, te određenom izvedbom armaturnog namota (npr. namot s većim brojem utora po polu i fazi). U slučaju nesinusnog induciranog napona, postoje viši harmonici koji su nepoželjni. Prema propisima, oblik napona na stezaljkama sinkronoga generatora ne smije odstupati više od  $\pm 5\%$  amplitude osnovnog (prvog) harmonika.

*Smjer* induciranog napona slijedi iz vektorskog produkta prema izrazu (2.13), ali se u strojevima obično taj smjer određuje pravilom desne ruke (točka 2.2.1.).

Srednja vrijednost indukcije na polnom koraku iznosi:

$$B_s = \frac{\Phi}{\tau_p \cdot l}, \quad (3.118)$$

gdje je  $\Phi$  magnetski tok,  $\tau_p$  polni korak, a  $l$  dužina stroja.

Ako se pretpostavi sinusna raspodjela polja u zračnom rasporu, vrijedit će izraz za srednju indukciju:

$$B_s = \frac{1}{\tau_p} \cdot \int_0^{\tau_p} B_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) \cdot dx = \frac{2}{\pi} \cdot B_m \quad (3.119)$$

tako da je maksimalna vrijednost indukcije s kojom treba računati inducirani napon:

$$B_m = \frac{\pi}{2} \cdot B_s = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Phi}{\tau_p \cdot l} \quad (3.120)$$

Brzina relativnog gibanja vodiča prema polju prikazuje se preko brzine vrtnje  $n$  ( $\text{r min}^{-1}$ ):

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2p \cdot \tau_p \cdot n}{60}, \quad (3.121)$$

gdje je  $D$  promjer rotora, a  $2p$  broj pari polova sinkronoga generatora.

Maksimalna vrijednost induciranog napona u vodiču je:

$$E_m = B_m \cdot l \cdot v = \pi \cdot \Phi \cdot \frac{p \cdot n}{60} = \pi \cdot \Phi \cdot f \quad (3.122)$$

Frekvencija  $f$  induciranog napona određena je izrazom:

$$f = p \cdot \frac{n}{60} \quad (3.123)$$

pa ako se želi dobiti frekvencija induciranog napona od 50 Hz, mora se rotor sinkronoga generatora vrtjeti točno određenom sinkronom brzinom vrtnje prema (3.110). U tablici 3.3.1. predočene su sinkrone brzine vrtnje pri frekvenciji od 50 Hz za razne brojeve pari polova.

Tabl. 3.3.1. Sinkrone brzine vrtnje rotora sinkronoga generatora pri frekvenciji od 50 Hz.

p	$n_s$ (r min <sup>-1</sup> )	p	$n_s$ (r min <sup>-1</sup> )
1	3000	8	375
2	1500	10	300
3	1000	12	250
4	750	16	187,5
5	600	20	150
6	500	24	125

Iznos induciranog napona  $E$  može se odrediti polazeći od izraza za inducirani napon u jednom vodiču (vidi točku 2.2.1.). Uzme li se u obzir broj zavoja, oblik, veličina i raspodjela namota u utorima i po obodu statora, inducirani napon jedne faze računa se po izrazu:

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N \cdot k_n, \quad (3.124)$$

gdje je  $\Phi$  magnetski tok,  $f$  frekvencija,  $N$  broj zavoja jedne faze i  $k_n$  faktor namota koji uzima u obzir oblik, veličinu i raspodjelu namota u utorima i po obodu statora sinkronog generatora.

### 3.3.1.2. Pogonska stanja sinkronoga generatora

Za sinkroni generator karakteristična su tri pogonska stanja: *prazni hod*, *opterećenje* i *kratki spoj*.

*Prazni hod* je takvo pogonsko stanje u kojem se rotor sinkronom generatoru vrti konstantnom brzinom vrtnje  $n_s$  ( $f = \text{konst.}$ ), uzbudna struja je takva iznosa da se inducira nazivni napon  $E = U_n$  a stezaljke armaturnog namota su otvorene (neopterećene trošilom), pa je armaturna struja jednaka nuli ( $I_a = 0$ ). Iz toga slijedi da *karakteristika praznog hoda*  $E = f(I_a)$  pokazuje ovisnost induciranog napona o uzbudnoj struji pri  $n_s = \text{konst.}$  i  $I_a = 0$ . Kad pogonski stroj pokreće sinkroni generator konstantnom brzinom vrtnje, a uzbudni je namot protjecan istosmjernom strujom, zbog čega se uzbuđuje glavni magnetski tok, u armaturnom namotu svake faze inducira se napon određen izrazom (3.124). Budući da su broj zavoja, faktor namota i frekvencija konstantne veličine, može se izraz (3.124) izraziti kao:

$$E = k \cdot \Phi, \quad (3.125)$$

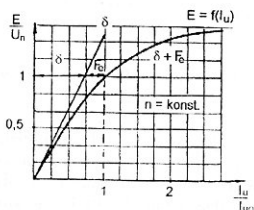


Glavni magnetski tok  $\Phi$  ovisan je o iznosu uzbudne struje  $I_u$ , broju zavoja uzbudnog namota, dimenzijama magnetskog kruga (zračnog raspora  $\delta$  i feromagnetskog materijala  $F_c$ ) te o magnetskim karakteristikama materijala. Za određenu izvedbu sinkronoga generatora broj zavoja uzbudnog namota je konstantan pa je krivulja magnetiziranja  $\Phi = f(I_u)$  određena karakteristikom magnetskog kruga. Prema tome, kako će se mijenjati promjenom uzbudne struje  $I_u$  magnetski tok  $\Phi$  u magnetskom krugu sinkronoga generatora, tako će se mijenjati u praznom hodu inducirani napon  $E$ . Dakle, krivulja magnetiziranja predstavlja u određenom mjerilu i krivulju inducirano napona.

Razne konstrukcijske izvedbe sinkronih generatora imaju i različite karakteristike magnetskog kruga, zbog čega mogu i karakteristike praznog hoda biti različite. Karakteristike praznog hoda u sinkronih generatora prikazane u dijagramu s relativnim jedinicama međusobno se neznatno razlikuju i odgovaraju nekoj srednjoj, tzv. normalnoj karakteristici. Na slici 3.3.14.a) vidi se normalna karakteristika praznog hoda koja u odgovarajućem mjerilu predstavlja i krivulju magnetiziranja. Budući da najveći dio protjecanja otpada na zračni raspor  $\delta$ , to se u području zasićenja željeza (do maks. 0,5 T) uzima samo ono u obzir, a zanemaruje se protjecanje za put magnetskih silnica kroz željezo. Ako se potpuno zanemari magnetski otpor željeza, tada je potrebna uzbudna struja određena pravcem  $\delta$ . Uzima li se u obzir i utjecaj magnetskog otpora željeza, uzbudna struja u praznom hodu  $I_{u0}$  određena je karakteristikom  $\delta + F_c$ . U tom slučaju za nazivni napon  $U_n$  ( $\frac{E}{U_n} = 1$ ) potrebna je uzbudna struja  $I_{u0}$  ( $\frac{I_u}{I_{u0}} = 1$ ).

Na slici 3.3.14. b) predložen je fazorski dijagram sinkronoga generatora u praznom hodu. U praznom hodu napon stezaljka jednak je inducirano naponu ( $U = E$ ), a struja uzbuće u praznom hodu  $I_{u0}$  prethodi tim naponima za  $90^\circ$ .

a)



b)

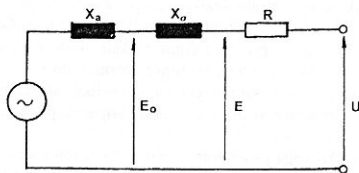


SI 3.3.14. Karakteristika praznog hoda a) i fazorski dijagram b) sinkronoga generatora u praznom hodu

Priključe li se simetrično raspoređena trošila na stezaljke statora u trofaznom sinkronom generatoru, koje su u praznom hodu bile otvorene, poteći će armaturnim namotom struja opterećenja  $I_r$ , zbog čega nastaju znatne promjene u odnosu prema praznom hodu. Struja opterećenja  $I_r$  izaziva u namotu armature padove napona pa je

napon na stezaljkama sinkronoga generatora manji od induciranog napona ( $U < E$ ). To pogonsko stanje zove se *opterećenje* trofaznog sinkronoga generatora.

Prilike u opterećenom sinkronom generatoru s cilindričnim rotorom mogu se prikazati nadomjesnom shemom prema slici 3.3.15.



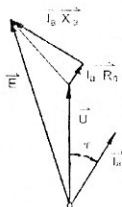
Sl. 3.3.15. Nadomjesna shema sinkronoga generatora sa cilindričnim rotorom

Napon  $E_0$  na slici 3.3.15. predstavlja onaj napon koji bi se inducirao u armaturnom namotu nakon rasterećenja sinkronoga generatora i kad bi karakteristika praznog hoda bila pravac. Taj inducirani napon stvarno je nešto manji zbog zasićenja. Vektorska razlika napona  $E_0$  i  $E$  predstavlja fiktivni pad napona izazvan djelovanjem reakcije armature koji odgovara reaktanciji reakcije armature  $X_a$ . Umjesto početne stvarne fizikalne slike dobiva se sada ekvivalentna slika prema kojoj primarna uzbuda inducira napon  $E_0$  u armaturi, a nakon oduzimanja pada napona  $I_a R_a$  zbog omskog otpora  $R_a$ , pada napona  $I_a X_a$  zbog reakcije armature i pada napona  $I_a X_o$  zbog rasipne reaktancije armaturnog namota dobiva se napon na stezaljkama generatora  $U$ .

Prema nadomjesnoj shemi može se pisati da je:

$$U + I_a R_a + I_a X_o = E, \quad (3.126)$$

a jer je sinkroni generator najčešće induktivno opterećen, pojednostavljeni fazorski dijagram za to opterećenje može se predočiti kao na slici 3.3.16.



Sl. 3.3.16. Fazorski dijagram opterećenog sinkronoga generatora

Umjesto reaktancija reakcije armature  $X_a$  i rasipne reaktancije  $X_\sigma$ , često se uzima njihov zbroj, tzv. *sinkrona reaktancija*:

$$X_s = X_a + X_\sigma. \quad (3.127)$$

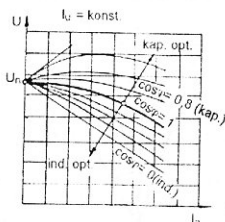
Reaktancije sinkronoga generatora (početna  $X_d'$ , prijelazna  $X_d''$  i sinkrona  $X_s$ ) uz snagu i napon imaju odlučujući utjecaj pri proračunima. Početna reaktancija je važna pri proračunu maksimalne struje kratkog spoja, a prijelazna i sinkrona pri proračunu trajne struje kratkog spoja te pri proračunu statičke i dinamičke stabilnosti. Prijelazna reaktancija je važna i pri proračunu maksimalnih padova napona u slučajevima kad se pokreću veliki trofazni asinkroni kavezni motori.

Jednako tako, u trofaznih sinkronih generatora velikih snaga pad napona u omskom otporu relativno je malen u odnosu prema rasipnom padu napona, pa se može zanemariti.

Sva razmatranja sinkronoga generatora s cilindričnim rotorom odnose se i na generatore koji imaju istaknute polove, ali zbog različitog magnetskog otpora u uzdužnoj i poprečnoj osi, treba armaturno protjecanje razložiti na uzdužnu i poprečnu komponentu. I u tom slučaju računa se sa sinkronom reaktancijom, ali s uzdužnom  $X_d$  i poprečnom  $X_q$ . Za detaljnija tumačenja upućujete se na [L 4, 14, 23].

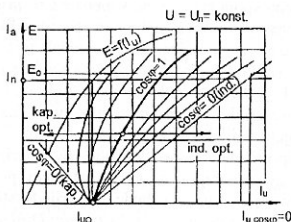
Da bi napon stezaljka  $U$  i za opterećeni sinkroni generator ostao nazivnog iznosa, mora se, ovisno o veličini opterećenja, mijenjati inducirani napon  $E$ . Na promjenu napona utječe osim spomenutih padova napona stezaljka opterećenog sinkronoga generatora i armaturni na uzbuđno protjecanje. Struja opterećenja stvara s armaturnim namotom protjecanje, odnosno armaturni magnetski tok koji djeluje na glavni magnetski tok stvoren uzbuđom, zbog čega se mijenja iznos inducirano napona  $E$ . Ta pojava poznata je kao *reakcija armature*.

Djelovanje reakcije armature pri opterećenju sinkronoga generatora ovisi o vrsti opterećenja. Pri čisto omskom opterećenju, pri kojemu je struja  $I_a$  u fazi s naponom stezaljka  $U$ , napon stezaljka  $U$  neznatno se mijenja s promjenom opterećenja. Pri induktivnom opterećenju taj napon se smanjuje, a pri kapacitivnom opterećenju raste. Utjecaj karaktera opterećenja je takav da uz sve veća induktivna opterećenja napon stezaljka  $U$  se smanjuje, a kod sve većih kapacitivnih opterećenja dolazi do njegova povećanja. Ovisnost napona stezaljka o struji opterećenja  $U = f(I_a)$  pri konstantnoj struji uzbuđbe ( $I_w$ ) i faktoru snage ( $\cos \varphi$ ) definira *vanjsku karakteristiku* sinkronog generatora. Na slici 3.3.17. predočene su vanjske karakteristike za razne faktore snage.



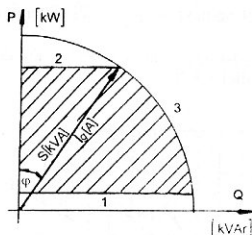
Sl. 3.3.17. Vanjske karakteristike sinkronoga generatora

Budući da sinkroni generator mora osigurati trošilu konstantni napon u svim opterećenjima, potrebno je promjenom uzbudne struje  $I_u$  mijenjati glavni magnetski tok  $\Phi$  tako da se inducira upravo takav napon  $E$  koji će davati konstantni napon stezaljka  $U$ . Potrebna uzbudna struja  $I_u$  za razne iznose struje opterećenja  $I_a$  i razne faktore snage  $\cos \varphi$  i konstantni napon stezaljki  $U$  može se odrediti računski, grafički ili mjerenjem, odnosno njihovom kombinacijom. Tu ovisnost pokazuju tzv. *regulacijske karakteristike*, kako je predočeno na slici 3.3.18. Na istoj slici predočena je i karakteristika praznog hoda, kako bi se još jednom upozorilo da je u tom pogonskom stanju sinkronoga generatora za nazivni napon  $U_n$  potrebna uzbudna struja  $I_{u0}$



Sl. 3.3.18. Regulacijske karakteristike sinkronoga generatora

Na temelju opisanog daje se zaključiti da sinkroni generatori napajaju električna trošila s djelatnom (kW) i jalovom (kVAR) snagom. To se redovito predstavlja dijagramom snage s ucrtanim ograničenjima dopuštenog trajnog rada, odnosno *pogonskom kartom*. Na slici 3.3.19. nacrtana je pojednostavnjena *pogonska karta sinkronoga generatora*.



Sl. 3.3.19. Pojednostavnjena pogonska karta sinkronoga generatora

Dopušteno područje trajnog rada sinkronoga generatora nalazi se unutar granica označenih na slici 3.3.19. slijedećim brojkama:

- 1 - maksimalna djelatna snaga ograničena pogonskim strojem,
- 2 - minimalna djelatna snaga ograničena pogonskim strojem,
- 3 - granica po maksimalnoj armaturnoj struji zbog pregrijavanja armaturnog namota sinkronoga generatora.

Pogonske karte realnih agregata (pogonski stroj sa sinkronim generatorom) imaju sličan oblik, ali se pri tom računaju i ograničenja radi zagrijanja rotora i zbog pogonskog stroja.

*Kratki spoj* sinkronoga generatora je posebno pogonsko stanje u kojem su stezaljke armaturnog (statorskog) namota međusobno kratko spojene kratkim vodovima velikog presjeka, a struje u kratko spojenoj armaturi mogu slobodno teći. Pri tome pogonski stroj vrti generator sinkronom brzinom, a generator je uzbuđen. Budući da u kratkom spoju nema zasićenja, struja kratkog spoja raste proporcionalno uzbudnoj struji pa je *karakteristika kratkog spoja*  $I_k = f(I_u)$  pravac.

Pod pojmom kratkog spoja misli se na *simetrični*, tj. *tropolni* (trofazni) kratki spoj trofaznog sinkronoga generatora u kojem su stezaljke armature U-V-W međusobno kratko spojene pa je napon između njih jednak nuli.

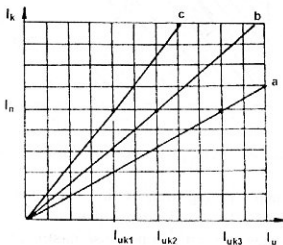
Osim simetričnog kratkog spoja postoje i *nesimetrični*: jednopolni, dvopolni i dvopolni sa zvjezdištem. U *jednopolnom* kratkom spoju kratko se spaja jedna faza sa zvjezdištem, u *dvopolnom* kratko se spajaju samo dvije faze, a u *dvopolnom sa zvjezdištem* kratko se spajaju dvije faze i zvjezdište.

Pokusi kratkog spoja generatora ostvaruju se najprije kratkim spajanjem odgovarajućih stezaljka generatora, a zatim zalijetanjem pogonskim strojem do sinkrone brzine, te podizanjem struje uzbuđe do vrijednosti kad struja dosegne nazivnu vrijednost. Ti kratki spojevi zovu se još i *trajnim kratkim spojevima*.

Struja trajnog trolnog kratkog spoja generatora ovisi obrnuto proporcionalno o asinkronoj reaktanciji, dvopolnog kratkog spoja osim o sinkronoj reaktanciji i o reaktanciji inverznog sustava protjecanja, a jednopolnog kratkog spoja i o nultoj reaktanciji.

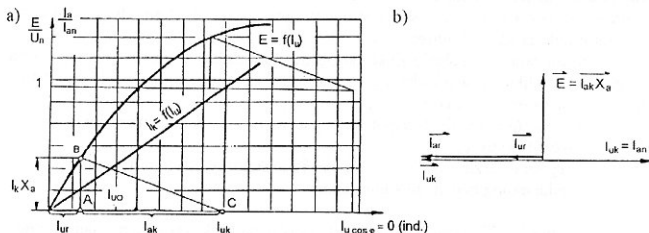
Osim trajnih krakih spojeva *udarni kraki spojevi* nastaju kvarovima u mreži. Ti kratki spojevi nastaju ako se već uzbuđeni stroj kartko spoji, što se rjeđe i ispituje, ali u pravilu sa sniženom uzbuđom. Početne struje i zakretni momenti kod udarnih kratkih spojeva znatno su veći od onih u trajnim kratkim spojevima. Proračun veličina struja udarnih kratkih spojeva mogu se naći u literaturi [17].

Karakteristike simetričnog i nesimetričnih kratkih spojeva sinkronoga generatora predočene su na slici 3.3.20.



Sl. 3.3.20. Karakteristike trolnog a), dvopolnog b) i jednopolnog c) kratkog spoja trofaznog sinkronoga generatora

Na slici 3.3.21. nacrtane su karakteristike praznog hoda i krakog spoja te fazorski dijagram kratkog spoja sinkronoga generatora. Na ordinati su nanesene relativne vrijednosti napona i struje, pri čemu vrijednost 1 predstavlja iznos pri nazivnim vrijednostima struje i napona.



Sl. 3.3.21. Karakteristika kratkog spoja i praznog hoda a) i fazorski dijagram kratkog spoja b) sinkronoga generatora

Iz slike 3.3.21.a) vidi se da je u praznom hodu za nazivni napon potrebna uzbudna struja  $I_{u0}$ , a u kratkom spoju, da bi tekla nazivna struja, potrebna je uzbudna struja  $I_{uk}$ .

Uzbudna struja  $I_{uk}$  sastavljena je od struje  $I_{ak}$  potrebne za poništenje djelovanja reakcije armature i struje  $I_{ur}$  koja inducira napon  $E$  što se potroši na rasipnom padu napona  $I_{ak} X_a$ . U tom je slučaju napon na stezaljka sinkronoga generatora nula ( $U = 0$ ), pa njegov fazorski dijagram kratkog spoja izgleda kao na slici 3.3.21. b)

Ti odnosi predočeni su i na slici 3.3.21. a). Ako se od uzbudne struje  $I_{uk}$  odbije struja reakcije armature  $I_{ak}$ , dobiva se u točki A iznos struje  $I_{ur}$  kojoj odgovara inducirani napon  $E$  određen točkom B na karakteristici praznog hoda. Veličina AB predstavlja rasipni pad napona, a veličina AC uzbudnu struju koja je potrebna da se kompenzira reakcija armature pri nazivnoj struji  $I_{an}$ . Spoji li se točka B i C, dobiva se tzv. *Potierov trokut*, koji karakterizira padove napona zbog reakcije armature i rasipne reaktancije pri nazivnoj struji i  $\cos \varphi = 0$  (ind.).

Ako se Potierov trokut premjesti na visinu nazivnog napona, kao što je to učinjeno na slici 3.3.20. a), dobiva se potrebna uzbudna struja  $I_{u \cos \varphi = 0 (\text{ind.})}$  za nazivnu struju  $I_{an}$  i nazivni napon stezaljka  $U_n$  u čisto induktivnom opterećenju ( $\cos \varphi = 0$ ).

S pomoću Potierova trokuta moguće je odrediti potrebnu uzbudnu struju za bilo koje opterećenje i dobiti regulacijske karakteristike predočene na slici 3.3.18.

U kratkom spoju sinkronog generatora struja  $I_a$  povećava se na opasnu vrijednost struje kratkog spoja  $I_{ak}$ . Dok proradi električna zaštita, rastuća struja kratkog spoja svojim magnetskim učinkom uzrokuje velike mehaničke sile - udarce. Ti mehanički udarci djeluju posebno na čelone spojeve namota, koji se zbog toga moraju dobro učvrstiti. Također, početnu struju kratkog spoja moguće je prigušiti velikom reaktancijom namota. Nakon početne struje kratkog spoja slijedi trajna struja kratkog spoja koja je nešto manja, ali ona svojim toplinskim učinkom može oštetiti namot ako se sinkroni generator na vrijeme ne odspoji od mreže.

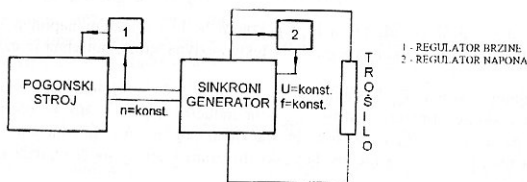
### 3.3.1.3. Samostalni rad sinkronoga generatora

Sinkroni generator može sam napajati grupu trošila kao jedini izvor električne energije. Svim tim trošilima on mora davati napon konstantnog iznosa i konstantne frekvencije bez obzira na vrstu i veličinu opterećenja. U tom slučaju sinkroni generator radi na *vlastitoj mreži*.

Promjenom opterećenja sinkronog generatora dolazi do promjene napona na njegovim stezaljkama, a također i do promjene frekvencije, odnosno brzine vrtnje rotora. U vezi s tim potrebno je:

- neprekidno regulirati napon stezaljka sinkronoga generatora mijenjajući uzbudnu struju;
- regulirati brzinu vrtnje tako da ona bude sinkrona, kako bi frekvencija inducirano napona bila konstantna.

Na slici 3.3.22. predložena je pojednostavnjena blokovska shema samostalnog rada sinkronoga generatora.



Sl. 3.3.22. Blokovska shema samostalnog rada sinkronoga generatora

U samostalnom radu sinkronoga generatora karakteristično je da faktor snage s kojim će raditi generator diktira trošilo. Faktor snage trošila može ovisiti o frekvenciji, a ponekad može biti i funkcija napona, što usložnjava proračun stacionarnih i prijelaznih stanja generatora u radu, pogotovo ako regulatori ne djeluju dovoljno točno pa promjene napona i frekvencije nisu zanemarive.

Sinkroni generator u prijelaznoj pojavi pri preuzimanju tereta mijenja brzinu vrtnje tako dugo dok se ne uspostavi ravnoteža mehaničkog i razvijenog elektromagnetskog momenta. Razvijeni elektromagnetski (zakretni) moment se može izračunati iz snage okretnog polja, tj. elektromagnetske snage koja preko zračnog raspora prelazi s rotora na stator:

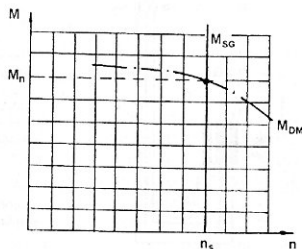
$$M = \frac{P_{em}}{\omega_m} = P_{em} \cdot \frac{P}{\omega} = P_{em} \cdot \frac{1}{\pi \cdot n} = 9,55 \cdot \frac{P_{em}}{n} \quad (3.128)$$

gdje je  $\omega_m$  (mehanička) kutna brzina,  $\omega$  kružna frekvencija, a  $n$  brzina vrtnje u okretajima u minuti ( $r \min^{-1}$ ).

Protumoment razvijenom elektromagnetskom momentu je, u stacionarnom stanju, pogonski moment pogonskog stroja. To je na brodu moment turbine, dizelskog motora ili osovine propelera koji pogone sinkroni generator. Veličina pogonskog momenta definirana je dotokom pare ili plina u turbinu, ili goriva u dizelski motor, a regulira se ugradnjom regulatora uz pogonski stroj. Na taj način

omogućen je rad sinkronoga generatora na vlastitu mrežu s približno konstantnom frekvencijom.

Vanjske karakteristike pogonskog stroja imaju različite oblike, a na slici 3.3.23. vide se karakteristike  $M = f(n)$  dizelskog motora (DM) i sinkronog generatora (SG).



Sl. 3.3.23. Karakteristike dizelskog motora i sinkronoga generatora

Sjecište karakteristika pogonskog momenta i elektromagnetskog momenta predstavlja *stacionarnu radnu točku generatora*. Ta točka na slici 3.3.23. nazivna je radna točka kao sjecište karakteristika dizelskog motora i sinkronoga generatora.

Porastom opterećenja sinkronoga generatora dolazi do pada napona  $U$  i pojačane reakcije armature, zbog čega je potreban regulator napona. Također, porastom opterećenja sinkronoga generatora javlja se veći kočni moment, zbog čega je potrebno pogonskim strojem dovoditi više mehaničke energije kako bi brzina vrtnje rotora ostala konstantna. U protivnom rotor bi se vrtio sporije, pa bi porastom opterećenja padala frekvencija inducirano napona  $E$ . Dovodjenje više mehaničke energije pogonskom stroju pri većem opterećenju sinkronoga generatora, tj. kad sinkroni generator daje više električne energije trošilu, odgovara osnovnom zakonu o pretvorbi i održanju energije. Zbog toga je potreban regulator brzine vrtnje koji će djelovati na pogonski stroj ovisno o opterećenju sinkronoga generatora.

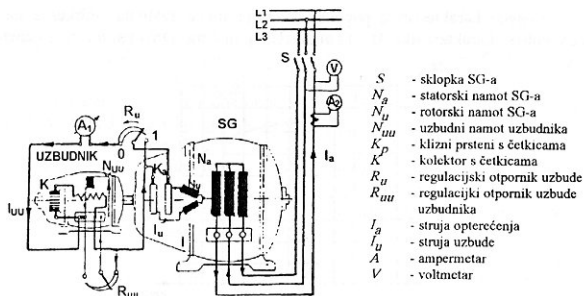
Sinkroni generator spaja se relativno lako na vlastitu mrežu (u kojoj ne radi drugi sinkroni generator) i na koju su spojena samo trošila. To se može opisati s pomoću slike 3.3.24. koja predstavlja načelni spoj trofaznog sinkronoga generatora s uzбудnikom i brodskom mrežom.

Početak spajanja trofaznog sinkronoga generatora s uzбудnikom na brodsku mrežu u kojoj ne radi drugi sinkroni generator počinje tako da se, uz otvorenu sklopku  $S$ , sinkroni generator zavrti bez uzbude, tj. bez uzbudne struje u uzбудnom namotu s pomoću pogonskog motora (npr. dizelskog motora koji nije nacrtan na slici 3.3.24.) do sinkrone brzine vrtnje. Nakon što se postigne sinkrona brzina vrtnje koja se mjeri brojiлом okretaja, a koja odgovara frekvenciji mreže (npr. 50 Hz), uključi se uzbuda (klizni kontakt otpornika  $R_u$  pomakne se iz točke 1 ulijevo); ampermetar  $A_f$  pokaže potrebnu uzbudnu struju, a voltmetar  $V$  traženi napon. Nakon toga se sinkroni generator priključi na brodsku mrežu s trošilima.

Ampermetar  $A_f$  pokazuje struju opterećenja  $I_f$  koja zahtijeva veći inducirani napon  $E$  sinkronog generatora, tj. veću uzbudnu struju  $I_{ur}$  da bi napon stezaljka  $U$  sinkronog generatora ostao konstantan, što se vidi na voltmetru  $V$ . Istodobno s



uzbudom mora se dodati pogonskom stroju pogonska energija da ne padne brzina vrtnje, a s tim i frekvencija izmjenične struje.



Sl. 3.3.24. Shema spoja trofaznoga sinkronoga generatora s uzбудnikom i brodskom mrežom

Ako se regulira uzbuđna struja tako da napon sinkronom generatoru bude konstantan u stacionarnim (i sporim prijelaznim) stanjima, a da je pri tome pogonski stroj nereguliran, promjenom opterećenja znatno će se mijenjati brzina vrtnje, odnosno frekvencija napona. Ta će promjena brzine vrtnje biti neznatna samo u slučaju čisto jalovog opterećenja koje ne zahtijeva djelatnu snagu. Svakom promjenom vanjskog djelatnog otpora trošilo zahtijeva novu djelatnu snagu, koju mu mora dati pogonski stroj. Ako se pogonski moment ne mijenja, mora se nakon prijelazne pojave uspostaviti novo stanje novom veličinom brzine vrtnje koja slijedi iz zakona o održanju energije i ravnoteže protjecanja.

Sinkroni generator spojen na mrežu još ne mora davati struju. On je u praznom hodu ako je inducirani napon jednak mrežnom naponu ( $E = U$ ). Da bi generator davao struju trošilima priključenim na brodsku mrežu, potrebno je *povisiti* inducirani napon  $E$  sinkronog generatora pojačanjem uzbuđne struje  $I_u$  (ne brzinom vrtnje koja je konstantna radi konstantne mrežne frekvencije). Pri opterećenju sinkronog generatora valja povećati i privedenu mu mehaničku snagu.

Sinkroni generator smije se trajno opteretiti nazivnom snagom (s određenim faktorom snage  $\cos \varphi$ ) označenom na natpisnoj pločici. Veće opterećenje i manji faktor snage  $\cos \varphi$  dovode do zagrijavanja armaturnog i uzbuđnog namota iznad dopuštene nadtemperature, zbog čega se može oštetiti izolacija namota.

#### 3.3.1.4. Paralelni rad sinkronih generatora

Na brodskoj mreži često rade dva ili više *paralelno spojena* sinkrona generatora, tako da su mrežni napon i frekvencija konstantni, a impedancija mreže praktički je zanemariva. Da bi se sinkroni generator mogao paralelno priključiti na

takvu mrežu (brodsku mrežu) mora se provesti određeni postupak tzv. *sinkronizacija*, tj. prije priključka tog sinkronoga generatora na mrežu na kojoj već radi jedan ili više sinkronih generatora treba postići:

1. jedanke iznose napona generatora i mrežnog napona, tj.  $E_G = U$ ;
2. jedanake frekvencije napona generatora i mrežnog napona, tj.  $f_G = f$ ;
3. jednake kutove napona generatora i mreže,  $\varphi_G = \varphi$ ;
4. isti redoslijed faza generatora i mreže.

Neispunjenje tih uvjeta može izazvati velike strujne udarce zbog čega zna doći do oštećenja sinkronog generatora i drugih elemenata brodskog postrojenja.

Prije priključka sinkronoga generatora na brodsku mrežu mora se generator pokrenuti vlastitim pogonskim strojem na približno sinkronu brzinu vrtnje (određenu frekvencijom mreže i brojem pari polova sinkronoga generatora). Nakon toga uzbuduje se generator dok napon njegovih stezaljka ne postigne vrijednost približno jednaku naponu brodske mreže, pa se provjerava redoslijed faza mreže i sinkronoga generatora (a ne istoimenost faza, kao što je potrebno pri paralelnom spajanju transformatora). Ta provjera može se obaviti posebnim instrumentom, tzv. *indikatorom redoslijeda faza*, ili npr. s pomoću smjera vrtnje malog *indukcijskog motora* priključenog na stezaljke sinkronom generatoru, odnosno brodske mreži (rotor motora mora se vrtjeti u obje prilike u istom smjeru!). Priključak sinkronoga generatora na brodsku mrežu valja izvesti kada je fazni pomak između istoimenih napona generatora i brodske mreže doveden na najmanju moguću mjeru.

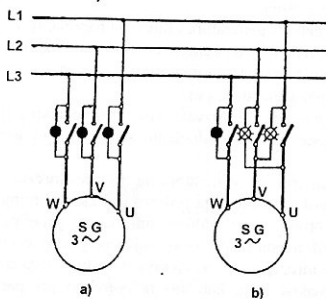
Da bi se utvrdilo jesu li ispunjeni svi uvjeti za paralelan rad, u uporabi su razne naprave za sinkronizaciju. Najjednostavnije su *sinkronizacijske žarulje*, koje u kombinaciji s voltmetrom često služe za ispitivanje na starijim tipovima brodova. U tom slučaju moguća su tri spoja: *tamni, svijetli i mješoviti spoj*. Takva sinkronizacija, je *ručna sinkronizacija*.

U sinkronizaciji trofaznog sinkronoga generatora koristeći se *tamnim spojem*, premesti se sklopka žaruljama kao što je predočeno na slici 3.3.25. a). Žarulje se moraju izraditi da izdrže dvostruki fazni napon. Tako dugo dok nema približne jednakosti napona generatora i napona brodske mreže, žarulje trajno svijetle. Uskladbom uzbudne struje sinkronoga generatora postiže se jednakost napona mreže i generatora, što se može kontrolirati voltmetrima. Pri jednakim iznosima napona, ali još nejednakih iznosa frekvencija, žarulje čas svijetle, a čas potamne u ritmu razlike frekvencija napona generatora i napona brodske mreže. Regulirajući brzinu vrtnje pogonskog stroja frekvencije se sve više izjednačuju, pa je paljenje i gašenje žarulja sporije, dok se konačno uz približno jednake frekvencije napona generatora i napona brodske mreže ne postigne tama kroz duži vremenski interval, u kojem je brzina ljudskih refleksa dostatna da se sklopkom uključi sinkroni generator na brodsku mrežu.

Ako se sve tri žarulje pale i gase istodobno, redoslijed je faza ispravan, a u protivnom redoslijed faza sinkronoga generatora i brodske mreže nije isti, pa je potrebno dva dovoda na sinkronom generatoru međusobno zamijeniti.

*Svijetli je spoj* za trofazni sinkroni generator neupotrebljiv jer maksimalna razlika napona nastupa  $60^\circ$  iza trenutka kad se naponi odgovarajućih faza poklapaju.

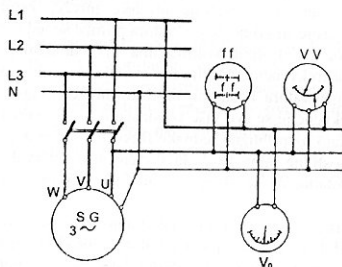
Napon između stezaljka (L1) i (V) u času kad se naponi poklapaju iznosi  $\sqrt{3} U_f$ , a nakon  $60^\circ$  taj napon iznosi  $2 U_f$ .



Sl. 3.3.25. Sinkronizacija s pomoću tamnog a) i mješovitog spoja b) sinkronizacijskih žarulja

Kod *mješovitog spoja* može se zaključiti vrti li se rotor sinkronoga generatora prebrzo ili presporo. Jedna žarulja priključena je kao u tamnog spoja, a dvije druge križno između dvije različite faze brodske mreže i generatora kako je predočeno na slici 3.3.25. b). Kad još nije postignuta jednakost frekvencija, sve žarulje redom tamne ili svijetle. Ako su žarulje postavljene u trokut, dobiva se dojam kao da se svjetlo vrti. Kad ono stane, postignuta je jednakost frekvencija. Žarulja priključena u tamnom spoju svijetli, a ostale dvije jako svijetle. U tom trenutku postignut je sinkronizam i sinkroni generator može se priključiti na brodsku mrežu.

Uz sinkronizacijske žarulje obično se na brodu rabe *instrumenti* za kontrolu napona i frekvencije. Na slici 3.3.26. predočen je načelni spoj uređaja za sinkronizaciju s pomoću instrumenata - tzv. uređaj za *poluautomatsku sinkronizaciju*.



Sl. 3.3.26. Načelni spoj uređaja za sinkronizaciju pomoću instrumenata

Kako se vidi na slici 3.3.26., frekvencija napona sinkronoga generatora i napona brodske mreže utvrđuje se s pomoću dvostrukog frekvencijometra, naponi se

kontroliraju dvostrukim voltmetrom, a nul-voltmetar (mora mjeriti više od dvostrukog faznog napona) služi da se utvrdi istofaznost napona sinkronoga generatora i napona brodske mreže. Nul-voltmetar ima u početku (u području malih napona) rastegnutu skalu, kako bi se mogla utvrditi i mala razlika napona između brodske mreže i napona generatora, zbog čega se priključuje između kontakata sklopke. U trenutku kada nul-voltmetar pokaže nulu, postignuta je istofaznost napona.

Uređaj prema slici 3.3.26. može se nadopuniti sinkronizacijskim žaruljama da se utvrdi premala ili prevelika brzina vrtnje rotora sinkronoga generatora na način kako je već objašnjeno.

Umjesto žarulja upotrebljava se *sinkronoskop s kazaljkom* koji u sebi sadrži nul-voltmetar. Taj sinkronoskop je mali sinkroni motor koji se priključuje između kontakata sklopke, i brzinom, ovisno o razlici frekvencija napona sinkronoga generatora i napona brodske mreže, okreće kazaljku koja pokazuje fazor napona sinkronoga generatora. Fazor napona brodske mreže miruje i stoji okomito prema gore. Kada kazaljka stane u položaju fazora napona brodske mreže, postignuta je istofaznost i može se sinkroni generator priključiti na brodsku mrežu. Prema smjeru vrtnje kazaljke može se zaključiti vrti li se rotor generatora prebrzo ili presporo. Oznaka na instrumentu upućuje osoblje kako treba djelovati na regulator pogonskog stroja.

Za provođenje opisanih postupaka sinkronizacije potrebno je određeno vrijeme. Za vrijeme većih kvarova u mreži, kad frekvencija mreže nije konstantna (mreža "se njiše"), to vrijeme raste. A upravo je tada važno brzo uključivanje rezervnog generatora u brodsku mrežu. Za takav se slučaj može primijeniti tzv. *gruba sinkronizacija*. To je ubrzani postupak uključivanja generatora na brodsku mrežu s jednostavnom opremom. Generator koji treba uključiti na brodsku mrežu zavrti se pogonskim strojem na brzinu vrtnje približnu sinkronoj (razlika do 2%), uključi se bez uzbude na mrežu i tada se uzbuđi. Elektromagnetski (sinkroni) moment koji se stvori nakon priključka uzbude povući će generator u sinkronizam.

Za vrijeme zaleta sinkronoga generatora i uključanja na mrežu, uzbudni namot mora se premostiti određenim otporom sa svrhom smanjenja inducirano napona na stezaljkama uzbudnog namota. U pravilu se gruba sinkronizacija rabi ako strunji udarac nije veći od  $3,5I_n$ . Osnovna je prednost tog načina sinkronizacije u brzini i jednostavnosti automatizacije.

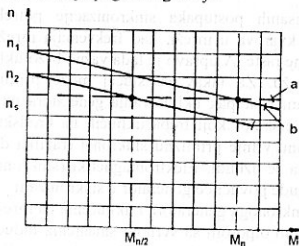
Suvremeni brodovi opremljeni su uređajima za *automatsku sinkronizaciju*. Njihovo djelovanje osigurava se jednostavnim pritiskom na tipku koja je smještena na glavnoj sklopnoj ploči u polju generatora. Ti automatski uređaji za sinkronizaciju zovu se *sinkronizatori*.

Nakon izvršene sinkronizacije sinkroni generator priključuje se sklopkom na brodsku mrežu. Samo s povećanjem uzbudne struje  $I_u$  ne raste napon stezaljka  $U$  tog generatora (raste samo inducirani napon  $E$ ) niti raste njegovo opterećenje (vatna komponenta struje ili djelatna snaga), već se postiže samo porast faznog pomaka  $\phi$  između napona stezaljka  $U$  i struje opterećenja  $I_n$  te i povećanje jalove komponente struje (fazni pomak  $\phi$  i faktor snage  $\cos \phi$  mijenjaju se i s vrstom opterećenja). Uz konstantnu vatnu komponentu struje povećana jalova komponenta struje uvjetuje povećanu rezultirajuću struju opterećenja  $I_n$ , zbog čega se namot, a s tim i cijeli sinkroni generator, zagrijava. Zato se na natpisnoj pločici sinkronoga generatora osim

djelatne snage (kW) navodi i prividna snaga (kVA) koju generator ne smije prekoračiti, da se namot ne pregrrije iznad dopuštene vrijednosti. Prividna snaga ne smije se prekoračiti i zato da sinkroni generator ne ispadne iz sinkronizma.

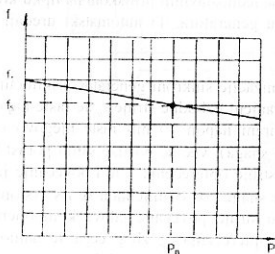
Valja dakle znati da se s povećanjem uzbudne struje  $I_p$  povećava samo jalova komponenta struje sinkronoga generatora, zbog čega se on *naduzbudu*. Treba li generator davati i struju opterećenja, tj. djelatnu, odnosno vatnu komponentu u brodsku mrežu, a s tim i povećati električnu snagu, mora se pogonskom stroju (npr. dizelskom motoru ili turbini) povećati mehanička snaga, a sinkroni generator istodobno jače uzbuditi. Ne mijenja li se mehanička snaga pogonskom stroju, ne mijenja se ni električna snaga sinkronom generatoru.

Kad sinkroni generator radi paralelno na mreži konstantne frekvencije, bit će mu i brzina vrtnje konstantna, pa je njegova momentna karakteristika  $n = f(M)$  pravac paralelan s apscisom, kako je crtkano (a) prikazano na slici 3.3.27. Na istoj slici ucrtane su i dvije karakteristike reguliranog pogonskog stroja (b) dobivene promjenom dovoda goriva pogonskom stroju. Iz te slike vidi se da se moment generatoru može mijenjati samo djelovanjem na pogonski stroj. To znači da se promjenom uzbuđe ne može mijenjati aktivna (djelatna) snaga jer se uzbuđom ne može djelovati na brzinu vrtnje pogonskog stroja.



Sl. 3.3.27. Momentna karakteristika sinkronoga generatora (a) i pogonskog stroja (b)

Često se linearizirano prikazuje i funkcija frekvencija - djelatna snaga generatora, kako se vidi na slici 3.3.28.



Sl. 3.3.28. Karakteristika frekvencija - snaga generatora

Sa like 3.3.28. može se odčitati nagib krivulje frekvencija - djelatna snaga generatora izražen u kW/Hz:

$$s_p = \frac{P_n}{f_{n1} - f_s} \quad (3.129)$$

gdje je  $P_n$  nazivna snaga,  $f_{n1}$  frekvencija neopterećenoga generatora, a  $f_s$  sinkrona frekvencija, tj. frekvencija pri nazivnom opterećenju.

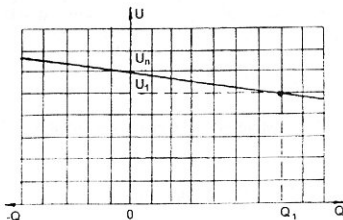
Generator sinkroniziran na mrežu predavat će mreži odgovarajuću električnu djelatnu snagu na taj način da se djelovanjem na regulator pogonskog stroja poveća njegov mehanički moment. Budući da je u početku trenutni električni protumoment jednak nuli, dolazi do poremećaja ravnoteže primljene i predane snage, zbog čega se brzina vrtnje rotora generatora na trenutak poveća. Kako brzina rotoru raste, raste i brzina okretnog polja uzbude u odnosu prema okretnom polju mreže, pa inducirani napon generatora prethodi mrežnom naponu. Između napona na stezaljkama  $U$  i induciranog napona  $E_o$  nastaje pad napona  $\Delta U$ . Kroz armaturni namot mora poteći struja koja zaostaje  $90^\circ$  za padom napona. Ta je struja praktički u fazi s naponom generatora, dakle djelatna struja, a generator pri tome razvija, u odnosu prema pogonskom stroju, kočni moment.

Promjena uzbude sinkronoga generatora djeluje samo na izmjenu jalove snage s mrežom za bilo koje pogonsko stanje, a ne samo za generator u praznom hodu. Povećanje uzbude djeluje tako da generator daje induktivnu, a smanjenje uzbude tako da daje kapacitivnu struju u mrežu. Promjenom uzbudne struje ne može se djelovati na pretvaranje energije.

Za regulirani sinkroni generator može se, prema slici 3.3.29., prikazati linearna ovisnost napona generatora o jalovoj snazi. Nagib krivulje napon - jalova snaga računa se iz jednadžbe pravca s te slike:

$$s_Q = \frac{Q_1}{U_n - U_1} \quad (3.130)$$

gdje je  $Q_1$  jalova snaga,  $U_n$  nazivni napon,  $U_1$  napon pri jalovoj snazi  $Q_1$ .



Sl. 3.3.29. Karakteristika napon - jalova snaga generatora

Opterećeni generator isključuje se automatski s brodske mreže (na suvremenim brodovima) s pomoću ARN, pa je nepotrebna intervencija posade. Međutim, na starijim brodovima opterećeni generator isključuje se s brodske mreže

(od ostalih sinkronih generatora) tako da mu se najprije postupno smanjuje uzbudna struja  $I_u$  odnosno inducirani napon  $E$  toliko da faktor snage  $\cos \varphi$  bude jednak jedinici ( $\cos \varphi = 1$ ) i istodobno se smanjuje mehanička energija pogonskom stroju. Na taj način postupno se smanjuje struja opterećenja sinkronoga generatora sve do minimuma ( $I_a \cong 0$ ), što pokazuje ampermetar  $A_2$  na slici 3.3.24. Pogonski stroj ima pri tome uvijek takvu brzinu vrtnje, da je frekvencija sinkronom generatoru jednaka frekvenciji brodske mreže (u obrnutom slučaju struja iz mreže tekla bi u sinkroni generator). Kad ampermetar  $A_2$  pokaže približnu vrijednost nula, moguće je generator sklopkom odvojiti od brodske mreže, isključiti regulacijski otpornik uzbuđene  $R_u$  (na slici 3.3.24.) i pogonski stroj.

Opisani način isključivanja sinkronoga generatora od brodske mreže izvodi se u slučaju kad se mreža rasterećuje. Treba li sinkroni generator *odteretiti ili isključiti od mreže uz nepromijenjeno opterećenje mreže* ( $I_a$  je konstantno) valja istodobno sa smanjenjem uzbuđene isključenog sinkronoga generatora ostale generatore naduzbuditi i povećati mehaničku energiju pogonskim strojevima. Struju koju ne daje isključeni sinkroni generator moraju dati ostali generatori koji rade paralelno.

Kvarovi koji zahtijevaju trenutna isključenja s brodske mreže čine skupinu nenormalnih pogonskih stanja u kojima dolazi do porasta napona generatora. Koliki je taj porast napona, može se odrediti iz krivulje praznog hoda. U praksi se obično grade generatori tako da porast napona pri rasterećenju ne prelazi 30% nazivnog napona, a Hrvatski registar brodova propisuje taj porast na 20% za slučaj nazivnog opterećenja.

### 3.3.1.5. Gubici i korisnost sinkronoga generatora

Pri pretvorbi mehaničke energije u električnu, u sinkronom generatoru nastaju gubici. Ti gubici mogu se podijeliti na osnovne i dodatne, odnosno na gubitke u statoru i gubitke u rotoru.

*Gubici u statoru* ( $P_{gs}$ ) sastoje se od gubitaka u bakru statorskog (armaturnog) namota ( $P_{Cus}$ ), gubitaka u željezu ( $P_{Fe}$ ) i dodatnih gubitaka ( $P_d$ ):

$$P_{gs} = P_{Cus} + P_{Fe} + P_d \quad (3.131)$$

*Gubici u rotoru* ( $P_{gr}$ ) sastoje se od mehaničkih gubitaka ( $P_{gm}$ ) i gubitaka uzbuđene ( $P_{gu}$ ):

$$P_{gr} = P_{gm} + P_{gu} \quad (3.132)$$

Gubici u željezu (nastali zbog pojave histereze i vrtložnih struja) i mehanički gubici (koji nastaju zbog trenja i ventilacije) ne ovise o opterećenju i dio su gubitaka praznog hoda ( $P_o$ ):

$$P_o = P_{Fe} + P_{gm} \quad (3.133)$$

Gubici u bakru i dodatni gubici nastaju tek pri opterećenju sinkronoga generatora i proporcionalni su kvadratu struje opterećenja. Ti gubici zovu se gubici opterećenja ( $P_{gd}$ ) sinkronoga generatora:

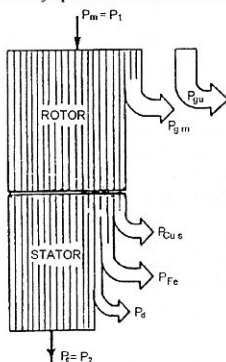
$$P_{gt} = P_{Cus} + P_d. \quad (3.134)$$

Gubici uzbude pojavljuju se i u praznom hodu i pri opterećenju sinkronoga generatora, a mijenjaju se s kvadratom promjene uzbudne struje ( $I_u$ ):

$$P_{gu} = I_u^2 R_u, \quad (3.135)$$

i pokrivaju se iz zasebnog izvora (osim kod samouzbudnih trofaznih sinkronih generatora) iz kojeg se napaja uzbudni namot.

Na osnovi definiranog od (3.131) do (3.135) daje se sastaviti bilanca snage sinkronoga generatora, kako je predočeno na slici 3.3.30.



Sl. 3.3.30. Bilanca snage sinkronoga generatora

Ukupni gubici sinkronoga generatora jednaki su:

$$P_g = P_{Cus} + P_{Fe} + P_d + P_{gm} + P_{gu}. \quad (3.136)$$

Mehanička snaga, tj. privedena snaga pogonskim strojem sinkronom generatoru, određuje se iz električne snage koju generator daje na svojim stezaljkama (koju je jednostavnije izmjeriti) i gubitaka, pa vrijedi:

$$P_m = P_1 = P_2 + P_g. \quad (3.137)$$

Električna snaga  $P_2$  koju sinkroni generator daje u mrežu iznosi:

$$P_2 = P_1 - P_g. \quad (3.138)$$



Korisnost  $\eta$  sinkronoga generatora računa se prema izrazu:

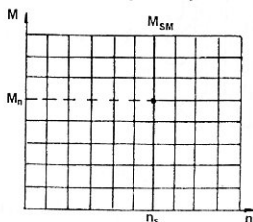
$$\eta = \frac{P_e}{P_m} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_g} = 1 - \frac{P_g}{P_2 + P_g}. \quad (3.139)$$

Budući da je električna snaga  $P_2$  ovisna o djelatnoj komponenti struje, a gubici zbog opterećenja ovise o prividnoj struji, očito je da će korisnost pri manjim faktorima snage  $\cos \varphi$  biti nepovoljnija. Korisnost  $\eta$  sinkronoga generatora ovisi o veličini nazivne snage, brzini vrtnje, tipu i konstrukciji, sustavu hlađenja i kvaliteti materijala, i iznosi od 95 do 99%.

### 3.3.2. Sinkroni motori

Kad se sinkroni stroj optereti velikim momentom, na osovini on prelazi u motorski rad. Rotor se i dalje vrti sinkronom brzinom vrtnje prema izrazu (3.100), ali u položaju koji je zaostao za položajem neopterećenog rotora za kut  $\delta$ , ovisno o momentu tereta. Takav se stroj zove *sinkroni motor*.

Budući da se brzina vrtnje motora ne mijenja s opterećenjem, tj. sve vrijednosti razvijenog momenta nastupaju pri istoj, sinkronoj, brzini vrtnje  $n_s$ , njegova momentna karakteristika  $M = f(\delta)$  izgleda kao na slici 3.3.31. Mijenja se samo položaj rotora definiran kutom opterećenja  $\delta$ .



Sl. 3.3.31. Momentna karakteristika sinkronog motora

Moment tereta ne smije dosegnuti maksimalnu vrijednost momenta  $M_{max}$  tzv. *moment ispadanja iz koraka*, pri kojem je  $\delta = \pi/2$ . U tom trenutku motor bi ispao iz sinkronizma.

Sinkroni motor treba iz stanja mirovanja dovesti do sinkrone brzine vrtnje i tada ga sinkronizirati na način kako je opisano za sinkrone generatore. Budući da se za pokretanje sinkronog motora ne može računati s pogonskim strojevima koji se rabe za okretanje sinkronih generatora, to će za njihovo pokretanje može poslužiti:

- pomoćni motor,
- jedan od načina sinkronog pokretanja i
- statički pretvarač frekvencije

*Pokretanje pomoćnim motorima* tzv. "pony" motorom najstariji je način pokretanja. Taj pomoćni motor koji je mehanički spojen sa sinkronim motorom, luži samo za zalet (najčešće mali asinkroni motor), ili se nakon izvršenog zaleta morot pretvara u generator uzbudne struje, tzv. uzbudnik (zalet s pomoću uzbude).

*Asinkrono pokretanje* ostvaruje se ako sinkroni motor ima posebni prigušni namot (kavez) na rotoru ili ugrađen u masivne polne nastavke. Postiže se priključkom sinkronog motora na mrežu:

- izravno (struja pokretanja je  $I_p = 4 \div 6 I_m$  a potezni moment  $M_p = 0,5 \div 1,0 M_n$ );
- preklopkom zvijezda-trokut ( $I_p = 1,5 \div 2 I_m$ ,  $M_p = 0,2 \div 0,5 M_n$ );
- preko otpornika (prigušnice) ( $I_p = 1,5 \div 2,5 I_m$ ,  $M_p = 0,1 M_n$ ) ili
- preko transformatora.

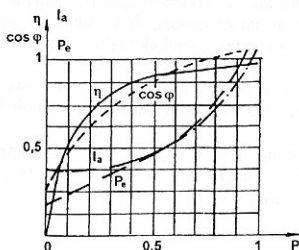
*Pokretanje statičkim pretvaračem frekvencije* je tzv. *sinkroni zalet* jer se ostvaruje pri vrlo niskim frekvencijama te se polako diže napon i frekvencija do nazivnih vrijednosti. To je skupo rješenje pa se uzima samo za velike sinkrone motore.

Za rad je sinkronog motora posebno važno da su napon i frekvencija konstantni. Ako mrežni napon nije nazivni, već se snižen, a frekvencija je nazivna, sinkroni će motor pri zadanom opterećenju imati smanjenu stabilnost zbog rada s povećanim kutom opterećenja, i veće zagrijavanje armaturnog namota zbog povećanih gubitaka u namotu. Također, ako prilike u mreži izazivaju promjenu frekvencije, te ako su nazivni napon, uzbudna struja i moment tereta sinkronog motora konstantni, tad će se neznatno mijenjati korisnost, a gubici trenja i ventilacije, te gubici u namotima rast će s porastom frekvencije, dok će gubici u željezu armature padati. Ukupni gubici u sinkronom motoru rast će s porastim frekvencije, ali pri tome raste i korisna snaga (uz konstantni moment). Znatnije promjene radnog režima sinkronog motora može izazvati moment opterećenja ovisan o brzini vrtnje, tj. povećanje frekvencije značajnije će smanjiti statičku preopterativost motora i povećati struju armature.

Prema propisima dopuštena je promjena napona od -5% do +10% (kao i u asinkronih motora) i frekvencije  $\pm 5\%$ , pri čemu motor mora trajno izdržati nazivno opterećenje.

Sinkroni motor iz mreže uzima samo *djelatnu* snagu da pokrije svoje gubitke i preda na osovinu snagu koju zahtijeva radni mehanizam. Ako radni mehanizam traži veću snagu, tad će automatski sinkroni motor iz mreže povući veću djelatnu snagu povećanjem kuta opterećenja  $\delta$ . *Jalovu* snagu sinkronog motora moguće je mijenjati neovisno o djelatnoj snazi. To se postiže promjenom uzbudne struje. Karakteristike generatora vezane uz jalovu snagu vrijede i za sinkroni motor (samo je kut opterećenja suprotnog predznaka).

Ocjena rada sinkronog motora pri raznim opterećenjima na osovini prikazuju se radnim karakteristikama uz zadanu konstantnu uzbudu, te uz konstantni napon i frekvenciju mreže kako se vidi na slici 3.3.32. Karakteristike pokazuju potrebnu djelatnu snagu  $P_c$  i struju armature  $I_a$  koju motor uzima iz mreže, faktor snage  $\cos \varphi$  i korisnost  $\eta$ , sve ovisno o korisnoj snazi  $P$  na osovini motora.



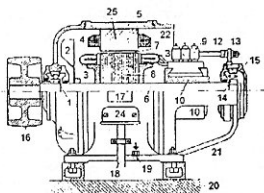
Sl. 3.3.32. Radne karakteristike sinkronog motora

Klasična primjena sinkronih motora je u pogonima gdje nije potrebno regulirati brzinu vrtnje niti se zahtijeva veći broj pokretanja i zaustavljanja. To su motor-generatorske grupe, zatim elektromotorni pogoni sa snažnim pumpama, ventilatorima, kompresorima, mlinovima i drobilicama. Početkom 70-ih godina sinkroni se motori rabe u reguliranim industrijskim postrojenjima jer je regulacija brzine vrtnje omogućena upotrebom energetske elektroničke pretvarača kojima se regulira frekvencija napajanja motora. Na brodovima su u uporabi mali sinkroni motori, a neki primjeri opisani su u točki 3.5.

### 3.4. Istosmjerni strojevi

Električni rotacijski strojevi kojima u vanjskom strujnom krugu teče istosmjerna struja zovu se *istosmjerni strojevi*. Mogu raditi reverzibilno, tj. kao *generatori* (na svojim stezaljkama daju istosmjerni napon) ili *motori* (na njihove stezaljke dovodi se istosmjerni napon).

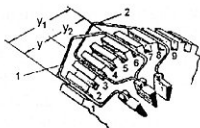
Istosmjerni strojevi po svojoj izvedbi slični su sinkronim strojevima. Razlika je u tomu što se uzbudni dio istosmjernom stroju nalazi na statoru, a armaturni na rotoru, dok je kod sinkronih strojeva to ređevito obratno. U armaturnom namotu teče izmjenična struja, pa istosmjerni strojevi moraju imati tzv. *kollektor* ili *komutator* koji omogućuje da istosmjerni generator daje na stezaljkama istosmjerni napon, odnosno da stezaljkama istosmjernog motora privedenu istosmjernu struju pretvori u izmjeničnu. Prema tome, istosmjerni strojevi imaju tri osnovna dijela: *stator s uzбудnim namotom* (ili kod manjih snaga s permanentnim magnetom), *rotor s armaturnim namotom* i *komutacijski sklop* (kollektor, držači četkica i četkice), kako je shematski prikazano na slici 3.4.1.



Sl. 3.4.1. Presjek istosmjernog stroja

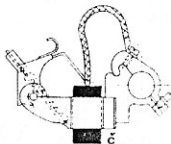
1-valjkasti ležaj, 2-ventilator, 3-namot armature, 4-bandaža, 5-kućište, 6-osovina, 7-zračni raspod, 8-armatura, 9-držači četkica, 10-kolektor, 11-lamela, 12-svornik držača četkica, 13-hvataljka držača, 14-kuglični ležaj, 15-vanjski ležajni štít, 16-remenica, 17-natpisna poločica, 18-priključak na brodsku mrežu, 19-matica za uzemljenje, 20-temelj, 21-ležajni štít, 22-uzbudni namot, 23-glavni pol, 24-priključna kutija.

Za razliku od sinkronih i asinkronih strojeva, istosmjerni strojevi imaju **kolektor** koji se izrađuje od lamela tvrdog elektrolitskog bakra. Na lamele kolektora priključeni su krajevi armaturnog namota, kako je shematski predočeno na slici 3.4.2.



Sl. 3.4.2. Shema spoja armaturnog namota i lamela kolektora istosmjernog stroja

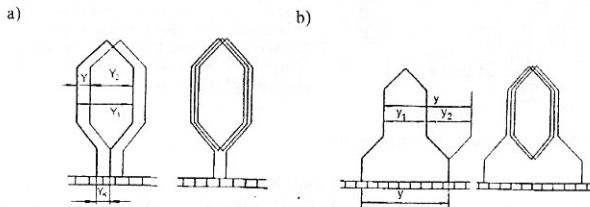
Lamele kolektora međusobno su izolirane (tinjcem, odnosno kolektorskim mikanitom), a također su izolirane i od osovine rotora. Kolektor se vrti zajedno s rotorom, a po lamelama kližu **četkice** preko kojih su istosmjerni strojevi spojeni na vanjski strujni krug. Četkice su smještene u **držače četkica** koji se moraju konstruirati tako da drže konstantni pritisak na četkice neovisno troše li se četkice pri radu više ili manje, kako je to na slici 3.4.3.



Sl. 3.4.3. Držač četkice s četkicom istosmjernog stroja

Kao i ostali električni strojevi tako i istosmjerni strojevi imaju konstrukcijske dijelove koji su sposobni da provode magnetske tokove (željezo, čelik ili dinamo lim) i dijelove koji su sposobni da provode električne struje (namot). O magnetskom krugu rečeno je u točki 2.4.1., a o namotima u točki 2.4.2. Valja napomenuti da se **uzbudni namot** istosmjernog stroja izvodi kao posebni izolirani svitak sa slobodnim krajevima

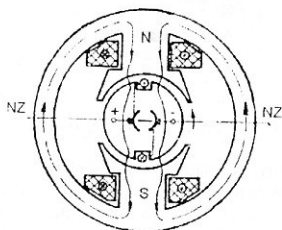
za priključak. Ti se svici postavljaju na svaki pol, a spajaju se redovito serijski, i to tako da je polaritet polova izmjeničan, tj. iza N-pola dolazi S-pol itd. *Armaturni namot* izvodi se kao *petljasti (paralelni)* ili *valoviti (serijski)*, kako je shematski predočeno na slici 3.4.4. Na toj slici  $y$  je korak namota (ukupni korak),  $y_1$  korak svička,  $y_2$  spojni korak, a  $y_k$  kolektorski korak (korak u lamelama).



Sl. 3.4.4. Petljasti a) i valoviti b) namot istosmjernog stroja

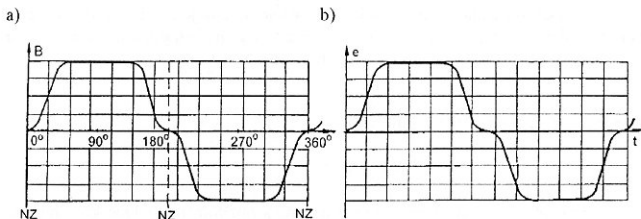
Svaki istosmjerni stroj ima dva električna strujna kruga: uzbudni, za stvaranje magnetskog toka, i armaturni, u kojem se inducira napon. Oni su međusobno povezani magnetskim tokom i omogućuju rad stroju. Na slici 3.4.5. shematski je dan presjek pojednostavnjenog dvopolnog istosmjernog stroja. Radi jednostavnosti, na armaturi nalazi se samo jedan svitak, kojemu su strane uložene u dva suprotna utora pod polovima N i S, a krajevi tog svitka spojeni su na kolektor koji je predočen s dva poluprstena s četkicama označenima s + i -. Četkice se nalaze u tzv. *neutralnoj zoni* (NZ), tj. na mjestu gdje je magnetska indukcija  $B$ , odnosno inducirani napon  $E$  jednak nuli.

Kad struja protječe kroz uzbudni namot ( $I_u$ ), stvara se magnetski tok  $\Phi$  koji se zatvara, kao što je silnicama predočeno na slici 3.4.5. Gustoća magnetskog toka, odnosno magnetska indukcija  $B$ , očito je da u zračnom rasporu tik uz obod rotora neće biti konstantna, nego će se mijenjati ovisno o magnetskoj vodljivosti. Neposredno pod polovima zračni raspor je malen, magnetska je vodljivost relativno velika, pa je magnetska indukcija maksimalna. U međupolnom prostoru zračni raspor postaje veći, magnetska vodljivost se smanjuje, a s tim se smanjuje i iznos magnetske indukcije. U NZ ona je jednaka nuli, a zatim opet, jer je stroj simetričan, raste po istom zakonu, samo je suprotnog predznaka.



Sl. 3.4.5. Shema presjeka pojednostavnjenog jedнопolnog istosmjernog stroja

Veličina magnetske indukcije, uz točno određene magnetske i konstrukcijske karakteristike stroja, određena je samo uzbuđnom strujom. Prostorni raspored magnetske indukcije u zračnom rasporu je oblika kao na slici 3.4.6 a).



Sl. 3.4.6. Oblik magnetske indukcije u zračnom rasporu a) i oblik induciranog napona b) istosmjernog stroja

Vrti li se rotor vanjskim pogonskim strojem konstantnom obodnom brzinom  $v$  u smjeru naznačenom na slici 3.4.5., u jednom vodiču dužine  $l$  inducirat će se napon  $E$  prema izrazu (2.14) jer smjer magnetskog polja i vodič zatvaraju pravi kut, a također je pravi kut između vektora brzine vrtnje i vodiča, odnosno magnetske indukcije. Budući da je  $l \cdot v$  konstantno, to je inducirani napon proporcionalan magnetskoj indukciji i mijenja se po istom zakonu po kojem se mijenja magnetska indukcija. Inducirani napon je izmjeničan, kako se vidi na slici 3.4.6 b).

Budući da je iznos magnetske indukcije, odnosno induciranog napona promjenljiv, iznos induciranog napona može se izračunati iz srednje vrijednosti, pa je:

$$E_s = B_s \cdot l \cdot v. \quad (3.140)$$

Srednja vrijednost magnetske indukcije  $B_s$  određuje se iz izraza

$$B_s = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{l \cdot \tau_p}, \quad (3.141)$$

gdje je  $\Phi$  glavni magnetski tok u zračnom rasporu između dvije NZ,  $l$  dužina vodiča, a  $\tau_p$  polni korak, odnosno udaljenost između dvije NZ. Uvrstivši (3.141) u (3.140) dobiva se:

$$E_s = \frac{\Phi}{\tau_p} \cdot v. \quad (3.142)$$

Ako se pretpostavi da je obodna brzina  $v$  konstantna, tada je:

$$v = D \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} = 2p \cdot \tau_p \cdot \frac{n}{60}, \quad (3.143)$$

gdje je  $D$  promjer rotora.

Uvrsti li se (3.143) u (3.142), dobiva se iznos induciranog napona za jedan vodič:

$$E_s = 2p \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi, \quad (3.144)$$

a budući da u jednom namotu ima  $z/2a$  vodiča spojenih u seriju, gdje je  $2a$  broj paralelnih grana, *inducirani napon* istosmjernog stroja je:

$$E = \frac{z}{2a} \cdot E_s = \frac{p}{a} \cdot \Phi \cdot n \cdot z. \quad (3.145)$$

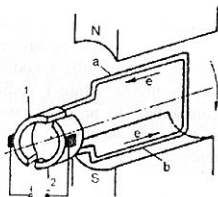
Za petljasti namot je  $a = p$ , a kod valovitog namota je  $a = 1$ . Budući da se za neki izgrađeni istosmjerni stroj  $p$ ,  $a$  i  $z$  ne mogu više mijenjati, oni ulaze u konstantu koja se zove *koeficijent inducirano napona*, pa će biti:

$$k_E = \frac{p}{a} \cdot \frac{z}{60}. \quad (3.146)$$

Uvrsti li se (3.146) u (3.145), dobiva se:

$$E = k_E \cdot \Phi \cdot n. \quad (3.147)$$

Promatra li se smjer inducirano napona s obzirom na četkice koje miruju, uočit će se da one dobivaju napon istog polariteta. Za to promatranje može poslužiti pojednostavnjena shema na slici 3.4.7.

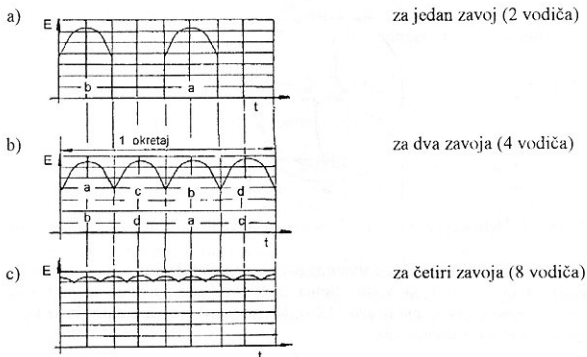


Sl. 3.4.7. Načelna shema spoja svitka (namota), lamele i četkice istosmjernog stroja

Dok ispod četkice klizi jedna lamela kolektora (na slici 3.4.7. označeno s 1), napon na četkici odgovara trenutnom naponu one strane svitka koja je vezana za tu lamelu (strana  $a$ ). Dolaskom svitka u NZ, odlazi lamela 1 ispod četkice i nailazi lamela 2, koja je spojena sa stranom svitka  $b$ . U tom trenutku četkica dobiva opet isti napon kao prije, jer se strana svitka  $b$  nalazi u istom polju u kojem se neposredno prije toga nalazila strana  $a$ . Rezultat toga je da se vremenska slika induciranih napona stalno ponavlja, kako je predočeno na slici 3.4.8. Taj je napon još uvijek pulzirajući, ali četkice dobivaju napon uvijek istog smjera. Prema tome, kolektor i četkice omogućuju pretvaranje izmjeničnog napona u istosmjerni. *Na taj način rade istosmjerni generatori.*

Dobiveni inducirani napon u promatranom istosmjernom stroju sa samo jednim svitkom jako je pulzirajući i daleko je od istosmjerne veličine. Da bi se smanjila pulzacija napona na stezaljkama, armaturni namot izvodi se s većim brojem utora (svitaka) po polu. U tom slučaju mora i kolektor imati odgovarajući broj lamela. Idealni istosmjerni napon dobio bi se uz beskonačni broj utora, što je nemoguće izvesti. Iskustvo pokazuje da se kod velikih istosmjernih strojeva već s brojem utora

po polu 8 - 10 postižu zadovoljavajući rezultati. Za manje istosmjerne strojeve dopuštena je nešto veća valovitost, pa se oni izrađuju i s manje od 8 utora po polu.



Sl. 3.4.8. Oblici iduciranog napona u vodičima za jedan okretaj rotora istosmjernog stroja

Iznos induciranog napona  $E$  različit je od napona  $U$  koji vlada na stezaljkama istosmjernog stroja. To je zbog toga što zbog opterećenja istosmjernog stroja teče kroz armaturni namot struja armature  $I_a$  koja izaziva pad napona u otporu armature  $R_a$  (uključeno i s drugim otporima koji su mu serijski spojeni), a također dolazi i do pada napona na četkicama  $\Delta U_c$  zbog prijelaznog otpora između četkica i kolektora.

Ako je napon na stezaljkama istosmjernog stroja manji od induciranog napona ( $U < E$ ), struja teče iz stroja i on radi kao *generator*. U tom je slučaju:

$$U = E - I_a R_a - \Delta U_c \quad (3.148)$$

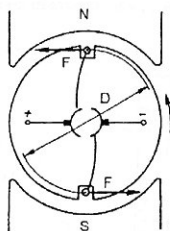
Ako napon na stezaljkama nadvladava inducirani napon ( $U > E$ ) struja teče u stroj i on radi kao *motor*. U toj prilici je:

$$U = E + I_a R_a + \Delta U_c \quad (3.149)$$

Kad je napon na stezaljkama jednak induciranom naponu ( $U = E$ ), postiže se granični slučaj, *idealni prazni hod*, i kroz stroj ne teče struja.

Kad istosmjerni stroj radi kao *motor*, tada je, uz pretpostavku jednake uzbude, prostorni raspored i veličina magnetske indukcije u zračnom raspore kao na slici 3.4.6. Narine li se pri mirujućem rotoru na + i - stezaljke istosmjerni napon, poteći će svitkom armature struja obratnog smjera od onoga na slici 3.4.5., odnosno u smjeru kako se vidi na slici 3.4.9.





Sl. 3.4.9. Definicija momenta jednog svitka istosmjernog stroja

Kad struja  $I_a$  protječe kroz armaturni namot koji se nalazi u polju magnetske indukcije  $B$ , javlja se sila  $F$  na vodič. Smjer djelovanja sile određuje se pravilom lijeve ruke, a njezin iznos prema izrazu (2.24). Na svaki od vodiča u utoru kroz koje teče struja jedne grane  $I$ , djeluje sila:

$$F_v = I_v \cdot l \cdot B_s = \frac{I_a}{2a} \cdot l \cdot B_s, \quad (3.150)$$

a na cijeli utor sila:

$$F_u = \frac{Z}{N} \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot l \cdot B_s. \quad (3.151)$$

Ako se uvrsti srednja vrijednost magnetske indukcije  $B_s$  ispod pojedinih utora jednog polnog koraka, dobit će se ukupna sila na obodu istosmjernog stroja:

$$F = \frac{p}{a} \cdot \frac{Z \cdot I_a \cdot \Phi}{D \cdot \pi}. \quad (3.152)$$

Ukupni razvijeni moment iznositi će:

$$M = F \cdot \frac{D}{2} = \frac{p}{a} \cdot \frac{Z \cdot I_a \cdot \Phi}{2\pi}. \quad (3.153)$$

Vrijednosti koje se ne mijenjaju pri radu istosmjernog stroja mogu se obuhvatiti jednim *koeffcijentom momenta*:

$$k_M = \frac{p}{a} \cdot \frac{Z}{2\pi}, \quad (3.154)$$

pa je *moment* koji razvija istosmjerni stroj:

$$M = k_M \cdot I_a \cdot \Phi. \quad (3.155)$$

Okretni moment zavrtjet će rotor u smjeru strelice na slici 3.4.9. Kad se vodiči približuju NZ, magnetska indukcija opada i u samoj NZ ona postaje jednaka nuli, a prema (3.155) i okretni moment u NZ jednak je nuli. Ipak, zbog inercije rotor se tu neće zaustaviti, već će nastaviti vrtnju, a vodiči dolaze u magnetsko polje suprotnog smjera. Budući da se istodobno promijenimo i smjer struje u svitku, jer su istodobno pod četkice došle druge lamele, to je smjer obodne sile i okretnog momenta ostao nepromijenjen i rotor će se dalje vrtjeti. I u ovom slučaju vidi se da kolektor i četkica omogućuju da istosmjerni stroj radi kao motor.

Kao što se inducira napon u istosmjernom stroju bez obzira radi li kao generator ili motor, tako se javlja i moment bez obzira na njegovo područje rada. Pri *generatorskom radu* razvijeni *moment je negativan*, tj. protivi se vanjskom momentu koji pokreće generator i uvijek je manji od njega, a u *motorskom radu* je *pozitivan*, tj. djeluje u smjeru vrtnje. *U idealnom praznom hodu moment je jednak nuli.*

Definicije pogonskih stanja električnih strojeva, opisane u točki 2.6., mogu se primijeniti i za istosmjerne strojeve. Pri tome se mora, kod istosmjernog stroja, dodatno protumačiti pogonsko stanje opterećenja.

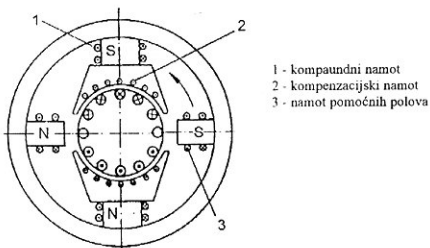
Otpetiti li se istosmjerni stroj bilo da uzima iz armaturnog namota neku struju  $I_a$  (generatorski pogon), bilo dovođenjem struje armaturi (motorski pogon), pojavit će se djelovanje magnetskog polja proizvedeno tom strujom. Armaturna struja protokom kroz zavoje armaturnog namota stvara novo magnetsko polje (*poprečno polje*) kojega nije bilo u praznom hodu. Budući da se to magnetsko polje javlja u prostoru u kojem već postoji magnetsko polje stvoreno uzbudnom strujom (*uzdužno polje*), kao rezultat nastaje zajedničko (*rezultirajuće*) polje. To djelovanje magnetskog polja armature na magnetsko polje stvoreno uzbudom (magneta) zove se *reakcija armature*.

Reakcija armature uvjetuje da polje više nije homogeno razdijeljeno na površini magnetskog pola i u zračnom rasporu, pomaknula se NZ iz prijašnjeg položaja za neki kut, smanjio se iznos induciranog napona, a između četkica i lamela kolektora pojavljuje se povećano iskrenje (pogoršala se *komutacija* istosmjernog stroja).

*Komutacija* je promjena polariteta induciranog napona svitka (ako istosmjerni stroj radi u praznom hodu), odnosno struje (ako je opterećen) pri protoku struje kroz NZ. U trenutku prolaska lamele kolektora pod četkicom mijenja se smjer struje u svitku koji se nalazi u kratkom spoju. Za vrijeme dok je svitak kratko spojen, tj. dok četkica pokriva odgovarajuću/e lamelu/e, mora se promjenljiva struja  $i$  kratkospojenog svitka u vrlo kratko vrijeme kratkog spoja promijeniti od iznosa  $+I_a$  na iznos  $-I_a$ . Ako se ta promjena ne bi dospjela obaviti za vrijeme kratkog spoja, tada bi, kod potpunog prijelaza četkice na sljedeću lamelu, morala nastati vrlo nagla promjena struje u svitku koja može izazvati visoke napone indukcije (samoindukcije), a s tim i jako iskrenje između lamele i četkice. Iskrenje može oštetiti kolektor, a pri jačim električnim lukovima može se potpuno onesposobiti istosmjerni stroj.

Osim električnih razloga iskrenje između četkice i kolektora mogu izazvati neokruglost i istrošenost kolektora, prašina, nečistoće ili loša atmosfera u kojoj istosmjerni stroj radi, loša kvaliteta materijala četkice, slab pritisak pritisakivača držača četkice na četkicu itd.

Radi smanjenja djelovanja reakcije armature i poboljšanja komutacije (smanjilo se iskrenje između četkice i kolektora, jer se iskrenje ne može potpuno poništiti) koristi se različitim postupcima: pomak četkice u NZ, promjena kvalitete materijala četkice, konstrukcijska poboljšanja komutacijskog sklopa, ugradnja kompaundnog i kompenzacijskog namota te namot pomoćnih polova. Načelni raspored tih namota istosmjernog stroja bio bi kao na slici 3.4.10.



Sl. 3.4.10. Načelni raspored pomoćnih namota istosmjernog stroja

*Kompaundni namot* postavlja se na glavne polove uz uzbudni namot, a spaja se između četkica i stezaljka istosmjernog stroja, tako da kroz njega teče struja  $I_a$  u istom smjeru kao i uzbudna struja. Zbog toga je zadaća tom namotu da nadoknadi smanjenje inducirano napona nastalog reakcijom armature. Upotrebljava se u manjim i srednjim strojevima.

*Kompenzacijski namot* postavlja se u utoke u polnim nastavcima glavnih polova, a spaja se također između četkica i stezaljka istosmjernog stroja, tako da kroz njega teče  $I_a$ , ali smjera suprotnoga onomu u armaturnom namotu. Zadaća je toga namota da poništi poprečno polje armature (osim u međupolnom prostoru), tj. da smanji inducirani napon i pomak NZ. Zbog visoke cijene rabii se samo u velikim istosmjernim strojevima s čestim kratkotrajnim preopterećenjem.

*Namot pomoćnih polova* postavlja se na pomoćne polove koji se nalaze u NZ, a kroz njega protječe  $I_a$ . Obično se izvodi zajedno s kompenzacijskim namotom kao jedan namot, tj. namot pomoćnih polova poništava poprečno polje armature u međupolnom prostoru. Pomoćni pol s namotom pomoćnih polova često se ugrađuje u istosjerne strojeve.

Problem komutacije istosmjernog stroja vrlo je složen, pa se za dodatna tumačenja upućujete na [L 7].

Za uzбудu glavnog magnetskog polja i međusobno spajanje uzbudnog i armaturnog kruga ima više mogućnosti. Tako uzbudu istosmjernom stroju može osigurati permanentni magnet (rijetko) ili elektromagnet (redovito). Najstariji je način uzbuđivanja istosmjernog stroja s pomoću strane ili neovisne uzbuđbe, tj. uzbudna struja  $I_u$  dobiva se iz nekog posebnog istosmjernog izvora. Uzbudni strujni krug neovisan je o armaturnom strujnom krugu, što je velika prednost te vrste uzbuđbe. Istosmjerni strojevi s takvom uzbuđbom zovu se *neovisno uzbuđeni*.

Za razliku od neovisne uzbuđbe, ovisna ili vlastita uzbuđba je takva u koje je uzbudni namot tako spojen da u generatorskom radu struja istosmjernog stroja osim trošila napaja i uzbudni namot, odnosno u motorskom radu privedena struja napaja i armaturni i uzbudni namot. Istosmjerni strojevi s tako spojenim namotom zovu se *ovisno uzbuđeni*.

Prema spoju uzbuđnog i armaturnog namota vlastita uzbuda može biti serijska, paralelna ili složena (kompaundna), pa su na temelju toga istosmjerni strojevi dobili ime.

*Serijska uzbuda* je takva da su armaturni i uzbuđni namot (malo zavoja debele žice) spojeni serijski (*serijski* istosmjerni stroj), *paralelna uzbuda* je takva da je uzbuđni namot (puno zavoja tanke žice) spojen paralelno armaturnom (*paralelni* istosmjerni stroj), a *složena (mješovita, kompaundna) uzbuda* je takva da postoje dva uzbuđna namota: jedan je spojen serijski, a drugi paralelno armaturnom namotu (*kompaundni* istosmjerni stroj).

U spojnim shemama označuju se stezaljke namota istosmjernog stroja, mrežni vodovi i polariteti, stezaljke regulatora i uputnika, te oznake smjera vrtnje. Tako se armatura označuje krugom, ravna strjelica u krugu označuje smjer armaturne struje  $I_a$ , ili smjer induciranog napona  $E$ , a zakrivljena strjelica označuje smjer vrtnje rotora. Desnim smjerom vrtnje zove se vrtnja u smjeru kazaljke na satu, gledano s pogonskog kraja vratila, i to u generatora sa strane pogonskog stroja, a u motora sa strane pogonjenog stroja. Desnom smjeru vrtnje odgovara isti smjer napona.

Stezaljke pojedinih namota (prema JUS N.G0.010) označuju se velikim slovima:

- namot armature (rotora)	A
- namot pomoćnog pola	B
- kompenzacijski namot	C
- serijski namot	D
- paralelni namot	E
- neovisno uzbuđeni namot	F

Početak namota ima indeks 1, a svršetak namota indeks 2.

Mrežni vodovi i polariteti označuju se:

- pozitivni vodič	P
- negativni vodič	N
- pozitivni pol	+
- negativni pol	-

Stezaljke regulatora označuju se, za priključak na:

- paralelni namot	s
- rotor ili mrežu	r
- rotor ili mrežu za kratko spajanje paralelnog namota	q

a stezaljke uputnika, za priključak na:

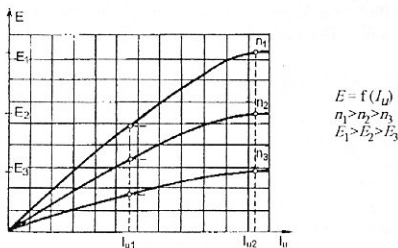
- mrežu	L
- rotor	R
- paralelni namot	M

### 3.4.1. Istosmjerni generatori

Rad istosmjernih generatora karakterizira:

- iznos inducirano napona  $E$  određen izrazom (3.147),
- iznos napona stezaljki  $U$  određen izrazom (3.148),
- karakteristika praznog hoda,
- karakteristika opterećenja,
- unutarnja karakteristika,
- vanjska karakteristika.

*Karakteristika praznog hoda* određuje inducirani napon  $E$  pri bilo kojim brzinama vrtnje i bilo kojeg iznosa uzbudne struje  $I_u$  tj.  $E = f(I_u)$  uz  $n = \text{konst.}$ , a kako je predočeno na slici 3.4.11. Ako se povećava brzina vrtnje ( $n_1 > n_2 > n_3$ ), raste inducirani napon ( $E_1 > E_2 > E_3$ ).



Sl. 3.4.11. Karakteristika praznog hoda istosmjernoga generatora

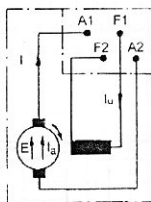
*Karakteristika opterećenja* predočava ovisnost napona stezaljka  $U$  o uzbudnoj struji  $I_u$  pri konstantnij struji opterećenja  $I$ , tj.  $U = f(I_u)$ ,  $I = \text{konst.}$

*Karakteristike opterećenja također su unutarnja i vanjska karakteristika. Unutarnja karakteristika* predočuje ovisnost inducirano napona  $E$  o struji opterećenja  $I$  pri konstantnoj brzini  $n$ , tj.  $E = f(I)$ ,  $n = \text{konst.}$ , a *vanjska karakteristika* ovisnost napona stezaljka  $U$  o struji opterećenja  $I$  pri konstantnoj brzini vrtnje  $n$ , tj.  $U = f(I)$ ,  $n = \text{konst.}$

Vanjske karakteristike međusobno se razlikuju u različito uzbudnim istosmjernim generatorima, a karakteriziraju njihovu glavnu veličinu - napon stezaljki  $U$ .

#### 3.4.1.1. Neovisno uzbudeni generator

Načelna spojna shema neovisno uzbudenog istosmjernoga generatora (bez namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota) predočena je na slici 3.4.12.

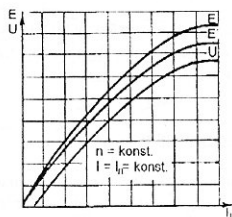


Sl. 3.4.12. Načelna spojna shema neovisno uzbuđenog istosmjernoga generatora

Na slici 3.4.13. vide se karakteristike praznog hoda i opterećenja. Karakteristika praznog hoda predložena je krivuljom  $E$ . Pri opterećenju generatora poteći će struja opterećenja ( $I = I_a = I_n$ ), a zbog reakcije armature smanjit će se inducirani napon (krivulja  $E'$ ). Protokom struje armature stvara se pad napona na armaturi:

$$\Delta U = I_a R_a + \Delta U_c, \quad (3.156)$$

zbog čega napon na stezaljkama postaje manji (krivulja  $U$ ). Napon praznog hoda je funkcija brzine vrtnje  $n$  i uzbuđne struje  $I_f$  tj.  $E = f(n, I_f)$ .



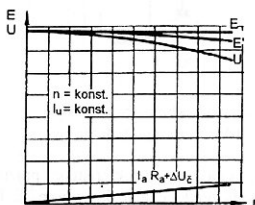
Sl. 3.4.13. Karakteristika praznog hoda i opterećenja neovisno uzbuđenog istosmjernoga generatora

Unutarnja i vanjska karakteristika neovisno uzbuđenog istosmjernoga generatora vidi se na slici 3.4.14. Unutarnja karakteristika za slučaj kompenzirane reakcije armature predložena je krivuljom  $E$ . Vidi se da je inducirani napon  $E$  konstantan bez obzira na iznos struje opterećenja. Ako reakcija armature nije kompenzirana, tada će inducirani napon padati s porastom opterećenja (krivulja  $E'$ ).

Ako se od unutarnje karakteristike odbije pad napona na armaturi (prema (3.156), dobiva se vanjska karakteristika predložena krivuljom  $U$  na slici 3.4.1. (i to za uvjete djelovanja reakcije armature), a iznos je napona na stezaljkama jednak (prema izrazu (3.148):

$$U = E - I_a R_a - \Delta U_c. \quad (3.157)$$

Budući da je relativno mali otpor armature, iznos pada napona i pri velikim strujama opterećenja nije značajan pa vanjska karakteristika blago pada. Takva je *karakteristika tvrda*, tj. napon stezaljka mijenja se neznatno s promjenom opterećenja. Tvrda vanjska karakteristika i neovisna uzbuda razlog su da taj generator ima vrlo veliku struju kratkog spoja.



Sl. 3.4.14. Unutarnja i vanjska karakteristika neovisno uzbuđenog istosmjernoga generatora

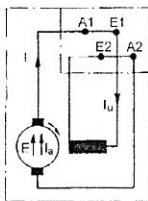
Na temelju rečenog osnovna su obilježja neovisno uzbuđenog istosmjernog generatora:

- napon na stezaljkama  $U$  neznatno pada pri porastu struje  $I$ ,
- napon na stezaljkama  $U$  regulira se pomoću  $n$  i  $I_u$  i
- nije siguran na kratki spoj.

Ta obilježja omogućuju da neovisno uzbuđeni istosmjerni generator posluži kao istosmjerni izvor za nužno napajanje ili pomoćni uzбудnik (trajnom uzbudom) sinkronih generatora na brodu.

### 3.4.1.2. Paralelno uzbuđeni generator

Načelna spojna shema paralelno uzbuđenog istosmjernog generatora (bez namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota) vidi se na slici 3.4.15.



Sl. 3.4.15. Načelna spojna shema paralelno uzbuđenog istosmjernoga generatora

Ako se zanemari utjecaj reakcije armature, tada za paralelni istosmjerni generator vrijedi:

$$I_a = I + I_u. \quad (3.158)$$

Povećanjem struje opterećenja  $I$  povećava se i armaturna struja  $I_a$ , a s tim i pad napona, pa se smanjuje napon na stezaljkama:

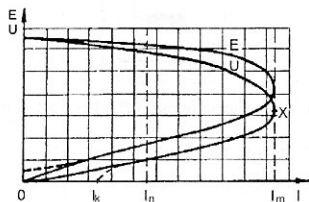
$$U = \frac{E - I_a R_a - \Delta U_c}{1 + \frac{R_a}{R_u}}, \quad (3.159)$$

gdje je  $R_u$  otpor uzbudnog namota.

Manji napon stezaljka  $U$  daje manju uzбудnu  $I_u$  struju jer je ona određena izrazom:

$$I_u = \frac{U}{R_u}. \quad (3.160)$$

Manja uzbudna struja  $I_u$  stvara manji magnetski tok  $\Phi$ , zbog čega se smanjuje inducirani napon  $E$ , što uvjetuje smanjenje napona  $U$ . To izaziva daljnje smanjenje  $I_u$ , smanjenje  $\Phi$  i  $E$ , itd., sve dok se ne uspostavi stacionarno stanje koje odgovara trenutnom opterećenju. Zbog toga su unutarnja i vanjska karakteristika padajuće, kako je predočeno na slici 3.4.16.



Sl. 3.4.16. Unutarnja i vanjska karakteristika paralelnog istosmjernoga generatora

Kako se na slici 3.4.16. može uočiti, s porastom opterećenja vanjska karakteristika postaje sve strmija i u točki X krivulje postiže se maksimalna vrijednost struje  $I$ . Ako se trošila i dalje priključuju, struja  $I$  više ne raste, nego pada, jer su  $U$  i  $I_u$  već jako mali. U kratkom spoju je  $U = 0$  i  $I_u = 0$ , pa je zbog toga  $\Phi = 0$ , odnosno struja kratkog spoja jednaka je nuli ( $I_k = 0$ ). Ipak, zbog remanentnog magnetizma ( $E_r$ ) i u kratkom spoju teče struja  $I_k$  (crtkano predočeno na slici 3.4.16.), ali je ona znatno manja od maksimalno moguće struje  $I_m$ .

Vanjska je karakteristika paralelnog istosmjernoga generatora vrlo tvrda u početnom dijelu (približno do nazivne vrijednosti struje  $I_n$ ) pa se taj generator može dobro iskoristiti. Pri tome valja znati da se najbolje uzbuđuje u praznom hodu, a napon praznog hoda funkcija je brzine vrtnje  $n$  i uzbudne struje  $I_u$ , tj.  $F = f(n, I_u)$ .



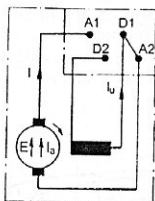
Na temelju rečenog osnovna su obilježja paralelno uzbuđenog istosmjernoga generatora:

- napon na stezaljkama  $U$  neznatno pada pri porastu struje opterećenja do  $I = I_r$
- napon na stezaljkama  $U$  regulira se spomoću  $n$  i  $I_r$
- siguran je na kratki spoj.

Ta obilježja omogućuju da se paralelno uzbuđenim istosmjernim generatorima može koristiti kao istosmjernim izvorima za nužno napajanje, glavni uzбудnik sinkronih generatora ili kao izvor za pojedinačna trošila na brodu.

### 3.4.1.3. Serijski uzbuđeni generator

Načelna spojna shema serijski uzbuđenog istosmjernoga generatora (bez namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota) vidi se na slici 3.4.17.



Sl. 3.4.17. Načelna spojna shema serijski uzbuđenog istosmjernoga generatora

Ako se zanemari utjecaj reakcije armature, tada za serijski istosmjerni generator vrijedi:

$$I = I_a = I_u. \quad (3.161)$$

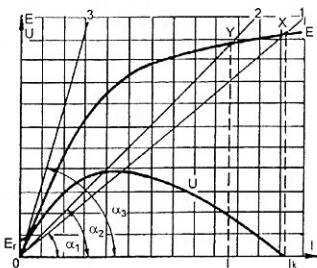
U praznom hodu armaturnim namotom ne teče struja, nema uzbuđene i generator daje tek vrlo mali napon zbog remanentnog magnetizma. Napon praznog hoda funkcija je brzine vrtnje  $n$  i struje opterećenja  $I$ , tj.  $E = f(n, I)$ .

Povećanjem struje opterećenja  $I$  povećava se i uzbuđna struja  $I_r$ , a s tim i magnetski tok  $\Phi$ , odnosno inducirani napon  $E$ . Unutarnja karakteristika predočena je na slici 3.4.18. Na istoj slici vidi se i vanjska karakteristika koja se dobiva tako da se od unutarnje karakteristike odbije pad napona na armaturnom i uzbuđnom namotu. Na taj nači napon na stezaljkama jednak je:

$$U = E - I(R_a + R_u) - \Delta U_c. \quad (3.162)$$

Veličina otpora  $R_a + R_u = l\alpha_1$  može se predočiti pravcem 1 s kutem  $\alpha_1$  kao na slici 3.4.18.

Vanjska karakteristika serijskog istosmjernog generatora dobiva se odbijajući ordinatne naznačenog pravca od unutarnje karakteristike. Na taj način dobivena je krivulja  $U$ .



Sl. 3.4.18. Unutarnja i vanjska karakteristika serijskog istosmjernoga generatora

Napon  $U$  jako je promjenljiv ovisno o opterećenju. U praznom hodu je nula, odnosno  $E_r$ . Povećanjem opterećenja  $U$  naglo raste, pri nekom opterećenju postiže maksimalnu vrijednost, a daljnjim porastom opterećenja smanjuje se i uz kratki spoj stezaljka jednak je nuli. Pri tome teče struja  $I_k$ , a na slici 3.4.18. pravac 1 siječe unutarnju karakteristiku u točki  $X$ . Ako istosmjerni generator nije kratko spojen, nego se u njegov strujni krug uključi trošilo, dobit će se pravac 2, koji siječe unutarnju krivulju u točki  $Y$ , odnosno istosmjerni generator uzbudit će se do toka koji će inducirati napon što odgovara naponu te točke. Ako bi vanjski otpor bio još veći, pravci otpora bili bi sve strmiji, tako da pravac 3 više ne bi presijecao unutarnju karakteristiku i istosmjerni generator ne bi se uopće uzbudio i pri nazivnoj brzini vrtnje.

Može se zaključiti da će se serijski istosmjerni generator uzbuditi tek nakon određene brzine vrtnje, i to lakše u kratkom spoju nego pri uključenom vanjskom otporu, a u praznom hodu uopće se ne može uzbuditi. Njegova je vanjska karakteristika jako nepovoljna, tj. velike su promjene napona s promjenom opterećenja, pa se na brodu ne upotrebljava.

### 3.4.1.4. Kompaundni (složeno uzbudeni) generator

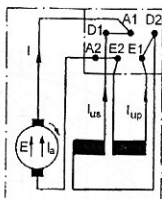
Načelna spojna shema kompaundnog istosmjernoga generatora (bez namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota) predočena je na slici 3.4.19. Takav generator ima paralelnu (ili neovisnu) i serijsku uzbudu na glavnim polovima.

Napon praznog hoda kompaundnog istosmjernoga generatora funkcija je brzine vrtnje  $n$  te serijskog i paralelnog magnetskog toka ( $\Phi_s + \Phi_p$ ), tj.  $E = f(n, \Phi_s + \Phi_p)$ .

Napon na stezaljkama je:

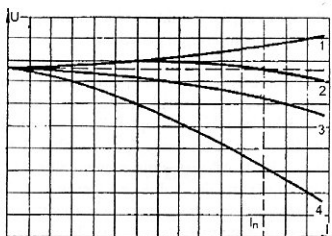
$$U = E - I_a(R_a + R_b) - \Delta U_c, \quad (3.163)$$

pa njegova vanjska karakteristika ovisi o djelovanju pojedine uzbude.



Sl. 3.4.19. Načelna spojna shema kompaundnog istosmjernoga generatora

Vanjske karakteristike kompaundnog istosmjernoga generatora vide se na slici 3.4.20.



Sl. 3.4.20. Vanjske karakteristike kompaundnog istosmjernoga generatora

Serijska uzbuda kompaundnog istosmjernoga generatora može biti tako spojena da potpomaže ili slabi paralelnu uzbudu. U prvom slučaju vanjska karakteristika može lagano rasti (napon  $U$  raste s povećanjem  $I$ , generator je *natkompaundiran* - krivulja 1 na slici 3.4.20. - i takva je karakteristika nepoželjna), ili je konstantna (napon  $U$  se uopće ne mijenja s promjenom  $I$ , karakteristika je idealna - označeno crtkano, odnosno krivuljom 2 na slici 3.4.20. - takav generator zove se *kompaundirani*, a obično ima nazivni napon u dvije točke: u praznom hodu i pri nazivnom opterećenju), ili može lagano padati (napon  $U$  pada s povećanjem  $I$ , generator je *potkompaundiran* - krivulja 3 na slici 3.4.20. - a karakteristika je tvrda). U drugom slučaju, kad serijska uzbuda djeluje suprotno od paralelne, vanjska karakteristika je vrlo mekana - krivulja d) na slici 3.4.20. - tj. napon  $U$  naglo pada s povećanjem  $I$ , tj. karakteristika je to mekanija što je veći utjecaj serijske protuuzbude. Takvi generatori zovu se *protukompaundirani* generatori.

Kompaundni istosmjerni generator rabi se često kao glavni uzбудnik sinkronih generatora na brodu.

### 3.4.1.5. Paralelni rad istosmjernih generatora

Kad dva ili više istosmjernih generatora radi na zajedničkoj brodskoj mreži, ili napajaju zajedničko trošilo, tada oni rade *paralelno*. Nužni uvjet za paralelni rad istosmjernih generatora je da su međusobno (preko sabirnica ili mreže) spojene njihove stezaljke istog polariteta i da moraju imati približno isti napon stezaljka:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (3.164)$$

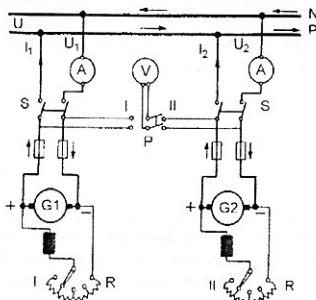
Budući da je ukupna struja jednaka zbroju struja pojedinih istosmjernih generatora:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (3.165)$$

također je ukupna snaga:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (3.166)$$

Budući da su najčešće u uporabi paralelni istosmjerni generatori, na slici 3.4.21. predočena je njihova shema spoja u paralelnom radu.



Sl. 3.4.21. Shema spoja dva paralelna istosmjerna generatora u paralelnom radu

Postupak paralelnog uključivanja izvodi se određenim redoslijedom. Generatoru koji je već u pogonu (G1 na slici 3.4.21.) priključuje se drugi generator (G2) tako da se najprije pogonskim strojem dovede do nazivne brzine vrtnje, a zatim se promjenom uzbudne struje namjesti napon  $U_2$  na iznos  $U$  (uvjet za paralelni rad). Nakon što se provjeri ispravnost polariteta stezaljka, može se generator G2 priključiti na brodsku mrežu.

U trenutku priključka naponi stezaljka su jednaki, tj.  $U_1 = U_2$ , ali su inducirani naponi  $E_1$  i  $E_2$  različiti, jer je generator G1 opterećen, pa je zbog pada napona poradi opterećenja  $E_1 > U$ , a generator G2 radi u praznom hodu, tj. kroz njegov armaturni namot ne teče struja pa je  $E_2 = U$ .

Da bi generator G2 preuzeo dio opterećenja s generatora G1, mora mu se povećati inducirani napon  $E_2$  odnosno uzbudna struja. Time postaje  $E_2 > U$  i

generator G2 šalje struju u mrežu. Ako je ukupno opterećenje ostalo nepromijenjeno, generator G1 može se rasteretiti tako da mu se smanji uzbudna struja, zbog čega će se smanjiti inducirani napon  $E_1$  i struja koju daje u mrežu. Da bi u tom slučaju brzine vrtnje generatora ostale nazivnog iznosa, potrebno je generatoru G2 preko pogonskog stroja dovesti mehaničku energiju proporcionalno opterećenju, a generatoru G1 smanjiti dovod mehaničke energije proporcionalno opterećenju.

Ako se uzbuđa i brzina vrtnje istosmjernih generatora drže konstantnima, raspodjela opterećenja u paralelnom radu određena je njihovim vanjskim karakteristikama. Uz pretpostavku da su naponi u praznom hodu jednaki, a napon na sabirnicama da se smanjuje s porastom opterećenja (na svakom mjestu sabirnice, dakle i na stezaljkama generatora napon je jednak), slijedi da u svakom paralelnom spojenom generatoru mora biti jednak pad napona. To znači da će generator s mekšom vanjskom karakteristikom uzimati postotno manje opterećenje, jer već postotno manja struja opterećenja izaziva pad napona koji je nastupio na sabirnicama (brodskoj mreži). Istosmjerni generator s tvrdom karakteristikom preuzima postotno veće opterećenje jer mu je potrebna postotno veće struja za isti pad napona.

Generator G1 može se isključiti s brodske mreže u okolnosti da cijelo opterećenje preuzme generator G2. Generator G1 isključuje se tako da se najprije razbudi toliko da njegov inducirani napon padne na iznos napona brodske mreže, tj.  $E_1 = U$ . U generatoru G1 tada nema pada napona, što znači da ne daje struju u mrežu pa se može s nje isključiti. Generator G2 preuzima tako cijelo mrežno opterećenje, ako se istodobno prema potrebi preuzbudi.

### 3.4.2. Istosmjerni motori

Kad se istosmjerni motor priključi na napon brodske mreže  $U$ , stvara se moment  $M$  određen izrazom (3.155), koji drži rotor u vrtnji. Pri tome se u armaturnom namotu inducira protunapon  $E$  prema izrazu (3.147), koji s padovima napona u istosmjernom motoru drži ravnotežu naponu  $U$  prema izrazu (3.149). Ako se zanemari pad napona na četkicama (radi jednostavnosti), može se napisati da je:

$$M = k_M \cdot I_a \cdot \Phi, \quad (3.167)$$

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} \quad \text{i} \quad (3.168)$$

$$n = \frac{E}{k_E \cdot \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{k_E \cdot \Phi} \quad (3.169)$$

Na temelju izraza od (3.167) do (3.169) također se određuje ovisnost brzine vrtnje  $n$  o momentu  $M$  pa se za razne vrste istosmjernih motora utvrđuju njihove karakteristike koje se međusobno razlikuju. Osnovne su karakteristike istosmjernih motora:

- ovisnost brzine vrtnje i momenta o struji opterećenja, tj.  $n = f(I)$  i  $M = f(I)$ ,
- ovisnost brzine vrtnje o momentu, tj.  $n = f(M)$ . Ta karakteristika zove se *vanjska* ili *mehanička karakteristika* istosmjernog motora.

Zajedničko je obilježje istosmjernih motora da im rotori, prema izrazu (3.169), pri malim iznosima magnetskog toka mogu postići velike brzine vrtnje. Uz mali magnetski tok mora biti velika brzina vrtnje da bi se inducirao takav protunapon koji će prema II. Kirchhoffovu zakonu držati ravnotežu naponu izvora. Budući da se istosmjerni motor u većini prilika pokreće opterećen, tj. mehanički je kruto spojen sa strojem koji pogoni, posebno se mora paziti da istosmjerni motor od početka pokretanja bude potpuno uzbuđen kako ne bi "pobjegao" zbog slabog magnetskog polja. Za neovisno uzbuđene istosmjerne motore to se postiže tako da se prvo uključi uzbuđa, a tada se tek uključi armaturni namot na mrežni napon, dok se za ovisno uzbuđene istosmjerne motore to postiže odgovarajućim spojem otpora za pokretanje.

Struja pokretanja je u većini okolnosti velika i vrlo opasna za istosmjerni motor, a osobito za kolektor. Zbog toga se izravno na mrežu mogu priključiti samo mali motori snage do 1 kW. Pri većim snagama motora struja pokretanja mora se ograničiti kako bi pokretanje bilo bez strujnih udara i ekonomično. To se postiže s pomoću predotpora, tzv. *uputnika* ili *pokretača* koji se uključuju serijski s armaturnim namotom. Uputnici su obično metalni otpori izvedeni u više stupnjeva. U trenutku pokretanja uključeni su svi stupnjevi, a isključenjem pojedinih stupnjeva raste brzina vrtnje rotora do nazivne vrijednosti, tj. u tom je trenutku armaturni namot izravno priključen na mrežu.

Maksimalna struja pokretanja odabiru se, ovisno o mreži i istosmjernom motoru, u granicama od 1,5 do 2 nazivne struje. Time se postiže dovoljno veliki moment, a struja pokretanja nije prevelika. Minimalna struja pokretanja uzima se nazivnog iznosa, ili malo veća.

Najvažnije je obilježje istosmjernog motora da mu se, određenim zahvatima, može regulirati brzina vrtnje na ekonomičan način u širokim granicama. Prema (3.169) to je moguće ostvariti na dva načina: *naponom* i *poljem*.

U prvom načinu moguće je regulirati brzinu vrtnje promjenom otpora armaturnog kruga (promjenom pada napona) i promjenom iznosa napona napajanja. U drugom načinu brzina se vrtnje regulira mijenjanjem magnetskog polja promjenom uzbuđne struje.

Uključivanjem otpora u armaturni strujni krug, brzina se vrtnje rotoru smanjuje, tj. brzina vrtnje može se regulirati samo na niže. Regulacija je jednostavna, ali neekonomična, jer se na predotporu gubi snaga pa pri manjim brzinama vrtnje korisnost istosmjernih motora postaje nepovoljnija.

Regulacija brzine vrtnje promjenom iznosa napona napajanja može poslužiti samo ako postoji istosmjerni izvor promjenljivog iznosa napona na koji se priključuje istosmjerni motor. Takva regulacija je vrlo ekonomična, a korisnost motora ostaje praktički konstantna u širokom području regulacije brzine vrtnje (od nula do nazivne brzine vrtnje).

Regulacija brzine vrtnje poljem izvodi se tako da se smanjenjem uzbuđne struje smanjuje magnetsko polje uz konstantni priključeni napon. Time se povećava brzina vrtnje rotora iznad nazivne vrijednosti, tj. opseg regulacije brzine vrtnje kreće se do 1 : 2 (do dvostruke nazivne brzine vrtnje).

U praksi su često pokretač (predotpornik) i regulator (regulacijski otpornik za regulaciju brzine vrtnje) spojeni u jedan uređaj. Oba otpornika imaju zajedničku ručicu koja prvo dotiče pokretač. Okretanjem ručice postupno se rotor istosmjernog motora ubrzava, u srednjem položaju ručice rotor ima nazivnu brzinu vrtnje, a daljnjim se zakretanjem ručice uključuju stupnjevi regulacijskog otpornika uzbuđenih namota.

Najpogodnija regulacija brzine vrtnje (s obzirom na korisnost i ekonomičnost) ostvaruje se promjenom iznosa napona napajanja (od nule do nazivne brzine vrtnje) i promjenom polja (u području iznad nazivne brzine vrtnje). Za takvu regulaciju potrebni su posebni izvori (sklopovi) koji se priključuju između izmjenične brodske mreže i motora (npr. istosmjerni motori u Leonardovu spoju, tj. sklop s rotacijskim strojevima ili, danas češće, sklopovi sastavljeni od poluvodičkih elemenata, tj. statički uređaji).

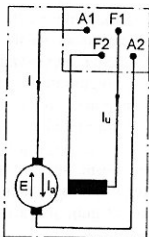
Promjena smjera vrtnje istosmjernog motora postiže se:

- ili promjenom spoja armaturnog namota uz nepromijenjeni spoj uzbudnog namota,
- ili promjenom spoja uzbudnog namota uz nepromijenjen spoj armaturnog namota.

Ako se istodobno promijeni smjer obiju struja (uzbudne i armaturne), ostat će smjer vrtnje motora isti, jer produkt  $B \cdot I$ , odnosno  $(-B) \cdot (-I)$ , daje moment istog smjera.

### 3.4.2.1. Neovisno uzbuđeni motor

Načelna spojna shema neovisno uzbuđenog istosmjernog motora (bez namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota) vidi se na slici 3.4.22.



Sl. 3.4.22. Načelna spojna shema neovisno uzbuđenog istosmjernog motora

Kad se neovisno uzbuđeni istosmjerni motor priključi na napon  $U$ , rotor se u tom trenutku ne vrti ( $n = 0$ ), pa je prema (3.140) inducirani protunapon jednak nuli ( $E = 0$ ). Zbog toga je struja armature  $I_a$  maksimalna (općenito je struja armature jednaka struji opterećenja), tj. jednaka je struji kratkog spoja:

$$I_k = \frac{U}{R_a} \quad (3.170)$$

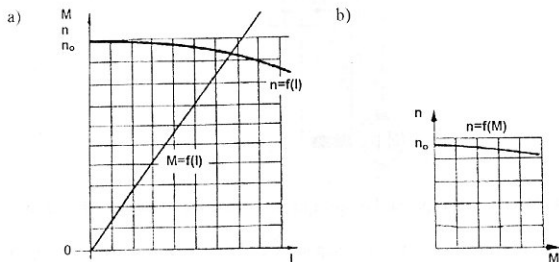
Prema (3.167) bit će i moment maksimalan, odnosno definiran kao *potezni* (pokretni) moment iznosi:

$$M_p = \frac{k_M \cdot \Phi \cdot U}{R_a} \quad (3.171)$$

Potezni moment pokrenut će rotor istosmjernog motora i on se počinje ubrzavati, a uz sve veću brzinu vrtnje inducira se prema (3.170) veći protunapon, koji prema (3.168) smanjuje struju armature, odnosno prema (3.167) slabi moment.

Brzina vrtnje tako dugo raste, a s tim struja armature i moment padaju, dok se pri nekoj određenoj brzini vrtnje ne razvije moment motora jednak protumomentu tereta  $M_T$  koji se opire vrtnji rotora. U toj se prilici rotor više ne ubrzava, već se vrti jednolikom brzinom, tj. motor je postigao *stacionarno* stanje. Pri nekom drugom opterećenju automatski će se uspostaviti (nakon završene *prijelazne* pojave) novo stacionarno stanje i pri tome će motor iz mreže uzimati upravo takvu struju da se postigne  $M = M_T$ .

Na slici 3.4.23. a) predočene su karakteristike  $n = f(I)$  i  $M = f(I)$ , a na slici 3.4.23. b) karakteristika  $n = f(M)$ . Karakteristike su nacrtane uz zanemarenje reakcije armature.



Sl. 3.4.23. Karakteristike neovisno uzbuđenog istosmjernog motora

Iz karakteristike  $n = f(I)$  na slici 3.4.23. a) vidi se da se brzina vrtnje, s promjenom opterećenja, u širokom području mijenja samo malo, tj. karakteristika je jako tvrda. Razlika između brzine vrtnje u praznom hodu i pri opterećenju je 5 do 15%.

Jednako tako i karakteristika  $n = f(M)$  na slici 3.4.23. b) pokazuje neznatnu promjenu brzine vrtnje s promjenom tereta. Budući da je prema (3.167) moment proporcionalan produktu  $\Phi \cdot I$ , to je uz konstantnu uzbudu ( $\Phi$ ) moment proporcionalan struji opterećenja, pa je karakteristika  $M = f(I)$ , na slici 3.4.23. a), linearna.

Potezni je moment ograničen dopuštenom strujom pri pokretanju istosmjernog motora koja je za normalno ubrzanje cca 1,5 puta veća od nazivne struje, pa se računa da je  $M_p = 1,5 M_p$ .

Na temelju rečenog osnovna su obilježja neovisno uzbuđenog istosmjernog motora:

- neznatna je promjena brzine vrtnje pri promjeni opterećenja na njegovoj osovini,
- potezni moment ograničen je strujom pokretanja i iznosi do  $1,5 M_p$ ,
- regulacija brzine vrtnje rotora ostvaruje se promjenom napona armature ili uzbuđenom strujom,
- namot armature i uzbuđni namot mogu imati različite napone.

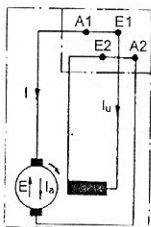
Ta obilježja omogućuju da se neovisno uzbuđeni istosmjerni motor daje upotrebljavati za pogon strojeva koji zahtijevaju vrlo finu i široku regulaciju brzine



vrtnje (regulacija brzine vrtnje s pomoću Leonardova spoja ili upravljanih ispravljača).

### 3.4.2.2. Paralelno uzbuđeni motor

Načelna spojna shema paralelno uzbuđenog istosmjernog motora (bez namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota) predočena je na slici 3.4.24.



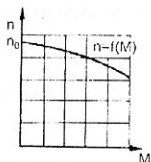
Sl. 3.4.24. Načelna spojna shema paralelno uzbuđenog istosmjernog motora

Ovom istosmjernom motoru napon stezaljka  $U$  zajednički je napon armaturnog i uzbuđenog namota. Pri konstantnom naponu  $U$  bit će i uzbuđna struja  $I_u$  konstantna, a tada je konstantan i magnetski tok  $\Phi$ . U toj prilici nema fizikalne razlike u ponašanju neovisnog i paralelnog istosmjernog motora, pa karakteristike objašnjene uz sliku 3.4.23. vrijede i za paralelno uzbuđeni istosmjerni motor.

U odnosu prema neovisno uzbuđenom istosmjernom motoru jedino postoji razlika u strujama. Za neovisno uzbuđeni istosmjerni motor vrijedi  $I = I_a$ , a za paralelno uzbuđeni istosmjerni motor struja opterećenja jednaka je zbroju armaturne i uzbuđne struje:

$$I = \frac{U}{R_a} + \frac{U}{R_u} \quad (3.172)$$

Jednako tako, vanjska ili mehanička karakteristika  $n = f(M)$ , prikazana na slici 3.4.25., nešto je mekša od takve karakteristike neovisno uzbuđenog istosmjernog motora.

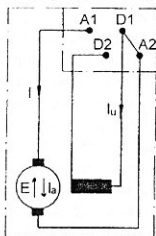


Sl. 3.4.25. Vanjska karakteristika paralelno uzbuđenog istosmjernog motora

Sva naznačena obilježja za neovisno uzbuđeni istosmjerni motor vrijede i za paralelno uzbuđeni istosmjerni motor. Zbog toga se i taj motor rabi vrlo često u okolnostima kad se zahtijeva ekonomična regulacija brzine vrtnje u širokom području kao i kad se zahtijeva konstantna brzina vrtnje pri promjeni opterećenja. Na brodu ti istosmjerni motori služe za pogon kompresora, pumpa, dizalica i slično.

### 3.4.2.3. Serijski uzbuđeni motor

Načelna spojna shema serijski uzbuđenog istosmjernog motora (bez namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota) vidi se na slici 3.4.26.



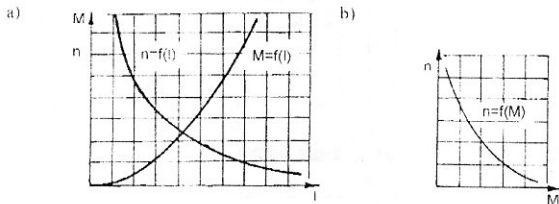
Sl. 3.4.26. Načelna spojna shema serijski uzbuđenog istosmjernog motora

Tom istosmjernom motoru struja opterećenja jednaka je armaturnoj, odnosno uzbuđnoj struji ( $I = I_a = I_u$ ):

$$I = \frac{U}{R_a + R_u} \quad (3.173)$$

To znači da opterećenje određuje uzbuđivanje, pa se karakteristike serijskog istosmjernog motora znatno razlikuju od neovisno, odnosno paralelno uzbuđenog istosmjernog motora kojima je uzbuđivanje neovisno o opterećenju.

Na slici 3.4.27. a) predočene su karakteristike  $n = f(I)$  i  $M = f(I)$ , a na slici 3.4.27. b) karakteristika  $n = f(M)$ .



Sl. 3.4.27. Karakteristike serijski uzbuđenog istosmjernog motora

Budući da je prema (3.167) moment  $M$  proporcionalan produktu  $\Phi \cdot I_a$ , a magnetski je tok  $\Phi$  proporcionalan uzbuđnoj struji  $I_u$  uz  $I = I_a = I_u$  moment će biti proporcionalan kvadratu struje opterećenja ( $M \sim I^2$ ), pa karakteristika  $M = f(I)$ , na slici 3.4.27. a) ima oblik parabole. Karakteristika pokazuje da serijski uzbuđeni istosmjerni motor svladava povećano opterećenje s manjom strujom opterećenja nego što to može neovisno, odnosno paralelno uzbuđeni istosmjerni motor.

Ako se taj motor više mehanički optereti, smanjit će se njegova brzina vrtnje. Budući da je brzina vrtnje  $n \sim U/\Phi$ , te uz konstantni napon stezaljka  $U$  i  $\Phi \sim I$ , brzina vrtnje obrnuto je proporcionalna struji opterećenja ( $n \sim 1/I$ ), pa karakteristika  $n = f(I)$ , na slici 3.4.27. a), ima oblik hiperbole.

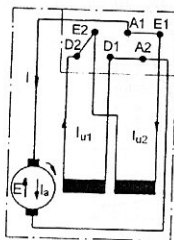
Jednako tako i karakteristika  $n = f(M)$ , na slici 3.4.27. b), pokazuje znatnu promjenu brzine vrtnje s promjenom opterećenja, tj. serijski uzbuđeni istosmjerni motor ima *mekanu* vanjsku karakteristiku.

Opisane karakteristike pokazuju da serijski uzbuđeni istosmjerni motor povećano mehaničko opterećenje svladava s relativno malim povećanjem struje opterećenja i znatnim smanjenjem brzine vrtnje. Ako bi se on naglo rasteretio, brzina vrtnje naglo bi mu porasla, a djelovanje velike centrifugalne sile na rotor moglo bi uzrokovati njegovo uništenje. Zato serijski uzbuđeni istosmjerni motor ne smije imati prijenos s remenom, već s pomoću zupčanika ili čvrste spojke uz osiguranje centrifugalnom sklopkom za isključenje s mreže.

Sva naznačena obilježja, te veliki potezni moment i mogućnost regulacije brzine vrtnje (promjenom iznosa napona ili promjenom uzbuđne struje) u širokom području, omogućuju primjenu serijski uzbuđenih istosmjernih motora za pogon brodskih dizalica, kranova, vitala i svugdje gdje je pri povećanju opterećenja (momenta) poželjno smanjiti brzinu vrtnje.

#### 3.4.2.4. Kompaundni (složeno uzbuđeni) motor

Načelna spojna shema kompaundnog (složeno uzbuđenog) istosmjernog motora (bez namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota) predočena je na slici 3.4.28. Takav motor ima složenu uzбудu, odnosno dva uzbuđna namota: jedan serijski i jedan paralelni (neovisni). Ti su namoti spojeni tako da im se protjeccanja potpomažu, jer bi u suprotnom rad motora bio nestabilan, odnosno brzina vrtnje bi mu se povećavala s porastom opterećenja.



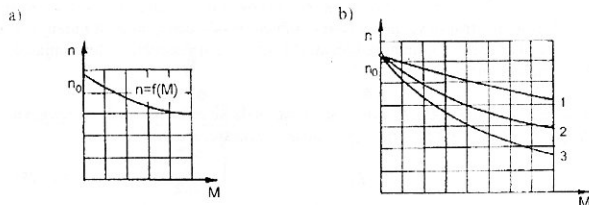
Sl. 3.4.28. Načelna spojna shema kompaundnog (složeno uzbuđenog) istosmjernog motora

Kompaundnom istosmjernom motoru struja opterećenja  $I$  jednaka je zbroju armaturne i uzbudne struje:

$$I = \frac{U}{R_a + R_{u,s}} + \frac{U}{R_{u,p}} \quad (3.174)$$

Njegova vanjska karakteristika ima oblik kao na slici 3.4.29. Kako se vidi na slici 3.4.29.a) brzina vrtnje pada s porastom opterećenja manje nego u serijski uzbuđenom istosmjernom motoru, ali više nego paralelno uzbuđenom.

Vanjska karakteristika mijenja se ovisno o utjecaju pojedine vrste uzbuđenja, kako se vidi na slici 3.4.29.b). Karakteristika I je *tvrd*a, tj. odgovara prilici kad je protjecanje paralelne uzbuđenja znatno veće od protjecanja serijske uzbuđenja (slično paralelno uzbuđenom istosmjernom motoru), dok je karakteristika III *meka*, odnosno odgovara slučaju kad serijska uzbuđenja nadvladava paralelnu (slično serijski uzbuđenom istosmjernom motoru). Raznim kombinacijama utjecaja pojedine uzbuđenja daju se dobiti različite vanjske karakteristike, pa je tako karakteristika II jedna od mogućih između karakteristika I i III.



Sl. 3.4.29. Vanjske karakteristike kompaundnog istosmjernog motora

Kompaundni (složeno uzbuđeni) istosmjerni motori primjenjuju se tamo gdje je potreban veliki potezni moment i gdje je intermitiran pogon (alatni strojevi, kod preša, pogon valjaonica i sl.), a na brodu su rijetki.

### 3.4.3. Gubici i korisnost istosmjernog stroja

Gubici snage istosmjernog stroja mogu se podijeliti (kao i u drugih rotacijskih strojeva) u tri osnovne skupine: mehanički gubici, gubici u željezu zbog vremenske promjene magnetskog polja i gubici u bakru namota kojima protječe struja.

*Mehanički gubici* dijele se na:

- gubitke trenja* u ležajima i trenja o zrak dijelova koji se vrte,
- gubitke ventilacije* nastale kao gubitak snage predan ventilatoru kojim se rashladni zrak protjeruje strojem,
- mehaničke gubitke na kolektoru* koji nastaju zbog trenja četkica o kolektor.

*Gubici u željezu* dijele se na:

- gubitke u zubima željeza* armature,
- gubitke u jarnu željeza* rotora,
- površinske gubitke u željezu glavnih polova*

Gubici nastali zbog struje, često kraće nazvani *strujni gubici* ili *gubici u bakru* namota, dijele se na:

- g) *gubitke u namotu armature* (nazivni "istosmjerni" gubici),
- h) *gubitke u namotu pomoćnih polova*,
- i) *gubitke kompenzacijskog namota* (ako ga stroj ima),
- j) *gubitke u serijskom namotu* (ako ga stroj ima),
- k)  *dodatne gubitke u armaturnom namotu zbog djelovanja poprečnog magnetskog polja*,
- l)  *dodatne gubitke u armaturnom namotu zbog djelovanja uzdužnog magnetskog polja*,
- m) *električne gubitke na kolektoru* koji nastaju prilikom prolaska struje kroz prijelazni otpor između četkica i kolektora te kolektora i četkica,
- n) *gubitke u bakru uzbuđnih namota*. Oni su zbroj gubitaka u pojedinim uzbuđnim namotima kad ima više od jednog uzbuđnog namota.

Zbroj svih gubitaka od a) do n) čine *ukupne gubitke* (*širć gubitke*) istosmjernog stroja  $P_g$  i oni služe kao osnova za određivanje korisnosti  $\eta$ .

Za istosmjerni stroj je važno da su mu gubici pri određenoj snazi što manji, tj. da ima što veću korisnost. Optimalna korisnost postiže se u području opterećenja od 75 do 100% nazivne snage.

Kad se govori o *snazi istosmjernog stroja*, onda se redovito misli na njegovu izlaznu snagu, tj. *snagu koju generator predaje mreži na stezaljkama*.

$$P_2 = U \cdot I, \quad (3.175)$$

ili *snagu* što je *motor predaje radnomu mehanizmu* (*pogonjenom stroju*) prema relaciji:

$$P_2 = M \cdot \omega = M \cdot \frac{n \cdot \pi}{30}, \quad (3.176)$$

pri čemu je  $M$  moment na osovini između motora i radnog mehanizma.

*Ulazna snaga* istosmjernog stroja je ona koju generator na osovini prima od pogonskog stroja ili je motor na ulaznim stezaljkama uzima iz mreže. Razlika tih snaga, tj.:

$$P_1 - P_2 = P_g, \quad (3.177)$$

čini gubitke u stroju ili tzv. *uže gubike stroja*.

Korisnost istosmjernog stroja definirana je omjerom predane i primljene snage, tj. za *istosmjerni generator* valja primijeniti izraz (2.7), a za motor (2.6).

### 3.5. Strojovi posebne namjene

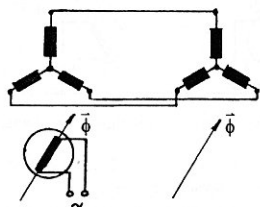
Na brodu se rabi veliki broj strojeva posebne namjene kojima prije svega pripadaju *davači položaja* (*selsini* ili *sinkro*) i *tahogeneratori*.

### 3.5.1. Davači položaja

Točan prijenos položaja ostvaruje se paralelnim radom dvaju sinkronih strojeva. Jednaki napon na stezaljkama uvjetuje jednaka protjecanja obaju strojeva, a time i jednak međusobni položaj obaju rotora u svakom trenutku vrtnje. Na žalost, kad strojevi stanu, izgubi se jednakost položaja jer se više ne induciraju naponi koji bi osigurali jednaka okretna polja u oba stroja. To vrijedi i pri vrlo malim brzinama jer su tad naponi premali da bi mogli održati sinkrono kretanje.

Suvremeni brodski strojarški telegraf s izmjeničnim napajanjem radi na načelu davača položaja (*selsin, sinkro*), tj. strojeva u kojih treba postići da se položaj jednog rotora (davača) registrira i podatak o tome prenese na drugo mjesto i tamo reproducira položajem drugog rotora (prijamnika). Pri tome taj uređaj mora raditi ne samo pri vrtnji već i onda kad davač miruje ili se vrti vrlo polagano.

Da bi se shvatio rad selsina, treba poći od slike sinkronog stroja s trofaznim namotom na statoru i uzбудom na rotoru, ali s tom razlikom što uzbuđa nije istosmjernom već izmjeničnom strujom, kako se vidi na slici 3.5.1.



Sl. 3.5.1. Shema spoja statora i rotora selsina davača

Kad bi os rotoru došla u os faze 1, inducirao bi se u toj fazi puni napon koji odgovara amplitudi kojom pulsira magnetski tok u osi rotorskog uzbudnog namota. Taj napon neka je  $E_m$ . Ako se rotor zakrene za kut  $\alpha$ , djelovat će u osi namota 1 samo komponenta magnetskog toka:

$$\vec{\Phi}_1 = \vec{\Phi} \cdot \cos \alpha. \quad (3.178)$$

U osi namota 2 djeluje komponenta pulzirajućeg magnetskog toka:

$$\vec{\Phi}_2 = \vec{\Phi} \cdot \cos(\alpha - 2\pi/3), \quad (3.179)$$

a u osi namota 3:

$$\vec{\Phi}_3 = \vec{\Phi} \cdot \cos(\alpha - 4\pi/3). \quad (3.180)$$

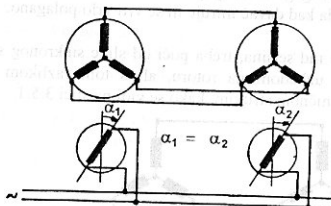
Naponi triju statorskih namota tada će biti:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_m \cdot \cos \alpha \\ E_2 &= E_m \cdot \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ E_3 &= E_m \cdot \cos(\alpha - 4\pi/3). \end{aligned} \quad (3.181)$$

Naponi prema (3.181) izmjenični su naponi frekvencije uzbude (npr. 50 Hz) kojima amplituda ovisi o kutu  $\alpha$ . Budući da su to naponi transformacije, oni se induciraju bez obzira na to stoji li rotor ili se vrti. Amplitude ovise o kutu  $\alpha$  kao što trenutne vrijednosti napona u sinkronom stroju ovise o argumentu  $\omega t$ .

Ako se naponi  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$  i  $\vec{E}_3$  priključe na stezaljke isto takva statora, stvorit će se i u tom stroju isto takvo pulzirajuće protjecanje jer su naponi na pojedinim faznim namotima jednaki, pa će i rezultantno pulzirajuće protjecanje biti jednako onome u prvom stroju. Dobio se prijemnik kojim se može rabiti na dva načina.

Prvi je način prijemnik s mehaničkim izlazom, tako da se rotor prijemnika priključi na isti izvor napona kao i rotor davača kao se vidi na slici 3.5.2.



Sl. 3.5.2. Shema spoja selsina davača i prijemnika s mehaničkim izlazom

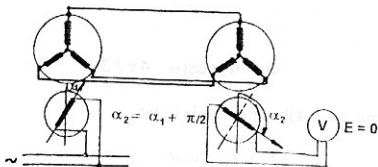
Na rotor prijemnika djelovat će namot sve dok se on ne nađe u istom položaju prema statoru u kojem se nalazi rotor davača ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ).

Za bilo koji kut  $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$  između osi rotora prijemnika i osi rotora davača napon rotorskog namota prijemnika bit će proporcionalan komponenti magnetskog toka  $\Phi$  u osi toga rotora. Ako je na rotoru davača napon  $U_1$ , napon na rotoru prijemnika bit će:

$$U_2 = U_1 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1). \quad (3.182)$$

Taj će napon biti maksimalan kad se osi obaju rotora podudaraju. Na tom principu radi strojarski telegraf.

Drugi je način prijemnik s električkim izlazom, tako da se mjeri inducirani napon u rotorskom namotu prijemnika, koji sada nije priključen na isti izvor napona kao i rotor davača, kao se vidi na slici 3.5.3.



Sl. 3.5.3. Shema spoja selsina davača i prijemnika s električkim izlazom

Budući da je mnogo pouzdanije odrediti položaj u kojemu je napon nula nego u kojemu je napon maksimalan, obično se traži položaj rotora prijamnika pomaknut  $\pi/2$  prema položaju rotora davača. Tad je napon nula jer je:

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_2 - \alpha_1) &= 0 \\ \alpha_2 - \alpha_1 &= \pi/2 \\ \alpha_2 &= \pi/2 + \alpha_1\end{aligned}\quad (3.183)$$

Na tom načelu radi indukcijski kompas.

### 3.5.2. Tahogeneratori

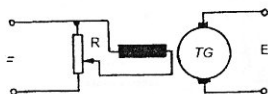
*Tahogenerator* omogućuje točno mjerenje brzine vrtnje broskog propelera i uključivanje brzine vrtnje kao električne veličine u procesu mjerenja i regulacije na brodu. To je rotacijski stroj koji mehanički tjeran brzinom vrtnje  $n$ , daje na stezaljkama napon proporcionalan toj brzini vrtnje.

*Tahogenerator istosmjernog napona* sličan je po funkciji istosmjernom generatoru u kojem je magnetski tok konstantan. U tom je slučaju inducirani napon proporcionalan brzini vrtnje. Konstantni magnetski tok postiže se ili točno kontroliranom neovisnom uzbudom ili permanentnim magnetom, te strujom opterećenja ograničenom na tako male vrijednosti da se utjecaj reakcije armature može zanemariti. Inducirani je napon:

$$E = k_n \cdot \Phi \cdot n = k \cdot n, \quad (3.184)$$

pa je postignuta linearnost kao osnovni zahtjev.

Schema tahogeneratora istosmjernog napona s neovisnom uzbudom vidi se na slici 3.5.4.



Sl. 3.5.4. Shema tahogeneratora istosmjernog napona s neovisnom uzbudom

Tahogeneratoru istosmjernog napona s neovisnom uzbudom napon mora biti vrlo konstantan, a budući da mora imati jednaku karakteristiku  $E = T(n)$  za oba smjera vrtnje, četkice treba postaviti točno u neutralnu zonu. Karakteristika se konačno namještina preciznim potenciometrom u uzbudnom krugu.

Tahogeneratori istosmjernog napona precizne izvedbe dosežu točnost od 2%, a najbolje izvedbe i do 0,25%.



*Tahogenerator izmjeničnog napona* gradi se bez kolektora, s rotorom od permanentnog magneta i s namotom na statoru. Proporcionalno brzini vrtnje mijenja se i visina induciranog napona i njegova frekvencija, što je dosta neprilično kad su brzine vrlo male. Točnost koja se postiže u tim izvedbama doseže do 0,1%.

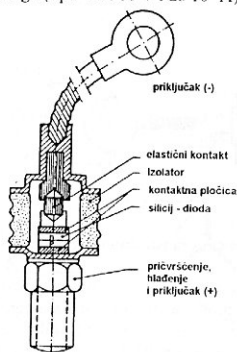
### 3.6. Ispravljači ili usmjerivači

U brod je ugrađen veliki broj električnih trošila koja rade pri različitim iznosima izmjeničnog napona i frekvencije, odnosno pri različitim iznosima istosmjernog napona. Budući da se na brodu istosmjerna trošila napajaju iz izmjeničnog izvora, nužno je ispraviti izmjenične napone i struje. To se ostvaruje s pomoću *ispravljača* ili *usmjerivača*, odnosno sklopovima energetske elektronike koji pružaju velike mogućnosti prilagodbe uvjetima upravljanja, regulaciji i automatizaciji svih vrsta pogona.

Osnovne komponente u sklopovima energetske elektronike su *poluvodičke diode* i *tiristori*. U ovom udžbeniku protumačit će se ukratko njihova funkcija kako bi se bolje mogla shvatiti fizikalnost upravljanja i regulacije s pomoću sklopova energetske elektronike koji su detaljnije opisani u udžbeniku "*Brodski električni uređaji i sustavi*" II. dio.

#### 3.6.1. Poluvodičke diode

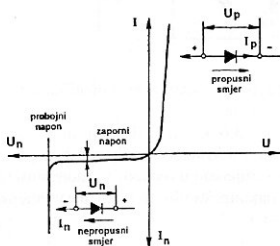
Rad poluvodičke diode temelji se na poluprovodljivom, tzv. P-N-spoju očešćene kristalne strukture silicija, i to tako da je P-dio obogaćen nositeljem pozitivnog naboja, a N-dio nositeljem negativnog naboja. Tako je omogućen protok struje u smjeru od P prema N ili tijek elektrona od N prema P, a suprotan je smjer otežan suprotno orijentiranim poljem prostornog naboja. Na slici 3.6.1. vidi se presjek jedne takve diode veće snage (npr. od 500 V i do  $10^2$  A).



Sl. 3.6.1. Presjek jedne poluvodičke (silicijske) diode

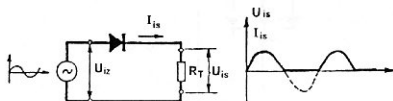
Temelj ispravljačkog (usmjerivačkog) djelovanja diode je P-N, tzv. sendvič kristala silicija kojem je jedna strana plus-pol (anoda) ujedno i pričvršćenje diode radi što je moguće većeg odvođenja toplinskih gubitaka P-N-spoja zbog prolaska struje i otpora diode u provodnom smjeru. Druga strana "sendviča" minus-pol (katoda) je preko elastična kontakta priključena na odgovarajući priključak. Polovi su međusobno vezani izolatorom kao na slici 3.6.1.

Fizikalnost P-N-spoja protumačit će se s pomoću karakteristike poluvodičke silicijske diode predočene na slici 3.6.2.



Sl. 3.6.2. Karakteristika poluvodičke silicijske diode

Prema prikazanoj karakteristici na slici 3.6.2. zaključuje se da su u *propusnom* (provodnom) smjeru diode velike struje  $I_p$  uz minimalni pad napona na diodi  $U_p$ , a u *nepropusnom* smjeru struja je vrlo mala, zanemariva, tzv. *zaporna struja*  $I_n$ , neovisna o veličini *zapornog napona*  $U_n$  sve do tzv. *probojnog napona*, kada dioda *probije* i napon postaje konstantan, bez obzira na veličinu struje. Poradi te svoje stabilnosti u granicama dopuštene struje (tzv. *Zenerov efekt*) to se svojstvo rabi pri stabilizaciji napona, a *ventilsko* djelovanje poluvodičke diode upotrebljava se uglavnom za ispravljanje izmjenične struje i napona u istosmjerne, i to u najjednostavnijem obliku ispravljača prema slici 3.6.3.

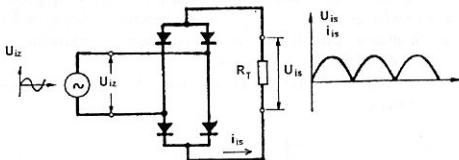


Sl. 3.6.3. Poluvalno ispravljanje jednofazne izmjenične struje diodom

Kako se vidi na slici 3.6.3., izmjenični napon  $U_{iz}$ , kojem je u strujnom krugu poluvodička dioda, protjerat će struju kroz trošilo  $R_T$  samo u provodnom smjeru diode tako da će kroz trošilo teći samo struja u jednom smjeru, a na otporu će se pojaviti odgovarajući istosmjerni napon  $U_{is}$  kao zbog napona radi prolaska istosmjerne struje  $I_{is}$ . Takvo ispravljanje, uz propuštanje samo poluperioda jednog smjera, zove se *poluvalno ispravljanje*, kao što to prikazuje vremenski tijek ispravljenog napona i struje na trošilu.

Medutim, odgovarajućim spojem poluvodičkih dioda u tzv. *mosnom spoju* može se jednofazni izmjenični napon ispraviti za obje poluperiode struje kroz trošilo

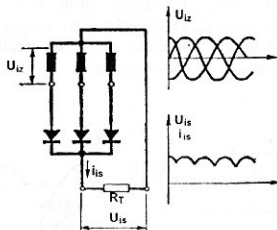
uvijek u istom smjeru, kao na slici 3.6.4. Takvo ispravljanje zove se *punovalno ispravljanje*.



Sl. 3.6.4. Punovalno ispravljanje jednofazne izmjenične struje (mosni spoj)

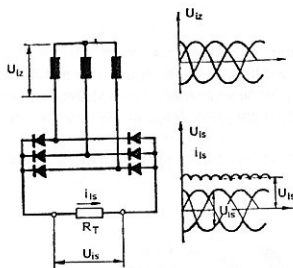
Kao što se vidi na slici 3.6.4., ili jedan ili drugi smjer jednofaznog izmjeničnog napona zatvorit će strujni krug preko dijagonalnih poluvodičkih ventila tako da će obje poluperiode biti usmjerene u jednom te istom smjeru kroz trošilo na kojem će nastati istosmjerni pad napona, kao što to prikazuje vremenski tijek napona i struje na trošilu.

Mnogo se manja pulzirajuća vrijednost ispravljenog napona dobiva ako je izvor trofazni izmjenični napon (npr. iz trofaznog transformatora). Pri tome je dostatno da se svaka faza spoji preko poluvodičkih dioda na strujni krug trošila. U toj prilici propustit će se samo pozitivna poluperioda trofazne struje, tj. dobilo se trofazno poluvalno ispravljanje kao na slici 3.6.5. U tom će *trofaznom spoju* ispravljeni napon ili struja biti vršna crta trofaznog napona jednog polariteta, kao što na slici prikazuje vremenski tijek izmjeničnog i ispravljenog (istosmjernog) napona.



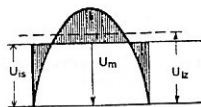
Sl. 3.6.5. Poluvalno ispravljanje trofazne izmjenične struje (trofazni spoj)

U trofaznom izvoru izmjeničnog napona daje se ispravljanje provesti "*punovalno*" spajanjem poluvodičkih dioda u *mosni spoj*, kako se vidi na slici 3.6.6. Dijagonalnim provođenjem dioda za sve smjerove svih faza, struja će teći u istom smjeru kroz trošilo, a istosmjerni ispravljeni napon činit će razliku vršnih trenutnih vrijednosti trofaznog napona poluperioda obaju smjerova. Na taj način vremenski tijek tako ispravljenog istosmjernog napona pokazuje mnogo manje pulsacije istosmjernog napona od poluvalnog trofaznog ispravljanja koji se dobiva trofaznim spojem.



Sl. 3.6.6. Punovalno ispravljanje trofazne izmjenične struje (mosni spoj)

Upotrijebi li se veći broj faza, dobiveni ispravljeni (istosmjerni) napon bit će s još manje pulsacija. Veličina ispravljenog napona čini srednju vrijednost vremenski promjenjivih veličina u jedinici vremena. Tako za punovalno ispravljenu jednofaznu izmjeničnu veličinu odnose između izmjenične i istosmjerne (ispravljene) veličine prikazuje slika 3.6.7., na kojoj zasjenjene površine više i ispod srednje vrijednosti, odnosno istosmjerne veličine, moraju biti jednake u jednoj jedinici periodične veličine.



Sl. 3.6.7. Vrijednosti istosmjerne veličine poluperiode izmjeničnog (sinusnog) oblika

Izračunaju li se vrijednosti sa slike 3.6.7. za prije opisane spojeve poluvodičkih dioda, dobit će se istosmjerne vrijednosti napona (struja) u odnosu prema efektivnoj vrijednosti izmjenične veličine. Ti podaci upisani su u tablici 3.6.1.

Tabl. 3.6.1. Vrijednosti ispravljenog (istosmjernog) napona

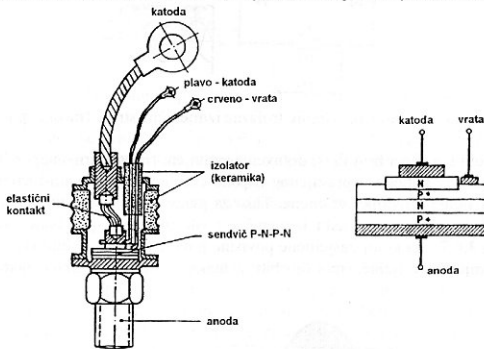
Odnos	Jednofazni polovalni spoj	Jednofazni mosni spoj	Trofazni spoj	Trofazni mosni spoj
$\frac{U_{iz}}{U_{iz}}$	0,64	0,90	0,983	0,999
$\frac{U_{m}}{U_{iz}}$	3,14	1,57	1,21	1,05

### 3.6.2. Tiristori

U dosadašnjim razmatranjima promatralo se samo ventilsko djelovanje poluvodičke diode. Međutim, želi li se ispravljeni napon regulirati u istim spojevima, umjesto dioda upotrijebit će se *tiristori*. To su složeniji spojevi silicijskih poluvodiča s dva P-N-spoja, i to u smjeru provođenja struje, odnosno anoda - katoda, po slijedu:

P - N - P - N.

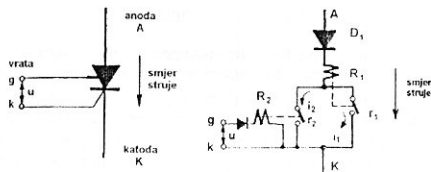
Takav jedan poluvodički "sendvič" i presjek tiristora predočuje slika 3.6.8.



Sl. 3.6.8. Presjek tiristora i poluvodički "sendvič" P - N - P - N

Izvedba je tiristora konstrukcijski slična izvedbi diode s tim što su za "otvaranje" tiristora dodani jedan ili dva priključka (radi lakšeg priključivanja upravljačkog impulsa). Anoda (plus-pol) je izvedena za učvršćenje tiristora, na koju se učvršćuje i rashladno tijelo radi odvođenja toplinskih gubitaka uzrokovanih padom napona i struje u provodnom smjeru. Katoda (minus-pol) je izvedena kao savitljivi priključak, a za anodu je učvršćena izolatorom. Poluvodički "sendvič" smješten je na anodu i elastično je vezan s katodom kao i u diode.

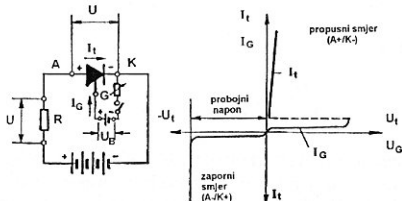
Otvaranjem tiristora propušta se struja u smjeru anoda - katoda, a to se postiže s pomoću vrata tako da se propusti početna struja kroz P-N-spoj u krugu vrata - katoda. Za to je dovoljan kratkotrajni impuls, iza kojega protječe tzv. *lavina elektrona* (u smjeru katoda - vrata), i tiristor provede sve dok je priključen na izvor napona između anode i katode. Djelovanje tiristora može se opisati s pomoću releja i diode prema slici 3.6.9.



Sl. 3.6.9. Shematski prikaz djelovanja tiristora

Prema slici 3.6.9. vidi se da dioda  $D_1$  ne može voditi struju u provodnom smjeru jer su relejima  $R_1$  i  $R_2$  otvoreni kontakti  $r_1$  i  $r_2$ . Tek kad se dovede napon  $u$  na stezaljke  $g - k$ , uzbuditi će se relej  $R_2$  i kontaktom  $r_2$  provesti struja  $i_2$  dovoljna da se uzbudi namot releja  $R_1$ , koji će svojim kontaktom  $r_1$  zatvoriti strujni krug neovisno o kontaktu  $r_2$ . Struja kroz diodu  $D_1$ , koja predstavlja tiristor, teći će neovisno o naponu  $u$  na stezaljkama (vratima)  $g - k$ . Tek nestankom napona koji tjera struju u smjeru  $A - K$  prestat će teći struja  $i_1$ . To u potpunosti vrijedi i za tiristor u kojega je za otvaranje dovoljan samo kratkotrajni impuls, slično sklopu releja i diode.

Funkcionalno djelovanje tiristora može se objasniti njegovom karakteristikom prikazanom na slici 3.6.10.



Sl. 3.6.10. Karakteristika (vođenja) tiristora

Prema slici 3.6.10. vidi se da priključenjem napona između stezaljki  $A - K$  u propusnom smjeru neće poteći struja kroz tiristor sve dok se naponom  $U_B$  između vrata  $G$  i katode  $K$  ne protjera struja  $I_G$ . Ta će struja biti neovisna o naponu do napona paljenja, kad će struja  $I_G$  naglo porasti i otvoriti tiristor pa će se pridodati struji tiristora  $I_T$ , koja će brzo narasti do ograničenja koje čini vanjski otpor  $R$ . Tako će na tiristoru nastati samo pad napona  $U_1$  u provodnom smjeru, koji je u redu veličine pada napona na odgovarajućoj diodi. Struja vrata  $I_G$  može se i prekinuti, a tiristor će i dalje voditi sve dok postoji napon na stezaljkama  $A - K$ .

Priključi li se na tiristor napon suprotnog smjera, on će se ponašati kao dioda. To znači da će teći minimalna struja suprotnog smjera neovisna o naponu do probojnog napona, kad struja suprotnog smjera naglo poraste uz konstantan napon suprotnog smjera bez obzira na veličinu struje suprotnog smjera.

Opisana svojstva tiristora posebno dolaze do izražaja ako je on u strujnom krugu izmjenične struje, kako se vidi na slici 3.6.11. Tu je izvor izmjeničnog napona priključen preko prikladnog tiristora tako da tiristor propušta struju samo u jednom smjeru, dakle on u provodnom stanju djeluje kao poluvalni ispravljač. Budući da je tiristor priključen na izvor izmjeničnog napona  $U_v$ , ako bi on stalno vodio, kao dioda, kroz njega bi protekla struja  $I_{vr}$ , i to samo u jednom smjeru (puna crta).

Dok se na vrata tiristora ne dovede napon  $U_G$ , on je zatvoren i kroz njega neće teći struja. Tek kad mu se na vrata dovede napon  $U_G$  u obliku impulsa koji će protjerati struju u njegovu provodnom smjeru, također u obliku impulsa, doći će do "otvaranja" tiristora tog trenutka i vođenja do kraja poluperiode kad izmjenični napon padne na nulu. Za to vrijeme proteći će struja kroz tiristor i nakon toga će on ponovno biti zatvoren sve dok mu se na vrata ne privede novi naponski, odnosno strujni impuls.

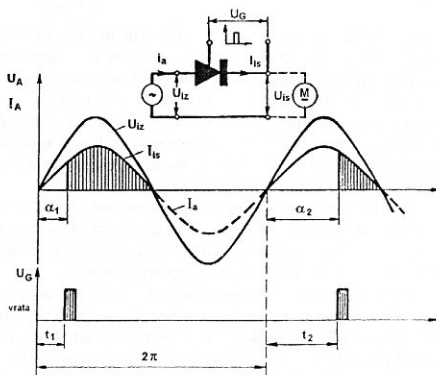
Prema tomu, ako se takvom tiristoru na vrata priključi izvor impulsa u vremenu  $t_1$ , što znači u faznom kutu  $\alpha$  u odnosu prema sinusoidi napona ( $\omega t = \alpha_1$ ), proteći će struja  $I_{is}$  prema zasjenjenoj površini za vrijeme  $\pi - \alpha_1$ . Ako se u sljedećoj poluperiodi vratima tiristora dovede impuls u vremenu  $t_2$ , tiristor će provesti nakon kuta  $\alpha_2$  i provodit će za preostali kut  $\pi - \alpha_2$ , kao što je zasjenjeno na slici. Budući da je kut vođenja tiristora u prvoj poluperiodi veći od onoga u drugoj poluperiodi, vrijedit će:

$$\int_{\alpha_1}^{\pi} I_{is} \cdot \sin \alpha \cdot dt > \int_{\alpha_2}^{\pi} I_{is} \cdot \sin \alpha \cdot dt, \quad (3.185)$$

pa je ispravljeni napon:

$$\frac{U_B}{\pi - \alpha_1} > \frac{U_{is}}{\pi - \alpha_2}. \quad (3.186)$$

Na temelju izraza (3.185) i (3.186) zaključuje se da je, pomakom faze impulsa za otvaranje tiristora u svakoj poluperiodi izmjeničnog napona, moguće mijenjati srednje vrijednosti struje, a to znači regulirati ispravljeni napon tiristorom od nule do maksimalne srednje vrijednosti kad se tiristor izjednačava s diodom.

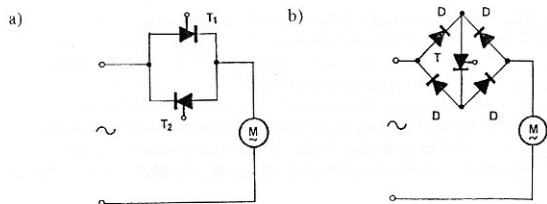


Sl. 3.6.11. Regulacija napona promjenom faze otvaranja tiristora

Upravljanje provodljivosti tiristora omogućuje upravljanja i regulacije izmjeničnog napona, i to tako da se u jedan strujni krug izmjeničnog napona spoje dva tiristora, za oba smjera izmjenične struje, kako je predloženo na slici 3.6.12.

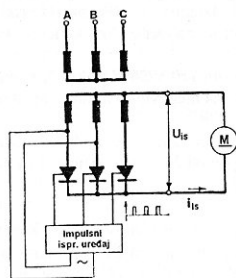
Prema slici 3.6.12.a) otvaranjem tiristora za cijeli kut  $\alpha = \pi$  za oba smjera izmjenične struje dovodi se napon trošilu (elektromotoru). Kašnjenjem otvaranja tiristora, kao što je objašnjeno na slici 3.6.11., na trošilo se dovodi sniženi izmjenični

napon, što znači da se može regulirati i izmjenični napon. Na slici 3.6.12.b) vidi se takvo upravljanje i regulacija izmjeničnog napona s pomoću jednog tiristora u dijagonali diodnog mosta. U tom spoju kroz tiristor protječu oba smjera struje koja protječe kroz elektromotor pa su obje poluperiode regulirane istim tiristorom.



Sl. 3.6.12. Upravljanje i regulacija izmjeničnog napona tiristorom

Opisane funkcije tiristora, poradi jednostavnijeg tumačenja, odnosile su se samo na jednofazne strujne krugove. Međutim, njihova uporaba na brodu vrlo je velika u trofaznoj brodskoj mreži. Takav trofazni poluvodički ispravljački tiristorski uređaj predložen je na slici 3.6.13., gdje se iz trofaznog izvora (transformatora) preko tri tiristora napaja jedan istosmjerni pogon. Regulacijski impulsni ispravljački uređaj daje svakom tiristoru odgovarajuće impulse, koji mogu biti i fazno regulirajući, a kroz trošilo (elektromotor) teče istosmjerna struja  $I_{is}$  napona  $U_{is}$ .



Sl. 3.6.13. Trofazni tiristorski ispravljač

Jednako kao što je ostvareno ispravljanje trofazne izmjenične struje u istosmjernu uz regulaciju istosmjernog napona, dadu se s pomoću tiristora napajati i trofazni motori provodeći istodobno i regulaciju trofaznoga izmjeničnog napona. Upravljanje i regulacija napona trofaznim motorima postižu se s pomoću dva tiristora po fazi, ili s jednim tiristorom i diodnim mostom po fazi.

Na brodovima se danas sve više upotrebljava tiristorski pogon zbog toga što se s pomoću tiristorskih ispravljača može vrlo fino i kontinuirano mijenjati brzina vrtnje elektromotornim pogonima. Upravljanje i regulacija takvih pogona opisana je u udžbeniku "Brodski električni uređaji i sustavi" II. dio.



### 3.7. Pitanja i zadaci za provjeru znanja

Uz točku 3.1.:

1. Skicirajte i objasnite načelnu shemu jednofaznog transformatora.
2. Što je koeficijent transformacije transformatora?
3. Objasnite pogonsko stanje praznog hoda i kratkog spoja transformatora. Kolika je korisnost transformatora u tim pogonskim stanjima?
4. Skicirajte i objasnite nadomjesne sheme transformatora u praznom hodu i kratkom spoju te fazorske dijagrame struja i napona u tim pogonskim stanjima.
5. Skicirajte i objasnite nadomjesnu shemu realnog jednofaznog transformatora.
6. Skicirajte i objasnite pojednostavljeni fazorski dijagram opterećenog jednofaznog transformatora.
7. Nabrojite i opišite sve gubitke energije u realnom transformatoru.
8. Skicirajte i objasnite vanjske karakteristike realnog transformatora.
9. Skicirajte i objasnite sheme spoja namota trofaznog transformatora i odgovarajuće fazorske dijagrame napona.
10. Što je satni broj, a što grupa spoja trofaznog transformatora?
11. Skicirajte i objasnite fazorske dijagrame simetričnog trofaznog sustava.
12. Skicirajte i objasnite najčešće nesimetrično opterećenje trofaznog sustava.
13. Koji su uvjeti za paralelni rad dva i više transformatora?
14. Koji je redoslijed priključivanja dva trofazna transformatora u paralelni rad?
15. Nabrojite neke specifičnosti za primjenu transformatora na brodu.
16. Smije li se jednofazni transformator izrađen za 380V, 50 Hz priključiti na napon 660 V, 50 Hz? Obrazložite odgovor uzimajući u obzir veličinu struje magnetiziranja.
17. Jednofazni transformator s prijenosom 110 V/24 V priključi se na brodsku mrežu napona 220 V. Koliki će napon biti na njegovim sekundarnim stezaljkama?  
[ $U_2 = 48 \text{ V}$ ]
18. Odredite koeficijent transformacije i broj zavoja sekundarnog namota transformatora koji mora imati napon od 24 V, ako primarni namot ima 880 zavoja i napon stezaljka od 220 V.  
[ $k_{12} = 9$ ;  $N_2 = 96$  zavoja]
19. Privedena snaga jednofaznom transformatoru iznosi 81 kW, korisnost je  $\eta = 0,90$ , a na sekundarnim stezaljkama izmjerena je napon 230 V i faktor snage  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . Kolika je prividna snaga i snaga, ukupna i radna struja na sekundaru?  
[ $P_2 = 90 \text{ kW}$ ;  $I_2 \approx 489 \text{ A}$ ;  $I_1 \approx 391 \text{ A}$ ;  $S \approx 112,5 \text{ kVA}$ ]
20. Trofazni transformator prividne snage 150 kVA ima prijenosni omjer napona 6000 V/400 V. Kolike su ukupne struje u primarnom i sekundarnom namotu? Kolika je radna snaga i struja sekundara ako je faktor snage  $\cos \varphi_2 = 0,8$ , a korisnost  $\eta = 0,90$ ?  
[ $I_1 = 14,5 \text{ A}$ ;  $I_2 = 217 \text{ A}$ ;  $P_2 \approx 108 \text{ kW}$ ;  $I_2 = 156 \text{ A}$ ]

Uz točku 3.2.:

1. Što je asinkroni stroj? Zašto se asinkroni motor zove induksijski motor?
2. Zbog čega sinkroni motor ne može doseći sinkronu brzinu vrtnje? Što je klizanje?

3. Koja je razlika između trofaznog asinkronog kaveznog i kolutnog motora?
4. Što određuje broj polova, a što broj faza kaveznog motora?
5. O čemu ovisi okretni moment trofaznog asinkronog motora?
6. Što pokazuje momentna ili vanjska karakteristika trofaznog asinkronog motora?
7. Kako utječe veličina narinutog napona na stezaljke asinkronog motora na njegov potezni moment i struju pri pokretanju?
8. Kako utječe promjena frekvencije na potezni moment, a kako na snagu asinkronog motora?
9. Zašto se smanjuje brzina vrtnje rotora asinkronog motora ako se povećava mehaničko opterećenje?
10. Koju snagu i struju uzima asinkroni motor iz mreže u praznom hodu? Koju snagu predaje na osovini? Kada nastupa takvo pogonsko stanje?
11. Koju snagu i struju uzima asinkroni motor iz mreže u kratkom spoju? Koliku snagu predaje na osovini? Kada nastupa takvo pogonsko stanje?
12. Kolika je korisnost asinkronog motora u praznom hodu, a kolika u kratkom spoju?
13. Uzima li asinkroni motor veću struju iz brodske mreže u praznom hodu ili u kratkom spoju pri jednako velikom naponu mreže? Obrazložite odgovore.
14. Kako se može pokrenuti trofazni asinkroni kavezni motor?
15. Kad se može koristiti preklapkom zvijezda - trokut za pokretanje asinkronog motora?
16. Kako se može regulirati brzina vrtnje trofaznom asinkronom kaveznom motoru?
17. Skicirajte momentne karakteristike trofaznog asinkronog motora pri promjeni frekvencije i napona narinutog na stator.
18. Skicirajte momentne karakteristike trofaznog asinkronog motora pri promjeni amplitude narinutog napona (klizanja).
19. Kako se pokreće trofazni asinkroni kolutni motor?
20. Skicirajte ovisnost rotorske struje o otporu i klizanju u trofaznom asinkronom kolutnom motoru.
21. Skicirajte utjecaj otpora u rotorskom krugu na momentnu karakteristiku trofaznog asinkronog kolutnog motora.
22. Kako se regulira brzina vrtnje trofaznog asinkronom kolutnom motoru?
23. O čemu ovisi veličina otpora za regulaciju brzine vrtnje trofaznom asinkronom kolutnom motoru?
24. Kako se može promijeniti smjer vrtnje trofaznom asinkronom motoru?
25. Kako trofazni asinkroni motor radi na jednofaznoj mreži?
26. Koje su osnovne karakteristike jednofaznog asinkronog motora?
27. Što je kondenzatorski motor?
28. Skicirajte momentne karakteristike kondenzatorskog motora s pomoćnom fazom za zalet i bez nje.
29. Kako se može postići veliki potezni moment jednofaznom asinkronom motoru?
30. Kakvo mora biti klizanje asinkronog stroja da bi on radio kao generator?  
[ $s < 0$ ]
31. Koliko jalove energije potroši mjesečno (30 dana rada po 24 sata) trofazni asinkroni motor: 125 kW, 735 r/min, 237 A, 380 V, 50 Hz,  $\cos \varphi = 0,84$ ?  
[ $Q_t = 16,9 \text{ kVAhr}$ ]
32. Da bi se trofaznom asinkronom kolutnom motoru promijenio smjer vrtnje, treba (zaokružite točne odgovore):
  - a) zamijeniti priključke dviju rotorskih faza (priključke na rotorski otpornik).

- b) zamijeniti priključke dviju statorskih faza,  
 c) ne može se promijeniti smjer vrtnje  
 d) motor se isključiti s mreže, i pri ponovnom priključku na mrežu rotor se zakrene u suprotnom smjeru,  
 e) motor se rastereti, a rotorski otpornik postavi na maksimalnu vrijednost.  
 [b)]
33. Za koliko bi se promijenio potezni moment asinkronog motora građenog za spoj u trokut ako bi se priključio na istu mrežu u spoju u zvijezda?  
 $[M_Y = \frac{1}{3} M_\Delta]$
34. Trofazni asinkroni motor ima na natpisnoj pločici podatke: 380 V; Y; 50 Hz; 10 kW; 20,8 A;  $\cos \varphi = 0,86$ ; 1425 r/min. Koliki su ukupni gubici i korisnost pri nazivnom opterećenju? Koliko iznosi klizanje?  
 $[P_g = 1774 \text{ W}; \eta = 0,85; s_n = 5\%]$
35. Trofazni asinkroni motor razvija moment 34,1 Nm i vrti se brzinom od 1400 r/min priključen na mrežu od 50 Hz. Koliku snagu daje motor i koliki su gubici u strujnim krugovima?  
 $[P_2 = 5000 \text{ W}; P_{2e} = 357 \text{ W}]$
36. Trofazni asinkroni motor na mreži od 380 V opterećen snagom od 6 kW uzima struju 12,9 A i ima ukupne gubitke od 1200 W. Koliko iznosi faktor snage i korisnost motora?  
 $[\cos \varphi = 0,848; \eta = 0,83]$
37. Trofazni kavezni motor ima podatke: 55 kW; 380 V; 975 r/min;  $\cos \varphi = 0,89$ ;  $\eta = 0,92$ ;  $f = 50 \text{ Hz}$ , spoj statorskog namota u trokut. Struja kratkog spoja je 6 puta veća od nazivne, a moment kratkog spoja iznosi 60% nazivnog. Koliko iznosi struja kratkog spoja u amperima, i to u dovodima do motora i u fazi motora, te koliko iznosi moment kratkog spoja u Nm?  
 $[I = 612 \text{ A}; I_f = 353 \text{ A}; M_k = 323,2 \text{ Nm}]$
38. Trofazni asinkroni motor: 380 V; Y; 5 kW; 13,6 A; prespojen u  $\Delta$  i priključen na 3-faznu mrežu od 220 V. Koliku će struju uzimati iz mreže pri opterećenju od 5 kW? Hoće li se namot pregrijati?  
 $[I = 23,6 \text{ A}; \text{ne će se pregrijati}]$
39. Trofazni kolutni motor razvija prekretni moment od 300 Nm pri 15%-tnom klizanju. Otpor po fazi rotora iznosi 0,2  $\Omega$ . Koliki otpor po fazi treba dodati u rotorski krug da se postigne prekretni moment pri pokretanju, tj.  $s = 1$ , a koliki bi maksimalni moment motor postigao uz 5% sniženi napon, nepromijenjene frekvencije?  
 $[R_{2d} = 1,13 \Omega; M_m = 270,8 \text{ Nm}]$
40. Asinkroni motor opterećen konstantnim momentom vrti se brzinom 1410 r/min. Dodavanjem otpora u rotorske strujne krugove brzina je smanjena na 1230 r/min. Koliko su puta porasli ukupni gubici u rotorskim strujnim krugovima?  
 $[P'_{2e} = 3 P_{2e}]$

Uz točku 3.3.:

- Što je sinkroni stroj? Kako se mogu podijeliti sinkroni strojevi?
- Koji su namoti u sinkronom generatoru i koja je njihova uloga? Zašto je redovito uzbuđa na rotoru, a višefazni djelatni namot (armatura) na statoru, a ne obratno?

3. Koja je razlika između rotora s neistaknutim i istaknutim polovima?
4. Kako se može ostvariti uzbuda sinkronog generatora?
5. Skicirajte uzbudni sustav s rotirajućim i sa stacionarnim ispravljačem i objasnite njihovu ulogu.
6. Skicirajte načelnu shemu spoja samouzbudnog sinkronoga generatora i objasnite njegov rad?
7. Što određuje frekvenciju, a što iznos induciranog napona sinkronoga generatora?
8. Objasnite stanje praznog hoda sinkronoga generatora. Skicirajte karakteristiku praznog hoda i fazorski dijagram sinkronoga generatora u praznom hodu. Kolika je predana snaga u praznom hodu?
9. Objasnite stanje kratkog spoja sinkronoga generatora. Skicirajte karakteristiku kratkog spoja i fazorski dijagram sinkronoga generatora u kratkom spoju. Kolika je predana snaga u kratkom spoju?
10. Što je sinkrona reaktancija? Prikažite je u jednostavnoj nadomjesnoj shemi sinkronoga generatora s cilindričnim rotorom.
11. Skicirajte i objasnite vanjske karakteristike sinkronoga generatora.
12. Skicirajte i objasnite regulacijske karakteristike sinkronoga generatora.
13. Što je simetrični, a što nesimetrični kratki spoj sinkronog generatora? Skicirajte njihove karakteristike.
14. Objasnite blokovskom shemom rad sinkronog generatora na vlastitoj mreži.
15. Kako se može držati konstantnim napon i frekvencija sinkronoga generatora ako on radi na vlastita trošila?
16. Što se mijenja u radu sinkronoga generatora ako mu se mijenja opterećenje?
17. O čemu ovisi razvijeni elektromagnetski (zakretni) moment sinkronoga generatora?
18. Skicirajte karakteristiku sinkronoga generatora i pogonskog dizelskog motora. Što je stacionarna radna točka generatora?
19. Objasnite pojam sinkronizacije i kako se ona provodi.
20. Kako se može mijenjati moment generatora?
21. S čime se mijenja djelatna (aktivna) snaga generatora? Objasnite karakteristikom frekvencija - djelatna snaga.
22. S čime se mijenja jalova (nekorisna) snaga generatora? Objasnite karakteristikom napon - jalova snaga generatora.
23. Skicirajte i objasnite bilancu snage sinkronoga generatora.
24. Kako se određuje i koliko približno iznosi korisnost sinkronoga generatora?
25. Što je sinkroni motor? Skicirajte i objasnite njegovu momentnu karakteristiku.
26. Kako se može pokretati sinkroni motor?
27. Skicirajte i objasnite radne karakteristike sinkronog motora.
28. Koju snagu iz mreže uzima sinkroni motor?
29. Dva sinkrona generatora imaju na natpisnoj pločici podatke:
  - a) 30000 kVA,  $\cos \phi = 0,8$  ind.,
  - b) 30000 kVA,  $\cos \phi = 1$ .
 Koji generator treba veći pogonski stroj?  
 [b] jer je  $P_1 = 24$  MW;  $P_2 = 30$  MW]
30. Trofazni sinkroni generator 70 kVA, 400 V,  $\cos \phi = 0,8$ , 50 Hz,  $\eta = 0,9$  radi na mreži i pogonjen je turbinom koja može trajno davati najviše 60 kW. Smije li se generator opteretiti u trajnom radu:
  - a) strujom 90 A uz  $\cos \phi = 0,9$  induktivno;
  - b) snagom 60 kW uz  $\cos \phi = 1$ ?
 [a) ne, b) ne]

31. Sinkroni generator s cilindričnim rotorom ima podatke na natpisnoj pločici:  $Y$ , 400 V, 50 Hz, 70 kVA,  $\cos \varphi = 0,8$ ,  $X_s = 2,31 \Omega$  i radi na vlastitu mrežu uzbuđen nazivnom uzbuđenom strujom praznog hoda. Koliko će iznositi struja generatora i napon na stezaljkama ako se generator optereti simetričnim omskim teretom  $5 \Omega/\text{fazi}$ ? Regulator brzine vrtnje pogonskog stroja održava konstantnu brzinu vrtnje.  
[ $I = 75 \text{ A}$ ;  $U = 650 \text{ V}$ ]
32. Sinkroni generator ima podatke na natpisnoj pločici: 4 MVA, 10,5 kV, 50 Hz, 48-polni,  $\cos \varphi = 0,8$ ,  $X_s = 5 \Omega/\text{fazi}$ . Generator je u kratkom spoju i vrti se brzinom 25 r/min nazivno uzbuđen. Kolika struja teče u namotima armature?  
[ $I_k = 2265 \text{ A}$ ]
33. Dva sinkrona generatora razlikuju se u sinkronoj reaktanciji. Sinkrona reaktancija  $G1$  veća je za 20% od one  $G2$ . Oba generatora su radila neopterećena s nazivnim naponom, a zatim su oba kratko spojena, bez promjene uzbuđne struje. U kojem će generatoru teći veća trajna struja kratkog spoja?  
[ $I_{kG1} = I_{kG2}$ ]
34. Sinkroni trofazni generator ima nazivne podatke: 50 MVA, 16 kV,  $\cos \varphi = 0,85$ . Kolika je nazivna struja?  
[ $I_n = 1804 \text{ A}$ ]
35. Trofazni sinkroni generator ima nazivne podatke: 10 MVA, 10 kV, 50 Hz,  $\cos \varphi = 0,8$ . Pri nazivnom opterećenju generatora turbina daje snagu od 8,3 MW. Ako generator radi na krutu mrežu s nazivnom strujom i  $\cos \varphi = 0,9$ , izračunajte:  
a) koliku snagu daje turbina,  
b) jalovu snagu koju daje generator,  
c) djelatnu (radnu) snagu koju daje generator u mrežu,  
d) prividnu snagu generatora.  
[a)  $P_1 = 9,34 \text{ MW}$ ; b)  $Q = 4,36 \text{ MVAr}$ ; c)  $P = 9 \text{ MW}$ ; d)  $S = 10 \text{ MVA}$ ]
36. Na natpisnoj pločici trofaznog sinkronog stroja piše: 6 MW, 6 kV, 50 Hz, 700 A,  $\cos \varphi = 0,85$ , spoj zvijezda. Je li to motor ili generator i kolika je korisnost za nazivnu radnu točku?  
[motor,  $\eta = 0,97$ ]
37. Sinkroni motor ima nazivne podatke: 5 MW, 10 kV i  $\cos \varphi = 0,9$ . Kolika je nazivna struja motora ako je korisnost 0,96?  
[ $I_n = 334 \text{ A}$ ]
38. Trofazni sinkroni motor ima sinkronu reaktanciju  $60 \Omega/\text{fazi}$ . Motor je priključen na mrežu linijskog napona od 380 V i vrti se sinkronom brzinom. Kolika će struja teći iz mreže i koliki će biti  $\cos \varphi$  ako je:  
a) neuzbuđen,  
b) uzbuđen na 220 V faznog napona (pri otvorenim stezaljkama),  
c) uzbuđen na 440 V faznog napona (pri otvorenim stezaljkama)?  
Motor je mehanički neopterećen, a omski otpor može se zanemariti.  
[a)  $I = 3,66 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0 \text{ kap.}$ ; b)  $I = 0 \text{ A}$ ; c)  $I = 3,66 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0 \text{ ind.}$ ]
39. Trofazni 4-polni sinkroni motor ima 100 kW, 380 V, 50 Hz,  $\eta = 0,92$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ , spoj zvijezda, opterećen je i uzbuđen tako da radi s nazivnom strujom i  $\cos \varphi = 1$ . Sinkrona reaktancija iznosi  $0,8 \Omega/\text{fazi}$ , a otpor se može zanemariti. Koliki je moment na vratilu motora?  
[ $M = 795,8 \text{ Nm}$ ]
40. Trofazni 6-polni sinkroni motor priključen je na mrežu 50 Hz. Ako su gubici trenja i ventilacije 25 W, a motor razvija moment 20 Nm, kolika je korisna snaga

i koliki je moment na vratilu?  
 $[P = 2069 \text{ W}, M = 19,8 \text{ Nm}]$

Uz točku 3.4.:

1. Što čini komutacijski sklop istosmjernog stroja?
2. Opišite ulogu glavnih namota istosmjernog stroja.
3. Čemu služe pomoćni polovi istosmjernog stroja?
4. Skicirajte načelni raspored pomoćnih namota u istosmjernom stroju.
5. O čemu ovisi inducirani napon istosmjernog stroja?
6. Što je koeficijent inducirano napona, a što koeficijent momenta istosmjernog stroja?
7. Kako nastaje reakcija armature u istosmjernom stroju i kakve ima posljedice?
8. Na koji način i kakvim sredstvima se ublažuju ili uklanjaju posljedice reakcije armature?
9. Kad istosmjerni stroj radi kao generator, a kad kao motor?
10. Koje su osnovne karakteristike istosmjernih generatora?
11. Skicirajte načelnu spojnu shemu istosmjernog neovisno uzbuđenoga generatora.
12. Skicirajte i objasnite karakteristiku praznog hoda i karakteristiku opterećenja istosmjernog neovisno uzbuđenoga generatora.
13. Objasnite tok unutarnje i vanjske karakteristike istosmjernog neovisno uzbuđenoga generatora.
14. Kako se regulira napon na stezaljkama istosmjernog neovisno uzbuđenoga generatora?
15. Skicirajte načelnu spojnu shemu istosmjernog paralelno uzbuđenoga generatora.
16. Nacrtajte i objasnite unutarnju i vanjsku karakteristiku istosmjernog paralelno uzbuđenoga generatora.
17. Kako se regulira napon na stezaljkama istosmjernog paralelno uzbuđenoga generatora?
18. Skicirajte načelnu spojnu shemu istosmjernog serijski uzbuđenoga generatora.
19. Nacrtajte i objasnite unutarnju i vanjsku karakteristiku istosmjernog serijski uzbuđenoga generatora.
20. Skicirajte načelnu spojnu shemu istosmjernog kompaundnoga (složeno uzbuđenog) generatora?
21. Nacrtajte i objasnite vanjske karakteristike istosmjernog kompaundnoga (složeno uzbuđenog) generatora.
22. Koji su nužni uvjeti da istosmjerni generatori rade paralelno?
23. Koji je postupak uključivanja istosmjernoga generatora u paralelni rad, a koji je postupak isključivanja s mreže?
24. Koje su osnovne karakteristike istosmjernih generatora?
25. Zašto je potreban pokretač (uputnik) za istosmjerni motor.?
26. Objasnite nastanak i ovisnost momenta istosmjernog motora.
27. Skicirajte načelnu spojnu shemu istosmjernog neovisno uzbuđenog motora.
28. Na koji se način može regulirati brzina vrtnje istosmjernom neovisno uzbuđenom motoru?
29. Na koji se način može mijenjati smjer vrtnje istosmjernom neovisno uzbuđenom motoru?
30. Skicirajte i objasnite vanjsku karakteristiku istosmjernog neovisno uzbuđenog motora.

31. Skicirajte načelnu spojnu shemu istosmjernog paralelno uzbuđenog motora.
32. Na koji se način može regulirati brzina vrtnje istosmjernom paralelno uzbuđenom motoru?
33. Na koji se način može mijenjati smjer vrtnje istosmjernom paralelno uzbuđenom motoru?
34. Skicirajte i objasnite vanjsku karakteristiku istosmjernog paralelno uzbuđenog motora.
35. Skicirajte načelnu spojnu shemu istosmjernog serijski uzbuđenog motora.
36. Na koji se način može regulirati brzina vrtnje istosmjernom serijski uzbuđenom motoru?
37. Na koji se način može mijenjati smjer vrtnje istosmjernom serijski uzbuđenom motoru?
38. Skicirajte i objasnite vanjsku karakteristiku istosmjernog serijski uzbuđenog motora.
39. Skicirajte načelnu spojnu shemu istosmjernog kompaundnog (mješovito uzbuđenog) motora.
40. Na koji se način može regulirati brzina vrtnje istosmjernom kompaundnom (mješovito uzbuđenom) motoru?
41. Na koji se način može mijenjati smjer vrtnje istosmjernom kompaundnom (mješovito uzbuđenom) motoru?
42. Skicirajte i objasnite vanjsku karakteristiku istosmjernog kompaundnog (mješovito uzbuđenog) motora.
43. Kako se mogu podijeliti gubici snage istosmjernog stroja?
44. Armatura istosmjernog stroja ima  $a = 4$  para paralelnih grana. Napon po grani je 200 V, a dopuštena struja po grani je 20 A. Kolika je dopuštena električna snaga na stezaljkama stroja?  
[ $P = 32 \text{ kW}$ ]
45. Istosmjerni generator vrti se brzinom  $800 \text{ r min}^{-1}$  i pri tome u neopterećenom stanju daje napon od 400 V. Koliki će napon generator dati ako se vrti brzinom  $900 \text{ r min}^{-1}$ , a uzbuđa se ne mijenja. Što će se dogoditi s gubicima u željezu rotora?  
[ $U' = 450 \text{ V}$ , gubici u rotoru rastu]
46. Istosmjerni neovisno uzbuđeni stroj priključen je na mrežu od 110 V. Otpor kruga armature iznosi  $0,1 \Omega$ , a pad napona na četkicama 2 V. Izračunajte struju armature i objasnite način rada (tokove energije) ako je inducirani napon:  
a) 105 V; b) 115V; c) 110 V.  
[a)  $I = 10 \text{ A}$ , motor; b)  $I = 30 \text{ A}$ , generator; c)  $I = 0 \text{ A}$ ]
47. Istosmjerni stroj s neovisnom uzбудom priključen je na mrežu od 220 V i u praznom hodu vrti se brzinom  $1250 \text{ r min}^{-1}$ . Opterećen kao motor uzima iz mreže struju 25 A i vrti se brzinom  $1180 \text{ r min}^{-1}$ . Kolikom brzinom se mora vrtjeti stroj kao generator da bi uz istu uzбудu u mrežu slao struju od 25 A?  
[ $n = 1320 \text{ r min}^{-1}$ ]
48. Istosmjerni generator s neovisnom uzбудom ima na stezaljkama napon od 110 V pri brzini vrtnje  $1380 \text{ r min}^{-1}$  i opterećenju od 10 kW. Kolika treba biti brzina vrtnje generatora da bi pri opterećenju od 2 kW i nepromijenjenoj uzbudbi napon na stezaljkama bio 110 V? (Otpor armature iznosi  $0,1 \Omega$ , a pad napona na četkicama 2 V).  
[ $n = 1297 \text{ r min}^{-1}$ ]

49. Istosmjerni generator s paralelnom uzbuđom, 22 kW, 220 V ima otpor uzbuđnog namota  $55 \Omega$ , a armature  $0,1 \Omega$ . Koliki je inducirani napon pri nazivnom opterećenju generatora?  
[ $E = 232 \text{ V}$ ]
50. Neopterećeni istosmjerni motor priključen na nazivni napon vrti se brzinom  $1400 \text{ r min}^{-1}$ . Kojom će se brzinom vrtjeti ako se promijeni uzbuđa tako da se tok smanji na  $70 \%$ , a napon povisi za  $10 \%$ .  
[ $n' = 2200 \text{ r min}^{-1}$ ]
51. Istosmjernom neovisno uzbuđenom motoru koji se na mreži napona od  $400 \text{ V}$  vrti brzinom  $1000 \text{ r min}^{-1}$  treba podići brzinu na  $1300 \text{ r min}^{-1}$  ne dirajući uzbuđu. Koliko iznosi potrebiti napon?  
[ $U' = 520 \text{ V}$ ]
52. Istosmjerni motor s neovisnom uzbuđom ima nazivne podatke:  $14 \text{ kW}$ ,  $220 \text{ V}$ ,  $1500 \text{ r min}^{-1}$ , korisnost  $0,85$ , otpor namota armature  $0,2 \Omega$  (mjereno u pogonski toplom stanju). Pad napona na četkicama iznosi  $2 \text{ V}$ . Brzinu vrtnje motora, opterećenog nazivnim momentom, treba regulirati u rasponu od  $900$  do  $1500 \text{ r min}^{-1}$ . U kojem rasponu treba osigurati promjenu napona priključenog na armaturu?  
[ $U = 138,8 \text{ V}$ ;  $220 \text{ V}$ ]
53. Istosmjerni motor s neovisnom uzbuđom priključen na napon od  $150 \text{ V}$ , uzima iz mreže struju  $120 \text{ A}$  svladavajući moment tereta brzinom vrtnje  $1103 \text{ r min}^{-1}$ . Moment tereta nije ovisan o brzini vrtnje. Otpor armature motora iznosi  $0,03 \Omega$ , a zanemaruje se reakcija armature i pad napona na četkicama. Kolikom će brzinom vrtnje motor svladavati isti moment tereta ako se napon smanji na  $200 \text{ V}$ ? Koliko će (u %) iznositi smanjenje predane snage na osovini pri tako sniženom naponu?  
[ $n = 879 \text{ r min}^{-1}$ ,  $\Delta P = -20,3 \%$ ]
54. Istosmjerni motor s paralelnom uzbuđom priključen je na mrežu i vrti se brzinom  $n$ . U uzbuđnom krugu nalazi se otpornik za regulaciju. Treba li njegov otpor povećati ili smanjiti da bi povećali brzinu vrtnje motora?  
[povećati]
55. Istosmjerni motor s paralelnom uzbuđom ima nazivne podatke:  $220 \text{ V}$ ,  $25 \text{ A}$ ,  $1400 \text{ r min}^{-1}$ , otpor armature  $0,5 \Omega$ , otpor uzbuđnog namota  $110 \Omega$ , sve mjereno u pogonski toplom stanju. Koliki je razvijeni moment motora?  
[ $M = 32,4 \text{ Nm}$ ]
56. Istosmjerni motor s porednom uzbuđom koji ima otpor armature i četkica  $0,5 \Omega$ , a otpor uzbuđnog namota  $110 \Omega$ , vrti se brzinom  $1500 \text{ r min}^{-1}$  i uzima iz mreže napona od  $220 \text{ V}$  struju od  $20 \text{ A}$ . Koliku će brzinu vrtnje postići motor ako je struja iz mreže (opterećenja)  $15 \text{ A}$ , a u uzbuđni namot je dodan otpornik od  $30 \Omega$ ? Pretpostavlja se da je magnetski tok proporcionalan uzbuđnoj struji (nezasićen stroj).  
[ $n = 1930 \text{ r min}^{-1}$ ]
57. Istosmjerni motor sa serijskom uzbuđom na istosmjernoj mreži od  $110 \text{ V}$  opterećen je tako da uzima  $60 \text{ A}$  i vrti se s  $900 \text{ r min}^{-1}$ . Motor je nezasićen, otpor svih u seriju spojenih namota je  $0,2 \Omega$ , a pad napona na četkicama je  $2 \text{ V}$ . Koliki je inducirani napon i kojom će se brzinom vrtjeti motor, ako se opterećenje smanji tako da uzima struju  $45 \text{ A}$ ? Reakcija armature može se zanemariti.  
[ $n = 1237,5 \text{ r min}^{-1}$ ]
58. Istosmjerni motor sa serijskom uzbuđom ima nazivne podatke:  $50 \text{ kW}$ ,  $500 \text{ V}$ ,  $1000 \text{ r min}^{-1}$ , faktor korisnosti  $0,91$ , otpor uzbuđnog namota  $0,1 \Omega$ , otpor



armaturnog namota  $0,15 \Omega$  i pad napona na četkicama 2 V. Ako se motor priključi na napon od 250 V i opteretit nazivnim momentom, koliko iznosi struja i brzina vrtnje motora?

[ $I = 109,9 \text{ A}$ ;  $n = 469 \text{ r min}^{-1}$ ]

59. Istosmjerni motor sa serijskom uzбудom na mreži od 440 V vrti se brzinom  $2500 \text{ r min}^{-1}$  i uzima struju od 15 A. Zbog promjene opterećenja brzina vrtnje se smanjila na  $1800 \text{ r min}^{-1}$ . Motor je nezasićen, otpor svih u seriju spojenih namota je  $1,3 \Omega$ , a pad napona na četkicama je 2V. Koliko iznosi struja iz mreže i je li se opterećenje povećalo ili smanjilo?

[ $I = 10,9 \text{ A}$ ; povećalo se]

60. Istosmjerni motori s neovisnom, paralelnom i serijskom uzбудom vrte se jednakom brzinom pri jednakom opterećenju. Ako se opterećenje smanji na 50%:
- najviše će porasti brzina vrtnje istosmjernom motoru s paralelnom uzбудom,
  - najviše će porasti brzina vrtnje istosmjernom motoru s neovisnom uzбудom,
  - najviše će porasti brzina vrtnje istosmjernom motoru sa serijskom uzбудom,
  - svim motorima brzina će opasti približno na polovicu (ovisno o zasićenju),
  - brzina ne ovisi o teretu ako se zanemari utjecaj zasićenja.

Odredite točne odgovore.

[c]

Uz točku 3.5.:

- Čemu služe i na kojem načelu rade davači položaja (selsini)?
- Skicirajte i objasnite rad tahogeneratora.
- Na tahogenerator s permanentnim magnetima unutarnjeg otpora od  $100 \Omega$  priključen je voltmetar unutarnjeg otpora od  $1.000 \Omega$ . Pri brzini vrtnje od  $1.000 \text{ r min}^{-1}$  voltmetar je pokazao napon od 80 V. U brzini vrtnje od  $1.500 \text{ r min}^{-1}$  koliki je napon u tahogeneratoru i napon koji pokazuje voltmetar?  
[132 V, 120 V]
- Tahogenerator karakteriziraju sljedeća svojstva:
  - napon mu je proporcionalan kutu zakreta;
  - može se izvesti kao istosmjerni ili kao izmjenični generator;
  - služi za mjerenje brzine vrtnje;
  - da bi precizno mjerio fizikalnu veličinu, treba ga što više opteretiti instrumentima. Zaokružite točne odgovore.  
[b) i c)]
- Statori su dva jednaka davača položaja spojeni. Rotor prvoga napajan je s 100 V, 400 Hz i postavljen u položaj  $+30^\circ$ . Koliki će biti napon u rotoru drugoga ako se os tom rotoru nalazi u položaju  $+45^\circ$ ? U kojem će položaju rotora prijemnika napon biti nula? Strojevi su dvopolni.  
[96,6 V;  $120^\circ$ ]
- Podatke iz dvopolnog selsina davača treba dovesti dvopolnom selsinu prijammiku. Rotor davača priključen na izvor napona od 120 V, 400 Hz. Ako se rotor davača zakrene za  $+65^\circ$ , a rotor prijammika je zakrenut za  $-20^\circ$  i otvoren, koliki će biti napon u rotoru prijammika? U koji će se položaj postaviti ako se priključi na isti izvor kojim se napaja davač?  
[10,46 V;  $65^\circ$ ]

Uz točku 3.6.:

1. Što su ispravljači ili usmjerivači?
2. Opišite poluvodičku silicijsku diodu.
3. Nacrtajte i opišite karakteristiku poluvodičke silicijske diode.
4. Nacrtajte shemu jednofaznog spoja i opišite poluvalno ispravljanje jednofazne izmjenične struje.
5. Nacrtajte shemu jednofaznog mosnog spoja i opišite punovalno ispravljanje jednofazne izmjenične struje.
6. Nacrtajte shemu trofaznog spoja i opišite poluvalno ispravljanje trofazne izmjenične struje.
7. Nacrtajte shemu trofaznog mosnog spoja i opišite punovalno ispravljanje trofazne izmjenične struje.
8. Opišite tiristor.
9. Skicirajte i opišite karakteristiku tiristora.
10. Opišite djelovanje tiristora s pomoću releja i diode.
11. Opišite regulaciju napona promjenom faze otvaranja tiristora.
12. Skicirajte shemu spoja i opišite upravljanje i regulaciju jednozanog izmjeničnog napona tiristorom.
13. Skicirajte shemu spoja i opišite trofazni tiristorski ispravljač.

## 4. IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU

Proizvodnja električne energije na brodu obavlja se u električnim centralama (elektranama), s pomoću pojedinačnih agregata, a u manjoj količini osigurava se iz akumulatorskih baterija, pa i priključkom na kopno.

Dimenzioniranje izvora električne energije na brodu određuje se tzv. *bilancom električne energije*, tj. potrebna instalirana snaga izvora računa se uzimajući u obzir različita pogonska stanja broda. To se odnosi na plovidbu, manevriranje, krcanje tereta u luci vlastitim vitlima, mirovanje u luci itd., posebno za hladne, a posebno za tople zone plovidbe, za rad danju ili noću. U izvanrednim prilikama električnu energiju osigurava posebni izvor koji mora napajati trošila prije svega prema zahtjevima sigurnosti broda.

Pri proračunu izvora električne energije na brodu polazi se od tehničkih i iskustvenih podataka: instalirana snaga trošila, faktor istodobnosti, vjerojatna vršna snaga itd., a sve to uzimajući u obzir dopušteni pad napona, odnosno gubitke u brodskoj mreži.

Danas su trofazni izvori električne energije gotovo potpuno potisnuli istosmjernu (na tankerima, a zatim i na većim trgovačkim brodovima). Na temelju novih konstrukcija sinkronih generatora s vrlo brzom regulacijom napona, u brodove se danas ugrađuju veliki i jednostavni indukcijski (asinkroni) motori za pogon gotovo svih radnih mehanizama. Istosmjerni izvor, kao glavni izvor električne energije, rabi se još uvijek na nekim ribarskim brodovima, plovnim dizalicama i objektima koji se njime služe za propulziju.

Algebarsko zbrajanje potrošnje električne energije u trofaznoj brodskoj mreži nije ispravno, pa ni zbrajanje vrijednosti samo djelatnih snaga, jer su trenutna vrijednost i faktor snage svakog trošila vremenski različite. Prakticira se izračunavanje prividne snage  $S$  svakog trošila primjenom izraza:

$$S = P \cdot \cos \varphi, \quad (4.1)$$

gdje je  $P$  djelatna snaga trošila. Pojedinačne se vrijednosti prividnih snaga zbrajaju, a rezultirajući faktor snage računa se iz zbroja vrijednosti djelatnih snaga i zbroja prividnih snaga.

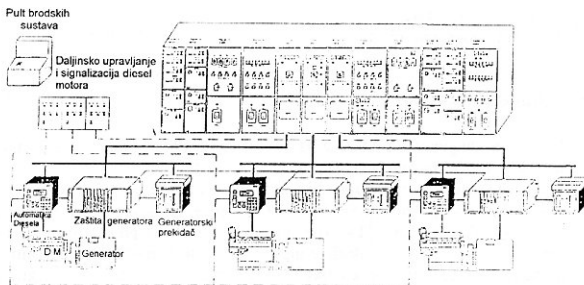
Takav je postupak dugotrajan, a rezultat nesiguran poradi mnogih pretpostavljenih vrijednosti. Zbog toga neke zemlje (SAD i Engleska) u račun uzimaju zbroj djelatnih snaga grupe trošila ili sva trošila na brodu zajedno (prema statističkim podacima iz prakse), procjenjuju rezultirajući faktor snage i na temelju toga određuju snagu izvora, a neke zemlje (Njemačka i Hrvatska) najčešće grupiraju trošila na brodu i zbrajaju njihove nazivne vrijednosti u kW, pa dobivene rezultate ispravljaju iskustvenim podacima, koji obuhvaćaju faktor istodobnosti, faktor opterećenja i faktor posade.

Za trofazne mreže odabire se u pravilu napon od 3x380 V, 50 Hz (europski sustav) ili 3x440 V, 60 Hz (američki sustav), a za električni pogon brodova (propulziju) rabe se i naponi do 10 kV, 60 Hz. Klasifikacijska društva dopuštaju

svojim pravilima promjene nazivnog napona  $\pm 2,5\%$  u području od 20 do 100% nazivnog opterećenja. Za vrijeme prijelaznih pojava izazvanih udarcima struje opterećenja, dopušta se trenutni pad napona i do 50% nazivne vrijednosti napona na stezaljkama generatora. Pri promjeni faktora snage od 0,3 do 0,7 dopušta se pad napona i do 20% uz vraćanje na razliku od 3% napona tijekom 3 sekunde.

Redovito se električna energija proizvodi na jednomu mjestu, što znači da brod ima jednu elektranu. Međutim, na brodovima građenim za posebne namjene (za spašavanje, gašenje požara, ratni brodovi i sl.), gdje je sigurnost električnog sustava od presudne važnosti, elektranu se može podijeliti u dva odvojena dijela.

Na slici 4.1.1. vidi se pojednostavnjena shema glavne sklopne ploče, odnosno brodske elektrane s tri generatorska polja. Na toj ploči smješteni su međusabirnički prekidač, kojim se generatori mogu međusobno spojiti, generatorski prekidač za svaki generator, napojni prekidači trošila i prekidač priključka na kopno. Da bi se povećala stabilnost brodske mreže, prekidači su selektivno odabrani.



Sl. 4.1.1. Načelna shema glavne sklopne ploče na brodu

Elektrana, kao srce brodskega električnog sustava, čini skup agregata sa svim uređajima potrebnima za njihov rad i funkcije koje osiguravaju upravljanje i kontrolu rada. Agregatom se smatra dizelski motor i električni generator s pripadajućom opremom, a regulacija frekvencije, regulacija napona, praćenje opterećenja, raspodjela opterećenja, zaštita motora i generatora i slično, moraju osigurati sigurnu, kvalitetnu i stabilnu proizvodnju električne energije.

Osim dizelskog motora, za pogon električnog generatora upotrebljava se i plinska ili parna turbina, pa i osovina brodskeg propelera.

U brodove se ugrađuju *osnovni i pomoćni izvori električne energije*.

*Osnovni izvori* su generatori koji osiguravaju električnu energiju, preko glavne sklopne ploče, svim električnim trošilima na brodu u normalnim plovidbenim uvjetima.

*Pomoćni izvori* električne energije, tzv. *izvori za nužno napajanje*, uključuju se onda kad na glavnoj sklopnoj ploči nestane električne energije ili se neko trošilo na brodu mora napajati iz posebnog izvora.

## 4.1. Osnovni izvori električne energije

Na svakom brodu moraju se osigurati najmanje dva osnovna izvora. Budući da su to redovito električni generatori, tada najmanje jedan od njih mora imati vlastiti neovisni pogon. Iznimno, na brodovima ograničenog područja plovidbe (osim putničkih brodova) dopušta se gradnja samo jednog generatora, i to ako je njegova snaga manja od 20 kW. Prema tome, osnovni izvor može imati:

- dva generatora ( $1 \times 100\% P_G + 1 \times 100\% P_G$  kao rezerva),
- tri generatora ( $2 \times 50\% P_G + 1 \times 50\% P_G$  kao rezerva),
- više od tri generatora ( $n \times P_n$ ,  $P_n = P_G \cdot 1/n$ , gdje je  $n = 4, 5, \dots$  s rezervom prema potrebi).

Ovisno o načinu pokretanja, osnovni izvori električne energije na brodu dijele se na:

- turbinske generatore,
- dizelske generatore,
- osovinske generatore.

### 4.1.1. Turbinski generatori

Kad na brodu generator pokreće parna ili plinska turbina, tada se takav izvor električne energije zove *turbinski generator*.

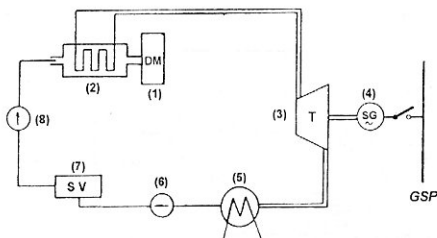
Turbinski generatori ugrađuju se u brod onda kad brod ima proizvodnju pare za pogon turbina za propulziju ili višak tehnološke pare, pa se dio te pare rabi i za proizvodnju električne energije. Također, na brodu koji ima propulzijski dizelski motor velike snage, toplina ispušnih plinova tog motora može se iskoristiti za stvaranje pare, koja se onda preko turbinskoga generatora pretvara u električnu energiju (tzv. *utilizacijski generator*).

Koristeći se temperaturom ispušnog plina propulzijskog dizelskog motora, *utilizacijski generator* praktički bez troškova goriva proizvodi električnu energiju. Od ukupne energije goriva, propulzijski dizelski motor pretvori cca 40% u koristan rad, 34% toplinske energije odvodi se ispušnim plinovima, a 26% gubi se na rashladnim sredstvima i na zračenju.

Utilizacijski generator može osigurati trošilima na brodu, preko glavne sklopne ploče (GSP), električnu snagu koja iznosi od 5 do 13% snage propulzijskog dizelskog motora. Prvi iznos odnosi se za suvremeni sporohodni dvotaktni dizelski motori s niskom temperaturom ispušnih plinova, a drugi za srednjohodni četverotaktni dizelski motori s vrlo visokom temperaturom ispušnih plinova. Dosadašnje analize i rezultati iz prakse pokazuju da se utilizacijski generator može ekonomično primijeniti na brodovima s propulzijskim dizelskim motorom snage veće od 7 MW i da se svi troškovi izgradnje utilizacijskog postrojenja isplate u razdoblju od 2 do 3 godine.

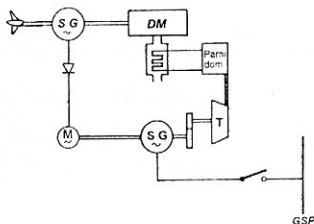
Na slici 4.1.2. predočena je načelna shema spoja brodskog utilizacijskog turbinskoga generatora. Ispušni plinovi dizelskog motora (DM) (1) skupljaju se u utilizacijski kotao (2), gdje predaju toplinsku energiju parnom kružnom toku. Vodena para preko višestupne turbine (T) (3) pokreće sinkroni generator (SG) (4), a preko kondenzatora (5) i kondenzatne pumpe (6) voda se dovodi u spremnik napojne vode s

otplinjačem (SV) (7). S toga mjesta napojnom pumpom (8) voda se ponovno dovodi u utilizacijski kotao (2).



Sl. 4.1.2. Načelna shema spoja brodskog utilizacijskoga generatora

Na suvremenim brodovima često se električna energija proizvodi radom utilizacijskoga generatora i osovinskoga generatora, kako je shematski predočeno na slici 4.1.3. U plovidbi, osnovnu električnu energiju potrebnu brodskim trošilima proizvodi utilizacijski generator, a dodatnu električnu energiju osigurava osovinski generator.



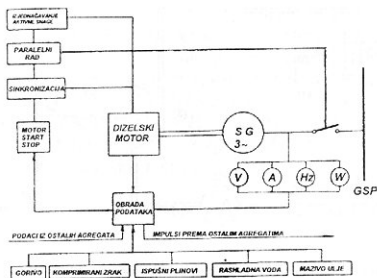
Sl. 4.1.3. Blokowska shema brodske elektrane s utilizacijskim i osovinskim generatorom

U najnovije vrijeme u brodove se ugrađuju i plinske turbine za pogon električnih generatora (npr. ratni brodovi i podmornice), čime se dobilo na nosivosti i prostoru, a povećana je i ekonomičnost pogona.

#### 4.1.2. Dizelski generatori

Dizelski generator je agregat koji se sastoji od dizelskog motora, generatora, postolja te upravljačkih i pomoćnih uređaja. To je najčešći izvor električne energije na brodu. Pretvarajući energiju tekućeg goriva, najčešće lake nafte, u električnu energiju, može postići manje ili veće brzine vrtnje, pri čemu su brzohodni dizelski generatori oni s brzinama vrtnje većima od  $1000 \text{ r min}^{-1}$ .

Na slici 4.1.4. predočena je načelna shema jednog brodskog agregata kod kojega dizelski motor pokreće trofazni sinkroni generator.



Sl. 4.1.4. Načelna shema jednog brodskog agregata

Općenito se dizelski motor agregata može se definirati prema snazi sinkronoga generatora, odnosno bilanci električne energije, primjenom izraza

$$P_{DM} = \frac{P_G \cdot \cos \varphi_G}{\eta_G}, \quad (4.2)$$

gdje je  $P_{DM}$  snaga dizelskog motora u kW,  $P_G$  snaga sinkronoga generatora u kVA,  $\cos \varphi_G$  faktor snage sinkronoga generatora, a  $\eta_G$  korisnost sinkronoga generatora.

Međutim, da bi se točno definirao dizelski motor, nužno mu je definirati način pokretanja, broj okretaja, regulacijske krugove, stupanj automatizacije, način hlađenja i zaštitu, odnosno udovoljiti svim propisima za njegovu gradnju.

Pokretanje dizelskog motora može se obaviti električnim pokretačima (za manje jedinice), odnosno zračnim motorima ili izravnim ubacivanjem komprimiranog zraka u cilindre motora.

Dizelske motore karakterizira mali broj okretaja pa izravno pokreću sinkrone generatore bez uporabe reduktora. Međutim, oni imaju nejednoliki broj okretaja, koji je definiran stupnjem nejednolikosti:

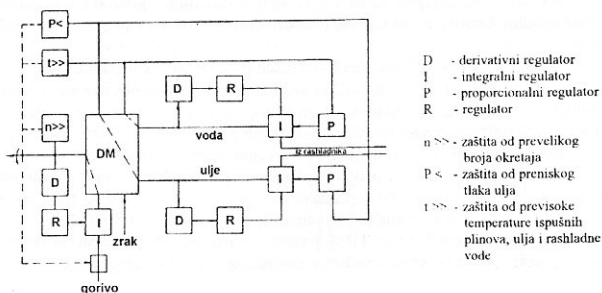
$$\zeta = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{sr}} \quad (4.3)$$

gdje je  $n_{\max} - n_{\min}$  nejednolikost broja okretaja zbog pulzirajućeg momenta dizelskog motora, a  $n_{sr} = \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2}$  srednji broj okretaja.

Stupanj nejednolikosti  $\zeta$  iznosi od 1/100 do 1/300; pod jednakim uvjetima je manji kod dizelskog motora s većim brojem cilindara, a može se smanjiti povećanjem zamašnjaka.

Budući da dizelski motori često rade u trajnom radu, vrlo je važna njihova specifična potrošnja goriva. Redovito, dizelski motori s manjom specifičnom potrošnjom goriva uvijek su skuplji, ali uložena sredstva vraćaju se brzo kroz uštedu u gorivu. Pri tome valja znati da u području opterećenja većem od 50% nazivne snage, oni imaju konstantnu potrošnju, a pri opterećenju manjem od 50% nazivne snage specifična potrošnja znatno raste sa smanjenjem opterećenja.

Neovisno o razini automatizacije elektrane, dizelski motor ima vlastitu automatizaciju regulacije hlađenja, podmazivanja, dobave goriva, pokretanja i zaustavljanja, pa i vlastitu zaštitu. Načelna shema regulacije i zaštite jednog dizelskog motora predočena je na slici 4.1.5.



Sl. 4.1.5. Načelna shema regulacije i zaštite dizelskog motora

Svi regulatori koji su danas u uporabi na dizelskom motoru, a prikazani na slici 4.1.5., imaju ugrađeno proporcionalno (P), integralno (I) i derivativno (D) djelovanje. Proporcionalno djelovanje regulatoru daje brzinu odziva, integralno točnost djelovanja, a derivativno djeluje samo kratkotrajno pri promjenama. Ta se djelovanja mogu po želji uključiti ili isključiti, odnosno da se mijenjati zadani parametri pa se prema tome dobiva i određena karakteristika.

Da bi dizelski motor mogao sigurno raditi, odnosno da bi se onemogućio njegov rad kad zadani parametri prekorače dopuštene vrijednosti, bitna je ugradnja zaštite. Zaštita dizelskog motora mora uvijek djelovati pri prevelikom broju okretaja, prenikom tlaku ulja za podmazivanje i previsokoj temperaturi ispušnih plinova, ulja i rashladne vode. Ta zaštita može se riješiti na samom dizelskom motoru ili u sastavu cijelog sustava zaštite brodske elektrane.

Regulacijski krug goriva redovito je dio sustava automatizacije na razini elektrane, pa se s toga mjesta održava konstantna frekvencija sinkronoga generatora, odnosno frekvencija brodske mreže. Međutim, kad je taj regulacijski krug samo dio vlastite automatizacije dizelskog motora, tada se frekvencija regulira automatskim regulatorima brzine vrtnje, koji na osnovi mjerenja brzine vrtnje na vratilu dizelskog motora i na načelu povratne veze djeluju na količinu goriva. Takva je regulacija mehaničko-hidrauličkog tipa. Danas se sve više susreću i tzv. električni ili elektronički regulatori koji imaju izvršne elemente i povratne veze po brzini ili opterećenju električnog tipa.

Hlađenje dizelskog motora rješava se rashladnim medijem koji kruži u zatvorenom sustavu. To se postiže s pomoću zračnih rashladnika, rashladnika hlađenih morem ili s pomoću ventilatora.

Veličina dizelskog motora za pogon glavnih generatora iznosi od nekoliko stotina do nekoliko tisuća kW. Korisni radni vijek dizelskog motora računa se da je cca 12 godina, ali se on znatno produžava uz pravilno podmazivanje, hlađenje i pridržavanje uputa proizvođača, odnosno uz redovito održavanje.



Električni dio dizelskoga generatora na brodu može biti *istosmjerni* ili *izmjenični* generator.

*Istosmjerni* generatori služe za napajanje istosmjerne mreže, a također se rabe kao izvori električne energije za nužno napajanje, kao motor-generatori za punjenje akumulatorskih baterija ili za napajanje specijalnih trošila i za pogon propulzijskih uređaja.

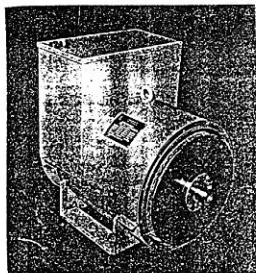
Za napajanje istosmjerne mreže najčešće je u uporabi kompaundni generator. Napon viši od  $\pm 2,5\%$  regulira se obično automatskim regulatorom napona, a propisi određuju da napon na stezaljkama istosmjernog generatora zbog naglih promjena opterećenja do 50% nazivne vrijednosti ne smije porasti više od 4%. Brzina vrtnje takva dizelskoga generatora pri naglom rasterećenju ne smije porasti više od 10%.

Od najveće je važnosti podjela opterećenja pri paralelnom radu istosmjernih generatora. To zahtijeva dobro poznavanje vanjskih karakteristika istosmjernih generatora, jer se mora zajamčiti potpuna sigurnost rada svih paralelno spojenih generatora u području od 20 do 110% nazivne vrijednosti struje. Često je potrebno osigurati paralelni rad posebno izvedenim ekvipotencijalnim spojevima.

*Izmjenični* brodski trofazni generatori su uvijek sinkroni, najčešće spojeni u zvijezdu s uzemljenim zvjezdištem, te moraju imati automatsku regulaciju napona koja garantira održavanje napona na njegovim stezaljkama, odnosno brodske mreže u granicama  $\pm 2,5\%$  (brzim regulatorima koji djeluju na uzbudu).

Na brodu su uglavnom tri tipa sinkronih generatora: generatori s automatskom regulacijom napona, samouzbudni kompaundirani generatori i samouzbudni kompaundirani generatori s dodatnom automatskom regulacijom napona.

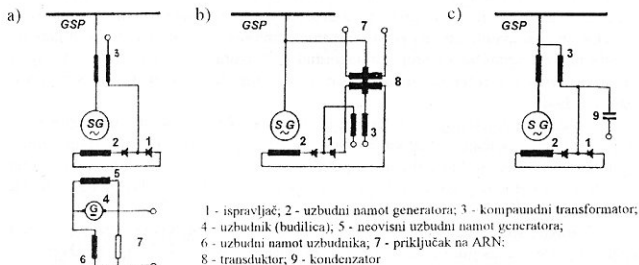
Samouzbudni kompaundirani generatori su redovito beskontaktni (bez četkica), kao na slici 4.1.6., a odlikuju se jednostavnošću i prikladnim karakteristikama te vrlo brзом regulacijom napona (od 0,09 do 0,12 s) pri naglim promjenama opterećenja. Ti generatori imaju struju uzbude ovisnu o naponu stezaljka i o struji armature. Budući da je struja uzbude istosmjerna, to u uzbuđnom strujnom krugu generatori imaju ispravljački sklop.



Sl. 4.1.6. Fotografija beskontaktnog sinkronoga generatora na brodu

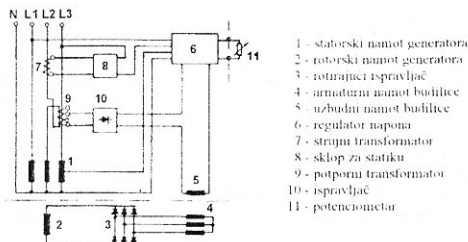
Na slici 4.1.7. shematski je predložen načelni spoj samouzbudnih kompaundiranih generatora s tri tipa automatskih regulatora napona (ARN). Održavanje konstantnog napona u brodskoj mreži neovisno o promjeni opterećenja

zahtijeva uz  $\cos \varphi = 0,8$  povećanje uzbudne struje na vrijednost dvostruko veću od uzbudne struje u praznom hodu, a za veća induktivna opterećenja to je povećanje još veće. Struja opterećenja djeluje izravno na promjenu uzbudne struje preko transformatora u uzbudnom strujnom krugu. Odgovarajućim dimenziranjem generatora utjecaj struje opterećenja i faktora snage smanjuje se na minimum, a utjecaj se promjene otpora, zbog promjene temperature u krugu samouzbuđe, isključuje. Induktivni se otpor tih spojeva mijenja linearno s promjenom frekvencije pa je struja uzbuđe neovisna o frekvenciji, a napon stezaljka generatora linearno je proporcionalan uzbudnoj struji.



Sl. 4.1.7. Načelna shema spoja samouzbuđnih kompaundiranih generatora

U brodove se često ugrađuju samouzbuđni beskontaktni sinkroni generatori koji se sastoje od glavnoga generatora s istaknutim polovima na rotoru, a na istoj osovine s rotorom glavnoga generatora nalazi se i rotor budilice (uzbudnika) bez četkica s punovalnim trofaznim rotirajućim ispravljačem. Polovi budilice imaju uzbudni namot koji se napaja iz uzbuđnog uređaja. Da bi se osigurao potrebni remanentni napon, u jedan pol budilice ugrađen je permanentni magnet. Osnovna blok-shema kompletnog uzbuđnog sustava takva generatora prikazana je na slici 4.1.8. Taj uzbuđni sustav osigurava samouzbuđu, regulaciju uzbuđe ovisno o opterećenju, trajanje struje kratkog spoja i paralelni rad generatora s drugim generatorom na brodskoj mreži.



Sl. 4.1.8. Blok shema uzbuđnog sustava beskontaktnog sinkronoga generatora

Uzbudni sustav generatora na slici 4.1.8. sastoji se od tri elementa:

- regulatora napona,
- strujne potpore,
- sklopa za statiku.

*Regulator napona* (6) regulira napon na stezaljkama generatora preko uzbudne struje budilice. Regulacija uzbudne struje obavlja se preko tiristorskog ispravljača koji se napaja iz jedne faze generatora. Napon napajanja jednak je polovici faznog napona. Napajanje tiristorskog ispravljača ide preko filtra koji služi za uklanjanje radiosmetnji proizvedenih u regulatoru. Vrijeme vođenja tiristorskog ispravljača određeno je kutom paljenja iz impulsnog uređaja s tranzistorima, a kut paljenja ovisi o ugođenom odstupanju napona na stezaljkama generatora. Stvarna vrijednost napona (linijski napon) ispravlja se preko transformatora i ispravljača u istosmjerni napon koji se uspoređuje s referentnim naponom. Referentni napon ostvaren je s pomoću Zenerove diode.

Poredba izmjenjenog i referentnog napona obavlja se u tranzistorskom diferencijalnom pojačalu. Razlika napona uvjetuje pozitivni ili negativni signal pogriješke koji određuje kut paljenja impulsnog uređaja. Signal povratne veze uzima se sa stezaljka uzbudnog namota. U elemente povratne veze pripada i potencijometar za regulaciju stabilnosti.

Karakteristika regulacije napona je frekvencijski neovisna. Pri pokretanju generatora mora se osigurati da napon remanencije stvori nazivni napon. Zbog toga je, pri uzbudivanju generatora, tiristorski ispravljač premošten preko zatvorenog kontakta releja. Za to vrijeme remanentni se napon ispravlja i izravno dovodi na uzbudni namot budilice (5). Kad napon na stezaljkama generatora dostigne namješteni iznos, relej otvara kontakt i regulator preuzima upravljanje tiristorskog ispravljača.

Regulator u svom sastavu ima potencijometar (11) za ugadanje opsega vanjske regulacije.

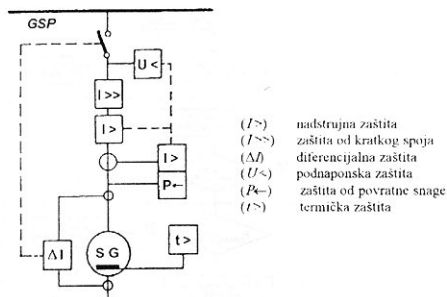
*Strujna potpora* sastoji se od potpornog transformatora (9) i poluvodičkog ispravljača (10), a zajedno s regulatorom napona (6) napaja uzbudni namot budilice (5). Njezina je svrha da potpomaže regulator napona u teškim radnim režimima, kao što je preopterećenje i zalet asinkronih motora. Također, strujnom potporom osigurava se određena trajna struja kratkog spoja (3 do 5 puta nazivne struje).

*Sklop za statiku* (8) omogućuje razdiobu jalovog opterećenja između generatora u paralelnom radu. Spojen je na sekundar strujnog transformatora (7), a sekundarna struja iznosi 0,6 do 1 A pri nazivnom opterećenju. To je uobičajeni sklop za statiku, a pad napona može se regulirati do 5% nazivnog napona.

Kad dva generatora rade paralelno, a struja jednog od njih postane prevelika, tada između generatora poteče struja izjednačenja. To se u generatora s povećanom uzbudnom strujom uočava kao induktivno opterećenje, a u drugoga kao kapacitivno opterećenje. Sklop za paralelni rad smanjuje uzbudnu struju generatora s induktivnim opterećenjem i tako smanjuje struju izjednačenja između generatora.

Brodski sinkroni generatori imaju električne elemente koji ih štite od unutarnjih i vanjskih smetnja. Ta je zaštita po svom opsegu definirana veličinom generatora, tako da se manji generatori štite manjim brojem zaštita, a veći većim

brojem. Neovisno o tome, električna zaštita mora pouzdano i točno proraditi (kako bi se osigurala selektivnost). Elementi električne zaštite načelno su shematski predloženi na slici 4.1.9.



Sl. 4.1.9. Elementi električne zaštite brodskog sinkronoga generatora

Pokretanje dizelskoga generatora obavlja se prema točno utvrđenom pravilu. Ono počinje prvo pokretanjem dizelskog motora, kojim se pokrene osovina rotora sinkronoga generatora. Da bi se dizelski motor pokrenuo, on ne smije biti hladan (u stanju pripravnosti se grije!), a posebnom uljnom pumpom osigurava se ulje za normalan rad ležaja koljeničaste osovine već od samog starta. Ta pumpa prepodmazivanja isključuje se čim broj okretaja dizelskog motora prekorači neku zadanu vrijednost, odnosno kad glavna pumpa postigne određeni minimalni tlak.

Pokretanje dizelskog motora obavlja se s pomoću impulsa kojeg šalje jedinica za obradu podataka. Na slici 4.1.10. vidi se dijagram toka za jedan primjer pokretanja dizelskog motora.

Svaka faza pokretanja je pod nadzorom tako da automatika u slučaju neuspjelog pokretanja signalizira mjesto i uzrok kvara. Pri tome, prema dijagramu toka na slici 4.1.10., pojedini alarmi znače :

ALARM 1 - sadrži sve mjere koje onemogućuju nenamjerno pokretanje agregata dok se na njemu obavljaju radovi;

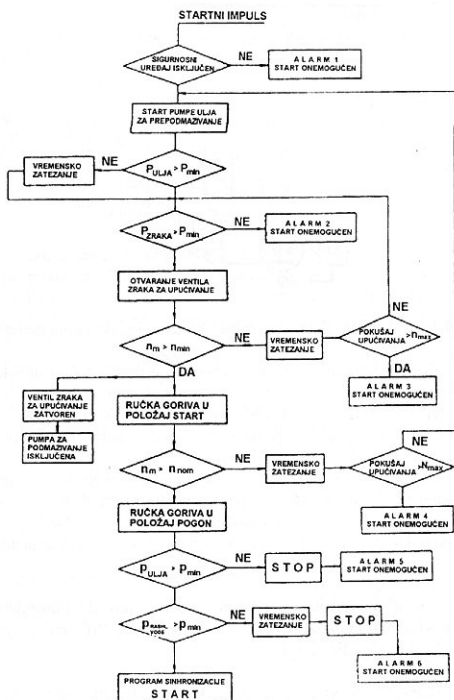
ALARM 2 - signalizira prekid dovoda zraka između spremnika zraka i cjevovoda zraka za pokretanje pomoćnih motora pa tlak zraka u sustavu zraka za pokretanje nije dovoljan da se postigne minimalna brzina paljenja dizelskog motora (npr. zatvoren ventil na spremniku zraka ili je negdje prekid);

ALARM 3 - signalizira neispravnost sustava zraka za pokretanje na samom dizelskom motoru, tj. neispravnost uputnih ventila na pojedinim cilindrima, razvodnog cjevovoda zraka ili razvodnika zraka za pokretanje (npr. neispravnost usisnih i ispušnih ventila pojedinih cilindara ili slabo brtvljenje glava motora);

ALARM 4 - signalizira neispravnost u sustavu dobave goriva, tj. u dovodnom cjevovodu goriva, pumpama ili rasprskaćima goriva;

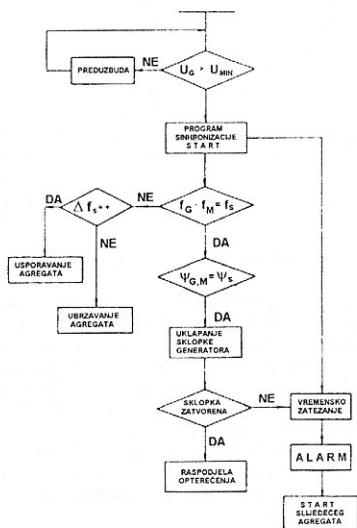
ALARM 5 - signalizira da je tlak ulja u sustavu za podmazivanje manji od dopuštenog minimalnog tlaka;

ALARM 6 - signalizira da je tlak rashladne vode u sustavu za hlađenje dizelskog motora manji od dopuštenog minimalnog tlaka.



Sl. 4.1.10. Dijagram toka programa za pokretanje jednog dizelskog motora

Pokretanje dizelskog motora završava signalom za start programa sinkronizacije generatora na brodsku mrežu, kako je predočeno na slici 4.1.11. To je važno onda kad se dizelski generator priključuje paralelno drugom generatoru koji već radi na mreži. Tijekom pokretanja dizelskog motora povećava se uzbuda sinkronoga generatora tako da je u trenutku postizanja nazivne brzine vrtnje rotora sinkronoga generatora napon na njegovim stezaljkama približno jednak naponu brodske mreže.

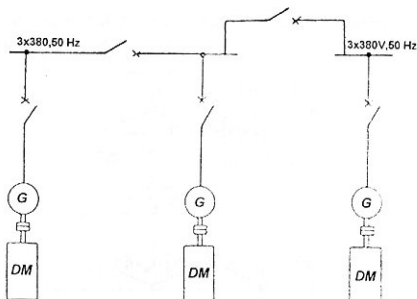


Sl. 4.1.11. Dijagram toka sinkronizacije dizelskoga generatora

Da bi se ubrzalo postizanje sinkronizacije i da se spriječe nepoželjni strujni udarci pri nepotpunim uvjetima, umjesto ručne sinkronizacije u brodove se ugrađuje *poluautomatska*, tzv. *gruba sinkronizacija*. Ta sinkronizacija sastoji se u tome da se između sinkronoga generatora i brodske mreže uključi prigušnica koja ograničava udarce struje pri približnoj sinkronizaciji. Nakon što se sinkroni generator "povuče" u sinkronizam (u vremenu od 1 do 5 s), prigušnica se zakraćuje i sinkroni je generator izravno priključen na mrežu.

U potpuno automatiziranim elektranama, gdje se generatori automatski uključuju u sustav prema potrebi opterećenja, prijeko je potrebna automatska sinkronizacija. Takva sinkronizacija sadrži uređaje koji automatski djeluju na izjednačenje napona sinkronoga generatora koji se želi sinkronizirati i najčešće (samo) uređaje koji automatski djeluju na brzinu vrtnje pogonskog stroja sinkrononoga generatora, odnosno broj okretaja dizelskog motora. Kad je postignut uvjet sinkronizacije, uređaj automatski daje nalog za uklop prekidača sinkronoga generatora.

Na brodovima obično rade dva ili više dizelskih generatora paralelno. Načelna shema spoja tri dizelska generatora u paralelnom radu vidi se na slici 4.1.12.



Sl. 4.1.12. Načelna shema spoja tri dizelska generatora u paralelnom radu

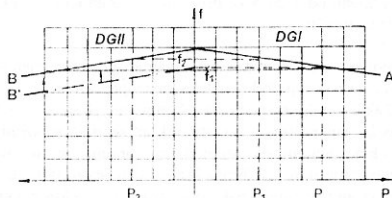
Da bi novouključeni dizelski generator preuzeo dio opterećenja, potrebno je preraspodijeliti opterećenje između njega i dizelskoga generatora koji već radi na brodskoj mreži. O raspodjeli *reaktivnog* opterećenja (kVAr) brine se regulacija napona, a o raspodjeli *djelatnog* opterećenja (kW) brine se regulacija brzine vrtnje, odnosno frekvencije. Regulacija napona ostvaruje se u uzbudnom krugu sinkronoga generatora (najčešće ugrađnjom ARN), a regulacija frekvencije prema karakteristikama regulatora broja okretaja dizelskog motora.

Na brodovima se najčešće koristi sustavima koji sadrže samo uređaje za djelovanje na brzinu vrtnje pogonskog stroja. To znači da se raspodjela djelatnog opterećenja obavlja djelovanjem na dovod goriva dizelskog motora.

Prema karakteristikama regulatora broja okretaja dizelskog motora razlikuju se tri mogućnosti paralelnog rada dva dizelska generatora:

- oba regulatora imaju *statičke* karakteristike,
- jedan regulator ima *statičku*, a drugi *astatičku* karakteristiku,
- oba regulatora imaju *astatičku* karakteristiku.

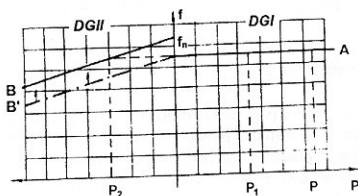
U prvom slučaju, kad obje statičke karakteristike imaju namješten jednaki nagib, raspodjela opterećenje između DG I i DG II u paralelnom radu bit će kao na slici 4.1.13.



Sl. 4.1.13. Raspodjela opterećenja između dva dizelska generatora s regulatorima sa statičkim karakteristikama

Kad DG I, prema slici 4.1.13., ne može osigurati dovoljnu količinu električne energije priključenim trošilima, potrebno je sinkronizirati još jedan DG II i između njih preraspodijeliti opterećenje. Nakon završene sinkronizacije DG II, raspodjela opterećenja između dizelskih generatora obavlja se daljinski s pomoću ugadača s ploče generatora i servomotora na regulatoru broja okretaja dizelskog motora. Pri tome se krivulja B' pomaknula u položaj B, tj. DG II preuzeo je polovicu opterećenja DG I uz povećanje frekvencije od  $f_1$  do  $f_2$ , odnosno opterećenje na oba dizelska generatora bit će jednako:  $P_1 = P_2$  i  $P = P_1 + P_2$ . Nakon što se jednom namjesti opterećenje između dizelskih generatora, sve promjene opterećenja nakon toga automatski prati regulator broja okretaja dizelskog motora. Zbog toga se takvim načinom rada dizelskoga generatora koristi u poluautomatiziranim brodskim dizelskim elektranama.

U drugom slučaju, kad se DG I, s astatičkom karakteristikom regulatora broja okretaja dizelskog motora, koji radi na brodskoj mreži paralelno priključi DG II sa statičkom karakteristikom regulatora, raspodjela opterećenje između tih dizelskih generatora bit će kao na slici 4.1.14. Da bi DG II preuzeo dio opterećenja od DG I, potrebno je nakon sinkronizacije DG II, jednako kao u prvom slučaju, namjestiti regulator broja okretaja njegova dizelskog motora, odnosno regulirati mu dovod goriva. Pri tome se krivulja B' pomaknula u položaj B, sjecište krivulja A i B odredit će opterećenje (snagu)  $P_2$ , koju će preuzeti DG II, a na DG I preostat će opterećenje (snaga)  $P_1 = P - P_2$ . Valja znati da pri rasterećenju DG I nije došlo do povećanja frekvencije, a sve nove promjene opterećenja podnosi će DG I.

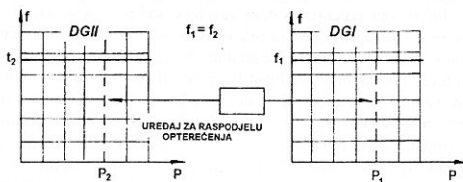


Sl. 4.1.14. Raspodjela opterećenja između dva dizelska generatora s regulatorima s astatičkom i statičkom karakteristikom

Opisanim načinom paralelnog rada dva dizelska generatora koristi se na brodovima kad se želi da jedan dizelski motor radi s punim, odnosno stalnim opterećenjem (regulator u kvaru ili dizelski motor ima manju potrošnju goriva), a drugi prati promjene opterećenja. Isto je kad paralelno radi osovinski generator i turbinski generator. Također, kad dizelski generator može sam preuzeti ukupno opterećenje, poželjnija je astatička karakteristika, jer je onda frekvencija konstantna neovisno o opterećenju.

U trećem slučaju, kad dizelski motori imaju regulatore s astatičkim karakteristikama, raspodjela opterećenje između DG I i DG II u paralelnom radu bit će kao na slici 4.1.15.





Sl. 4.1.15. Raspodjela opterećenja između dva dizelska generatora s regulatorima s astatičkim karakteristikama

Da bi DG I i DG II (s regulatorima s astatičkim karakteristikama) radili paralelno, moraju se ugraditi dodatni elektronički uređaji za raspodjelu opterećenja. Mjereći električnu snagu ti uređaji utječu na dobavu goriva dizelskom motoru, zbog čega se mijenja opterećenje na svakom dizelskom generatoru. Pri svim promjenama opterećenja ne mijenja se frekvencija.

Dodatni elektronički uređaj za raspodjelu opterećenja potreban je i za paralelni rad između osovinskoga generatora i turbinskoga ili dizelskoga generatora.

Takav paralelni rad dizelskih generatora prikladan je u automatiziranim brodskim elektranama, gdje se nakon automatske sinkronizacije i automatski raspodjeljuje opterećenje.

#### 4.1.3. Osovinski generator

*Osovinski generator* pogoni se vrtnjom osovine glavnoga propulzijskog stroja. Može se rabiti samo za vrijeme plovidbe. Budući da se brzina vrtnje propelera u plovidbi često mijenja, posebno kad je more jače nemirno, odnosno pri izronjavanju i uronjavanju propelera, kod toga se generatora bitan problem javlja pri održavanju konstantne frekvencije i napona.

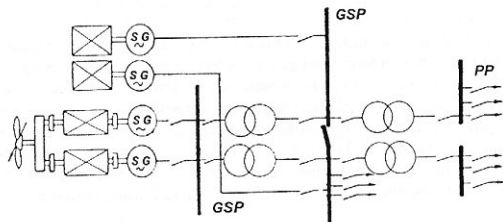
U vrijeme kad se na brodovima koristilo samo istosmjernom strujom često se ugradio osovinski generator, a konstantni napon relativno lako rješavao se regulatorom napona. U sinkronih generatora, koji se danas većinom ugrađuju u brodove, nejednolika brzina vrtnje propelera utječe ne samo na napon već još više na frekvenciju. Unatoč tomu, ekonomsko-tehnička prednost osovinskih generatora razlog je da se oni ipak ugrađuju u brodove. Ta se prednost očituje u jeftinije proizvedenoj električnoj energiji u odnosu prema onoj koju proizvode glavni propulzijski motori korištenjem teškim gorivom ili dizelski generatori s lakim gorivom. Uz primjenu osovinskih generatora moguće je smanjiti broj ugrađenih dizelskih generatora na brodu.

Na suvremenim motornim brodovima, osobito automatiziranim, trofazni osovinski generatori proizvode električnu energiju, ovisno o vrsti propelera, na nekoliko načina.

Ako brod ima zakretni propeler, tada se ugrađuju standardni beskontaktni sinkroni generatori. Budući da je brzina vrtnje propelerske osovine približno

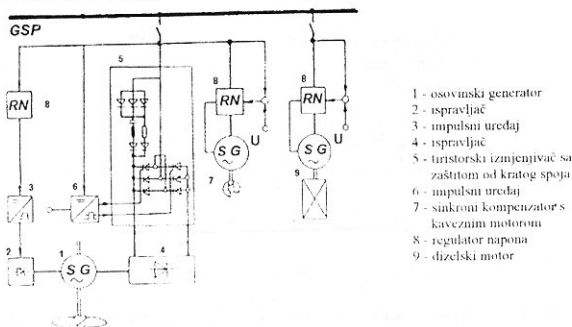
konstantna i da propulzijski motori imaju vrtnju uvijek u jednom smjeru pri plovidbi i u manevru, osovinski generatori u tim režimima rada napajaju mrežu konstantnim naponom i približno konstantnom frekvencijom. Osovinski generator daje potrebnu snagu u plovidbi i napaja trošila na brodskoj mreži sve dok se glavni propulzijski motor vrti nazivnom brzinom. Da ne bi stalno radili glavni dizelski motori pri ukrcanju tereta u luci, mogu se generatorima pridodati pomoćni dizelski motori.

Na slici 4.1.16. predočena je načelna shema spoja osovinskoga generatora u brodskim mrežama napona od 6 do 10 kV. Obično je jedan generator dostatan za pokrivanje električne snage u plovidbi, manevru, te u luci pri ukrcaju i iskrcaju tereta, a drugi je rezerva. Shema je proširena i s dva dodatna dizelska generatora koji napajaju mrežu napona od 400 V.



Sl. 4.1.16. Načelna shema spoja osovinskoga generatora sa zakretnim propelerom

Na brodu s krutim propelerom, tj s promjenljivom brzinom vrtnje brodske osovine, napajanje mreže konstantnim naponom i konstantnom frekvencijom omogućili su osovinski generatori sa statičkim usmjerivačima, kako je shematski predočeno na slici 4.1.17.



- 1 - osovinski generator
- 2 - ispravljač
- 3 - impulсни uređaj
- 4 - ispravljač
- 5 - tiristorski izmjenjivač sa zaštitom od kratkog spoja
- 6 - impulсни uređaj
- 7 - sinkroni kompenzator s kaveznom motorom
- 8 - regulator napona
- 9 - dizelski motor

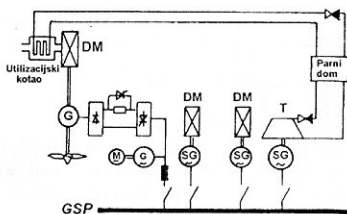
Sl. 4.1.17. Načelna shema spoja osovinskoga generatora sa statičkim usmjerivačima na brodu s krutim propelerom

U postrojenjima kao na slici 4.1.17. osovinski generator (1) napaja ispravljač (4) koji pretvara napon promjenljive frekvencije u istosmjerni napon. Taj se napon dovodi tiristorskom izmjenjivaču (5) za pretvorbu u trofazni napon konstantne frekvencije pa se tako trofazna djelatna snaga uz te parametre predaje brodskoj mreži. Budući da izmjenjivač može davati samo djelatnu snagu, potrebnu jalovu snagu za osovinski generator i za brodsku mrežu daje sinkroni kompenzator (7), kojeg pokreće mali kavezni motor i dovodi na potrebnu brzinu za sinkronizaciju s brodskom mrežom. Regulator napona kompenzatora (8) održava konstantni mrežni napon i napon generatora, a regulator frekvencije regulira uzbudnu struju osovinskoga generatora tako da preko istosmjernog međukruga(2) i (3) dotječe uvijek toliko snage koliko je potrebno da se zadrže nazivne brzine vrtnje strojeva i nazivna mrežna frekvencija.

Alternativa rješenju sa statičkim usmjerivačem je ono s rotacijskim pretvaračem. U tom slučaju sinkroni generator preko statičkog ispravljača napaja istosmjerni motor koji pokreće sinkroni generator konstantnom brzinom vrtnje.

Nabrojena rješenja osovinskih generatora s krutim propelerom, iako su ekonomski opravdana, tehnički gledano nisu jednostavna rješenja. Zbog toga je za pogon sinkronih generatora bolje novije rješenje s mehaničkim pretvornikom promjenjive brzine vrtnje u konstantnu. Mehanički varijator na mehaničko-hidrauličkim načelima pretvara promjenjivu brzinu vrtnje propulzijskog stroja u konstantnu. S tom konstantnom brzinom vrtnje pokreće se klasični sinkroni generator.

Na suvremenim brodovima često se električna energija proizvodi radom više ugrađenih generatora. U plovidbi, osnovnu električnu energiju potrebnu brodskim trošilima proizvodi turbinski generator korištenjem otpadne energije ispušnih plinova sporohodnog propulzijskog motora, a dodatnu električnu energiju osigurava osovinski generator pokretan tim motorom koji troši jeftino teško gorivo. Kad ne rade turbinski i osovinski generator (uglavnom u manevru), električnoj mreži energiju daju dva dizelska generatora, kako je na jednom primjeru shematski predočeno na slici 4.1.18.



Sl. 4.1.18. Shema brodske elektrane s različitim električnim agregatima

Pri rješenju elektrana kao na slici 4.1.18. optimalan pogon moguć je jedino uz primjenu visokog stupnja automatizacije. Pri tome automatizacija mora ispuniti dva osnovna zadatka. Prvi je da pogon raznovrsnih (s obzirom na korišteno gorivo) agregata međusobno uskladi i osigura da osnovno mrežno opterećenje pokriva prije svega turbinski generator, a drugi je da se ekonomično i pogonski sigurno koordinira

pogon brodske elektrane i glavnog dizelskog motora pri raznim vrtnjama propellerske osovine.

Ako turbinskom generatoru pri radu pomaže osovinski generator, tada osovinski generator mora preuzeti samo dio snage koji premašuje napojne mogućnosti utilizacijskog postrojenja. Isti je zahtjev i kad je umjesto osovinskoga generatora u pogonu dizelski generator. Ako u paralelnom radu napajaju brodsku mrežu osovinski i dizelski generator, tada automatika mora osigurati da osovinski generator pokriva osnovno opterećenje brodske mreže, a dizelski generator samo dio opterećenja.

S energetske i tehničke točke gledišta, naznačeno se elektroenergetsko postrojenje, a jednako tako i osovinski i turbinski generator, ne mogu upotrebljavati na svim brodovima. Stvarna opravdanost i optimalno rješenje moraju rezultirati na temelju složene analize koja uzima u obzir sve potrebne elemente.

Ako se na kraju samo nabroje bitni zahtjevi za usklađeno djelovanje bitnih uređaja automatike u suvremenoj brodskoj elektrani, onda se to odnosi na:

- automatsko predgrijavanje i pretpodmazivanje dizelskog motora u pripravi;
- daljinski start / stop dizelskoga generatora iz upravljačke prostorije;
- upravljanje frekvencijom;
- automatsku raspodjelu opterećenja u radu;
- automatski start i sinkronizaciju dodatnih brodskih generatora;
- automatsku raspodjelu opterećenja između više paralelno priključenih generatora;
- trajnu kontrolu ispravnosti zaštitnih elemenata;
- automatsko zaustavljanje dizelskog generatora pri pojavi kritičnih alarma;
- kontrolu uključenja velikih trošila.

#### 4.2. Izvori za napajanje u nenormalnim pogonskim stanjima

Na svakom se brodu osim osnovnih generatora ugrađuju i izvori za napajanje u nenormalnim pogonskim stanjima. Ti izvori za nužno napajanje moraju osigurati napajanje električnom energijom trošilima, ovisno o namjeni broda, kad na glavnoj sklopnoj ploči nestane električne energije i kad brod ima poprečni nagib od 22,5°, odnosno uzdužni od 10° ili oba nagiba istodobno.

Raspoloživa energija izvora za nužno napajanje mora omogućiti napajanje svih služba koje su potrebne za sigurnost putnika i posade kad treba poduzeti mjere u opasnosti, uzevši u obzir one službe koje moraju raditi istodobno. Osobito valja uzeti u obzir:

- nužnu rasvjetu;
- opći alarm;
- sustav za dojavu požara i sustav alarma;
- signalno-navigacijska svjetla, ako su isključivo električna i svjetiljke za signalizaciju po danu ako se napajaju iz glavnog izvora električne energije.

Izvori za nužno napajanje moraju se smjestiti izvan prostora strojarne i iznad glavne palube, a moraju imati takav kapacitet da mogu neprekidno napajati

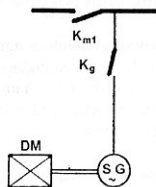
predviđena trošila u vremenu do 35 sati. Za brodove namijenjene obalnoj plovidbi dopuštaju se i kapaciteti za nužno napajanje u trajanju najmanje 6 sati. Ti izvori su:

- dizelski generator za nužno napajanje;
- akumulatorske baterije;
- neprekidno napajanje;
- priključak na kopno.

#### 4.2.1. Dizelski generator za nužno napajanje

Dizelski generator za nužno napajanje smješten je u posebnoj prostoriji na brodu (najčešće na gornjoj palubi), a priključuje se na ploču za nužno napajanje. Dimenzionira se prema snazi trošila koja se priključuju na ploču za nužno napajanje, a građen je u skladu s propisima koje propisuju klasifikacijska društva. S tim u vezi on mora imati uređaje koji će omogućiti tri uzastopna starta dizelskog motora, održavanje konstantne frekvencije i napona u granicama od 6% pri statičkim promjenama opterećenja u cijelom području opterećenja, a pri dinamičkim promjenama (npr. pri uključanju asinkronih motora) napon ne smije pasti ispod 18%, a frekvencija ispod 10%.

Zbog potrebe da automatski starta i uključi se na sabirnice ploče za nužno napajanje kad nestane napajanje s glavne sklopne ploče, dizelski generator za nužno napajanje, prema slici 4.2.1., mora se opremiti uređajem automatike koji će to omogućiti. U tu svrhu ploča za nužno napajanje ima mjerne instrumente, optičke signale stanja i kvarova, sklopke za ručno upravljanje, a za automatski pogon ima još uređaje za nadzor brodskog mrežnog i generatorskog napona i frekvencije, davanje impulsa za pokretanje i zaustavljanje dizelskog generatora, te za isključivanje i uključivanje mrežnog i generatorskog napona na trošilu.



Sl. 4.2.1. Shema spoja automatskog agregata za nužno napajanje

Prema slici 4.2.1., u normalnoj situaciji trošila se napajaju iz brodske mreže preko mrežnog sklopnika  $K_{mt}$ . Dođe li do kvara na glavnom izvoru, isključit će se mrežni sklopnik  $K_{mt}$ , a uključiti generatorski  $K_g$ .

Dizelski motor najčešće je zračno hlađen i opremljen uređajem za pokretanje s pomoću komprimiranog zraka ili električnog pokretača s napajanjem iz akumulatorskih baterija. Osim tih pokretanja, dizelski motor mora imati i pričuveni način pokretanja.

Dizelski motor osim standardne opreme ima još centrifugalni regulator broja okretaja, pa u različitim promjenljivim opterećenjima održava broj okretaja u utvrđenim granicama. Najčešći je to  $1500 \text{ r min}^{-1}$ , a što je prilagođeno brzini vrtnje 4-polnog sinkronoga generatora.

Električni generatori su samouzbudnog tipa, s četkicama ili bez njih, iako su više u primjeni generatori bez četkica. Posebna odlika tih generatora je brzo uzbuđivanje, brza regulacija pri udarnim opterećenjima, velika pouzdanost, pri radu izazivaju manje radio smetnje, a lakše se i održavaju u usporedbi sa sinkronim generatorima s četkicama.

#### 4.2.2. Akumulatorske baterije

*Akumulatorske baterije* su takvi kemijski izvori koji mogu davati ili primati istosmjernu struju, pri čemu se materije koje su sadržane u njima kemijski pretvaraju i opet vraćaju u početno stanje. Kad se akumulatorske baterije pune, električna se energija pretvara u kemijsku energiju, a pri pražnjenju kemijskim procesom oslobađa se električni naboj. Ako se dobro održavaju, jedan su od najsigurnijih izvora električne energije, koji će u svakoj prilici djelovati potpuno sigurno i neovisno o drugim strujnim izvorima.

Standardni, najčešće korišteni nazivni naponi akumulatorskih baterija su 6, 12, 24, 48, 110 i 220 V. Željeni napon postiže se spajanjem članaka (čelija) u seriju. Prilikom odabiranja broja članaka valja paziti na to da pri puno akumulatorskoj bateriji napon na trošilima ne bude previsok, a pri praznoj pre nizak.

Uvjeti u kojima rade akumulatorske baterije redovito su međuovisni. U nekim okolnostima akumulatorska baterija mora davati struju mreži tijekom dužeg vremena. Pri tom ona mora biti u stanju dati određenu količinu elektriciteta, mjerenu u ampersatima (Ah) - kapacitetno opterećenje. U drugoj prilici akumulatorska se baterija samo kratkotrajno optereti vrlo jakim strujama - strujno opterećenje, pa se na bateriju ne postavlja zahtjev s obzirom na kapacitet, već na dopuštenu jakost struje pražnjenja. Prema tome, kapacitet akumulatorske baterije definiran je izrazom:

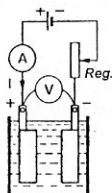
$$Q = I \cdot t, \quad (4.4)$$

gdje je  $I$  struja pražnjenja (A), a  $t$  vrijeme pražnjenja (h).

Akumulatorske baterije pune se istosmjernom strujom, i to tako da se plus-pol strujnog izvora priključi na plus-pol baterije koju treba puniti, a minus-pol izvora na minus-pol baterije, kako je shematski predočeno na slici 4.2.2. Pri tome je svejedno služi li kao strujni izvor motorgenerator ili ispravljač.

Pri punjenju akumulatorskih baterija najvažniju ulogu ima ispravno odabrana jakost struje punjenja i trajanje punjenja. O tim faktorima ovisi u biti trajnost baterije i njezin kapacitet, jer uz previsoku jakost struje punjenja dolazi do pojačanog

razvijanja plinova, koje uzrokuje mehaničko otkidanje čestica aktivne mase pozitivnih ploča i stvaranje mulja.



Sl. 4.2.2. Spojna shema za punjenje akumulatorske baterije

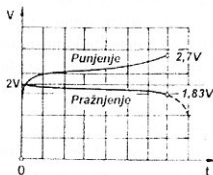
Da bi se mogla ocijeniti ekonomska vrijednost akumulatorske baterije, važno je znati koje količine energije može baterija u sebi akumulirati i s kojom korisnošću uloženu energiju vratiti.

Napon pri kojem neka akumulatorska baterija daje energiju trošilima ili je prima od izvora, ovisna je o broju članaka, dok količina struje koju neka baterija može primiti ili predati ovi o veličini ploča i njihovu broju u jednom članku.

Budući da se pri punjenju akumulatorskih baterija privedena količina elektriciteta ne troši samo za stvaranje aktivne supstancije na pločama, već se jedan dio potroši i na neželjeno stvaranje plinova, punjenje će trebati više ampersati nego što ih se dobiva pri pražnjenju. Omjer ampersati pražnjenja i punjenja zove se *dobrota akumulatora*  $\zeta$ , a jer se pri punjenju privodi na stezaljke viši napon nego je napon pražnjenja, to je omjer energija, dakle korisnost  $\eta$ , još manja od dobrote

U brodove se ugrađuju *olovne* (kiselinske) i *čelične* (alkalijske) akumulatorske baterije.

Akumulacija elektriciteta u *olovnoj* akumulatorskoj bateriji obavlja se tako da se djelovanjem električne struje masa pozitivnih i negativnih ploča kemijski mijenja. Pozitivna elektroda, olovni dioksid ( $\text{PbO}_2$ ), i negativna elektroda, olovo ( $\text{Pb}$ ), uronjene su u mješavinu destilirane vode ( $\text{H}_2\text{O}$ ) i sumporne kiseline ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Tijekom pražnjenja stvara se na objema elektrodama olovni sulfat ( $\text{PbSO}_4$ ), koji se pri punjenju ponovno razgrađuje. Jednako tako, za vrijeme punjenja zapaža se porast gustoće elektrolita, dok se pri pražnjenju zapaža njezino smanjenje, tj. stvara se voda. Mijenjanje gustoće elektrolita proporcionalno je promjeni struje koja prolazi člankom za vrijeme punjenja ili pražnjenja. Kako se mijenja napon olovne akumulatorske baterije pri punjenju i pražnjenju, predočeno je na slici 4.2.3.



Sl. 4.2.3. Dijagram promjene napona olovne akumulatorske baterije

Olovne akumulatorske baterije imaju:

- nazivni napon: 2V/članku;
- napone razvijanja plinova: od 2,4 do 2,45 V/članku;
- najviši napon punjenja: od 2,5 do 2,75 V/članku (ovisno o tipu ćelije);
- najniži napon pražnjenja: od 1,72 do 1,82 V/članku (ovisno o trajanju pražnjenja);
- gustoću elektrolita (sumporne kiseline): pune baterije cca 1,20 kg/dm<sup>3</sup>,  
prazne baterije cca 1,15 kg/dm<sup>3</sup> i  
za nalijevanje 1,18 kg/dm<sup>3</sup>;
- dobrotu: od 0,85 do 0,95;
- korisnost: 0,65 (pražnjenje od 3 do 10 sati), odnosno 0,7 (pražnjenja 1 sat).

Točne podatke i obvezne upute daju proizvođači akumulatorskih baterija.

Najčešće pogreške koje se pojavljuju tijekom eksploatacije akumulatorskih baterija su:

- sulfatizacija;
- kratki spojevi u ćeliji;
- nečistoća elektrolita;
- kratki spojevi između ćelija;
- depolarizacija.

*Sulfatizacija* je kemijski proces formiranja krutih kristala PbSO<sub>4</sub> od sumporne kiseline i olova, koji razaraju baterije. Javlja se kad se ispražnjena akumulatorska baterija ne puni duže vremena ili kad su velika pražnjenja, a nepotpuna punjenja. Tipični znaci sulfatizacije su:

- smanjenje kapaciteta;
- smanjenje gustoće elektrolita;
- povećani napon ćelija tijekom punjenja;
- povišena temperatura tijekom punjenja.

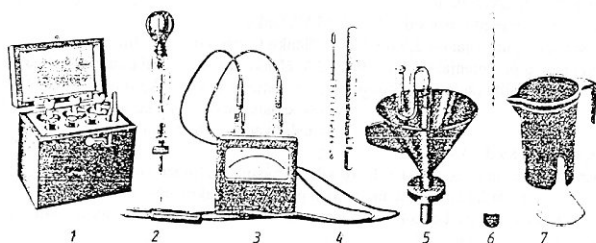
*Desulfatizacija* se može obaviti produženim punjenjem s 50% vrijednosti propisane struje punjenja (za 10-satno punjenje), nakon čega bi trebala porasti gustoća elektrolita. Nakon toga valja vidjeti je li potrebno dodavati razrijeđenu kiselinu (pri razrjeđivanju treba prvo lijevati kiselinu u vodu, a nikako obratno!) ili se obratiti proizvođaču akumulatorskih baterija.

*Kratki spojevi* u ćeliji posljedica su oštećenja zbog ulaska metalnih čestica u prostor ćelije, a nečistoće elektrolita s metalima stvaraju galvanske veze tih metala s negativnom pločom, što dovodi do sulfatizacije negativne ploče. Vrlo je opasna i voda u elektrolitu koja u sebi sadrži klor jer izaziva koroziju rešetaka u ćeliji. Kratki spojevi između ćelija, koji nastaju nepažljivim dodirnom suprotnih polova akumulatorske baterija metalnim predmetima, ili pri izlivanju kiseline po površini ćelije, može izazvati samoizbijanje, odnosno *depolarizaciju* ćelije, pri čemu napon vrlo brzo pada na nulu pa takvu ćeliju odmah valja mijenjati.

Uz svaku akumulatorsku bateriju proizvođači prilažu propise za rukovanje, koje valja istaknuti na vidnom mjestu u baterijskoj prostoriji. Ti propisi sadrže upute za pogon i održavanje. Za kontrolu elektrolita akumulatorske baterije potreban je pribor:

- ormarić s elektrolitom;
- mjerač kiseline;
- prijenosni voltmetar;
- termometar;
- mjerni lijevak za blok baterije;
- aerometar;
- posuda za kiselinu, kako je predloženo na slici 4.2.4.





- 1 - ormarić s elektrolitom      2 - mjerač kiseline      4 - termometar      6 - aerometar  
 3 - prijenosni voltmetar      5 - žnjerni lijevak za blok baterije      7 - posuda za kislinu

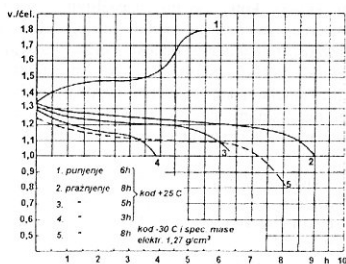
Sl. 4.2.4. Osnovna oprema za kontrolu elektrolita

Osim olovnih akumulatorskih baterija ima još i drukčije sastavljenih, od kojih je na brodu čest *alkalijski* nikal-kadmij (Ni-Cd). Alkalijski se naziva zato što mu je elektrolit vodena otopina kalijeve lužine (KOH) u destiliranoj vodi, a aktivne supstancije punog akumulatora su na pozitivnom polu nikal III-hidroksid,  $\text{Ni}_2(\text{OH})_6$ , a na negativnom čisti kadmij, Cd. Pri pražnjenju gustoća elektrolita raste, a pri punjenju stvara se voda, što ima za posljedicu smanjenje gustoće elektrolita.

Alkalijske akumulatorske baterije imaju:

- nazivni napon: 1,2V/članku;
- napone razvijanja plinova: od 1,55 do 1,60 V/članku;
- najviši napon punjenja: 1,78 V/članku;
- napon pražnjenja: početni, prosječni i najniži 1,3/1,2/1,0 V/članku;
- gustoću elektrolita, 21%-tne otopine kalijeve lužine s malim dodatkom litijeva hidroksida (za povećanje kapaciteta i trajnosti): od 1,19 do 1,21  $\text{kg}/\text{dm}^3$  kod 20°C.

Na slici 4.2.5. predočen je dijagram promjene napona pri punjenju i pražnjenju jedne Ni-Cd akumulatorske baterije.



Sl. 4.2.5. Dijagram promjene napona jedne Ni-Cd akumulatorske baterije

Korisnost je alkalijske akumulatorske baterije lošija nego olovne jer joj je unutarnji otpor veći nego što je olovnoj bateriji.

Alkalijska Ni-Cd baterija ima veliku mehaničku čvrstoću i neosjetljivost na mehaničke udarce, podnosi velike strujne udarce bez oštećenja i neosjetljiva je prema opterećenju. Praktički nema samoizbijanja, jednostavno se održava i nema procesa sličnog sulfatiziranju. Neosjetljiva je prema niskim temperaturama, a pri radu ne razvija korozivne plinove.

Vrlo je važno znati da se olovne i alkalijske baterije ne smiju nikada postaviti u istoj prostoriji ili u jednom sanduku. Posude i pribor određene za baterije s različitim elektrolitom treba spremati odvojeno.

Akumulatorske baterije službenih telefona, signalizacije otkrivanja požara i signalizacije u nuždi moraju se smjestiti iznad pregradne palube i izvan groblišta strojarnice. Kad se te baterije postavljaju u posebne prostorije, tada one moraju imati izlaz na otvorenu palubu.

Akumulatorske baterije s naponom većim od sigurnosnog, a također baterije sa snagom većom od 2 kW, izračunane iz najjače struje punjenja i nazivnog napona, treba ugraditi u posebne prostorije s pristupom s palube, ili u odgovarajuće kutije postavljene na otvorenoj palubi. Te prostorije moraju biti posebne električarske prostorije.

Akumulatorske baterije snage od 0,2 do 2 kW mogu se postaviti u sanduke ili u ormare unutar broskog trupa, dok se baterije snage manje od 0,2 kW mogu ugraditi u bilo kojoj prostoriji, osim u nastambama i službenim prostorijama, uz uvjet da su zaštićene od djelovanja vode i mehaničkih oštećenja i da štetno ne utječu na okolne uređaje.

Unutarnji dijelovi prostorije ili sanduka za akumulatorske baterije, a također i svi konstrukcijski dijelovi koji se mogu izložiti štetnom djelovanju elektrolita ili plina, moraju se na odgovarajući način zaštititi.

Akumulatorske baterije moraju se dobro učvrstiti. Svaka baterija (ćelija) kojoj je posuda napravljena od materijala koji je vodič mora se izolirati, a pri ugradnji baterija treba osigurati razmak sa svih strana radi zračnog strujanja.

Na ulaznim vratima prostorija s akumulatorskim baterijama, ili oko njih, a također i na kutijama i ormarima s baterijama, treba postaviti natpisne tablice koje upozoravaju na opasnost od eksplozije. Takve prostorije valja zagrijavati ako temperatura padne ispod 5°C. Zagrijavanje se može obaviti toplinom iz susjednih prostorija ili s pomoću vodenih ili parnih radijatora smještenih unutar prostorije. Ventili sustava zagrijavanja moraju se nalaziti izvan prostorija. Za zagrijavanje se ne smije upotrebljavati klimatizacijski sustav.

Prostorije i kutije za akumulatorske baterije treba dostatno ventilirati tako da se spriječi mogućnost stvaranja i skupljanja eksplozivnih smjesa. Prostorije koje imaju prisilnu ventilaciju moraju imati sredstvo koje će spriječiti uključivanje punjenja baterija prije uključivanja ventilacije. Punjenje se mora automatski isključiti ako nastupi zaustavljanje ventilatora.

Pojedine akumulatorske baterije koje napajaju bitne službe moraju imati uređaj za punjenje sposoban da izvrši punjenje na brodu u vremenu koje nije dulje od 8 sati. Kad su predviđene rezervne baterije, vrijeme punjenja može prekoračiti 8 sati.

Sustav punjenja mora omogućiti mjerenja napona na stezaljkama akumulatorskih baterija i struju punjenja, a izvor električne energije za nuždu, još i struju pražnjenja.

Na brodovima koji imaju prijenosne akumulatorske svjetiljke ili imaju akumulatorske rezervne signalno-navigacijske svjetiljke, valja predvidjeti i napravu za punjenje baterija tih svjetiljaka.

Na brodovima koji imaju motore s unutarnjim izgaranjem koji se pokreću isključivo električnim putem, neovisno o broju motora moraju biti stalno ugrađene najmanje dvije akumulatorske baterije za pokretanje glavnih i pomoćnih motora, ili najmanje dvije zajedničke baterije za pokretanje svih motora. Tome treba priključiti i pouzdanu napravu za prebacivanje, koja osigurava mogućnost uporabe bilo koje akumulatorske baterije za pokretanje bilo kojeg motora od grupe koja se poslužuje baterijom.

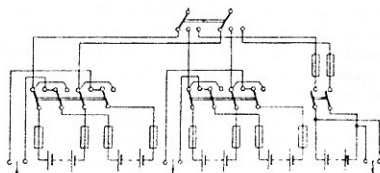
Svaku akumulatorsku bateriju za pokretanje valja proračunati za jakost struje pražnjenja pri pokretanju koja odgovara struji najjačeg elektromotora za pokretanje glavnog i pomoćnog motora s unutarnjim izgaranjem.

Kapacitet svake akumulatorske baterije mora omogućiti najmanje šest pokretanja motora najveće snage pripremljenog za pokretanje, a ako su dva ili više motora, najmanje tri pokretanja svakog motora. Pri izračunavanju kapaciteta baterija mora se osigurati da svako pokretanje traje pet sekunda.

Napajanje uređaja za punjenje akumulatorske baterije za pokretanje mora se obavljati iz glavne sklopne ploče s posebnim napojnim vodom i onda kad je predviđena mogućnost punjenja baterije od privješenog generatora.

Za akumulatorske baterije, osim za one za pokretanje motora s unutarnjim izgaranjem, treba osigurati naprave za zaštitu od struja kratkog spoja. Jednako tako, svaki sustav za punjenje baterija mora imati odgovarajuću zaštitu od pražnjenja baterija, ako bi se smanjio ili nestao napon koji napaja napravu za punjenje.

Uređaj za punjenje akumulatorskih baterija na brodu zajednički je za sve baterije, osim za bateriju radiostanice. Na slici 4.2.6. predočena je shema spoja akumulatorskih baterija za nužno napajanje, za dojavu i za pokretanje istosmjernog motora.



Sl. 4.2.6. Shema spoja akumulatorskih baterija za nužno napajanje, za dojavu i za pokretanje istosmjernog motora

Za punjenje akumulatorskih baterija na brodu s istosmjernim sustavom služe pretvarači. Izravno punjenje iz takve mreže obično nije ekonomično jer je većinom napon 220 ili 110 V, a napon baterija 24 ili 36 V, pa se na predtoporima gubi i do 90% snage.

Na brodovima s trofaznim sustavima akumulatorske baterije se pune s pomoću transformatora i ispravljača. Živini se ispravljači izbjegavaju jer su osjetljivi na vibracije i poniranje broda, a nisu ni mehanički dovoljno otporni. Zbog toga se rabe selenski ispravljači, a danas najčešće silicijski ispravljači, jer su vrlo malih dimenzija

i imaju vrlo visok stupanj djelovanja. Napon se regulira preklopkom i s pomoću više izvoda na transformatoru.

Olovne akumulatorske baterije obično se trajno pune, dok pri punjenju alkalijских baterija punjenje se obavlja pri neopterećenom strujnom krugu koji napajaju te baterije.

Akumulatorske baterije na brodu najčešće se upotrebljavaju za:

- a) *pomoćni pogon*, kad se akumulatorska baterija odmah ručno ili automatski aktivira prekinu li se napajanje iz glavnog izvora. Na taj način osigurava se pomoćno napajanje opće rasvjete i rasvjete u strojarnici, pomoćno upravljanje, pokretanje generatora, vodonepropusnih vrata, čamaca za spašavanje i slično;
- b) *redoviti rad*, kad akumulatorske baterije služe za rasvjetu na malim teretnim brodovima za vrijeme njihova boravka u luci, rasvjetu privatnih jahta, pokretanje riječnih motornih brodova, pokretanje motora malih brodova i slično;
- c) *sustav niskog napona* za napajanje radioprijamnika, opreme za uzbunu, protupožarne opreme, telefonske centrale, indikatora poziva i svih oblika signalizacije.

#### 4.2.3. Nепrekidno napajanje

Nепrekidno napajanje nužno je mnogim elektroničkim uređajima koji se sve više ugrađuju u brodove. Bez takva napajanja, elektronički uređaji za potrebe npr. navigacije, komunikacije, signalizacije, rasvjete itd. ne bi mogli obavljati namijenjenu funkciju. Pogotovo bi to bilo opasno pri nestanku napajanja iz brodske elektrane u najtežim okolnostima plovidbe, a kad su ti uređaji najpotrebniji.

Postrojenja za nепrekidno napajanje realiziraju se *rotacijskim* i *statičkim* pretvaračima.

*Rotacijski elektroagregati* ili *nепrekidni agregati (no-break)* najčešće se proizvode s dizelskim motorom, kao pogonskim strojem. Pojavom kvara na glavnom izvoru, pogon sustava preuzima dizelski motor, s tim što nema nikakva prekida u napajanju. Umjesto dizelskog motora najčešće se nепrekidno napajanje na brodu izvodi iz akumulatorskih baterija.

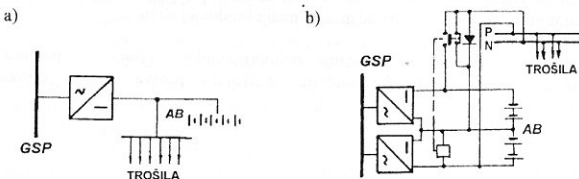
Na suvremenim brodovima sve više se ugrađuju postrojenja za nепrekidno napajanje s pomoću *statičkih pretvarača* koji imaju znatne prednosti u usporedbi s rotacijskim. Osnovne prednosti su:

- veći stupanj djelovanja;
- veća pogonska sigurnost;
- manji troškovi održavanja;
- jednostavnija montaža i rukovanje;
- manja buka i vibracije;
- veća životna dob;
- nema dijelova izloženih habanju;
- veća točnost frekvencije izlaznog napona (neovisno o opterećenju).

Postrojenje za neprekidno napajanje najčešće radi u trajnom pogonu; trošilo se trajno napaja iz tog postrojenja, koje potrebnu energiju uzima iz brodske mreže. Dode li do ispada mrežnog napona, napajanje trošila nastavit će se neprekidno iz akumulatorske baterije, koja osigurava potrebnu energiju sve do povratka napona mreže ili napona iz pomoćnog izvora, kao što je npr. dizelsko-električni agregat (no-break). Kapacitet akumulatorske baterije odabire se u odnosu prema snazi trošila i vremenu unutar kojeg baterija mora osigurati napajanje.

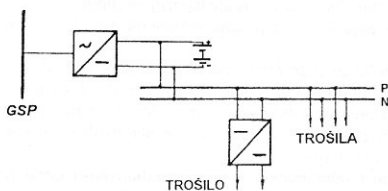
Za istosmjerno napajanje najčešće se uzima najjednostavniji sustav za neprekidno napajanje, tj. paralelni rad ispravljača i akumulatorske baterije, što je shematski predočeno na slici 4.2.7.a).

Daljnje povećanje pouzdanosti u pogledu neprekidnog napajanja postiže se postrojenjem s dva ili više pretvarača spojenih paralelno, kako je predočeno na slici 4.2.7.b). Paralelno spojeni pretvarači ne smiju imati zajedničke one elemente koji bi svojim kvarom mogli izazvati kvar čitavog postrojenja.



Sl. 4.2.7. Blok-shema spoja postrojenja za neprekidno napajanje trošila istosmjernom strujom

Neprekidno napajanje posebno je važno onda kad uređaji na brodu zahtijevaju zaštitu od električnih smetnja koje dolaze iz istosmjernog sustava. U tom slučaju primjenjuje se način napajanja kako je shematski predočeno na slici 4.2.8.



Sl. 4.2.8. Blokowska shema napajanja posebno osjetljivih trošila istosmjerne struje

#### 4.2.4. Priključak na kopno

Priključak na kopno, kao na slici 4.2.9., brodu služi kad je vezan u luci, odnosno u brodogradilištu. U tom slučaju brod ne može zadovoljiti sve potrebe za

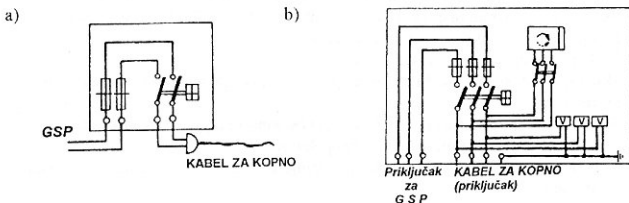
električnom energijom, pa se priključak općenito dimenzionira na polovicu snage koju bi osiguravao glavni brodski generator.



Sl. 4.2.9. Blokovska shema priključka broda na kopno

Kako je shematski predloženo na slici 4.2.9., priključak na kopno ostvaruje se savitljivim kablom koji povezuje priključnu kutiju na kopnu s onom koja se nalazi na palubi (obično na krmu), a dalje s ugrađenim kablom do glavne sklopne ploče u brodskoj strojarnici.

Priključna kutija na brodu razdjelnik je za napajanje iz vanjskog izvora (s kopna). Na slici 4.2.10.a) predložena je priključna kutija na brodskoj palubi za napajanje iz istosmjerne mreže na kopnu, a na slici 4.2.10.b) isto, ali za napajanje iz izmjenične mreže na kopnu.



Sl. 4.2.10. Priključne kutije na brodskoj palubi

U priključnoj kutiji na brodskoj palubi moraju biti:

- odgovarajuće stezaljke za priključak savitljivog kabela s kopna;
- naprave za uključivanje i zaštitu položenog kabela do glavne sklopne ploče;
- signalne žarulje ili voltmetar koji pokazuje da su stezaljke pod naponom;
- naprave ili mogućnost za uključivanje naprava za kontrolu polariteta ili redoslijeda faza;
- stezaljke za uzemljenje nul-voda vanjskog izvora;
- tablice s naznakom veličine napona, vrste struje i frekvencije.

Jednako tako, na glavnoj sklopnoj ploči u brodskoj strojarnici, u spojnomo vodu vanjskog izvora, trebaju biti:

- sklopne naprave i zaštitni aparati u strujnom krugu stalno položenog kabela;
- voltmetar koji pokazuje napon na stezaljkama kabela, ili signalna žarulja.

### 4.3. Pitanja i zadaci za provjeru znanja

Uz točku 4.1.:

1. Koji naponi i frekvencije na brodu odgovaraju europskom i američkom sustavu?
2. Kako se definira brodaska elektrana?
3. Kako se dijele osnovni izvori električne energije na brodu?
4. Kako rade brodski turbinski generatori?
5. Skicirajte i objasnite načelnu shemu spoja brodskog utilizacijskoga generatora.
6. Skicirajte i objasnite načelnu shemu spoja dizelskoga generatora.
7. Skicirajte i objasnite načelnu shemu regulacije i zaštite dizelskog motora.
8. Koji se tipovi sinkronih generatora ugrađuju u brodove?
9. Koje elemente sadrži uzbudni sustav generatora na brodu?
10. Opišite ulogu automatskog regulatora napona.
11. Skicirajte i objasnite elemente električne zaštite brodskog sinkronoga generatora.
12. Opišite način pokretanja dizelskoga generatora na brodu.
13. Skicirajte i objasnite dijagram toka sinkronizacije dizelskoga generatora.
14. Skicirajte i objasnite raspodjelu opterećenja između dva dizelska generatora s regulatorima sa statičkim karakteristikama.
15. Skicirajte i objasnite raspodjelu opterećenja između dva dizelska generatora od kojih jedan ima regulator sa statičkom, a drugi s astatičkom karakteristikom.
16. Skicirajte i objasnite raspodjelu opterećenja između dva dizelska generatora s regulatorima s astatičkim karakteristikama.
17. Na kojem principu radi osovinski generator?
18. Skicirajte i objasnite načelnu shemu spoja osovinskoga generatora sa zakretnim propelerom.
19. Skicirajte i objasnite načelnu shemu spoja osovinskoga generatora sa statičkim usmjerivačima i s krutim (fiksni) propelerom.
20. Koji su bitni zahtjevi za usklađeno djelovanje automatike u suvremenim brodskim centralama?

Uz točku 4.2.:

1. Što su izvori za nužno napajanje i kako se mogu podijeliti?
2. Skicirajte i objasnite shemu spoja dizelskoga generatora za nužno napajanje.
3. Koje se vrste akumulatorskih baterija ugrađuju u brod?
4. Koji su standardni naponi akumulatorskih baterija na brodu?
5. Što je kapacitet, dobrota i korisnost akumulatora?
6. Skicirajte i objasnite shemu spoja za punjenje akumulatorske baterije.
7. Koje su osnovne karakteristike olovnih akumulatora?
8. Koje su osnovne karakteristike alkalijских akumulatora?
9. Koja je osnovna oprema za kontrolu elektrolita akumulatorskih baterija?
10. Što se propisuje za smještaj, održavanje i rukovanje akumulatorskim baterijama na brodu?
11. S kojeg se mjesta na brodu mora osigurati napajanje uređaja za punjenje akumulatorske baterije za pokretanje motora s unutarnjim izgaranjem?
12. Kad se najčešće upotrebljavaju akumulatorske baterije na brodu?

13. Kako se realiziraju postrojenja za neprekidno napajanje?
14. Opišite rad neprekidnog agregata (no - break).
15. Skicirajte i objasnite spoj postrojenja za neprekidno napajanje trošila istosmjernom strujom.
16. Kad brodu služi priključak na kopno?
17. Skicirajte i objasnite shemu priključne kutije za kopno koja se nalazi na brodskoj palubi.
18. Što se mora nalaziti u priključnoj kutiji na brodskoj palubi?
19. Što se mora nalaziti na glavnoj sklopnoj ploči u brodskoj stojarnici u polju za priključak na kopno?



## 5. ELEKTRIČNA PROPULZIJA BRODA

Da bi brod plovio nekom određenom brzinom, treba primijeniti odgovarajuću silu koja će svladati njegov otpor pri toj brzini. Izvor energije koji proizvodi silu potrebnu za plovidbu može biti izvan broda (kad se brod tegli s užetom ili pokreće silom vjetera ili jedrima) ili može biti u samom brodu, pri čemu posebna naprava, tzv. *propulzor* (najčešće brodski *vijak*, odnosno *propeler*) pretvara snagu preuzetu od pogonskog stroja u *poriv*, tj. silu kojom on svladava silu otpora broda.

Brodovi obično imaju jedan ili dva propelera na krmu, a neki i vučni tlačni propeler na pramcu. Takav pramčani propeler ima najčešće zadaću da olakša manevriranje brodom (ili sprječava gomilanje zdrobljenog leda ispred broskog pramca), a nije važan kao propulzor. Propeler može imati dva do šest krila, najčešće tri ili četiri krila.

Projektiranje i izrada propelera vrlo je odgovoran posao. Projektant koji rješava brodski oblik istodobno odlučuje kolika je efektivna snaga porivnog stroja potrebna da brod plovi određenom brzinom. Da se udovolji tim uvjetima, projektant mora odrediti najpovoljnije mjere i oblik propelera.

Najčešći oblik propelera je onaj koji ima krila s glavinom izljevenim u jednom komadu. To je tzv. *propeler s fiksnim krilima*.

Propeler s fiksnim krilima projektira se za određene radne uvjete. Ako se ti uvjeti promijene, propeler više nije optimalan, mijenja mu se brzina vrtnje, moment i opterećenje, zbog čega se smanjuje stupanj njegova djelovanja, a remeti se i optimalni rad pogonskog stroja. To je osobito nepovoljno kad je pogonski stroj dizelski motor, što ima za posljedicu povećani potrošak goriva (preopterećenje ili podopterećenje dizelskog motora), a može izazvati i veći kvar dizelskog motora.

Drugi je oblik propeler s krilima koja su pričvršćena na glavinu, a mogu se zakretati i mijenjati uspon kontinuirano. To je tzv. *propeler s prekretnim krilima*.

Propeler s prekretnim krilima omogućuje da se za vrijeme plovidbe posebnim mehanizmom zakreću krila oko osi okomito na osovinu propelera. Zbog toga se mijenja uspon krila, a s tim i brzina vrtnje propelera, moment i porivna sila. Prekretanjem krila takav se propeler prilagodava svakom opterećenju, što omogućuje ekonomični pogon i duži vijek trajanja pogonskog stroja.

Vrtnja se propelera najčešće ostvaruje parnim ili motornim pogonom. U nekim okolnostima i zbog posebnih razloga primjenjuje se *električna propulzija*, tj. *propeler se pokreće elektromotorom*.

*Propelerski elektromotori* mogu se smjestiti u brodskoj krmu pa nisu potrebni dugački osovinski vodovi. Između propelerskog elektromotora i osovine propelera ugrađuje se reduktor ako se, zbog manjih dimenzija i niže cijene propelerskog elektromotora, time postiže ušteda na prostoru i na troškovima cijelog postrojenja.

Izvor električne energije za napajanje propelerskih elektromotora može biti *akumulatorska baterija, generator, kombinacija dizelskoga generatora i akumulatorske baterije* ili *gorive ćelije*.

Električni pogon propelera *akumulatorskom baterijom* ograničen je kapacitetom baterije. Akumulatorske baterije imaju veliku masu za relativno malu energiju koju mogu dati, zahtijevaju punjenje i pažljivo održavanje.

Za pogon električnih *generatorskih turbina* služe turbine i dizelski motori. *Turbinski* pogon primjenjuje se na velikim brodovima (najčešće putničkim), i to obično s trofaznim električnim sustavom, a *dizelski* pogon na brodovima svih veličina i namjena.

Napajanje propelerskog elektromotora ostvaruje se većinom vlastitim turbinskim generatorom, odnosno dizelskim generatorom. Na brodovima s više propelera, pri manjoj brzini plovidbe, može jedan turbinski generator napajati više propelerskih elektromotora, pa se na taj način postiže veća ekonomičnost pogona. Dizelsko generatorsko postrojenje može imati veći broj manjih agregata koji se uključuju prema potrebi, odnosno lako se prilagođuje svim promjenama opterećenja propelera, a kvar jednog dizelskog motora ne sprječava normalnu plovidbu.

Električni pogon propelera *kombinacijom dizelskoga generatora i akumulatorske baterije* ima, kao i pogon akumulatorskom baterijom, izvor energije praktično konstantnog napona. *Jedno* je rješenje da se propelerski elektromotor napaja iz akumulatorske baterije, a dizelski generator pri konstantnoj brzini vrtnje služi za punjenje akumulatorskih baterija. *Drugo* je rješenje da dizelski motor radi na istoj osovini s propelerskim elektromotorom, pa pri malim brzinama dizelski motor pokreće i propeler i generator koji puni akumulatorske baterije, a pri većim brzinama propelerski elektromotor napaja se i iz akumulatorske baterije. Manevriranje i promjena smjera vrtnje propelerske osovine izvodi se samo elektromotorom.

Kao izvorom električne energije za napajanje propelerskih elektromotora može se koristiti i *gorivim ćelijama*, koje neposredno pretvaraju kemijsku energiju u električnu. Iako ih je otkrio 1839. godine W. R. Grove, do danas se nije našla velika primjena za električnu propulziju. U literaturi se spominje da su stručnjaci njemačke tvrtke Siemens prije trideset godina (1965.) eksperimentirali s gorivim ćelijama snage 0,5 kW koje su napajale istosmjerni motor snage 0,37 kW što je vrtio propeler čamca, a nakon toga su se pokušno rabile i na podmornicama. Očekuje se da će se gorive ćelije primjenjivati i na brodovima, u početku za manje snage propulzije iako se danas izvode pokusi s ćelijama snage iznad 100 kW.

Promjene otpora broda, izazvane promjenom njegove brzine, djelovanjem valova i vjetra itd., utječu na promjenu brzine vrtnje propelera i na promjenu porivne snage. Uredaj za propulziju mora se prilagođavati tim promjenama. U slučaju pogona motorima istosmjerne struje to se pouzdano postiže već samom karakteristikom strojeva koji pri preopterećenju daju propeleru povećani moment, a pri rasterećenju imaju ograničenu brzinu vrtnje. Veći trofazni pogoni imaju posebni regulacijski uredaj koji u preopterećenju povećava uzbuđu generatora i propulzijskih elektromotora i time osigurava stabilnost sustava. Zadatak je regulatora brzine vrtnje strojeva za pogon generatora da osiguraju gornju granicu brzine vrtnje i stroj prilagode potrebnoj snazi. Automatsko prilagođavanje momenta istosmjernih propulzijskih motora potrebnom momentu na propeleru osigurava da se preveliki moment ne prenese na pogonski stroj.

Za dimenzioniranje električnih propulzijskih strojeva mjerodavne su ekstremne točke procesa prekretanja stroja. Manevar prekretanja stroja, zbog zaustavljanja broda ili zbog promjene vožnje naprijed u vožnju natrag, jako je važan za sigurnost broda pri pristajanju uz obalu ili za izbjegavanje nesreća na moru. Prilikom manevriranja broda, kad se mijenja smjer vožnje, najprije treba usporiti i zaustaviti brodsku masu u kretanju, masu propelera i osovine, masu vode koju potiskuje propeler i masu rotora propulzijskog stroja, a zatim ih u suprotnom smjeru ubrzati. Radni procesi pri tom manevriranju detaljno su istraženi i razradene su metode proračuna momenata propulzijskog sustava u pojedinim fazama procesa. Prekretanje stroja definirano je izrazom gibanja broda:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F - R, \quad (5.1)$$

odnosno izrazom za propulzijski sustav:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_s - M_p - M_t, \quad (5.2)$$

u kojima je  $m$  masa broda i dodatna masa mora,  $v$  brzina broda,  $t$  vrijeme,  $F$  porivna sila propelera,  $R$  otpor broda,  $J$  moment tromosti rotirajućih masa sustava i dodatne mase mora,  $\omega$  kutna brzina,  $M_s$  zakretni moment stroja,  $M_p$  moment propelera i  $M_t$  moment trenja osovinog voda.

Promjenljive veličine u izrazima (5.1) i (5.2) najjednostavnije se daju odrediti ispitivanjem brodskog modela. Rezultati takvih ispitivanja mogu se predložiti u obliku krivulja, tzv. Robinsonove krivulje koje za različite konstantne brzine vrtnje propelera daju promjenu momenta propelera zbog njegova prekretanja.

Pogon propelera može se ostvariti motorom istosmjerne ili izmjenične struje.

## 5.1. Pogon propelera motorom istosmjerne struje

Pogon propelera motorom istosmjerne struje ostvaruje se s pomoću spoja s:

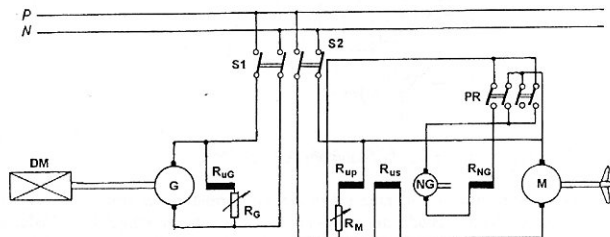
1. - konstantnim naponom,
2. - konstantnom strujom,
3. - Ward-Leonardovim spojem,
4. - dizelskim sinkronim generatorom i istosmjernim motorom.

### 5.1.1. Spoj s konstantnim naponom

Spoj s konstantnim naponom, prema slici 5.1.1., sastoji se od dizelskog motora (DM) koji pokreće istosmjerni generator (G) s paralelnom uzbudom ( $R_{ut}$ ). Regulacijskim otpornikom ( $R_c$ ) mijenja se uzbudna struja istosmjernom generatoru, a zajedno s dodavanjem ili oduzimanjem goriva dizelskom motoru, tj. promjenom brzine vrtnje, osigurava se konstantni napon  $U$  na stezaljkama generatora, odnosno na

sabirnicama. Na te je sabirnice priključen istosmjerni motor (M) sa serijskom ( $R_{us}$ ) i paralelnom ( $R_{up}$ ) uzбудom koji pokreće brodski propeler. Regulacijskim otpornikom ( $R_M$ ) održava se konstantna brzina vrtnje istosmjernom motoru. Da bi mu se brzina vrtnje mijenjala (najčešće u omjeru 1 : 3), uz automatsko upravljanje udarcima struje koji nastaju pri toj promjeni brzine, ugrađen je mali istosmjerni generator (NG) sa serijskom uzбудom ( $R_{uNG}$ ). Njega pokreće propelerski istosmjerni motor, a u protuspoju je s uzбудom motora.

Propelerski elektromotor dimenzionira se tako da se vrti s polovicom brzine vrtnje kad je uzбудni namot generatora (NG) isključen.



SI. 5.1.1. Shema spoja s konstantnim naponom

Spoj s konstantnim naponom prikladan je za manje brodove porivne snage do 350 kW. Iznad te snage primjena je neekonomična jer generator (NG) i uređaj za upravljanje bitno poskupljuju izvedbu. Jednako tako, nedostatak je tom spoju što se propelerski istosmjerni motor mora pokrenuti preko reduktora koji se mora dimenzionirati za nazivnu struju armature, pa je zbog toga vrlo glomazan, a cijeli sustav propulzije neprikladan.

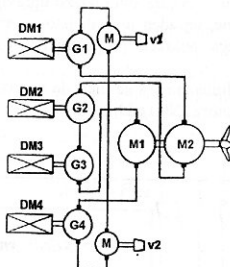
### 5.1.2. Spoj s konstantnom strujom

Takozvani "spoj s konstantnom strujom" upotrebljava se onda kad se iz istog izvora moraju osim propelerskog motora napajati i druga veća trošila na brodu. Na slici 5.1.2. predočen je spoj s konstantnom strujom u kojem četiri dizelska motora (DM1 do DM4) pokreću četiri istosmjerna generatora (G1 do G4) koji napajaju dva propelerska istosmjerna motora (M1 i M2) i dva vitlena motora (M-V1 i M-V2).

Prema slici 5.1.2. istosmjerni generatori i motori spojeni su serijski, a uzbuđa generatora namješta se posebnim regulacijskim uređajem tako da struja armature svih serijski spojenih strojeva zadržava konstantnu vrijednost. Promjena brzine vrtnje i smjera vrtnje različitih motora postiže se promjenom smjera njihove struje uzbuđa.

Opterećenje istosmjernih generatora konstantne struje proporcionalno je njihovu naponu, koji je jednak zbroju napona serijski priključenih istosmjernih motora. Istosmjerni generatori dimenzioniraju se tako da jedan ili više njih spojenih

serijski može ekonomično raditi i kad brodska elektrana ne služi za propulziju, tj. mogu napajati razna trošila na brodu.



SI. 5.1.2. Shema spoja s konstantnom strujom

Istosmjerni motori koji rade s konstantnom armaturnom strujom razvijaju moment koji je određen uzbuđnom strujom i neovisan je o brzini vrtnje. Uz određenu uzbuđnu struju rast će brzina vrtnje sve dok se ne izjednači moment istosmjernog motora s protumomentom propelera. Istosmjerni motor može se zakočiti bez opasnosti jer armaturna struja ne će narasti. Bijeg istosmjernog motora pri malim protumomentima sprječava se s pomoću malog dodatnog istosmjernoga generatora, a njega pokreće propelerski istosmjerni motor, i spojen je serijski s uzbuđom tako da uzbuđa slabi kad raste brzina vrtnje istosmjernom motoru. S druge strane, posebni uređaj ograničava visinu napona, a istosmjerni motor nije moguće preopteretiti zbog konstantne struje.

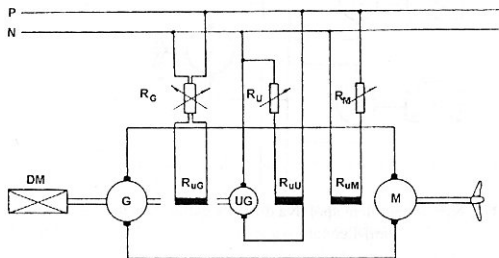
### 5.1.3. Ward-Leonardov spoj

Istosmjerni pogon propelera u Ward-Leonardovu spoju predočen je shemom na slici 5.1.3. Sastoji se od dizelskog motora (DM) koji pokreće istosmjerni generator (G), propelerskog istosmjernog motora (M) i uzbuđnog generatora (UG). Armature su istosmjernog generatora i motora međusobno spojene, a uzbuđne namote generatora ( $R_{ug}$ ) i motora ( $R_{uM}$ ) napaja uzbuđni generator s paralelnom uzbuđom ( $R_{ut}$ ).

U Ward-Leonardovu spoju brzina vrtnje propelerskog motora ovisi samo o naponu generatora i o magnetskom polju istosmjernog motora, a regulira se promjenom uzbuđe istosmjernog generatora. Dobiveni polaritet i visina narinutog napona određuju smjer i brzinu vrtnje propelerskom motoru. Budući da se struja uzbuđe generatora, tj. napon propelerskog istosmjernog motora može mijenjati po volji, daje se propelerski istosmjerni motor prilagoditi svim zahtjevima propelera.

Razvijeni moment istosmjernog motora za zadanu brzinu vrtnje propelera ovisi o magnetskom toku, struji i konstanti motora. Posebni uređaj automatski prilagođuje moment različitim vrijednostima poriva, i to osobito pri broskom manevriranju. Kad poraste moment na propeleru, uređaj smanjuje brzinu vrtnje tako

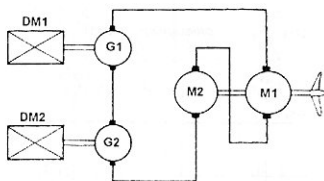
da predana snaga u plovidbi i za vrijeme manevra ostaje približno konstantna. Pri kočenju propelerom mijenja se smjer vrtnje propelera i tok energije, ali se ne mijenja opterećenje dizelskom motoru. Snaga potrebna za uzbudu generatora, s pomoću koje se upravlja brzinom vrtnje propelera, iznosi 0,5 do 1% snage potrebne za pogon propelera. Zbog toga su i aparati za upravljanje mali, i premda su robustne izvedbe, omogućuju smještaj na bilo koje mjesto i upravljanje propelerom s bilo kojeg mjesta na brodu.



Sl. 5.1.3. Shema istosmjernog Ward-Leonardova spoja

Ekonomičnost pogona postiže se većim brojem serijski ili paralelno spojenih istosmjernih generatora, koji se prema potrebama uključuju u pogon.

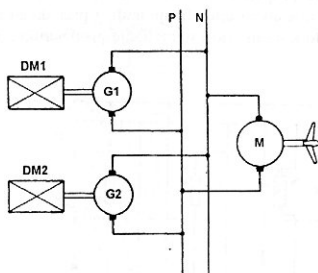
Većinom su generatori spojeni serijski na način kako je shematski predočeno na slici 5.1.4.



Sl. 5.1.4. Načelni serijski spoj dva dizelska generatora u Ward-Leonardovu spoju

Ako je od dva istosmjerna generatora jednake snage, prema slici 5.1.4., uključen samo jedan, uz punu uzbudu generatora i propelerskog motora postiže se 50% brzine vrtnje propelerskog motora. Budući da se snaga propeleru mijenja približno s trećom potencijom brzine vrtnje, samo se oko 12,5% ukupne snage generatora prenosi na propeler, pa se smanjivanjem uzbude propelerskog motora, uz dopuštenu snagu, može povećati brzina vrtnje propelera do cca 79% maksimalne brzine vrtnje. U tom spoju nije potrebna velika točnost regulacije brzine vrtnje dizelskom motoru.

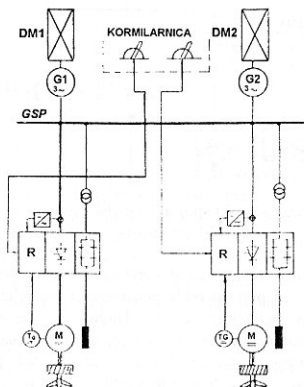
Za razliku od serijskog spoja, za paralelni spoj dizelskih generatora, kako je načelno predočeno na slici 5.1.5., potrebna je veća točnost regulacije brzine vrtnje dizelskom motoru.



Sl. 5.1.5. Načelni paralelni spoj dva dizelska generatora u Ward-Leonardovu spoju

#### 5.1.4. Spoj dizelskog sinkronoga generatora i istosmjernog motora

Električna propulzija broda danas se najčešće ostvaruje dizelskim generatorima izmjenične struje koji preko ispravljačkih sklopova napajaju istosmjerne motore, a oni preko reduktora pokreću brodski propeler, kako je načelno predočeno na slici 5.1.6.



Sl. 5.1.6. Shema spoja dva dizelska sinkrona generatora koji napajaju dva istosmjerna propellerska motora

## 5.2. Pogon propelera motorom izmjenične struje

Za pogon propelera motorom izmjenične struje upotrebljavaju se trofazni sinkroni ili asinkroni motori posebnih izvedaba. To je moguće ostvariti na nekoliko načina.

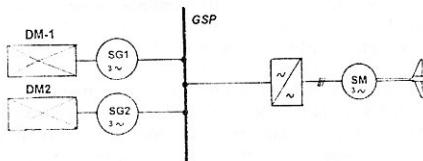
*Prvi* je način s dizelskim generatorom kako je shematski predočeno na slici 5.2.1.



Sl. 5.2.1. Načelni spoj dizelskoga generatora i propelerskog sinkronog motora

Prema slici 5.2.1., dizelski motor (DM) pokreće sinkroni generator (SG) koji napaja propelerski sinkroni motor (SM) s prigušnim kavezom na rotoru. Pri pokretanju dizelski motor pogoni generator s cca 20% nazivne brzine vrtnje, a propelerski motor radi kao asinkroni. Regulacijom brzine vrtnje dizelskog motora mijenja se frekvencija napona generatora i brzina vrtnje propelerskom sinkronom motoru, dok se smjer vrtnje tog propelerskog motora mijenja tako da se međusobno zamijeni priključak dviju faza motora. Sinkroni motor u tom slučaju koči propeler, a da bi ga zaustavio, mora u suprotnom smjeru razviti potrebni moment.

*Drugi* je način s dva dizelska generatora kako je shematski predočeno na slici 5.2.2.



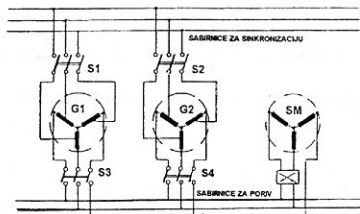
Sl. 5.2.2. Načelni spoj dva dizelska generatora koji napajaju jedan propelerski sinkroni motor

U spoju prema slici 5.2.2., propelerski sinkroni motor (SM) postiže oko 80% nazivne brzine vrtnje s energijom jednog generatora (SG-1) kojeg pokreće dizelski motor (DM-1). Da bi se dobila nazivna brzina vrtnje propelera, uključuje se i drugi dizelski motor (DM-2), odnosno generator (SG-2), a da se pri tome nije prekinulo napajanje propelerskom sinkronom motoru.

Reverziranje se izvodi zamjenom dviju faza propelerskom sinkronom motoru, ali prije toga mora se isključiti njegova uzbuda.

Nedostatak je toga načina da generatori više ne mogu raditi sinkrono kad im se prekine uzbuda. Zbog toga se generatori izrađuju sa statorskim namotom podijeljenim u dva dijela, kako je shematski predočeno na slici 5.2.3.





Sl. 5.2.3. Načelni spoj dva sinkrona generatora i sinkronog motora na sabirnice za sinkronizaciju i poriv

U trenutku reverziranja propelerskog sinkronog motora, prema slici 5.2.3., reverzira se polje uzbude tako da obje polovice namota oba dizelska generatora, iako imaju nazivni napon, rade u opoziciji, pa je rezultirajući napon na porivnim sabirnicama propelerskog sinkronog motora jednak nuli. Nakon isključenja propelerskog sinkronog motora može se jedna po jedna polovica statorskog namota generatora sinkronizirati na sabirnice za sinkronizaciju. Kad je postignut sinkronizam i izmjene faze propelerskom sinkronom motoru, tada se on uključuje na porivne sabirnice.

### 5.3. Perspektive primjene električne propulzije broda

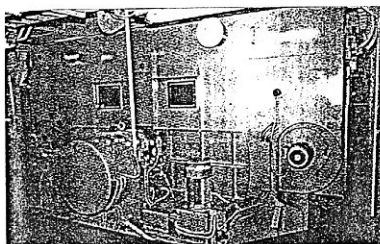
Danas se sve više uvodi električna propulzija u novogradnjama brodova. Pri tome najznačajniju ulogu ima dizel-električni pogon, i to ne samo na malim putničkim brodovima (trajektima) već i na trgovačkim brodovima, odnosno na tankerima.

Dosadašnja istraživanja su pokazala da je sve manje razloga koji priječe primjenu dizel-električne propulzije na brodu. Dva bitna nedostatka: manja korisnost i veća početna financijska ulaganja u usporedbi sa standardnom mehaničkom propulzijom nisu više odlučujuća. Prvo, smanjenje korisnosti, koja se odnosi samo na mehaničku snagu potrebnu za pokretanje brodske propelerne, već danas je moguće poništiti boljom iskoristivošću električne energije za propulziju, a drugo, ugradnjom sve više serijski proizvedene električne opreme visoke kvalitete izrade bitno smanjuje i početna financijska ulaganja.

Osnovna prednost dizel-električnog pogona je u tome što se njime postiže optimalna operativna fleksibilnost u brodske elektromotornom pogonu. Uporabom većeg broja identičnih strojeva osigurava se potrebna energija velikom broju ugrađenih električnih trošila na brodu. Jednako tako, dizel-električna propulzija dopušta da se dizelski strojevi mogu postaviti u brod točno gdje su najdjelotvorniji, tj. nisu ograničeni dužinom propelerske osovine jer se napajanje, upravljanje i regulacija brzine vrtnje propelerskog motora ostvaruje električnim prijenosom. Zbog toga se na suvremenim brodovima dizelski sinkroni generatori mogu ugrađivati i u strojarnicu broda na jednom mjestu kako se vidi na slici 5.3.1., a propelerski motori na drugom mjestu, kako se vidi na slici 5.3.2.



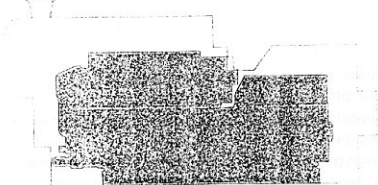
Sl. 5.3.1. Fotografija strojarnice broda s dizelskim generatorima za napajanje propellerskih motora



Sl. 5.3.2. Fotografija strojarnice broda s dva propellerska motora

Dizel-električni pogoni imaju prednost u odnosu prema klasičnim dizel-mehaničkim pogonima jer je moguće kontinuirano mijenjati brzinu vrtnje propelera u cijelom opsegu regulacije brzine od 0 do 100%. Istraživanja su pokazala da s obzirom na sigurnost i zalihost, tj. manevriranje i rad s jednim dizelskim strojem propeler s promjenljivim krilima (*prekretni propeler*) ima bolja svojstva, dok je s obzirom na cijenu godišnjeg održavanja jeftiniji propeler s fiksnim krilima (*fiksni propeler*).

Ocjenjujući sve prednosti i nedostatke dizel-električne i standardne mehaničke propulzije može se zaključiti da su ukupna ulaganja u opremu za dizel-električnu propulziju mnogo manja, a kako se vidi na slici 5.3.3.



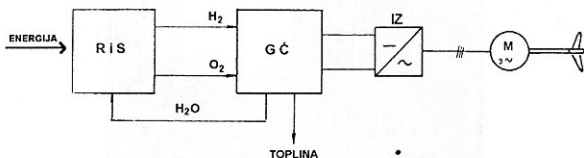
Sl. 5.3.3. Poredbeni prikaz ulaganja u opremu za dizel-električnu (tamna površina) i standardnu mehaničku propulziju

Pretpostavlja se da će se u budućnosti kao izvor za električnu propulziju broda, imati i gorive ćelije, koje su se do danas ugrađivale u svemirske brodove, a neki su pokusi provedeni i na podmornicama.

Osnovna prednost za primjenu gorivih ćelija je visoki stupanj korisnosti i vrlo mali negativni utjecaj na okoliš. Stupanj korisnosti je znatno viši nego u svih do danas korištenih toplinskih procesa za proizvodnju električne energije (više od 70%), dok se pri izgaranju ne stvaraju nikakvi štetni sastojci.

Do danas je razvijeno više gorivih ćelija s obzirom na vrstu goriva, elektrode, elektrolit i oksidante. Uglavnom rade na niskim temperaturama, a napon je jedne ćelije malen, tako da se više njih spaja serijski.

Goriva ćelija radi vrlo jednostavno. Ako se na elektrode ćeliji dovodi npr. vodik ( $H_2$ ) kao gorivo i kisik ( $O_2$ ) kao oksidant, tada će doći do njihova spajanja i oslobađanja elektriciteta. Slično kao u galvanskih elemenata, između elektroda (anode i katode) stvorit će se napon, a kada se na te elektrode spoji neko trošilo, kroz njega će poteći istosmjerna struja. Rezultat reakcije još je čista voda ( $H_2O$ ) i otpadna toplina. Kada se toj ćeliji (GĆ) doda regenerator i separator (R i S) te dovodi energija za elektrolizu na vodik i kisik, dobiva se zatvoreni proces, što se vidi na slici 5.3.4.



Sl. 5.3.4. Shema spoja propellerskog elektromotora i gorive ćelije

Da bi se mogao pokrenuti elektromotor propelera (M) prema slici 5.3.4., potreban je samo izmjenjivač (IZ) za pretvorbu istosmjerne struje približno konstantnog napona. Takvi pretvarači danas su jednostavni, jeftini i rade sa stupnjem korisnosti većim od 99%.

## 5.4. Pitanja i zadaci za provjeru znanja

1. Kako se ostvaruje električna propulzija broda?
2. Koji se izvori električne energije upotrebljavaju za napajanje propellerskih elektromotora?
3. Što je mjerodavno za dimenzioniranje električnih propulzijskih strojeva?
4. Skicirajte i objasnite spoj s konstantnim naponom.
5. Skicirajte i objasnite spoj s konstantnom strujom.
6. Skicirajte i objasnite Ward-Leonardov spoj.
7. Skicirajte i objasnite spoj dizelskog sinkronoga generatora i istosmjernog propellerskog motora.
8. Kako se ostvaruje pogon propelera motorom izmjenične struje?
9. Što su gorive ćelije?
10. Nabrojite osnovne prednosti i nedostatke dizel-električne propulzije na brodu.

## 6. TROŠILA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU

Sva trošila električne energije na brodu mogu se podijeliti u četiri osnovne skupine:

1. elektromotorni pogoni;
2. toplinska trošila;
3. svjetlosna trošila;
4. ostala trošila.

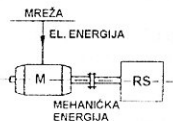
Elektromotorni pogoni najveća su brodska trošila električne energije, tj. oni troše 75 - 80 % proizvedene električne energije na brodu. U tu skupinu trošila ubrajaju se električni pogoni vitala, pumpa, kompresora, ventilatora i raznih pomoćnih strojeva nužnih za rad glavnih strojeva.

Toplinska trošila ugrađena u brod, kao što su npr. električni uređaji i aparati za grijanje i kuhanje, klimatizacija, razni grijači goriva i maziva itd., troše 10 - 15 % ukupno proizvedene električne energije na brodu.

Svjetlosna trošila, u koju se ubrajaju sve vrste rasvjete na brodu (opća ili normalna, pomoćna, pojačana, dekorativna i rasvjeta u slučaju opasnosti, te signalno-navigacijska), troše 3 - 10 %, a ostala trošila, tj. trošila slabe struje (razni alarmi) i specijalna trošila na brodu (navigacijski uređaji i brodske veze), troše 1 - 3 % ukupno proizvedene električne energije na brodu.

### 6.1. Elektromotorni pogoni na brodu

Kad za pogon radnog stroja, odnosno radnog mehanizma služi mehanička energija koju daje elektromotor tada se govori o *elektromotornom pogonu*. Na slici 6.1.1. predložen je jednostavni elektromotorni pogon, gdje je *M* elektromotor, a *RS* radni stroj.



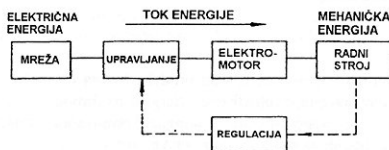
Sl. 6.1.1. Načelna izvedba jednostavnog elektromotornog pogona

Zadaća je elektromotornog pogona prije svega da električnu energiju pretvori u mehaničku sa što je moguće višim stupnjem korisnosti. Pri tome se teži da se korištenjem mogućnosti elektromotora i primjenom upravljačke i regulacijske tehnike, postignu tehnički i ekonomski najpovoljnija rješenja.

Prvi elektromotorni pogon ostvario je Boris S. Jacobi 1838. godine, tjerajući primitivnim elektromotorom čamac s 14 osoba po rijeci Neva u Leningradu. Kao

izvor struje za elektromotor služila je baterija galvanskih elemenata. Od tada do danas, zbog izvanrednih tehničkih svojstava i ekonomskih razloga, elektromotori su postali najvažniji motori za pogon radnih strojeva. Budući da im nije potrebno gorivo, elektromotori ne stvaraju ispušne plinove i ne onečišćuju okolinu, a buka, koju pri radu proizvode, neznatna je u usporedbi s ostalim pogonskim strojevima.

Pojednostavljeni blokovski dijagram suvremenog elektromotornog pogona što prikazuje vezu između brodske mreže koja daje električnu energiju i radnog stroja koji treba mehaničku energiju, predočen je na slici 6.1.2.



Sl. 6.1.2. Blokovski dijagram suvremenog elektromotornog pogona

Pretvaranje električne energije u mehaničku događa se u elektromotoru. S obzirom na zahtjeve proizvodnog procesa u pogledu promjene brzine vrtnje i dinamičkih stanja, koristi se pri tome upravljačkom ili regulacijskom tehnikom. Pri tome je osobito važno optimalno prilagoditi elektromotor i upravljačke, odnosno regulacijske elemente na zahtjeve radnog stroja.

Glavni je element elektromotornog pogona elektromotor. Osim što daje mehaničku energiju radnom stroju, često upravlja ili automatski regulira određenim radnim procesom s pomoću upravljačkih i regulacijskih elemenata.

Između elektromotora i radnog stroja mehanička je veza, a između izvora, upravljačkih elemenata i elektromotora električna veza.

Prema tome, svaki elektromotorni pogon sadrži u načelu sljedeće osnovne elemente:

- radni stroj, odnosno radni mehanizam koji obavlja radni proces;
- elektromotor koji daje mehaničku energiju radnom stroju;
- spojne elemente (spojke, remenice itd.) koji mehanički povezuju radni stroj s elektromotorom;
- priključne i upravljačke elemente kojima se elektromotor priključuje na izvor električne energije, odnosno kojima se upravlja;
- zaštitne uređaje kojima se osigurava elektromotor i uređaji protiv preopterećenja, odnosno pregrijavanja.

Zadnja dva nabrojena elementa omogućuju da se kontrolira i utječe na željeni rad elektromotora. Takvi elementi su npr. upravljivi usmjerivači, statički pretvornici frekvencije, ili drugi uređaji koji daju motoru odgovarajuće napajanje, zatim otpornici, sklopke, pokretački i upravljački uređaji, uređaji za mjerenje itd. Ponegdje se gubi poneki od elemenata, jer ovisno o značaju i zahtjevu elektromotornog pogona izgleda i njegov sastav. Nabrojani elementi i njihovo zajedničko djelovanje s radnim strojem određuju pogonske karakteristike elektromotornog pogona.

U elektromotornom se pogonu javljaju razne fizikalne veličine koje karakteriziraju njegov rad. Tako se razlikuju *mehaničke* veličine (brzina vrtnje,

moment tereta, moment motora itd.), *električne* (struja, napon, otpor itd.), *magnetske* (tok, indukcija itd.) i *toplinske* (temperatura, količina topline itd.).

Kad se pri radu elektromotornog pogona vremenski ne mijenja ni jedna fizikalna veličina (osim zbog karaktera promjene izmjeničnih veličina), pogon se u općem smislu nalazi u *stacionarnom* (statičkom) stanju, a ako se vremenski mijenja makar i jedna fizikalna veličina, pogon se u općem smislu nalazi u *dinamičkom stanju*. To stanje često se naziva i *prijelaznim stanjem*, a sama pojava prijelaznom pojavom, jer pogon prelazi iz jednog stacionarnog stanja u drugo.

### 6.1.1. Osnovna statička i dinamička stanja elektromotornih pogona

Za detaljnu analizu statičkih i dinamičkih stanja raznih elektromotornih pogona studenti se upućuju na literaturu [8] i [18], a na ovom mjestu će se promatrati samo osnovna statička i dinamička stanja u mehaničkom smislu, razmatrajući međusobni odnos fizikalnih mehaničkih veličina.

U stacionarnom stanju ( $n = \text{konst.}$ ) svaki radni stroj suprostavlja se okretnom momentu  $M_m$  (u tekstu dalje  $M$ ) pogonskog elektromotora s momentom tereta  $M_t$  iste veličine. Taj moment radnog stroja sastoji se od dva dijela:

- korisnog okretnog momenta koji obavlja rad;
- okretnog momenta trenja.

U dinamičkom stanju ( $n \neq \text{konst.}$ ) osim naznačenih momenata pojavljuje se moment ubrzanja  $M_u$  (ili usporenja) kao posljedica djelovanja tromе mase elektromotornog pogona.

Na osovinu elektromotora općenito djeluju tri momenta:

- a) moment elektromotora  $M$  sa smjerom koji zahtijeva pogon;
- b) moment tereta  $M_t$  radnog stroja preračunan na osovinu motora, koji djeluje nasuprot momentu elektromotora;
- c) moment ubrzanja (ili usporenja)  $M_u$  kojim moment tromosti pogona djeluje na osovinu.

Pod momentom tromosti pogona razumijeva se moment tromosti rotora i drugih dijelova u vrtnji, ili pravocrtno gibajućih dijelova pogona reduciranih na osovinu elektromotora.

Moment ubrzanja (usporenja)  $M_u$  tipično je reaktivan pa se kao izraz momenta tromosti opire svakoj promjeni brzine vrtnje.

Opća jednadžba gibanja rotirajućih masa elektromotornog pogona glasi:

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0, \quad (6.1)$$

tj. poništava se zbroj svih okretnih momenata na osovinu elektromotora i radnog stroja

Jednadžba (6.1) može se također pisati u obliku:

$$M_u = M - M_t = J \frac{d\omega}{dt} = J \dot{\omega}, \quad (6.2)$$

gdje je:

- $M$  - moment motora,  
 $M_t$  - moment tereta,  
 $J$  - moment tromosti (inercije) svih gibajućih dijelova reduciran na osovinu elektromotora,  
 $\omega$  - kutna brzina,  
 $\varepsilon$  - kutno ubrzanje.

Jednadžbom (6.2) mogu se obuhvatiti svi procesi gibanja elektromotornog pogona.

Pri stacionarnom pogonskom stanju elektromotornog pogona u mehaničkom smislu, moment elektromotora i moment tereta radnog stroja međusobno su jednaki, tj.

$$M = M_t \quad (6.3)$$

Prema (6.2) stacionarno stanje karakteriziraju jednadžbe:

$$\omega = \text{konst.} \quad n = \text{konst.} \quad (6.3.a)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \quad \frac{dn}{dt} = 0 \quad (6.3.b)$$

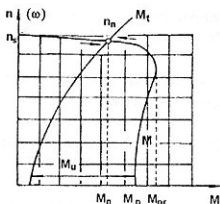
$$\varepsilon = 0 \quad (6.3.c)$$

$$M_u = 0 \quad (6.3.d)$$

U tom stanju nema ubrzanja ili usporenja, pa je brzina vrtnje konstantna.

Ovisnost spomenuta tri momenta objasniti će se na dva primjera na brodu.

a) Prvi primjer odnosi se na elektromotorni pogon u kojem trofazni asinkroni kavezni motor s karakteristikom momenta  $M$  pokreće ventilator kojemu je karakteristika  $M_t$ , kako je predloženo na slici 6.1. 3.



Sl. 6.1.3. Vanjska karakteristika trofaznog kaveznog motora  $M$  i ventilatora  $M_t$ .

Da bi se pogon zaletio do stacionarne brzine vrtnje, mora moment motora  $M$  biti veći u čitavom području  $n$  od momenta tereta  $M_t$ . Razlika oba momenta je, prema

(6.2), moment ubrzanja  $M_u$ . Vrijeme zaleta ovisi o veličini momenta tromosti i momenta ubrzanja. Zalet  $\omega = f(t)$  mogao bi se izračunati prema jednadžbi (6.2) ako su poznati moment tromosti i analitički izrazi karakteristika  $M = f(n)$  i  $M_t = f(n)$ . Budući da se to obično ne poznaje, to se krivulja zaleta i vrijeme zaleta obično određuju grafički.

Nakon što motor prijede za vrijeme zaleta brzinu vrtnje koja odgovara prekretnom (maksimalnom) momentu  $M_{pr}$ , počinje moment ubrzanja naglo padati s porastom brzine vrtnje i postaje jednak nuli u sjecištu obiju karakteristika. U toj točki postignut je stacionarni pogon, pri čemu je  $M_u = 0$ ,  $M = M_t$  i  $n = n_n$  (nazivna brzina vrtnje). Ta pogonska točka je stabilna jer uz malo prekoračenje nazivne brzine vrtnje postaje  $M_t > M$ , odnosno pri malom smanjenju brzine je  $M > M_t$ . U oba se slučaja opet vraća u prvobitnu radnu točku s brzinom  $n_n$ , što je na slici 6.1.3. označeno strjelicama.

Pri labilnom pogonskom stanju odstupanje brzine vrtnje postaje uvijek sve veće, tako da pogon dođe ili u mirovanje ili brzina vrtnje dalje raste.

U promatranom primjeru elektromotornog pogona pretpostavljeno je da ventilator upravo opterećuje elektromotor nazivnim momentom  $M_n$ , pri čemu je postignuta stacionarna (nazivna) brzina vrtnje  $n_n$ . Uz takvo opterećenje i u trajnom pogonu ne će doći do pregrijavanja namota elektromotora. Ako bi nazivna snaga elektromotora bila znatno veća od snage ventilatora u stacionarnom pogonu, brzina vrtnje bi bila veća od nazivne, i to bliža sinkronoj brzini vrtnje  $n_s$ , što je veća razlika između nazivne snage elektromotora i ventilatora. U tom slučaju motor je slabo izabran, ima preveliku snagu (predimenzioniran je), slabo je iskorišten i radi s lošim faktorom snage ( $\cos \varphi$ ). Obratno, ako je izabran premalen elektromotor (nazivna snaga elektromotora je manja od snage ventilatora), stacionarna brzina vrtnje bit će manja od nazivne brzine, a u trajnom pogonu elektromotor će biti termički preopterećen. Zbog toga elektromotor smije samo kratkotrajno raditi, ili dolazi do opasnosti da namot elektromotora brzo pregori.

Kad se motor isključi s mreže postaje  $M = 0$ , a prema (6.2) dobiva se:

$$M_u = -M_t - J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon. \quad (6.4)$$

Moment opterećenja  $M_t$  usporava pogon do mirovanja. I tu se točno vrijeme zaustavljanja ne može jednostavno odrediti analitički, pa se obično koristi grafičkom metodom.

b) U drugom primjeru, prema slici 6.1.4., radne točke  $n_1$  i  $n_2$  stacionarnog pogonskog stanja određene su sjecištem mehaničkih karakteristika elektromotora i radnog mehanizma. Prikazane karakteristike momenta tereta  $M_{t1}$  i  $M_{t2}$  odnose se na pogon brodskih dizalica. Svakom promjenom momenta tereta (npr. povećanjem opterećenja od  $M_{t1}$  na  $M_{t2}$ ) automatski se mijenja moment (od  $M_1$  do  $M_2$ ) i brzina vrtnje elektromotora (od  $n_1$  do  $n_2$ ).

Prijelaz s jedne stacionarne točke ( $n_1$ ) na drugu ( $n_2$ ) nužno dovodi, između dva stacionarna stanja, do mehaničkih prijelaznih pojava u elektromotornom pogonu. U tim okolnostima riječ je o dinamičkom stanju elektromotornog pogona u mehaničkom smislu i tada nije ispunjen uvjet jednakosti momenta motora  $M$  i momenta tereta  $M_t$ , pa je:

$$M \neq M_t. \quad (6.5)$$



Tada je moment ubrzanja jednak razlici momenta:

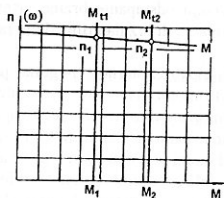
$$M_u = M - M_r \quad (6.5.a)$$

Brzina vrtnje mijenja se, odnosno:

$$\omega \neq \text{kons.} \quad n \neq \text{kons.} \quad (6.5.b)$$

i to više što je veći moment ubrzanja, tj.:

$$\frac{d\omega}{dt} = f(M_u) \neq 0 \quad \frac{dn}{dt} = f(M_u) \neq 0. \quad (6.5.c)$$



Sl. 6.1.4. Radne točke radnog stanja dizaličnog pogona

Jednadžbe (6.5) do (6.5.c) karakteriziraju dinamičko stanje elektromotornog pogona u mehaničkom smislu.

Statička i dinamička stanja elektromotornog pogona u mehaničkom smislu međusobno se neprekidno izmjenjuju. Nemoguće je dovesti elektromotorni pogon u bilo koje stacionarno stanje, ili ga izvesti iz njega, a da se ne prođe kroz dinamičko stanje.

Da bi se mogle razumjeti karakteristike elektromotornih pogona, potrebno je poznavati osnovne pojmove pogonskih stanja elektromotora.

*Vanjska karakteristika* (ili *mehanička karakteristika*) elektromotora  $M = f(n)$  njegova je osnovna karakteristika. U proučavanju električnih strojeva ta se karakteristika obično prikazuje u obliku  $M = f(n)$ , ili  $M = f(\omega)$ , dok se za elektromotorne pogone koristi obratom, tj.  $n = f(M)$ , ili  $\omega = f(M)$ , ali to nije pravilo.

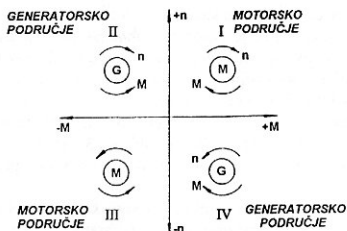
Moguća područja rada elektromotornih pogona prikazana su na slici 6.1.5. Kako se vidi na toj slici, u I. i III. kvadrantu je motorsko pogonsko stanje elektromotornog pogona, gdje je vrtnja cijelog elektromotornog pogona u smjeru motorskog okretnog momenta  $M$ . U II. i IV. kvadrantu je generatorsko (kočno) pogonsko stanje elektromotornog pogona, pri kojemu je vrtnja cijelog elektromotornog pogona suprotna smjeru okretnog momenta  $M$ . U svakom od navedenih pogonski stanja moguća su tri slučaja:

## a) Motorsko pogonsko stanje elektromotornog pogona:

- brzina vrtnje raste,  $M > M_p$ , a  $M_u$  ubrzava pogon;
- brzina vrtnje se ne mijenja,  $M = M_p$ ,  $M_u = 0$ , a pogon je u stacionarnom radnom stanju;
- brzina vrtnje opada,  $M < M_p$ , a  $M_u$  koči pogon.

## b) Generatorsko pogonsko stanje elektromotornog pogona:

- brzina vrtnje raste,  $M < M_p$ , a  $M_u$  koči pogon, ali nedovoljno efikasno;
- brzina vrtnje se ne mijenja,  $M = M_p$ ,  $M_u = 0$ , a pogon je u stacionarnom kočnom stanju;
- brzina vrtnje opada,  $M > M_p$ , a  $M_u$  efikasno koči.



Sl. 6.1.5. Pogonska stanja elektromotornog pogona

Prva dva slučaja motorskog stanja su radna, a treći slučaj je kočni, dok su u generatorskom stanju sva tri slučaja kočna. Kod elektromotornih pogona ne govori se o motorskom i generatorskom, nego o radnom i kočnom pogonskom stanju.

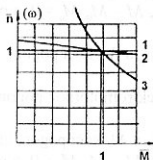
## 6.1.2. Vanjske (mehaničke) karakteristike elektromotora

*Vanjska (mehanička) karakteristika* elektromotora pokazuje ovisnost brzine vrtnje o momentu na osovini elektromotora, tj.  $n = f(M)$  ili  $\omega = f(M)$ . Na temelju te ovisnosti može se ocijeniti prikladnost elektromotora za elektromotorni pogon i ona je osnovni kriterij pri izboru elektromotora.

Vanjska karakteristika elektromotora koja se postiže pri nazivnim veličinama elektromotora naziva se *prirodna* ili *normalna karakteristika*. Ona se može mijenjati vanjskim zahvatima, npr. promjenom uvjeta napajanja, uključivanjem otpora u strujne krugove elektromotora, ili promjenom spoja elektromotora. U tom slučaju govori se o *izvedenoj* (umjetnoj) *vanjskoj karakteristici* elektromotora.

Elektromotor mora raditi u stabilnom dijelu karakteristike pri čemu s porastom momenta tereta ne raste brzina vrtnje elektromotora. Većina elektromotora

ima padajuću vanjsku karakteristiku i ovisno o veličini promjene brzine vrtnje o promjeni momenta razlikuju se tri osnovne vrste vanjskih karakteristika, kako je predloženo na slici 6.1.6.



Sl. 6.1.6. Prirodne vanjske karakteristike elektromotora

Karakteristika 1 na slici 6.1.6. je *apsolutno kruta* ili *sinkrona vanjska karakteristika*. Brzina vrtnje elektromotora je konstantna i neovisna o veličini momenta tereta. Takvu karakteristiku imaju sinkroni motori.

Karakteristika 2 na slici 6.1.6. je *tvrda* ili *paralelna vanjska karakteristika*. Brzina vrtnje neznatno pada s povećanjem opterećenja. Takvu karakteristiku imaju:

- trofazni asinkroni motori u kojih brzina pada od praznog hoda do nazivnog opterećenja za približno 2 - 8% ovisno o njihovoj veličini;
- paralelno i nezavisno uzbuđeni istosmjerni motori, pri promjeni brzine vrtnje od praznog hoda do nazivnog opterećenja za približno 3 - 15%;
- istosmjerni kompaundni motori kojima pada brzina vrtnje približno 10 - 25%.

Karakteristika 3 na slici 6.1.6. jest *mekana* ili *serijska vanjska karakteristika*. Brzina vrtnje znatno pada s povećanjem opterećenja, i obratno, brzina vrtnje naglo raste s opterećenjem. Takvu karakteristiku imaju motori kojima je promjena brzine vrtnje od praznog hoda do nazivnog opterećenja veća od 25%, a to su:

- istosmjerni serijski motori;
- jednofazni serijski izmjenični kolektorski motori;
- trofazni serijski izmjenični kolektorski motori.

### 6.1.3. Karakteristična svojstva radnih strojeva

Svaki radni stroj ima svoju pogonsku karakteristiku, tj. karakteriziran je momentom tereta  $M_t$ . Taj se moment sastoji od dva dijela:

- korisnog okretnog momenta (obavljanje radnog procesa),
- okretnog momenta trenja (gubici).

Moment tereta  $M_t$  može ovisiti o brzini vrtnje, vremenu, kutu, putu, položaju i drugim fizikalnim veličinama. Zbog toga se pogonske karakteristike mnogobrojnih radnih strojeva pokretanih elektromotorom vrlo teško mogu, zbog svoje raznolikosti, sistematski podijeliti. Teškoće nastaju to više što se za mnoge radne strojeve može mijenjati više parametara, pa se za isti stroj dobiva više karakteristika.

Na brodu su najbrojniji mehanizmi kojima se moment tereta može prikazati kao funkcija brzine vrtnje, tj.  $M_t = f(n)$  ili  $M_t = f(\omega)$ , odnosno njihov obrat  $n = f(M_t)$ .

ili  $\omega = f(M_t)$  (npr. dizalice, vitla, pumpe, kompresori, ventilatori itd.). Ta ovisnost naziva se *statička* ili *mehanička karakteristika* radnog stroja (mehanizma).

Općenita ovisnost momenta tereta radnih strojeva o brzini vrtnje daje se prikazati izrazom:

$$M_t = M_o + (kM_{tn} - M_o) \left(\frac{n}{n_n}\right)^p, \quad (6.6)$$

gdje je:

- $M_o$  - moment trenja,
- $M_{tn}$  - nazivni moment trenja radnog stroja,
- $k$  - faktor opterećenja,
- $n$  - trenutna brzina vrtnje,
- $n_n$  - nazivna brzina vrtnje,
- $p$  - eksponent ovisan o mehaničkoj karakteristici.

Ako se zanemari utjecaj momenta trenja, tada jednadžba (6.6) prelazi u:

$$M_t = kM_{tn} \left(\frac{n}{n_n}\right)^p. \quad (6.6.a)$$

Četiri različita oblika mehaničkih karakteristika radnih strojeva daju različite vrijednosti eksponenta  $p$  u izrazu (6.6.a). Te karakteristike, reducirane na nazivne vrijednosti momenta, snage, kutne brzine i brzine vrtnje, predočene su na slikama od 6.1.7. do 6.1.10. Veličine reducirane na nazivnu vrijednost označene su crticom iznad oznake, pa je.

$$\frac{M_t}{M_{tN}} = \overline{M}_t, \quad \frac{P_t}{P_{tN}} = \overline{P}_t, \quad \frac{\omega}{\omega_N} = \overline{\omega}, \quad \frac{n}{n_N} = \overline{n}.$$

Karakteristike  $\overline{M}_t$  momenata tereta (pune crte) i pripadnih snaga (crtkane) prikazane su u obliku  $\overline{n} = f(\overline{M}_t)$  i  $\overline{n} = f(\overline{P}_t)$  i sve prolaze kroz točku 1 - 1. To znači da se pretpostavlja nazivno opterećenje ( $M_t = M_{tN}$ , odnosno  $\overline{M}_t = 1$ ), tj. faktor opterećenja  $k$  iz jednadžbe (6.6), odnosno (6.6.a) jednak je jedinici.

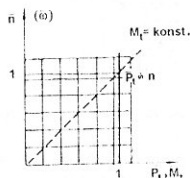
Radni strojevi kojima moment tereta ne ovisi o brzini vrtnje imaju karakteristike kao na slici 6.1.7. U tom slučaju je  $p = 0$  u jednadžbi (6.6), odnosno (6.6.a). Budući da je  $M_t = \text{konst.}$ , odnosno  $\overline{M}_t = 1$ , pogonska snaga, koja je općenito jednaka:

$$P = \omega M_t, \quad (6.7)$$

može se u reduciranom obliku prikazati:

$$\overline{P}_t = \overline{\omega} \cdot \overline{n}, \quad (6.8)$$

tj. snaga mora rasti linearno.



Sl. 6.1.7. Mehanička karakteristika radnog stroja za  $p = 0$

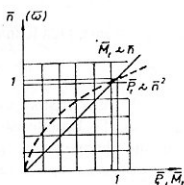
Karakteristični radni strojevi na brodu s karakteristikom prema slici 6.1.7. jesu brodске dizalice. Njihov broj je vrlo velik i raznovrstan, ali se najčešće ugrađuju dizalice s teretnim vitlima preko samarica, okretnе dizalice za različite namjene itd.

Radni strojevi kojima je moment tereta linearno ovisan o brzini vrtnje imaju karakteristike kao na slici 6.1.8. U tom je slučaju  $p = 1$ . Budući da je:

$$\overline{M}_t \div \overline{\omega} \div D, \quad (6.9)$$

pogonska snaga mora rasti s kvadratom brzine:

$$\overline{P}_t \div \overline{\omega}^{-2} \div D^{-2}; \quad (6.10)$$



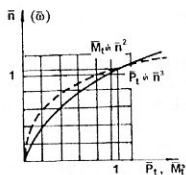
Sl. 6.1.8. Mehanička karakteristika radnog stroja za  $p = 1$

Radni strojevi kojima je moment tereta kvadratno ovisan o brzini vrtnje, imaju karakteristike kao na slici 6.1.9. U tom je slučaju  $p = 2$ . Takva karakteristika često se naziva *centrifugalna* ili *ventilatorska*. Budući da moment tereta raste s kvadratom brzine vrtnje, tj.:

$$\overline{M}_t \div \overline{\omega}^{-2} \div D^{-2}, \quad (6.11)$$

pogonska snaga raste s trećom potencijom povećanja brzine vrtnje:

$$\overline{P}_t \div \overline{\omega}^{-3} \div D^{-3}. \quad (6.12)$$



Sl. 6.1.9. Mehanička karakteristika radnog stroja za  $p = 2$ .

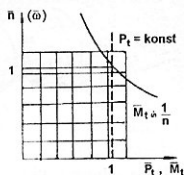
Karakteristični radni strojevi na brodu s karakteristikom kao na slici 6.1.9 jesu centrifugalne pumpe, kompresori, ventilatori itd.

Radni strojevi kojima je moment tereta obratno proporcionalan brzini vrtnje, imaju karakteristike kao na slici 6.1.6.10. U tom je slučaju  $p = -1$ . Budući da je moment tereta obratno proporcionalan s brzinom vrtnje:

$$\overline{M}_t \div \frac{1}{\omega} \div \frac{1}{n}, \quad (6.13)$$

pogonska snaga je konstantna:

$$P_t = \text{konst.}, \quad \overline{P}_t = 1. \quad (6.14)$$



Sl. 6.1.10. Mehanička karakteristika radnog stroja za  $p = -1$

## 6.1.4. Tipični elektromotorni pogoni na brodu

Elektromotorni pogoni na brodu ovise o veličini, tipu i namjeni broda. Ipak, svi imaju vitla, pumpe, ventilatore, kompresore i centrifuge.

### 6.1.4.1. Pogon brodskih vitala

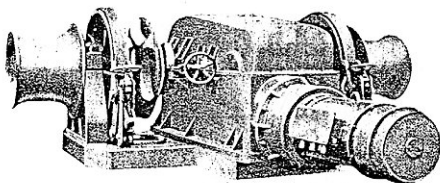
*Brodski vitla* dijele se na sidrena, teretna, pritezna i vlačna. Svi ti palubni strojevi rade ili za vrijeme manevra ili za vrijeme krcanja tereta.

#### a) Sidrena vitla

Kad brod ne može pristati uz obalu, osigurava se sidrom. Za spuštanje i dizanje sidra služi *sidreno vitlo*. Svaki brod ima na pramcu sidreno vitlo za dva sidra, a veliki brodovi imaju i na krmi još jedno sidreno vitlo.

Sidro se spušta djelovanjem svoje težine, a diže snagom pogonskog stroja vitla. Pri spuštanju težina sidra i sidrenog lanca okreće lančanicu. Da bi se istim vitlom moglo spuštati i dizati svako sidro zasebno, lančanica je spojena s osovinom preko spojke, pa se prema potrebi može isključiti ili priključiti. Radi reguliranja brzine spuštanja sidra, svaka lančanica ima kočnicu. Da sila koja djeluje na lanac usidrenog broda, a koja ovisi o jakosti morske struje i vjetra, ne bi oštetila sidreno vitlo, lanac se zakoči u stoperu na palubi ispred sidrenog vitla. Na krajevima osovine sidrenog vitla obično su učvršćeni bubnjevi za pritezno uže, tako da sidreno vitlo može ujedno služiti kao pritezno vitlo na brodskom pramcu.

Iako se u najnovije vrijeme sve više uvodi hidraulički pogon, za pogon sidrenog vitla uglavnom služe elektromotori. Na slici 6.1.11. vidi se jedno električno sidreno vitlo ispred kojeg su stoperi.



Sl. 6.1.11. Fotografija električnog sidrenog vitla na brodu

U istosmjernim sustavima za pogon sidrenog vitla upotrebljava se istosmjerni motor s paralelnim i serijskim uzбудnim namotom, što omogućuje odgovarajuće veće brzine vrtnje potrebne za pritezanje. Brzina motora regulira se redovito promjenom struje armature, odnosno odgovarajućim predotporima ili paralelnim otporima u rotorskom strujnom krugu, ili promjenom polja uzbude. Da se spriječi eventualni bijeg motora zbog pogrešnog rukovanja, upravljačka je sklopka blokirana tako da svaka operacija mora početi iz nultog položaja. Motor se automatski blokira i kad nestane napona u brodskoj mreži.

U trofaznom sustavu rabe se kavezni polno-preklopivi motori ili kombinacije kliznokolutnih motora s odgovarajućim načinima kočenja. Danas su najčešći trobrzinski polno-preklopivi kavezni motori s dva odvojena statorska namota, i to 16/8-polni u Dahlanderovu spoju i 4-polni u spoju zvijezda. Rotor ima odgovarajući dvokavezni namot koji daje motoru potrebnu otpornu karakteristiku. Budući da su motori smješteni na palubi, potpuno su zatvoreni i zaštićeni ako bi se preko njih preljevalo more. Razvijaju tri brzine vrtnje, od kojih najmanja služi za uvlačenje sidra u sidreno ždrijelo ili za lagano pritezanje broda, srednja brzina za dizanje i čupanje sidra i za pritezanje broda, a najveća brzina samo za prikupljanje rasterećenog priveznog užeta. Ti motori razvijaju maksimalni moment na početku zaleta i nemaju izražen prekretni moment. Zbog opasnosti od preopterećenja motori imaju obično u 4-polnom namotu ugrađenu termičku zaštitu.

Za pogon sidrenih vitala služe i posebno izrađeni Ward-Leonardovi pretvarači, a u novije vrijeme uvodi se i elektrohidraulički pogon. Za vrijeme spuštanja ili dizanja sidra elektromotor neprekidno radi, a pojedine operacije izvode se spregom hidrauličke pumpe i hidrauličkog motora. Za kočenje služi samokočni prijenos ili elektromagnetska kočnica na elektromotoru. U svakom slučaju potrebna je i dodatna ručna kočnica. Da se spriječi preopterećenje motora, ugrađena je mehanička klizna spojka koja djeluje kad moment na osovini motora poraste iznad 1,8-struke nazivne vrijednosti.

Velika okomita sidrena vitla za pojedinačni pogon svakog sidra imaju pogonski motor smješten u potpalublju.

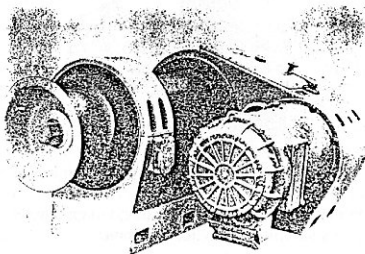
Snaga motora sidrenog vitla određuje se prema težini sidra i 100 m lanca, a ovisi i o brzini podizanja sidra iz mora. Približno se može uzeti da je pri brzinama podizanja od 9 do 12 m/s potrebna pogonska snaga motora od 10 do 40 kW.

## b) Teretna vitla

*Teretna vitla* brodu služe pri utovaru i istovaru tereta. Za njihov pogon mogu se uzeti istosmjerni ili izmjenični motori, koji moraju osigurati vrtnju bubnja za užu u oba smjera, tj. vitla moraju biti prekretna. Pri tome motori moraju omogućiti najveća dopuštena ubrzanja podizanja i spuštanja tereta uz popratne operacije zaleta, kočenja, prekretanja i višekratnog ponavljanja tih operacija.

U istosmjernim sustavima za pogon teretnog vitla uglavnom se rabe serijski istosmjerni motori, a rjeđe kompaundni. Kad se teret spušta, istosmjerni motor vitla djeluje kao generator pa električnu struju vraća u mrežu ili poništava u otpornicima. Kompaundni motori mogu s odgovarajućim kombinacijama spojeva serijskih i paralelnih otpora postići vrlo povoljne radne karakteristike. Pri tome obično na završetku zaleta motor razvije propisanu brzinu dizanja tereta. Brzina spuštanja tereta obično je 2 do 2,5 puta veća od brzine dizanja tereta, a prazne kuke za teret 3 do 3,5 puta veća. Za sve te operacije potezni moment mora biti 2 do 2,5 puta veći od nazivnog.

U izmjeničnim sustavima za pogon teretnog vitla najčešće služe trofazni polnpreklopivi višebrzinski kavezni motori. To je zbog toga što se u praksi pokazalo da većinom nije potrebna fina regulacija brzine teretnog vitla, već su za sve radne operacije dovoljna dva ili tri stupnja brzine. Jednostavni i robustni, a s kratkim vremenom zaleta, mogu postići jednake radne karakteristike kao s istosmjernim pogonskim motorom ili još povoljnije, uz veći broj operacija utovara. Na slici 6.1.12. vidi se električno teretno vitlo sa zupčanim prijenosom.



Sl. 6.1.12. Fotografija teretnog vitla na brodu sa zupčanim prijenosom

Pogon teretnih vitala na brodu trofaznim polnpreklopivim trobrzinskim kaveznim motorima služi za sve vrste opterećenja. Ti su motori zaštićeni od preopterećenja termoelementima u glavama statorskih namota. Elektromagnetska kočnica napaja se preko ispravljača istosmjernom strujom iz trofazne mreže i automatski zakoči motor kad nestane napona. U tom slučaju teret se može spustiti ručnim otpuštanjem kočnice.



Moderna brodska teretna vitla znatno su automatizirana, a pripadajući sklopni uređaj osigurava jednostavno posluživanje, postupni zalet motora, kočenje i bestrzajni prijelaz iz jedne na drugu brzinu vrtnje. Razvijena toplina u motoru odvodi se posebnim ventilacijskim uređajem koji je obično prilagođen na motor ili na vitlo, a koji radi za vrijeme dok je vitlo u pogonu. Nastupi li kvar na ventilaciji motora, automatski se prekida i njegov rad.

### c) Pritezna vitla

*Pritezna vitla* na brodu upotrebljavaju se za točno pristajanje uz obalu, jer brod to ne može obaviti snagom svojih propulzijskih strojeva. U tu se svrhu jedan kraj užeta veže za bitvu na kopnu, a drugi je na brodu namotan na bubanj priteznog vitla.

Pritezna vitla postavljaju se na pramcu i krmu broda. Na pramcu kao pritezno vitlo može služiti i sidreno vitlo, ako je posebno izvedeno za tu svrhu.

Ovisno o tome kako je postavljena osovinu i bubanj za namatanje užeta, pritezna vitla mogu biti vodoravna ili okomita. Vodoravnim priteznim vitlima motor je na palubi, a okomitih priteznih vitala može se smjestiti iznad ili ispod palube.

Pogon bubnja za namatanje užeta ostvaruje se istosmjernim ili izmjeničnim motorima. U istosmjernim sustavima pogonski motori su sa serijskim i paralelnim uzbudnim namotom, a u trofaznim sustavima to su kolutni asinkroni motori i dvopolni ili trolpolni preklapljivi kavezni asinkroni motori. Pogonski motori velikih vitala često se napajaju preko Ward-Leonardova pretvarača. Na slici 6.1.13. vidi se električno pritezno vitlo s okomito postavljenim bubnjem.



Sl. 6.1.13. Fotografija električnog priteznog vitla na brodu s okomito postavljenim bubnjem

Motor priteznog vitla mora imati elektromagnetsku kočnicu koja, nestane li napon, blokira rad motoru, a uređaji za upravljanje motorom uglavnom se ne razlikuju od uređaja za sidreno vitlo. Snaga motora ovisi o veličini broda i o brzini pritezanja. Za brzine pritezanja od 10 do 20 m/min pogonska snaga motora iznosi od 10 do 30 kW.

Za prolazak brodova kroz kanale i splavnice i za tegljenje drugih brodova ili teglenica služe posebna, tzv. *vlačna vitla*. Ta vitla normalno imaju posebni uređaj za održavanje konstantne sile u užetu ili konstantnog momenta na bubnju vitla. Prema tome kako se mijenja sila u užetu, uređaj mijenja brzinu vrtnje motora, tj. bubanj se

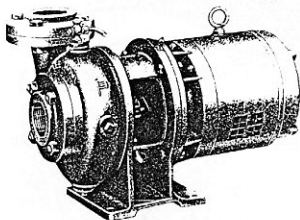
vitla brže ili sporije vrti, pri čemu se sila u užetu ne može mnogo promijeniti od propisane vrijednosti.

#### 6.1.4.2. Pogon brodskih pumpa

*Pumpe* na brodovima služe za transport tekućina potrebnih u energetskom procesu toplinskih strojeva, za sigurnost broda, za njegovo uravnoteženje i za brodske vodovode. Specijalni brodovi, npr. tankeri, imaju i pumpe za teret, a neki tegljači i pumpe za spašavanje i za gašenje požara.

Sve brodske pumpe koje dolaze u dodir s morskom vodom izrađuju se od materijala otpornih prema koroziji, najčešće od bronce. Također, redovito imaju okomitu osovinu koju pokreće motor. Na taj način smanjuje se potrebna tlocrtna površina i bolje se može povezati pumpa s cijevnim vodovima i kabelima.

Za male količine tekućine, a visoke tlakove upotrebljavaju se stapne, klipne i zupčane pumpe, a za velike količine tekućine samo centrifugalne pumpe. Fotografija centrifugalne pumpe vidi se na slici 6.1.14.



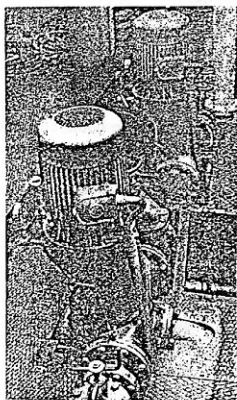
Sl. 6.1.14. Fotografija centrifugalne pumpe na brodu

Danas se pogon brodskih centrifugalnih, vijčanih i zupčanih pumpa najčešće izvodi elektromotorom. Pokretanje je jednostavno jer im protumoment raste s kvadratom brzine vrtnje, tako da se mogu rabiti jednostavni kavezni (indukcijski) motori s izravnim pokretanjem. Veći kavezni motori pokreću se s pomoću preklapke zvijezda - trokut ili s pomoću transformatora za pokretanje. Koristi se i dvobrzinski kavezni motorima (omjer brzine vrtnje 2 : 3) s automatskim uređajem za preklapanje polova kad motor postigne odgovarajuću nižu brzinu vrtnje. U modernim brodskim instalacijama teretnih brodova, pa i za pogon velikih pumpa za krcanje tereta na tankerima, služe i motori s izravnim pokretanjem ako brodsku mrežu napajaju odgovarajuće dimenzionirani samouzbudni kompaundni generatori. Dobri pogonski rezultati s takvim instalacijama postignuti su i kad motori imaju relativno velike snage. Struja zaleta takvim motorima može znatno prelaziti nazivnu struju motora (i do 215%), pa valja pažljivo odabrati zaletne karakteristike i odrediti vrijeme zaleta.

Za istosmjerni sustav moraju se ugraditi istosmjerni motori koji se pokreću odgovarajućim pokretačem, odnosno s odgovarajućim brojem stupnjeva regulacije brzine vrtnje.

Brodске pumpe najčešće se pokreću daljinski tipkalom ili sklopnikom, a najmanje pumpe i s pomoću automatskog zaštitnog prekidača.

Na slici 6.1.15. vide se dvije pumpe s okomitom osovinom u jednoj brodskoj strojarnici.



Sl. 6.1.15. Fotografija pumpe s okomitom osovinom u brodskoj strojarnici

#### 6.1.4.3. Pogon brodskih ventilatora

*Ventilacijski i rashladni uređaji uz pumpe* su najveća trošila električne energije na brodu. Ventilatori se ugrađuju za provjetravanje brodskih prostorija i za dobavu zraka brodskim strojevima. U posljednje vrijeme u brodove se sve češće ugrađuju klimatizacijski uređaji, koji u tropskim krajevima rashlađuju, a u polarnim griju brodske prostorije. Na modernim teretnim brodovima sve se više prirodna ventilacija skladišta tereta zamjenjuje umjetnom, jer se na taj način može spriječiti kondenziranje vlage u skladišnim prostorima.

Pogoni tih uređaja moraju biti tihi. Pri većim brzinama strujanja zraka nastaju šumovi koji se šire brodom i mogu izazvati rezonantne pojave. Da bi se to izbjeglo, ugrađuju se veći radijalni i aksijalni ventilatori s relativno manjom brzinom vrtnje. Radijalne ventilatore normalno pogone elektromotori s vodoravnom osovinom, a za pogon aksijalnih ventilatora, osobito cijevnih, izrađuju se specijalni motori s kućištem u obliku kaplje.

Ako se radijalni ventilatori postavljaju na palubu, za pogon služe motori s površinskim hlađenjem. Aksijalni ventilatori služe za veće dobave količine zraka i prikladniji su za ugradnju u brod od radijalnih ventilatora.

Kao i svim centrifugalnim strojevima, tako i ventilatoru protumoment raste s kvadratom brzine vrtnje. Iako je za pokretanje potreban mali potezni moment, zalet

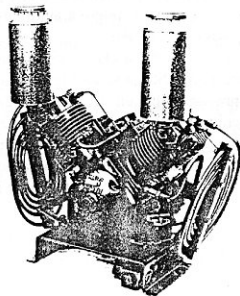
može trajati dugo, osobito ako ventilator ima težak rotor i pogonski motor manje snage, pa mogu nastati slične teškoće kao s centrifugom ulja.

Ako se traži različita dobava količine zraka, tada se mora osigurati mogućnost promjene brzine vrtnje ventilatora. S istosmjernim motorima to se jednostavno postiže promjenom uzbude, a u trofaznom sustavu ugradnjom polnpreklopnih kaveznih motora i to obično za dvije brzine vrtnje. Manja brzina daje manju količinu zraka dovoljnu za hladniju klimu, a veća brzina vrtnje služi za dobavu u tropima. Moguće je prigušenje protoka zraka mehaničkim putem, ali to može izazvati nepoželjne šumove.

Na svim brodovima, a posebno na putničkim, mora postojati mogućnost da se, izbije li požar, isključe, bilo ručno ili automatski, svi ventilatori nekog ugroženog prostora. Pri tome je ručno isključivanje moguće s više mjesta na brodu.

#### 6.1.4.4. Pogon brodskih kompresora

*Kompresori* na brodu služe za dobivanje plinova pod visokim tlakom. Pokreću se s elektromotorima koji imaju brzinu vrtnje od 300 do 1000 r min<sup>-1</sup>. Na slici 6.1.16. vidi se fotografija brodskog kompresora.



Sl. 6.1.16. Fotografija brodskog kompresora

Kompresori za pokretanje propulzijskog dizelskog motora su dvostupanjski, a komprimiraju zrak na 2,5 do 3,0 MPa u posebne boce za zrak. Radi sigurnosti pogona ugrađuju se po dva kompresora od kojih svaki mora imati toliko kapacitet da može u roku od jednog sata napuniti boce za zrak na najviši tlak. Elektromotori tih kompresora dobivaju struju od generatora pokretanih pomoćnim dizelskim motorima. Pri stavljanju u pogon glavnih kompresora zraka za pokretanje propulzijskih dizelskih motora, najprije se pokrene jedan od pomoćnih dizelskih motora uz pomoć zraka dobivenog iz malog kompresora koji se okreće ručno ili Otto-motorom.

Za rashladne uredaje na brodovima hladnjačama upotrebljavaju se jedno i dvostupanjski kompresori koji rade neprekidno, 24 sata na dan. Zbog toga se ugrađuju tri kompresora od kojih svaki ima 50% potrebnog rashladnog kapaciteta: normalno rade dva kompresora, a kad se teret ukrcao pa ga treba rashladiti do temperature na kojoj se prevozi, rade sva tri kompresora.

Zbog opsežnosti kompresorskih postrojenja, koja u pogonu trebaju stalan nadzor, postavljaju se kompresorske stanice u strojarnicu, ili u njezinu blizinu, da bi bile uvijek lako pristupačne strojarskom osoblju.

#### 6.1.4.5. Pogon brodskih centrifuga

Suvremena tekuća goriva za dizelske motore na brodovima imaju u sebi krutih čestica i vode, što smeta njihovoj uporabi. Također, ulje za podmazivanje onečišćuje se u pogonu, a djelomično se i oksidira, što mu smanjuje sposobnost podmazivanja. Zbog toga treba obje te tekućine očistiti. U tu svrhu osim običnih protočnih filtara upotrebljavaju se *centrifuge* koje pokreću elektromotori, a za dovod i odvod tekućina služe posebne privješene pumpe.

U centrifugama se onečišćena tekućina podvrgava ubrzanju centrifugalne sile više tisuća puta većom nego što je ubrzanje sile teže, zbog čega se veći dio težih čestica taloži na zid posude. Krute čestice zadrže se tamo i povremeno se uklanjaju, voda se s kraja posude kroz posebni kanal izbacuje, a očišćena tekućina izlazi kroz otvor bliže sredini. Takva centrifuga zove se *purifikator*. Za uklanjanje još zaostalih krutih čestica tekućina se ponovno centrifugira u drugoj centrifugi (*klarifikator*).

Čišćenje taloga iz centrifuge vrlo je prljav posao, pa ga brodska posada nerado obavlja. Stoga se grade i centrifuge koje se tijekom pogona automatski ispiru toplom vodom, a isprani se talog odvodi u posebne spremnike.

Centrifuge ulja imaju dugo vrijeme leta, a ako je ulje gusto, pri pokretanju moraju svladati relativno veliki protumoment. Stoga se zaštitni uređaji motora moraju dimenzionirati tako da omogućuju ispravan zalet centrifuge i u slučaju najtežih vrsta ulja, što se obično postiže privremenim blokiranjem zaštite pri zaletu. Kabeli za napajanje tog trošila imaju nešto veći presjek. Pokretač pogonskog motora centrifuge lakog goriva mora se nalaziti što dalje od uređaja da ne bi eventualno izazavao požar. Uređaj za otkrivanje požara često služi i za automatsko zaustavljanje motora.

## 6.2. Toplinska trošila na brodu

Toplinskim trošilima na brodu nazivaju se svi električni uređaji koji električnu energiju pretvaraju u toplinsku. Ovisno o mjestu ugradnje na brodu, razlikuju se:

a) toplinska trošila kuhinje, smočnice, praonice, kupaonice i sanitarnih prostorija (električni štednjak, peć za kruh, kotao za juhu, podgrijač hrane, stroj za pranje posuda, stroj za pranje rublja, stroj za sušenje rublja, električna glačala, odmrzivači ledenice, električni bojleri, itd.);

b) toplinska trošila u strojarnici broda (grijač rashladne slatke vode glavnih i pomoćnih strojeva, predgrijač nafte, predgrijač ulja, grijač evaporatora, razni manji grijači za predgrijavanje strojeva i uređaja, itd.);

c) toplinska trošila nadgrada i navigacijskih uređaja (električne peći za grijanje stambenih i navigacijskih prostorija, grijači vode za bazene, predgrijači navigacijskih

i komunikacijskih uređaja na brodskoj palubi, predgrijači upravljačkih naprava za elektromotore ugrađene na otvorenim brodskim palubama itd.).

Kuhinjski uređaji za električno grijanje moraju se izvesti na takav način da isključuju mogućnost dodirivanja posuda za kuhanje s dijelovima pod naponom i da se pri vrenju tekućina ne izazove kratki spoj ili ošteti izolacija.

Električno grijanje brodskih prostorija primjenjuju se sve više, jer lakše se postavlja nego parno grijanje.

Utrošak je topline za grijanje prostorija na brodu veći nego na kopnu zbog veće vlažnosti, jačeg utjecaja vjetrova, relativno nižih prosječnih temperatura i bržeg prijelaza topline kroz lakirane ili samo donekle izolirane metalne zidove brodskih prostorija. Gubici topline veći su u prostorijama sa stropom iznad kojega kojega se nalazi paluba. Uz vanjsku temperaturu od  $-15^{\circ}\text{C}$  računa se da je za zagrijavanje prostorija na  $+20^{\circ}\text{C}$  potrebno  $80 \text{ W/m}^3$  za prostorije za boravak putnika i posade, a  $50 \text{ W/m}^3$  za stubišta, kupaonice i unutarnje kabine. Proračun se korigira za utjecaj zračenja rasvjetnih tijela.

Ogrjevna tijela najčešće se izvode od elemenata, tzv. cijevnih grijala. U tim elementima ogrjevna spirala nalazi se u središtu zaštitne cijevi, a međuprostor je napunjen keramičkom masom. Na taj način je utjecaj korozije na samu žarnu nit potpuno uklonjen.

Ako se prostorije griju električnim pećima, onda one moraju biti stalno ugrađenog tipa. Takve peći moraju se opremiti odgovarajućim sustavom za isključivanje napona kad se povisi temperatura pojedinih njezinih dijelova iznad dopuštene granice.

Napajanje uređaja za kuhanje i grijanje mora se osigurati iz glavne sklopne ploče ili razdjelnika predviđenih za tu namjenu. Kada na tim uređajima nije ugrađena sklopna naprava, tada se takva naprava mora nalaziti u prostoriji gdje se nalazi taj uređaj.

Nosivi dijelovi konstrukcije uređaja za kuhanje i grijanje, a također i unutarnje površine kućišta, moraju se izvesti iz nezapaljivih materijala. Jednako tako, izvedba kućišta uređaja za električno grijanje mora biti takvo da se ne može nikakav predmet na te uređaje položiti.

## 6.3. Svjetlosna trošila na brodu

### 6.3.1. Osnovne definicije

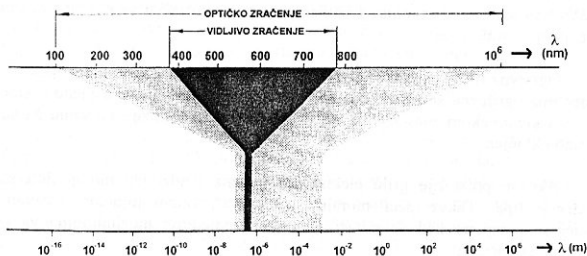
S izrazom *svjetlost* (*svjetlo*) označuje se svako zračenje, koje uzrokuje neposredno vidljivo opažanje.

*Zračenje* je u fizikalnom smislu definirano kao emitiranje ili prijenos energije u obliku elektromagnetskih valova ili čestica.

*Elektromagnetska zračenja* međusobno se razlikuju po valnim dužinama ( $\lambda$ ), odnosno frekvencijama od kojih su sastavljena. Pri tome neko zračenje može biti sastavljeno samo od jedne valne dužine (frekvencije) ili iz većeg broja valnih dužina (frekvencija).

*Spektar* je pojam, koji se rabi onda kad se želi prikazati udio valnih dužina iz kojih je neko zračenje sastavljeno.

*Spektar elektromagnetskih zračenja* je vrlo širok i rasprostire se od kozmičkih zračenja do tehničkih izmjeničnih struja. Pojedina zračenja međusobno se razlikuju samo po različitim valnim dužinama, odnosno frekvencijama. Pregled spektra zračenja predočen je na slici 6.3.1.



Sl. 6.3.1. Pregled spektra zračenja

U svjetlosnoj tehnici iskorištava se samo vrlo usko područje spektra elektromagnetskih zračenja (područje valnih dužina između  $10^{-7}$  i  $10^{-3}$ m), koje se označuje kao *optičko zračenje*. Spektar optičkog zračenja podijeljen je na tri područja:

- ultravioletno zračenje,
- vidljivo zračenje (svjetlost),
- infracrveno zračenje.

Ljudsko oko opaža samo *vidljivo zračenje (svjetlost)*, tj. područje valnih duljina između 380 nm i 780 nm (nanometar =  $10^{-9}$ m), dok ultravioletno i infracrveno zračenje ne opaža. Ultravioletno zračenje graniči s vidljivim zračenjem na strani kraćih valnih dužina, a infracrveno zračenje na strani dužih valnih dužina vidljivog zračenja.

Vidljivo zračenje ljudsko oko osjeća kao svjetlost, a može ga razlikovati po boji i jakosti. Kraćim valnim dužinama odgovara violetni kraj, a dužim crveni kraj. Vidljivo zračenje koje sadrži sve valne dužine ljudsko oko osjeća kao svjetlost bijele boje (bijela svjetlost). Opis spektra vidljivog zračenja dan je u tablici 6.3.1.

Tabl. 6.3.1. Spektar optičkog zračenja

Naziv zračenja	Područje zračenja
ULTRAVIOLETNO ZRAČENJE (UV)	100 - 400 nm
VIDLJIVO ZRAČENJE (SVJETLOST)	380 - 780 nm
Boja svjetlosti:	
- ljubičasta	380 - 436 nm
- plava	436 - 495 nm
- zelena	495 - 566 nm
- žuta	566 - 589 nm
- narančasta	589 - 627 nm
- crvena	627 - 780 nm
INFRACRVENO ZRAČENJE (IR)	780 - 10 <sup>6</sup> nm

Kao i svako elektromagnetsko zračenje tako je i vidljivo zračenje (svjetlost) povezano s emitiranjem energije tijela koje zrači. Prema zakonu o održanju energije svako emitiranje energije mora se nadomjestiti dovodom energije. To znači da se svakom izvoru svjetlosti, koje zrači, treba privoditi energiju; za svjetlosne izvore kojima se koristi u tehnici svjetlosti, to je isključivo električna energija. Takvi izvori svjetlosti zovu se *umjetni izvori* (za razliku od prirodnih izvora - sunce, mjesec i zvijezde).

Kod umjetnih izvora svjeta vidljivo zračenje proizvodi se načelno na dva načina, i to na osnovi *termičkog i luminiscentnog zračenja*.

Sva kruta tijela, plinovi i tekućine zbog svoje topline emitiraju energiju, i to u obliku elektromagnetskog zračenja. To je jače što je viša temperatura tijela, plina ili tekućine. Svako zračenje koje nastane na taj način zove se *termičko zračenje*. Ono je s fizikalnog gledišta definirano kao elektromagnetsko zračenje, koje uzrokuje gibanje čestica (atoma, molekula, iona i sl.). Kao primjer tehničkog izvora svjetlosti koji djeluje na načelu termičkog zračenja ubrajaju se žarulje - izvori sa žarnom niti.

*Luminiscentno zračenje* je pojava pri kojoj neka materija emitira elektromagnetsko zračenje, kojeg je jakost za određene valne dužine ili za mala spektralna područja veća od termičkog zračenja pri istoj temperaturi te materije. To je zračenje najznačajnije pri pražnjenju u plinovima, metalnim parama ili mješavini plinova i para.

Za neke plinove i metalne pare značajno je da pri pražnjenju emitiraju pretežit dio energije zračenja u ultravioletnom (nevidljivom) dijelu spektra. To se zračenje zatim pretvara u vidljivo zračenje, i to tako da se upotrijebe tzv. "luminiscentne tvari" (ponekad se zovu "fluorescentne tvari"). Te tvari imaju to obilježje da kratkovalno zračenje transformiraju u dugovalno (npr. u zračenje u vidljivom dijelu spektra). Ta pojava zove se *fotoluminiscencija* i iskorištava se osobito u fluorescentnim cijevima, a također i u drugim izvorima na pražnjenje.

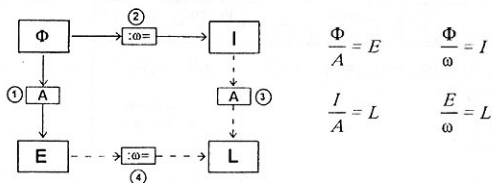
### 6.3.2. Svjetlosne veličine i jedinice

Osnovne svjetlosne veličine su:

- svjetlosni tok ( $\Phi$ ),
- jakost svjetla (svjetlosti) ( $J$ ),
- osvjetljenost (rasvjetljenost, jakost rasvjete) ( $I$ ),
- sjajnost (luminancija) ( $L$ ).



Međusobni odnosi između osnovnih svjetlosnih veličina predloženi su na slici 6.3.2.

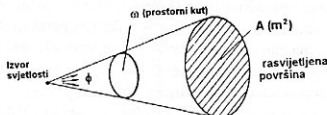


Sl. 6.3.2. Odnosi između osnovnih svjetlosnih veličina

Na slici 6.3.2.  $\omega$  (sr) znači prostorni kut, a  $A$  ( $m^2$ ) osvijetljenu ili rasvijetljenu površinu kako se vidi na slici 6.3.3. Prostorni kut  $\omega$  definiran je kao kvocijent između površine  $A$  nekog dijela površine kugle i kvadrata njezina polumjera  $r$ , tj.:

$$\omega = \frac{A}{r^2}. \quad (6.15)$$

Jedinica za prostorni kut je *steradian* (sr). Prema definiciji (6.15) steradian je prostorni kut kalote s vrhom u središtu kugle ( $r = 1$  m), koji na njezinu omotaču obuhvaća površinu jednaku kvadratu njezina polumjera ( $A = 1$   $m^2$ ).



Sl. 6.3.3. Uz definiciju jakosti svjetlosti i rasvijetljenosti

Prema slici 6.3.2. moguće je pojednostavljeno definirati osnovne svjetlosne veličine.

*Svjetlosni tok*  $\Phi$  je ukupna snaga svjetlosnog zračenja izvora svjetlosti koje ljudsko oko opaža kao svjetlost.

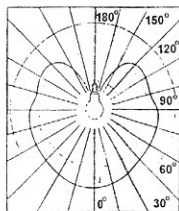
Jedinica za svjetlosni tok je *lumen* (lm). Prema definiciji 1 lumen je svjetlosni tok koji u prostorni kut  $\omega$  od 1 steradiana zrači točkasti izvor svjetlosti, kojemu je jakost svjetlosti u svim smjerovima prostora jednaka 1 candela.

*Jakost svjetlosti*  $I$  je gustoća svjetlosnog toka u obuhvaćenome prostornom kutu  $\omega$ , tj.:

$$I = \frac{\Phi}{\omega}. \quad (6.16)$$

Jedinica za jakost svjetlosti je *candela* (cd). Prema definiciji 1 candela je jakost svjetlosti koju okomito na zračenu površinu zrači crno tijelo površine  $1/60$   $cm^2$ , pri temperaturi skrućivanja platine (2045 K) i pri tlaku 101 325 Pa.

Jakost svjetlosti izvora je u različitim smjerovima različita. Ako se ta jakost izmjeri postupno u svim smjerovima jedne ravnine, a veličine jakosti se označe veličinama dužina zraka koje izlaze iz izvora, dobiva se krivulja-dijagram izvora svjetlosti, kako je za žarulju predloženo na slici 6.3.4.



Sl. 6.3.4. Dijagram svjetlosti žarulje

*Osvijetljenost (rasvijetljenost) površine E* je kvocijent između ukupnog svjetlosnog toka  $\Phi$ , koji pada okomito na određenu površinu, i te površine  $A$ , tj.:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (6.17)$$

Jedinica za osvjetljenost je *luks* (lx). Prema definiciji 1 luks je osvjetljenost površine 1 m<sup>2</sup> na koju pada ravnomjerno raspodijeljen svjetlosni tok od 1 lumena.

*Sjajnost ili luminancija L* je kvocijent između jakosti svjetlosti  $I$  i površine na koju svjetlost pada  $A$ , tj.:

$$L = \frac{I}{A} \quad (6.18)$$

Od velikog broja ostalih svjetlosnih veličina ovdje se definira još količina svjetlosti i svjetlosna iskoristivost izvora svjetlosti.

*Količina svjetlosti Q* je umnožak svjetlosnog toka  $\Phi$  (ne mijenja se tijekom vremena) i njegova trajanja  $t$ , tj.:

$$Q = \Phi t \quad (6.19)$$

Jedinica za količinu svjetlosti je *lumen-sekunda* (lm s).

*Svjetlosna iskoristivost izvora svjetlosti  $\eta$*  definirana je kao kvocijent između emitirano svjetlosnog toka  $\Phi$  i primljene električne snage  $P$ , tj.:

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (6.20)$$

Jedinica za svjetlosnu iskoristivost je *lumen po vatu* (lm/W).

### 6.3.3. Električni izvori svjetlosti na brodu

Izvori svjetlosti na brodu mijenjali su se onako kako su se mijenjali i na kopnu. Tako je u početku izvor svjetlosti bila luč, odnosno drugi izvori s otvorenim (kasnije zatvorenim) plamenom (voštance, petrolej itd.), a danas na brodu svjetlost daju samo električni izvori. Ti izvori svjetlosti s pomoću užarene niti ili izbijanjeni

u plinovima i metalnim parama pretvaraju dio uložene električne energije u svjetlosnu energiju.

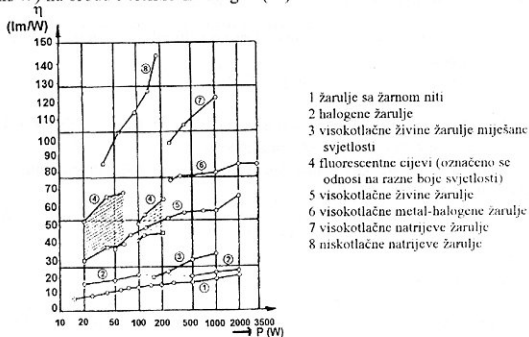
Za izbor izvora svjetlosti na brodu odlučujuća su njihova svojstva:

- svjetlosni tok,
- svjetlosna iskoristivost,
- pad svjetlosnog toka tijekom životne dobi,
- boja svjetlosti i svojstva u pogledu reprodukcije boja,
- električna snaga,
- životna dob,
- izvedbeni oblik,
- ponašanje u pogonu,
- nabavna cijena i troškovi eksploatacije.

Između spomenutih svojstava jedno od najvažnijih je svjetlosna iskoristivost, iako ona sama nije odlučujuća u pogledu prikladnosti izvora svjetlosti za određenu zadaću osvjjetljenja na brodu.

Veličina svjetlosne iskoristivosti ovisi o tome koliki je dio privedene električne energije pretvoren u zračenje u vidljivom području spektra i kako je ta energija zračenja raspodijeljena unutar toga područja.

Na slici 6.3.5. predložen je odnos svjetlosne iskoristivosti raznih električnih izvora  $\eta$  (lm/W) na brodu i električne snage  $P$  (W).



Sl. 6.3.5. Ovisnost svjetlosne iskoristivosti raznih izvora o električnoj snazi

Reprodukcija boje u izvoru svjetlosti definira se kao učinak zračenja (nekog izvora svjetlosti) na izgled obojenosti predmeta koje izvor osvjetljava u usporedbi s izgledom obojenosti istih predmeta osvjetljenih referentnim svjetlosnim izvorom.

Opći indeks reprodukcije boja  $R_a$  u kvantitativnom obliku daje svojstva reprodukcije boja nekog izvora svjetlosti. Najveća vrijednost koju indeks  $R_a$  može postići je 100, što znači da su spektralne raspodjele zračenja ispitivanog i referentnog izvora svjetlosti identične. Iz toga proizlazi da veća vrijednost indeksa  $R_a$  nekog izvora svjetlosti znači njegovu bolju reprodukciju boja.

Iz praktičnih razloga uvedena su 4 stupnja reprodukcije boja. Svaki stupanj odgovara određenom području indeksa  $R_a$ , kako je naznačeno u tablici 6.3.2.

Tabl. 6.3.2. Stupnjevi reprodukcije

Stupanj reprodukcije boje	Područje indeksa $R_p$
1	85 - 100
2	70 - 84
3	40 - 69
4	< 40

Osnovni podaci o električnim izvorima svjetlosti naznačeni su u tablici 6.3.3.

Tabl. 6.3.3. Osnovni podaci o izvorima svjetlosti

Izvor svjetlosti	Svjetlosna iskoristivost lm/W	Vijek trajanja h	Stupanj reprodukcije boje	Temperatura boje K
Žarulja	7 - 20	1500	1	2600
Halogena žarulja	19 - 22	2000	1	3000
FC cijev standardna	32 - 77	2500	1, 2, 3	2900-6500
Živina vis.tlač. žarulja	40 - 60	6000	3	4000
Metal-hal. vis.tlač. žarulja	67 - 92	4000	1, 3	6000
Natrijeva vis.tlač. žarulja	60 - 120	5000	4	2100
Natrijeva nis.tlač. žarulja	80 - 160	4000	4	2500

Električni izvori svjetlosti na brodu podijeljeni su, s obzirom na načelo nastajanja svjetlosti, u dvije osnovne skupine:

- izvori svjetlosti sa žarnom niti;
- izvori svjetlosti na električno pražnjenje.

### 6.3.3.1. Izvori svjetlosti sa žarnom niti

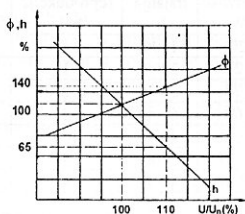
Svjetlosni izvori sa žarnom niti ili žarulje svjetlost isijavaju pri prolasku struje koja žari volframovu nit. Što je viša temperatura žarenja, to je bolja svjetlosna iskoristivost izvora (lm/W), odnosno veći je svjetlosni tok izvora.

Budući da pri visokim temperaturama volframova nit prebrzo isparava (raspada se), ona se mora postaviti u stakleni balon. Stakleni baloni žarulja za manje snage su bez zraka (vakuumске žarulje); kod žarulja za veće snage oni su napunjeni inertnim plinovima (argon, dušik, kripton, itd.). Ti plinovi dodatno smanjuju isparavanje volframa, ali zato povećavaju odvođenje topline, što nije baš pogodno, jer se na taj način smanjuje iskoristivost energije zračenja. To se sprječava tako da se volframova nit oblikuje u jednostruku, dvostruku ili trostruku spiralu. Na taj način skraćuje se dužina žarne niti, odnosno smanjuje se njegova efektivna površina, što pogodno utječe na toplinske gubitke i povećava svjetlosnu iskoristivost žarulje.

Žarulje koje imaju veću snagu i niži nazivni napon imaju deblju volframovu nit. Budući da se deblja nit može jače zagrijati, zbog toga je boja svjetlosti žarulje s takvim nitima bjelja, a njihova svjetlosna iskoristivost veća. Zbog toga je žaruljama za niže nazivne napone (npr. 24 ili 48 V) nazivni svjetlosni tok veći nego žaruljama za standardni napon od 220 V.

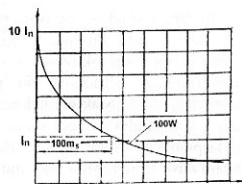
Izvori svjetlosti sa žarnom niti samo 5 - 15% dovedene energije pretvaraju u vidljivo zračenje, dok je ostali dio uglavnom termičko zračenje. Pri porastu napona povećava se svjetlosni tok izvora, iako se istodobno smanjuje njegova životna dob; pri smanjenju napona je obratno. Tako se pri 10 % povećanom naponu ( $1,1 U_n$ ) povećava nazivni svjetlosni tok za 45 %, a životna dob žarulje time se smanjuje za 75 %. Jednako tako, u pogonu se svjetlosni tok tih izvora smanjuje zbog oksidacije i tanjenja žarnog vlakna, tj. isparavanja volframa.

Svjetlosni tok i trajnost žarulje ovisni su odstupanja od nazivnog napona, pa se njezine pogonske karakteristike mogu predočiti kao na slici 6.3.6. Tim izvorima svjetlosti moguće je kontinuirano mijenjati svjetlosni tok (regulatorima, transformatorima ili otporima). Regulacija nije preporučljiva samo u halogenih žarulja jer se pri smanjenju napona narušava kružni halogeno-volframov proces, zbog čega se životna dob tih žarulja jako smanjuje.



Sl. 6.3.6. Pogonske karakteristike žarulje

Za žarulje sa žarnom niti također je od značenja strujni udarac pri priključenju na mrežni napon. Taj udarac je  $10-15 I_n$  (nazivne struje žarulje) iako traje samo vrlo kratko vrijeme ( $0,1 - 1$  ms); treba ga uzeti u obzir osobito za žarulje većih snaga, kad se osiguravaju automatskim osiguračima. Dijagram struje pri paljenju žarulje predočen je na slici 6.3.7.



Sl. 6.3.7. Dijagram struje pri paljenju žarulje

Izvori svjetlosti sa žarnom niti koji se upotrebljavaju na brodu, mogu se podijeliti na:

- žarulje za opću upotrebu,
- reflektorske žarulje,
- halogene žarulje.

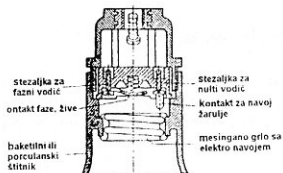
a) *Žarulje za opću upotrebu* proizvođači izrađuju u različitim oblicima i za različite namjene na brodu. U osnovi se mogu podijeliti na *standardne* i *posebne* žarulje.

*Standardna* žarulja, predočena na slici 6.3.8., ima spiraliziranu volframovu žicu poduprtu tankim molibdenskim nosačima učvršćenim na stakleni štapić, koji ih drži na visini najšireg promjera staklenog krušolikog balona. Balon je napunjen nekim inertnim plinom, najčešće argonom. Električna struja dovodi se na spiralnu žicu preko dviju metalnih elektroda, od kojih je presjek jedne stanjen u podnožju, pa na tome mjestu pregori ako u žarulji nastane kratak spoj. Tako se sprječava eksplozija žarulje. Stakleni nosač pridržava žarnu žicu, stupiće i obje elektrode, a stalak i balon povezuje u jedinstvenu cjelinu. Podnoškom se žarulja učršćuje i električki spaja s grlom svjetiljke.



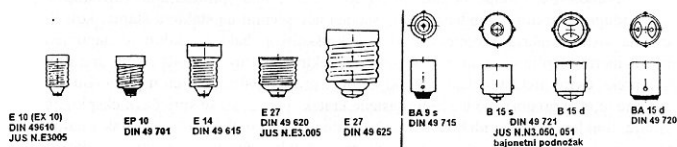
Sl. 6.3.8. Žarulja sa spiralnom volframovom niti

Grlo žarulje, predočeno na slici 6.3.9., element je preko kojeg se žarulja spaja u električni strujni krug. Za učvršćenje žarulje služi mesingano grlo s elektro navojem (tzv. *Edisonovo grlo*) normirane veličine E 14 (tzv. *minjon-grlo*), odnosno E 27 (tzv. *normalno grlo*), ili pak E 40 (tzv. *golijat-grlo*). Grlo mora biti napravljeno tako da onemogućuje dodir s kontaktima unutar grla kad se umeće ili skida žarulja.

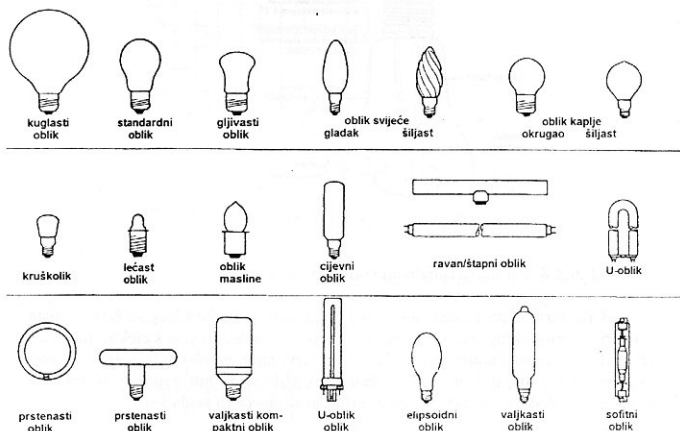


Sl. 6.3.9. Grlo žarulje

*Posebne žarulje* su namijenjene za opću uporabu, a razlikuju se od standardnih žarulja ili po obliku podnožaka, predočenih na slici 6.3.10., ili po obliku balona, predočenih na slici 6.3.11.



Sl. 6.3.10. Različiti oblici podnožaka žarulja



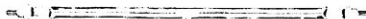
Sl. 6.3.11. Različiti oblici balona žarulja

b) *Reflektorske žarulje* su izvori svjetlosti sa žarnom volframovom nit u kojih je balon s unutarnje strane metaliziran tako da one zrače svjetlost u određenom smjeru ili u koncentriranom (kružno simetričnom ili asimetričnom) snopu. Na slici 6.3.12. prikazani su neki mogući oblici tih žarulja.



Sl. 6.3.12. Reflektorske žarulje

c) *Halogene žarulje*, prema slici 6.3.13., izvori su svjetlosti s volframovom niti u cijevi od kvarcnog stakla, koja sadrži plin za punjenje i vrlo malu količinu halogenog elementa (jod, brom). Halogeni element omogućuje stvaranje halogeno-kružnog procesa, u kojem se s niti ispareni volfram ponovno vraća natrag. Na taj način povećava se iskoristivost i životna dob žarulje, ali i smanjuje gubitak svjetlosnog toka u pogonu.



Sl. 6.3.13. Reflektorska halogena žarulja

### 6.3.3.2. Izvori svjetlosti na električno pražnjenje

Izvori svjetlosti na električno pražnjenje zrače svjetlost zbog električnog pražnjenja kroz plin, metalne pare ili smjesu plinova i metalnih para.

Pražnjenje nastaje prolaskom električne struje kroz plin ili metalne pare, kad pod utjecajem električnog napona dolazi do stvaranja i kretanja električno nabijenih čestica (iona i elektrona). Posljedica toga je nastanak ionizacije i reakcija atoma plinova ili metalnih para. Pri tome oslobada se elektromagnetska energija u obliku optičkog zračenja u vidljivom i ultravioletnom dijelu spektra. U svjetlosnih izvora koji imaju visoki postotak u ultravioletnom području spektra, dodatno se upotrebljavaju luminiscentne tvari (fluorescentni prah). Te tvari imaju to svojstvo da ultravioletno zračenje pražnjenja pretvaraju u vidljivo zračenje.

S obzirom na visinu pogonskog (unutarnjeg) tlaka, izvori svjetlosti na pražnjenje dijele se na *niskotlačne* i *visokotlačne* izvore.

Za *niskotlačne izvore svjetlosti* značajan je pogonski tlak 0,1-1,3 Pa, duguljasta su oblika i relativno velikog volumena, malih snaga i malog svjetlosnog toka te zbog toga male sjajnosti. Tu se ubrajaju *fluorescentne cijevi* i *niskotlačne natrijeve žarulje*.

Za visokotlačne izvore svjetlosti karakteristični pogonski tlakovi su  $3 \cdot 10^4$  -  $9 \cdot 10^5$  Pa, manjeg su volumena, kratki, velikih snaga i velikih svjetlosnih tokova i zbog toga su njihove sjajnosti visoke. Tu se ubrajaju *visokotlačne živine žarulje*, *visokotlačne metal-halogene žarulje* i *visokotlačne natrijeve žarulje*.

Izvori svjetlosti na pražnjenje imaju veću svjetlosnu iskoristivost, veću ekonomičnost i dužu životnu dob u odnosu prema izvorima sa žarnom niti. Jednako tako trebaju za normalan pogon predspojni uređaj, koji stabilizira (ograničava) struju pražnjenja izvora. Kad taj uređaj nije priključen, struja pražnjenja stalno bi rasla, i to tako dugo dok ne bi uništila elektrode izvora.

U praksi se kao predspojni uređaji rabe prigušnice, kondenzatori, otpornici, transformatori s rasipnim poljem i posebni tranzistorski predspojni uređaji (za pogon pri istosmjernom naponu).

Za izvore na pražnjenje uglavnom su značajne sljedeće vrste spojeva izvora svjetlosti i predspojnog uređaja, kako je prikazano na slici 6.3.14:

- *induktivni spoj*: izvor svjetlosti i prigušnica (ili transformator s rasipnim poljem) u serijskom spoju;
- *kapacitivni spoj*: izvor, prigušnica i kondenzator u serijskom spoju;



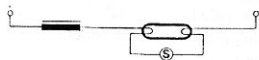
- *kompenziran spoj*: izvor i prigušnica (ili transformator s rasipnim poljem) u serijskom spoju s paralelno spojenim kondenzatorom;
- *duo spoj*: paralelni spoj prigušnice i kondenzatora;
- *tandem spoj*: 2 izvora iste snage u serijskom spoju s jednom prigušnicom (induktivni tandem spoj); ponekad se tom spoju paralelno spaja još i kondenzator (kompenzirani tandem spoj).

Valja naglasiti da svi naznačeni spojevi dolaze u cjelini u obzir samo za fluorescentne cijevi, dok se za sve druge izvore na pražnjenje upotrebljava uglavnom samo induktivni i kompenziran spoj.

Za izvore svjetlosti na pražnjenje također je značajno da pri paljenju trebaju veći napon nego u pogonu. Zbog toga se kod tih izvora koristi posebnim uređajima koji sami ili zajedno s predspojnim uređajem stvaraju naponske vrhove (špice), odnosno impulse, potrebne za paljenje izvora. Ti su uređaji vrlo različitih izvedaba (mogu također biti sastavni dio izvora) i u osnovi su ovisni o vrsti izvora svjetlosti i načinu paljenja (visina naponske špice). U uređaje koji su namijenjeni za paljenje ubrajaju se:

- starteri (fluorescentne cijevi za paljenje sa starterom);
- štedni transformatori (sigurnosne fluorescentne cijevi);
- transformatori s rasipnim poljem (niskotlačne natrijeve žarulje);
- elektrode za paljenje (sastavni dio visokotlačnih živinih žarulja);
- posebni uređaji za trenutno paljenje (visokotlačne metal-halogene i natrijeve žarulje).

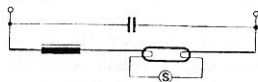
Induktivni spoj



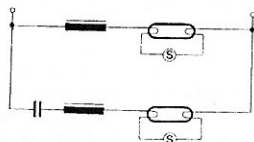
Kapacitivni spoj



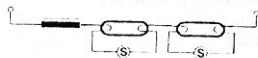
Kompenziran spoj



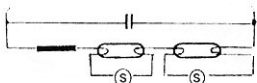
Duo-spoj



Tandem spoj



Tandem-kompenziran spoj

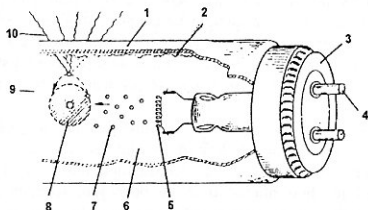


Sl. 6.3.14. Spojevi izvora svjetlosti na električno pražnjenje

Izvori svjetlosti na pražnjenje ne daju odmah nakon paljenja puni (nazivni) svjetlosni tok, nego trebaju određeno vrijeme za stabilizaciju pogona. To je vrijeme za fluorescentne cijevi neznatno; za visokotlačne izvore je 3 - 10 minuta, a najduže je u niskotlačnih natrijevih žarulja, tj. 10 - 20 minuta.

Na brodovima se najčešće koristi fluorescentnim cijevima (FC), visokotlačnim živinim žaruljama, te niskotlačnim natrijevim žaruljama i tinjalicama.

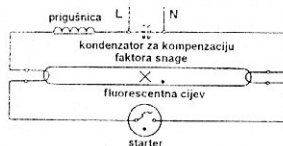
a) *Fluorescentna cijev (FC)* najčešće je ravna staklena cijev kakvu predočuje slika 6.3.15., ali cijev može biti i oblikovana potkovasto ili prstenasto. Unutarnja ploha cijevi premazana je slojem luminiscentnog praha, a krajevi cijevi hermetički su zatvoreni tzv. podnošcima, kroz koje su s vanjske strane utaljena po dva kontaktna zatika. Zatici su unutar cijevi spojeni dvostruko motanom spiralom od volframa, tzv. žarnom elektrodom. Unutrašnjost cijevi ispunjena je mješavinom plemenita plina argona i živinih para pod niskim tlakom.



- 1-staklena cijev
- 2-luminiscentni prah
- 3-podnožak (poklopac cijevi)
- 4-kontaktni zatic
- 5-žarna elektroda
- 6-mješavina razrijeđenog argona i živinih para
- 7-elektroni koje emitira žarna elektroda
- 8-živin atom
- 9-nevidljive ultravioletne zrake
- 10-vidljiva svjetlost

Sl. 6.3.15. Prikaz jednog kraja FC s pogledom u unutrašnjost

Za razliku od žarulje, FC ne može se izravno uključiti u strujni krug, jer to onemogućuje način njezina rada. Za paljenje FC potreban je znatno viši napon od onog potrebnog za normalan pogon nakon paljenja, pa se zato u strujni krug moraju ugraditi dodatni uređaji kojima se u procesu paljenja i rada napon regulira. Sklop svih potrebnih uređaja za rad FC sastoji se od FC (svjetlilo), tinjaličkog startera, predspojnog uređaja (prigušnica) i kondenzatora za poboljšanje faktora snage, a predočen je na slici 6.3.16.



Sl. 6.3.16. Sklop uređaja u shemi za rasvjetu FC

Relativno složeno djelovanje električnog kruga FC može se podijeliti na fazu paljenja i fazu normalnog pogona.

U fazi paljenja strujni krug FC zatvoren je preko prigušnice, lijeve žarne elektrode, startera i desne žarne elektrode. Iako je kontakt startera u početku otvoren (kontakti su razmaknuti), kroz starter ipak protječe električna struja tinjavim izbijanjem kroz plin kojim je starter ispunjen. Ta struja zagrijava obje žarne elektrode i bimetal startera.

Zbog zagrijavanja bimetal se u starteru savije i kontakti startera se spoje (to je kratki spoj), pa zato zbog smanjenog otpora strujnim krugom teče struja koja je 1,5 puta jača od nazivne struje FC. Ta pojačana struja brzo zagrije žarne elektrode, a u prigušnici se stvori jako magnetsko polje.

Premoštenje kontakta u starteru uzrokuje prestanak tinjavog izbijanja, pa se bimetal ohladi i vrati u početni položaj. Time se prekida strujni krug, koji se do tada zatvarao preko startera. Naglim prekidom strujnog kruga trenutno nestane uzročnika stvaranja magnetskog polja u prigušnici, pa bi zbog toga magnetsko polje naglo oslabilo. Međutim, nagloj promjeni magnetskog polja suprotstavlja se prigušnica tako da se u njoj stvori toliko jaka protuelektromotorna sila (induciranjem udarnog napona od oko 800 V) koja izazove tinjavo izbijanje kroz plin u FC, pa se tako FC upali. Kad se FC upali, prigušnica preuzima ulogu predotpornika, kojim će se smanjiti dio napona. Smanjeni napon smiruje starter, a struja koja protječe kroz FC smanjit će jakost na nazivnu vrijednost. To je i poželjno jer bi se u protivnom struja u cijevi naglo pojačala i mogla bi oštetiti FC. Zbog toga se prigušnica obično naziva predspojni uređaj FC ili *balast*.

U fazi normalnog pogona struja FC stvara na prigušnici pad napona pa FC, pa tinjalica neće imati viši napon od nazivnog (220V) i tinjalica se više neće paliti. Zatim struja prelazi izbojem kroz plin samo u FC, jer tinjalica startera ima manji napon od nazivnog, a bimetal je zbog hladne tinjalice odspojen. Kondenzator u starteru (oko 0,01  $\mu\text{F}$ ) sprječava da se stvore smetnje koje bi ometale radioprijem pri paljenju startera i FC.

Zbog reaktancije prigušnice spojene u seriju s FC, faktor snage smanjit će se na 0,5. Da se poboljša faktor snage, mora se paralelno strujnom krugu FC priključiti kompenzacijski kondenzator. Uz ispravno odabrani kapacitet kompenzacijskog kondenzatora (oko 5  $\mu\text{F}$ ) faktor snage može se poboljšati čak na 0,95.

Ako FC ne upali pri prvom pokušaju, odmah se može ponoviti paljenje, sve dok se FC ne upali. Međutim, moguće je da se ni nakon nekoliko pokušaja FC ne upali. Ako se sumnja da FC ne svijetli zbog pregorjele žarne niti cijevi, tada se to ispituje najjednostavnije tako da se žarna nit cijevi spoji na mrežni napon preko probne žarulje.

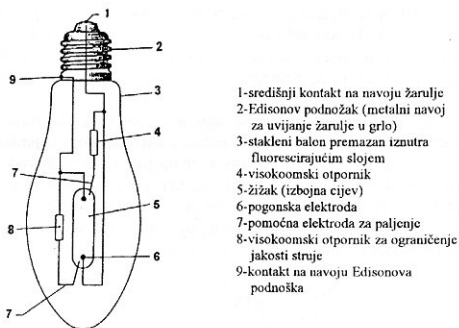
Valja znati da je starter najčešći uzročnik kvara FC. Elektrode tinjalice startera se pri priključku na napon vrlo često ne spajaju dobro pa se FC ne može dobro rasvijetliti. Ponekad se, obrnuto, elektrode tinjalice startera ne mogu odspojiti. Ta pogriješka startera je opasnija jer može doći do pregaranja žarnih niti elektroda FC, koje su dimenzinirane samo na kratkotrajni prolazak struje. Pogriješka se opaža tako što se cijev ne rasvijetli, a njezini krajevi pri tome trajno žare crvenkastim svjetlom. U takvom slučaju potrebno je FC isključiti i zamijeniti starter novim. Starter je jednak za sve tipove FC, ali se cijev može zamijenjati samo s onom iste snage.

Zbog frekvencije izmjenične mreže (npr. 50 Hz), svaka priključena FC pali se i gasi (u tom slučaju 100 puta u sekundi), što ljudsko oko gotovo ne zamjećuje. Međutim, kod rasvjete prostora na brodu, gdje se ugrađuju rotacijski strojevi, oko će zamijetiti titranje svjetlosti poznato kao tzv. *stroboskopski efekt*. Da se to tehničkim zahvatom spriječi, u svjetiljku se ugrađuju dvije ili tri FC tako da je svaka priključena na drugu fazu trofazne mreže. Njihovo paljenje i gašenje tada nije istodobno, nego s

međusobnim pomakom, pa je titranje svjetlosti manje primjetno. Ako je na raspolaganju samo jedna faza, onda se tzv. duo-spojem dviju FC može na umjetan način izazvati pomak u fazi njihova paljenja i gašenja. Da se to postigne, u shemu spoja ugrađuje se kondenzator uz jednu FC, a induktivni svitak uz drugu.

b) *Visokotlačna živina žarulja* je po svom vanjskom izgledu nalik običnoj žarulji. Ima stakleni balon u koji je smještena *izbojna cijev*, zvana još i *žičak*. Stijenke žiška su od kvarcnog stakla. Na krajevima žiška utaljena je po jedna *pogonska elektroda* (glavna elektroda kojoj je površina prekrivena specijalnim emisionim slojem), te po jedna *pomoćna elektroda* za paljenje. Svaka pomoćna elektroda serijski je spojena s visokoomskim otpornikom, koji ograničava jakost struje. U unutrašnjosti žiška je plin *argon* i nekoliko kapljica *žive*. Prostor između žiške i balona ispunjen je inertnim plinom. Zadaća inertnog plina je da uspostavlja i održava ispravnu toplinsku ravnotežu u žarulji. *Vanjski balon* štiti žičak od vanjskih utjecaja, a dijelom i apsorbira ultraljubičaste zrake koje propušta cijev žiška. Unutrašnje stijenke balona mogu se presvući luminiscirajućim luminoformom, čime se poboljšava svjetlosni spektar. Vanjska stijenka balona može na gornjem dijelu imati reflektirajući sloj od kojeg se svjetlost usmjerava prema dolje.

Izgled i sastavni dijelovi visokotlačne živine žarulje vide se na slici 6.3.17.

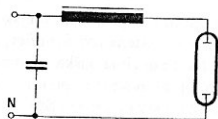


Sl. 6.3.17. Izgled i sastavni dijelovi visokotlačne živine žarulje

Visokotlačne živine žarulje ne smiju se izravno priključiti na mrežu, iako im nije potreban povišeni napon paljenja. Priključak mora ići preko serijski spojene prigušnice (balasta), jer im je naponsko-strujna karakteristika padajuća (negativni otpor), pa prigušnica regulira jakost pogonske struje. Za poboljšanje faktora snage (kojeg smanjuje djelovanje prigušnice) potrebno je paralelno žarulji spojiti kondenzator.

Kad se sklopkom uklopi žarulja u mrežni strujni krug, između pomoćne i glavne elektrode započne tinjavo izbijanje u plinu argonu, koje se postupno prenosi na obje glavne elektrode i cijev se pali, ali pri tome žarulja ne daje potrebno svjetlo, jer kroz nju teče samo struja zagrijavanja. Tijekom 3 do 6 minuta zagrijavanja u žišku

se ispari dovoljno živinih para, one postanu nositelj pražnjenja, pa se u žišku stvori luk i žižak počinje svijetliti plavkastobijelim svjetlom. Načelna spojna shema visokotlačne živine žarulje predočena je na slici 6.3.18.



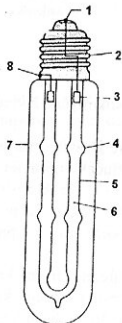
Sl. 6.3.18. Načelna shema spoja visokotlačne živine žarulje

Iskorištenje svjetlosti visokotlačnih živinih žarulja iznosi 33 do 63 lumena po svakom vatu snage, što im daje prednost pred FC, a osobito žaruljama. Trajnost im je do 6000 sati.

Visokotlačne živine žarulje neosjetljive su na vibracije, otporne su na nagle promjene temperature, a posebno su pogodne za rad pri visokim temperaturama. Na brodovima služe za osvjetljenje strojarnice, velikih skladišta i palube, te na mjestima za ukrcaj i iskrcaj tereta.

Nedostaci tih žarulja su relativno dugo vrijeme dok postignu normalan režim rada, gase se kada pogonski napon padne ispod 180 V, a nakon gašenja ne mogu se odmah upaliti, jer tinjavo izbijanje u argonu nije provedivo pri visokom tlaku, pa se žarulja mora hladiti i do 5 minuta.

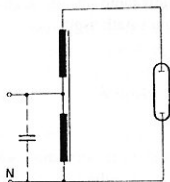
b) *Niskotlačne natrijeve žarulje* obično su dugoljasta oblika, kako je predočeno na slici 6.3.19. Vanjski je balon s dvostrukom stijenkom, a između njih je vakuum zbog poboljšanja toplinske izolacije. Unutar balona je tanka cijev od specijalnog stakla, savinuta u usku i veoma izduženu potkovicu. Na nekoliko mjesta te cjevaste potkovice su žlijebna proširenja u kojima se zadržava tekući natrij umetnut u cjevčicu. U cjevčici je i mješavina plinova helija i ksenona pod niskim tlakom. S oba kraja savinute cijevi utaljene su žične elektrode.



- 1-središnji kontakt na navoju žarulje
- 2-Edisonov podnožak s navojem E27
- 3-žične elektrode
- 4-žlijebna proširenja cijevi koji zadržavaju tekući natrij
- 5-tanka cijev od specijalnog stakla savinuta u usku izduženu potkovicu
- 6-unutrašnjost cjevčice ispunjena je tekućim natrijem i mješavinom plinova helija i ksenona pod niskim tlakom
- 7-stakleni balon dvostrukih stijenki s vakuumom u međuprostoru
- 8-postrani kontakt na navoju Edisonova podnoška

Sl. 6.3.19. Izgled i sastavni dijelovi niskotlačne natrijeve žarulje

Za paljenje niskotlačnih natrijevih žarulja potreban je napon paljenja viši od pogonskog. Taj se napon dobiva s pomoću transformatora koji je najčešće *autotransformator s velikim rasipanjem*, pa tijekom pogona djeluje kao prigušnica za ograničavanje jakosti struje. Načelna shema spoja niskotlačne natrijeve žarulje predočena je na slici 6.3.20.



Sl. 6.3.20. Načelna shema spoja niskotlačne natrijeve žarulje

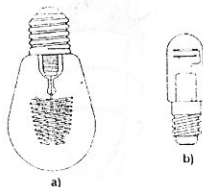
Prilikom uključivanja sklopke najprije se javlja tinjavo izbijanje u heliju. Kad se tim pražnjenjem stvori dovoljna toplina, isparit će natrij, pa se pražnjenje nastavlja u njegovim parama, uz pojavu intenzivnog žutog svjetla. Zagrijavanje do normalnog pogonskog stanja traje i do 12 minuta, ali se ove žarulje nakon gašenja mogu odmah upaliti.

Faktor snage je vrlo loš, tj.  $\cos \varphi \approx 0,2$  i može se kompenzirati ugradnjom kompenzacijskog kondenzatora (20 - 30  $\mu\text{F}$ ), ali i zajedničkim spojem dviju žarulja u duo-spoj, čime se smanjuje i treperenje.

Svjetlosna iskoristivost niskotlačne natrijeve žarulje (do 150 lumena po svakom watu snage) najbolja je od svih izvora svjetlosti, a trajnost joj je više od 4000 sati.

Mana im je izrazito žuta svjetlost i to što se ne mogu upotrebljavati u svim položajima, pa o tome pri montaži treba voditi računa. Na brodovima se rabe za rasvjetu reflektorima na palubi za vrijeme rada u magli.

c) *Tinjalica* ima oblik žarulje, kako je predočeno na slici 6.3.21. Redovito je punjena mješavinom neona i helija, a predotpor je spojen u podnožju, odnosno do podnoška s navojem. Na tom predotporu gubi se razlika napona između napona paljenja i pogonskog napona. Napon paljenja tinalice je 220 V. Tinjalice za napon od 110 V imaju aktivne elektrode, tj. njihove su elektrode presvučene materijom koja pospješuje emisiju elektrona. Tako pogonski napon padne na 70 do 90 V, odnosno od 130 do 150 V pri neaktivnim elektrodama.

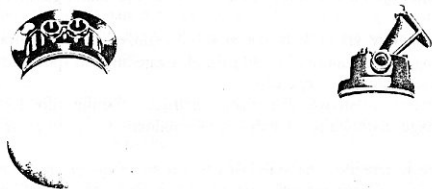


Sl. 6.3.21. Oblici tinjalice

Tinjalica ima malu struju (0,5 do 15 mA) pa i malenu svjetlosnu korisnost. Zato se ne primjenjuje za osvjetljenje, ali je vrlo raširena njezina primjena za optičku signalizaciju izlaza za nuždu (slika 6.3.21.a). Kao signalna svjetiljka (slika 6.3.21.b) primjenjuje se na razdjelnim pločama, kao indikator napona itd., a također i kao ispitivalo napona u obliku olovke. Svijetle li obje elektrode, riječ je o izmjeničnoj struji. Pri istosmjernoj struji svijetli samo negativna elektroda. Veličina napona može se grubo odrediti prema intenzitetu svjetla ispitivala.

#### 6.3.4. Svjetiljke na brodu

Kad se izvor svjetlosti postavi u određeni "oklop", tada se dobiva *rasvjetno tijelo* ili *svjetiljka*. Prema tome, svjetiljke su naprave koje služe za raspodjelu, filtriranje ili pretvaranje svjetla izvora svjetlosti. One ujedno sadrže dijelove za nošenje i pričvršćenje, za zaštitu i pogon izvora svjetlosti. Tipičan oblik brodske rasvjetne svjetiljke predočen je na slici 6.3.22. Takva svjetiljka namijenjena je za rasvjetu unutrašnjih brodskih prostora (hodnici, sanitarni prostori, službene prostorije, kabine itd.).



Sl. 6.3.22. Rasvjetna svjetiljka opalna, za žarulju do 100 W

Svjetiljke postavljene u prostorijama broda gdje su moguća mehanička oštećenja staklenih balona, moraju se zaštititi zaštitnim mrežama, kako je za univerzalnu svjetiljku na brodu prikazano na slici 6.3.23.



Sl. 6.3.23. Univerzalna svjetiljka sa zaštitnom mrežom za žarulju do 100 W

Svjetiljke moraju uglavnom zadovoljiti ove zahtjeve:

a) *svjetlosne*, tj. odgovarajuću raspodjelu svjetlosnog toka i jakosti svjetla, ograničenje blještanja i povoljnu iskoristivost;

b) *mehaničke*, tj. dovoljnu mehaničku čvrstoću, otpornost prema zagrijavanju, otpornost prema koroziji, osiguranje protiv prodora vlage i vode, osiguranje protiv onečišćenja unutrašnjosti, jednostavnu konstrukciju radi lakše montaže i lakog održavanja (zamjena izvora svjetlosti i dijelova svjetiljke, čišćenje) i trajnost;

c) *elektrotehničke*, tj. pogonsku sigurnost, zaštitu od previsokog napona dodira, zaštita protiv radiosmetnja, jednostavan i siguran električni priključak, preglednost unutrašnjih električnih veza, lak dostup električnim dijelovima i trajnost električnih dijelova;

d) *oblikovne*, tj. estetski izgled oblika i završna obrada te harmoničnost u pogledu uklapanja u pojedine brodske dijelove.

Svjetiljke se mogu podijeliti prema:

- vrsti izvora svjetlosti (za žarulje, za FC cijevi itd.);
- raspodjeli svjetlosnog toka (izravne, neizravne, jednolike itd.);
- raspodjeli jakosti svjetla (s uskim, širokim ili kosim zračenjem itd.);
- području primjene (za unutrašnje i vanjsko osvjetljenje);
- izvedbi (otvorene, zatvorene, reflektorske itd.);
- načinu montaže (ugradne, nadgradne, stojeće, nasadne itd.);
- zaštiti (električna i mehanička zaštita).

U ovisnosti o mjestu ugradnje na brodu za rasvjetne svjetiljke treba primijeniti odgovarajuće mjere za zaštitu od štetnih utjecaja okoline i zaštitu osoblja od ozljeda električnom strujom. Stupnjevi zaštite od dodira, prodiranja stranih tijela i vode za rasvjetne svjetiljke u kormilarnici moraju biti najmanje IP 22, u strojarnici, kotlovnici, elektrani, radionici, prostoriji kormilarskog stroja, prostoriji generatora za nuždu, kuhinji i sanitarnim prostorijama najmanje IP 34, na otvorenim palubama IP 55, a u prostorijama akumulatorske baterije i spremi boja i zapaljivih tekućina prema "S"- propisima.

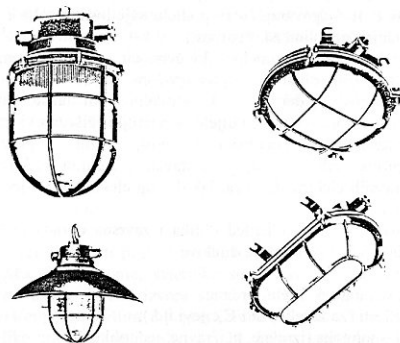
Valja znati da se oznake stupnjeva mehaničke zaštite (prema JUS N.A5.070 i IEC 529) sastoje od slovne oznake IP (International Protection - Medunarodna zaštita) i dva karakteristična broja.

Prvi broj (od 0 do 6) označava stupanj zaštite osoba od dodira dijelova pod naponom ili s unutrašnjim pomičnim dijelovima i zaštitu električnog uređaja od prodora stranih krutih tijela, tj. brojevi znače: 0 - bez zaštite, 1 - zaštita od slučajnog dodira, 2 - zaštita od dodira prstom, 3 - zaštita od dodira alatom, 4 - zaštita od dodira sitnim alatom, 5 - potpuna zaštita od dodira i 6 - zaštita od prodiranja prašine.

Drugi broj (od 0 do 8) označava stupanj zaštite od štetnog prodora vode, tj. brojevi znače: 0 - bez zaštite, 1 - zaštita od kapanja kondenzirane vode, 2 - zaštita od kapanja vode, 3 - zaštita od kiše, 4 - zaštita od prskanja vode, 5 - zaštita od mlaza vode, 6 - zaštita od olujnih uvjeta na otvorenim brodskim palubama, 7 - zaštita od povremenog uranjanja i 8 - zaštita pri trajnom radu u vodi pod određenim tlakom.

Tipični primjeri zaštite rasvjetnih svjetiljaka koje se ugrađuju u strojarnice, radionice, prostore s niskim stropovima, otvorene palube, hodnike i stubišta na brodu sadrži slika 6.3.24.





Sl. 6.3.24. Tipični primjeri nepromoćivih svjetiljaka na brodu

### 6.3.5. Brodska rasvjeta

Brodska rasvjeta može se podijeliti na:

- opću ili normalnu,
- pomoćnu,
- rasvjetu u opasnosti,
- pojačanu,
- dekorativnu.

Brodomskom rasvjetom smatra se i signalno-navigacijska rasvjeta s obzirom na identičnost izvora svjetlosti.

Za napajanje brodske rasvjete uglavnom postoje dvije odijeljene mreže, i to glavna mreža za napajanje rasvjete (iz glavne sklopne ploče, odnosno razdjelnika rasvjete) i mreža rasvjete u opasnosti (iz sklopne ploče za napajanje u nuždi). Na putničkim brodovima može se upotrijebiti i mreža koja se napaja iz dizelgeneratora, pa su tada na brodu tri neovisne mreže za napajanje rasvjete.

U trgovačkih brodova uobičajeno je da glavna mreža rasvjete služi za napajanje ukupne brodske rasvjete. Napaja se (iz glavnih generatora spojenih na glavnu sklopnu ploču) preko transformatora koji osiguravaju preporučeni jednofazni napon rasvjete od 220 V (rjede 125V, odnosno 110 V). Samo se rasvjeta za nuždu napaja iz akumulatorske baterije, gdje je preporučeni istosmjerni napon od 24 V (rjede 48 V, odnosno 110 V).

### 6.3.5.1. Opća ili normalna rasvjeta

*Opća ili normalna rasvjeta* je ona rasvjeta kojom se koristi u normalnim okolnostima rada i života na brodu.

Rasvjeta brodske strojarnice osigurana je ugradnjom FC-cijevi (na važnijim mjestima) i žaruljama. Ravnomierno osvjetljenje postiže se tako da se rasvjetna tijela postavljaju u obliku šahovske ploče, odnosno napojni vodovi se križaju u cijelom prostoru strojarnice. Da bi se to moglo ostvariti, svjetiljke se moraju napajati iz najmanje dva odvojena strujna kruga. U tom slučaju, ako bi došlo do kvara na jednoj ploči rasvjete, ne bi polovica strojarnice ostala u mraku, već bi se ukupna rasvjeta smanjila na polovicu. Jednako kao u strojarnici broda, rasvjetu osovinskog tuncla i stanicu pumpe valja napajati s najmanje dva neovisna pojna voda i s takvim rasporedom svjetla da bi se osigurala što veća jednoličnost rasvjete u slučaju da jedan vod ispadne iz pogona.

Jakost opće rasvjete u brodskoj strojarnici mora biti minimalno 75 lx (prolazi između strojeva, kotlova, stubišta platformi itd.). Ta rasvjeta mora se poboljšati na radnom mjestu ovisno o vrsti ugrađene svjetiljke. Mjesta za upravljanje porivnim strojevima moraju imati jakost rasvjete s FC cijevima 100 - 150 lx (sa žaruljama 75 - 150 lx), a površine sklopnih uređaja i upravljačkih pultova 100 - 200 lx (sa žaruljama 75 - 150 lx).

Opća rasvjeta tuncla osovinskog voda, bunara brzinomjera i dubinomjera mora imati jakost ostvarenu s FC-cijevima 50 lx (sa žaruljama 20 lx). Jednako takvu jakost opće rasvjete moraju imati prolazi na palubama, mostići za prolaz i prostor oko čamaca za spašavanje. Valja znati da je najveći dio svjetiljaka na brodskoj palubi za vrijeme plovidbe ugašen (ispred zapovjedničkog mosta su sva svjetla ugašena, a prema krmu gore ona svjetla koja se s mosta ne vide). Na putničkim brodovima mogu svijetliti svjetiljke ispred mosta, ali se s mosta ne smiju vidjeti. Na teretnim brodovima na palubu se ugrađuju obične žarulje, a na putničke brodove također i FC-cijevi.

Jakost opće rasvjete u akumulatorskim prostorijama i kormilarnici mora biti s FC-cijevima minimalno 75 lx (sa žaruljama 50 lx). U stambenim prostorijama (kabinama), navigacijskoj i radiokabini, neovisno o tipu svjetiljke, minimalna jakost rasvjete mora biti 100 lx, a na radnom stolu u radiokabini 400 lx, odnosno na navigacijskom stolu 150 lx.

### 6.3.5.2. Pomoćna rasvjeta

*Pomoćna rasvjeta* je ona rasvjeta koja se ugrađuje obično u putničkim brodovima. Uključuje se automatski nastane li kvar na napajanju opće rasvjete, pa se na taj način izbjegava panika putnika. Ta se rasvjeta napaja iz dizelgeneratora koji se nalazi iznad zaštitne palube, a koristi se istom brodomskom mrežom, svjetilkama i visinom napona kao i opća rasvjeta. Budući da se rasvjeta u opasnosti uključuje tek onda kad zakaže pomoćna rasvjeta, pomoćna se rasvjeta nalazi između opće rasvjete i rasvjete u opasnosti.

### 6.3.5.3. Rasvjeta u opasnosti

*Rasvjeta u opasnosti* uključuje se automatski preko naponskog releja nastupi li kvar na napajanju opće i pomoćne rasvjete. Napaja se iz akumulatorske baterije (puni se preko ispravljača iz razdjelnika opće rasvjete) preko razdjelnika rasvjete za napajanje u slučaju opasnosti, a koristi se posebnom brodskom mrežom, svjetiljkama i istosmjernim naponom (obično 24 V).

Rasvjeta u opasnosti je minimalna i služi samo za kretanje po brodu ili pri napuštanju broda. Prema SOLAS-konvenciji ne ugrađuje se u stambene prostorije (kabine), već:

- na mjestu upravljanja glavnim strojem,
- ispred i iza glavne sklopne ploče,
- iznad pomoćnih strojeva,
- u svim hodnicima u strojarnici računajući po visini na galerijama,
- iznad svih stubišta strojarnice,
- iznad vrata za izlazak iz strojarnice,
- u radionici,
- u prostoriji kormilariskog stroja,
- u hodnicima ispred brodske ledenice,
- u kuhinji,
- u hodnicima stambenih i navigacijskih prostorija,
- u blagovaonicama posade i časnika,
- u kormilarnici,
- u navigacijskoj kabini,
- u radio postaji,
- u prostoriji akumulatorskih baterija,
- u prostoriji s bocama CO<sub>2</sub>,
- na svim stubištima palubnih komunikacija,
- na važnim palubnim prolazima,
- oko čamaca za spašavanje.

Rasvjeta u opasnosti ostvaruje se žaruljama sa žarnom niti minimalne snage od 40 W. Kad se određuje kapacitet akumulatorske baterije za napajanje u opasnosti, tada on mora biti takav da sve te žarulje moraju svijetliti najmanje 12 sati. Redovito se baterije izabiru znatno većeg kapaciteta od onoga koji se dobiva proračunima i propisima klasifikacijskih društava.

### 6.3.5.4. Pojačana rasvjeta

*Pojačana rasvjeta* je ona kojom se koristi u iznimnim prilikama za posebna osvjjetljenja dijela brodske prostora. Uglavnom se ostvaruje upotrebom reflektora ili živinih žarulja postavljenih u skupini. Načesto su to:

- palubni reflektori na jarbolima za osvjjetljenje palube pri radovima na palubi;
- reflektori na brodskom boku koji osvjjetljavaju dio obale za koji je brod privezan ili površina mora za neke radnje u blizini broda;
- posebni reflektori preko čamaca za spašavanje, koji služe kad se upotrebljavaju ti čamci (priklučen je na mrežu za napajanje u opasnosti).

- brodski reflektor smješten na kormilarnici (s mogućnošću vrtnje od 360° vodoravno, a okomito za određeni kut) i upravljan iz kormilarnice pri osvjetljavanju nekih objekata na kopnu i moru;
- SUEZ-reflektor, smješten na brodskom pramcu, koji daje dva odvojena snopa svjetla pod kutom od 5°, tako da je između ta dva snopa neosvijetljen prostor koji omogućuje nesmetan prolazak brodu koji ide ususret, a istodobno osvjetljava obje strane kanala;
- palubne svjetiljke za dodatnu poprečnu rasvjetu palube na brodovima za prijevoz kombiniranog tereta (kontejneri ili automobili) kojom se moraju otkloniti sjene što se javljaju u prolazima između kontejnera ili automobila;
- reflektorske visokotlačne živine žarulje za osvjetljenje strojnica velikih brodova s visokim platformama itd.

Osim ugrađenih svjetiljaka na brodu se nalaze i prijenosne svjetiljke za osvjetljenje raznih skrovitih mjesta. Te svjetiljke moraju se rabiti uz napajanje iz galvanski odvojenih transformatora s istim naponom rasvjetne mreže ili sa sniženim naponom.

#### 6.3.5.5. Dekorativna rasvjeta

*Dekorativna rasvjeta* daje poseban ugođaj na brodu. To se u prvom redu odnosi na putničke brodove, u kojima se određeni brodski dio osvjetljava većim brojem reflektora. Na taj se način ističe natpis imena broda, naziv kompanije, dimnjak, sidro itd.

U dekorativnu rasvjetu ubraja se i tzv. *gala rasvjeta* postavljena uzduž cijelog broda, koja se uključuje u svečanim trenucima ili kad brod u noćnim satima ulazi u luku.

Na velikim putničkim brodovima dekorativna se rasvjeta ugrađuje u brojne prostorije za boravak i zabavu putnika. U danim trenucima, bilo danju ili noću, izborom boje svjetla i regulacijom njezine jakosti, prostori blagovaonica, noćnog kluba, kockarnice, diskokluba ili čitaonice, tv-sale itd. putnici se osjećaju kao da ne plove na brodu. Taj osjećaj je u putnika naglašen i u kabinama, gdje se, uz pomoć regulacijskih potencijometara i većeg broja svjetiljaka, može uskalditi jakost rasvjete i njihova usmjerenost.

#### 6.3.5.6. Signalno-navigacijska rasvjeta

*Signalno-navigacijska rasvjeta* je ona koja se daje zbog sigurnosti plovidbe.

Prema međunarodnom propisu o izbjegavanju sudara na moru svaki brod ima upaljene navigacijske svjetiljke od zalaska do izlaska sunca za vrijeme plovidbe. Taj propis i propisi pojedinih klasifikacijskih društava određuju izvedbu, smještaj, broj, napajanje i signalizaciju rada i kvara navigacijskih svjetiljaka.

Signalno-navigacijske svjetiljke moraju se spojiti na svoj napojni vod preko odgovarajuće utičnice i utikača s gibljivim kabelom na razdjelnik signalno-

navigacijske rasvjete. Taj se razdjelnik mora napajati preko dva pojna voda, određena samo za ovu namjenu, izravno ili preko transformatora:

- s jednim pojnim vodom iz glavne sklopne ploče ili preko sklopne ploče za opasnost;
- s drugim pojnim vodom iz najbližeg razdjelnika.

Iz razdjelnika signalno-navigacijske rasvjete ne smiju se napajati druga trošila, osim signalno-navigacijskih svjetiljki. Napajanje svake pojedine svjetiljke mora biti dvopolno.

Razdjelnik signalno-navigacijske rasvjete smješten je u brodskoj kormilarnici, a na njemu ili u njegovoj neposrednoj blizini (ili u pultu) mora biti preklopka kojom se izabire vod za napajanje električnom energijom.

Svaka signalno-navigacijska svjetiljka mora se upravljati i zaštititi u svakom izoliranom polu ili fazi sklopki ili osiguračem, ili samo prekidačem ugrađenim u razdjelnik signalno-navigacijske rasvjete. Pri tome svaki taj strujni krug mora imati svjetlosnu ili zvučnu signalizaciju rada, odnosno kvara pojedine svjetiljke. Svjetlosna signalizacija mora se tako izvesti da se ne prekida napajanje signalno-navigacijske svjetiljke kada pregori signalna žaruljica. Kad postoji samo zvučna signalizacija, tada se ona mora napajati iz posebnog izvora električne energije (akumulatorska baterija), ali ako su obje, tada se svaka od njih mora napajati iz posebnog (neovisnog) izvora.

Žarulje koje se ugrađuju u signalno-navigacijske svjetiljke moraju biti sa žarnom niti, a kućišta se ne smiju zagrijavati više od 30° iznad temperature okoline, pri trajnom radu i kad nema strujanja zraka. Grla se žarulja ne smiju sama odvrtati.

Međunarodni propis za izbjegavanje sudara na moru propisuje boje za signalno-navigacijske svjetiljke:

- a) *jarbolno svjetlo* označava bijelo svjetlo smješteno iznad pramčane i krmene centralne crte, dajući neprelomljeno svjetlo u luku od 225°;
- b) *bočno svjetlo* označava zeleno svjetlo na desnoj i crveno svjetlo na lijevoj strani broda dajući neprelomljeno svjetlo u luku od 112,5°;
- c) *krmeno svjetlo* označava bijelosvjetlo smješteno na brodskoj krmi dajući neprelomljeno svjetlo u luku od 135°;
- d) *svjetlo pri tegljenju* označava žuto svjetlo istih karakteritika kao pod c);
- e) *obično 360° svjetlo* označava bijelo svjetlo koje u luku od 360° daje neprekinuto svjetlo;
- f) *bljeskajuće svjetlo* označava svjetlo koje blješće u određenim intervalima s frekvencijom od 120 ili više titraja.

#### 6.4. Pitanja i zadaci za provjeru znanja

Uz točku 6.1.:

1. Koje osnovne elemente sadrži elektromotorni pogon?
2. Koji momenti djeluju na osovinu elektromotora?
3. Što je moment tromosti elektromotornog pogona?
4. Opišite opću jednadžbu gibanja rotirajućih masa elektromotornog pogona.

5. Koji je osnovni uvjet stacionarnog pogonskog stanja elektromotornog pogona?
6. Skicirajte i objasnite vanjske karakteristike trofaznog kaveznog motora i ventilatora na brodu.
7. Skicirajte i objasnite vanjske karakteristike dizaličnog pogona na brodu.
8. Koji su osnovni uvjeti dinamičkog pogonskog stanja elektromotornog pogona?
9. Objasnite pogonska stanja elektromotornog pogona.
10. Skicirajte i objasnite prirodne vanjske karakteristike elektromotora koji su najčešće na brodu.
11. Što je pogonska karakteristika pogonskog stroja?
12. Kako se može izraziti ovisnost momenta tereta radnih strojeva o brzini vrtnje?
13. Opišite rad brodskih električnih vitala.
14. Opišite rad brodskih elektromotornih pumpa.
15. Opišite rad brodskih ventilatora pokretanih elektromotorom.
16. Opišite rad brodskih kompresora pokretanih elektromotorom.
17. Opišite rad brodskih centrifuga pokretanih elektromotorom.
18. Elektromotornom pogonu u stanju mirovanja priključi se motor na mrežu s tendencijom vrtnje "naprijed". Motor razvije na osovini moment  $M_m = 170 \text{ Nm}$ , a reaktivni je moment tereta u mirovanju  $M_t = 290 \text{ Nm}$ . U kojem će se smjeru vrtjeti (gibati) elektromotorni pogon?  
[ostat će u mirovanju.]
19. Elektromotornom se pogonu teretnog vitla u stanju mirovanja priključi motor na mrežu s tendencijom "dizanja". Motor razvije na osovini moment  $M_m = 140 \text{ Nm}$ , a potencijalni moment tereta iznosi  $M_t = 240 \text{ Nm}$ . U kojem će se smjeru početi vrtiti elektromotorni pogon i koliki je početni moment ubrzanja?  
[spuštanje;  $M_u = -60 \text{ Nm}$ .]
20. Elektromotorni se pogon za teretno vitlo promatra u trenutku kad spušta teret konstantnom brzinom, a motor je priključen na smisao "spuštanja". Koji su predznaci  $M_m$  i  $M_t$  te koji je kvadrant za radnu točku elektromotornog pogona, ako se dogovorno odredi pozitivni smisao brzine vrtnje za:  
a) dizanje i b) spuštanje?  
[a)  $+M_m, +M_t$ , IV. kvadrant; b)  $-M_m, -M_t$ , II. kvadrant]

Uz točku 6.2.:

1. Što su toplinska trošila na brodu?
2. Kako se mogu podijeliti toplinska trošila na brodu?
3. Zašto je veći utrošak topline za grijanje prostorija na brodu nego na kopnu?

Uz točku 6.3.:

1. Što je svjetlost (svjetlo)?
2. Što je optičko zračenje?
3. Što je termičko, a što luminiscentno zračenje?
4. Koje su svjetlosne veličine i jedinice?
5. O čemu ovisi izbor svjetla na brodu?
6. Koje je svojstvo najvažnije za izbor prikladnog izvora svjetlosti na brodu?
7. Kako se mogu podijeliti izvori svjetlosti sa žarnom niti?

8. Skicirajte i objasnite pogonske karakteristike žarulje.
9. Skicirajte i opišite žarulju sa spiralnom volframovom niti.
10. Skicirajte i opišite grlo žarulje.
11. Kako se mogu podijeliti izvori svjetlosti na električno pražnjenje?
12. Skicirajte i opišite rad fluorescentne cijevi.
13. Skicirajte i objasnite kako se fluorescentna cijev priključuje u strujni krug.
14. Skicirajte i opišite rad visokotlačne živine žarulje.
15. Skicirajte i opišite rad niskotlačne natrijeve žarulje.
16. Skicirajte i opišite rad tinjalice.
17. Što su svjetiljke i koja je njihova primjena na brodu?
18. Kako se mogu podijeliti svjetiljke na brodu?
19. Kako se može podijeliti brodska rasvjeta. Opišite osnovne karakteristike te rasvjete.
20. Opišite signalno-navigacijsku rasvjetu na brodu.

## PRIMJENA ELEKTRIČNIH I NEELEKTRIČNIH VELIČINA I JEDINICA

Od 1. siječnja 1981. i u nas je stupio na snagu zakonski propis kojim je prihvaćen "međunarodni sustav jedinica" (SI). Na taj način pokušao se smanjiti nered koji je nastao uporabom različitih jedinica za jednu te istu veličinu. Tim je sustavom prihvaćeno i pravilo kako se pišu izrazi koji prikazuju odnose fizikalnih veličina: *svaku fizikalnu jedinicu treba uvrstiti izraženu u jedinicama SI-sustava*. Rezultat koji se dobiva izražen je također u jedinicama SI-sustava.

Budući da ima mnogo fizikalnih veličina, treba i mnogo različitih jedinica kojima se mjere i prikazuju. No većina tih jedinica može se prikazati pomoću drugih jedinica sustava. Zbog toga su definirane *osnovne jedinice*, a sve ostale jedinice mogu se izraziti s pomoću njih kao *izvedene jedinice*.

Dogovoreno je da u SI-sustavu bude *sedam osnovnih jedinica*, i to za:

dužinu (metar - *m*), masu (kilogram - *kg*), vrijeme (sekunda - *s*), jakost električne struje (amper - *A*), temperaturu (kelvin - *K*), svjetlosnu jakost (kandela - *cd*) i količinu tvari (mol - *mol*).

Od spomenutih sedam jedinica SI-sustava u tehnici se praktički opotrebljavaju prve četiri, pa je to *MKSA-sustav (sustav metar-kilogram-sekunda-amper)*. To nije nikakav *poseban* sustav, već samo dio SI-sustava koji je najzgodniji za promatranje *mehaničkih veličina*. *Elektrotehnika* se radije služi *VAMS-sustavom (sustav volt-amper-metar-sekunda)*, u kojem se umjesto osnovnom jedinicom za masu, dimenzije izvedenih veličina prikazuju jedinicom *V* (volt) za električni napon, tj. vrijedi da je:

$$V = \frac{kgm^2}{As^3}, \quad kg = \frac{VAs^3}{m^2}.$$

Služeći se slobodno tim sustavom, u ovom su udžbeniku prihvaćene i sve njegove *izvedene jedinice*.

Povezanost mehaničkih i električnih jedinica najbolje se može uočiti kad se razmatra rad. U mehanici je rad:

$$dW = F ds \quad (1)$$

i mjeri se u jedinicama njutn-metar (*Nm*), što je izvedena jedinica:

$$1 Nm = 1 \frac{kgm^2}{s^2}.$$

Rad je u elektrotehnici jednak:

$$dW = U I dt, \quad (2)$$

a mjeri se u jedinicama džul (*J*), što je opet izvedena jedinica:

$$1 J = 1 VAs.$$



Sve su to jedinice SI-sustava, pa je rad, izračunan na bilo koji način, izražen u istim jedinicama, odnosno mora biti:

$$1 J = 1 VAs = 1 Nm = 1 \frac{kgm^2}{s^2}.$$

Budući da i moment sile ima dimenziju  $Nm$ , radije se u mehanici rad izražava u  $J$ .

Odatle slijede odnosi između osnovnih i izvedenih jedinica koje se najviše upotrebljavaju pri pretvorbi energije:

$$1 kg = 1 \frac{VAs^3}{m^2}, \quad 1 V = 1 \frac{kgm^2}{As^3},$$

$$1 N = 1 \frac{VAs}{m}, \quad 1 V = 1 \frac{Nm}{As}.$$

Pri *translacijskom gibanju* koristi se veličinama:

sila  $F [N = \frac{kgm}{s^2} = \frac{VAs}{m}]$ , masa  $m [kg = \frac{VAs^3}{m^2}]$ , akceleracija  $a [\frac{m}{s^2}]$ , brzina  $v [\frac{m}{s}]$  i put  $s [m]$ , kojima su dimenzije povezane relacijama:

$$F = m a = m \frac{dv}{dt}, \quad (3)$$

$$v = \frac{ds}{dt}, \quad (4)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}. \quad (5)$$

Analogno tome, za *rotacijsko gibanje* koristi se veličinama:

zakretni moment ili moment vrtnje  $M [Nm = \frac{kgm^2}{s^2}]$ , moment tromosti  $J [kgm^2]$ ,

kutna akceleracija  $\epsilon [s^{-2}]$ , kutna brzina  $\omega [s^{-1}]$ , kut zakreta  $\alpha [rad]$  (omjer luka i polumjera, bez dimenzija).

Osnovne su relacije u rotacijskom gibanju:

$$M = J\epsilon = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (6)$$

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}, \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}. \quad (8)$$

Snaga je rad u jedinici vremena bez obzira na to je li gibanje translacijsko ili rotacijsko. To će pri translacijskom gibanju biti:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{s}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}, \quad (9)$$

a pri rotacijskom:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\vec{M} \cdot d\vec{\alpha}}{dt} = \vec{M} \cdot \vec{\omega}. \quad (10)$$

Ako sila djeluje na udaljenosti  $r$  od središta vrtnje, ona na putu  $ds$  izvrši rad:

$$dW = F ds. \quad (11)$$

Moment sile  $F$  oko središta vrtnje je:

$$M = F r, \quad (12)$$

pa se rad može iskazati kao:

$$dW = M \frac{ds}{r} = M d\alpha. \quad (13)$$

Kut  $d\alpha$  iskazan je u radijanima, pa je razumljivo da u svim računima te vrste kut treba uvrštavati u radijanima, bez obzira na to što je kut bezdimenzijska veličina.

Slične teškoće pojavljuju se i kod drugih veličina u vezi s kutom, kao što je kutna brzina, kutna akceleracija, brzina vrtnje i sl. Kutna brzina mjeri se u  $rad/s$  (dimenzija:  $s^{-1}$ ), a kutna akceleracija u  $rad/s^2$  (dimenzija:  $s^{-2}$ ). Brzina vrtnje iskazuje se u okretajima u sekundi ili, vrlo često, u okretajima u minuti. U tom drugom slučaju mijenja se i oznaka  $\omega$  u  $n$ . Da ne bi bilo nesporazuma, može se i za okretaj, koji je bezdimenzijska veličina, pisati kratica *okr* ili samo  $r$  pa je jedinica za brzinu vrtnje  $r/s$  (dimenzija:  $s^{-1}$ ), odnosno  $r/min$  (dimenzija:  $min^{-1}$ ).

Jedinice kojima se broje bezdimenzijske veličine zahtijevaju da se točno kaže što se broji. Tako se zakret može iskazati u radijanima, ali i u punim okretajima. Ili, frekvencija je broj oscilacija u sekundi, a kružna je frekvencija broj radijana u sekundi. Dimenzija je u oba slučaja  $s^{-1}$ . Ako se navede samo dimenzija, nije određeno je li riječ o frekvenciji  $f$  ili o kružnoj frekvenciji  $2\pi f$ .

Ovakva dodatna objašnjenja, kao što su *rad* (radijan),  $r$  (okretaj),  $rad/s$ ,  $rad/min$ , frekvencija u  $Hz$ , kružna frekvencija u  $Hz$  i slično, ne ubrajaju se u dimenziju veličine, ali su korisna jer otklanjaju mogućnost zabune.

Osim *sedam osnovnih jedinica* sve druge jedinice su *izvedene*. Neke od *izvedenih jedinica* SI-sustava predočene su u tablici 1.

Tabl. I. Izvedene jedinice SI-sustava (nekoliko primjera)

Veličina	Jedinica	Oznaka jedinice	Dimenzije
Kut (u ravnini)	radijan	<i>rad</i>	bez dimenzije
Kutna brzina	radijan u sekundi	<i>rad/s</i>	$s^{-1}$
Frekvencija	herc	<i>Hz</i>	$s^{-1}$
Frekvencija vrtnje	okretaja na sekundu	$r s^{-1}$	$s^{-1}$
Frekvencija vrtnje	okretaja na minutu	$r \text{ min}^{-1}$	$\text{min}^{-1}$
Kružna frekvencija	herc	<i>Hz</i>	$s^{-1}$
Gustoća, specifična masa	kilogram po kubnom metru	$kg/m^3$	$kg/m^3$
Sila	njutn	<i>N</i>	$kgm/s^2 = VAs/m$
Moment	njutn-metar	<i>Nm</i>	$kgm^2/s^2 = VAs$
Moment tromosti	kilogram puta kvadrati metar	$kgm^2$	$kgm^2$
Tlak, naprezanje	paskal	<i>Pa</i>	$N/m^2 = VAs/m^3$
Rad	džul	<i>J</i>	$J = VAs = Nm$
Snaga	vat	<i>W</i>	$VA$
Gustoća električne struje	amperi po kvadratnom metru	$A/m^2$	$A/m^2$
Električni naboj	kulon	<i>C</i>	$As$
Gustoća električnog toka	kulon po kvadratnom metru	$C/m^2$	$As/m^2$
Električno protjecanje	amper	<i>A</i>	$A$
Magnetski napon	amper	<i>A</i>	$A$
Električni napon	volt	<i>V</i>	$Nm/As = kgm^2/As^2$
Jakost električnog polja	volt po metru	$V/m$	$kgm/As^2$
Električni kapacitet	farad	<i>F</i>	$As/V$
Dielektrična konstanta	farad po metru	$F/m$	$As/Vm$
Radni (djelatni) otpor	om	$\Omega$	$V/A$
Reaktancija	om	$\Omega$	$V/A$
Impedancija	om	$\Omega$	$V/A$
Električna vodljivost	simens	<i>S</i>	$\Omega^{-1} = V/A$
Specifični otpor	ommetar	$\Omega m$	$Vm/A$
Induktivitet	henri	$Vs/A$	$kgm^2/A^2s^2$
Električna energija	vatsekunda	<i>Ws</i>	$VAs$
Jakost magnetskog polja	amper po metru	$A/m$	$A/m$
Magnetski tok	veber	<i>Wb</i>	$Vs$
Magnetska indukcija	tesla	<i>T</i>	$Vs/m^2$
Permeabilnost	henri po metru	$H/m$	$Vs/Am$
Reluktancija	amper po veberu	$A/Wb$	$A/Vs$
Magnetska vodljivost	henri	<i>H</i>	$Vs/A$
Količina topline	džul	<i>J</i>	$VAs$
Toplinski tok	vat	<i>W</i>	$VA$
Toplinski kapacitet	džul po kelvinu	$JK$	$VAs/K$
Specifična toplota	džul po kilogramu i kelvinu	$JkgK$	$VAs/kgK$
Toplinska vodljivost	vat po kelvinu i metru	$W/Km$	$VA/Km$
Koeficijent prijelaza topline	vat po kelvinu i kvadrat. metru	$W/Km^2$	$VA/Km^2$
Termodinamička temp.	kelvin	<i>K</i>	$1 K = 1^\circ C$
Celzijeva temperatura	stupanj Celzija	$^\circ C$	$0^\circ C = 273,15 K$

Valja znati da se određeni broj jedinica ne uklapaju u SI-sustav, ali se danas još uvijek primjenjuje. To je najviše posljedica stanja u praksi (katalozi, prospekti, ponude, tehnička dokumentacija), a onda i u samoj literaturi. Pri tome se neke još uvijek dopuštaju, ali ima i onih koje su danas *zabranjene*. Moraju se poznavati da bi se mogle po potrebi preračunati u nove jedinice. Evo nekoliko primjera takvih *dopuštenih jedinica* koje su predložene u tablici 2.

Tabl. 2. Nekoliko još uvijek *dopuštenih* jedinica preračunanih u nove

Namjena i naziv	Preračunavanje
Kut $1^\circ = 60'$ ; $1' = 60''$	$1^\circ = \pi/180 \text{ rad}$
Vrijeme - sat, minuta; 1 h = 60 min	$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$
Brzina - kilometri na sat	$1 \text{ km/h} = 0,277 \text{ m/s}$
Tlak - bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
Volumen tekućina - litra	$1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
Magnetski tok - voltsekunda, Tm <sup>2</sup>	$1 \text{ Vs} = 1 \text{ Wb}$
Snaga, djelatna - vat	$1 \text{ W} = 1 \text{ VA}$ <i>djelatne snage</i>
Snaga, jalova - voltamer reaktivni	$1 \text{ var} = 1 \text{ W}$ <i>jalove snage</i>
Snaga, prividna - voltamper	$1 \text{ VA} = 1 \text{ W}$ <i>prividne snage</i>
Rad, energija - kilovatsat	$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$

U tablici 3. predočeno je nekoliko starih, danas *zabranjenih* jedinica, koje su bile mnogo u upotrebi, pa se moraju znati preračunati u nove jedinice SI-sustava.

Tabl. 3. Nekoliko *zabranjenih* (starih) jedinica preračunanih u nove

Namjena i naziv	Preračunavanje
Sila - kilopond	$1 \text{ kp} = 9,8066 \text{ N}$
Sila - megapond	$1 \text{ Mp} = 9806,6 \text{ N}$
Tlak - atmosfera	$1 \text{ at} = 0,981 \text{ bar} = 98066,5 \text{ Pa}$
Tlak - milimetar stupca žive, Torr	$1 \text{ Torr} = 1,333 \text{ mbar} = 133,3 \text{ Pa}$
Tlak metar vodenog stupca	$1 \text{ m v.st.} = 9807 \text{ Pa}$
Snaga - konjska snaga	$1 \text{ KS} = 735,5 \text{ W}$
Snaga- kilopondmetar u sekundi	$1 \text{ kpm/s} = 9,81 \text{ W}$
Rad, energija - kilokalorija	$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ}$
Toplinski tok - kilokalorija u sekundi	$1 \text{ kcal/s} = 4,1868 \text{ kW}$
Specifična toplina - kilokalorija po kilogramu i stupnju Celzijevu	$1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 4,1868 \text{ kJ/kgK}$
Magnetska indukcija - gauss	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$

Osim osnovnih i izvedenih jedinica internacionalnog sustava primjenjuju se u praksi još veće i manje jedinice, a dobivaju se množenjem faktorom koji je neka potencija broja 10. Te se jedinice označuju tzv. prefiksima, kako se vidi u tablici 4.

Tabl. 4. Potencije broja 10

Dio ili višektarnik	Prefiks	Oznaka
$10^{18}$	ato	a
$10^{15}$	femto	f
$10^{12}$	piko	p
$10^9$	nano	n
$10^6$	mikro	$\mu$
$10^3$	mili	m
$10^3$	kilo	k
$10^6$	mega	M
$10^9$	giga	G
$10^{12}$	tera	T

## Angloamerički sustav mjera

Za pomorce je posebno važno poznavati angloamerički sustav mjera. Taj sustav ima primjenu u brodogradnji i pomorstvu vrlo razvijenih pomorskih zemalja, kao što su Velika Britanija i Sjedinjena Američke Države, a primjenjuju ga i: Australija, Burma, Indija, Iran, Irska, Kanada, Novi Zeland, Južna Afrika i Tunis. Zbog toga što naši pomorci plove i na stranim brodovima ili borave u lukama zemalja u kojima se služe tim mjernim sustavom, posebno je važno poznavati angloamerički sustav mjera i njegovo pretvaranje u metarski sustav, i obratno.

U angloameričkom sustavu mjera odabrane su osnovne jedinice:

foot - second - pound,

a ostale su jedinice izvedene:

1 yard = 3 feet = 36 inches

1 foot = 12 inches,

1 pound = 16 ounces i

1 quarter = 28 pounds.

Angloameričke mjerne jedinice imaju ove kratice:

BTU	- British Thermal Unit	- jedinica za toplinu
cu	- cubic	- kubik
ft	- foot, feet	- stopa
gal	- gallon	- galon
imp.gal.	- Imperial gallon	- engleski galon
in	- inch, inches	- col, palac
lb	- pound, avoirdupois	- libra, funta
oz	- ounce, ounces	- unca
psi	- pound per sq.in.	- libra, funta po kvadratnom colu
s	- second	- sekunda
sq	- square	- kvadrat
yd	- yard	- yard.

Odnos prema metarskom sustavu je:

### a) Jedinice za dužinu

1 in. = 25,400 mm

1 line = 0,1 in. = 2,540 mm

1 ft. = 12 in. = 304,799 mm

1 yd. = 3 ft. = 0,9144 m

1 chain = 4 poles = 100 links = 792 in. = 20,117 m

1 furlong = 40 poles = 110 fathoms = 201,17 m

1 fathom = 2 yd. = 6 ft. = 1,8288 m

1 statute mile = 8 furlongs = 5280 ft. = 1,6093 km (zemaljska milja)

1 London mile = 5000 ft. = 1,5240 km

1 nautical mile = 6080 ft. = 1,8532 km (morska milja)

1 admiralty mile = 6086,5 ft. = 1,8552 km (međunarodna morska milja)

1 mm = 0,03937 in.

1 m = 1,0936 yd. = 3,2808 ft.

1 km = 0,6214 statute miles = 0,5396 nautical miles.

## b) Jedinice za površinu

- 1 sq. line = 6,4516 mm<sup>2</sup>  
 1 sq. in. = 6,4516 cm<sup>2</sup>  
 1 sq. ft. = 144 sq.in. = 0,0929 m<sup>2</sup> = 929 cm<sup>2</sup>  
 1 circular in. =  $\pi/4$  sq. in. = 5,0671 cm<sup>2</sup>  
 1 circular mil = 10<sup>-6</sup> circular in. = 0,0005067 mm<sup>2</sup>  
 1 mm<sup>2</sup> = 0,00155 sq. in. = 0,155 sq. lines  
 1 cm<sup>2</sup> = 0,1550 sq. in.  
 1 m<sup>2</sup> = 1,1960 sq. yd. = 10,764 sq. ft. = 1550 sq. in.

## c) Jedinice za volumen - engleske i američke

- 1 cu. in. = 16,387 cm<sup>3</sup> = 0,016387 dm<sup>3</sup>  
 1 cu. ft. = 1728 cu. in. = 28,317 dm<sup>3</sup>  
 1 cu. yd. = 27 cu. ft. = 0,7646 m<sup>3</sup>  
 1 register ton = 100 cu. ft. = 2,8317 m<sup>3</sup>  
 1 ocean (freight) ton = 40 cu. ft. = 1,1327 m<sup>3</sup>  
 1 cm<sup>3</sup> = 0,06102 cu. in.  
 1 dm<sup>3</sup> = 0,035315 cu. ft. = 61,024 cu. in.  
 1 m<sup>3</sup> = 0,35315 register ton = 0,88287 ocean tons = 1,3080 cu. yd. =  
 = 35,315 cu. ft. = 61024 cu. in.

## Samo engleske jedinice:

- 1 imp. gal. = 4 quarts = 8 pints = 277,26 cu. in. = 4,546 dm<sup>3</sup>  
 1 pint = 4 gills = 0,4732 dm<sup>3</sup>  
 1 imp. quarter = 2 combs = 8 bushels = 0,2909 m<sup>3</sup> = 290,9 dm<sup>3</sup>  
 1 bushel (bu) = 8 imp. gal. = 36,368 dm<sup>3</sup>  
 1 barrel (bbl) = 36 imp. gal. = 4,5 bu = 163,6 dm<sup>3</sup>  
 1 petrol barrel = 35 petrol gal. (276,8 cu. in. = 4,536 dm<sup>3</sup>) =  
 = 5,6065 cu. in. = 158,76 dm<sup>3</sup>  
 1 dm<sup>3</sup> = 0,21998 imp. gal.  
 1 m<sup>3</sup> = 219,98 imp. gal. = 27,50 bu = 6,114 bbl  
 1 shipping ton (utovarna tona broda) = 42 cu. ft. = 1,1893 m<sup>3</sup>

## Samo američke jedinice:

- 1 gal. = 4 quarts = 8 pints = 231 cu. in. = 3,7854 dm<sup>3</sup>  
 1 pint = 4 gills = 0,4732 dm<sup>3</sup>  
 1 bushel (bu) = 35,242 dm<sup>3</sup>  
 1 barrel (bbl) = 31,5 gal. = 119,24 dm<sup>3</sup>  
 1 petrol barrel = 42 petrol gal. (230,67 cu. in. = 3,7798 dm<sup>3</sup>) = 158,76 dm<sup>3</sup>  
 (jednako engleski petrol barrel)  
 1 dm<sup>3</sup> = 0,2642 gal.  
 1 m<sup>3</sup> = 264,2 gal. = 28,38 bu = 8,388 bbl = 6,299 petrol barrels  
 1 gal. (američki)  $\approx$  5/6 imp. gal. (engleski)  
 1 shipping ton (utovarna tona broda) = 40 cu. ft. = 1,1326 m<sup>3</sup>

## d) Jedinice za masu

1 dram = 1,772 g

1 ounce (oz.) = 16 drams = 28,3495 g

1 lb. = 16 oz. 0,45359 kg

1 hundredweight (ctw.) = 4 quarters = 112 lbs. = 50,802 kg

(kod SAD također 1 ctw = 1 cental = 100 lbs = 45,359 kg)

1 long ton = 20 ctw. = 2240 lbs. = 1,01605 t (= 1 gross ton)

1 hort ton = 2000 lbs. = 0,90718 t ( 1 net ton)

1 g = 0,564 drams

1 kg = 2,2046 lbs. = 35,274 oz.

1 t = 0,9842 long tons = 1,1023 short tons

Deplasman broda = težina natovarenog broda u engleskim long tons

Dead weight – težina tereta i goriva u engleskim tons.

## e) Jedinice za gustoću (specifičnu masu)

1 long ton /cu. yd. = 1,3289 t/m<sup>3</sup>

1 short ton /cu. yd. = 1,1866 t/m<sup>3</sup>

1 lb./cu. ft = 27 lb./cu. yd. = 16,019 kg/m<sup>3</sup>

1 lb. /cu. in. = 1728 lb./cu. ft. = 27,680 kg/m<sup>3</sup>

1 lb. /imp. gal. = 0,09978 kg/m<sup>3</sup>

1 lb./gal (SAD) = 0,1198 kg/m<sup>3</sup>

1 kg/m<sup>3</sup> = 0,06243 lbs./cu. ft. = 1,6855 lbs./cu. yd.

1 kg/dm<sup>3</sup> = 10.0221 lbs./imp. gal. = 8,3455 lbs./gal (SAD) = 0,03613 lbs./cu. in.

1 t/m<sup>3</sup> = 0,7525 long tons/cu. yd. = 0,8428 short tons/cu. yd. (= 1 kg/dm<sup>3</sup>)

## f) Jedinice za silu

1 pound-force (lbf.) = 4,44822 N ≈ 0,4536 kp

1 kp = 2,2046 lbf. = 9, 80665 N

1 N ≈ 0,101972 kp = 0,224809 lbf.

## g) Jedinice za tlak

1 long ton/sq. yd. = 1,2152 t/m<sup>2</sup>

1 short ton/sq. yd. = 1,0850 t/m<sup>2</sup>

1 lb./sq. Yd. = 0,5425 kg/m<sup>2</sup>

1 lb./sq. ft. = 9 lbs./sq. yd. = 4,882 kg/m<sup>2</sup>

1 lb./sq. in. = 1 psi. = 144 lb./sq. ft. = 0,070307 kg/cm<sup>2</sup>

1 in. Hg (1 col stupca žive) = 0,03453 kg/cm<sup>2</sup>

1 kg/m<sup>2</sup> = 1,8433 lbs./sq.yd. = 0,2048 lbs./sq. ft.

## h) Jedinice za snagu i energiju

- 1 horsepower (HP) = 550 lbf. x ft./s = 1,01387 KS = 0,7457 kW
- 1 kW  $\approx$  1,341 HP  $\approx$  1.36 KS
- 1 British Thermal Unit (BTU) = 0,252 kcal  $\approx$  1,05506 kJ  $\sim$  0,2931 x 10<sup>-3</sup> kWh
- 1 BTU/lb. = 0,556 kcal/kg
- 1 BTU in. = 9,921 kcal/m
- 1 BTU/sq. ft. = 2,71 kcal/m<sup>2</sup>
- 1 BTU/cu. ft. = 8,899 kcal/m<sup>3</sup>
- 1 Centigrade Heat Unit (CHU) = 0,4536 kcal
- 1 horsepower-hour (HPh) = 0,7457 kWh = 2684,52 kJ = 641,186 kcal
- 1 pound-force foot (lbf. x ft.) = 1,3582 J  $\approx$  0,138255 kpm
- 1 kWh = 3600 kJ  $\sim$  367098 kpm = 3412,14 BTU = 859,845 kcal = 1,34102 HPh
- 1 J = 0,737562 lbf. x ft. = 8,85075 lbf- x in. = 0,947817 x 10<sup>-3</sup> BTU = 1 Nm
- 1 kcal = 3,96832 BTU = 2,2046 CHU = 4,1868 kJ = 1,163 x 10<sup>-3</sup> kWh  $\approx$  427 kpm
- 1 kcal/kg = 1,80 BTU/lb.
- 1 kcal/m = 1,008 BTU/in.
- 1 kcal/m<sup>2</sup> = 0,37 BTU/sq. ft.
- 1 kcal/m<sup>3</sup> = 0,112 BTU/cu. ft.
- 1 kcal/s  $\approx$  3,968 BTU/s  $\approx$  3088 lbf. x ft./s  $\approx$  4,186 kW  $\approx$  427 kpm/s
- 1 kpm = 7,2330 lbf. x ft.  $\approx$  9,295 x 10<sup>-3</sup> BTU = 9,80665 J

## i) Jedinice za brzinu

- 1 ft./min = 0,3048 m/min  $\approx$  0,00508 m/s
- 1 ft./s = 0,3048 m/s  $\approx$  1,097 km/h
- 1 yd./s = 0,9144 m/s  $\approx$  3,292 km/h
- 1 mile/h  $\approx$  1,609 km/h  $\approx$  0,447 m/s
- 1 int. naut. mile/h = 1,852 km/h
- 1 m/s  $\approx$  3,28 ft./s = 3,6 km/h
- 1 km/h  $\approx$  6214 mile/h = 0,2778 m/s

## j) Jedinice za ubrzanje

- 1 ft./s<sup>2</sup> = 0,3048 m/s<sup>2</sup>
- 1 m/s<sup>2</sup> = 3,2808 ft./s<sup>2</sup>

## k) Jedinice za potrošnju goriva

- 1 gal./mile (engleski) = 2,8247 l/km
- 1 gal./mile (američki) = 2,353 l/km
- l/km  $\approx$  0,3540 gal./mile (engleski)  $\approx$  0,4252 gal./mile (američki)



## l) Jedinice za gustoću struje

$$1 \text{ micro ohm-inch } (\mu\Omega\text{in.}) = 36 \times 10^{-6} \Omega\text{in}^2/\text{yd.} = 0,0254 \Omega\text{mm}^2/\text{m} = \\ = 0,0254 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$$

$$1 \Omega\text{mil./ft.} = 1,662 \times 10^{-3} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

$$1 \Omega\text{mm}^2/\text{m} = 39,37 \mu\Omega\text{in.} = 6017 \Omega\text{mil./ft.}$$

$$1 \Omega\text{m} = 10^2 \Omega\text{cm} = 10^6 \Omega\text{mm}^2/\text{m} = 3,937 \times 10^7 \mu\Omega\text{in.} = 6,017 \times 10^8 \Omega\text{mil./ft.}$$

## m) Jedinice za rasvijetljenost

$$1 \text{ luks (lx)} = 1 \text{ lumen/m}^2 (\text{lm/m}^2) \sim 0,0929 \text{ lm/ft.}^2 \text{ (ranije foot-candle, ft.-c.)}$$

$$1 \text{ ft.-c.} = 1 \text{ lm/ft.}^2 = 10,76391 \text{ lx}$$

$$1 \text{ foot (ph)} = 1 \text{ lm/cm}^2 = 10^4 \text{ lx}$$

## n) Jedinice za luminiscenciju

$$1 \text{ kandela/m}^2 (\text{cd/m}^2) = 1 \text{ nit (nt.)} = 0,0001 \text{ stilb (sb.)} \sim 3,14159 \text{ apostilb (bsb.)} \sim \\ \sim 0,291864 \text{ foot-lambert (fL.)} \sim 3,14159 \text{ lambert (L.)}$$

$$1 \text{ sb.} = 10000 \text{ cd/m}^2 = 10^4 \text{ nt.} \sim 10^4 \pi \text{ asb.} \sim 2918,64 \text{ fL.} \sim \pi \text{ L.}$$

$$1 \text{ asb.} = 1/10^4 \pi \text{ sb.} \sim 0,31831 \text{ cd/m}^2 \sim 0,09290 \text{ fL.} = 0,0001 \text{ L.}$$

$$1 \text{ fL.} = 3,426259 \text{ cd/m}^2 = 10,7639 \text{ asb.} = 1,07639 \times 10^{-3} \text{ L.}$$

$$1 \text{ L.} \sim 0,318310 \text{ sb.} \sim 3183,100 \text{ cd/m}^2 = 10000 \text{ asb.} \sim 929,03 \text{ fL.}$$

## LITERATURA

1. Ban, D., Štivecvić, V. i Gašparac, I.: *Osnove elektromehaničke pretvorbe energije i električnih strojeva*, Nacionalna i sveučilišna biblioteka, Zagreb (1996.)
2. Courtay, R. i Viard, A.: *Diesel-Electric Propulsion: The Best System for Cruise Ships*, Alstom Review, No. 8. (1987.)
3. Dolenc, A.: *Asinhroni strojevi*, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb (1967.)
4. Dolenc, A.: *Transformatori I i II*, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb (1968.)
5. Dolenc, A.: *Sinkroni strojevi*, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb (1976.)
6. Hartl, V.: *Električni strojevi I i II*, Školska knjiga, Zagreb (1979. i 1981.)
7. Holmström, P.: *Which Type of Diesel-Electric Propulsion?*, Schiff und Hafen No. 6 (1994.)
8. Jurković, B.: *Elektromotorni pogoni*, Školska knjiga, Zagreb (1990.)
9. Jurković, B. i Smolčić, Z.: *Kolektorski strojevi*, Školska knjiga, Zagreb (1986.)
10. Lončar, J.: *Osnovi elektrotehnike*, Knjiga druga, Tehnička knjiga, Zagreb (1958.)
11. Marinović, N.: *Elektromotorna postrojenja*, Školska knjiga, Zagreb (1986.)
12. Meluzin, H.: *Elektrotehnika na lak način*, Tehnička knjiga, Zagreb (1982.)
13. Ozretić, V.: *Brodski pomoćni strojevi i uređaji*, Riječka tiskara, Rijeka (1978.)
14. Pinter, V.: *Osnove elektrotehnike I i II*, Tehnička knjiga, Zagreb (1989.)
15. Pinter, V. i Skalicki, B.: *Osnove elektroenergetike i električnih strojeva*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb (1979.)
16. Samolek, M.: *Propulzori brzih nekonvencionalnih brodova*, Brodogradnja br. 41/3 (1993.)
17. Sirotić, Z. i Maljković, Z.: *Sinkroni strojevi*, FER, Zagreb (1996.)
18. Skalicki, B.: *Elektromotorni pogoni*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb (1976.)
19. Smith, P. W.: *Moderne Marine Electricity and Electronics*, Cornell Maritime Press, Inc., Cambridge, Maryland (1966.)
20. Srb, N.: *Asinhroni motori*, Tehnička knjiga, Zagreb (1971.)
21. Taylor, D. A.: *Introduction to Marine Engineering - Marine Engineering*, British Library Cataloguing in Publication Data, London (1985.)
22. Vidmar, B.: *Brodaska elektrotehnika*, Školska knjiga, Zagreb (1980.)
23. Vlahinić, I.: *Električni sistemi plovnih objekata*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka (1988.)
24. Watson, G. O.: *Marine Electrical Practice - Electricity on Ships*, 5th ed. British Library Cataloguing in Publication Data, London (1986.)
25. Wolf, R.: *Osnove električnih strojeva*, Školska knjiga, Zagreb (1985.)
26. Wolf, R.: *Uvod u teoriju električnih strojeva*, Školska knjiga, Zagreb (1975.)
27. ....: *Diesel-Electric Suits Many Cruise Newbuildings*, Marine Propulsion, VI (1994.)
28. ....: *Electric Propulsion Drives Forge Ahead*, The Naval Architect, No. 7-8, (1993.)
29. ....: *Marine Equipment: Alternators and Motors*, Siemens Catalog SET 1 (1978.)
30. ....: *Pomorska enciklopedija*, I. i II. svezak, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb (1954. i 1960.)
31. ....: *Pravila o gradnji pomorskih brodova*, dio XII - *Električni uređaji*, Split (1972.)

31. ....: *Tehnička enciklopedija*, II. svezak, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb (1966.)
32. ....: *Tehnički priručnik*, Končar i Tehnička knjiga, Zagreb (1990.)
33. ....: *Westermannov elektrotehnički priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb (1991.)
34. : Tehnička dokumentacija brodova Atlantske plovidbe iz Dubrovnika
35. : Prospekti i katalozi proizvođača brodske opreme: Končar (Zagreb), Končar (Rijeka), Končar (Split) i Uljanik (Pula).

## POPIS INDEKSA I OZNAKA

- A - klasa izolacije (2.5, 3.1)
- A - oznaka za anodu (3.6)
- A - oznaka izvora električne energije (1.2)
- A - oznaka stezaljke transformatora (3.1)
- A - oznaka stezaljki namota armature (rotora) istosmjernog stroja (3.4)
- A - osvijetljena površina (6.3)
- a - oznaka stezaljke transformatora (3.1)
- a - broj pari paralelnih grana namota armature (3.4)
- B - magnetska indukcija, gustoća magnetskog toka (2.2, 2.3, 3.2, 3.4)
- B - oznaka razvoda i razdiobe električne energije (1.2)
- B - oznaka stezaljki namota pomoćnog pola istosmjernog stroja (3.4)
- B - oznaka stezaljke transformatora (3.1)
- B - klasa izolacije (2.5, 3.1)
- $B_m$  - maksimalna vrijednost magnetske indukcije (3.3)
- $B_s$  - srednja vrijednost magnetske indukcije (3.3, 3.4)
- b - oznaka stezaljke transformatora (3.1)
- C - oznaka električnih trošila (1.2)
- C - oznaka stezaljki kompenzacijskog namota u istosmjernom stroju (3.4)
- C - oznaka stezaljke transformatora (3.1)
- C - klasa izolacije (2.5)
- C - oznaka za kondenzator (3.2)
- $C_A$  - oznaka za elektrolitski kondenzator (3.2)
- $C_B$  - oznaka za pogonski kondenzator (3.2)
- c - oznaka stezaljke transformatora (3.1)
- c - specifična toplina vodiča (2.5)
- D - oznaka stezaljki serijskog namota istosmjernog stroja (3.4)
- D - promjer rotora (2.3, 3.3, 3.4)
- D - promjer stupa transformatora (3.1)
- D - oznaka za diodu (3.6)
- DN - donji namot transformatora (3.1)
- d - oznaka za donji sloj namota u utoru (2.4)
- d - oznaka za širinu svitka (2.2)
- E - oznaka stezaljki paralelnog namota u istosmjernom stroju (3.4)
- E - klasa izolacije (2.5, 3.1)
- E - efektivna vrijednost inducirano napona (2.2, 2.3, 3.3, 3.4, 3.5)
- E - jakost rasvjete (osvijetljenost) (6.3)
- $E_0$  - inducirani napon nakon zaustavljanja generatora (3.2)
- $E_1$  - inducirani napon primara transformatora (3.1)
- $E_2$  - inducirani napon sekundara transformatora (3.1)
- $E_{20}$  - inducirani napon sekundara zakočenog asinkronog motora (3.2)
- $E_G$  - inducirani napon sinkronog generatora (3.3)
- $E_m$  - maksimalni inducirani napon (3.3, 3.5)
- $E_{max}$  - maksimalni inducirani napon (2.2)
- $E_s$  - srednja vrijednost inducirano napona (3.5)
- e - trenutna vrijednost elektromagnetske indukcije (2.2, 3.4)

- $e_r$  - inducirani napon rotacije (2.2)
- $e_i$  - inducirani napon transformacije (2.2)
- F - oznaka stezaljki neovisno uzbuđenog namota u istosmjernom stroju (3.4)
- F - klasa izolacije (2.5, 3.1)
- F - sila na vodič (2.2, 2.3)
- F - poriv propelera (5.1)
- $F_v$  - sila na vodič u utoru (3.4)
- $F_u$  - sila na utor (3.4)
- $f$  - frekvencija, općenito ((2.2, 3.2, 3.3)
- $f_1$  - frekvencija u statoru stroja (3.2)
- $f_2$  - frekvencija u rotoru stroja (3.2)
- $f_G$  - frekvencija sinkronoga generatora (3.3)
- $f_{nl}$  - frekvencija neopterećenoga generatora (3.3)
- $f_s$  - sinkrona frekvencija (3.3)
- G - oznaka za generator (6.1)
- G - oznaka za vradta tiristora (3.6)
- GN - gornji transformatorski namot (3.1)
- g - oznaka za glavni namot (3.2)
- g - oznaka za gornji sloj namota u utoru (2.4)
- g - oznaka za stezaljku (3.6)
- H - klasa izolacije (2.5, 3.1)
- H - jakost magnetskog polja (2.2)
- $H_0$  - jakost magnetskog polja u vakuumu (zraku) (2.2)
- $H_x$  - jakost magnetskog polja na mjestu x (3.3)
- I - oznaka stezaljke uzbuđenog namota u sinkronom stroju (3.3)
- I - jakost svjetla (svjetlosti) (6.3)
- I - jakost (efektivna vrijednost) struje (2.2, 2.3, 2.5, 3.3)
- I - struja pražnjenja akumulatora (4.2)
- I - struja opterećenja (3.4)
- $I_0$  - struja u praznom hodu stroja (3.1, 3.2)
- $I_1$  - struja u namotu transformatorskog primara (3.1)
- $I_2$  - struja u namotu transformatorska sekundara (3.1)
- $I_2$  - struja u rotorsku namotu (3.2)
- $I_a$  - struja u armaturnom namotu (3.3, 3.4)
- $I_{ak}$  - struja u armaturnom namotu za vrijeme kratkog spoja (3.3)
- $I_{an}$  - nazivna struja u armaturnom namotu (3.3)
- $I_{Fe}$  - struja u željezu (3.3)
- $I_f$  - fazna struja (3.1)
- $I_g$  - struja u glavnom namotu (3.2)
- $I_k$  - ispravljena struja (3.6)
- $I_k$  - struja u kratkom spoju (3.1, 3.2, 3.3, 3.4)
- $I_l$  - linijska struja (3.1)
- $I_m$  - struja magnetiziranja (3.1)
- $I_m$  - maksimalna struja (3.4)
- $I_n$  - nazivna struja (3.1, 3.4, 6.3)
- $I_n$  - zaporna struja diode (3.6)
- $I_p$  - struja opterećenja transformatora (3.1)
- $I_p$  - propusna struja diode (3.6)
- $I_p$  - struja u pomoćnom namotu (3.2)
- $I_p$  - struja pokretanja (3.3)

- $I_t$  - struja tiristora (3.6)
- $I_u$  - struja u uzбудnom namotu (3.3, 3.4)
- $I_{u0}$  - struja u uzбудnom namotu za vrijeme praznog hoda (3.3)
- $I_{uk}$  - struja u uzбудnom namotu za vrijeme kratkog spoja (3.3)
- $I_{ur}$  - struja rasipanja u uzбудnom namotu (3.3)
- $I_{uu}$  - struja u uzбудnom namotu uzbuđnika (3.3)
- $I_v$  - struja jedne grane vodiča u utoru (3.4)
- IEC - internacionalna elektrotehnička komisija (2.5, 3.1)
- $i_t$  - trenutna vrijednost struje (2.2)
- $J$  - moment inercije, tromost (5.1, 6.1)
- $K$  - oznaka za klizni kolut (3.1)
- $K$  - oznaka za katodu (3.6)
- $K$  - oznaka kolektora s četkicama (3.3)
- $K$  - oznaka stezaljke uzbuđnog namota u sinkronom stroju (3.3)
- $K_p$  - oznaka kliznih prstena s četkicama (3.3)
- $k$  - faktor opterećenja (3.3, 6.1)
- $k$  - oznaka za stezaljku (3.6)
- $k_{12}$  - koeficijent transformacije (3.1)
- $k_{21}$  - koeficijent transformacije (3.1)
- $k_E$  - koeficijent induciranog napona (3.4)
- $k_f$  - koeficijent forsiranja uzbude (3.3)
- $k_M$  - koeficijent momenta (3.4)
- $k_n$  - faktor namota (3.3, 6.4)
- $L$  - sjajnost (luminiscencija) (6.3)
- $L$  - induktivitet prigušnice (3.3)
- $L_{1-3}$  - oznake za faze brodske mreže (3.1, 3.2, 3.3)
- $L_{k2}$  - induktivitet rotorskog namota (3.2)
- $l$  - dužina stroja (3.3)
- $l$  - dužina vodiča (2.2, 3.4)
- $l$  - dužina namota u utoru (2.4)
- $l$  - srednja dužina magnetskih silnica (2.2)
- $l_k$  - dužina namota izvan utora (2.4)
- $M$  - međuinaktivitet svitka (2.2)
- $M$  - moment vrtnje (2.2, 2.3)
- $M$  - moment motora (3.2, 3.3, 3.4)
- $M$  - oznaka za motor (6.1)
- $M_0$  - moment trenja (6.1)
- $M_c$  - električni moment (3.2)
- $M_m$  - okretni moment (6.1)
- $M_{nn}$  - maksimalni (prekretni) moment (3.2)
- $M_n$  - nazivni moment (3.2, 3.3, 6.1)
- $M_p$  - potezni (pokretni) moment (3.2, 3.3, 3.4, 6.1)
- $M_p$  - moment propelera (5.1)
- $M_{pr}$  - prekretni moment (6.1)
- $M_s$  - zakretni moment stroja (3.2, 5.1)
- $M_{snn}$  - moment pri smanjenoj brzini vrtnje (3.2)
- $M_t$  - moment tereta (3.2, 3.4, 6.1)
- $M_{t1}$  - moment tereta u stacionarnoj točki (6.1)
- $M_{t2}$  - moment tereta u stacionarnoj točki (6.1)
- $M_t$  - moment trenja osovinskog voda (5.1)

$M_m$	- nazivni moment trenja radnog stroja (6.1)
$M_u$	- moment ubrzanja (6.1)
$m$	- masa broda (5.1)
$m$	- masa zagrijanog vodiča (2.5)
$N$	- oznaka za nultu točku (zvjezdište) transformatora (3.1)
$N$	- oznaka za negativni vodič (3.4)
$N$	- oznaka magnetskog pola (2.2, 2.4, 3.4)
$N$	- oznaka za negativan sloj diode (3.6)
$N$	- broj zavoja (2.2, 3.3)
$N_1$	- broj zavoja u namotu transformatorskog primara (3.1)
$N_1$	- broj zavoja u statorskom namotu (3.2)
$N_2$	- broj zavoja u namotu transformatorskog sekundara (3.1)
$N_2$	- broj zavoja u rotorskom namotu (3.2)
$N_a$	- namot armature (3.3)
$N_u$	- namot uzbude (3.3)
$N_{uu}$	- namot uzbude uzбудnika (3.3)
$NZ$	- oznaka neutralne zone (3.4)
$n$	- oznaka za nultu točku (zvjezdište) transformatora (3.1)
$n$	- broj generatora na brodu (4.1)
$n$	- brzina vrtnje, općenito (3.4)
$n$	- asinkrona brzina vrtnje (3.2)
$n_0$	- brzina vrtnje u praznom hodu (3.4)
$n_{maks}$	- maksimalni broj okretaja dizelskog motora (4.1)
$n_{min}$	- minimalni broj okretaja dizelskog motora (4.1)
$n_n$	- nazivna brzina vrtnje (6.1)
$n_s$	- sinkrona brzina vrtnje (3.2, 3.3, 6.1)
$n_{s2}$	- sinkrona brzina vrtnje rotora (3.2)
$n_{sm}$	- smanjena brzina vrtnje (3.2)
$n_{sr}$	- srednji broj okretaja dizelskog motora (4.1)
$P$	- oznaka za pozitivni vodič (3.4)
$P$	- oznaka za početak svitka (2.4)
$P$	- snaga općenito (2.3, 2.5)
$P$	- djelatna snaga (4.1, 6.1, 6.3)
$P$	- oznaka za pozitivan sloj diode (3.6)
$P_0$	- ukupni gubici snage u praznom hodu (3.1, 3.2)
$P_1$	- primljena (privedena) snaga (2.1, 3.1, 3.2, 3.3)
$P_2$	- predana (dobivena) snaga (2.1, 2.5, 3.2, 3.3, 3.4)
$P_{2d}$	- gubici snage na kliznim prstenima (3.2)
$P_{Cu}$	- ukupni gubici snage u transformatorskim namotima (3.1)
$P_{Cu1}$	- gubici snage u bakru namota transformatorskog primara (3.1)
$P_{Cu1}$	- gubici snage u bakru statorskog namota stroja (3.2)
$P_{Cu2}$	- gubici snage u bakru namota transformatorskog sekundara (3.1)
$P_{Cu2}$	- gubici snage u bakru rotorskog namota stroja (3.2)
$P_{Cus}$	- gubici snage u bakru statorskog namota sinkronoga generatora (3.3)
$P_{DM}$	- snaga dizelskog motora (4.1)
$P_d$	- dodatni gubici u željezu (3.1, 3.3)
$P_e$	- električna snaga (2.3, 3.2, 3.3)
$P_{em}$	- elektromagnetska snaga (3.3)
$P_{Fe}$	- osnovni gubici u željezu (3.1, 3.3)
$P_G$	- snaga generatora (4.1)

- $P_{Gn}$  - nazivna snaga generatora (4.1)  
 $P_g$  - ukupni gubici (2.1, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4)  
 $P_{gm}$  - mehanički gubici (3.3)  
 $P_k$  - snaga kratkog spoja transformatora (3.1)  
 $P_{gr}$  - gubici snage u rotoru (3.3)  
 $P_{gs}$  - gubici snage u statoru (3.3)  
 $P_{gt}$  - gubici snage pri opterećenju stroja (3.3)  
 $P_{gu}$  - gubici snage u uzbudi (3.3)  
 $P_{im}$  - mehanička snaga stroja (2.3, 3.2, 3.3)  
 $P_n$  - nazivna snaga (3.1, 3.2, 3.3)  
 $P_{okr}$  - snaga u zračnom rasporu stroja (3.2)  
 $P_{t+v}$  - gubici snage na trenje i ventilaciju (3.2)  
 $p$  - broj pari polova (2.4, 3.3, 3.4)  
 $p$  - eksponent ovisan o mehaničkoj karakteristici (6.1)  
 $p$  - oznaka za pomoćni namot (3.2)  
 $Q$  - količina svjetlosti (6.3)  
 $Q$  - kapacitet ventilatora (2.5)  
 $Q$  - kapacitet akumulatorske baterije (4.2)  
 $Q$  - Joulova toplina (2.5)  
 $Q_1$  - preostala količina topline (2.5)  
 $Q_1$  - jalova snaga (3.2)  
 $Q_2$  - predata količina topline (2.5)  
 $R$  - otpor broda (5.1)  
 $R$  - električni djelatni otpor (2.5, 3.1, 3.3)  
 $R$  - oznaka za relj (3.6)  
 $R_0$  - električni djelatni otpor namota u praznom hodu stroja (3.2)  
 $R_1$  - električni djelatni otpor statorskog namota (3.2)  
 $R_1$  - električni djelatni otpor u transformatorskom primarnom namotu (3.1)  
 $R_2$  - električni djelatni otpor u transformatorskom sekundarnom namotu (3.1)  
 $R_2$  - električni djelatni otpor rotorskog namota (3.2)  
 $R_{20}$  - električni otpor rotorskog namota stroja u praznom hodu (3.2)  
 $R_{2d}$  - vanjski dodatni otpor kolutnog motora (3.2)  
 $R_{2f}$  - fazni dodatni otpor (3.2)  
 $R_a$  - područje indeksa kod stupnja reprodukcije boja (6.3)  
 $R_a$  - električni djelatni otpor u armaturnom namotu (3.3, 3.4)  
 $R_{Fe}$  - električni djelatni otpor u željezu (3.1)  
 $R_k$  - ukupni električni djelatni otpor transformatora (3.1)  
 $R_{in}$  - električni djelatni otpor pri maksimalnom klizanju (3.2)  
 $R_I$  - otpor trošila (3.6)  
 $R_u$  - električni djelatni otpor namota uzbude (3.3, 3.4)  
 $R_{uu}$  - električni djelatni otpor namota uzbude u uzbudniku (3.3)  
 $R_{up}$  - električni djelatni otpor paralelnog namota uzbude (3.4)  
 $R_{us}$  - električni djelatni otpor serijskog namota uzbude (3.4)  
 $r$  - polumjer kugle (6.3)  
 $r$  - polumjer rotora (2.3)  
 $r$  - oznaka za kontakt (3.6)  
 $S$  - površina presjeka magnetskog kruga (2.2, 3.4)  
 $S$  - oznaka za svršetak svitka (2.4)  
 $S$  - površina presjeka vodiča (2.5)  
 $S$  - prividna snaga (4.1)



- $S$  - oznaka magnetskog pola (2.2, 2.4, 3.4)  
 $S_{Fc}$  - površina presjeka transformatorske jezgre (3.1)  
 $s$  - dužina puta (2.3)  
 $s$  - klizanje (3.2)  
 $s_0$  - klizanje u praznom hodu (3.2)  
 $s_m$  - maksimalno (prekretno) klizanje (3.2)  
 $s_n$  - nazivno klizanje (3.2)  
 $s_p$  - nagib krivulje frekvencija - djelatna snaga (3.3)  
 $s_Q$  - nagib krivulje napon - jalova snaga (3.3)  
 $t$  - vrijeme odziva (3.3)  
 $t$  - vrijeme (2.5, 3.4, 4.2)  
 $U$  - oznaka stezaljke stroja (3.2, 3.3)  
 $U$  - napon na stezaljkama stroja (3.2, 3.3, 3.4)  
 $U_1$  - napon transformatorskog primara (3.1)  
 $U_1$  - napon na rotoru davača selsina (3.5)  
 $U_2$  - napon na rotoru prijavnika selsina (3.5)  
 $U_2$  - napon transformatorska sekundara (3.1)  
 $U_G$  - napon na vratima tiristora (3.6)  
 $U_K$  - ukupni pad napona u transformatoru (3.1)  
 $U_R$  - pad napona na djelatnom otporu (3.1)  
 $U_X$  - pad napona na induktivnom otporu (3.1)  
 $\Delta U$  - pad napona na armaturi istosmjernog stroja (3.4)  
 $\Delta U_e$  - pad napona na četkicama (3.4)  
 $U_f$  - fazni napon (3.1, 3.2)  
 $U_{is}$  - ispravljeni napon (3.6)  
 $U_{iz}$  - izmjenični napon (3.6)  
 $U_l$  - linijski napon (3.1, 3.2)  
 $U_m$  - maksimalni napon (3.6)  
 $U_n$  - nazivni napon (3.1, 3.2, 3.3)  
 $U_n$  - zaporni napon diode (3.6)  
 $U_p$  - pad napona na poluvodičkoj diodi (3.6)  
 $U_u$  - napon uzбудnika (3.3)  
 $U_{un}$  - nazivni napon uzбудnika (3.3)  
 $U_{umax}$  - maksimalni napon uzбудnika (3.3)  
 $U_{\sigma 1}$  - napon rasipanja primara (3.1)  
 $U_{\sigma 2}$  - napon rasipanja sekundara (3.1)  
 $u_K$  - postotni napon kratkog spoja (3.1)  
 $u_k$  - postotni pad napona u transformatoru (3.1)  
 $u_R$  - postotni pad napona na djelatnom otporu (3.1)  
 $u_X$  - postotni pad napona na induktivnom otporu (3.1)  
 $V$  - oznaka stezaljke stroja (3.2, 3.3)  
 $V$  - magnetski napon (2.2)  
 $v$  - brzina gibanja vodiča (2.2)  
 $v$  - brzina vrtnje općenito (2.3, 3.3)  
 $v$  - brzina broda (5.1)  
 $v$  - obodna brzina (2.3, 3.3, 3.4)  
 $W$  - oznaka stezaljke stroja (3.2, 3.3)  
 $W$  - energija općenito (2.3)  
 $W_l$  - primljena (privedena) energija (2.1)

- $W_2$  - predana (dobivena) energija (2.1)  
 $W_e$  - električna energija (2.1, 2.3)  
 $W^g$  - energija gubitaka (2.1)  
 $W_m$  - mehanička energija (2.1, 2.3)  
 $X'$  - oznaka stezaljke transformatora (3.1)  
 $X$  - reaktivno opterećenje transformatora (3.1)  
 $X$  - induktivni otpor (3.1, 3.3)  
 $X_0$  - induktivni otpor namota u praznom hodu (3.2)  
 $X_a$  - reaktancija armature sinkronoga generatora (3.3)  
 $X_a$  - induktivni rasipni otpor u armaturnom namotu (3.3)  
 $X_d$  - uzdužna komponenta armaturne reakcije (3.3)  
 $X_k$  - rasipni induktivni otpor (3.1, 3.3)  
 $X_m$  - induktivni otpor u željezu transformatora (3.1)  
 $X_q$  - poprečna komponenta armaturne reakcije (3.3)  
 $X_s$  - sinkrona reaktancija (3.3)  
 $X_{\sigma}$  - prividni otpor transformatora (3.1, 3.2)  
 $X_{\sigma}$  - rasipna reaktancija sinkronoga generatora (3.3)  
 $X_{\sigma 1}$  - rasipna reaktancija statorskog namota (3.2)  
 $X_{\sigma 2}$  - rasipna reaktancija rotorskog namota (3.2)  
 $X_{\sigma 2s}$  - induktivni otpor rotota u vrtnji (3.2)  
 $x$  - oznaka transformatorske stezaljke (3.1)  
 $x$  - relativno opterećenje transformatora (3.1)  
 $Y$  - klasa izolacije (2.5)  
 $Y$  - oznaka spoja transformatorskog namota (3.1)  
 $Y$  - oznaka transformatorske stezaljke (3.1)  
 $y$  - oznaka transformatorske stezaljke (3.1)  
 $y$  - korak armaturnog namota (3.4)  
 $y_1$  - korak svitka namota armature (3.4)  
 $y_2$  - spojni korak armaturnog namota (3.4)  
 $y_k$  - kolektorski korak (3.4)  
 $Z$  - oznaka spoja transformatorskog namota (3.1)  
 $Z$  - oznaka transformatorske stezaljke (3.1)  
 $Z$  - impedancija, općenito (3.1)  
 $Z_2$  - impedancija rotorskog namota (3.2)  
 $Z_K$  - ukupna impedancija transformatora (3.1)  
 $z$  - oznaka transformatorske stezaljke (3.1)  
 $z$  - broj vodiča u armaturnom namotu (3.4)  
 $\alpha$  - kut opterećenja (2.2)  
 $\alpha$  - kut zakreta (2.3)  
 $\alpha_1$  - kut selsina davača (3.5)  
 $\alpha_2$  - kut selsina prijammika (3.5)  
 $\Gamma$  - gustoća struje (2.5)  
 $\Delta$  - oznaka spoja transformatorskog namota (3.1)  
 $\delta$  - zračni raspor (3.3)  
 $\delta_x$  - zračni raspor na mjestu x (3.3)  
 $\varepsilon$  - kutno ubrzanje (6.1)  
 $\eta$  - korisnost, stupanj korisnosti (2.1, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 6.3)  
 $\eta_A$  - korisnost akumulatorske baterije (4.3)

- $\eta_G$  - korisnost sinkronoga generatora (4.1)  
 $\eta_g$  - korisnost generatora (2.1)  
 $\eta_m$  - maksimalna korisnost (3.1)  
 $\eta_{lm}$  - korisnost motora (2.1, 3.2)  
 $\eta_{sm}$  - smanjena korisnost (3.2)  
 $\Theta$  - protjecanje (2.2, 3.2)  
 $\Theta_x$  - protjecanje na mjestu x (3.3)  
 $\vartheta$  - temperatura zagrijanog vodiča (2.5)  
 $\vartheta_0$  - temperatura okoline (2.5)  
 $\vartheta_{max}$  - maksimalna temperatura vodiča (2.5)  
 $\vartheta_{nmax}$  - nadtemperatura vodiča (2.5)  
 $\lambda$  - toplinski koeficijent odvođenja topline (2.5)  
 $\mu$  - magnetska permeabilnost (2.2)  
 $\mu_0$  - magnetska permeabilnost vakuuma (zraka) (3.3)  
 $\mu_r$  - relativna magnetska permeabilnost (2.2)  
 $\tau$  - vremenska konstanta zagrijanja (2.5)  
 $\tau_p$  - polni korak (3.3, 3.4)  
 $\xi_1$  - faktor statorskog namota (3.2)  
 $\xi_2$  - faktor rotorskog namota (3.2)  
 $\xi_n$  - faktor namota (3.2)  
 $\zeta$  - dobrotu akumulatora (4.2)  
 $\zeta$  - stupanj nejednolikosti (4.1)  
 $\Phi$  - svjetlosni tok (6.3)  
 $\Phi$  - magnetski tok (2.2, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5)  
 $\Phi_{max}$  - maksimalni magnetski tok (2.2)  
 $\Phi_n$  - nazivni magnetski tok (3.2)  
 $\Phi_p$  - magnetski tok paralelnog uzbuđenog namota (3.4)  
 $\Phi_s$  - magnetski tok serijskog uzbuđenog namota (3.4)  
 $\Phi_{\sigma 1}$  - rasipni magnetski tok primara (3.1)  
 $\Phi_{\sigma 2}$  - magnetski rasipni tok sekundara (3.1)  
 $\varphi$  - kut faznog pomaka (3.3)  
 $\varphi_G$  - kut faznog pomaka, sinkroni generator (3.3)  
 $\varphi_1$  - kut faznog pomaka, transformatorski primar (3.1)  
 $\varphi_2$  - kut faznog pomaka, transformatorski sekundar (3.1)  
 $\varphi_2$  - kut faznog pomaka, rotor stroja (3.2)  
 $\varphi_0$  - kut faznog pomaka između napona i struje u praznom hodu (3.1)  
 $\varphi_k$  - kut faznog pomaka između napona i struje u kratkom spoju (3.1)  
 $\Psi$  - ulančani magnetski tok (2.2)  
 $\omega$  - kružna frekvencija električna ( $2\pi f$ ) (2.2)  
 $\omega$  - prostorni kut (6.3)  
 $\omega$  - obodna brzina (2.3, 3.3)  
 $\omega_m$  - kutna brzina (3.3, 6.1)