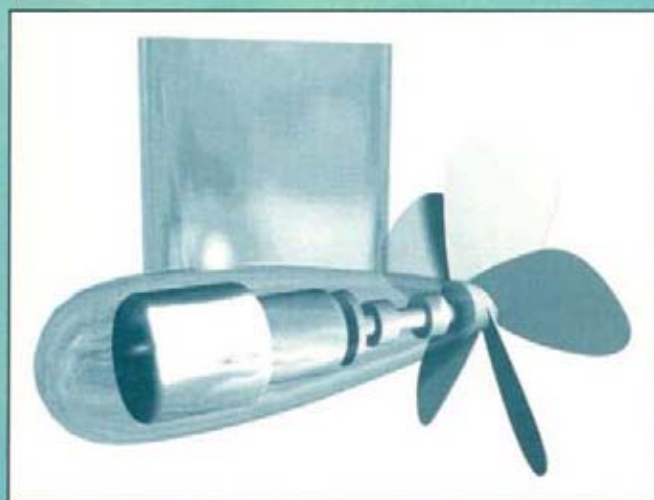


ITN 2003/3

**INSTITUT TEHNIČKIH NAUKA**  
*Srpske akademije nauka i umetnosti*

---

*Zoran NIKOLIĆ, Gordana POČUČA*



***BRODSKE ELEKTRIČNE  
MAŠINE I UREĐAJI***

---

Beograd, 2003.

**INSTITUT TEHNIČKIH NAUKA**  
**Srpske akademije nauka i umetnosti**

---

*Dr Zoran NIKOLIĆ dipl.inž.el,*

*Gordana POČUČA dipl.inž.el.*

***BRODSKE ELEKTRIČNE***  
***MAŠINE I UREĐAJI***

---

Beograd, 2003.



- Autori Dr. Zoran NIKOLIĆ, dipl.inž, viši naučni saradnik  
Gordana POČUČA, dipl.inž
- Naslov **BRODSKE ELEKTRIČNE MAŠINE I  
UREDAJI**
- Recenzenti Prof. Petar MILJANIĆ, dipl.inž, redovan član SANU  
Prof. Branislav BILEN, dipl.inž, redovan član IAJ
- Štampanje  
odobrio Upravni odbor Instituta tehničkih nauka SANU
- Izdavač Institut tehničkih nauka SANU  
Knez Mihailova 35/IV  
P.O. Box 315, 11.000 Beograd  
Telefon: 011-636-994; Fax: 011-185-263  
E.mail: brod@itn.sanu.ac.yu
- Tehnički urednik Predrag DAKIĆ, inž.maš.
- ISBN broj 86-80321-06-0
- CIP broj 629.5.035:621.313/314
- Zahvalnost Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i  
tehnologije Srbije koje je finansijski podržalo  
izdavanje ove monografije
- Štampa Štamparija "Čigoja"  
Studentski trg 15, 11000 Beograd  
Telefon: 011- 186-725
- Tiraž 300 primeraka

## PREDGOVOR

*Početak primene električne energije na plovnim objektima vezan je za sam početak primene električne energije. Treba imati u vidu da je prvi praktično primenjeni elektromotor pokretao upravo jedan čamac na reci Nevi pre oko 160 godina. Šira primena električne energije na brodovima započeta je osamdesetih godina prošlog veka. Električni pogoni najvećih brodova, snagama više desetina MW, bili su prisutni dvadesetih godina ovog veka. Na podmornicama je od postanka do danas električni pogon nezaobilazan. Savremeni brodovi se danas ne mogu zamisliti bez izuzetno jakog i žilavog sistema proizvodnje kao i upotrebe električne energije. Zbog niza prednosti, i danas se najluksuzniji putnički brodovi prave sa električnim pogonom tako da na njima postoje brodske električne centrale velikih snaga.*

*Izlaganje je započeto sa specifičnostima koje se javljaju u brodogradnji i radi čega je potrebno konstruisati električne uređaje u skladu sa proverenim u praksi propisima nacionalnih institucija. Prvo poglavlje obrađuje transformatore kao najjednostavnije i najraširenije električne uređaje. Osim toga, to je solidna osnova za razumevanje obrtnih jednosmernih i naizmjeničnih mašina koje su posle toga objašnjene. Velika pažnja posvećena je regulisanju jednosmernih i naizmjeničnih mašina, koje je doneo savremeni razvoj energetske elektronike. Detaljnije su objašnjeni energetske pretvarači kao što su ispravljači, čoperi, invertori i ciklokonvertori. Posle toga, data je detaljna analiza električnog pogona prolelera kao vitalnog uređaja za pogon broda kao i podmornice. Na kraju su objašnjeni i neki novi električni uređaji kao što su aktivna katodna zaštita i MHD propulzija.*

*Ova knjiga namenjena je prvenstveno studentima Vojno tehničke akademije i ima cilj da im pomogne u efikasnijem proučavanju brodskih električnih mašina i uređaja kako bi ih u praksi optimalno koristili i održavali. Pored toga, može pomoći brodograditeljima pri rešavanju praktičnih problema prilikom projektovanja brodova. U knjizi su uglavnom sabrana predavanja iz predmeta Brodske električne mašine i uređaji koje smo držali u periodu 1991–2003. godine.*

*Namena ove knjige je da objasni osnovne principe rada energetskih električnih mašina i savremenih uređaja koji služe za njihovu regulaciju brzine obrtanja. Pored toga, služi da objasni i praktičnu primenu energetskih električnih mašina u brodogradnji.*

*Duboku zahvalnost izražavamo recenzentima, profesoru Petru Miljaniću, redovnom članu SANU i profesoru Branislavu Bilenu redovnom članu IAJ, na svesrdnoj dobronamernoj pomoći u završnoj fazi pravljenja ove knjige. Autori zahvaljuju profesorima Vojnotehničke akademije koji su inicirali i podržali izdavanje ove knjige, a posebno pukovniku Radoslavu Nikoliću. Duboko zahvaljujemo prof. Zoranu Stojiljkoviću i saradnicima Laboratorije za energetske pretvarače Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, saradnicima Instituta tehničkih nauka SANU i ekspertu Jugoslovenskog registra brodova Aleksandru Stanojeviću, dipl.inž. Pri izradi knjige sve crteže napravio je kolega Predrag Dakić, maš. ing. bez čijeg velikog truda ova knjiga ne bi mogla da se nade pred Vama na čemu smo mu jako zahvalni.*

*Autori*

## SADRŽAJ:

01.	SPECIFIČNOSTI I KARAKTERISTIKE	ELEKTRIČNE	
	OPREME RADI PRIMENE NA PLOVNIM OBJEKATIMA		1
01.01.	<i>Uticaj okoline</i>		2
01.02.	<i>Klasifikacione ustanove</i>		3
01.03.	<i>Autonomnost i veličina električnog sistema</i>		4
01.04.	<i>Uticajni faktori</i>		5
01.05.	<i>Tehničke karakteristike plovnih objekata</i>		6
01.06.	<i>Pravila Jugoslovenskog registra brodova</i>		7
01.07.	<i>Literatura</i>		9
02.	TRANSFORMATORI		11
02.01.	<i>Osnovne jednačine za magnetsko kolo</i>		11
02.02.	<i>Princip rada transformatora</i>		14
02.03.	<i>Idealan transformator</i>		16
02.04.	<i>Efektivna vrednost sekundarnog napona transformatora</i>		17
02.05.	<i>Vektorski dijagrami opterećenog i neopterećenog transformatora</i>		18
02.06.	<i>Stepen iskorišćenja transformatora</i>		20
02.07.	<i>Autotransformator</i>		22
02.08.	<i>Merni transformatori</i>		22
02.09.	<i>Trofazni transformatori i sprezanje</i>		24
02.10.	<i>Dalji razvoj transformatora</i>		26
02.11.	<i>Pravila Jugoslovenskog registra brodova za transformatore</i>		27
02.12.	<i>Literatura</i>		28
03.	SINHRONE MAŠINE		29
03.01.	<i>Princip dobijanja naizmjeničnog napona</i>		29
03.02.	<i>Princip rada trofaznog sinhronog broskog generatora</i>		31
03.03.	<i>Naponske jednačine i dijagrami</i>		33
03.04.	<i>Osnovni delovi sinhronih generatora</i>		34
03.05.	<i>Sinhronizacija brodskih generatora</i>		36
03.06.	<i>Paralelan rad sinhronih brodskih generatora</i>		37
03.07.	<i>Automatsko upućivanje sinhronih generatora u rad</i>		38
03.08.	<i>Sinhroni motori</i>		39
03.09.	<i>Sinhroni motori sa permanentnim magnetima</i>		40

03.10.	<i>Pravila JR brodova za sinhronne generatore</i>	41
03.11.	<i>Literatura</i>	42
04.	ASINHRONE MAŠINE	44
04.01.	<i>Teslino obrtno magnetsko polje</i>	44
04.02.	<i>Princip rada trofaznog asinhronog motora</i>	46
04.03.	<i>Gubici snage i stepen iskorišćenja asinhronog motora</i>	48
04.04.	<i>Motor sa kratkospojenim i namotanim rotorom</i>	50
04.05.	<i>Puštanje u rad asinhronih motora sa namotanim rotorom</i>	50
04.06.	<i>Puštanje u rad motora sa kratkospojenim rotorom</i>	51
04.07.	<i>Puštanje u rad jednofaznih asinhronih motora ( kondenzatorski motori )</i>	55
04.08.	<i>Regulacija brzine asinhronih motora</i>	56
04.09.	<i>Pravila Jugoslovenskog registra brodova za asinhronne mašine</i>	59
04.10.	<i>Literatura</i>	60
05.	JEDNOSMERNE MAŠINE	61
05.01.	<i>Princip rada mašina za jednosmernu struju</i>	61
05.02.	<i>Magnetska reakcija indukta</i>	63
05.03.	<i>Komutacija</i>	65
05.04.	<i>Vrste pobude i označavanje krajeva jednosmernih mašina</i>	66
05.05.	<i>Mašine jednosmerne struje sa rednom pobudom</i>	67
05.06.	<i>Mašine jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom</i>	69
05.07.	<i>Mašine jednosmerne struje sa paralelnom (otočnom) pobudom</i>	72
05.08.	<i>Mašine jednosmerne struje sa složenom pobudom</i>	73
05.09.	<i>Dalji razvoj električnih mašina za jednosmernu struju</i>	75
05.10.	<i>Pravila Jugoslovenskog registra brodova za jednosmerne mašine</i>	75
05.11.	<i>Literatura</i>	77
06.	IZBOR I ZAŠTITA MOTORA ZA BRODSKE ELEKTROMOTORNE POGONE (BEMP)	78
06.01.	<i>Osnovni pojmovi i osobine BEMP – a</i>	78
06.02.	<i>Zagrevanje električnih mašina</i>	80
06.03.	<i>Vrste tipičnih opterećenja</i>	83
06.04.	<i>Uticaj okoline na izbor motora i zaštita elektromotornog pogona</i>	84
06.05.	<i>Zaštita od preopterećenja</i>	85
06.06.	<i>Mehanička zaštita električnih uređaja</i>	87
06.07.	<i>Pravila Jugoslovenskog registra za elektromotorne pogone</i>	89
06.08.	<i>Literatura</i>	91
07.	STATIČKA I DINAMIČKA STANJA BEMP – a	92
07.01.	<i>Uvod</i>	92
07.02.	<i>Mehanička karakteristika radnih mehanizama</i>	93
07.03.	<i>Mehaničke karakteristike jednosmernih mašina</i>	93

07.04.	<i>Mehaničke karakteristike naizmeničnih mašina</i>	94
07.05.	<i>Statička stabilnost</i>	95
07.06.	<i>Određivanje snage mašine kod BEMP - a u trajnom radu</i>	96
07.07.	<i>Dinamička stabilnost</i>	97
07.08.	<i>Pravila Jugoslovenskog registra brodova</i>	98
07.09.	<i>Literatura</i>	98
08.	<b>ENERGETSKI PRETVARAČI</b>	100
08.01.	<i>Podcla energetskih pretvarača</i>	100
08.02.	<i>Osnovni pojmovi o komponentama energetske elektronike</i>	100
08.03.	<i>Princip rada tiristora</i>	101
08.04.	<i>Podešavači naizmeničnog napona</i>	104
08.05.	<i>Srednje vrednosti napona za različite talasne oblike</i>	109
08.06.	<i>Komutacija</i>	110
08.07.	<i>Dalji razvoj energetske elektronike</i>	112
08.08.	<i>Pravila Jugoslovenskog registra brodova</i>	113
08.09.	<i>Literatura</i>	114
09.	<b>ISPRAVLJAČI (AC/DC pretvarači)</b>	115
09.01.	<i>Monofazni ispravljač sa transformatorom sa srednjom tačkom</i>	115
09.02.	<i>Punoupravljivi monofazni mostni ispravljač</i>	117
09.03.	<i>Poluupravljivi monofazni mostni ispravljač</i>	119
09.04.	<i>Punoupravljivi trofazni mostni ispravljač</i>	122
09.05.	<i>Poluupravljivi trofazni mostni ispravljač</i>	125
09.06.	<i>Literatura</i>	126
10.	<b>ČOPERI (DC/DC pretvarači)</b>	127
10.01.	<i>Čoper spuštač napona</i>	127
10.02.	<i>Čoper podizač napona</i>	129
10.03.	<i>Čoper sa jednim tiristorom</i>	131
10.04.	<i>Čoper sa dva tiristora</i>	134
10.05.	<i>Čoper sa tri tiristora</i>	137
10.06.	<i>Čoper za spuštanje i podizanje napona</i>	140
10.07.	<i>Dalji razvoj čopera</i>	142
10.08.	<i>Literatura</i>	143
11.	<b>INVERTORI (DC/AC pretvarači)</b>	144
11.01.	<i>Monofazni inverter sa transformatorom sa srednjom tačkom</i>	145
11.02.	<i>Monofazni mostni inverter</i>	149
11.03.	<i>Trofazni mostni inverter</i>	152
11.04.	<i>Invertori sa tranzistorima snage</i>	156
11.05.	<i>Literatura</i>	158



12.	CIKLOKONVERTORI (AC/AC pretvarači)	159
12.01.	<i>Monofazni ciklokonvertori sa transformatorom sa srednjom tačkom</i>	159
12.02.	<i>Monofazni ciklokonvertori u mostnoj sprezi</i>	161
12.03.	<i>Trofazni trofalsni ciklokonvertori</i>	165
12.04.	<i>Trofazni šestopulsni ciklokonvertori u mostnoj sprezi</i>	167
12.05.	<i>Ciklokonvertor sa komutacijom preko opterećenja</i>	167
12.06.	<i>Ciklokonvertor sa forsiranom komutacijom</i>	168
12.07.	<i>Envelopski ciklokonvertor</i>	169
12.08.	<i>Literatura</i>	170
13.	ELEKTRIČNA PROPULZIJA BRODA	171
13.01.	<i>Istorijski razvoj električne propulzije brodova</i>	171
13.02.	<i>Osnovne karakteristike električnog pogona broda</i>	173
13.03.	<i>Prekret propelera</i>	175
13.04.	<i>Vrste električne propulzije brodova</i>	177
13.05.	<i>Električna propulzija plovnih objekata</i>	179
13.06.	<i>Električni prenos snage do propelera</i>	181
13.07.	<i>Jednosmerni sistem prenosa snage</i>	186
13.08.	<i>Naizmenično jednosmerni sistem pogona propelera</i>	189
13.09.	<i>Pogon propelera trofaznom naizmeničnom strujom</i>	192
13.10.	<i>Savremeni pogoni brodova</i>	203
13.11.	<i>Savremeni koncept pogona brodova</i>	205
13.12.	<i>Prednosti dizel električnih pogona</i>	207
13.13.	<i>Savremeni pogoni ratnih brodova</i>	210
13.14.	<i>Dalji razvoj električne propulzije</i>	212
13.15.	<i>Elektromagnetske spojnice</i>	213
13.16.	<i>Pravila Jugoslovenskog registra brodova</i>	216
13.17.	<i>Literatura</i>	216
14.	ELEKTRIČNI POGONI PODMORNICA	220
14.01.	<i>Autonomni električni pogoni podmornica</i>	220
14.02.	<i>Dizel električni pogon sa direktnim prenosom snage</i>	223
14.03.	<i>Dizel električni pogon sa električnim prenosom snage na propelere</i>	224
14.04.	<i>Pogonsko postrojenje dizel električnih pogona</i>	226
14.05.	<i>Savremeni pogoni podmornica</i>	229
14.06.	<i>Električni prenos snage kod nuklearnih podmornica</i>	230
14.07.	<i>Torpeda sa električnim pogonom</i>	230
14.08.	<i>AIP – Gorivne ćelije (elektrohemijski generatori)</i>	232
14.09.	<i>Savremene podmornice</i>	234
14.10.	<i>Literatura</i>	236

15.	RAZMAGNETISANJE I KONTROLA BRODSKOG MAGNETIZMA	238
15.01.	<i>Magnetsko polje zemlje</i>	238
15.02.	<i>Magnetsko polje broda</i>	239
15.03.	<i>Merenje brodskog magnetizma</i>	240
15.04.	<i>Razmagnetisanje broda</i>	241
15.04.	<i>Literatura</i>	243
16.	AKTIVNA KATODNA I AKTIVNA VEGETATIVNA ZAŠTITA	244
16.01.	<i>Normalni električni potencijali metala</i>	244
16.02.	<i>Prirodan proces korozije i faktori koji utiču na koroziju</i>	245
16.03.	<i>Pasivna i aktivn katodna zaštita (AKZ)</i>	247
16.04.	<i>Merenje zaštitnog potencijala</i>	249
16.05.	<i>Kriterijum efikasnosti zaštite sistema aktivne katodne zaštite</i>	249
16.06.	<i>Princip rada i osnovne karakteristike aktivne vegetativne zaštite(AVZ)</i>	251
16.07.	<i>Moguće primene u brodogradnji</i>	252
16.08.	<i>Propisi klasifikacionih društava</i>	253
16.09.	<i>Literatura</i>	254
17.	MHD PROPULZIJA	256
17.01.	<i>Princip rada i osnovne karakteristike</i>	256
17.02.	<i>Korisna električna snaga i stepen iskorišćenja</i>	258
17.03.	<i>Istraživanja u oblasti MHD propulzije</i>	259
17.04.	<i>Literatura</i>	260

# ***01. SPECIFIČNOSTI ELEKTRIČNE OPREME RADI PRIMENE NA PLOVNIM OBJEKTIMA***

Razvojem savremene brodogradnje, električni uređaji su postali izuzetno važni delovi svakog broda: trgovačkog, teretnog, putničkog, specijalnog, a posebno vojnog. Osnovne prednosti električnih uređaja i sistema, u odnosu na druge vrste uređaja, proizilaze iz činjenice da se električna energija jednostavno dobija, prenosi i pretvara u druge oblike energije. Električne uređaje je moguće jednostavno koristiti i automatski regulisati. Pored toga, mnogi uređaji funkcionišu samo ako se napajaju iz izvora električne energije. Brodska električna oprema primenjuje se na brodovima kao i na svim plovnim objektima, što je znatno širi pojam od broda. U plovne objekte, osim brodova za prevoz putnika i robe, spadaju ratni brodovi, objekti tzv. "morske tehnologije", kao i plovnii dokovi.

Ratni brodovi imaju određenih specifičnosti u odnosu na ostale plovne objekte. Jugoslovenski ratni brod je brod pod zapovedništvom oficira oružanih snaga SRJ, čija je posada vojna, i koji je dužan da vije spoljne znakove raspoznavanja ratnih brodova jugoslovenske državne pripadnosti, kad god je potrebno da svoja svojstva učini poznatim. Ratni ili vojni brodovi snabdeveni su električnim i elektronskim uređajima bez kojih se puna efikasnost plovnih objekata ne bi mogla ispoljiti. Od ovih električnih uređaja traži se visoka pouzdanost i izdržljivost a često i automatski rad.

Problemi projektovanja i izrade brodske električne centrale i električnog razvoda su znatno složeniji nego na kopnenim električnim centralama. Problemi vezani sa efikasnošću, ekonomijom i cenom su isti u oba slučaja. Brodogradevisnski inženjeri imaju dodatne probleme vezane sa ograničenjem mase opreme i prostora a koji su manje izraženi u primenama na kopnu. Stepenn mehaničke zaštite mašina postavlja dodatna ograničenja.

Za brze brodove, kao što su putnički i ratni, vitalno je da radi smanjenja otpora broda, i deplasman broda bude što je moguće manji, a to znači i da mase električne opreme budu najmanje moguće.

U odnosu na slične kopnene uređaje i naprave, brodski električni uređaji i sistemi na plovnim objektima imaju izvesne specifičnosti. Te specifičnosti proizilaze iz

uslova okoline, propisa klasifikacionih ustanova, autonomnosti i veličine električnih sistema, i mnogih drugih uticajnih faktora.

### 01.01. Uticaj okoline

Klimatske prilike se, naročito na palubi, znatno menjaju u zavisnosti od godišnjeg doba i geografskog područja. Temperatura ambijenta može biti dosta visoka u mašinskom prostoru ali na palubi može biti i ekstremno niska. Zbog toga se propisuje kao normalna temperatura u mašinskom prostoru  $+40^{\circ}C$  za rečne, a  $+45^{\circ}C$  za morske brodove. Za električnu opremu na palubi propisuje se i minimalna radna temperatura od  $-25^{\circ}C$ .

Relativna vlažnost vazduha na brodu može imati visoke vrednosti, pri čemu na palubi može biti znatno viša nego u unutrašnjosti broda. Električni uređaji koji se nalaze na palubi, moraju korektno raditi pri relativnoj vlažnosti vazduha od 95%, u a oni koji se nalaze u unutrašnjosti broda do 70%. Na palubi, neki električni uređaji mogu biti i preplavljivani, a neki čak i uronjeni u vodi. Ako se brod ili plovni objekat nalazi na moru, mora se uzeti u obzir činjenica na se u  $1 m^3$  vazduha nalazi i do 5 mg morske soli. A ako se električni uređaji nalaze u blizini dizel motora, mora se računati sa činjenicom da vazduh može sadržati i do  $20 mg / m^3$  motornog ulja.

Vibracije na brodovima su poseban problem, kao i šokovi na ratnim brodovima usled eventualnih eksplozija.

Električni uređaji moraju pouzdano raditi kada su plovni objekti nagnuti uzdužno, poprečno kao i kada postoji veliko bočno ljuljanje, a što je definisano postojećim propisima. Električni uređaji treba sigurno da rade pri trajnom bočnom nagibu broda od  $15^{\circ}$  i uzdužnom nagibu od  $5^{\circ}$  na rekama. Na moru se postavlja strožiji zahtev za uzdužni nagib od  $10^{\circ}$  kao i dodatni za bočno ljuljanje broda do  $22,5^{\circ}$ . Električna oprema kao i uređaji koji se ugrađuju na podmornice, moraju besprekorno raditi i kod kratkotrajnih (do 3min) uzdužnih nagiba do  $30^{\circ}$ .

Zbog toga se za rečne brodove određuje oblast ili područje plovidbe. Područje plovidbe za unutrašnje vode je, po definiciji, područje određeno u zavisnosti od najvećih uočenih talasa, pri čemu visina uočenih talasa znači aritmetičku sredinu najviših talasa merenih između brega i dola talasa, a čiji broj iznosi 10% ukupnog broja talasa izmerenih u određenim vremenskim periodima. Uobičajena podela na područja plovidbe deli se na:

- Područje plovidbe 1 - sa visinama talasa do 2,0m
- Područje plovidbe 2 - sa visinama talasa do 1,2m

- Područje plovidbe 3 - sa visinama talasa do 0,8m

Pred vojne (ratne) brodove postavljaju se daleko strožiji uslovi nego za komercijalne brodove. Od nekih električnih uređaja zahteva se pouzdan rad i pod vodom.

## 01.02. Klasifikacione ustanove

Osnovna namena klasifikacionih ustanova je izdavanje tehničkih pravila i utvrđivanje sposobnosti za plovidbu i klasifikaciju plovih objekata.

Poznatija klasifikaciona društva su: Lloyd's Register of Shipping - Velika Britanija, American Bureau of Shipping - USA, Bureau Veritas - Francuska, Germanischer Lloyd - Nemačka, Det Norske Veritas - Norveška, Ruski Registar - ZND, Jugoslovenski registar brodova -JR. Pored toga, često se zahteva da se električna oprema gradi u skladu sa internacionalnim propisima, npr. IEC[01], ili propisima za električne uređaje koji se primenjuju na kopnu, kao što su IEC.

Našim [02], a i stranim standardima propisani su uslovi rada za električne uređaje i opremu na brodu. Električni uređaji moraju biti proračunati na trajan i siguran rad u sledećim uslovima:

Nazivna temperatura van broskog mašinskog prostora iznosi  $+20^{\circ}\text{C}$ . Nominalna temperatura ambijenta u mašinskom broskom prostoru iznosi  $+45^{\circ}\text{C}$ . Za normalno niske temperature kod opreme namenjene za rad pri niskim temperaturama uzima se  $-20^{\circ}\text{C}$ . Brodski električni uređaji treba sigurno da rade u uslovima relativne vlažnosti okolnog vazduha  $80 \pm 3\%$  pri temperaturi  $-40 \pm 2^{\circ}\text{C}$  odnosno relativne vlažnosti vazduha  $92 \pm 3\%$  pri temperaturi  $-25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Za proračun trajnog rada računa se sa vlažnošću  $80 \pm 3\%$  pri temperaturi  $+40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Električni uređaji treba sigurno da rade pri vibracijama učestanosti od 5 do  $30\text{ Hz}$ , sa amplitudom od 1mm za učestanosti od 5 -  $8\text{ Hz}$  kao i za ubrzanja od 0,5 g za učestanosti od 8 do  $30\text{ Hz}$ . Električni uređaji treba sigurno da rade pri udarima sa ubrzanjem od 3 g pri učestanosti od 40 do 80 udara u minuti.

Interesantno je navesti da je prema statistici klasifikacionog društva Det Norske Veritas [03], samo zbog striktnog pridržavanja propisa o gradnji brodova, do 1993 godine postignuto da se broj nesreća u brodarstvu po 1.000 obavljenih poslova smanjio od 0,5% na samo 0,3%. Prema istom izvoru, može se istaći da je brodarstvo, sa rizikom na poslovima od samo 0,3%, znatno bezbednije od

železničkog transporta sa rizikom od 0,41% ili u avijaciji sa rizikom od oko 0,65%.

### 01.03. Autonomnost i veličina električnog sistema

Autonomnost električnog sistema je sposobnost rada nezavisno od drugih sistema. To podrazumeva da električni uređaji na brodu moraju imati i povećanu pouzdanost što u izvesnoj meri utiče na investicione i eksploatacione troškove.

Veličina električnog sistema je ukupnost instalisanih snaga. Kod tzv. "malih sistema" postoje veće oscilacije napona i frekvencije. Zato se u takvim sistemima mora voditi računa o međusobnim uticajima potrošača.

Zbog toga što se koriste uglavnom u slabim, autonomnim mrežama, brodski električni uređaji moraju raditi ispravno kod odstupanja od nazivnih veličina napona i frekvencije navedenih u tabeli 01.

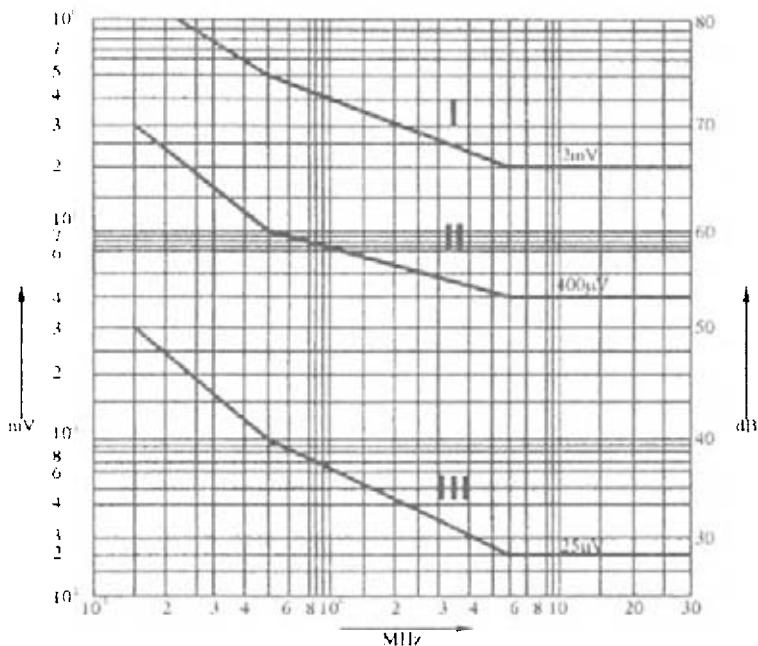
Tabela 01. Dozvoljena odstupanje napona i frekvencije od nazivnih veličina

	Dugotrajno	Kratkotrajno 1,5s	Kratkotrajno 5s
Napon (V)	+6% - 10%	+15% - 30%	
Frekvencija (Hz)	±5%		10% - 10%

Dozvoljeni nivo buke treba da odgovara nacionalnim propisima i propisima ISO.

Ako smetnje izazvane električnim uređajima mogu da se prostiru van broda ili da prodru u mrežu napajanja radiouređaja, te električne uređaje opremiti zaštitnim sredstvima koja umanjuju napon smetnji na njihovim stezaljkama do nivoa datim na dijagramu na slici 01. Pri konstrukciji električnih uređaja treba, prema potrebi, preduzeti mere za smanjenje radio smetnji. Ovo se ne odnosi na smetnje koji se javljaju rede, jednom na čas u trajanju od 2s ili do pet na čas u trajanju ne više od 20ms.

Uслед niza električnih uređaja na brodovima, a posebno jako osetljive elektronike potrebne za regulaciju i nadgledanje radnih parametara pogonskih uređaja, problemu smetnji u naponu napajanja potebno je pokloniti sve veću pažnju [04]. Radi napajanja posebno osetljivih potrošača, do nedavno su pravljani obrtni transformatori (spoj sinhronog motora i generatora) koji su napajali ove potrošače, ali se sve više koriste harmonijski filtri za eliminisanje smetnji.



Slika 1. Nivo dozvoljenog napona smetnji kod uređaja koji se nalaze:  
 I - ispod glavne palube, II-iznad glavne palube, III-na palubi kormilarnice

#### 01.04. Uticajni faktori

Na osnivanje električnog sistema plovnog objekta veliki uticaj imaju tehničko tehnološke specifičnosti. Iz tih specifičnosti proizilaze i uticajni faktori [05], koji predstavljaju ulazne i izlazne veličine električnog sistema bez kojih je najčešće nemoguće doći do kvalitetnog električnog sistema.

Ulazni uticajni faktori su:

- tehničke karakteristike objekta. To je prvenstveno vrsta plovnog objekta i namena za koju se gradi, jer se pravila za gradnju brodova mogu dosta razlikovati pri gradnji komercijalnih, putničkih, teretnih i ratnih, a posebno ako se prave za morske i rečne uslove.
- potrošači električne energije. Napajanje sa električne mreže može služiti za pogon manje važnih potrošača ili vitalnih za pogon broda, kao što je pogon propelera ili kormilarski uređaj. Kvalitet i pouzdanost električnog izvora i električne opreme koja služi za pogon uređaja vitalnih za rad broda moraju biti visoki.
- karakteristike elektromotornih pogona. Elektromotori mogu biti za jednosmernu struju ili naizmeničnu, a mogu se puštati u rad direktno ili preko

određenih upuštačkih uređaja. Uređaji za puštanje u rad mogu uticati na smanjenje polaznih struja a time i na veličinu izvora električne energije.

- maksimalna snaga u nekom od režima rada broda. Postoje nekoliko osnovnih režima rada broda kao što su plovidba, manevar, sidrenje i lučki režim. Za svaki od njih se prilikom izrade bilansa električne energije određuje najnepovoljniji slučaj koji bi se u praksi mogao dogoditi i na osnovu toga se određuje snaga i broj izvora električne energije.

Izlazni uticajni faktori su:

- kvalitet parametara električne mreže. Zависи od opreme, jer neka oprema trpi veće varijacije parametara električne mreže, kao što su napon i frekvencija, a neka manje.
- kontinuitet napajanja električnom energijom. Zависи od namene plovnog objekta. Kod nekih brodova dozvoljeno je kraće vreme ispada brodske centrale iz pogona (nekoliko desetina sekundi), a na nekim brodovima postoje uređaji koji zahtevaju neprekidno napajanje.
- pouzdanost i raspoloživost električnog sistema. Direktно zависи od investicione cene. Poznato je pravilo da su upravo zbog pouzdanosti i šireg opsega rada komponente i uređaji namenjeni vojnoj primeni znatno skuplji od komercijalnih i industrijskih.
- eksploatacioni zahtevi. Posebni zahtevi smanjenog održavanja uslovljavaju znatno višu cenu.

### **01.05. Tehničke karakteristike plovnih objekata**

Trgovački brodovi se u funkciji namene i veličine grade sa različitim snagama električnih generatora a to je opet u funkciji upotrebljenih potrošača. Morski brodovi imaju ukupnu snagu generatora veličine od 1-10MW [06] a rečni 10-500kW [07 - 08]. Plovni dokovi takode spadaju u male autonomne sisteme sa sopstvenim izvorima električne energije.

Svaki vojni brod gradi se prema taktičko tehničkim zahtevima (TTZ) a predstavlja kompleksnu opremu raznih grana tehnike (na nekim ratnim brodovima cena električnih uređaja dostiže i do 60% cene broda).

Pored svih nabrojanih uslova za plovne objekte, ratni brodovi moraju izdržati i posebne šokove od eksplozija tako da i električna oprema mora biti dodatno proverena. Upravo radi ovih efekata, a radi primene na ratnim brodovima, postoje i posebna pravila za ispitivanje električne opreme koja treba u njih da se ugradi. Pored toga, i samo izvođenje električne mreže po brodu obavlja se sa tzv. prstenastom ili radijalnom spojom mrežom, kako bi se postigla veća pouzdanost sistema u napajanju potrošača.



## 01.06. Pravila Jugoslovenskog registra brodova

U našoj zemlji, klasifikaciju brodova obavlja Jugoslovenski registar brodova (Jugoregistar), osnovan još 1949 godine. Osnovni zadatak Jugoregistra [02], je da donosi tehnička pravila kojima se propisuju elementi konstrukcije, plovidbena svojstva plovnog objekta, uređaja i opreme broda koji služe održavanju sigurnosti na moru i unutrašnjim vodama. Pored toga, Jugoregistar obavlja tehnički nadzor, utvrđuje sposobnost za plovidbu i izdaje brodska svedočanstva i isprave propisane međunarodnim sporazumima i nacionalnim propisima. Kada se brodovi prave za Ratnu mornaricu, potrebno je pridržavati se i posebnih pravila i standarda Ratne mornarice [09 - 12].

Jugoslovenski registar brodova zahteva nadzor nad sledećom dokumentacijom: tehnički opis, bilans električne energije, proračun struje kratkog spoja, jednopolna shema, kablovske trase, dispozicija električnih uređaja, dispozicija uređaja signalizacije i alarma.

Nadzoru podležu sledeći uređaji i sistemi: električni uređaj propulzije, izvor električne energije, transformatori, električni pogoni, rasveta (posebno u nuždi), signalna i navigacijska svetla, signalizacija opšte uzbune, kablovska mreža, uzemljenje trupa broda, gromobranski uređaj.

Dozvoljena temperatura zagrevanja električne mašine pri radu definisana je prema vrsti izolacije i takvi podaci dati su u tabeli 02.

Tabela 02. Dozvoljena temperatura zagrevanja  
za trajan rad u funkciji klase izolacije

Klasa izolacije	E	B	F	H	C
Dozvoljena temperatura (°C)	120	130	155	180	> 180

Zaštita od korozije prouzrokovane delovanjem morske atmosfere ostvaruje se površinskom zaštitom i to:

- lakovanjem i bojenjem
- oksidnom zaštitnom prevlakom i naknadnim lakovanjem i bojenjem
- metalizovanjem, pri čemu preko metalne prevlake može doći i sloj boje ili laka.

Električni otpor izolacije ne sme biti niži od vrednosti navedenih u tabeli 03.

Sva metalna kućišta uređaja koji rade sa naponom većim od 48 V moraju imati klemu za uzemljenje označenu znakom. Stepem mehaničke zaštite električnih

uređaja od dodira delova pod naponom kao i od stepena zaštite električnih uređaja od prodora vode definisani su posebnim standardom.

Tabela 03. Minimalne vrednosti otpora izolacije električnih uređaja

Otpor električnog uređaja	Otpor izolacije ( $M\Omega$ ) u hladnom stanju	Otpor izolacije ( $M\Omega$ ) u toplom stanju
Električne mašine	5	2
Transformatori	5	2
Razvodne table	1	
Uređaji za puštanje	5	

Za optičku signalizaciju koriste se boje prikazane u tabeli 04.

Svaki električni uređaj ili deo uređaja mora imati na sebi sledeće oznake:

- nazivne električne veličine: napon izražen u (V), struja izražena u (A) i snagu u (W) ili (VA)
- oznaku tipa
- naziv ili oznaku proizvođača

ostale oznake propisane su standardom za dotični električni uređaj.

Kada se napravi neki uređaj, vrše se ispitivanja. Postoje dve vrste ispitivanja brodskih električnih uređaja na osnovu čega se dobijaju pojedinačni ili tipski atesti.

Tabela 04. Preporučene boje za optičku signalizaciju

Boja	Značenje	Primena
Crvena	Opasnost	Znak za uzbunu kada je potrebna hitna intervencija i ukazuje na opasno stanje koje treba otkloniti
Žuta	Pažnja	Znak za nenormalno stanje koje ne zahteva hitnu intervenciju (nije opasno za sigurnost)
Zelena	Sigurnost	Znak za normalni režim rada i delovanja
Plava	Informacija	Znak za spremnost ulaska u pogon
Bela	Opšta informacija	Za neophodnu rasvetu, dopunske signale

Tipska ispitivanja su ona koja se vrše na prototipovima ili pri izmenama konstrukcije, materijala ili tehnološkog procesa i svrha im je proveravanje svojstava koja se zahtevaju za primenu na brodu. Obuhvataju:

- pregled i proveru izvođenja prema tehničkoj dokumentaciji
- proveru i ispitivanje funkcionalnosti (delovanja)

- ispitivanje izolacije
- ispitivanje sigurnosti trajnog rada
- ispitivanje otpornosti na brodske klima i mehaničke uslove
- proverau stepana mehaničke zaštite

Prigledna ispitivanja se vrše nakon preuzimanja pojedinih uređaja. Električni uređaji koji se spajaju u agregat, moraju se nakon spajanja ispitati u fabrici koja vrši agregatiranje u prisustvu predstavnika klasifikacionog društva.

Pored ovih ispitivanja, potrebno je vršiti periodične preglede i atestiranje električnih mašina i uređaja. Ovi pregledi i atestiranja propisani su od strane klasifikacione ustanove.

Podrazumeva se da je proizvođač dužan da uz sve električne uređaje isporuči komplet rezervnih delova po pravilima registra i sopstvenoj preporuci proizvođača. Pored toga, svi električni uređaji moraju imati instrukcionu knjigu za montažu i održavanje kao i knjigu rezervnih delova.

#### 01.07. Literatura

01. EEC, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovnim putevima, OUN, Njujork, 1993.
02. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe, Knjiga 2, Električni uređaji, deo 9, Beograd, 1994.
03. Det Norske Veritas, Occupational Risk In The Transport Industries, DNV
04. Forum No. 3, 1993, 4-6.
05. Bourguet S., Guerin P., Doeuff R.L., Non characteristic harmonic generated by frequency converters, Proceedings of AES 2003, Edinburgh, 2003, 257-266.
06. Vlahinić I., Električni sistemi plovnih objekata, Fakultet za pomorstvo i saobraćaj, Rijeka, 1988.
07. Nikolić Z., Medved J., Medved B., Električni uređaji i oprema velikih brodova, Zbornik radova skupa "Intenziviranje razvoja brodogradnje u SR Jugoslaviji", Beograd, 1995, 179-185.
08. Nikolić Z., Electric Equipment of Hybrid Push Boat, Proceedings of conference "New concept for river pushing technology", Lohr, Germany, 1998, 4.1- 4.9
09. Bilen B., Projektovanje potiskivačkih sastava II, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd, 1997, 125-157.
10. SSNO, Brodska električna oprema, Standard Ratne mornarice RM 884, Beograd, 1973.
11. SSNO. Brodski električni strojevi, Standard Ratne mornarice RM 885, Beograd, 1973.

12. SSNO, Mehanička zaštita delova električnih uredaja, Standard Ratne mornarice RM 775, Beograd, 1972.
13. SSNO, Mehanička zaštita delova električnih uredaja, Standard Ratne mornarice RM 777, Beograd, 1973.

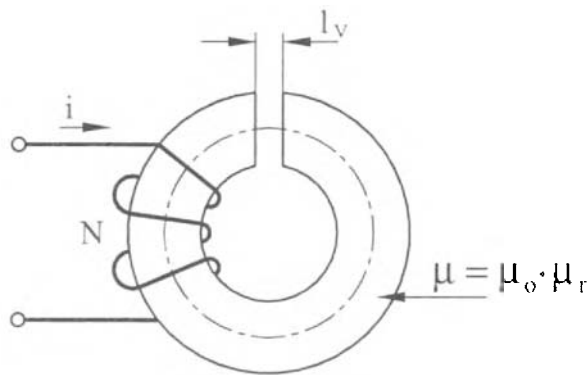
## 02. TRANSFORMATORI

Transformatori su uređaji koji naizmenični napon jednog naponskog nivoa pretvaraju u drugi naponski nivo bez promene učestanosti. Mogu se klasifikovati i kao AC/AC pretvarači stalne frekvencije. Poseduju primarnu i sekundarnu stranu. Primar je priključen na naizmenični izvor električne energije a sekundarna strana napaja električnom energijom potrošače. Na brodovima se transformatori koriste radi efikasnijeg prenosa električne energije, efikasnijeg korišćenja, prilagodavanja napona, radi galvanskog odvajanja, itd. Transformatori su poznati još i kao električni uređaji sa najvišim stepenom iskorišćenja. Teorija transformatora proučena je detaljno, tako da je pri pisanju ovog poglavlja korišćena poznata literatura [01 - 03].

### 02.01. Osnovne jednačine za magnetsko kolo

Posmatračemo magnetsko kolo prikazano na slici 2. Kada se namotaj priključi na naizmenični napon trenutne vrednosti  $u$  uspostavlja se struja  $i$ . Usled ove struje javlja se magnetsko polje čija se jačina može odrediti na osnovu Amperovog zakona:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot i \quad (2.01)$$



Slika 2. Zatvoreno magnetsko kolo

gde je  $\vec{H}$  vektor jačine magnetskog polja,  $\vec{l}$  vektor dužine magnetskog kola, po sredini magnetskog kola,  $N$  broj navojaka namota a  $i$  je struja koja protiče kroz namotaj. Proizvod  $N \cdot i$  naziva se i magnetopobudna sila.

Za slučaj magnetskog kola sa vazдушnim procepom, jednačina (01) može se napisati u obliku

$$\int_0^{l_{Fe}} \vec{H}_{Fe} \cdot d\vec{l}_{Fe} + \int_0^{l_v} \vec{H}_v \cdot d\vec{l}_v = N \cdot i$$

gde su  $H_{Fe}$  i  $H_v$  jačine magnetskog polja unutar magnetskog materijala i vazdušnog procepa a  $l_{Fe}$  i  $l_v$  su odgovarajuće dužine magnetskog polja kroz magnetski materijal i vazduh. Putanja integracije je centar torusa.

Gustina magnetskog fluksa ili magnetska indukcija  $B$  može se dobiti iz poznate jednačine:

$$B = \mu \cdot H \quad (2.02)$$

pri čemu je  $\mu$  magnetski permeabilitet sredine i može se izraziti:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2.03)$$

Permeabilitet vakuuma  $\mu_0$  je konstanta koja iznosi:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ (H / m)}$$

Relativna magnetska permeabilnost  $\mu_r$  je neimenovan broj i za feromagnetne materijale može iznositi nekoliko hiljada. Relativna magnetska permeabilnost vazduha je približno ista kao i skoro svih nemagnetskih materijala i iznosi 1.

Magnetski fluks koji se uspostavlja kroz magnetsko kolo je konstantan i može se izraziti:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot ds = B_{Fe} \cdot S_{Fe} = B_v \cdot S_v \quad (2.04)$$

pri čemu je  $\vec{n}$  jedinični vektor normale na datu površinu,  $B_{fc}$  i  $B_i$  su gustine magnetskih flukseva u gvožđu i vazdušnom zazoru a  $S_{fc}$  i  $S_i$  površine poprečnih preseka odgovarajućih sredina.

Poznato je da se u navojcima primarnog namotaja indukuje kontraelektromotorna sila ako se menja fluks koji obuhvata taj navojak. Vrednost te kontraelektromotorne sile definisana je Faradejevim zakonom:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.05)$$

gde je  $N$  broj navojaka,  $\Phi$  magnetski fluks a  $t$  vreme.

Jedinica za fluks je Veber (Wb), za vreme je sekunda (s) pa se može izvesti jedinica za elektromotornu silu volt (V). Smer elektromotorne sile je takav da se od nje proizvedeni fluks protivi promeni fluksa koji je proizveo tu indukovanu elektromotornu silu. Zbog toga postoji znak minus u izrazu (2.05). To je uočio i definisao Lenc, tako da se ovo pravilo naziva po njemu.

Koristeći jednačinu (2.04) u koju se ubacuje smena iz jednačine (2.02) a zatim i (2.01) može se izvesti da je

$$\Phi = B_{fc} \cdot S_{fc} = \mu_{fc} \cdot H_{fc} \cdot S_{fc} = \mu_{fc} \frac{N \cdot i}{l_{fc}} S_{fc}$$

Ubacujući ovu jednačinu u jednačinu (2.05) lako se izvodi da je

$$e = -\mu_{fc} \frac{N^2 \cdot S_{fc}}{l_{fc}} \cdot \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (2.06)$$

gde se  $L$  naziva sopstvena induktivnost namotaja.

Indukovana elektromotorna sila pojavljuje se kao opoziciona naponu čija je u stvari posledica. Zbog toga se naziva kontraelektromotorna.

Ukupan fluks u magnetskom kolu može se napisati u obliku

$$\Phi_1 = N \cdot \Phi + \Phi_2 \quad (2.07)$$

gde je  $N$  broj navojaka,  $\Phi$  zajednički fluks po navojku, a  $\Phi_y$  fluks rasipanja.

Drugi Kirhofov zakon primenjen na električno kolo prikazano na slici 2 može se iskazati preko naponske jednačine:

$$u - e_r - e_y - e = 0$$

U razvijenom obliku

$$u - R \cdot i - \frac{d\Phi}{dt} - e = 0 \quad (2.08)$$

Ako se ova jednačina pomnoži sa  $i \cdot dt$ , dobija se jednačina za energiju u magnetskom kolu

$$u \cdot i \cdot dt - R \cdot i^2 \cdot dt - i \cdot d\Phi - e \cdot i \cdot dt = 0 \quad (2.09)$$

Ova jednačina, u magnetskom kolu prikazanom na slici 2, izražava zakon o održanju energije.

## 02.02 Princip rada transformatora.

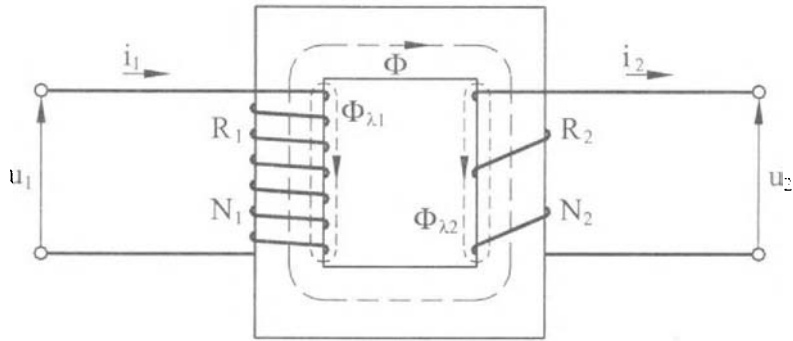
Transformator je uređaj u kojem se jednim strujnim kolom indukuje elektromotorna sila u dva strujna kola, pri čemu su oni u istom magnetskom kolu. Postoji konvencija o obeležavanju strujnih kola ili namotaja. Primarni je onaj koji se priključuje na neki naizmenični izvor električne energije a sekundarni namotaj napaja potrošače.

Ako se pretpostavi da je primarni namotaj priključen na napon trenutne vrednosti  $u_1$ , usled čega se kroz taj namotaj uspostavlja struja  $i_1$ , tada se usled ove struje javlja zajednički fluks  $\Phi$  u magnetskom kolu. U primarnom kolu ovaj fluks indukuje kontraelektromotornu silu  $e_1$  koja se može odrediti preko jednačine (2.06), a u sekundarnom namotaju pravu elektromotornu silu  $e_2$ . Vrednost sekundarne elektromotorne sile može se izraziti analogno elektromotornoj sili primara.

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\mu \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot S_{Fe}}{l_{Fe}} \frac{di_1}{dt} = -L_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (2.10)$$



gde je  $L_{12}$  međusobna induktivnost prvog i drugog namotaja pri čemu se ima u vidu da je zajednički fluks dat jednačinom (2.04):



Slika 3. Principijelna shema transformatora sa dva namotaja u magnetskom kolu

U sekundarnom kolu, elektromotorna sila  $e_2$  pojavljuje se kao prava elektromotorna sila što znači da podržava napon  $u_2$ . Elektromotorna sila je veća od napona  $u_2$  za padove napona usled omske otpornosti i rasipne induktivnosti sekundarnog namotaja.

Potpune naponske jednačine transformatora za primarno i sekundarno kolo prikazano na slici 3 glase:

$$u_1 - e_{r1} - e_{\gamma 1} - e_1 = 0 \quad (2.11)$$

$$e_2 - e_{r2} - e_{\gamma 2} - u_2 = 0 \quad (2.12)$$

Ovim jednačinama može se priključiti i treća, koja predstavlja Omov zakon za zatvoreno magnetsko kolo.

$$\Phi = \frac{M}{\Theta} = \frac{N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2}{l_{Fe} l(\mu_{Fe} \cdot S_{Fe})} \quad (2.13)$$

gde je  $M$  magnetopobudna sila a  $\Theta$  magnetski otpor koła.

U razvijenom obliku, jednačine (2.11), (2.12) i (2.13) mogu se napisati zajedno u obliku:

$$u_1 - R_1 \cdot i_1 - \frac{d\Phi_{\lambda 1}}{dt} - N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

$$N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} - \frac{d\Phi_{\lambda 2}}{dt} - R_2 \cdot i_2 = u_2 \quad (2.15)$$

$$\Phi = \frac{M}{\Theta} = \frac{N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2}{l_{Fe} / (\mu_{Fe} \cdot S_{Fe})} \quad (2.16)$$

Ove jednačine se nekada koriste u ovom obliku, a nekada se mogu koristiti u kompleksnom obliku ako je to pogodnije za predstavljanje ili za analizu.

### 02.03. Idealan transformator

Idealan transformator je onaj kod koga su termogeni otpori zanemarljivi kao i rasipne induktivnosti a magnetski permeabilitet izuzetno velik. Realan transformator se u praznom hodu ponaša kao idealan, jer je sekundarna struja jednaka nuli, kao i svi padovi napona, a u primarnom kolu su padovi napona zanemarljivi, jer kroz primar protiče jako mala struja praznog hoda.

Pretpostavke su, znači sledeće:

$$R_1, R_2 \Rightarrow 0 \quad \Phi_{\lambda 1}, \Phi_{\lambda 2} \Rightarrow 0 \quad \text{i} \quad \mu_{Fe} \Rightarrow \infty \quad (2.17)$$

Sledeće jednačine dobijaju se direktno iz prethodnih naponskih jednačina (2.14), (2.15) kao i Omove jednačine za zatvoreno magnetsko kolo (2.16) sa uprošćenjima proizašlim iz definicije idealnog transformatora (2.17). U skraćenom obliku, osnovne jednačine za idealan transformator glase:

$$u_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.18)$$

$$u_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.19)$$

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = 0 \quad \text{uzimajući u obzir} \quad \mu_{Fe} \Rightarrow \infty \quad (2.20)$$

Rešavajući jednačine (2.18) i (2.19) po  $\frac{d\Phi}{dt}$  a zatim uzimajući u obzir i jednačinu (2.20), može se dobiti jedan odnos kao važna karakteristika transformatora. Taj odnos se naziva odnos transformacije ili odnos preobražaja i može se izraziti za trenutne kao i za efektivne vrednosti napona i struje:

$$m = \frac{u_1}{u_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.21)$$

Odnos transformacije je vrlo važna karakteristika transformatora koja se kao konstruktivna karakteristika obavezno prikazuje na natpisnoj tablici.

Izraz za odnos transformacije (2.21) se može lako izvesti uz pretpostavku da je transformator idealan i da su primarna i sekundarna snaga iste, ili da je:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

odakle se lako može dobiti da je:

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

gde su  $U_1$  i  $U_2$  efektivne vrednosti napona primara i sekundara, a  $I_1$  i  $I_2$  efektivne vrednost struja primara i sekundara.

Pomoću odnosa transformacije moguće je sekundarne veličine transformatora svesti na primarnu stranu. Na primer, impedansa sekundara se može svesti na primarnu stranu pomoću odnosa transformacije na sledeći način:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{m \cdot U_2}{I_2 / m} = m^2 \cdot Z_2 \quad (2.22)$$

Ovaj postupak je dosta važan u analizama transformatora, jer se sekundarne veličine mogu svesti na primarne radi daljeg proučavanja.

#### 02.04. Efektivna vrednost sekundarnog napona transformatora

Postavlja se problem određivanja efektivne vrednosti sekundarnog napona transformatora na osnovu određenih karakterističnih parametara magnetskog kola.

Kada se primarni namotaj priključi na naizmeničan napon  $u_1$  uspostavlja se struja  $i_1$  usled čega se javlja zajednički fluks. Trenutna vrednost zajedničkog fluksa ima, kao i struja sinusan oblik, pa se može prikazati u obliku:

$$\phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$$

Elektromotorna sila sekundara ili napon sekundara u praznom hodu može se izračunati u skladu sa jednačinom (2.19).

$$u_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} = N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cos \omega t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_{Fe} \cdot N_2 \cdot B_m \cdot \cos \omega t \quad (2.23)$$

Na drugoj strani, trenutna vrednost napona se može predstaviti izrazom:

$$u_2 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos \omega t \quad (2.24)$$

Tako da se poređenjem jednačina (2.23) i (2.24) može dobiti da je efektivna vrednost sekundarnog napona

$$U = 4,44 \cdot f \cdot S_{Fe} \cdot N_2 \cdot B_m \quad (2.25)$$

Ova formula se često koristi u praksi.

## 02.05. Vektorski dijagrami opterećenog i neopterećenog transformatora

Naponske jednačine transformatora (2.14) i (2.15) prikazane preko trenutnih vrednosti, moguće je napisati u vektorskom obliku:

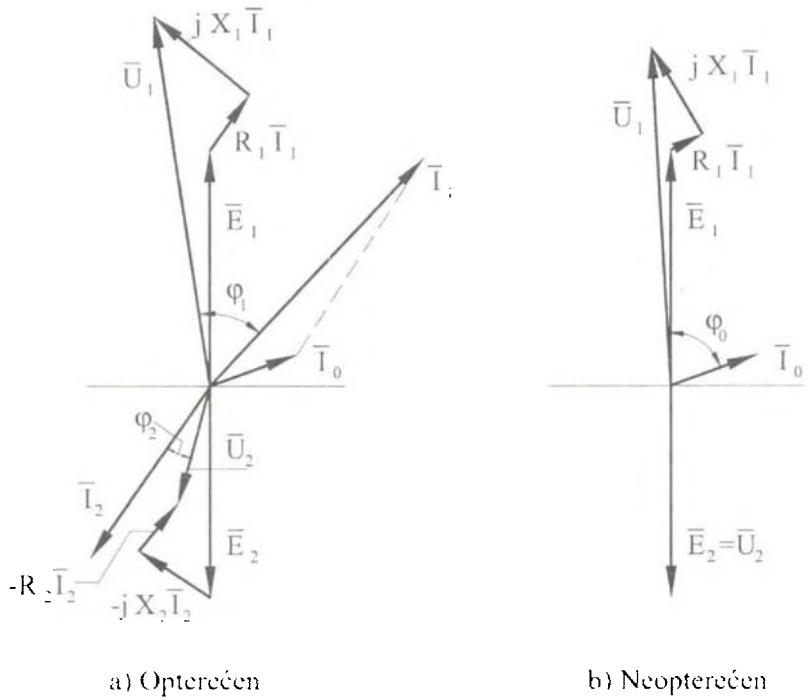
$$\vec{U}_1 = \vec{E}_1 + R_1 \cdot \vec{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \vec{I}_1 \quad (2.26)$$

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - R_2 \cdot \vec{I}_2 - j \cdot X_2 \cdot \vec{I}_2 \quad (2.27)$$

Sekundarne veličine su  $m$  puta manje ili veće od primarnih, pri čemu je  $m$  odnos transformacije. Jednačinu (2.27) možemo pomnožiti sa odnosom transformacije  $m$ . U tom slučaju dobija se jednačina slična jednačini (2.27) samo što svaki član ima oznaku prim, što znači da je svedena na primarnu stranu.

$$\vec{U}'_2 = \vec{E}'_2 - R'_2 \cdot \vec{I}'_2 - j \cdot X'_2 \cdot \vec{I}'_2$$

Da se ne bi u daljem tekstu stalno provlačilo dodatni znak, to će se ova jednačina pisati bez ovog znaka, ali će se podrazumevati da su obe jednačine svedene na isti nivo da bi se mogle upoređivati i crtati na istom dijagramu.



Slika 4. Dijagrami opterećenog i neopterećenog transformatora

Na osnovu jednačina (2.26) i (2.27) moguće je nacrtati vektorske dijagrame prikazane na slici 4. Pretpostavlja se da su sekundarne veličine svedene na primarnu stranu da bi se mogle prikazati zajedno. Dijagrami se konstruišu na taj način da se na vertikali, a u opoziciji nacrtaju elektromotorne sile primara i sekundara koje su jednake po vrednosti (jer je sekundarna svedena na primar), ali su suprotne. Oduzimajući od elektromotorne sile  $E_2$  padove napona usled omskog i induktivnog otpora, dobija se izlazni napon  $U_2$ . A ako se na elektromotornu silu  $E_1$  dodaju padovi napona, dobija se ulazni, primarni napon  $U_1$ .

Kod ertanja dijagrama opterećenog transformatora potrebno je imati u vidu da je napon  $U_1$  stalan i jednak naponu napajanja. Sve ostale elektromotorne sile kao i izlazni napon  $U_2$  menjaju se u skladu sa strujom opterećenja  $I_2$  a time i struje  $I_1$ .

Na brodovima struja opterećenja uglavnom ima induktivan karakter što znači da sekundarna a time i primarna kasni za naponom za neki ugao  $\varphi_2$  i  $\varphi_1$ . U skladu sa osnovnim zakonima elektrotehnike, pad napona na omskom otporu je u fazi sa strujom, a induktivni pad napona prednjači odgovarajućoj struji za ugao  $\pi/2$ . Potrebno je napomenuti da su dijagrami na slici 4 jako karikirani, jer u prirodi razlika između elektromotornih sila i odgovarajućih napona iznosi par procenata.

Kod neopterećenog transformatora je sekundarna struja  $I_2 = 0$  a to znači i padovi napona u tom kolu su jednaki nuli. Zato je izlazni napon jednak elektromotornoj sili  $E_2$ . Primarna struja jednaka je struji praznog hoda  $I_0$ . Padovi napona u primarnom kolu su mali tako da se primarni napon  $U_1$  i elektromotorna sila  $E_1$  malo razlikuju. Zbog svega toga je u praznom hodu sekundarni napon transformatora  $U_{20}$  viši nego pri nominalnom opteređenju.

Na osnovu dijagrama opterećenog transformatora moguće je zaključiti da sa promenom karaktera opterećenja (faktora snage  $\cos \varphi$ ) i vrednosti opterećenja transformatora, snage  $P_2$ , dolazi do promene sekundarnog napona. U slučaju kapacitivnog opterećenja ( $I_2$  prednjači naponu  $U_2$ ), moguće je da elektromotorna sila  $E_1$  bude veća od napona  $U_1$ .

## 02.06. Stepen iskorišćenja transformatora

Gubici koji nastaju u transformatoru mogu se podeliti na dve grupe i to: gubitke koji nastaju u gvožđu transformatora i gubitke koji nastaju u bakru.

Gubici u gvožđu nastaju usled histerezisa i vrtložnih struja. Stalni su pri stalnom naponu i frekvenciji i nezavisni su od opterećenja transformatora.

$$P_{fe} = k_h \cdot f \cdot B_m^2 + k_v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (2.28)$$

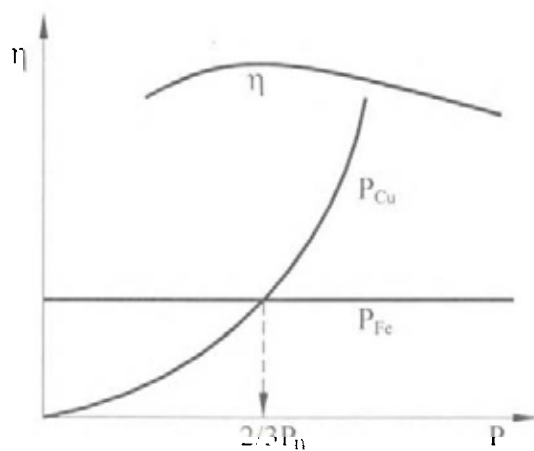
Gubici u namotajima (Džulovi gubici) zavise od kvadrata struje opterećenja u primarnom i sekundarnom kolu.

$$P_{cu} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \quad (2.29)$$

Ovi gubici u gvožđu i u bakru se na postojećim transformatorima mogu lako izmeriti u ogledima praznog hoda i kratkog spoja.

Gubici u gvožđu se mere u praznom hodu transformatora i to vatmetrom u primarnom kolu, pri čemu se zanemaruju gubici u bakru primara i sekundara. To je i logično jer je u praznom hodu  $I_2 = 0$  iz čega sledi  $P_{Cu}'' = 0$ , a pošto je primarna struja mala  $I' = I_0$  sledi da su i primarni gubici znatno manji jer zavise od kvadrata struje, pa se mogu zanemariti  $P_{Cu} \Rightarrow 0$ .

Gubici u bakru mere se u ogledu kratkog spoja transformatora pri sniženom ulaznom naponu  $e_s = 3 - 5\% U_n$ . Pri ovom naponu se u sekundarnom kolu uspostavlja nominalna struja  $I_2 = I_{2n}$ . U ovom ogledu se gubici snage u gvožđu (2.28) zanemaruju jer su napon napajanja kao i magnetska indukcija znatno manji od nominalnih vrednosti.



Slika 5. Stepen iskorišćenja transformatora

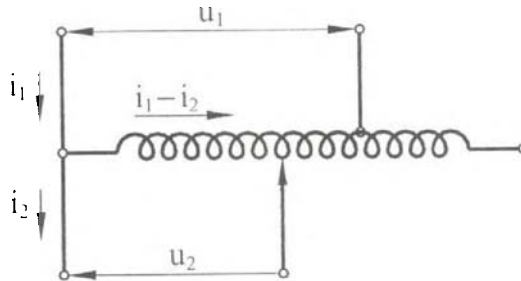
Stepen iskorišćenja transformatora može se naći kao odnos sekundarne ili korisne snage i primarne ili ukupne električne snage

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \quad (2.30)$$

Stepen iskorišćenja ima maksimum kada su gubici u bakru i gvožđu jednaki  $P_{Fe} = P_{Cu}$ , a to je praktično oko  $2/3$  nominalnog opterećenja (slika 5). Kod trofaznih transformatora koji se najčešće primenjuju u brodogradnji, snaga od 1 - 100 kVA, stepen iskorišćenja transformatora ima vrednosti u opsegu 0,94-0,98.

## 02.07. Autotransformator

Autotransformator je jednonamotni transformator koji se koristi kod malih prenosnih odnosa i kod promenljivog prenosnog odnosa. Dobra osobina ovog transformatora je da ima promenljiv ili podesiv odnos transformacije, a mana da nema galvanskog odvajanja. Pošto je relativno jednostavan uređaj, može se videti dosta često u jednostavnim punjačima akumulatorskih baterija i uređajima gde je potrebno ručno regulisati izlazni napon ali zajedno sa transformatorom koji se nalazi iza autotransformatora, a sa kojim se vrši prilagođenje napona i galvansko izolovanje.



Slika 6. Električna shema autotransformatora

Odnos transformacije autotransformatora se može naći kao i kod transformatora

$$m = \frac{U_1}{U_2}$$

Često se autotransformatori prave tako da je moguće dobiti i više napone od ulaznih.

## 02.08. Merni transformatori

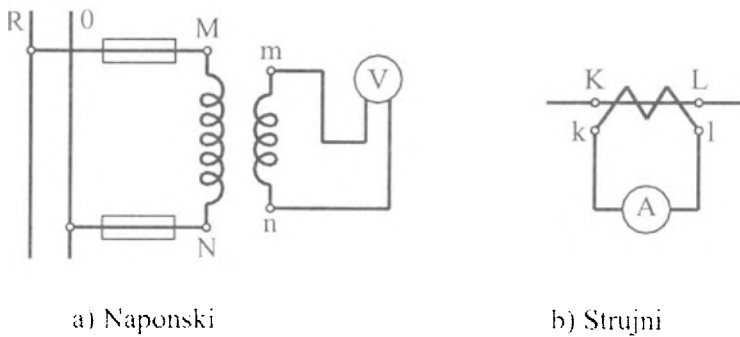
Merni instrumenti se ne mogu priključiti na visoke napone (isto je i sa merenjem velikih jačina struje) zbog opasnosti po život a i zbog toga što je vrlo teško i skupo konstruisati merne instrumente za takve uslove eksploatacije. Zbog toga se posebno konstruišu transformatori za merenje napona i struje koji se nazivaju naponski i strujni transformatori. Tačnost prenosnog odnosa  $U_1 = U_2$  ili  $I = I_1$ , određuje klasu tačnosti transformatora. Standardno naponski transformatori imaju oznake  $M$  i  $N$ , a strujni  $K$  i  $L$ . Naponski transformator radi kao i pravi transformator, tako da se ne sme dovesti u kratak spoj.



Strujni transformator mora biti stalno u kratkom spoju i ne sme biti otvoren zbog indukovanja velikih sekundarnih napona i proboja izolacije. Sekundarni napon strujnog transformatora može se napisati, koristeći jednačine (2.21) i (2.22), u sledećem obliku

$$U_2 = \frac{U_1}{m} = \frac{R_1 \cdot I_1}{m} = m \cdot I_1 \cdot R_2$$

Ovaj napon ima malu vrednost za određenu otpornost sekundara  $R_2$  koja je zanemarljiva. Kada je sekundar otvoren (ako je ampermetar odspojen), vrednost  $R_2$  teži beskonačnosti, tako da sekundarni napon može dobiti vrednosti koje mogu oštetiti izolaciju a time i ceo strujni transformator.



Slika 7. Merni transformatori

Postoje dve vrste strujnih transformatora, koji se koriste u mernim i zaštitnim kolima ili za merenje i zaštitu mreže.



Slika 8. Odnos primarne i sekundarne struje u strujnom transformatoru koji služi za merenje i zaštitu

Merni strujni transformatori moraju raditi pri vrhu linearnog dela histerezisne karakteristike tako da brzo ulaze u zasićenje. Ovo se konstruktivno podešava radi zaštite instrumenata od struje kratkih spojeva. Strujni transformatori koji se koriste u kolima zaštite treba da što kasnije uđu u zasićenje kako bi i odgovarajuća zaštita imala odgovarajuću informaciju o struji, a to znači da bi što pre proradila, pa rade na početku linearnog dela histerezisne krive.

## 02.09. Trofazni transformatori i sprezanje

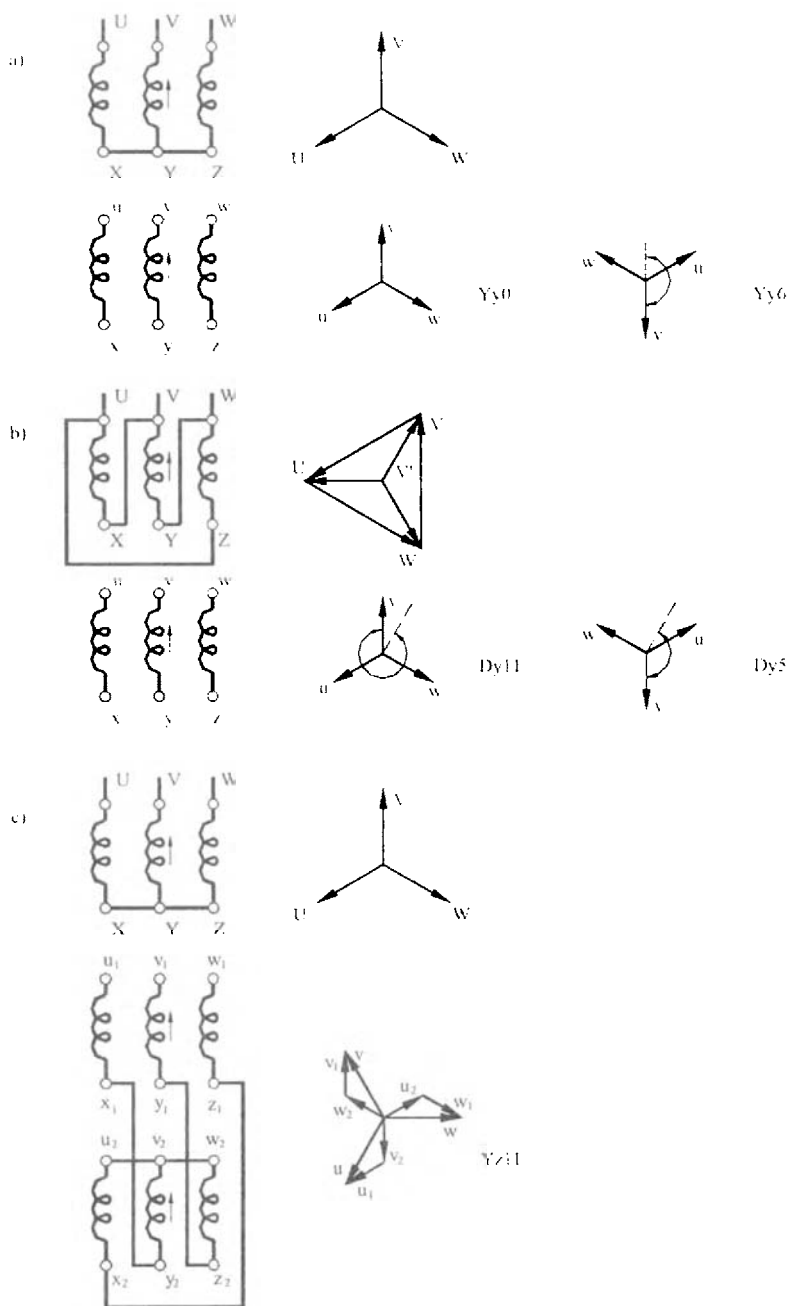
Trofazni transformatori su energetske transformatori i koriste se u trofaznim mrežama. Primarni krajevi obeležavaju se velikim slovima  $U, V, W$  i  $X, Y, Z$  a sekundarni malim  $u, v, w$  i  $x, z, y$ . Sprega namotaja može biti u zvezdu, trougao i slomljenu zvezdu. Transformatori se konstruišu od transformatorskih limova debljine 0,35 ili 0,5 mm. Provodnici su od bakra izolovani lakom. Radi sprečavanja mehaničkih oštećenja usled dinamičkih sila, namoti su dobro učvršćeni. Hlađenje je uglavnom vazdušno a ređe se koristi uljno hlađenje. Paralelan rad transformatora se u brodogradnji uglavnom izbegava. Ako je neophodan, u posebnim uslovima može se ostvariti ako su:

- isti nominalni naponi na primarnoj i sekundarnoj strani
- približno isti napon kratkog spoja
- jednake faze sekundarnih napona
- odnosi snaga transformatora manji od 1 : 3

Radi dijagrama sprezanja i kod crtanja vektorskih dijagrama napona transformatora, potrebno je uzeti u obzir određene konvencije. Vektor napona srednje faze primarnog napona se uvek crta vertikalno a ostali su pomereni fazno za ugao od  $120^\circ$  ili  $2\pi/3$ . Ako je sekundarni napon usmeren tako da pozitivno napaja potrošače, biće u smeru primarnog, a ako je suprotnog znaka, biće u opoziciji.

Sprezanje transformatora označava se sa dva slova i jednim brojem. Prvo slovo je veliko i označava spregu primara transformatora (Y - zvezda, D - trougao, Z - slomljena zvezda). Drugo slovo je malo i označava spregu sekundara transformatora (y - zvezda, d - trougao, z - slomljena zvezda). Broj označava fazni pomak primarnog i sekundarnog napona i to tako što se dati broj množi sa uglom od  $30^\circ$ .

Kod posmatranja sprezanja transformatora i faznog pomaka između odgovarajućih faza, važno je napomenuti da se posmatra samo fazni ugao a ne i efektivne vrednosti napona. Fazni pomak se posmatra uvek od primarnog napona do sekundarnog i to u smeru okretanja kazaljke na satu ili u pozitivnom smeru.



Slika 9. Dijagrami spreznja transformatora

Na slici 9 prikazani su neki dijagrami sprezanja transformatora.

U prvom slučaju, kada su i primarni i sekundarni namotaj spojeni u zvezdu, postoje dve mogućnosti. Ako se krajevi sekundarnog namotaja  $u$ ,  $v$  i  $w$  kratko spoje, dobija se zaostajanje sekundarnih napona za  $180^\circ$  pa imamo spregu  $Yy6$ , a ako se kratko spoje krajevi sekundara  $x$ ,  $y$  i  $z$  postojaće sprega  $Yy0$ .

Kako se posmatraju samo fazni naponi, to će se kod sprega u trougao konstruisati odgovarajući dijagram kao za spregu u zvezdu. Od ovog vektora će se okretanjem u desno posmatrati fazni naponi. Slično prethodnoj sprezi  $Yy$ , ako se kratko spoje sekundarni krajevi  $x$ ,  $y$  i  $z$  dobiće se sprega  $Dy11$ . Ako se kratko spoje krajevi  $u$ ,  $v$  i  $w$  postojaće kašnjenje napona za ugao od  $150^\circ$  čemu odgovara sprega  $Dy5$ .

U slučaju pod c) sekundarni namot raspodeljen je na dva dela tako da je namotaj sa oznakama 2 spojen u zvezdu a namotaj 1 u trougao. Prema datom vezivanju namotaja fazni pomak između napona na primaru i sekundaru je  $330^\circ$  čemu odgovara fazni pomak od 11 sati, tako da će i sprega biti  $Yz11$ .

Normalno da postoji još niz sprega, ali se fazni pomak kod svake može odrediti koristeći pravila prikazana na prethodnim primerima. Ovo je jako važno kod paralelnog rada dva transformatora jer se smeju paralelno vezati samo faze bez faznog pomaka.

## 02.10. Dalji razvoj transformatora

Na brodovima se koriste uglavnom transformatori sa vazдушnim hladenjem tzv. "suvi transformatori". Transformatori u ulju se manje primenjuju u brodogradnji i koriste se samo za posebne namene kao na bageru za kopanje uglja ili kod jako velikih potrošača.

Radi primene transformatora na višim frekvencijama koriste se transformatori napravljeni od mekog ferita. Feriti, ili materijali na bazi cinka ( $Zn$ ) i mangana ( $Mn$ ), mogu se koristiti na frekvencijama ispod 100 kHz za izradu prigušnica i transformatora manjih snaga. Zadnjih godina radi se intenzivno na razvoju amorfnih materijala [04 - 05], kao mekih magnetskih materijala za rad do frekvencije od 500 kHz.

Analize su pokazale da gubici u transformatoru sa silicijumskim limovima ( $Fe-Si$ ) debljine 0,5 mm pri frekvenciji 50 Hz i magnetskoj indukciji 1,5 T dostižu vrednosti od oko 2 W/kg, a limovi od amorfno materijala debljine 20 - 30  $\mu m$  pri frekvenciji 50 Hz, i magnetskoj indukciji 1,4 T imaju gubitke svega oko 0,2 W/kg.

## 02.11. Pravila Jugoslovenskog registra brodova za transformatore

Transformatori su često primjenjive i vrlo važne komponente u električnom postrojenju broda tako da su i strogo obuhvaćeni propisima. Propisima [06 - 07] definiše se nadzor još pri projektovanju, u fazi gradnje i ispitivanja transformatora a potom kod ugradnje u brod.

Na brodovima treba ugrađivati suve transformatore. Primenu drugih vrsta transformatora posebno razmatra Jugoregistar.

Transformatori za napajanje brodske mreže ili nekog brodskog uređaja, treba da imaju električno odvojene primarne i sekundarne namotaje. Ovaj zahtev se ne odnosi na transformatore za pokretanje i pobudne transformatore.

Razlika između predviđenog nominalnog odnosa transformacije i izmerenog odnosa transformacije u praznom hodu, ne treba da je veća od  $\pm 0,5\%$  nominalnog odnosa transformacije ili  $10\%$  od izmerenog napona kratkog spoja, već prema tome koja je vrednost od ove dve manja.

Kod jednofaznih ili trofaznih transformatora koji služe za napajanje brodske mreže promena napona pri radnom opterećenju, u području između praznog hoda i nominalnog opterećenja, ne treba da prede  $5\%$  za transformatore snage do 5 kVA po fazi i  $2,5\%$  za transformatore većih snaga.

Transformatori hladeni vazduhom i sa suvim dielektrikom treba da budu tako konstruisani da izdrže  $10\%$  preopterećenja za vreme od 60 min i  $50\%$  preopterećenja za vreme od 5 min.

Ako se osvetljenje i drugi bitni električni uređaji napajaju preko transformatora, tada treba predvideti najmanje dva transformatora takve snage, da pri prekidu rada najvećeg transformatora ostali mogu da obezbede punu potrošnju električne energije pri svim uslovima rada broda.

Ako su sabirnice glavne razvodne table odeljene na sekcije, tada primare transformatora treba priključiti na različite sekcije. Na brodovima sa električnim uređajima snage do 50kW može biti ugrađen samo jedan transformator.

Napon kratkog spoja transformatora u paralelnom radu treba da bude takav da se opterećenje bilo kojeg transformatora ne razlikuje više od  $10\%$  od odnosa snaga transformatora. Odnos nominalnih snaga najvećeg i najmanjeg transformatora u grupi, koji rade paralelno, ne treba da prelazi 3 : 1.

U napojnim kablovima primarnih namotaja transformatora treba postaviti uređaje za zaštitu od kratkog spoja a zaštitu od preopterećenja predvideti samo za

transformatore snage veće od 6,3kVA. Naprava za termičku i prekostrujnu zaštitu transformatora mogu se zameniti odgovarajućom signalizacijom o čemu posebno razmatra Jugoregistar.

Za merne transformatore nije potrebna zaštita od preopterećenja ni signalizacija. Prespajanje strujnih mernih transformatora treba vršiti tako da im sekundarni namotaji budu uvek kratko spojeni.

## 02.12. Literatura

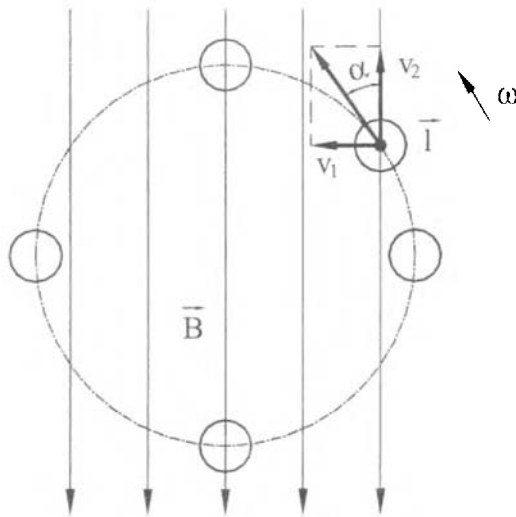
01. Fitzgerald - Kingsley, Električne mašine. Naučna knjiga, Beograd, 1962.
02. Miljanić P., Elektrotehnika, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
03. Rade Končar, Tehnički priručnik, Zagreb, 1980.
04. Dann, R.T., Gloss - Like metals Cut Cost and Energy Use, Machine Design, April 26, 1984, p.42.
05. Guthrie, M., Magnequench and its Applications, Proceedings of Motor-Con. 86, October 1986, p 138.
06. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe. Električni uređaji - deo 9, Beograd, 1994.
07. IEEC, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovim putevima, OUN, Njujork, 1993.

## 03. SINHRONE MAŠINE

Sinhrona mašina je električna mašina naizmjenične struje koja radi sinhronom brzinom ili brzinom koja odgovara frekvenciji naizmjenične struje. Mada svaka sinhrona mašina može da radi kao motor ili kao generator, na brodu se sinhronne mašine uglavnom koriste kao generatori. Zahvaljujući savremenom razvoju tehnologije izrade novih materijala a posebno razvoju energetske elektronike, zadnjih nekoliko godina došlo je do primene sinhronih motora za pogone najvećih prekookeanskih brodova [01], a razmatra se i pogon podmornica. Teorija rada sinhronih mašina dobro je poznata i proučena tako da je u daljem izvođenju u ovom poglavlju korišćena literatura [02 - 04].

### 03.01. Princip dobijanja naizmjeničnog napona

Pretpostavimo da se provodnik okreće oko ose konstantnom brzinom i da preseca homogeno jednosmerno magnetno polje. Prema Faradejevom zakonu elektromagnetne indukcije, u provodniku koji preseca magnetsko polje indukuje se elektromotorna sila u skladu sa obrascem (2.05)



Slika 10. Dobijanje indukovanih naizmjeničnih veličina

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

U vektorskom obliku, ovaj obrazac može se napisati u sledećem obliku:

$$e = \dot{l} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.01)$$

gde je  $\vec{l}$  vektor dužine provodnika orijentisan u smeru proticanja struje,  $\vec{v}$  je vektor brzine kretanja provodnika, a  $\vec{B}$  je vektor magnetne indukcije. Kada se dužina provodnika izražava u metrima (m), brzina obrtanja provodnika u (m/s) i magnetska indukcija u Teslama (T), dobija se indukovanu elektromagnetska sila u voltima (V).

Ako se jedan provodnik obrće konstantnom ugaonom brzinom u homogenom magnetskom polju (slika 10) moguće je pronaći indukovanu elektromotornu silu na osnovu jednačine (3.01). Brzina obrtanja se može razložiti na dve komponente od kojih je jedna normalna a druga paralelna sa linijama magnetskog fluksa. Vektorski proizvod komponente brzine obrtanja paralelne sa linijama magnetne indukcije i vektora magnetne indukcije jednak je nuli, tako da se umesto vektora brzine može računati samo sa jednom komponentom.

$$e = \vec{l} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = \vec{l} \cdot ((\vec{v}_1 + \vec{v}_2) \times \vec{B}) = \vec{l} \cdot (\vec{v}_1 \times \vec{B})$$

Kako su vektori brzine  $\vec{v}_1$ , i magnetne indukcije  $\vec{B}$  međusobno normalni a vektorski proizvod je kolinearisan sa vektorom dužine provodnika  $\vec{l}$ , to je moguće preći na skalarni račun. Ako se pored toga i normalna komponenta brzine zameni vrednošću brzine i sinusa odgovarajućeg ugla

$$v_1 = v \cdot \sin \alpha$$

dobija se izraz:

$$e = l \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Ako se izraz  $l \cdot v \cdot B$  zameni sa maksimalnom vrednošću elektromotorne sile  $E_m$  a pređeni ugao  $\alpha$  proizvodom ugaone brzine i vremena  $\omega t$  gornji izraz za indukovanu elektromotornu silu može se napisati u poznatom obliku

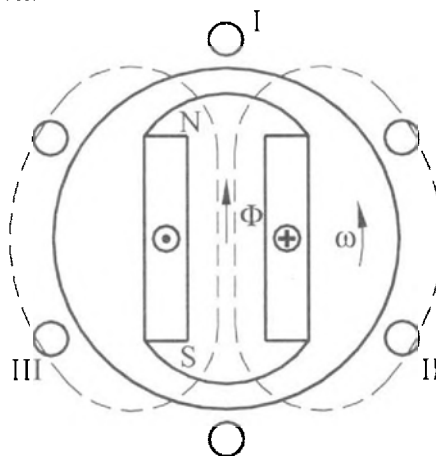
$$e = E_m \cdot \sin \omega t \quad (3.02)$$



Na ovaj način je pokazano da je moguće dobiti naizmeničan napon sinusnog oblika obrtanjem provodnika konstantnom brzinom u stalnom, homogenom magnetskom polju.

### 03.02. Princip rada trofaznog sinhronog brodskog generatora

U provodniku se može indukovati elektromotorna sila ako on preseca stalno magnetsko polje ili ako je provodnik stacionaran a magnetsko polje promenljivo. Kod praktične realizacije generatora više se koristi drugi slučaj iz jednostavnog razloga što je jednosmerna struja za stvaranje magnetskog polja znatno manja od struje koje protiču kroz fazne namotaje. Na slici 11 uprošćeno je prikazan princip rada sinhronog generatora. Pobudni namotaj postavljen na rotoru, stvara u međugvoždu stalno, jednosmerno magnetsko polje. Obrtanjem rotora ili indukta, dobija se u međugvoždu obrtno magnetsko polje. Znači, u međugvoždu se obrtno magnetsko polje dobija mehaničkim obrtanjem jednosmernog elektromagneta. Zbog toga što se obrtno polje, rotor i naizmenični napon istovremeno menjaju, ova mašina naziva se sinhrona.



Slika 11. Princip rada sinhronog generatora

Učestanost ili frekvencija je broj promena naizmenične veličine u sekundi

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (3.03)$$

gde je  $p$  broj pari polova namotaja na statoru, a  $n$  je brzina obrtanja rotora u minuti.

U jednom provodniku na statoru indukovaće se polovina elektromotorne sile prema jednačini

$$E = 2,22 \cdot f \cdot \Phi$$

U jednoj fazi na statoru koja poseduje  $N$  navojaka sa po dva aktivna provodnika, indukovaće se elektromotorna sila u skladu sa jednačinom (2.25).

$$E = 4,44 \cdot k_t \cdot k_p \cdot N \cdot f \cdot \Phi \quad (3.04)$$

Pri čemu su:

$k_t$  - tetivni navojni sačinilac ( ako polovi nisu zaobljeni )

$k_p$  - pojasni navojni sačinilac ( usled raspodele namotaja na više žlebova )

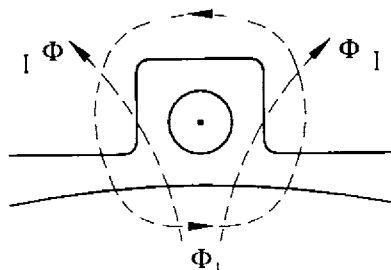
Zato što su prostorno pomereni za ugao od  $2\pi/3$ , u namotajima statora se indukuju elektromotorne sile koje vremenski kasne jedna za drugom za isti ugao od  $2\pi/3$ :

$$e_1 = E_m \sin \omega t \quad (3.05)$$

$$e_2 = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (3.06)$$

$$e_3 = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \quad (3.07)$$

Kada se stator optereti nekom strujom, dolazi do stvaranja magnetskog polja statora koje remeti magnetsko polje koje stvara rotor. Ovo remećenje magnetskog polja zove se magnetska reakcija indukta (slika 12).



Slika 12. Magnetska reakcija indukta

Magnetska reakcija indukta na jednoj strani žljeba (levog na slici) utiče na smanjenje magnetskog fluksa induktora što je poželjno, ali na drugoj strani (desnoj na slici) utiče na povećanje magnetskog fluksa induktora i na eventualno

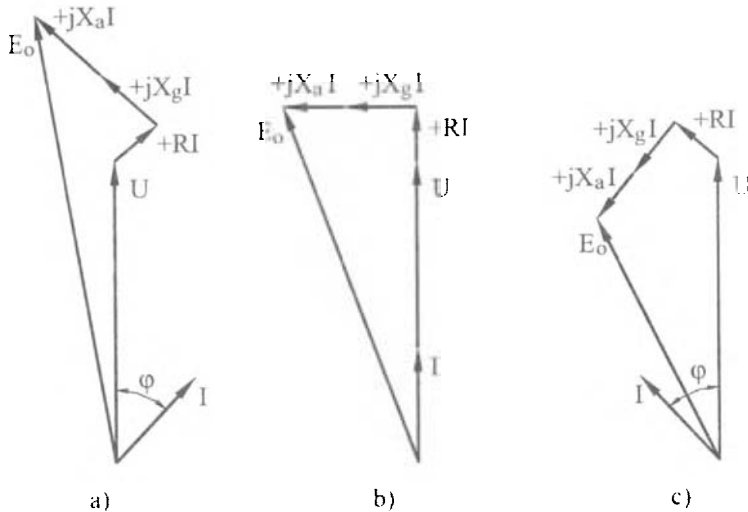
magnetsko zasićenje materijala čime se povećavaju gubici a i magnetsko kolo može da se pregreva u tom delu. Zbog toga je magnetska reakcija indukta neželjen problem koji se mora suzbiti ili sa kojim se mora računati.

### 03.03. Naponske jednačine i dijagrami

Jednačina naponske ravnoteže elektromotornih sila za sinhroni generator, a u skladu sa II Kirhofovom pravilom glasi:

$$\vec{U} = \vec{E}_o + \vec{E}_a + \vec{E}_r + \vec{E}_j = \vec{E}_o - jX_a \vec{I} - jX_r \vec{I} - R\vec{I} \quad (3.08)$$

gde je  $\vec{U}$  vektor izlaznog napona,  $\vec{E}_o$  je elektromotorna sila generatora u praznom hodu,  $\vec{E}_a$  je elektromotorna sila usled reakcije indukta,  $\vec{E}_r$  je vektor elektromotorne sile usled pada napona na induktivnom otporu namotaja statora, a  $\vec{E}_j$  je vektor elektromotorne sile usled pada napona na termogenim otporima namotaja statora.



Slika 13. Induktivno, omsko i kapacitivno opterećenje sinhronog generatora

Na slici 13 naertani su vektorski dijagrami napona i struje sinhronog generatora za neka tipična opterećenja.

Sa dijagrama je moguće uočiti da pri promeni karaktera opterećenja ( $\cos \varphi$ ) dolazi do promene izlaznog napona. Mada ovo može biti dosta značajno za neke manje autonomne sisteme kao što je brod, u praksi se ipak pokazuje kao manje važna činjenica, jer su potrošači na brodu uglavnom omski ili slabo induktivni, tako da pri opterećenju uvek dolazi do pada izlaznog napona generatora.

Postoji i druga interesantna činjenica da se kod paralelnog rada više generatora ili generatora i mreže, promenom pobudne struje (ili vrednosti  $\vec{E}_p$ ) jednog generatora, može menjati karakter opterećenja mreže.

### 03.04. Osnovni delovi sinhronih generatora

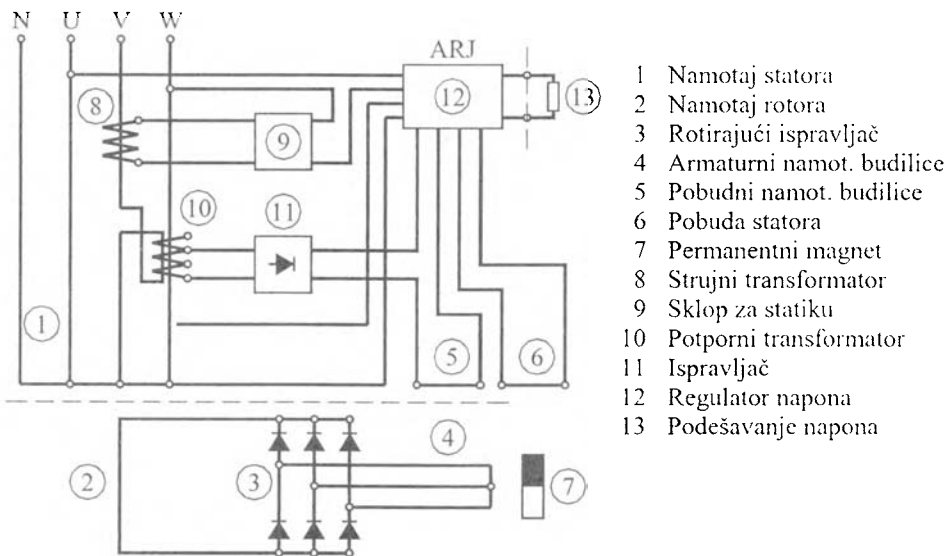
Prvi generatori naizmjenične struje imali su sistem za priključak jednosmernog nezavisnog napona na pobudni namotaj preko kliznih prstenova smeštenih na rotoru. Obrtanjem rotora dobijalo se obrtno magnetsko polje koje je presećalo namotaje statora i u njima indukovalo elektromotornu silu. Mane ove vrste generatora bile su: nestabilnost napona pri opterećenju, kao i problem kliznih prstenova i četkica. Regulacija izlaznog napona mogla se raditi isključivo regulacijom ulaznog jednosmernog napona. Ovo znači da nisu bili samopobudni generatori.

Radi održavanja izlaznog napona na konstantnom nivou pri opterećenju od praznog hoda do punog opterećenja, u primarno kolo postavljeni su strujni transformatori. Pored održavanja napona u punom opsegu opterećenja, strujni transformatori su ublažavali proces kod eventualnog kratkog spoja, jer su direktno smanjivali pobudnu struju. Svaki generator je imao i mogućnost ručnog zadavanja referentnog ili nominalnog napona. Normalno je da se generator pobuđivao u jednom smeru obrtanja svojim zaostalim ili remanentnim magnetizmom. A ako bi se rotor okrenuo u drugom smeru, razbudio bi se tako da je morao ponovo da se magneti. Ovo su bili samopobudni generatori tako da su mogli raditi i bez spoljašnjeg izvora jednosmernog napona za pobudu.

Korišćenjem elektronike [05 - 06] ostvaren je veliki napredak u sistemima koji su omogućivali da se održe stabilne karakteristike napona pri opterećenju. Dalji napredak ostvaren je eliminisanjem kliznih prstenova pomoću obrtne (rotacione) budilice i diodnog mosta kojim se vršilo ispravljanje napona. Ostao je i dalje problem oba smera obrtanja, jer su takvi generatori mogli da se obrću samo u jednom smeru obrtanja bez postupka ponovnog magnetisanja.

Današnji sinhroni generatori poseduju na rotoru i permanentni magnet kojim se omogućuje generisanje izlaznog napona bez obzira kojim se smerom obrće.

Obrtanjem rotora sinhronog generatora, obrtno magnetsko polje dobijeno okretanjem permanentnih magneta (7) preseca namotaj (6) na statoru i u njemu indukuje napon koji služi kao inicijalni za napajanje automatske regulacione jedinice (12). Ovaj regulacioni deo preko pobudnog namotaja budilice (5) napaja armaturni namotaj budilice (4) i pobudni namotaj rotora (2) preko trofaznog diodnog ispravljača (3) ili rotacionog ispravljača kako se ponekad naziva. Pobudni namotaj rotora ili budilica indukuje trofazne elektromotorne sile u statorskim namotajima (1) mašine. Automatska regulaciona jedinica mašine ARJ održava izlazni napon na podešenu referentnu vrednost zadatu ručnim potencijetrom (13), a na osnovu informacije o ostvarenim vrednostima napona i struje dobijenih preko strujnih transformatora (8) i potpornog transformatora (10) sa izlaza generatora.



Slika 14. Pobudni sistem sinhronih samopobudnih brodskih generatora

Karakteristika ovih generatora je da mogu raditi u oba smera obrtanja, bez četkica, sa strujnim i naponskim regulatorima i potencijetrom za podešavanje napona u praznom hodu. Pored stabilnih dizel agregata, na brodovima se danas [07 - 09] sve više primenjuju racionalnija rešenja pogona brodskih generatora.

### 03.05. Sinhronizacija brodskih generatora

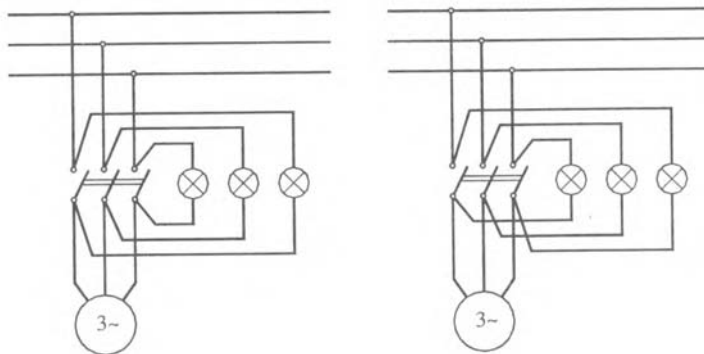
Sinhronizacija je postupak stavljanja generatora u paralelni rad sa drugim generatorom ili sa brodskom električnom mrežom. Uslovi za sinhronizaciju su:

- isti nominalni napon
- ista frekvencija ( učestanost )
- isti redosled faza
- minimalan ugao kašnjenja

Trenutak sinhronizacije proverava se pomoću tamnog ili ređe svetlog spoja sijalica iz jednostavnog razloga što je jednostavnije uočiti kada sijalice ne svetle nego kada je intenzitet osvetljenja maksimalan. Zbog toga će se izvesti uslov za sinhronizaciju za tamni spoj. Pretpostavimo da se naponi generatora mogu predstaviti u obliku.

$$u_1 = U_m \cdot \sin \omega_1 t$$

$$u_2 = U_m \cdot \sin \omega_2 t$$



a) Tamni spoj

b) Svetli spoj

Slika 15. Sinhronizacija brodskih generatora

Napon na sijalici može se na osnovu II Kirhofovog pravila naći na osnovu jednačine:

$$u_L = u_1 - u_2 = U_m (\sin \omega_1 t - \sin \omega_2 t) \quad (3.09)$$

Ako se pretpostavi da je na primer kružna brzina generatora veća od kružne brzine mreže za neku brzinu  $\Delta\omega$ , može se napisati

$$\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$$

jednačina (3.09) može se razviti u oblik

$$u_L = 2 \cdot U_m \sin \frac{\omega_1 t - \omega_2 t}{2} \cdot \cos \frac{\omega_1 t + \omega_2 t}{2}$$

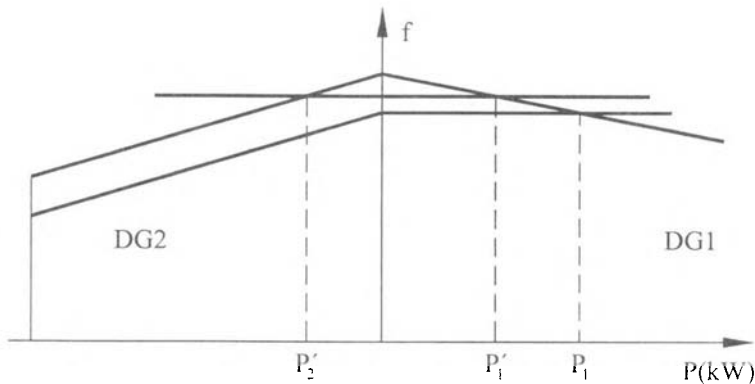
ili

$$u_L = 2 \cdot U_m \sin \frac{-\Delta\omega t}{2} \cdot \cos(\omega_1 t + \frac{\Delta\omega t}{2}) \quad (3.10)$$

U trenutku kada razlika ugaonih brzina obrtanja brodske mreže i generatora teži nuli,  $\Delta\omega \rightarrow 0$  može se dobiti da napon izjednačenja (na sijalicama) takode teži nuli  $u_L \rightarrow 0$  i tada se generator treba uključiti na mrežu. U tom trenutku ne postoji električni udar u napojnoj mreži jer ne postoji ni struja izjednačenja kao posledica razlike napona.

### 03.06. Paralelan rad sinhronih brodskih generatora

Na brodovima uvek postoji više generatora. Na manjim brodovima jedan po pravilu zadovoljava celu brodsku potrošnju a drugi mu je 100%-tna rezerva. Međutim, na velikim brodovima, posebno na putničkim i ratnim, postoji više generatora koji se uključuju po potrebi.



Slika 16. Preraspodela tereta kod paralelnog rada dizel generatora

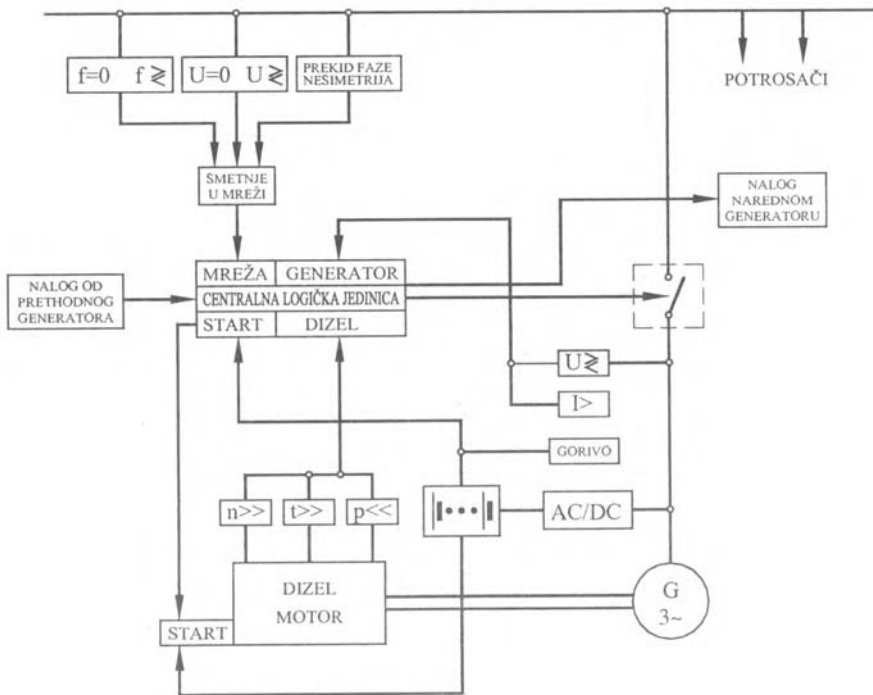
Kada opterećenje jednog generatora pređe oko 60% nominalnog opterećenja (na primer opterećenja  $P_1$ ), uključuje se drugi dizel generator u paralelan rad sa prvim [10]. U trenutku uključivanja, drugi generator ima frekvenciju kao i prvi i u tom slučaju njegovo opterećenje je minimalno. Ali povećanjem brzine obrtanja drugog generatora ili povećanjem njegove frekvencije, dolazi do preuzimanja tereta od

strane drugog generatora i na taj način se vrši preraspodela tereta (slika 16). U krajnjem slučaju prvi generator ima opterećenje  $P_1$  a drugi  $P_2$ . U praksi se ova podešavanja rade dok se opterećenja ne izjednače da bi oba generatora bila jednako opterećena.

Svaki dizelgenerator na brodu ima svoje polje na glavnoj razvodnoj tabli (GRT) na kome se između ostalog nalaze merni instrumenti za merenje struje, napona, učestanost i aktivnu snagu. Kada postoji polje sinhronizacije, u njemu se nalaze dvostruki frekvencmetar, dvostruki voltmetar i sinhroniskop.

### 03.07. Automatsko upućivanje sinhronih generatora u rad

Paralelan rad sinhronih generatora radi se u automatskom radu kod mrežnog opterećenja od oko 60%. Sledeći generator (treći), stavlja se u pogon kad opterećenje dostigne vrednost 160% pojedinačnog, itd. Kod starta se prvo proveravaju mehanički parametri, zatim električni, radi se sinhronizacija, izjednačuju se snage (slika 17).



Slika 17. Automatika dizelelektričnog pogona



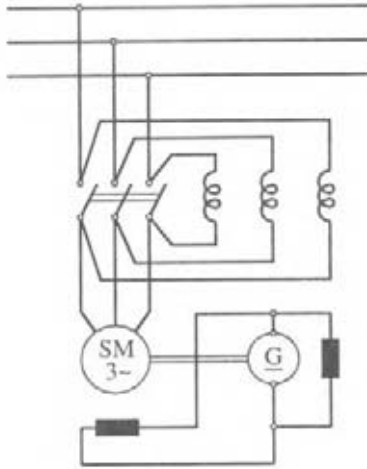
Kod automatskog naloga za upućivanje u pogon, centralna logička jedinica (CLJ) prvo proverava stanje akumulatorskih baterija i nivo goriva u dnevnom tanku. Ako su ovi parametri u redu, startuje se pogonski dizel motor i odmah se vrši proveravanje njegovih parametara, brzine obrtanja, temperature rashladne tečnosti i pritiska ulja za podmazivanje. Ako su i ovi parametri korektni, proveravaju se električni parametri sinhronog generatora, napon i struja opterećenja a istovremeno se preko ispravljača dopunjava akumulatorska baterija koja je poslužila za upućivanje dizel motora.

Tek posle ovoga vrše se provere osnovnih parametara mreže, a to su frekvencija, napon i eventualno neke smetnje kao prekid jedne faze. Ako je sve ovo u redu, vrši se automatska sinhronizacija i upućivanje ovog generatora u paralelni rad sa brodomskom mrežom. U slučaju da je ovaj agregat preopterećen, daje se nalog sledećem agregatu da uđe u pogon.

### **03.08. Sinhroni motori**

Kao što je napomenuto, sinhronne mašine se danas na brodovima koriste skoro isključivo kao sinhroni generatori. Zahvaljujući novim tehnologijama proizvodnje, posebno sinhronih motora sa permanentnim magnetima, kao i savremenom razvoju regulatora brzine obrtanja, počeli su da se opet koriste elektromotori ove vrste za pogon najvećih brodova. Ovo će se kasnije razmatrati detaljnije u poglavljima 12 i 13.

Ne treba ispustiti činjenicu iz vida da je početkom ovoga veka [11] električna propulzija na najvećim brodovima izvođena pomoću sinhronih motora snaga i više MW. Bili su pogodniji za električnu propulziju od asinhronih mašina zbog većeg stepena iskorišćenja i nešto većeg vazdušnog zazora između statora i rotora a što je posebno važno u brodogradnji zbog vibracija koje vladaju u mašinskom prostoru. Problemi vezani za eksploataciju sinhronih motora postojali su skoro isključivo zbog puštanja u pogon. Vrlo komplikovan proces puštanja u pogon sinhronih mašina i dovođenja u sinhronizam obavljalo se na nekoliko načina:



Slika 18. Puštanje sinhronog motora u pogon pomoću induktivnosti

- Pomoćnim dizel motorom
- Kao asinhroni motor pomoću sprega YD,
- pomoću induktivnosti u kolu statora ili
- pomoću autotransformatora

Pomoćnim dizel motorom se sinhroni motor pušta u pogon na taj način da se zaleti do određene brzine a onda se dizel motor isključuje i uključuje pobudni namotaj na rotoru, čime se sinhroni motor ubacuje u sinhronizam. Pri ovom postupku se dešavalo da se sinhronizacija ne obavi odmah tako da se postupak više puta ponavlja. Pošto je ovo dosta komplikovan postupak, više se koristio drugi metod. Na rotor asinhronog motora je postavljan kratkospojeni namotaj i ovaj motor se zaletao kao asinhroni motor. Po dostizanju nominalne brzine, uključivan je namotaj za pobudu na rotoru, čime se rotor dodatno ubrzavao. Ako postupak sinhronizacije ne bi uspeo, ponavlja bi se više puta. Dodatno su se za puštanje u rad asinhronog motora koristile uobičajene metode kao što je sprega zvezda-trougao ili preko određenih induktivnosti u kolu statora.

Dodatni problem kod primene sinhronih motora bio je proces reverziranja ili vožnje krmom. Ceo postupak je ponavljan i za vožnju krmom što je dodatno usložnjavalo primenu ovih motora.

### 03.09. Sinhroni motori sa permanentnim magnetima

Zajedno sa energetskekim pretvaračima, sinhroni motori sa permanentnim magnetima predstavljaju rešenje koje bi ubrzo moglo da zameni postojeće asinhronne motore i

jednosmerne motore u nekim primenama na brodovima. Osnovne prednosti ovih elektromotora su:

- mogućnost kontinualne regulacije u punom opsegu promene brzine
- smanjeno habanje i održavanje
- ušteda energije (mali gubici u regulatoru brzine)
- manja masa u odnosu na jednosmerne mašine
- veliki moment u celom opsegu regulacije
- odlična dinamika motora
- velika pouzdanost
- veliko međugvožđe

Sinhroni motori sa permanentnim magnetima imaju istu konstrukciju statora kao polifazni asinhroni. Konstrukcija rotora sastoji se od permanentnih magneta magnetisanih radialno. Ovi permanentni magneti imaju oblik kružnih lukova i montirani su na površini rotora.

Motor se obrće sinhronom brzinom kojom fluks rotora preseca vazdušni procep i pokušava da se izjednači sa sinhronom brzinom obrtanja statorskog obrtnog fluksa. Ako je učestanost statora stalna, brzina obrtanja rotora je nezavisna od opterećenja i takođe stalna. Ako se opterećenje poveća, ugao između fluksa rotora ostvarenog rotiranjem magneta i rotirajućeg statorskog fluksa ostvarenog strujom statora se povećava.

Ako se opterećenje poveća iznad "prevalnog momenta", maksimalnog momenta koji može sinhroni motor da proizvede, rotor ispada iz "sinhronizma" sa statorskim fluksom i motor staje. Sinhroni motori sa permanentnim magnetima imaju viši stepen iskorišćenja od običnih sinhronih motora kao i asinhronih mašina. Kako cena permanentnih magneta pada, to se očekuje i porast primene u svim oblastima primene a posebno u brodogradnji i brodarstvu.

US mornarica [12] je sa firmom Lockheed Martin preduzela gradnju integrisanog energetskog sistema (IPS) u kome će osnovna komponenta biti pogonski elektromotor sa permanentnim magnetima snage 9.200kW. Pored ovoga, konstruiše se red sinhronih motora raznih snaga u opsegu 15 - 180kW za pomoćne primene na brodovima prvenstveno zbog nešto višeg stepena korisnosti i mogućnosti jeftinije regulacije brzine obrtanja. Radi primene na ratnim brodovima, i podmornicama, US mornarica planira da za nekoliko narednih godina razvije motore ove vrste snage do 18.390kW.

### **03.10. Pravila Jugoslovenskog registra brodova za sinhronne generatore**

Našim [13] a i stranim propisima [14] detaljno su definisani uslovi za konstruisanje i primenu naizmeničnih generatora na morskim i rečnim brodovima.

Dizel agregati i turbo agregati treba da budu proračunati za neprekidan rad.

Svaki generator naizmjenične struje treba da ima automatsko podešavanje napona. Osim toga, preporučuje se naprava za ručnu regulaciju pobude generatora, ako je to, obzirom na konstrukciju pobude moguće.

Karakteristika regulatora brzine obrtanja pogonskog motora generatora naizmjenične struje, određenog za paralelan rad, treba da bude takva da tokom paralelnog rada u području od 20 - 100% ukupnog aktivnog opterećenja podela aktivnog opterećenja pojedinih generatora bude srazmerna njihovom procentualnom učešću u ukupnom aktivnom opterećenju i da se ne razlikuje za više od 10% od aktivne snage najvećeg generatora. Navedena podela opterećenja treba da se postigne bez ručnog regulisanja brzine obrtaja pogonskog motora i napona.

Agregati naizmjenične struje, određeni za paralelan rad, treba da imaju takav sistem za kompenzaciju reaktivnog pada napona da se tokom paralelnog rada agregata razlika u reaktivnom opterećenju svakog generatora ne razlikuje od veličine proporcionalne njihovim snagama za više od 10% nominalnog reaktivnog opterećenja najvećeg generatora.

Generatori treba da budu izgrađeni tako da posle zagrevanja do ustaljene temperature koja odgovara nominalnom opterećenju mogu da izdrže preopterećenje struje od 50% pri trajanju preopterećenja od 120s.

### 03.11. Literatura

01. Newman R.J., For the Navy, an engine of change U.S. News, 12.20.1999.
02. Fitzgerald - Kingsley, Električne mašine, Naučna knjiga, Beograd, 1962.
03. Miljanić P., Elektrotehnika, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
04. Jugoslovenski leksikografski zavod, Tehnička enciklopedija, Zagreb, 1963 - 1988.
05. Rade Končar, Tehnički priručnik, Zagreb, 1980.
06. Sever, Stabilni dizelelektrični agregati po licenci BBC, Subotica, 1977.
07. Bilen B., Nikolić Z., Osovinski generator - iskustva iz eksploatacije, Plovni putevi, brodogradnja brodarstvo broj 36 / 37, Beograd, 1991, 3-9 .
08. Barić J., Prednost primene trofaznih osovinskih generatora na suvremenim motornim brodovima - I deo, Brodogradnja 31, 1983, 1, 15 - 22
09. Barić J., Prednost primene trofaznih osovinskih generatora na suvremenim motornim brodovima - II deo, Brodogradnja 32, 1983, 6, 363 - 378
10. Vlahinić I., Električni sistemi plovnih objekata, Fakultet za pomorstvo i saobraćaj, Rijeka, 1988.
11. Chapman L., The Marine Power Plant, McGraw-Hill book company, New York, 1942 .

12. –, US develops permanent magnet propulsion, *The Motor Ship*, august 1996.
13. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe, Električni uređaji - deo 9, Beograd, 1994.
14. EEC, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovnim putevima, OUN, Njujork, 1993.

## 04. ASINHRONE MAŠINE

Asinhrone mašine su mašine za naizmjeničnu struju koje se obrću nesinhronom ili nejednakom brzinom sa brzinom obrtnog magnetskog polja. Pronalazač asinhronih mašina bio je Nikola Tesla 1887. godine. Princip rada asinhronih mašina svodi se na stvaranje obrtnog magnetskog polja pomoću dve ili više naizmjeničnih struja koje vremenski kasne jedna za drugom i protiču kroz namotaje koji su prostorno pomereni za odgovarajući ugao. Pošto rade na principu indukcije, zovu se i indukcione. Mada se asinhrone mašine mogu koristiti kao generatori i motori, na brodovima se uglavnom koriste u motornom režimu. Teorija rada asinhronih mašina, kao i načini puštanja u rad i regulacija brzine detaljno su prikazani i dati u literaturi [01 - 03] kao i njihova primena na brodu [04].

### 04.01. Teslino obrtno magnetsko polje.

Pretpostavićemo da na statoru postoje tri prostorno pomerena kalema kroz koje protiču naizmjenične struje, vremenski pomerene za vreme  $2\pi/3\omega$ .

$$\begin{aligned}i_1 &= I_m \cdot \cos \omega t \\i_2 &= I_m \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\i_3 &= I_m \cdot \cos(\omega t - 4\pi/3)\end{aligned}\tag{4.01}$$

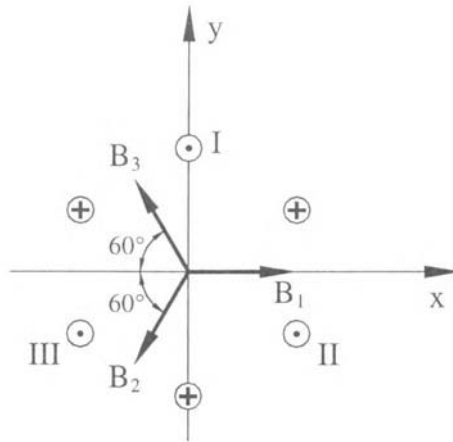
pri čemu je  $I_m$  - maksimalna vrednost struje a  $\omega$  - kružna učestanost, tako da je  $\omega T = 2\pi$ . Ove naizmjenične struje stvoriće nezavisna, nepokretna i vremenski promenljiva (pulsirajuća) magnetska polja čije trenutne vrednosti takode kasne jedna za drugom za vreme  $2\pi/3\omega$ .

$$\begin{aligned}b_1 &= B_m \cdot \cos \omega t \\b_2 &= B_m \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\b_3 &= B_m \cdot \cos(\omega t - 4\pi/3)\end{aligned}\tag{4.02}$$

pri čemu je  $B_m$  maksimalna vrednost magnetne indukcije.

Mada postoji više načina za dokazivanje stvaranja obrtnog magnetskog polja pomoću statičkih promjenljivih polja, ovde je prikazan jedan jednostavan dokaz.

U vazдушnom procepu između rotora i statora, magnetne indukcije svake faze, mogu se predstaviti vektorski kao što je prikazano na slici 19.



Slika 19. Princip stvaranja obrtnog magnetskog polja

Rezultujuća magnetska indukcija dobija se sabiranjem ta tri vektora. U Dekartovom koordinatnom sistemu za x i y ose, komponente magnetne indukcije iznose:

$$b_x = b_1 - b_2 \cdot \cos 60^\circ - b_3 \cdot \cos 60^\circ \quad (4.03)$$

$$b_y = b_2 \cdot \cos 30^\circ - b_3 \cdot \cos 30^\circ$$

Ubacivanjem jednačina (4.02) u jednačine (4.03) mogu se dobiti izrazi za komponente magnetne indukcije po x i z osi

$$b_x = B_m \cos \omega t - \frac{1}{2} B_m \left( \cos \frac{2\pi}{3} \cos \omega t + \sin \frac{2\pi}{3} \sin \omega t \right) - \frac{1}{2} B_m \left( \cos \frac{4\pi}{3} \cos \omega t + \sin \frac{4\pi}{3} \sin \omega t \right)$$

i

$$b_y = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m \left( \cos \frac{2\pi}{3} \cos \omega t + \sin \frac{2\pi}{3} \sin \omega t \right) - \\ - \frac{\sqrt{3}}{2} B_m \left( \cos \frac{4\pi}{3} \cos \omega t + \sin \frac{4\pi}{3} \sin \omega t \right)$$

Posle sređivanja, može se dobiti da je:

$$b_x = 1,5 \cdot B_m \cdot \cos \omega t = B_{ob} \cdot \cos \omega t \quad (4.04)$$

$$b_y = 1,5 \cdot B_m \cdot \sin \omega t = B_{ob} \cdot \sin \omega t$$

Na ovaj način je pokazano da je pomoću tri nepokretna, prostorno pomerena namotaja kroz koje protiču trofazne struje sa određenim vremenskim kašnjenjem, moguće dobiti obrtno magnetsko polje. Ovo magnetsko polje prolazi kroz međugvožđe ili vazdušni procep brzinom koja odgovara mrežnoj učestanosti.

#### 04.02. Princip rada trofaznog asinhronog motora

Pretpostavićemo da su na statoru i rotoru namotaji prostorno pomereni za trećinu dvostrukog polnog koraka, pri čemu je rotor kratko spojen. Ako na statorske namotaje priključimo trofazne naizmenične napone sa određenim vremenskim kašnjenjem, uspostaviće se trofazne struje koje će stvoriti Teslino, obrtno magnetno polje. Sinhrona brzina obrtanja magnetskog polja iznosi:

$$n' = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4.05)$$

pri čemu je  $f$  - frekvencija (učestanost) ili broj promena fluksa u jedinici vremena a  $p$  - broj pari polova

Krećući se u međugvožđu, obrtno magnetsko polje indukuje u provodnicima statora elektromotornu silu

$$E' = 4,44 \cdot k' \cdot N' \cdot f \cdot \Phi_{ob} \quad (4.06)$$

gde je  $k'$  konstruktivna konstanta a  $N'$  broja navojaka statora. Ostale oznake su objašnjene ranije. Indukovana elektromotorna sila u provodnicima rotora može se naći na osnovu vektorske jednačine:



$$e'' = \vec{l}'' \cdot (\vec{V} \times \vec{B})$$

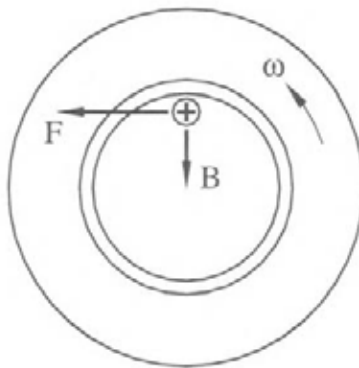
Na osnovu poznate relacije (3.01), može se za rotor izvesti slična jednačina kao i za stator

$$E'' = 4,44 \cdot k'' \cdot N'' \cdot f'' \cdot \Phi_{ob} \quad (4.07)$$

Usled ove elektromotorne sile, javljaju se struje u kratkospojenim navojcima rotora. Interakcijom ovih struja kao i obrtnog magnetskog polja, javlja se elektromagnetska sila koja deluje kao mehanička na navojke. Vektorski izraz za ovu elektromagnetnu silu je:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (4.08)$$

Spreg ovih sila ispod polova daje moment koji utiče da se provodnici, a samim tim i rotor okreću oko osovine.



Slika 20. Princip rada asinhronne mašine

Važno je napomenuti da rotor ne može dostići sinhronu brzinu obrtanja jer bi se u tom slučaju jednakim brzinama kretalo obrtno magnetsko polje i rotor. To bi značilo da bi prestalo presecanje provodnika rotora od strane obrtnog magnetskog polja a time bi indukovana elektromotorna sila u rotoru nestala kao i pogonska elektromagnetska sila, i rotor bi odmah počeo da usporava. Zbog toga, rotor se okreće nekom brzinom koja je za 2 do 6% niža od brzine obrtanja obrtnog magnetskog polja. Ovo zaostajanje naziva se klizanje i obeležava slovom  $s$ . Znači, klizanje se definiše kao razlika sinhrone i stvarne brzine obrtanja.

$$s = n' - n$$

Češće se klizanje izražava kao relativna vrednost u obliku količnika stvarnog klizanja i sinhronne brzine obrtanja, pomnoženo sa 100.

$$s(\%) = \frac{s}{n'} \cdot 100 = \frac{n' - n}{n'} \cdot 100 = \frac{\Delta n}{n'} \cdot 100 \quad (4.09)$$

Odavde se lako mogu izvesti i granične vrednosti klizanja. U trenutku uključenju elektromotora na mrežu, dok još elektromotora stoji sledi da je klizanje

$$s = 1 \quad \rightarrow \quad n = 0 \quad (4.10)$$

a pri sinhronoj brzini je uslov

$$s = 0 \quad \rightarrow \quad n = n' \quad (4.11)$$

Ukoliko bi neka druga mašina pokretala rotor većom brzinom od sinhronne, klizanje bi imalo negativnu vrednost što znači da ta mašina radi u generatorskom režimu ili radi nadsinhronom brzinom obrtanja.

Iz jednačine (4.09) moguće je izvesti često korišćenu jednačinu za asinhronu brzinu obrtanja elektromotora koristeći podatke za klizanje i sinhronu brzinu obrtanja

$$n = (1 - s) \cdot n' \quad (4.12)$$

Frekvencija u rotoru može se izračunati na osnovu formule

$$f'' = \frac{\Delta n \cdot p}{60} = \frac{s \cdot n' \cdot p}{60} = s \cdot f' \quad (4.13)$$

Može se primetiti da je frekvencija u rotoru asinhronog motora pri startu jednaka frekvenciji statora, i za naše uslove iznosi 50Hz, dok u nominalnim uslovima rada iznosi svega 1-3Hz. Pri sinhronoj brzini obrtanja, učestanost u rotoru iznosi 0Hz.

#### 04.03 Gubici snage i stepen iskorišćenja asinhronog motora

Ukupna snaga ili električna snaga koja se uzima iz mreže, može se izračunati po formuli:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4.14)$$

Korisna snaga asinhronog motora je mehanička snaga i može se izračunati na osnovu mehaničkih podataka o mašini

$$P_2 = \omega \cdot M = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot M = \frac{M \cdot n}{9,55}$$

Razlika ove dve snage predstavlja gubitke u električnoj mašini. Gubici u asinhronoj mašini mogu biti električni i mehanički. Električni gubici se dalje mogu podeliti na gubitke u gvožđu statora i rotora kao i gubitke u bakru statora i rotora.

Gubici u gvožđu usled histerezisa i vrtložnih struja mogu se naći posebno za rotor i stator na osnovu jednačine:

$$P_{Fe} = k_h \cdot f' \cdot B_m^2 + k_v \cdot (f'')^2 \cdot B_m^2 + k_h \cdot f' \cdot B_m^2 + k_v \cdot (f'')^2 \cdot B_m^2$$

Pošto je u nominalnom režimu rada frekvencija rotora znatno manja nego u statoru, gubici u gvožđu mašine su praktično jednaki gubicima u gvožđu statora, i nezavisni su od opterećenja.

$$P_{Fe} \approx P'_{Fe} \quad (4.15)$$

Gubici u namotajima (Džulovi gubici) zavise od opterećenja i mogu se naći na osnovu jednačine

$$P_{cu} = q \cdot R_1 \cdot I_1^2 + q \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (4.16)$$

Mehanički gubici usled ventilacije  $P_v$  zavise uglavnom od brzine obrtanja i stalni su. Stepen iskorišćenja asinhronog motora može se naći kao odnos snaga

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{Fe} - P_{cu} - P_v}{P_1} \quad (4.17)$$

Stepen iskorišćenja trofaznih asinhronih motora zavisi od brzine obrtanja i snage, ali se za brodske elektromotore koji se najviše upotrebljavaju u brodogradnji snage 1 – 22kW pri  $1.500 \text{ min}^{-1}$ , nalazi u granicama od 0,75 do 0,90.

#### **04.04. Motor sa kratkospojenim i namotanim rotorom**

Asinhroni elektromotor je električna mašina koja električnu energiju pretvara u mehanički rad. Sastoji se od dva osnovna dela: nepokretnog dela ili statora i pokretnog dela ili rotora koji su međusobno razdvojeni međugvoždem. Kod asinhronih motora, stator je uvek induktor ili primar koji se priključuje na električnu mrežu a rotor indukat ili sekundar. Znači, stator ili induktor stvara obrtno magnetno polje, a u rotoru ili induktu se indukuju elektromotorne sile i struje kao posledici presecanja provodnika od obrtnog magnetnog polja. Stator je napravljen od dinamo limova u obliku šupljeg valjka sa žljebovima po unutrašnjosti u kojima se nalaze namotaji. Rotor je takođe napravljen od dinamo limova sa žljebovima po spoljnom obimu u kojima se mogu naći namotaji ili šipke. Zbog toga se razlikuju dve vrste asinhronih motora, koji poseduju namotani ili kratkospojeni rotor.

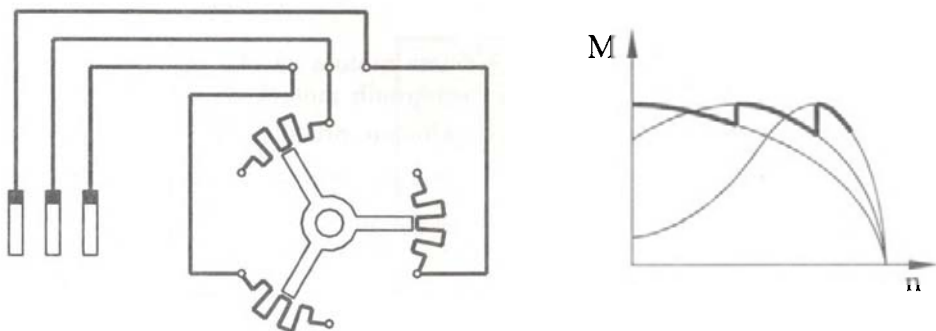
Asinhroni motor sa namotanim rotorom ima obično trofazne namotaje koji su spojeni sa kliznim prstenovima na vratilu na koje naležu dirke a koje su u vezi sa promenljivim trofaznim rotorskim otpornikom. Pri puštanju u pogon postavlja se maksimalna vrednost ovog otpornika da bi se smanjile udarne struje. Posle procesa puštanja u pogon i postepenog smanjenja spoljnih otpora, dirke se dižu u vazduh i prstenovi se kratko spajaju preko posebnog mehanizma da bi se time smanjilo trenje i habanje dirki.

Asinhroni motor sa kratkospojenim namotajem ima umesto namotaja provodnike od šipki (bakra, aluminijuma ili legura) koji su sa strane spojeni pomoću kružnih prstenova. Prednosti pravljenja ovakvih rotora su višestruke, a mana je što imaju lošije karakteristike pri puštanju u pogon i znatno komplikovaniju mogućnost regulacije brzine obrtanja.

#### **04.05. Puštanje u rad asinhronih motora sa namotanim rotorom**

Puštanje u pogon asinhronih motora predstavlja veliki problem naročito ako je električni izvor slab kao što je slučaj na brodu. Osnovni problem pri puštanju u pogon je vrednost polaznog momenta kao i veličina polazne ili udarne struje.

Kod asinhronih motora sa namotanim rotorom, polazna struja ograničava se rotorskim otpornikom. Na krajeve pojedinih faza rotora, preko dirki, povezani su rotorski otpornici određene vrednosti. Postepenim pomeranjem ručice, vrši se smanjenje otpora koji je uključen u pojedine faze namotaja. Na ovaj način postiže se smanjenje struje od neke maksimalne vrednosti do dozvoljene. Pri ovome, moment ima maksimalnu vrednost, a rotor se polako ubrzava sve dok se ne isključe svi segmenti otpora, kada motor dostiže maksimalnu brzinu obrtanja.



Slika 21. Puštanje u rad motora sa namotanim rotorom preko kliznih prstenova i spoljašnjeg otpora i momentne karakteristike

#### 04.06. Puštanje u rad motora sa kratkospojenim rotorom

Motori sa kratkospojenim rotorom se najčešće puštaju u pogon direktnim uključanjem na mrežu. Da bi se kod većih motora smanjile polazne struje, na neki način se vrši ograničavanje snage ovih motora [05-06]. Na žalost, to je neizbežno vezano i sa smanjenjem momenta elektromotora.

##### 1. Direktno uključnje na mrežu

Ovaj postupak se najčešće primenjuje. Pošto je na brodovima većina asinhronih motora malih snaga, ovaj postupak ima poseban značaj. Metod je jednostavan ali postoje polazne ili udarne struje čija je veličina u zavisnosti od brzine obrtanja elektromotora data u tabeli.

Tabela 05. Normalizovane vrednosti polaznih struja i momenata kod direktnog uključnja asinhronog motora

$n \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$I_p/I_n$	$M_p/M_n$	$M_{max}/M_n$
1500	6,5 – 8	1,4 - 1,1	1,8
1000	6	1,3 - 1,1	1,8
750	5,5	1,1	1,6

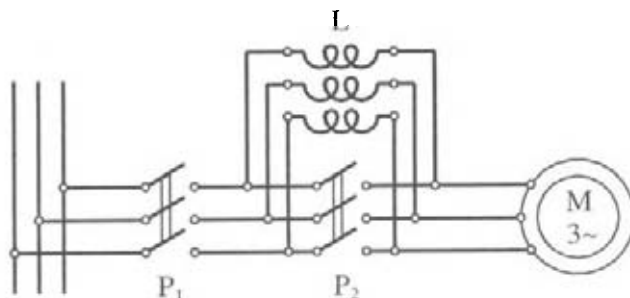
Prikazani su i neki podaci o relativnim vrednostima polaznih struja i momenata. Kod asinhronih motora posebne izrade moguće je ostvariti velike polazne momente pri malim polaznim strujama.

## 2. Pomoću prigušnice u kolu statora

Da bi se smanjio polazni napon na krajevima motora na oko 60-70% nominalne vrednosti, ponekad se u statorsko kolo asinhronih motora stavljaju induktivnosti (slika 22). U postupku puštanja se prvo uključuje prekidač  $P_1$  pa zatim prekidač  $P_2$ . Na ovaj način snižava se polazna struja na vrednost 2-2,5  $I_n$ , ali pri tome dolazi do znatnog smanjenja momenta što je glavni nedostatak ove metode. Ako se pretpostavi da je napon na motoru smanjen  $a$  puta, a da je impedansa rotora pri tome povećana  $b$  puta, polazna struja će biti:

$$I_p = \frac{U'}{a \cdot b \cdot z_k}$$

Pri ovome je polazni moment smanjen  $a^2 b^2$  puta.

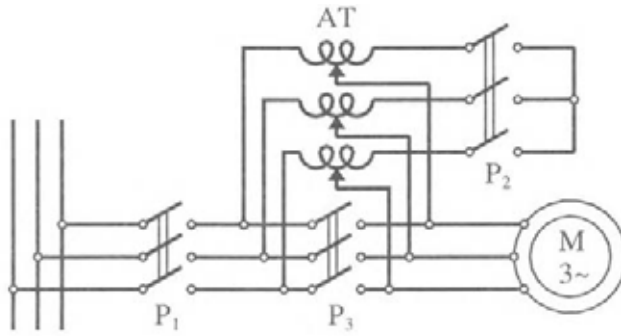


Slika 22. Puštanje u rad motora sa prigušnicama u kolu statora

U praksi je moguće često sresti pokretanje asinhronih motora pomoću statorskih otpornika [06]. Ovi otpori imaju jednake vrednosti u svakoj fazi, i nakon zaletanja se premošćavaju. Kod manjih motora moguće je staviti samo jedan otpornik.

## 3. Pomoću autotransformatora

Umesto induktivnosti ili otpornosti, u statorsko kolo asinhronog motora može se postaviti autotransformator. Ovo je u principu posebno napravljen autotransformator predviđen samo za kratkotrajan rad jer proces puštanja u rad ili zaletanja asinhronog motora traje relativno kratko. Obično se pri puštanju, pomoću autotransformatora snižava napon na 55-75%  $U_n$ .



Slika 23. Puštanje motora u rad pomoću autotransformatora

Pri puštanju u rad se prvo uključuje prekidač  $P_2$  pa  $P_1$ . Kada se proces završi, podizanjem napona na nominalnu vrednost pomoću autotransformatora, uključuje se prekidač  $P_3$  a isključuje prekidač  $P_2$  da bi se autotransformator isključio sa napajanja.

#### 4. Pomoću prebacivača zvezda - trougao

Na brodovima je ovo najčešće primenjivan postupak puštanja u pogon za asinhronne motore sa kratkospojenim rotorom. Pri ovome se mora imati u vidu da se na ovaj način mogu puštati u pogon samo motori koji su spregnuti u trougao. Elektromotor se prvo pušta u pogon sa spregom u zvezdu, a posle nekoliko sekundi(zavisi od snage i vremena zaleta) prebacuje se u spregu u trougao.

U sprezi u trougao je napon po fazi namotaja za  $\sqrt{3}$  puta veći od napona po fazi u sprezi zvezda. U sprezi u trougao na fazi namotaja nalazi se linijski ili međufazni napon  $u$  a u sprezi u zvezdu se na fazi namotaja nalazi fazni napon. Zbog toga je

$$U_{ld} = \sqrt{3} \cdot U_{fy} \quad (4.18)$$

Ako je ekvivalentna impedansa faze statora motora pri puštanju u pogon  $z_k$ , polazna linijska struja pri vezi u zvezdu iznosi:

$$I_{ply} = \frac{U_{fy}}{z_k} = \frac{U_{ld}}{\sqrt{3} \cdot z_k}$$

Polazna fazna struja pri sprezi u trougao, koju želimo da smanjimo, iznosi:

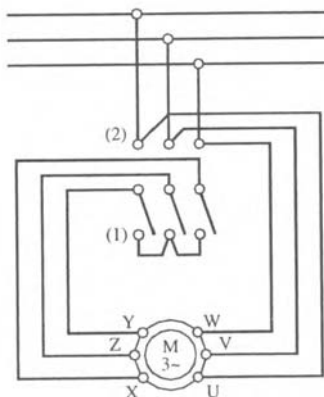
$$I_{pld} = \frac{U_{ld}}{z_k}$$

Pošto je polazna linijska struja pri sprezi u trougao za  $\sqrt{3}$  puta veća od polazne fazne struje pri vezi u trougao, to je:

$$I_{pld} = I_{plf} \cdot \sqrt{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ld}}{z_k}$$

odnos polaznih linijskih struja pri vezi u zvezdu i trougao iznosi:

$$\frac{I_{ply}}{I_{pld}} = \frac{1}{3} \tag{4.19}$$



Slika 24. Prebacač zvezda - trougao

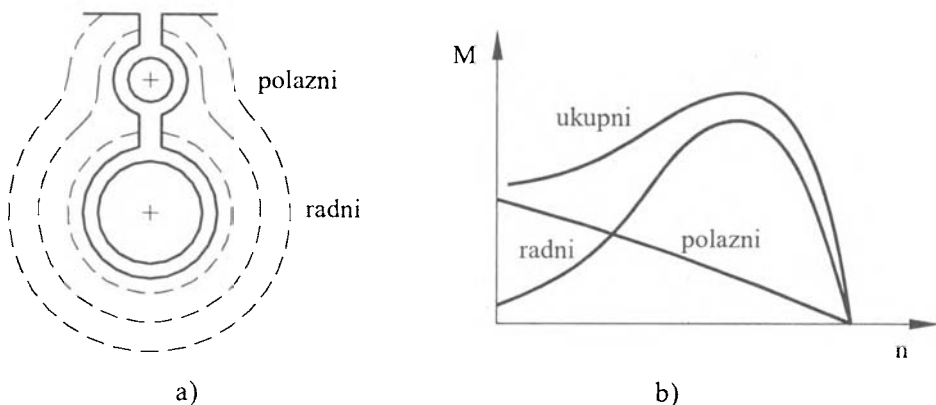
Mana ove metode puštanja u pogon je smanjenje polaznog momenta. Pošto je polazna struja 3 puta manja, to je i polazni moment. Na ovaj način mogu se puštati u pogon samo motori spregnuti u trougao i to samo ako je kriva momenta tereta manja od krive momenta koji motor razvija pri polasku sa statorom spregnutim u zvezdu.

### 5. Pomoću rotora sa dvostrukim ili dubokim žljebovima

Da bi se smanjile polazne struje a zadržale dobre mehaničke osobine, prave se posebne konstrukcije asinhronih motora sa dvostrukim ili dubokim žljebovima. Mada je princip rada u oba slučaja isti, bolje je objasniti ga na motoru sa dvostrukim žljebovima.



Spoljni ili polazni kavez napravljen je od legura bakra sa povećanim otporom a unutrašnji ili radni kavez napravljen je od bakarnih provodnika. Pri puštanju u pogon, u oba kaveza dolazi do indukovanja elektromotorne sile i struje kao posledice, obzirom da su kavezi kratko spojeni. Fluks polaznog namotaja zatvaraće se oko oba kaveza, a fluks radnog kaveza samo oko njega. To znači da će inuktivnost radnog kaveza biti veća od inuktivnosti polaznog kaveza. U trenutku puštanja u pogon, kada je klizanje  $s = 1$  i frekvencija u rotoru ili sekundaru  $f'' = s \cdot f' = f$ , javlja se veliki otpor radnog kaveza i kao posledica toga, veći deo struje uspostavlja se kroz polazni kavez. U normalnom radu kada je  $n = n'$ , frekvencija u rotoru je jako mala kao i inuktivni otpor radnog kaveza. Veći deo struje prelazi zbog toga u radni kavez.

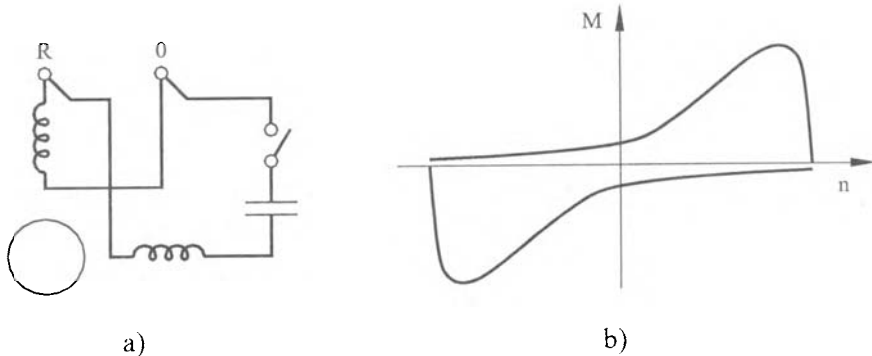


Slika 25. Rasuti fluksevi a) kao i momenti b) polaznog i radnog namotaja tokom zalatnja asinhronog motora sa kratkospojenim rotorom

#### 04.07. Puštanje u rad jednofaznih asinhronih motora ( kondenzatorski motori )

Još je Tesla pokazao da se obrtno magnetsko polje može dobiti pomoću dva prostorno pomenjena namotaja kroz koje protiču i vremenski pomenjene struje. U praksi je ovo teže ostvarljivo jer postoje standardni trofazni i monofazni sistemi. Međutim, obrtno magnetsko polje moguće je ostvariti i samo sa jednom fazom u posebnim slučajevima.

Lablan je u svojoj teoremi definisao da se svako nepokretno naizmjenično polje može rastaviti na dva obrtna polja sa upola manjim amplitudama, a koja se obrću u suprotnim smerovima istim brzinama ( $\omega t$ ). U praksi je ovo dosta interesantna pojava jer se uključanjem samo jedne faze i istovremenim mehaničkim pokretanjem rotora u jednom ili u drugom smeru može dobiti pogon sa nekom umanjenom snagom.



Slika 26. Puštanje u rad jednofaznih motora a) i momentna karakteristika b)

Za primenu u monofaznim mrežama prave se posebne konstrukcije mašina kod kojih postoje dva prostorno pomena namotaja na statoru. Da bi se dobilo vremensko kašnjenje između struja kroz radni i pomoćni namotaj, na red sa njim stavlja se kondenzator, čime se postiže određeni fazni pomak. Na ovaj način pomoću dva namotaja stvara se obrtno magnetsko polje i rotor počinje da se obrće.

Posle određenog vremena zaletanja pomoćna faza se može isključiti, a može se i neprestano nalaziti u pogonu da bi se popravio faktor snage mašine. Ovaj način puštanja u pogon naročito je važan za manje asinhronne motore.

#### 04.08. Regulacija brzine asinhronih motora

Poznato je da se brzina obrtanja asinhronog motora od praznog hoda do punog opterećenja menja za par procenata, tako da je regulacija brzine dosta veliki problem. Efikasnost regulacije brzine karakterišu:

- opseg regulacije ( $n_{\max} - n_{\min}$ )
- cena opreme i stepen iskorišćenja regulatora
- kvalitet regulatora (kontinualna regulacija)
- jednostavnost i pouzdanost regulacije

Polazeći od obrasca za brzinu obrtanja

$$n = (1 - s) \cdot 60 \cdot f / p \quad (4.20)$$

vidi se da se brzina može menjati promenom klizanja, učestanosti ili broja pari polova.

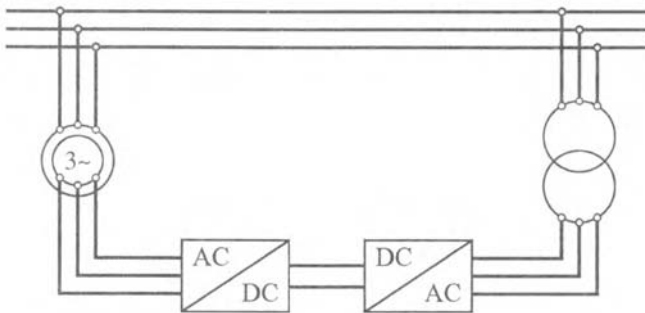
### 1. Rotorski otpornik

Regulacija brzine obrtanja asinhronih motora sa namotanim rotorom prikazana je na slici 21. Važno je napomenuti da, ako se regulacija brzine vrši na ovaj način, moraju postojati otpornici predviđeni za trajan pogon, tako da se ovi otpornici razlikuju od otpornika koji služe za puštanje u pogon, jer su ovi predviđeni za kratkotrajan rad. Pored toga, regulacija brzine ovom metodom je skokovita, a metoda je dosta rasipna. Ovom metodom može se postići pun ili delimičan opseg regulacije brzine na dosta jednostavan i pouzdan način, tako da se nekada dosta koristila a danas retko.

### 2. Podsinhrona kaskada

Radi velikih investicionih troškova pogodna je samo kod asinhronih motora sa namotanim rotorom velikih snaga jer se deo energije kočenja vraća u primarnu mrežu. Sam princip rada je jednostavan. Energija rotora se umesto beskorisnog rasipanja na toplotu u otpornicima pretvara u trofaznu električnu i vraća u mrežu. Prvo se iz naizmjeničnog prebacuje u jednosmeran oblik a zatim se preko invertora i transformatora vraća u napojnu mrežu.

Metoda je jako efikasna, a kvalitet regulacije, stepen iskorišćenja i opseg promene brzine su veliki. Mana je velika investicija. Ova metoda regulacije brzine obrtanja proistekla je iz prethodne, sa rotorskim otpornikom, ali tek kada su razvijeni energetske pretvarači.

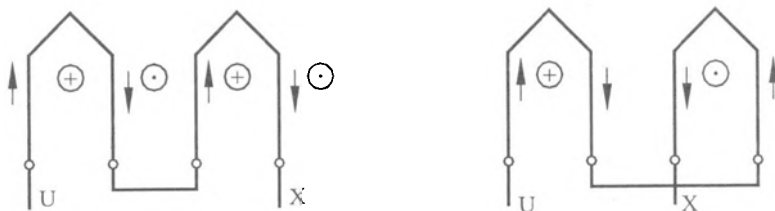


Slika 27. Podsinhrona kaskada

### 3. Promenom broja pari polova

Ovo je dosta rasprostranjena metoda regulisanja brzine obrtanja kada je potrebno da pogonski asinhroni elektromotor sa kratkospojenim rotorom ima dve ili tri brzine obrtanja. U brodogradnji često postoje takve potrebe.

Polazeći od jednačine da je brzina obrtanja obrnuto proporcionalna broju pari polova, moguće je na stator staviti dva ili tri namotaja sa različitim brojem polova i na taj način ostvariti više brzina obrtanja. Pored toga, moguće je staviti jedan namotaj koji ima više izvoda, kao što je prikazano na slici 28.



a) četvoropolna sprega

b) dvopolna sprega

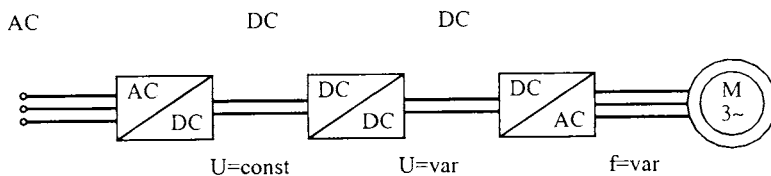
Slika 28. Promena brzine obrtanja promenom broja pari polova

Veživanjem namotaja statora kao što je prikazano na slici a) a prema smerovima struje, može se zaključiti da se dobijaju četiri pola ( $p = 2$ ), a ako se krajevi vežu kao što je prikazano na slici pod b), prema smerovima struje može se zaključiti da se dobija svega dva para polova ( $p = 1$ ). Pored brzine obrtanja, promenom pari polova menjaju se i sve ostale karakteristike motora.

#### 4. Promenom učestanosti primarne mreže ( sa inverterom )

Ovo je savremeno i vrlo kvalitetno rešenje za regulaciju brzine obrtanja asinhronih motora sa kratkospojenim rotorom. Polazeći od izraza za napon

$$U = 4,44 \cdot k \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{ob}$$



Slika 29. Principijelna shema regulacije brzine obrtanja asinhronih motora naponsko frekventnim inverterom

dobija se, uslov koga je potrebno ispuniti da bi se izbeglo prezasićenje magnetskog kola ili da obrtni fluks ne prede maksimalnu vrednost

$$\Phi_{ob} = konst = k \cdot \frac{U_{var}}{f_{var}} \quad (4.21)$$

iz ovog izlazi i uslov za uređaj kojim se vrši regulacija brzine obrtanja asinhronog motora sa kratkospojenim rotorom. U celom opsegu promene brzine, a da magnetsko kolo ne bi bilo prezasićeno, potrebno je da se odnos napona i frekvencije održava stalan.

Važno je napomenuti da se promenom učestanosti koja se dobija iz primarne mreže i primenom invertora radne karakteristike elektromotora malo menjaju. Ovaj metod regulacije brzine obrtanja asinhronih mašina je jako efikasan mada je sam uređaj složeniji a samim tim i investiciono skuplji.

#### **04.09. Pravila Jugoslovenskog registra brodova za asinhronne mašine**

Radi primena u brodogradnji, stalno se eksperimentiše, tako da se razvijaju stalno nove vrste motora [07] sposobnih da dugo vremena rade i na velikim morskim dubinama. Ispitivanja asinhronih motora snage 5kW pokazala su da za sada ovi motori sa posebnim zaptivanjem tpe rad na izuzetno velikim dubinama u morskoj vodi.

Asinhroni motori sa kratkospojenim rotorom se široko koriste na svim plovnim objektima za pogon posebnih uređaja. Manji asinhroni motori se puštaju u pogon direktnim uključanjem, a veći kao za pogon kormilarskih uređaja ili sidrenih vitala preko sprege zvezda-trougao. Razna vitla, sidrena ili vučna, u principu poseduju dva ili više pari polova za postizanje određenih brzina.

Mada Jugoslovenski registar brodova [08] nadgleda konstrukciju i zaštitu asinhronih motora, za posebne slučajeve primene na brodu, postoje i posebni propisi.

Polazni moment električnog motora kormilarskog uređaja sa direktnim električnim pogonom treba da iznosi barem 200% nominalnog.

Elektromotor naizmenične struje sa kratko spojenim rotorom za pogon sidrenog i priteznog vitla treba da bude takav da posle rada sa nominalnim opterećenjem u trajanju od 30min, izdrži u zakočenom stanju pod nominalnim naponom najmanje 30s za sidreno vitlo i 15s za pritezno vitlo. Kod motora sa polno preklopivim namotajem ovaj zahtev se odnosi na namotaj koji daje najveći polazni moment. Elektromotor naizmenične struje sa namotanim rotorom treba da izdrži navedeni režim zakočenosti pod naponom, pri momentu 200% nominalnog, pri čemu napon može biti nešto niži od nazivnog.

Rotori električnih mašina naizmenične struje treba da izdrže u trajanju od 2min bez oštećenja i trajnih deformacija povećanje brzine obrtaja od 120% najveće brzine obrtaja u praznom hodu.

Posebni propisi i preporuke [09] dolaze i od drugih klasifikacionih društava. Motori elektrohidrauličkih pogona kormilarskih uređaja i njihovi pretvarači treba da budu predviđeni za trajan rad sa intermitiranim opterećenjem od 15% u ciklusu od 10min. Motori električnih pogona na sve ovo treba da izdrže i uticaj udarnih ili polaznih struja pri pokretanju.

#### **04.10. Literatura**

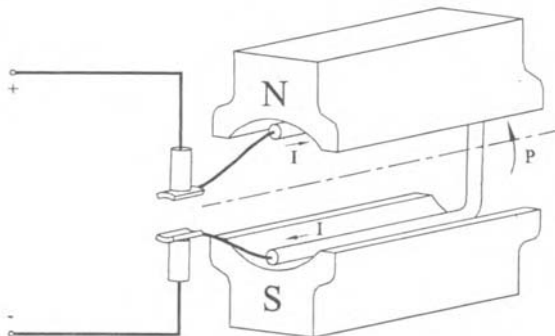
01. Mitraković B., Nikolić N., Asinhronne mašine, Naučna knjiga, Beograd, 1975.
02. Miljanić P., Elektrotehnika, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
03. Jurković B., Elektromotorni pogoni, Školska knjiga, Zagreb, 1983.
04. Chapman L., The Marine Power Plant, McGraw-Hill book company, New York, 1942.
05. Rade Končar, Tehnički priručnik, Zagreb, 1980.
06. Sever, Niskonaponski asinhroni motori, Subotica, 1979.
07. Vetohin V. I., Novbiii pogružnoii elektrodvigatelb tipa AMB – 5, Sudostroenie 4, 1997, 55.
08. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe, Električni uređaji - deo 9, Beograd, 1994.
09. EEC, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovnim putevima, OUN, Njujork, 1993.

## 05. JEDNOSMERNE MAŠINE

Jednosmerne mašine su električne mašine koje se koriste u jednosmernoj mreži. Sve električne mašine imaju obostrano ili reverzibilno dejstvo, što znači da se mogu koristiti u motornom ili generatorskom režimu. Ako se u električnoj mreži vrši pretvaranje električne energije u mehanički rad kaže se da mašina radi u motornom pogonu, a ako se vrši pretvaranje mehaničkog rada u električnu energiju kaže se da mašina radi u generatorskom režimu. Na brodovima su nekada [01] jednosmerne električne mašine korišćene i kao generatori i motori, ali se na savremenim brodovima retko mogu sresti jednosmerni generatori većih snaga, jer su ih naizmjenični generatori sa statičkim pretvaračima potpuno istisnuli iz upotrebe. Na nekim našim starijim brodovima moguće je još naći celu jednosmernu mrežu na naponskom nivou 110V.

### 05.01. Princip rada mašina za jednosmernu struju

Teorija rada kao i osnovne jednačine o radu jednosmernih mašina poznate su i detaljno objašnjene u literaturi [02-06]. Svaka mašina za jednosmernu struju sastoji se od statora na kome su postavljeni elektromagneti ili permanentni (stalni) magneti, rotora sa namotajima smeštenim u žlebove i komutatora na koji naležu ugljene četkice. Bez obzira radi li u generatorskom ili motorskom režimu, a posebno u ovom drugom, mašina se treba prethodno ili istovremeno sa uključenjem na mrežu pobuditi. Na slici 30 pojednostavljeno je prikazana mašina za jednosmernu struju.



Slika 30. Shematski prikaz mašine za jednosmernu struju sa ugljenim četkicama, lamelama i provodnikom koji se okreće

Pri okretanju rotora, namotaji presecaju magnetsko polje statora tako da se u njima indukuje elektromotorna sila u skladu sa Faradejevim zakonom elektromagnetske indukcije. Na krajevima mašine pojavljuje se elektromotorna sila usled koje se u spoljnom kolu može uspostaviti električna struja. U ovom slučaju, mašina radi kao generator pretvarajući mehanički rad u električnu energiju.

Kada kroz namotaje rotora teku jednosmerne struje, a ako se uzme u obzir da se nalaze u magnetskom polju statora, stvaraju elektromagnetske sile i mehanički moment na vratilu rotora čiji smer možemo odrediti u skladu sa pravilom leve ruke. Komutator pri obrtanju rotora prekida struje u pojedinim navojima i sprečava promenu smeru mehaničkog momenta. U ovom slučaju, mašina radi kao elektromotor pretvarajući električnu energiju u mehanički rad.

### ***Princip rada generatora jednosmerne struje***

Polazeći od izraza za elektromotornu silu jednog provodnika u žlebu rotora

$$e = \vec{l} \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

gde  $\vec{l}$  označava vektor dužine provodnika,  $\vec{v}$  vektor brzine kojom provodnik preseca magnetski fluks, a  $\vec{B}$  vektor gustine magnetskog fluksa. Sa slike se može videti da su ovi vektori međusobno normalni. Ubacujući u ovaj izraz poznate relacije

$$V = R \cdot \omega = R \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad ;$$

$$B = \Phi \cdot s$$

lako se može izvesti da je

$$E = k \cdot n \cdot \Phi \quad (5.01)$$

gde je  $n$  brzina obrtanja rotora,  $\Phi$  ukupan fluks po polu, a  $k$  konstruktivna konstanta.

Indukovana elektromotorna sila generisana  $E$  veća je od srednje vrednosti napona na krajevima mašine  $U$  za onoliko koliko iznosi pad napona u kolu rotora ( $R_a \cdot I + \Delta U$ ).

$$E = U + R_a \cdot I + \Delta U$$



Ova jednačina može se napisati i u pogodnijem obliku za izlazni napon:

$$U = E - R_a \cdot I - \Delta U \quad (5.02)$$

gde je  $R_a$  ukupan otpor rotora,  $I$  srednja vrednost struje indukta a  $\Delta U$  pad napona na četkicama. Važno je napomenuti da se električne mašine konstruišu tako da pad napona na omskom otporu indukta iznosi svega nekoliko procenata vrednosti elektromotorne sile pri nominalnom radu. Pad napona na četkicama još je manji.

### ***Princip rada motora jednosmerne struje***

Napon izvora priključen na krajeve motora veći je od indukovane elektromotorne sile za vrednost pada napona u kolu indukta

$$U = E + R_a \cdot I + \Delta U \quad (5.03)$$

Obrtni moment koji deluje na induct može se izvesti polazeći od izraza za elektromagnetsku silu koja deluje na jedan provodnik (4.08)

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

gde je  $I$  struja koja protiče kroz provodnik,  $\vec{l}$  vektor dužine provodnika a  $\vec{B}$  vektor gustine magnetskog fluksa. Elektromagnetski moment koji deluje na sve provodnike rotora može se naći razvijanjem ove formule, opet pretpostavljajući da su vektori normalni, tako da se na kraju dobija:

$$M = C \cdot \Phi \cdot I \quad (5.04)$$

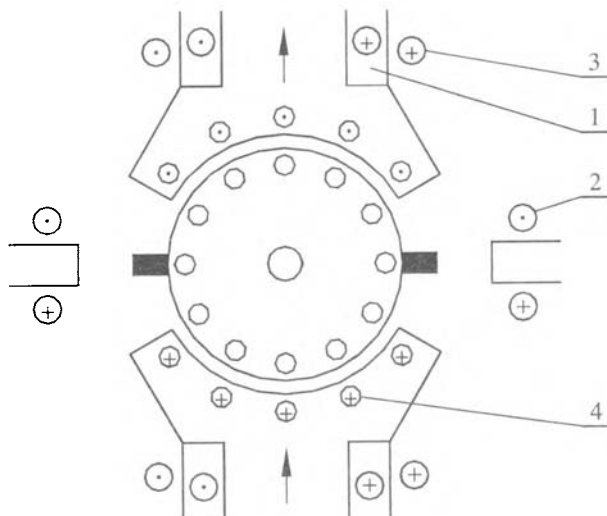
pri čemu je  $C$  konstruktivna konstanta. Ovaj elektromagnetski moment dobijen međusobnim dejstvom magnetskog polja i električne struje, pojavljuje se kao mehanički i pokreće vratilo rotora.

## **05.02. Magnetska reakcija indukta**

Osnovno magnetsko polje u mašini za jednosmernu struju uspostavlja se između polova na statoru a kroz induct mašine. Pri opterećivanju mašine za jednosmernu struju, kada kroz induct teku velike struje, javlja se dodatni magnetski fluks indukta čiji je smer normalan u odnosu na smer osnovnog magnetskog polja. Dejstvo ovog magnetskog fluksa kombinovano sa osnovnim magnetskim fluksom

induktora naziva se magnetska reakcija indukta. Ovo rezultantno magnetsko polje koje se može dobiti superpozicijom ovih flukseva, unosi dosta izmena u rad mašine. Magnetsko polje mašine više nije homogeno na površini polova i u vazдушnom prostoru, a i neutralna zona se pomera iz geometrijske simetrale za neki ugao. Na ovaj način, magnetska reakcija uzrokuje povećanje gubitaka u gvožđu indukta, a može dovesti i do proboja izolacije između dve susedne lamele na kolektoru. Zbog toga je neophodno suzbiti na neki način magnetnu reakciju indukta.

Smetnje koje stvara magnetska reakcija indukta su veće što je mašina veća pa ih je kod većih mašina potrebno ograničiti. Zato se postavlja jedan ili više namotaja koji su redno vezani sa armaturnim namotajem, tako da im je fluks koga stvaraju proporcionalan struji opterećenja.



Slika 31. Magnetska reakcija indukta 1-pobudni namotaj, 2-pomoćni polovi, 3-kompaundni namotaj, 4-kompenzacioni namotaj

*Pomoćni polovi* su izvedeni od feromagnetskog materijala a postavljeni su u neutralnu zonu. U ovom prostoru pomoćni polovi suzbijaju reakciju indukta, ali ne i ispod polova. Postavljaju se na svim mašinama snage iznad 1kW iz razloga da bi se uglavnom poboljšao proces komutacije.

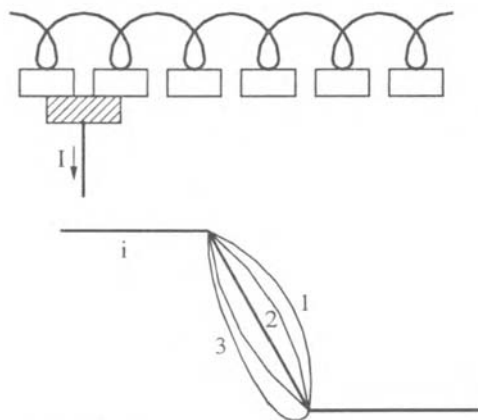
*Kompaundni namotaj* se postavlja na glavne polove tako da njegovo delovanje pomaže osnovno magnetsko polje. Time se nadoknadjuje raspored fluksa usled reakcije indukta, ali se istovremeno pojavljuju i neke druge mane.

*Kompenzacioni namotaj* se postavlja u žlebove glavnih polova i kroz njega protiče struja suprotnog smera od struje armature, tako da stvara fluks koji poništava deformisanje magnetskog polja ispod glavnih polova. Ovaj namotaj stavlja se kod najvećih mašina.

### 05.03. Komutacija

Komutacija je skup pojava vezanih za promenu struje u jednoj sekciji namotaja indukta. Struja u sekciji namotaja indukta menja smer kada sekcija pri obrtanju prolazi kroz neutralnu magnetnu zonu. Promena smera struje ne vrši se trenutno već traje izvesno vreme koje zavisi od brzine obrtanja rotora kao i od dimenzija kolektorskih lamela i ugljenih dirki.

Promena struje u nekom namotaju tokom vremena komutacije prikazana je na slici 32. Iskrenja i varničenja su vezana za akumulisanje magnetne energije  $\frac{1}{2}L \cdot i^2$  u namotaju. Pri prekidanju struje, a usled ove energije, dolazi do stvaranja elektromotorne sile samoindukcije  $e_s = L \frac{di}{dt}$ . Ukoliko je u trenutku rastavljanja četkica i kriške na lameli  $\frac{di}{dt} = 0$ , napon samoindukcije je nula i tada nema varničenja.



Slika 32. Struja u sekciji pri komutaciji  
1. potkomutacija 2. linearna komutacija 3. nadkomutacija

## 05.04. Vrste pobude i označavanje krajeva jednosmernih mašina

Kako postoji više vrsta konstruktivno izvedenih pobudnih namotaja, to će se izvršiti proučavanje osnovnih karakteristika mašina prema vrsti pobudnog kola.

Prema načinu pobuđivanja, mašine za jednosmernu struju mogu se podeliti na

- mašine sa rednom pobudom
- mašine sa nezavisnom pobudom
- mašine sa paralelnom pobudom
- mašine sa složenom pobudom

Pored ovog, potrebno je napomenuti da se mašine u generatorskom režimu same mogu inicijalno pobuđivati na osnovu zaostalog ili remanentnog magnetizma u magnetskom kolu, da bi se kasnije pobuđivanje obavljalo na jedan od napred navedenih načina.

Postoji konvencija za označavanje krajeva namotaja jednosmerne mašine.

- A i B** - namotaj indukta
- C i D** - namotaj za paralelnu pobudu
- E i F** - namotaj za rednu pobudu
- G i H** - namotaj pomoćnih polova (zajedno sa kompenzacionim namotajem )
- J i K** - namotaj za nezavisnu pobudu

Smer obrtanja je desni kada se mašina obrće u smeru kazaljke na satu posmatrano sa strane suprotno od kolektora. Kao pozitivan smer obrtanja uzima se desni smer za motor a levi za generator. Ovo je važno da ne bi došlo do razbuđivanja mašine. Ako se generator okreće u negativnom smeru, može doći do razbuđivanja ili neutralisanja zaostalog ili remanentnog magnetizma. U tom slučaju, znači posle razbuđivanja magnetskog kola, potrebno je prvo na trenutak namagnetisati pobudni namotaj a zatim nastaviti sa radom.

Smer okretanja na električnim shemama za priključenje mašina, računa se na taj način da se posmatra smer kretanja struje. Ako odgovara azbučnom redu, to je pozitivan smer.

Postoji jedno vrlo važno empirijsko pravilo kojim se određuje kriterijum rada jednosmerne mašine:

1. smer armaturne struje
2. smer pobudne struje
3. smer brzine obrtanja mašine
4. karakter mašine motor-generator

Ovo pravilo kaže da nije moguće menjati jedan već isključivo paran broj kriterijuma mašine.

### 05.05. Mašine jednosmerne struje sa rednom pobudom

Kod mašine sa rednom pobudom su pobudni namotaj i namotaj indukta vezani na red tako da struja koja teče kroz indukt, prolazi i kroz pobudni namotaj. To znači da je u većem delu radnog opsega mašine, dok se ne dođe u deo perioda zasićenja, pobudni fluks srazmeran struji opterećenja.

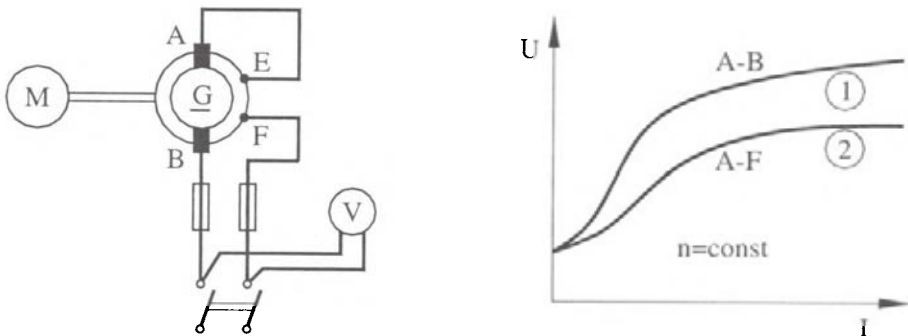
$$\Phi \approx I \quad (5.05)$$

Tek pri većim opterećenjima i strujama kada magnetski materijal ude u zasićenje, ne postoji srazmernost između magnetskog fluksa i struje, jer sa povećanjem struje ne dolazi do povećanja fluksa.

#### 05.05.01 Generator sa rednom pobudom

Osnovna karakteristika svakog generatora je promena izlaznog napona sa opterećenjem pri stalnoj brzini obrtanja. Oblik ove krive može se dobiti na osnovu naponske jednačine za generator:

$$U = E - R_a \cdot I - \Delta U \approx k \cdot n \cdot I - R_a \cdot I - R_c \cdot I$$



Slika 33. Shema generatora sa rednom pobudom i spoljna karakteristika

Pri ovome treba imati u vidu da je na početku namagnetisanja magnetskog materijala veza struje i fluksa linearna, da bi kasnije, po dostizanju zasićenja magnetskog materijala ova zavisnost bila funkcija krive magnetćenja materijala.

Promena napona pri stalnoj brzini obrtanja generatora  $n = \text{const}$  a pri promenljivoj opterećenju naziva se spoljna karakteristika. Merenjem se dobija kriva  $U = f(I)$ . Pošto se napon na krajevima generatora znatno menja sa opterećenjem, to je primena ovih generatora ograničena samo na neke specijalne slučajeve. U savremenoj brodogradnji se ovakvi generatori ne primenjuju.

#### 05.05.02 Motor sa rednom pobudom

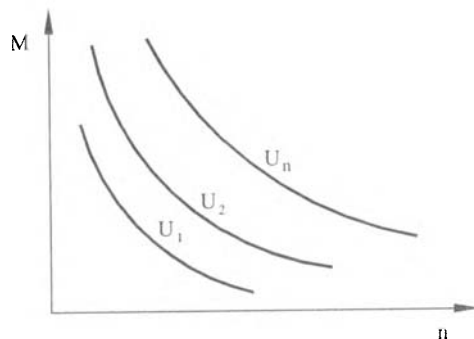
Za rad rednog motora karakteristične su velike promene fluksa sa opterećenjem. Brzina motora menja se u širokim granicama u funkciji promene opterećenja. Iz jednačina (5.01) i (5.03) a uz pretpostavku da je pad napona na četkicama zanemarljiv,  $\Delta U \approx 0$  lako se može izvesti obrazac za brzinu obrtanja motora

$$n = \frac{U - R \cdot I}{k \cdot \Phi} \quad (5.06)$$

U delu gde magnetski materijal nije zasićen, moguće je zameniti  $\Phi$  sa strujom  $I$  tako da se može napisati:

$$n = \frac{U - R \cdot I}{k_1 \cdot I} \quad (5.07)$$

U praznom hodu fluks je mali, pa postoji opasnost od pobega motora. Zato se motor nikada ne sme staviti u pogon, pod pun napon, bez barem 20 - 30 % nominalnog opterećenja.



Slika 34. Mehanička karakteristike rednog motora

Moment rednog motora može se naći približno po jednačini

$$M = c \cdot \Phi \cdot I \approx c_1 \cdot I^2 \quad (5.08)$$

Za opterećenja ispod nominalnih, kada je karakteristika magnećenja linearna, može se zavisnost momenta od brzine obrtanja obzirom na jednačine (5.08) i (5.07) napisati u obliku

$$M = c_2 \frac{U^2}{n^2}$$

Familije karakteristika rednog motora prikazane su na slici 34.

Regulisanje brzine rednog motora radi se promenom napona napajanja ili promenom opterećenja. Zbog toga što ima izuzetnu karakteristiku da pri opterećenju moment raste a brzina obrtanja pada, ovi motori se ponekad nazivaju i vučni. Redni motor teško može preći u generatorski režim i to samo ako se izvrši ukištanje krajeva jednog namotaja. Redni motor se ne može kočiti usled toga u generatorskom režimu.

## 05.06. Mašine jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom

Kod mašine sa nezavisnom pobudom se pobudna struja dobija iz nezavisnog izvora jednosmerne struje. To znači, da je pobudna struja stalna a time i pobudni fluks i da pobuda ne zavisi od opterećenja. Za ove mašine se može napisati da je

$$\Phi_p = I_p = const. \quad (5.09)$$

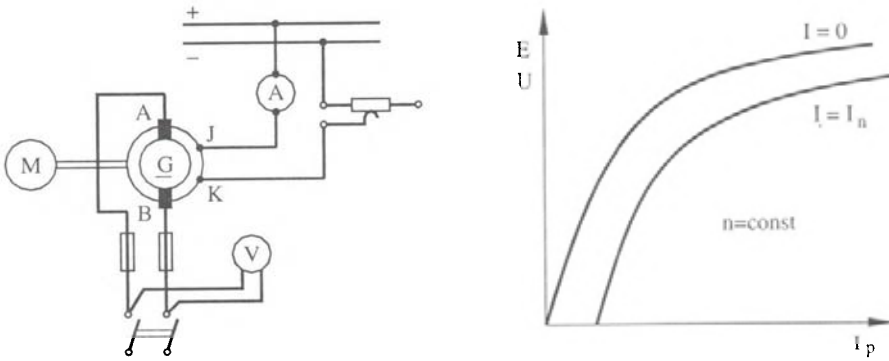
### 05.06.01 Generator sa nezavisnom pobudom

Napon na krajevima generatora sa nezavisnom pobudom može se pratiti u skladu sa jednačinom:

$$U = E - R_a \cdot I - \Delta U = k \cdot n \cdot \Phi - R_a \cdot I - \Delta U$$

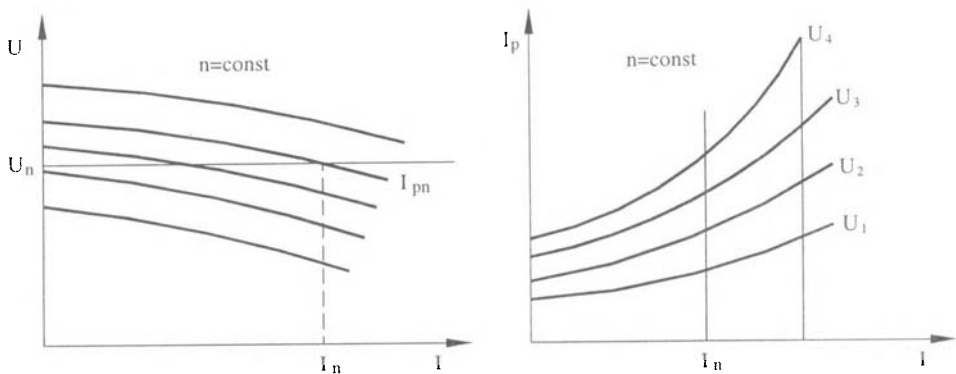
Na slici 35 prikazane su dve krive na jednom dijagramu. Karakteristika praznog hoda predstavlja zavisnost elektromotorne sile od pobudne struje  $E = f(I_p)$  pri  $n = const$ . Karakteristika opterećenja predstavlja zavisnost napona na krajevima generatora od pobudne struje  $U = f(I_p)$  a uz uslov stalne brzine obrtanja  $n = const$  i stalne struje opterećenja  $I = const$ .

Spoljna karakteristika predstavlja zavisnost napona na krajevima mašine od struje opterećenja pri stalnoj brzini obrtanja  $n = const$  i pri stalnoj pobudnoj struji  $I_p = const$ . Normalno je da na osnovu povećanih padova napona u namotajima i na četkicama dolazi do blagog pada izlaznog napona sa povećanjem struje opterećenja.



Slika 35. Shema generatora sa nezavisnom pobudom i karakteristika opterećenja

Karakteristika regulacije pokazuje zavisnost promene pobudne struje u funkciji struje opterećenja  $I_p = f(I)$  da bi napon na krajevima generatora ostao stalan  $U = const$  a pri stalnoj brzini obrtanja  $n = const$ . Da bi napon na opterećenju ostao stalan a u skladu sa prethodnom naponskom jednačinom, potrebno je povećavati pobudnu struju sa opterećenjem. Dobijene familije krivih prikazane su na slici 36.



Slika 36. Spoljna karakteristika i karakteristika regulacije

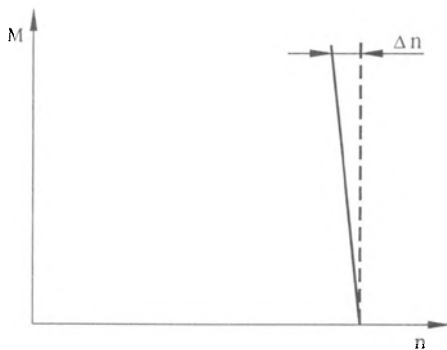


### 05.06.02 Motor sa nezavisnom pobudom

Motori sa nezavisnom pobudom imaju nezavisno napojen pobudni namotaj koji stvara približno stalan fluks. Brzina motora pri opterećenju uglavnom je stalna u skladu sa jednačinom.

$$n = \frac{U - R \cdot I}{k \cdot \Phi} = k_1 \cdot (U - R \cdot I) = n_o - \Delta n \approx const \quad (5.10)$$

Kako su padovi napona mali sa opterećenjem, to je i promena brzine obrtanja mala, tako da se praktično brzina obrtanja motora ove vrste vrlo malo menja sa opterećenjem. Zbog toga se kaže da su ovo motori sa "tvrdom karakteristikom" brzine obrtanja.



Slika 37. Karakteristike motora sa nezavisnom pobudom

Moment motora sa nezavisnom pobudom može se naći približno po jednačini

$$M = c \cdot \Phi \cdot I \approx c_1 \cdot I \quad (5.11)$$

Karakteristike motora sa nezavisnom pobudom prikazane su na slici 37.

Regulisanje brzine motora sa nezavisnom pobudom radi se promenom napona napajanja ili promenom fluksa (promenom pobudne struje).

Motor sa nezavisnom pobudom lako može preći u generatorski režim i može se vršiti kočenje radne mašine na ovaj način. Generatorski režim se može ostvariti promenom smera obrtanja, promenom smera pobudnog fluksa ili promenom smera armaturne struje.

## 05.07. Mašine jednosmerne struje sa paralelnom ( otočnom ) pobudom

Pobudni namotaj i namotaj indukta su vezani paralelno. To znači da su indukt i induktor priključeni na isti napon. Kod ovih mašina je pobudni fluks srazmeran naponu na priključnim krajevima mašine.

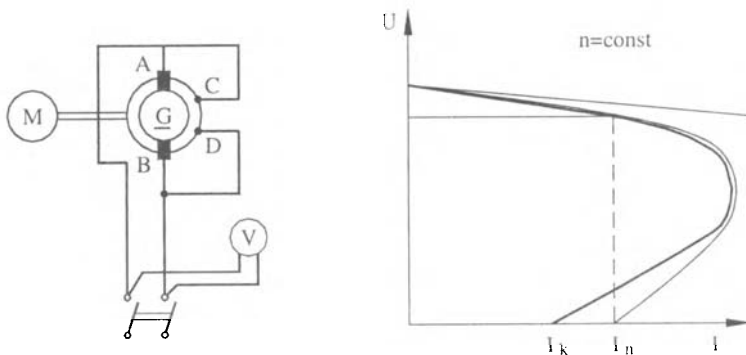
$$\Phi \approx U \quad (5.12)$$

### 05.07.01 Generator sa paralelnom pobudom

Naponska jednačina za ovu vrstu generatora glasi:

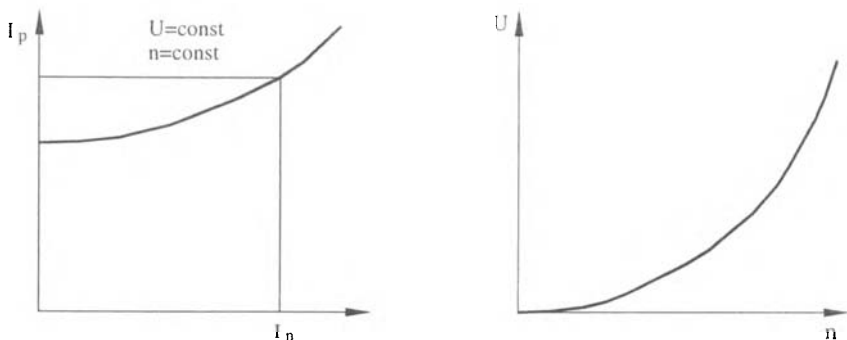
$$U = E - R_a \cdot I - \Delta U = k \cdot n \cdot \Phi - R_a \cdot I - \Delta U$$

Generator sa paralelnom pobudom može se sam pobuditi ako postoji u magnetskom kolu zaostali, remanentni magnetizam i ako se taj fluks sabira sa fluksom koji nastaje od pobudnog namotaja. Na slici 38 prikazana je shema generatora sa paralelnom pobudom i spoljna karakteristika izlaznog napona pri opterećenju a pri stalnoj brzini obrtanja.



Slika 38. Shema generatora sa paralelnom pobudom i spoljna karakteristika

Karakteristika regulacije i zavisnost napona od brzine prikazani su na slici 39. Karakteristika zavisnosti napona od brzine obrtanja nije linearna jer se mora imati u vidu činjenica da pri povećanju brzine obrtanja raste i izlazni napon a sa time pobudna struja i pobudni fluks. Ovo uslovljava da se napon ne menja linearno sa brzinom obrtanja



Slika 39. Karakteristika regulacije i karakteristika zavisnosti napona od brzine obrtanja

#### 05.07.02 Motor sa paralelnom pobudom

Motori sa paralelnom pobudom imaju paralelno napojen pobudni namotaj koji stvara približno stalan fluks. Zbog toga se ovi motori ponašaju slično motorima sa nezavisnom pobudom.

Regulisanje brzine motora sa paralelnom pobudom radi se promenom napona napajanja i promenom fluksa.

Motor sa paralelnom pobudom lako može preći u generatorski režim i radna mašina se može kočiti na ovaj način. Slično kao kod motora sa nezavisnom pobudom, generatorski režim kod motora sa paralelnom pobudom može se ostvariti promenom smeru obrtanja, promenom smeru pobudnog fluksa ili promenom smeru armaturne struje.

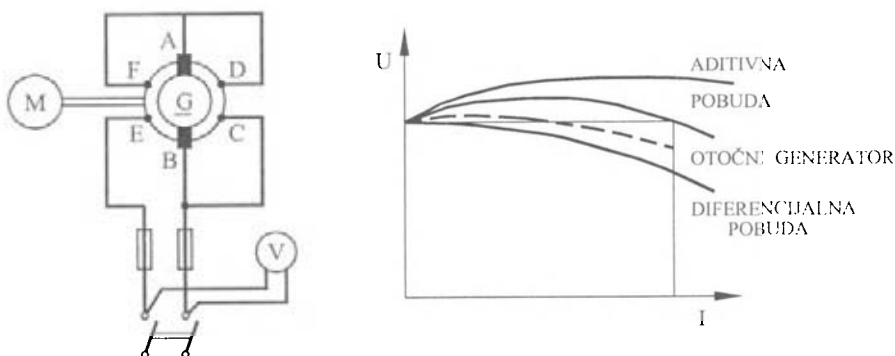
### **05.08. Mašine jednosmerne struje sa složenom pobudom**

Na polovima ove mašine nalaze se dva namotaja od kojih se jedan vezuje paralelno a drugi redno u odnosu na namotaj indukta. To znači da jedan stvara pobudni fluks koji je približno stalan, a drugi stvara fluks koji je direktna posledica struje opterećenja, tako da će sve ove mašine imati karakteristike koje u većoj ili manjoj meri imaju mašine sa rednom ili paralelnom pobudom.

#### 05.08.01 Generator sa složenom pobudom

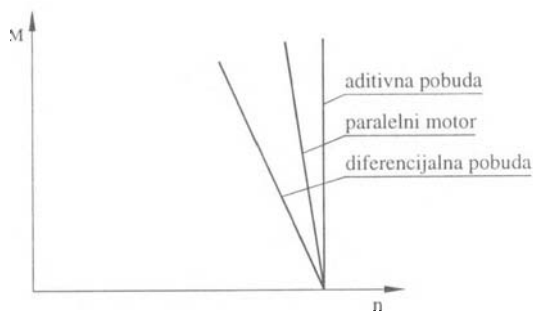
Prema tome da li se pobudni fluks rednog namotaja sabira ili oduzima od pobudnog fluksa paralelnog namotaja, generatori sa složenom pobudom mogu se

podeliti na generatore sa aditivnom ili diferencijalnom pobudom. Znači, kod prve vrste generatora se fluksevi rednog i paralelnog namotaja sabiraju, a kod drugog se oduzimaju. Shema generatora sa složenom pobudom kao i spoljne karakteristike generatora sa aditivnom i diferencijalnom pobudom prikazane su na slici 40.



Slika 40. Shema generatora i spoljne karakteristike generatora sa složenom pobudom

Uglavnom su svi generatori koji su se primenjivali na brodovima bili sa aditivnom pobudom. Ovi generatori posebno su konstruisani na taj način da im je spoljna karakteristika bila takva da su u praznom hodu i pri nominalnom opterećenju uz uslov nominalne brzine obrtanja imali nominalnu vrednost napona. Pri opterećenjima manjim od nominalnih, izlazni napon imao je više vrednosti od nominalnih (videti sliku 40) a kod većih opterećenja od nominalnih, napon se smanjivao.



Slika 41. Mehaničke karakteristike motora sa složenom pobudom

#### 05.08.02 Motor sa složenom pobudom

Motori sa složenom pobudom imaju paralelno napojen pobudni namotaj koji stvara približno stalan fluks i redno napojen pobudni namotaj čiji fluks zavisi od

opterećenja. Zato mu i karakteristike zavise od udela jednog ili drugog namotaja, tj. više ili manje približavaju se jednom ili drugom motoru.

Regulisanje brzine motora sa složenom pobudom radi se promenom napona napajanja ili promenom fluksa.

Motor sa složenom pobudom lako može preći u generatorski režim i može se vršiti kočenje radne mašine i motora na ovaj način.

### **05.09. Dalji razvoj električnih mašina za jednosmernu struju**

Jedna od prvih mogućih primena superprovodnika sa velikim jačinama struje i velikim jačinama magnetskog polja, bila je električni motor za pogon brodova.

U Velikoj Britaniji [07] je još 1969. godine razvijen jednosmerni superprovodni motor snage 2,5MW pri  $200 \text{ min}^{-1}$ . Za ovu namenu konstruisana je varijanta unipolarne mašine.

Unipolarna (homopolarna) mašina pripada specijalnim mašinama za jednosmernu struju koje imaju posebnu namenu a čiji su konstruktivni elementi različiti od običnih jednosmernih mašina. Princip rada ove mašine je jednostavan. Metalni disk ili valjak obrće se u magnetskom polju čiji je smer paralelan sa osom rotacije diska. Pošto je disk konstruisan od elementarnih isečaka pri čemu se svaki isečak može uporediti sa jednim provodnikom, to se pri kretanju diska u svakom provodniku indukuje elektromotorna sila. Preko ugljenih dirki (četkica), ova elektromotorna sila vodi se u spoljno kolo. Ova mašina proizašla je iz želje da se napravi jednosmerna mašina bez četkica. Odlikuje se niskim izlaznim naponom i izuzetno velikom strujom.

Mada su ove mašine, po svojim performansama, bile pogodne za električnu propulziju brodova, nisu našle širu primenu zbog teškoća oko praktične realizacije pogona. U međuvremenu su druge tehnologije uključujući energetska elektronika postale pogodnije za praktičnu primenu i počele da se koriste. Zadnjih desetak godina javila se realizacija MHD propulzije kao potpuno nova varijanta jednosmerne mašine kod koje se kao pokretan provodnik koristi morska voda, a o čemu će biti reči u 17. poglavlju.

### **05.10 Pravila Jugoslovenskog registra brodova za jednosmerne mašine**

Pravila za primenu jednosmernih mašina su se znatno menjala u zavisnosti od primene i razvoja tehnologije pravljenja novih materijala. Naši važeći propisi

klasifikacionog društva [08] neprestano dobijaju dopune i osavremenjuju se uglavnom od strane međunarodnih organizacija [09].

Elektromotor jednosmerne struje za pogon sidrenog i priteznog vitla treba da bude takav da posle rada sa nominalnim opterećenjem u trajanju od 30min izdrži u zakočenom stanju pod nominalnim naponom najmanje 30s za sidreno vitlo i 15s za pritezno vitlo. Navedeni režim zakočenosti treba da izdrže pri momentu 200% nominalnog, pri čemu napon napajanja može biti nešto niži od nazivnog. Posle ogleđa zakočenosti pod naponom, porast temperature ne treba da bude veći od 130% dozvoljene temperature.

Električni motori za jednosmernu struju treba da budu tako izgrađeni da mogu da razvijaju, bez zaustavljanja ili nagle promene brzine obrtanja, 50% povećanja obrtnog momenta za vreme 15s pri čemu napon treba da se održava na nominalnoj vrednosti.

Za generatore predviđene za paralelan rad treba da se predvidi najmanje zaštita od: preopterećenja, kratkog spoja, povratne struje ili snage, maksimalnog napona. Za zaštitu generatora od preopterećenja preporučuje se uređaj koji ima signalizaciju preopterećenja a koji deluje sa vremenskom zadržskom od 15min pri opterećenju od 100 do 110% nominalne struje i isključuje generator sa zadržskom, u skladu sa toplotnom izdržljivošću šticebnog generatora u predelu preopterećenja od 110 do 150% nominalne struje. Preporučuje se da zaštita od preopterećenja i vreme zadržske treba odabrati, obzirom na karakteristike preopterećenja pogonskog motora, tako da motor bude u mogućnosti da u predviđenom vremenu zadržske razvije neophodnu snagu. Za zaštitu od preopterećenja generatora ne treba upotrebiti zaštitne uređaje koji imaju mogućnost neposrednog ponovnog uključivanja generatora.

Generatori jednosmerne struje sa paralelnom pobudom treba da imaju automatske regulatore napona. Generatori jednosmerne struje sa složenom pobudom moraju da imaju nezavisne naprave za ručno regulisanje napona sa tačnošću od 1% za generatore do 100kW i 0,5% za generatore preko 100kW. Navedene granice regulisanja treba da se održe bilo u hladnom ili u toplom stanju kao i pri bilo kom opterećenju u području radnih opterećenja generatora. Regulator napona generatora paralelne pobude treba da bude tako izgrađen da se uključanjem pobude kratko spaja pobudni namotaj.

Agregati jednosmerne struje sa složenom pobudom treba da imaju takvu spoljašnju karakteristiku koja toplom generatoru, podešenom na nominalni napon, ne menja napon za više od  $\pm 1\%$  pri 20% opterećenja i ne više od  $\pm 1,5\%$  pri punom opterećenju za generatore snage preko 50kW a  $\pm 2,5\%$  za generatore manjih snaga. U području između 20 i 100% nominalnog opterećenja generatora sa složenom pobudom napon ne treba da pređe ove vrednosti:

- $\pm 3\%$  za generatore preko 50kW
- $\pm 4\%$  za generatore snage od 15kW do 50kW
- $\pm 5\%$  za generatore snage manje od 15kW

Agregati jednosmerne struje sa paralelnom pobudom treba da imaju takve spoljašnje karakteristike generatora i takve automatske regulatore napona da, pri opterećenju od praznog hoda do punog opterećenja, napon održavaju u granicama od  $\pm 2,5\%$  nominalnog napona.

Karakteristike regulatora broja obrtaja pogonskih motora generatora jednosmerne struje treba da budu takve da za opterećenja od  $20 \pm 100\%$  ukupnog nominalnog opterećenja, opterećenja pojedinih generatora ne treba da se razlikuje od veličine proporcionalne snagama generatora ili ne više od  $10\%$  nominalne snage najvećeg ili  $20\%$  nominalne snage najmanjeg generatora u paralelnom radu.

Generatori treba da budu tako izgrađeni da posle zagrevanja do ustaljene temperature koja odgovara nominalnom opterećenju, mogu da izdrže preopterećenje struje od  $50\%$  za vreme od 15s.

## 05.11. Literatura

01. Herbert S.L., Marine engineering , vol. 2, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1944, 459-495.
02. Fitzgerald - Kingsley, Električne mašine, Naučna knjiga, Beograd, 1962.
03. Volčkov I., Mašine za jednosmernu struju, Skripte elektrotehničkog fakulteta, Beograd, 1972.
04. Miljanić P., Elektrotehnika, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
05. Jurković B., Elektromotorni pogoni, Školska knjiga, Zagreb, 1983.
06. Rade Končar, Tehnički priručnik, Zagreb, 1980.
07. Appleton A., Superconductivity in propulsion, Proceedings of MHDS 91, Kobe 1991, 21-28.
08. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe, Knjiga 2, Električni uređaji, deo 9, Beograd, 1994.
09. EEC, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovnim putevima, OUN, Njujork, 1993.

## **06. IZBOR I ZAŠTITA MOTORA ZA BRODSKE ELEKTROMOTORNE POGONE (BEMP)**

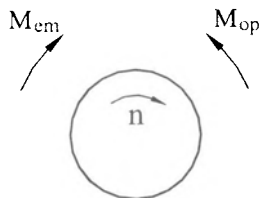
Prvi praktično realizovan elektromotorni pogon ostvaren je 1838 god na reci Nevi [01] kada je električni motor pokrenuo čamac sa 14 osoba. Krajem prošlog veka pojavljuje se jednosmerna električna mreža na brodovima, u prvo vreme samo za osvetljenje, a između svetskih ratova i trofazna naizmjenična za napajanje raznih vrsta potrošača. Najluksuzniji putnički brod "Queen Elisabeth II" ima instalisanu snagu generatora 20.600kVA. Na Dunavu najveću instalisanu snagu generatora ima putnički brod "Mozart" i to 3 x 600 kVA.

### **06.01. Osnovni pojmovi i osobine brodskih elektromotornih pogona (BEMP)**

Brodski elektromotorni pogon, kao i svaki drugi, sačinjavaju: radni mehanizam, elektromotor, spojni element, priključak na mrežu i upravljački deo.

Elektromotorni pogoni definisani su vremenskom zavisnošću korisne snage, snage električnih gubitaka i temperature motora. Brodski elektromotori razlikuju se od elektromotora za primenu na kopnu po klasi izolacije, po vrsti zaštite od morske soli, vlage, uljnih para i otpornosti na vibracije. Prema međunarodnim sandardima, postoji osam vrsta opterećenja električnih mašina. Važne karakteristike za brodske elektromotorne pogone su polazne karakteristike, kao polazni moment i polazna struja.

U opštem slučaju moment motora može delovati u smeru ili suprotno od smera obrtanja motora. Tako možemo razlikovati četvoro kvadrantni dijagram momenta i brzina obrtanja.



Slika 42. Delovanje momenata



U svakom elektromotornom pogonu mora biti zadovoljen uslov da je:

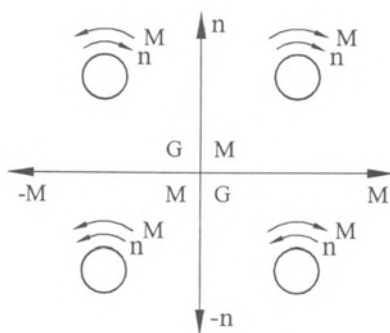
$$\Sigma M = 0 \quad (6.01)$$

Kod elektromotornih pogona ovo se može napisati i u obliku da je pogonski moment elektromotora jednak momentu opterećenja i momentu ubrzanja

$$M_{em} = M_{op} + M_{ubr} \quad (6.02)$$

Osnovna ( statička i dinamička ) stanja elektromotornog pogona su:

- |                              |                   |     |               |
|------------------------------|-------------------|-----|---------------|
| a. brzina obrtanja raste     | $M_{em} > M_{op}$ | ili | $M_{ubr} > 0$ |
| b. brzina obrtanja je stalna | $M_{em} = M_{op}$ | ili | $M_{ubr} = 0$ |
| c. brzina obrtanja opada     | $M_{em} < M_{op}$ | ili | $M_{ubr} < 0$ |



Slika 43. Karakter elektromotornih pogona

Karakter rada mašine može se odrediti na osnovu proizvoda mehaničkih karakteristika. Ukoliko je proizvod korisnog momenta i brzine obrtanja pozitivan, mašina radi u motornom režimu, a to je u prvom ili trećem kvadrantu. Ako je proizvod momenta i brzine obrtanja negativan, mašina se nalazi u generatorskom režimu rada i to je na slici 43 prikazano u drugom i četvrtom kvadrantu.

U prvom kvadrantu moment i brzina su pozitivni i pokazuju rad motora u direktnom smeru. U trećem kvadrantu su moment i brzina obrtanja negativni i pokazuju rad u inverznom smeru. U drugom i četvrtom kvadrantu brzina i moment imaju suprotne znake i u tom slučaju mašina radi kao generator ili kočnica. Jednokvadrantni pogoni prikladni su za rad motora samo u prvom i trećem kvadrantu. Dvokvadrantni omogućavaju vožnju ili kočenje u jednom smeru, dok četvorokvadrantni mogu raditi u sva četiri kvadranta i zato omogućavaju vožnju ili kočenje u direktnom ili inverznom smeru obrtanja.

Kada mašina radi u drugom i četvrtom kvadrantu, razvija momenat koji je suprotno orijentisan od brzine obrtanja radne mašine i usporava brzinu kočenjem. Mašina uzima mehaničku energiju od opterećenja i pretvara je u električnu. Rekuperativno kočenje podrazumeva vraćanje te energije u napojnu mrežu. Električna energija može biti potrošena na spoljnom otporniku ili u samom motoru, tako da to nazivamo dinamičko kočenje.

Mehaničko opterećenje predstavlja se kao obrtni moment u dijagramu  $M = f(n)$  a koje mora biti savladano pogonskim motorom. Presek krivih momenta pogonskog motora i momenta opterećenja, je tačka ravnoteža u kojoj sistem radi u ustaljenom stanju.

Svaki elektromotor mora izdržati mehanički moment na vratilu koji je barem 60% veći od nominalnog. Često se zahteva da elektromotor može izdržati moment koji je 2 pa čak i 2,5 puta veći od nominalnog. U brodogradnji, od elektromotora koji se koristi za čupanje sidara se zahteva da mora izdržati zakočeno stanje barem 30s i imati pri tome momenat  $2M_n$ .

## 06.02. Zagrevanje električnih mašina

Pogonski elektromotor bira se prema potrebnoj snazi radne mašine, ili prema vrednostima otpornog momenta i brzine kretanja pri tom momentu. U dinamičkim pogonima kao što je slučaj na brodu, izbor elektromotora vrši se uglavnom po dodatnim kriterijumima.

Kriterijum zagrevanja je jedan od osnovnih kriterijuma izbora snage elektromotora. Znajući da je zagrevanje električne mašine srazmerno njenim gubicima, cilj je određivanje tih gubitaka, usvajajući neke srednje ili ekvivalentne kao merodavne za odabir električne mašine.

### *Metod ekvivalentnih gubitaka*

Ako se u nekom intervalu ili ciklusu ponavljanja opterećenja, posmatraju odgovarajući gubici, srednja vrednost tih gubitaka može se dobiti kao zbir proizvoda tih gubitaka i njihovog vremena trajanja.

$$P_{\text{sc}} \cdot T = P_{\gamma_1} \cdot t_1 + P_{\gamma_2} \cdot t_2 + \dots + P_m \cdot t_n = \sum_{i=1}^n P_{\gamma_i} \cdot t_i \quad (6.03)$$

pri čemu je vreme trajanja ciklusa

$$T = t_1 + t_2 + \dots + t_n \quad (6.04)$$

Da bi se elektromotor mogao koristiti u potrebnom elektromotornom pogonu, potrebno je da su mu dozvoljeni ili nominalni gubici veći od ekvivalentnih ili srednjih

$$P_{\gamma n} \geq P_{\gamma ec} \quad (6.05)$$

Metoda srednjih gubitaka nije praktična, da bi se često koristila. Zato se više koriste izvedene i jednostavnije metode.

### ***Metod ekvivalentne struje***

Znajući da se gubici u mašini mogu podeliti na stalne i promenljive, pri čemu ovi drugi zavise, usled Džulovog zakona od kvadrata struje, može se napisati

$$P_{\gamma} = P_{com} + P_{var} = P_{com} + k \cdot I^2 \quad (6.06)$$

Jednačinu (6.06) možemo ubaciti u prethodnu jednačinu za ekvivalentne gubitke (6.03) i to za svaki interval vremena. Stalni gubici sa obe strane jednačine se potiru, tako da se posle sređivanja može napisati:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (6.07)$$

Izbor motora radi se analogno jednačini (6.05) da nominalna struja motora mora biti veća od ovako dobijene ekvivalentne

$$I_n > I_e \quad (6.08)$$

Ekvivalentna struja može se naći i po tačnijoj formuli

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T I^2 \cdot dt} \quad (6.09)$$

pri čemu je perioda  $T$  data jednačinom (6.04). Pošto je u praksi ovo dosta teško odrediti, više se koristi jednačina (6.07).

### **Metod ekvivalentnog momenta**

Kod mašina kod kojih je moment direktno srazmeran struji opterećenja ( $\Phi = const$ ), moguće je izbor raditi i metodom ekvivalentnog momenta uz uslov  $M = k \cdot \Phi \cdot I = k \cdot I$ , tako da se dobija direktno iz jednačine (6.07)

$$M_e = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (6.10)$$

Tačnije se ovo može izračunati pomoću formule

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T M^2 dt} \quad (6.11)$$

Normalno da je uslov ili kriterijum za izbor analogan prethodnom, tj da je

$$M_n > M_e \quad (6.12)$$

Dovoljno je iz kataloga izabrati prvu veću vrednost nominalnog momenta motora da bude veći od izračunate vrednosti ekvivalentnog.

### **Metoda ekvivalentne snage**

Ako je brzina obrtanja električne mašine približno stalna, može se prema poznatoj formuli

$$P = M\omega = M \frac{2\pi n}{60}$$

iskoristiti zamena momenata u jednačini (6.10) sa snagama. Na taj način dobija se metoda ekvivalentne snage koja praktično proizilazi iz prethodne. Osnovna jednačina za izbor snage elektromotora je:

$$P_e = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (6.13)$$

u opštem obliku se ova jednačina može napisati u obliku:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P^2 \cdot dt} \quad (6.14)$$

Izbor nominalne snage elektromotora vrši se uz poznati kriterijum da je:

$$P_n > P_e \quad (6.15)$$

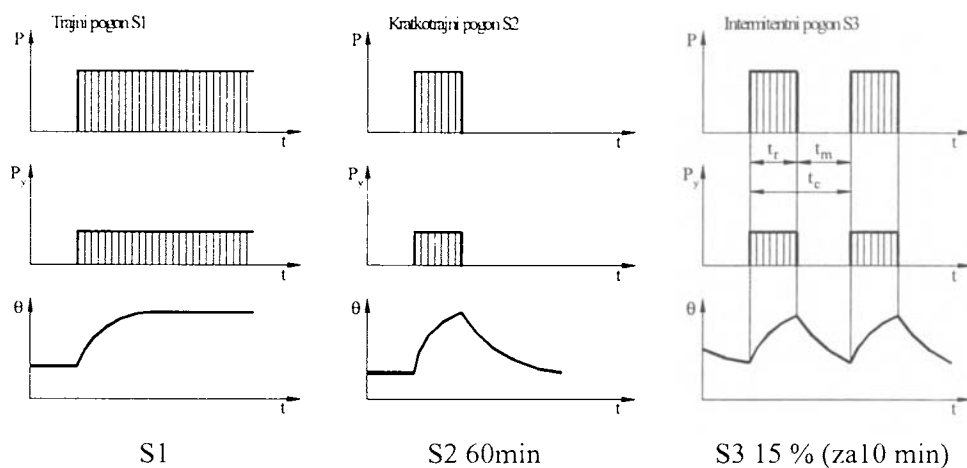
a što se svodi na tablični izbor elektromotora nominalne snage koja je prva veća od izračunate ekvivalentne.

### 06.03. Vrste tipičnih opterećenja

U skladu sa IEC propisima postoji osam tipičnih opterećenja. Na slici su prikazani dijagrami opterećenja ili korisne snage, sumarnih gubitaka i temperature mašine u funkciji vremena samo za prva tri slučaja definisana propisima. Ovi slučajevi se mogu najčešće sresti u brodogradnji. To su:

- trajan pogon sa oznakom S1
- kratkotrajan pogon sa oznakom S2 u vremenu trajanja 60 min posle čega dolazi do potpunog hlađenja mašine i
- intermitentan pogon sa oznakom S3 15% što znači da je tokom ciklusa od 10 min mašina u pogonu 15% vremena ili 1,5 min a ostalo vreme se hladi.

Dozvoljeni broj ciklusa opterećenja zavisi isključivo od temperature pogonskog elektromotora.



Slika 44. Vrste tipičnih opterećenja

Za svaku vrstu tipičnih opterećenja mašine prikazana su tri dijagrama u funkciji vremena. Na prvom dijagramu je opterećenje električne mašine, a na drugom sumarni gubici u mašini pri tom opterećenju. Na trećem dijagramu je prikazana temperatura mašine koja se od temperature ambijenta menja do maksimalno dozvoljene.

#### **06.04. Uticaj okoline na izbor motora i zaštita elektromotornog pogona**

Uticaj okoline je važan faktor za izbor pogonskog elektromotora. Od svih uslova treba pomenuti samo neke koji su prisutni na brodovima [02], kao što su:

- temperatura okoline
- relativna vlažnost
- tropski uslovi
- vibracije
- nadmorska visina
- agresivnost okoline

Za svaku konkretnu primenu motora mora se odabrati konstruktivno rešenje predviđeno da radi u uslovima koji tu vladaju. Na povišenoj temperaturi ili pri povećanoj mehaničkoj zaštiti motora i smanjenom dotoku svežeg vazduha, mora se smanjiti snaga da temperatura namotaja mašine ne bi prešla vrednost koju dopušta klasa izolacije mašine. Problem oštećenja elektromotora usled agresivnosti sredine u pogledu korozije ili drugih okolnosti takođe se može eliminisati ako se još u fazi projektovanja broda vodi računa o tome.

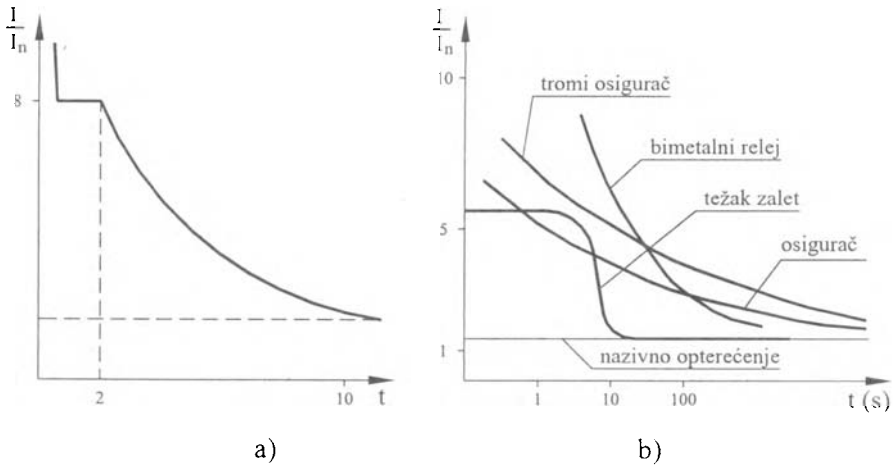
Da bi se izbeglo termičko oštećenje elektromotora pa i celog pogona, potrebno je izvršiti odgovarajuću zaštitu elektromotora. Pitanje zaštite pogonskih mašina zavisi u prvom redu od važnosti uređaja za pogon broda koga on pokreće, a zatim i od veličine i snage motora. Najčešći uzroci kvarova u nekom elektromotornom pogonu mogu poticati od smetnji koje potiču od pogonskog radnog mehanizma ili od smetnji koje potiču od izvora napajanja ili od smetnji iz samog elektromotora

Na plovnim objektima najčešći uzroci koji mogu dovesti do oštećenja motora su:

- preopterećenje pri pokretanju
- ukočen motor usled oštećenja ležaja ili korozije
- ispad jedne faze iz pogona
- nedozvoljene varijacije ulaznog napona
- ometano hlađenje ili porast temperature ambijenta iznad dozvoljene
- nesusni napon napajanja
- nedozvoljeno veliki, uzastopni, broj uključivanja

## 06.05. Zaštita od preopterećenja

Do preopterećenja pogonskog elektromotora može doći od radnog mehanizma bilo povećanim polaznim ili radnim otporom kretanja. Pored toga, do preopterećenja može doći usled povećanih mehaničkih otpora u samom motoru. I na kraju, do preopterećenja može doći i ako su parametri mreže (napon i frekvencija) izvan tolerantnih granica ili dolazi do njihovih velikih oscilacija.



Slika 45. Vremenska karakteristika prekostrujnog releja a) i ostalih zaštitnih uređaja u električnim kolima b)

Osnovne vrste zaštite koje se primenjuju na brodovima [03] radi zaštite mreže i uređaja su:

### a. - zaštita osiguračima

Mada je ovo opštepoznata i široko primenljiva zaštita, potrebno je napomenuti da je ova zaštita samo od kratkog spoja a ne i od preopterećenja radne mašine. I pored toga, ova zaštita se najčešće primenjuje u svim, pa i brodskim električnim mrežama. Princip rada ove zaštite svodi se na topljenje uložka (patrona) koji se nalazi u odgovarajućem kućištu. Uslov pregorevanja kod preopterećenja je da za  $1h$  osigurač mora pregoreti pri struji  $1,3I_n \leq I \leq 1,6I_n$ . Osigurači štite od kratkog spoja i to tako da pri sedmostrukoj struji moraju pregoreti za vreme  $t_{pregorevanja} \leq 0,2s$ .

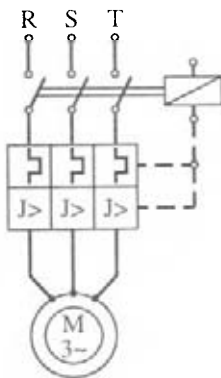
### b. - zaštita sklopniciima sa bimetalnim relejima

Zaštita sa bimetalom štiti od preopterećenja. Kod bimetalne zaštite, u strujna kola se stavljaju dva metala sa različitim temperaturnim koeficijentima širenja. Njihovo savijanje srazmerno je kvadratu struje opterećenja. Pri određenoj temperaturi dolazi do savijanja metala i do zatvaranja ili otvaranja određenog prekidača. Zato se kaže

da bimetalni prekidač radi kao termički prekidač. Na slici 45 data je karakteristika prekostrujnog releja kao i uporedne karakteristike reagovanja zaštita.

c. - zaštita sklopnica sa prekostrujnim relejima

Prekostrujni relej radi na principu elektromagnetne indukcije. Namotaj kroz koji prolazi struja uvlači jezgro od dinamo limova i time otvara ili zatvara komandne kontakte. Položaj i brzina kretanja jezgra zavise od jačine struje. Strujni transformatori koji se primenjuju kod prekostrujnih releja i za merenje imaju različite karakteristike, prikazane na slici 8.



Slika 46. Motorne zaštitne sklopke

Kod transformatora koji se primenjuje za merenje, potrebno je da je karakteristika magnećenja kola linearna do nominalne struje, a posle da brzo ulazi u zasićenje. Pri eventualnom kratkom spoju u kolu, na ovaj način bi se merni instrument štitio od strujnog udara.

Kod strujnih transformatora koji se primenjuju u kolima zaštite, potrebno je da magnetsko kolo ostane što je moguće više u linearnom delu kako bi se prava vrednost primarne struje prenela i da bi zaštita što pre reagovala.

d. - zaštita motornim zaštitnim sklopkama

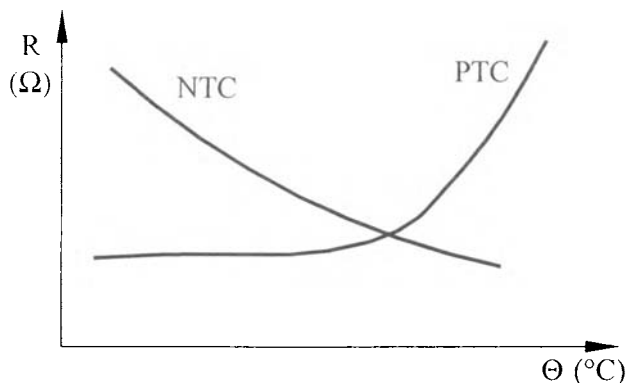
U cilju zaštite elektromotora, na brodovima se najčešće koriste motorske zaštitne sklopke koje objedinjuju prekidač sa bimetalnim relejom i elektromagnetski okidač. Prva zaštita štiti od preopterećenja a druga od kratkog spoja, slika 46.

e. - zaštita poluprovodnicima ( PTC i NTC otpornicima )

Neki poluprovodnici imaju osobinu da im se otpornost znatno menja sa promenom temperature. Za zaštitu u električnim mašinama se koriste poluprovodnici kojima se otpornost znatno menja kod neke unapred određene. Takvi elementi nazivaju se termistori i postavljaju se na mestima gde se očekuje pojavljivanje najviših



temperatura u mašini kao što su namotaji ili kod ležajeva. Merenjem pada napona na ovim elementima a pri stalnoj struji proticanja, moguće je precizno izmeriti temperaturu na određeno poziciji u mašini.



Slika 47. Karakteristike zaštitnih otpornika

Postoje NTC i PTC otpornici (sa negativnim i pozitivnim temperaturnim koeficijentom) za zaštitu. Ovi otpornici predstavljaju najkvalitetniju zaštitu od preopterećenja. Na slici 47 prikazane su karakteristike promene otpora ovih senzora.

## 06.06. Mehanička zaštita električnih uređaja

Za svaku konkretnu primenu električnog uređaja, mora se odabrati odgovarajuća mehanička zaštita onih delova električnog uređaja koji se u toku eksploatacije nalazi pod naponom.

Vrsta i stepen zaštite određeni su međunarodnim preporukama IEC. Prema standardima mehanička zaštita obeležava se sa dva slova i dva broja **IP A B**. Prva dva slova IP predstavljaju oznaku prvih slova međunarodne zaštite (International Protection).

Prva cifra **A** označava zaštitu od dodira

- 0 - bez zaštite
- 1 - zaštita od dodira rukom (predmetom većim od 50 mm)
- 2 - zaštita od dodira prstima (predmetom većim od 8 mm)
- 3 - zaštita od dodira alatom (predmetom većim od 2,5 mm)
- 4 - zaštita od dodira žicom (predmetom većim od 1 mm)
- 5 - potpuna zaštita ali ulazi samo prašina
- 6 - potpuna zaštita od ulaza prašine

Druga cifra **B** označava zaštitu od vode

- 0 - bez zaštite
- 1 - zaštita od vode koja prska vertikalno
- 2 - zaštita od vode koja prska pod uglom od 15° prema vertikali
- 3 - zaštita od vode koja prska pod uglom od 60° prema vertikali
- 4 - zaštita od vode koja prska iz svih smerova
- 5 - zaštita od mlaza vode
- 6 - zaštita od zapljuskivanja (preplavlivanja)
- 7 - zaštita od rada u dubini 1m ispod vode u vremenu 30 min
- 8 - zaštita od trajnog rada pod vodom

Za svaku konkretnu primenu mora se voditi računa o mestu eksploatacije jer je jasno da stepen mehaničke zaštite mora biti viši za opremu na palubi nego u unutrašnjosti broda.

Na brodovima, stepen mehaničke zaštite električnih uređaja od dodira, prodiranja stranih tela i vode, treba da odgovara mestima ugradnje i ne treba da budu manji od navedenih u tabeli 6.

Tabela 6. Stepen mehaničke zaštite električnih uređaja za odgovarajuća mesta ugradnje

	Mesto ugradnje	Karakteristika prostorija	Stepen zaštite
1	Stambene i službene prostorije, hodnici i stepeništa	Suva	IP 20
2	Specijalne električarske prostorije	Suva, moguća ovlaženja i kapljice	IP 00 – 22
3	Prostorija blizu izlaza na otvorenu palubu	Suva, moguće prodiranje vode	IP 20 – 32
4	Prostorije: mašinske, kormilarskih uređaja, sa agregatima i sl.	Povećana vlažnost	IP 22
5	Kormilarnice koje se rasklapaju	Povećana vlažnost	IP 23
6	Kuhinje, umivaonici i sl.	Povećana vlažnost	IP 44
7	Kupatila, perionice i sl.	Naročito vlažne	IP 55
8	Otvorene palube, skladišta, ostave i sl.	Naročito vlažne	IP 55
9	Prostorije gde el. uređaji treba da rade pod vodom	Potopljene	IP 68

## 06.07. Pravila Jugoslovenskog registra brodova za elektromotorne pogone

Pravila Jugoregistra [04] posebno obuhvataju zaštitu generatora a posebno elektromotora.

### *Zaštita generatora*

Generatori koji nisu predviđeni za paralelan rad, treba da imaju zaštitu od preopterećenja i kratkog spoja, pri čemu se generatori snage do 10kW (kVA) mogu zaštititi samo osiguračima, generatori snage od 10 do 50kW (KVA) mogu se zaštititi osiguračima i uklopnim uređajima sa prekostrujnim relejima, a preko 50kW (KVA) odgovarajućim prekidačima. Za generatore predviđene za paralelan rad treba da se predvidi najmanje zaštita od:

1. preopterećenja
2. kratkog spoja
3. povratne struje ili snage
4. podnapona i prenapona

Za zaštitu generatora od preopterećenja preporučuje se uređaj koji ima signalizaciju preopterećenja, a koji deluje sa vremenskom zadržskom od 15min. pri opterećenju od 100 do 110% nominalne struje i isključuje generator sa zadržskom, u skladu sa toplotnom izdržljivošću šticegenog generatora u predelu preopterećenja od 110 do 150% nominalane struje.

Preporučuje se da zaštita bude podešena tako da kod preopterećenja od 150% nominalne struje generatora vreme zadržske ne prelazi 2min, za generatore naizmenične struje i 15s za generatore jednosmerne struje. Pri preopterećenju iznad 150% nominalne struje isključenje generatora treba da bude, po mogućnosti, trenutno.

Veličinu podešavanja zaštite od preopterećenja i vreme zadržske treba odabrati, s obzirom na karakteristike preopterećenja pogonskog motora, tako da motor bude u mogućnosti da u predviđenom vremenu zadržske razvija neophodnu snagu. Za zaštitu od preopterećenja generatora ne treba upotrebiti zaštitne uređaje koji imaju mogućnost neposrednog ponovnog uključjenja generatora.

Treba postaviti uređaje koji će automatski i postepeno isključivati manje važne potrošače ako dođe do preopterećenja generatora.

Zaštitu generatora od kratkog spoja u izolovanim sistemima treba postaviti u svim fazama i polovima.

Zaštita generatora od povratne snage ili struje predviđenih za paralelan rad, treba da bude izabrana prema karakteristikama pogonskog motora. Mogućnost podešavanja zaštite od povratne struje ili snage treba da odgovara vrednostima navedenim u tabeli 7.

Tabela 7. Mogućnost podešavanja zaštite od povratne struje ili snage

Struja	Turbina	Motori SUS
Naizmjenična	2-6% nominalne snage generatora	8-15% nominalne snage generatora
Jednosmerna	2-15% nominalne struje generatora	2-15% nominalne struje generatora

Podnaponska zaštita treba da onemogući uključenje generatora na sabirnice dok se napon generatora ne ustali i dok ne dostigne najmanje 80% nominalnog napona i da isključuje generator kada mu napon padne na ovaj nivo. Podnaponska zaštita treba, da pri sniženju napona isključi generator sa vremenskom zadržkom i treba da deluje trenutno pri pokušaju uključanja dok se ne postigne gore navedeni minimalni napon.

Ako je jednosmerni generator sa turbinskim pogonom predviđen za paralelan rad, na svaki sigurnosni generator treba ugraditi uređaj koji će isključiti generatorski prekidač kada proradi sigurnosni regulator.

### ***Zaštita elektromotora***

Strujna kola razvodnih tabli i razvodnih uređaja za napajanje motora snage iznad 0,5kW treba da budu opremljeni zaštitom od kratkog spoja i preopterećenja a takode i podnaponskom zaštitom ako se ne traži njihovo ponovno automatsko pokretanje. Uređaji za zaštitu od preopterećenja i podnaponska zaštita mogu da se ugrade u upuštač motora. Elektromotore snage manje od 0,5kW treba zaštititi od kratkog spoja.

Zaštita od preopterećenja motora sa stalnim opterećenjem treba da ima okidač za isključenje motora u području između 105 i 125% nominalne struje. Vreme isključenja treba da bude usklađeno sa toplotnom karakteristikom štice motora. Uređaji za zaštitu od preopterećenja ne treba da prorade za vreme pokretanja motora. Uređaji za toplotnu ili strujnu zaštitu motora od preopterećenja mogu se zameniti odgovarajućom signalizacijom uz saglasnost Jugoregistra.

Za elektromotore, električne ili elektro-hidraulične kormilarske mašine treba predvideti uređaje samo za zaštitu od kratkog spoja. Podnaponska zaštita i zaštita od preopterećenja nije dozvoljena. Umesto zaštite od preopterećenja treba postaviti signalizaciju preopterećenja.

Prekidač za zaštitu elektromotora kormilarske mašine od struje kratkog spoja, za jednosmernu struju, treba da bude sa trenutnim isključenjem kod struja između 300% i 400% nominalne struje motora a za naizmjeničnu struju treba trenutno da isključi kod struje od približno 125% najveće struje pokretanja motora.

Pravila Jugoregistra daju neke propise vezane za elektromotorne pogone kojih se treba pridržavati. Posebna pažnja posvećena je pogonu kormila [05] kao uređaju vitalnom za rad broda. Polazni moment elektromotora kormilarskog uređaja sa direktnim pogonom treba da iznosi bar 200% nominalnog. Elektromotorni pogon kormilarskog uređaja treba da, samo za kormila sa direktnim električnim pogonom, omogući rad sa ukočenim elektromotorom pod naponom u toku jedne minute i to u toplom stanju. Elektromotori elektrohidrauličkih pogona kormilarskog uređaja i njihovi pretvarači treba da budu predviđeni za trajan rad sa intermitentnim opterećenjem od 15% u ciklusu od 10min. Motori električnih pogona kormilarskog uređaja na sve ovo treba da izdrže i uticaj udarnih ili polaznih struja pri pokretanju.

## 06.08. Literatura

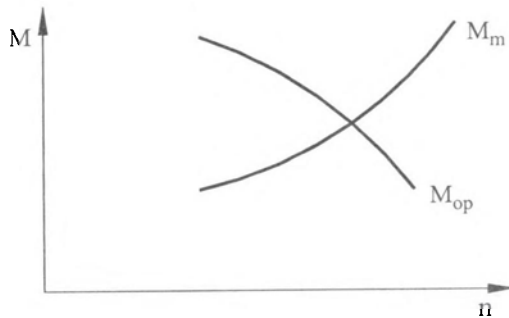
01. Jurković B., Elektromotorni pogoni, Školska knjiga, Zagreb, 1983.
02. Rade Končar, Tehnički priručnik, Zagreb, 1980.
03. Sever, Niskonaponski asinhroni motori, Subotica, 1979.
04. EEC-Komitet za unutrašnji saobraćaj, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovnim putevima, Njujork, Priređeno u Jugoslovenskom registru brodova, Beograd, 1994, 98.
05. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe, Beograd, Knjiga II, Električni uređaji - deo 9, 1994, 9-16.
06. Germanischer Lloyd, Inland waterway vessels, Hamburg, 1990, Ch3, I-10.

## 07. STATIČKA I DINAMIČKA STANJA BEMP-a

Važna osobina za ocenu kvaliteta elektromotornog pogona je stabilnost rada. U principu postoje dve vrste stabilnosti rada električne mašine u ustaljenom radu mašine: statička i dinamička. Mada je statička stabilnost elektromotornog pogona u suštini dinamički problem vezan za stabilan rad u ustaljenoj tački rada, na brodovima može dinamička stabilnost elektromotornih pogona vezana za prirodne uslove ljuljanja ili opterećenja biti dosta izražena.

### 07.01. Uvod

Pod statičkim stanjem elektromotornog pogona podrazumeva se ustaljeno ili dinamičko stacionarno stanje definisano presečnom tačkom momentnih krivih datih na slici 48.



Slika 48. Statičko stanje elektromotornog pogona

Ustaljenu tačku elektromotornog pogona definišu sledeće jednačine:

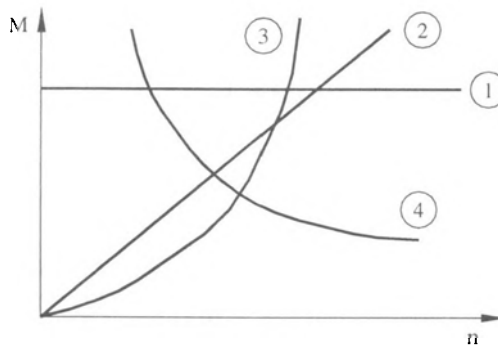
$$M_m = M_{op} \quad M_a = 0 \quad n = const \quad \frac{dn}{dt} = 0 \quad (7.01)$$

U ustaljenom stanju elektromotornog pogona moment pogonskog motora jednak je momentu opterećenja. Iz toga proizilazi i da je moment akceleracije ili ubrzanja

jednak nuli. A to znači da se mašina obrće sa stalnom brzinom obrtanja ili da ne postoje ubrzanja ili usporenja.

## 07.02. Mehanička karakteristika radnih mehanizama

Radi proučavanja statičke stabilnosti, važno je imati u vidu i otporne karakteristike radnih mehanizama. Neke triptične otporne krive radnih mehanizama prikazane su na slici 49. U principu, zavisnost momenta od brzine obrtanja može biti konstantna, linearna, kvadratna ili hiperbolička.



Slika 49. Tipične karakteristike radnih mehanizama

1.  $M = \text{const}$  - dizalice 2.  $M = k \cdot n$  - motalice 3.  $M = k \cdot n^2$  - propeleri, centrifugalne pumpe, ventilatori 4.  $M = k / n$  - vučna vozila, motalice

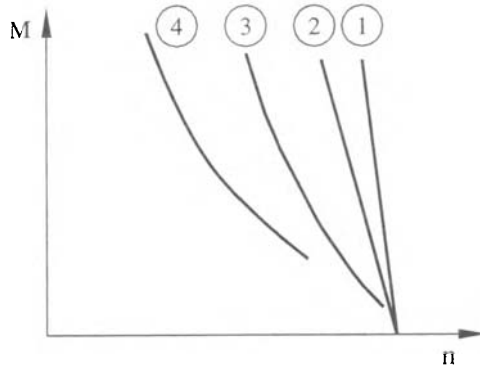
Na brodovima su prisutne praktično sve vrste tipičnih radnih mehanizama. Prva kriva, gde je otporni moment stalan u funkciji brzine obrtanja prisutna je kod raznih vrsta brodskih dizalica i kranova kao i raznih vrsta vitala. Linearna karakteristika otpornog momenta prisutna je kod raznih motalica što je redi slučaj u brodogradnji. Najprisutniji pogoni u brodogradnji imaju zakon kvadratne zavisnosti momenta od brzine obrtanja i to kod svih pogona propelera, raznih pumpi i ventilatora.

## 07.03. Mehaničke karakteristike jednosmernih mašina

Mehaničke karakteristike jednosmernih motora date su na slici 50.

Može se primetiti da je mehanička karakteristika jednosmernog elektromotora sa nezavisnom pobudom skoro vertikalna. To znači da pri velikoj promeni opterećenja dolazi vrlo malo do promene brzine obrtanja. Zato se kaže da je ovakva karakteristika "tvrda karakteristika". Elektromotori sa otočnom ili paralelnom pobudom imaju nešto veću promenu brzine pri opterećenju. Elektromotori sa

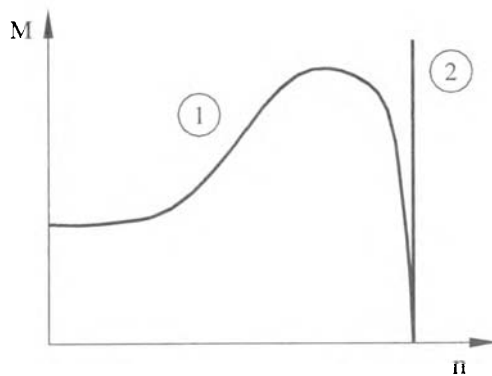
složenom pobudom mogu biti sa aditivnom ili diferencijalnom vrstom pobude. Kada imaju aditivnu pobudu, može se podesiti da praktično ne postoji promena brzine pri promeni opterećenja od praznog hoda do punog opterećenja. Kada su konstruisani sa diferencijalnom pobudom, u većoj meri se mehaničke karakteristike približavaju karakteristikama rednog motora. Redni motori imaju karakteristike koja se najviše menja sa promenom opterećenja, tako da se kaže da je mehanička karakteristika ovih motora "meka".



Slika 50. Različiti oblici mehaničkih karakteristika elektromotora 1 - sa nezavisnom 2 - otočnom, 3 - složenom, 4 - rednom pobudom

#### 07.04. Mehaničke karakteristike naizmjeničnih mašina

Mehaničke karakteristike naizmjeničnih motora date su na slici 51.



Slika 51. Različiti oblici mehaničkih karakteristika elektromotora 1 - asinhroni, 2 - sinhroni



Mehaničke karakteristike naizmeničnih trofaznih motora se u principu slabo menjaju sa opterećenjem, pa se za njih kaže da su "tvrde". Sinhroni elektromotori praktično ne menjaju brzinu obrtanja pri promeni opterećenja od praznog hoda do nominalnog opterećenja. Asinhroni motori, bez obzira radi li se o tipu sa kratkospojenim ili namotanim rotorom imaju pri ovom opterećenju pad brzine za nekoliko procenata. Nešto veću promenu brzine imaju jednofazni asinhroni motori.

Nominalna brzina obrtanja određena je nominalnim naponom i frekvencijom. Regulacija brzine moguća je i iznad nominalne brzine povećanjem učestanosti statora pri čemu se napon drži na nominalnoj vrednosti što rezultuje slabljenjem polja ili konstantne izlazne snage. Stepenasto regulisanje brzine je često radeno da bi se omogućilo lakše puštanje u pogon ili izvesna regulacija brzine asinhronih motora sa namotanim rotorom. Maksimalni moment je određen sa strujnim ograničenjem da bi se izbeglo preopterećenje elektromotora.

### 07.05. Statička stabilnost

Ako u ustaljenom pogonu dode do nekog poremećaja momenta usled opterećenja ili usled uslova u mreži

$$\Delta M_{op} = g \cdot \Delta \omega \quad (7.02)$$

dolazi do promene momenta motora

$$\Delta M_m = c \cdot \Delta \omega \quad (7.03)$$

pri čemu se koeficijenti  $c$  i  $g$  mogu prema oznakama na slici 52 izraziti kao:

$$c = \frac{dM_m}{d\omega} = tg\alpha \quad g = \frac{dM_{op}}{d\omega} = tg\beta \quad (7.04)$$

Ukoliko pri ustaljenom stanju dode do nekog poremećaja, doći će i do prirasta oba momenta. Razlika momenata  $\Delta M_m - \Delta M_{op}$  usloviće promenu brzine  $\Delta \omega$  usled čega će doći do ubrzanja sistema.

Razlika momenata iznosi:

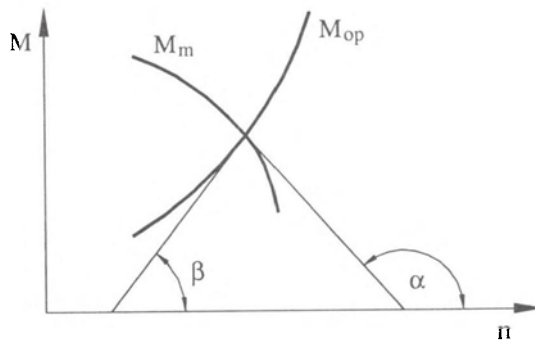
$$\Delta M_m - \Delta M_{op} = J \frac{d\Delta \omega}{dt} \quad (7.05)$$

Ako se u ovu jednačinu ubace (7.02) i (7.03)

$$\frac{c - g}{J} dt = \frac{d\Delta\omega}{\Delta\omega}$$

odakle se može posle integraljenja dobiti:

$$\Delta\omega = K \exp\left(\frac{c - g}{J} \cdot t\right) \quad (7.06)$$



Slika 52. Presek otporne i pogonske mehaničke krive i ispitivanje statičke stabilnosti

U statički stabilnom pogonu mora se nakon nekog vremena brzina obrtanja vratiti u početno stanje, tj:

$$t \rightarrow \infty \quad \Delta\omega \rightarrow 0 \quad (7.07)$$

To će se dogoditi kada eksponenet ima negativnu vrednost, kada je

$$g > c \quad \text{tj} \quad \operatorname{tg}\beta > \operatorname{tg}\alpha \quad (7.08)$$

što predstavlja i uslov stabilnosti elektromotornog pogona. Ovo je opšti uslov za statičku stabilnost rada elektromotornog pogona u bilo kom kvadrantu rada.

### 07.06. Određivanje snage mašine kod BEMP - a u trajnom radu

Optimalan pogon radne mašine zahteva prilagođenje pogonskog elektromotora radnom mehanizmu. To su pored osnovnih parametara, kao što su nominalni moment i brzina obrtanja, puštanje u pogon, regulisanje brzine obrtanja, sistem za

hladenje kao i mehanička zaštita. Veliku važnost imaju i ekonomski parametri kao što su investiciona cena, troškovi održavanja, sigurnost i pouzdanost, masa, potreban prostor i druge osobine.

U trajnom radu mora biti zadovoljen uslov da je nominalni moment motora

$$M_n \geq M_{op} \quad (7.09)$$

Snaga pogonskog elektromotora jednaka je:

$$P = F \cdot v = \frac{M}{R} \cdot R \cdot \omega = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

Trofazni asinhroni motor je najjeftiniji, najlakši i najrobusniji koji se pravi serijski. Kod nabavke pogonskog elektromotora potrebno je uzeti u obzir investicione cene jednosmernog, asinhronog sa namotanim rotorom i asinhronog motora sa kratkospojenim rotorom, koje stoje približno u odnosu (5 - 4) : 2 : 1.

### 07.07. Dinamička stabilnost

Dinamička stabilnost je znatno složeniji problem od statičke. Važno je napomenuti da je ovaj problem više izražen u automatskim regulisanim pogonima i da praktično pripada području automatike. Zbog toga je ovaj problem manje izražen na brodovima a više u pogonima koji treba da automatski obavljaju neke poslove u brodogradilištima kao što je na primer sinhronizacija rada vitala za porinuća i izvlačenje bina na navozima [01-02].

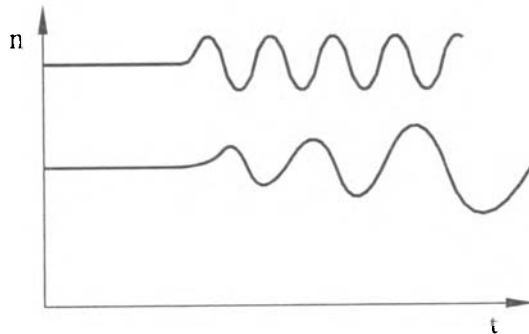
Dinamički je stabilan onaj sistem kod koga posle prestanka poremećaja brzina obrtanja teži nekoj konačnoj vrednosti. U nestabilnom sistemu moment opterećenja i elektromotora nisu jednaki tako da postoji moment ubrzanja. Brzina obrtanja elektromotora nije stalna.

$$M_m \neq M_{op} \quad M_a \neq 0 \quad n \neq const \quad \frac{dn}{dt} \neq 0 \quad (7.10)$$

Pretpostavimo da u električnoj mreži dolazi do poremećaja u napajanju električnog motora. Ako se kao posledica tog poremećaja javljaju sve veće oscilacije brzine samog motora, tada je sistem nestabilan.

Stabilan je sistem kome nakon prolazne pojave brzina teži nekoj konačnoj vrednosti. Na slici 53 je prikazan dinamički nestabilan sistem brzine koji osciluje

oko nominalne vrednosti. Uzrok nestabilnosti može biti regulator brzine obrtanja ili neki organ upravljanja u automatskim elektromotornim pogonima.



Slika 53. Dinamički nestabilan sistem

### 07.08. Pravila Jugoslovenskog registra brodova

Pravilima Jugoslovenskog registra brodova [03] je u manjoj meri obuhvaćen problem statičke i dinamičke stabilnosti elektromotornih pogona. To je ostavljeno proizvođačima opreme i prijemnim ispitivanjima da se praktično proveri.

Sistem daljinskog automatskog upravljanja pomoćnim motorima (dizel električnim agregatima) treba da osigura vreme trajanja od davanja signala za upućivanje do spremnosti da prihvati 100% opterećenja kod pomoćnih motora snage ispod 100kW za vreme od 15sec, a kod pomoćnih generatora snaga većih od 100kW do 30sec.

Kod brodskih centrala sa daljinskim automatskim upravljanjem treba osigurati automatsku sinhronizaciju, prijem i raspodelu opterećenja kao i automatsko isključivanje manje važnih opterećenja prilikom preopterećenja generatora. A po uključivanju generatora na mrežu, pri automatskom uključivanju bitnih uređaja koji su potrebni za upravljanje brodom uključivanje uređaja treba vršiti prema zadatom programu u kome je isključena mogućnost preopterećenja agregata u radu.

### 07.09. Literatura

01. Nad Š., Anakioski M., Nikolić Z., Upravljanje i regulacija na bazi mikroprocesora elektromotornim pogonima za izvlačenje i spuštanje brodova, V savetovanje "Energetska elektronika", Beograd, 1983.

02. Bilen B., Nikolić Z., Anakioski M., Oprema navoza za izvlačenje i spuštanje brodova, Zbornik radova VII simpozijuma Teorija i praksa brodogradnje, Pula, 1986, 2, 3.25-3.36.
03. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe, Automatizacija - deo 15, Beograd, 1994.

## **08. ENERGETSKI PRETVARAČI**

Energetski pretvarači su uređaji koji povezuju električne sisteme sa dva ili više različitih parametara (talasni oblik napona i struje, frekvencija, broj faza itd.). Savremeni razvoj energetske elektronike počinje 1956 godine kada je firma "General Electric" [01], napravila i pustila u prodaju silicijumske upravljive usmerače (SCR Silicon Controlled Rectifiers) koji su kasnije nazvani tiristori. Vrlo brzo, tiristori su uticali na buran razvoj svih vrsta pretvarača. Danas, kada se kombinuju sa informacionom elektronskom tehnikom na bazi mikroprocesora, moguće je stvoriti pouzdane, najpreciznije zakone upravljanja.

### **08.01. Podela energetske pretvarača**

Pretvarači se uglavnom mogu podeliti na nekoliko grupa prema vrsti električnog izvora odakle se napajaju i šta daju na izlazu:

1. Pretvaranje naizmjenične u jednosmernu struju vrši se pomoću ispravljača (AC - DC konverzija)
2. Pretvaranje jednosmernog u jednosmerni napon vrši se pomoću čopera (DC - DC konverzija).
3. Pretvaranje jednosmernog u naizmjenični napon vrši se pomoću invertora (DC - AC konverzija)
4. Pretvaranje naizmjeničnog napona jedne učestanosti u drugu vrši se pomoću ciklokonvertora (AC - AC konverzija)

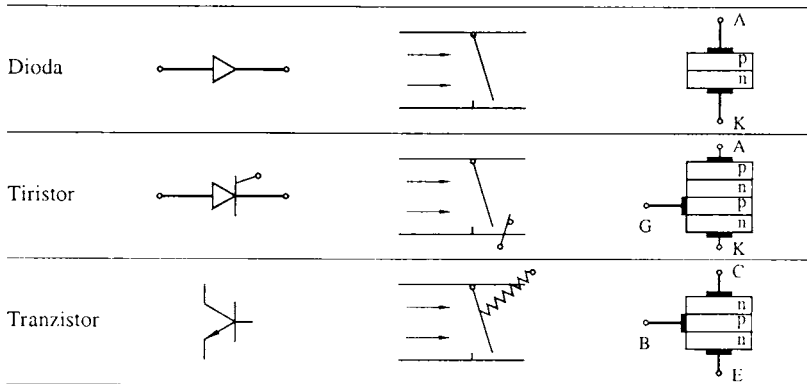
Druga podela energetske pretvarača je prema vrsti komutacije:

1. Pretvarači bez komutacije
2. Pretvarači sa prirodnom (mrežnom) komutacijom
3. Pretvarači sa forsiranom (prinudnom) komutacijom

### **08.02. Osnovni pojmovi o komponentama energetske elektronike**

Osnovne komponente energetske elektronike su dioda, tiristor i tranzistor snage. Na slici 54 predstavljeni su električni simboli, mehanički ekvivalenti ovih komponentata kao i dijagrami  $p-n$  spojeva.

Mehanički ekvivalent diode je nepovratni ventil u hidraulici. Dioda je provodna samo u jednom smeru i to kada je anoda (p spoj) na višem potencijalu a katoda (n spoj) na nižem. Slično je i sa neprovodnim ventilom koji provodi fluid samo u jednom smeru. To je jasno jer se ventil ili klapna može otvoriti samo u jednom smeru a u drugom je potpuno zatvorena i ne može se otvoriti.



Slika 54. Električni i hidraulični analozi elemenata energetskih pretvarača

Mehanički ekvivalent tranzistora je upravljivi ili regulacioni ventil. Tranzistor se otvara u skladu sa veličinom struje baze. Slično tome je i ventil otvoren onoliko koliko se regulaciona ručica okrene. Slično diodi i tranzistor provodi struju samo u jednom smeru. Zatvaranje tranzistora obavlja se ukidanjem struje baze ili upravljačke struje čime se koči ili obustavlja proticanje znatno veće struje emitora.

Mehanički ekvivalent tiristora je posebna konstrukcija regulacionog ventila sa klapnom i upravljačkom oprugom. Tiristor je provodan kao i dioda samo u jednom smeru i to kada je anoda na višem potencijalu od katode i kada se na gejt dovede mali pozitivan upravljački impuls. Tiristor se isključuje ako se neko vreme katoda nađe na višem potencijalu od anode. Slično je i sa mehaničkim ekvivalentom. Kada se povuče opruga, gubi se svako upravljanje. Ventil se zatvara tako što klapna padne ako fluid stane da protiče ili ako ima težnju da promeni smer.

### 08.03. Princip rada tiristora

Da bi tiristor provodio mora biti ispunjen uslov da je direktno polarisan (da je anoda pozitivnija od katode) i da se na gejt dovede impuls. Kada je inverzno polarisan, tiristor ne može provoditi.

Princip rada tiristora može se predstaviti pomoću modela formiranog pomoću dva komplementarna  $p-n-p$  i  $n-p-n$  tranzistora prikazana na sl. 55.

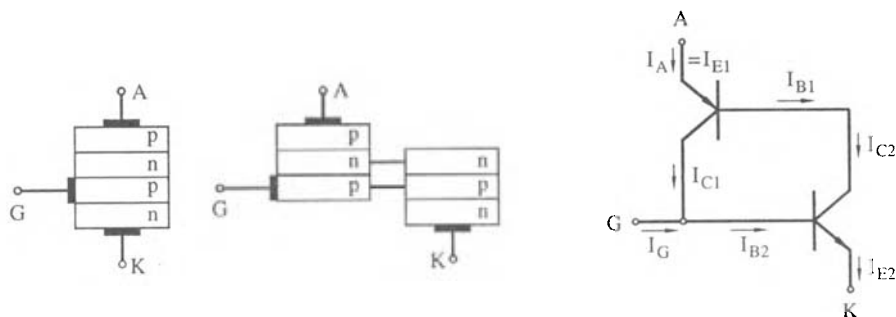
Kolektor svakog tranzistora spojen je na bazu drugog, tako da postoji pozitivna povratna sprega na svakom tranzistoru a što znači da pogoni drugi u zasićenje. Na taj način, pozitivna struja gejta uzrokuje da  $n-p-n$  tranzistor provodi i kao rezultat, uspostavlja se kolektorska struja  $I_{C2}$ . Ova struja postaje bazna struja za  $p-n-p$  tranzistor, uzrokujući da protiče kolektorska struja  $I_{C1}$ . Zato što je  $I_{C1}$  takođe struja baze  $n-p-n$  tranzistora, tiristor prihvata uključeno stanje, čak ako se spoljni signal na gejtu isključi. Znači, kada tiristor ima pozitivan napon između anode i katode, svaki tranzistor je provodan i ima zajedničko strujno pojačanje  $\alpha$  koje predstavlja odnos kolektorske i emitorske struje. Tako je za  $p-n-p$  tranzistor  $\alpha_1$  deo struje koja ulazi u emiter  $E_1$  koja sadrži struju kolektora  $C_1$ . Ako je spoljna struja koja ulazi u emiter  $E_1$ , kolektorska struja može se dati u poznatom obliku:

$$I_{c1} = \alpha_1 \cdot I_{E1} + I_{o1} \quad (8.01)$$

Analogno tome, i za drugi tranzistor može se napisati:

$$I_{c2} = \alpha_2 \cdot I_{E2} + I_{o2}$$

Gde su  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  strujna pojačanja, a  $I_{o1}$  i  $I_{o2}$  inverzne struje zasićenja dva tranzistora.



Slika 55. Model tiristora

Pošto je sa slike 55 očigledno da je:

$$\begin{aligned} I_{E1} &= I_A \\ I_{E2} &= I_K \end{aligned}$$



I da je:

$$I_A = I_{C1} + I_{C2}$$

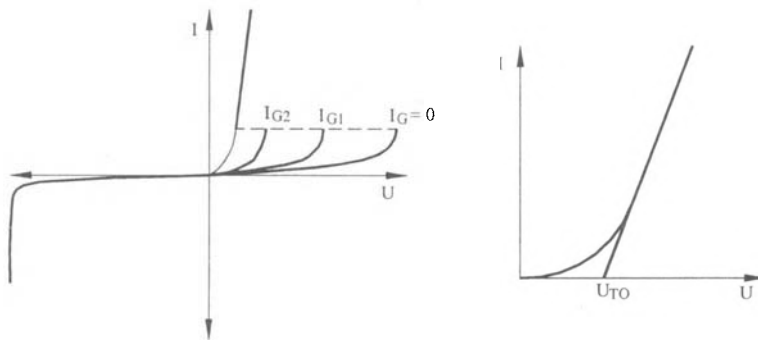
Iako se može izvesti da je

$$I_A = \frac{\alpha_2 \cdot I_G + I_{o1} + I_{o2}}{1 - \alpha_1 - \alpha_2} \quad (8.02)$$

Kada se na gejtu tiristora dovede impuls definisan naponom reda volta, struje reda miliampera i vremena trajanja reda desetak mikrosekundi, dolazi do porasta  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  sve dok ne bude ispunjen uslov  $1 - \alpha_1 - \alpha_2 \approx 0$ . Tada tiristor naglo počinje da provodi i uspostavlja se struja  $I_A \Rightarrow \infty$  ograničena samo spoljnim otpornostima u kolu.

Kada tiristor provodi, napon na njegovim krajevima je mali tako da se tiristor praktično ponaša kao prekidač. Karakteristika tiristora ima izgled kao na donjem  $U - I$  dijagramu ili izlaznoj statičkoj karakteristici.

Direktna oblast sastoji se od dva dela. Deo kada je tiristor neprovodan a direktno polarisan, što znači da na gejtu nema okidačkog impulsa i da je otpornost tiristora jako velika. Kada na gejtu dođe upravljački impuls, nastupa proboj i tiristor tada počinje naglo da provodi. Tiristor prelazi u direktnu provodnu oblast kada mu je otpornost jako mala i ova oblast je slična karakteristici obične diode.



Slika 56. Karakteristični dijagram tiristora

a) izlazna statička karakteristika b) aproksimativna provodna karakteristika

Inverzna oblast je oblast slična inverznoj karakteristici diode i ima dve oblasti: inverznu neprovodnu oblast i inverznu probojnu oblast.

Gubici u tiristoru potiču uglavnom od gubitaka u provodnom smeru kao i od gubitaka pri komutaciji ili prinudnom gašenju. Pad napona na tiristoru u provodnom stanju može se obzirom na sliku 56. aproksimirati jednačinom:

$$u_T = U_{To} + r \cdot I \quad (8.03)$$

Snaga disipacije na tiristoru može se dobiti na osnovu jednačine:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_T \cdot i \cdot dt = U_{To} \cdot I_{av} + r \cdot I_{rms}^2 \quad (8.04)$$

Pošto snaga disipacije na tiristoru zavisi od srednje i efektivne vrednosti struje, to se i hladnjak bira prema ovim vrednostima. Dinamičke osobine tiristora ograničavaju brzina porasta struje ( $di/dt$ ), napona ( $du/dt$ ) kao i vreme oporavka tiristora  $t_q$ . Vreme oporavka tiristora je minimalno vreme inverzne polarizacije da bi ostao u neprovodnom stanju. Zaštita tiristora od prevelike struje izvodi se brzim (tiristorskim) osiguračima a dinamička zaštita tiristora izvodi se RC članom (paralelno vezani R i C elementi).

#### 08.04. Podešavači naizmeničnog napona

Podešavači naizmeničnog napona pripadaju pretvaračima bez komutacije (u trenutku isključivanja nema prebacivanja sa tiristora koji provodi na tiristor koji ne provodi). Na slici 58 prikazana je šema spoja uređaja za podešavanje naizmeničnog napona kao i talasni oblici napona na tiristorima i opterećenju [01-02]. Pored toga, prikazani su i upravljački impulsi na gejtovima tiristora.

Napon na tiristoru jednak je mrežnom u pozitivnoj poluperiodi sve dok na njegov gejt ne dođe upravljački signal. Posle toga je nula. U negativnoj poluperiodi tiristor je neprovodan i na njegovim krajevima je pun napon. Suprotno, napon na opterećenju je nula sve dok se ne otvori tiristor a posle toga jednak je naponu mreže. Ako se posle istog vremena kašnjenja  $t_1$ , a čemu odgovara ugao kašnjenja  $\alpha$ , okidaju oba tiristora, na opterećenju se pojavljuju isti talasni oblici napona prikazani kao šrafirane površine.

Regulacijom vremena okidanja tiristora (vremena kašnjenja) ili ugla okidanja  $\alpha$ , moguće je menjati efektivnu vrednost napona na opterećenju. Trijak je konstruktivno napravljena antiparalelna veza dva tiristora. U električnim šemama predstavlja se simbolom



Slika 57 Električna šema za trijak

Srednja vrednost napona na opterećenju može se dobiti integraleći sinusnu vrednost napona u granicama od  $t_1$  (trenutak uključenja tiristora) do  $T/2$  (trenutka kada vrednost napona ne dobije vrednost nula). Pri tome treba imati u vidu da je:

$$\omega T = 2\pi \quad \text{i} \quad \omega t_1 = \alpha \quad (8.05)$$

i da je trenutna vrednost naizmeničnog napona data jednačinom:

$$u = U_m \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t$$

Srednja vrednost napona na opterećenju jednaka je nuli (slika 58, dijagram 5), jer su iste pozitivna i negativna površina. Radi opštosti računanja srednje vrednosti, pretpostavićemo da su obe poluperiode pozitivne, što je čest slučaj, posebno kod ispravljača. U tom slučaju se srednja vrednost napona može izračunati po definiciji

$$U_{sr} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{T/2} u \cdot dt$$

Član ispred integrala može se rastumačiti i kao dva impulsa po periodi. U razvijenom obliku ova jednačina može se napisati u obliku

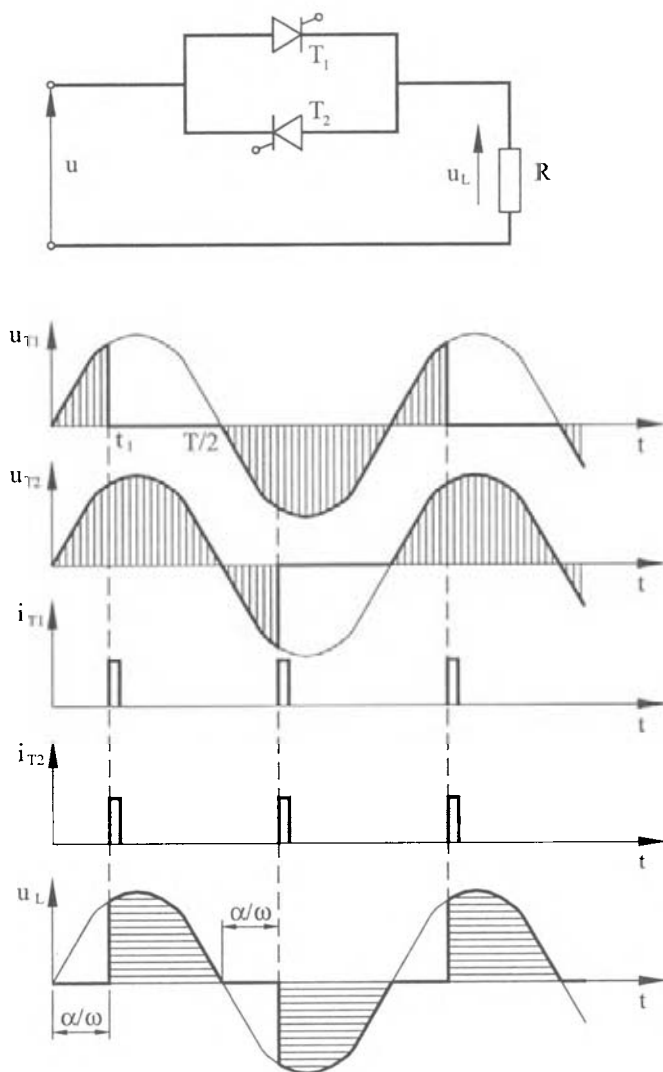
$$U_{sr} = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_1}^{T/2} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \cdot dt \cdot \frac{\omega}{\omega} = \frac{2\sqrt{2}}{\omega T} \cdot U \cdot \int_{t_1}^{T/2} \sin(\omega t) \cdot d(\omega t)$$

Posle integraljenja se može dobiti da je:

$$U_{sr} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot (-\cos \omega t) \Big|_{t_1}^{T/2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot (+1 + \cos \alpha) \quad (08.06)$$

Ako nema kašnjenja uključenja tiristora ( $\alpha = 0$ ), dobija se dobro poznata jednačina za srednje vrednosti napona na opterećenju

$$U_{sr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U = \frac{2}{\pi} U_m \quad (08.07)$$



Slika 58. Talasni oblici napona i struja gejtova na tiristorima i napon na opterećenju

Ako se posmatra samo srednja vrednost napona na opterećenju, kao posledica rada samo jednog tiristora, u početnu jednačinu će se samo ubaciti jedan impuls po periodu, tako da se posle integraljenja dobija

$$U_{st} = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot \pi} U(1 + \cos \alpha)$$

Efektivna vrednost napona na opterećenju može se dobiti na osnovu dobro poznate jednačine iz osnova elektrotehnike:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}$$

U slučaju tiristorskih regulatora napona, može se efektivna vrednost napona odrediti integraljenjem, tako što se zamjenjuju granice integracije od  $t_1$  (trenutka uključenja tiristora) do  $T/2$  (trenutka kada napon ne dobije vrednost nula). Pri tome treba imati u vidu da su uslovi (08.05) isti, i da je moguće radi uprošćenja izvršiti integraljenja za pola periode, ali se mora staviti dvojka u brojiocu zbog istog razloga kao kod računanja srednje vrednosti.

$$U_{ef}^2 = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_1}^{T/2} u^2 \cdot dt = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{T/2} 2 \cdot U^2 \cdot \sin^2(\omega t) \cdot dt$$

Integracija se lako može obaviti ako se uzme u obzir poznata jednačina iz trigonometrije da je:

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}$$

Tako da se dobija da je:

$$U_{ef}^2 = \frac{2U^2}{T} \cdot \left[ t \Big|_{t_1}^{T/2} - \frac{1}{2\omega} \cdot \sin(2\omega t) \Big|_{t_1}^{T/2} \right]$$

odavde se može dobiti jednačina za efektivnu vrednost napona na opterećenju u funkciji vremena

$$U_{ef} = U \sqrt{1 - \frac{2 \cdot t_1}{T} + \frac{1}{\omega T} \sin(2\omega t_1)} \quad (08.08)$$

Efektivna vrednost napona u funkciji ugla kašnjenja  $\alpha$  može se izraziti u sledećem obliku posle smene

$$U_{ef} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin 2\alpha} \quad (08.09)$$

treba imati u vidu da je u ovome obrascu  $U$  efektivna vrednost mrežnog napona a  $\alpha$  ugao koji odgovara kašnjenju uključenja tiristora.

Za  $\alpha = 0$  (nema kašnjenja uključenja tiristora), napon na opterećenju je maksimalan i jednak naponu mreže (kao kod diodne sprege), a za  $\alpha = \pi$  napon je minimalan i jednak je nuli.

I kod računanja efektivne vrednosti napona na opterećenju, kao posledica rada samo jednog tiristora, moguće je izračunati efektivnu vrednost napona na opterećenju tako što se u početnu jednačinu ubaci samo jedan impuls po periodu, pa se na kraju može dobiti

$$U_{ef} = U \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2 \cdot \pi} + \frac{1}{4\pi} \cdot \sin 2\alpha}$$

Efektivna snaga na omskom opterećenju iznosi:

$$P = \frac{U_{ef}^2}{R} = \frac{U^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin 2\alpha\right) \quad (08.10)$$

Srednja vrednost struja opterećenja može se dobiti na osnovu jednačine:

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T i \cdot dt = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{R \cdot \pi} (1 + \cos \alpha) \quad (08.11)$$

kao i efektivna vrednost struje opterećenja koja se može dobiti na osnovu formule:

$$I_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt$$

A posle integraljenja

$$I_{ef} = \frac{U}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin 2\alpha} \quad (08.12)$$

Na ovaj način, znači regulišući ugao uključjenja tiristora, moguće je regulisati napon na opterećenju a što se koristi za regulaciju osvetljenja, regulaciju temperature peći, ili za podešavanje brzine obrtanja asinhronih motora sa namotanim rotorom, a preko rotorskog otpornika

### 08.05. Srednje vrednosti napona za različite talasne oblike

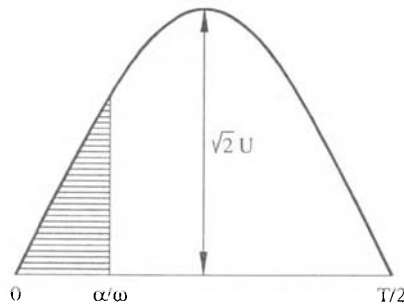
Srednja vrednost napona na opterećenju zavisi od vremena kašnjenja ili od ugla okidanja tiristora. Mada se može uvek iskoristiti metod integracije, u praksi se više koristi uprošćen ili praktičan postupak izveden iz osnovnih jednačina.

Ako je napon sinusan, može se pisati izraz za trenutnu vrednost napona:

$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t$$

gde je  $U$  efektivna vrednost ovog napona.

Pretpostavićemo da se tiristor uključuje u trenutku  $t_1$  koji je određen odnosom ugla kašnjenja  $\alpha$  i kružne učestanosti  $\omega$ .



Slika 59. Talasni oblik sinusnog napona

Metod se svodi na izračunavanje srednje vrednosti napona tako da se od pune ili poznate površine oduzima šrafirana. Zbog toga je potrebno izračunati vrednost šrafirane površine:

$$A_\alpha = \int_0^{t_1} u \cdot dt = \frac{\sqrt{2}}{\omega \cdot T} U \cdot T(-\cos \omega t)\Big|_0^{t_1}$$

ili

$$A_{\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot U \cdot T \quad (08.13)$$

pri čemu je  $U$  efektivna vrednost napona a  $T$  perioda.

Srednja vrednost napona na opterećenju dobija se tako da se od pune površine  $A_{180}$  oduzima površina koja odgovara uglu  $A_{\alpha}$  a razlika se pomnoži brojem impulsa u periodu i podeli vremenom trajanja periode  $T$ .

Za uobičajene vrednosti ugla  $\alpha$ , moguće je naći ove površine

$$\text{za } \alpha = 30^{\circ} \quad A_{30} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot U \cdot T \quad (08.14)$$

$$\text{za } \alpha = 60^{\circ} \quad A_{60} = \frac{\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U \cdot T \quad (08.15)$$

$$\text{za } \alpha = 180^{\circ} \quad A_{180} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot T \quad (08.16)$$

Ovi izrazi biće korišćeni u poglavlju 09. kod izračunavanja izlaznog napona iz ispravljača.

## 08.06. Komutacija

Komutacija je skup pojava do kojih dolazi u toku prebacivanja struje sa jednog na drugi tiristor. Pretpostavlja se da je tokom ovog vremenskog perioda struja opterećenja stalna. Ako ugao koji odgovara vremenu komutacije obeležimo slovom  $\mu$ , tada samo vreme komutacije iznosi  $\mu / \omega$ .

Pretpostavićemo da je opterećenje stalno  $I = const$ , tako da tu struju provode tiristori  $T_1$  ili  $T_2$ . Za vreme komutacije su oba provodna, jer je jedan provodan a drugi ga blokira i zatvara. Važno je da zbir struja koje prolaze kroz tiristor tokom vremena komutacije, mora u svakom trenutku biti jednak struji opterećenja

$$i_1 + i_2 = I = const \quad (08.17)$$

U toku vremena komutacije, naponske jednačine za obe grane u kojima se nalaze tiristori, mogu se napisati u skladu sa II Kirhofovom zakonom. Pri ovome su zanemareni omski otpori radi pojednostavljenja analize.

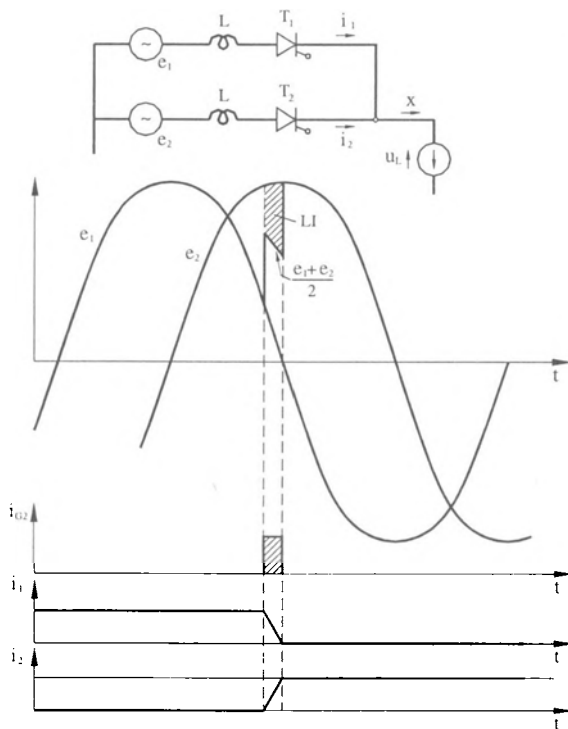


$$e_1 - L \cdot \frac{di_1}{dt} - u_L = 0 \quad (08.18)$$

$$e_2 - L \cdot \frac{di_2}{dt} - u_L = 0 \quad (08.19)$$

Sabirajući jednačine (08.18) i (08.19), a uzimajući u obzir i diferencijal jednačine (08.17) da je

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} = \frac{dI}{dt} = 0$$



Slika 60. Šema komutacije dva tiristora kao i talasni oblici napona

može se dobiti da je:

$$u_L = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad (08.20)$$

Ubacujući (08.20) u jednačinu (08.18), koristeći i granične uslove da je za  $t = 0$  i struja  $i_1(0) = I$ , dobija se da je struja koja prolazi kroz tiristor  $T_1$ :

$$i_1 = I - \frac{1}{L} \cdot \int_0^{\mu/\omega} (e_2 - e_1) \cdot \frac{dt}{2}$$

Ova jednačina važi samo dok struja  $i_1$  ne padne na nulu. Vreme komutacije  $\mu/\omega$  dobija se izjednačavanjem ove struje sa nulom, jer je na početku komutacije struja tiristora jednaka struji opterećenja, a na kraju procesa jednaka je nuli

$$L \cdot I = \int_0^{\mu/\omega} (e_2 - e_1) \cdot \frac{dt}{2}$$

Proces komutacije je dosta važan jer u tom procesu nastupa disipacija ili gubitak energije na tiristorima što može, naročito kod viših frekvencija, uticati na povećana grejanja tiristora, a na drugoj strani i na stvaranje smetnji u električnoj mreži.

## 08.07. Dalji razvoj energetske elektronike

Razvoj komponenata energetske elektronike i uređaja za puštanje u pogon i regulaciju brzine obrtanja, doveo je i do razmatranja povećane upotrebe električnih mašina za pogon propelera. Interesantno je navesti da su prema postojećem stanju tehnike napravljena rešenja za puštanje u pogon i regulaciju brzine motora do preko 25MW [04]. Pogoni sa jednosmernim mašinama su uglavnom napušteni sem na podmornicama tako da se za ovu namenu koriste čoperi i to za snage do više stotina kW. Za pogone velikih plovnih objekata koriste se samo naizmenične mašine, asinhroni i sinhroni motori.

To uslovljava i razvoj energetskih kola za regulaciju. Pretvarači za snage do 300kW uglavnom se prave sa tranzistorima snage kao energetskim komponentama. Preko ove snage koristi se tiristorska tehnika. Za snage ispod 1,5MW koristi se prinudna komutacija, naponski i strujni invertori. Za najveće snage se koristi linijska komutacija, mrežom komutujući invertori i ciklokonvertori.

Želje projekatnata energetskih pretvarača su da koriste poluprovodničke komponente koje bi bile u mogućnosti da provode velike struje u provodnom stanju, da blokiraju visoke napone u neprovodnom stanju i prelaze iz jednog u drugo stanje sa minimalnim energetskim gubicima. Mada idealan poluprovodnik sa ovim osobinama nije pronaden, postoji nekoliko poluprovodnika koji mu se sa svojim osobinama približavaju. Na višim naponima, problem postaje nešto složeniji.

MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) je poluprovodni prekidač koji se po karakteristikama najviše približava idealnom prekidaču. Na nesreću koristi se samo za primenu na relativno niskim naponima, pošto gubici za određenu struju značajno rastu sa porastom inverznog napona.

IGBT (insulated gate bipolar transistor) je u stvari MOSFET čija je struktura modifikovana da bi mu se prevazišle nezaobilazne mane, mada je to plaćeno nešto višim gubicima kod prekidanja. Danas su IGBT eliminisali bipolarne tranzistore BJT (bipolar junction transistor) kao energetske poluprovodnike za inverzne napone od nekoliko stotina volti do 2kV.

Iznad 2kV, GTO tiristori (gate turn off thyristor) su superiorni, mada zahtevaju nešto komplikovanije upravljačko kolo za pogon.

Naučnici obećavaju [05] da će sa novom vrstom poluprovodnika, na bazi SiC (silicijum-ugljenik) probojni napon biti za red veći, što bi dovelo do razvoja novih puteva u pravljenju kola energetske pretvarača.

### **08.08. Pravila Jugoslovenskog registra brodova za energetske pretvarače**

Koeficijent nelinejskih deformacija  $K$  brodske mreže koje nastaju zbog rada poluprovodnika snage ne treba da budu veći od 10%. O primeni poluprovodnika snage koji izazivaju veću deformaciju sinusoidne krive napona od napred navedene vrednosti razmatra Jugoregistar [06-07].

Svi statički pretvarači u stacionarnom radu, a posebno pri uključenju opterećenja stvaraju u sistemu distribucije električne energije više harmonike. Posebno je to izraženo u broskim pogonima kao relativno slabim, autonomnim sistemima za proizvodnju električne energije. Ovi harmonici mogu smanjiti kvalitet napona, usloviti greške u radu drugih uređaja i zaštite i usloviti elektromagnetske smetnje [08].

Koeficijent nelinejskih deformacija treba određivati po formuli

$$K = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}$$

gde je:

$U_n$  - stvarna veličina n-tog harmonika deformisanog napona

$U_1$  - stvarna veličina prvog harmonika

Poluprovodnici snage treba da imaju vazdušno hlađenje (prirodno ili prinudno). Ako poluprovodnici imaju prinudno hlađenje, treba da imaju blokadu tako da uređaj ne može da radi kada je hlađenje isključeno.

Izbor i ugradnja poluprovodničkih komponenata mora se obaviti na takav način da bi se obezbedilo, koliko je moguće, da kratak spoj usled drugih grešaka ne ošteti poluprovodničke komponente.

Mora se obezbediti zadovoljavajuća ventilacija. Na mestima gde se koristi prinudna ventilacija, greške u radu ventilacionog sistema moraju uključiti alarm ili isključiti opterećenje.

Zbog toga što je termički kapacitet poluprovodničkih uređaja jako mali, projektovanje uređaja mora se zasnivati na temperaturi ambijenta od  $60^{\circ}\text{C}$  [09].

Električne smetnje koje stvaraju poluprovodnici, uključujući i njihove napojne kablove, ne smeju da budu veće od nivoa datih na dijagramu na slici 01.

## 08.09. Literatura

01. Grafham D.R., Hey J.C., SCR Manual, Fifth Edition, General Electric Company, USA, 1972.
02. Miljanić P., Zabeleške sa predavanja iz Energetskih pretvarača, Beograd, 1985.
03. Nedeljković M, Zbirka rešenih ispitnih zadataka iz Energetskih pretvarača, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1994.
04. Facinelli W., Muggeridge D., Integrated System Analysis and Design of Podded Ship Propulsors, Marine Technology, Vol. 35, No. 3, July 1998, pp. 151-174.
05. Bergmar K., SiC power devices, European semiconductor, april 1996, 21-26.
06. EEC, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovnim putevima, OUN, Njujork, 1993.
07. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe, Knjiga 2, Električni uređaji, deo 9, Beograd, 1994.
08. J. Hensler, Electric Ship propulsion: Application and Integration, Trans. SNAME, vol. 97, 1989.
09. Germanischer Lloyd, Inland waterway vessels, Hamburg, 1990, Ch3, I-10.
10. Gollentz B., Gruau N., Mirzaian A., Leewis E., "A new medium voltage IGBT Press-Pack converter" a significant step in electrical propulsion drives, Proceedings of AES 2003, Edinburgh, UK, 2003, 198-210.

## **09. ISPRAVLJAČI (AC/DC pretvarači)**

Ispravljači su pretvarači koji naizmjenični napon pretvaraju u jednosmerni. Mogu se svrstati u pretvarače sa prirodnom komutacijom zato što struja prelazi sa jednog na drugi tiristor zahvaljujući stanju u mreži. Ispravljači koji rade na mreži, u najvećem broju slučajeva se mogu razmatrati preko strujnog ponora (motorno opterećenje). Rede se ispravljači koriste za napajanje omskih opterećenja, kao što je slučaj kod punjača akumulatora, mada se i tada na izlaz iz ispravljača stavljaju prigušnice koje deluju da se smanjuju strujni udari u kolu. U ovom poglavlju će se razmatrati samo srednje vrednosti izlaznog napona [01-02] a ne i izlazna struja, jer je to dosta komplikovaniji slučaj.

### **09.01. Monofazni ispravljač sa transformatorom sa srednjom tačkom**

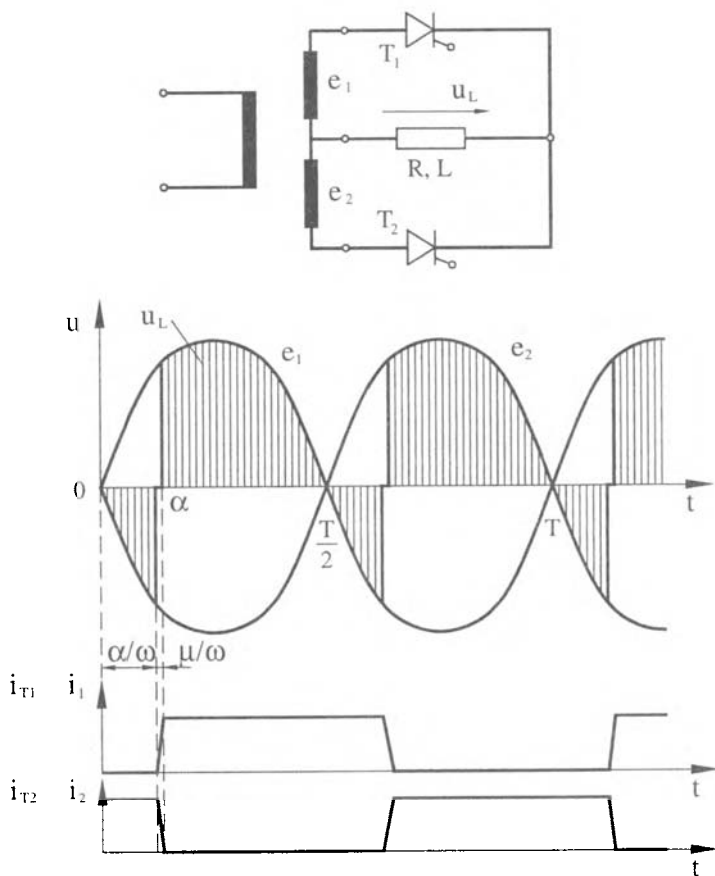
Ovo rešenje je u literaturi poznato kao "push-pull" sprega. Nekada se ova metoda znatno više koristila i to prvenstveno iz ekonomskih razloga kada je cena poluprovodnika bila viša od cene dvonamotnog sekundara transformatora. Svaki tiristor radi u gornjoj poluperiodi, mada oba dobijaju okidne impulse u svakoj poluperiodi istovremeno. To proizilazi iz činjenice da se u donjoj poluperiodi tiristori inverzno polarišu pri čemu je anoda negativnija od katode tako da ne postoje uslovi za provođenje tiristora.

Šema veze tiristora kao i talasni oblici napona prikazani su na slici 60. Kod ove vrste monofaznih ispravljača, mogu nastupiti različita stanja pri raznim opterećenjima.

Ukoliko je opterećenje čisto omsko, talasni oblici struje imaju samo pozitivne vrednosti, pri čemu od trenutka uključenja tiristora do prolaska napona kroz nulu, slede talasni oblik izvora. U trenutku prolaska napona kroz nulti potencijal dolazi do prelaska u inverznu polarizaciju tiristora i nastupa njegovo prirodno gašenje. Drugi tiristor se ponaša na isti način, tako da na opterećenju postoji jednosmerni, pulsirajući napon. Ako je opterećenje omsko, talasni oblik struje srazmeran je talasnom obliku napona.

Slično stanje nastupa i ako se paralelno pretežno induktivnom opterećenju ili strujnom ponoru stavi dioda koja se naziva zamajna. Pri prolasku napona kroz

nulu, počinje ova dioda da provodi pošto biva direktno polarisana, i dolazi do gašenja tiristora  $T_1$ . Sve do trenutka  $\frac{T}{2} + t_1$  dok ne dođe do okidanja tiristora  $T_2$ , napon na opterećenju jednak je naponu na diodi i jako je mali, oko 1,2V. Struja nastavlja da protiče kroz opterećenje usled nagomilane energije u induktivnosti opterećenja, a kroz zamajnu diodu  $D_2$ . U trenutku  $\frac{T}{2} + t_1$  uključuje se tiristor  $T_2$ , inverzno se polariše  $D_2$  i struja protiče od izvora ka opterećenju.



Slika 61. Monofazni pretvarač sa transformatorom sa srednjom tačkom

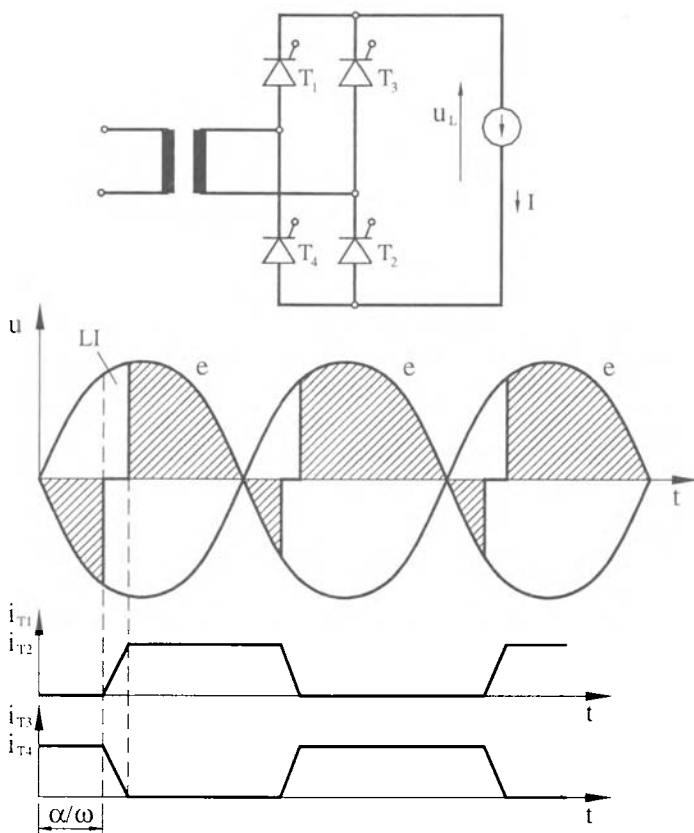
Dioda vezana paralelno sa opterećenjem zove se zamajna i služi da struja protiče kroz opterećenje i kad je napon nula.

Izlazni talasni oblici napona za ove ispravljače isti su kao i za monofazne mostne ispravljače, a pošto se drugi u praksi više primenjuju, to će se u sledećem delu izvesti srednje vrednosti napona za oba slučaja.

## 09.02. Punoupravljivi monofazni mostni ispravljač

Monofazna šema veze tiristora prikazana na slici 62 poznata je kao Grečov spoj. Ukoliko su sva četiri tiristora u mostu, naziva se punoupravljivi mostni pretvarač.

I u ovom slučaju razmatraće se dva granična slučaja: čisto omsko i veliko induktivno opterećenje ili bolje rečeno strujni ponor.



Slika 62. Punoupravljivi mostni monofazni ispravljač i talasni oblici napona

Kod omskog opterećenja, a posle vremenskog kašnjenja  $t_1$  koje odgovara uglu  $\alpha$ , istovremeno se uključuju tiristori  $T_1$  i  $T_2$  ili  $T_3$  i  $T_4$ . Tiristori provode sve dok napon ne padne na nulu i tada se gase. Na opterećenju postoje samo pozitivni polutalasi tako da je napon dat jednačinom (09.01). Dijagram struje srazmeran je dijagramu napona. Napon na opterećenju može se dobiti ili direktnom integracijom ili metodom preko određenih površina.

Ako je induktivni otpor znatno veći od omskog, ili ako je opterećenje strujni ponor ( $I = const$ ), dolazi do izvesne promene u analizi. U trenutku uključanja tiristora  $T_1$  i  $T_2$  ovi tiristori preuzimaju struju opterećenja. U trenutku prolaska napona kroz nulu ne dolazi do gašenja tiristora  $T_1$  i  $T_2$  već se oni gase u trenutku uključanja tiristora  $T_3$  i  $T_4$ . U gornjoj, pozitivnoj poluperiodi javlja se pozitivna snaga, koja se troši na opterećenju. Negativna snaga se javlja u donjoj poluperiodi kada su napon i struja suprotnog znaka, i tu snagu daje opterećenje da bi se održala struja u kolu. Ta snaga se vraća iz kola ili opterećenja u mrežu. Srednja vrednost napona na opterećenju iznosi:

$$U_{sr} = \frac{2}{T} [A_{180} - 2 \cdot A_{\alpha} - 2 \cdot L \cdot I] \quad (09.01)$$

Uslov uz jednačinu (09.01) je da je ugao

$$0 \leq \alpha \leq \pi.$$

Pošto struja prolazi kroz induktivnost transformatora u jednom pa u drugom smeru, tj menja vrednost od  $+I$  do  $-I$ , to je promena fluksa  $2LI$  pa se u jednačini ispred komutacionih gubitaka nalazi dvojka.

U izrazu (09.01) postoji broj 2 u brojiocu jer se tokom periode javljaju dva ista polutalasa. Od pune površine, za ugao provođenja od  $180^\circ$  oduzima se dvostruka površina do ugla  $\alpha$ , pri čemu je jedna za pozitivan deo talasnog oblika a druga za šrafiranu negativnu vrednost. Od pune površine oduzimaju se i gubici usled komutacije. Na osnovu prethodnih relacija može se izraz dovesti na oblik:

$$U_{sr} = \frac{2}{T} \left[ \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot T - \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1 - \cos \alpha) \cdot U \cdot T - 2 \cdot L \cdot I \right] \quad (09.02)$$

Odakle se dobija:



$$U_{sr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot \cos \alpha - \frac{2}{\pi} \cdot X \cdot I \quad (09.03)$$

pri čemu treba imati u vidu da je  $X = \omega \cdot L$

Ako je ugao kašnjenja uključanja tiristora  $\alpha = 0$  i ako se zanemare komutacioni gubici  $X \approx 0$ , dobija se iz ovog izraza dobro poznata relacija za srednju vrednost napona

$$U_{sr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U$$

Ako je  $\alpha = \pi/2$ , i ako se zanemare komutacioni gubici, dobija se  $U_{sr} = 0$ , što je i sa dijagrama očigledno pošto su pozitivna i negativna površina iste. A ako je  $\alpha > \pi/2$ , nastupa režim rekuperativnog kočenja elektromotora ili generatorskog kočenja kada mašina vraća električnu energiju u mrežu. Pozitivna površina je manja od negativne, tako da je i srednja vrednost napona negativna. To znači da je i snaga negativna ili da elektromotor radi u generatorskom ili rekuperativnom režimu. Na ovaj način se može kočiti elektromotor na primer kod dizalica i kontrolisano spuštati teret.

Za mrežu u kojoj je nominalan naizmeničan napon 220V, a učestanost 50Hz, što je uobičajeno u našem elektroenergetskom sistemu i na domaćim brodovima, maksimalna srednja vrednost napona za ugao kašnjenja  $\alpha = 0$  i kada se zanemare komutacioni gubici, može se izračunati na osnovu jednačine (09.01) da iznosi  $U_{sr} = 198V$ .

Mada smo razmatrali samo dva granična slučaja, za omska i velika induktivna opterećenja, većina realnih opterećenja je slična ovim slučajevima.

### 09.03. Poluupravljivi monofazni mostni ispravljač

Ako se u kolo punoupravljivog monofaznog mosta stavi zamajna dioda  $D_2$ , (slika 62.a) dobiće se poluupravljivi monofazni mostni ispravljač sa potpuno različitom analizom rada. Poluupravljivi monofazni tiristorski most se češće pravi na taj način što se tiristori  $T_1$  i  $T_3$  zamene diodama  $D_1$  i  $D_3$ , ili se tiristori  $T_2$  i  $T_4$  zamene

odgovarajućim diodama  $D_2$  i  $D_4$  (slika 62. b). Talasni oblici napona i struja prikazani su na slici 62.

Za omsko opterećenje analiza je ista kao i u prethodnom slučaju, što znači da su dijagrami napona i struje slični samo u drugoj razmeri.

Ako je opterećenje strujni ponor, analiza je nešto složenija. Pretpostavimo da u nekom trenutku provode tiristor  $T_1$  i dioda  $D_2$ . Pri prolasku napona kroz nulu, tačka A postaje negativnija od tačke B. Dioda  $D_2$  se polariše u inverznom smeru i prestaje da provodi. Njenu struju opterećenja preuzima  $D_4$  i provodi tako da dolazi do prirodne ili mrežne komutacije. Sve dok se ne uključi  $T_3$ , napon na opterećenju je praktično nula a struja u kolu se održava na račun prethodno akumulisane energije u opterećenju. Kada se uključi  $T_3$ , isključuje se  $T_1$  i proces se ponavlja.

Srednja vrednost napona na opterećenju može se dobiti takođe na osnovu poznatih formula

$$U_{sr} = \frac{2}{T} \cdot [A_{180} - A_\alpha - L \cdot I] \quad (09.04)$$

U jednačini se ispred komutacionih gubitaka  $LI$  ne stavlja 2 mada postoje dve komutacije tokom poluperiode, jer se obe komutacije obavljaju između faznog napona i nule.

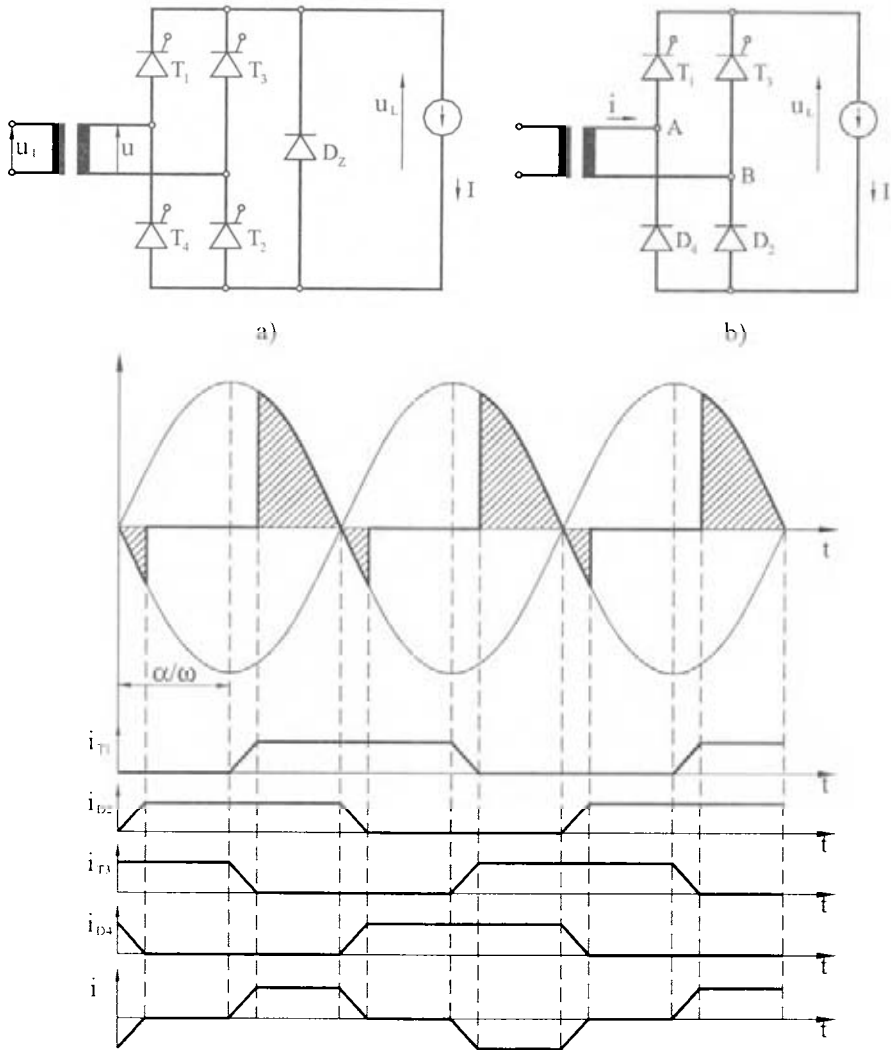
U razvijenom obliku, jednačina (09.04) se može napisati u obliku

$$U_{sr} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot (1 + \cos \alpha) - \frac{1}{\pi} \cdot X \cdot I \quad (09.05)$$

Ako je  $\alpha = 0$  i ako se zanemare komutacioni gubici, dobija se iz ovog izraza dobro poznata formula za srednju vrednost napona

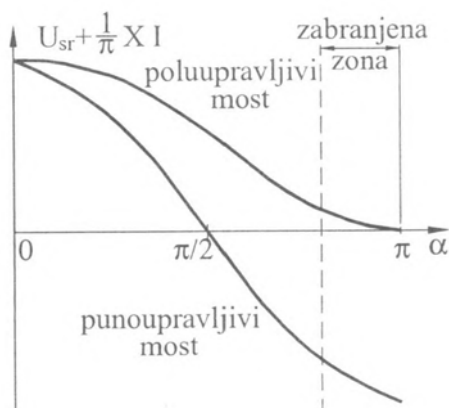
$$U_{sr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U$$

Ako je, kao granični slučaj  $\alpha = \pi$ , jer  $\alpha$  ne može preći ovu vrednost, i ako se zanemare komutacioni gubici, dobija se  $U_{sr} = 0$ .



Slika 63. Poluupravljivi mostni monofazni pretvarači i talasni oblici napona

Iz ovog se vidi bitna razlika između puno i poluupravljivih mostnih sprega. Kod prvih se regulacija napona može vršiti od maksimalno pozitivnih vrednosti do maksimalno negativnih vrednosti. Kod drugih se regulacija napona može raditi samo do nulte vrednosti. Zbog toga se punoupravljivi mostovi mogu koristiti za rekuperativno kočenje a poluupravljivi ne.



Slika 64. Zavisnost srednje vrednosti napona na opterećenju za punoupravljivi i poloupravljivi monofazni ispravljač

Mada je teoretski dobijena zavisnost promene napona na opterećenju za punoupravljivi i poloupravljivi most za promenu ugla kašnjenja od nule do  $\pi$ , u praksi je teško vršiti regulaciju napona u punom opsegu. U praksi se regulacija zadnjih  $20^\circ$  ne radi jer je u toj oblasti rad dinamički nestabilan. Zato se kaže da je to zabranjena zona.

#### 09.04. Punoupravljivi trofazni mostni ispravljač

Ukoliko su u trofaznom mostu svi ispravljači tiristori, takav most se naziva punoupravljivi mostni pretvarač. Ukoliko su u jednoj grani mosta, gornjoj ili donjoj, diode, zove se poloupravljivi mostni ispravljač. Pored tiristora, u mostu često mogu biti postavljene samo diode i tada se naziva neupravljivi ispravljač.

Tiristor je direktno polarisan tek kada vrednost napona u pojedinoj fazi prede ugao od  $30^\circ$ . Naime od tog trenutka mu je anoda na pozitivnijem potencijalu od katode. Zbog toga se i ugao kašnjenja okidanja tiristora računa od tog trenutka. Sa slike se vidi uslov granica promene ugla okidanja tiristora

$$0 \leq \alpha \leq 120^\circ \quad (09.06)$$

Srednja vrednost napona na opterećenju kod punoupravljivog trofaznog mosta iznosi:

$$U_{sr} = \frac{6}{T} \cdot [A_{1,50} - A_{30} - A_\alpha - L \cdot I] \quad (09.07)$$

Kod računanja srednje vrednosti napona važno je uočiti sledeće: Posmatra se samo šestina periode jer se taj deo ponavlja 6 puta tokom periode. Površina  $A_\alpha$  računa se između međufaznih napona tako da je za  $\sqrt{3}$  puta veći napon od prethodno izračunate vrednosti (08.13). Jednačina (09.07) se može napisati u razvijenom obliku:

$$U_{sr} = \frac{6}{T} \left[ \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot UT - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot UT - \sqrt{3} \frac{\sqrt{2}}{2\pi} (1 - \cos \alpha) \cdot UT - L \cdot I \right]$$

Posle sređivanja se dobija izraz za srednju vrednost napona na izlazu iz trofaznog punoupravljivog mosta:

$$U_{sr} = \frac{3}{\pi} \cdot [\sqrt{6} \cdot U \cdot \cos \alpha - X \cdot I] = \frac{3}{\pi} \cdot [\sqrt{2} \cdot U_l \cdot \cos \alpha - X \cdot I] \quad (09.08)$$

pri čemu je  $U$  efektivna vrednost faznog napona a  $U_l$  efektivna vrednost međufaznog (linijskog) napona.

Ova formula može se dobiti i direktnom integracijom od vremena  $t_1$  do  $t_2$  pri čemu je

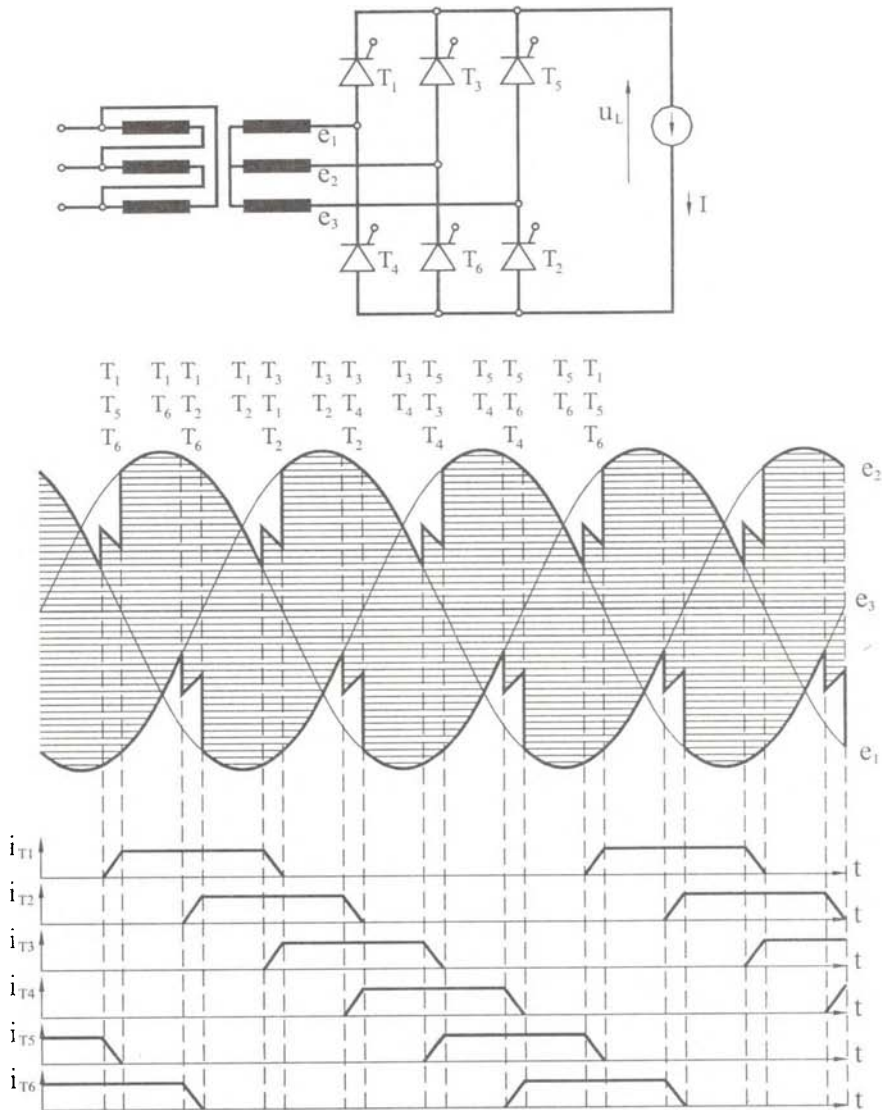
$$\omega t_1 = 30^\circ + \alpha \qquad \omega t_2 = 150^\circ + \alpha \qquad (09.09)$$

Ova vremena  $t_1$  i  $t_2$  definišu trenutke provođenja i neprovođenja tiristora. Zbog toga se srednja vrednost napona može naći i po definiciji

$$U_{sr} = \frac{6}{T} \left[ \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \cdot dt - L \cdot I \right] \quad (09.10)$$

Posle integracije se dobija isti rezultat ili ista formula kao i u prethodnom slučaju.

$$U_{sr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_l \cdot \cos \alpha - \frac{3}{\pi} \cdot X \cdot I$$



Slika 65. Trofazni mostni ispravljač i talasni oblici napona

Ako je  $\alpha = 0$  i ako se zanemare komutacioni gubici, dobija se iz ovog izraza maksimalna srednja vrednost napona

$$U_{sr} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_l$$

Ako je  $\alpha = \pi/2$ , i ako se zanemare komutacioni gubici, dobija se da je srednja vrednost napona na opterećenju jednaka nuli.

Ako je  $\alpha > \pi/2$ , i ako se zanemare komutacioni gubici, dobija se negativan izraz za srednju vrednost napona na opterećenju. To znači da je moguće sa ovom vrstom tiristorskih mostova vršiti rekuperativno kočenje električnih motora i vraćati u primarnu mrežu nagomilanu mehaničku energiju opterećenja.

### 09.05. Poluupravljivi trofazni mostni ispravljač

Poluupravljivi trofazni most se dobija na taj način što se u jednoj grani mosta postave diode umesto tiristora. Pretpostavimo da su umesto tiristora  $T_2$ ,  $T_4$  i  $T_6$  postavljene diode  $D_2$ ,  $D_4$  i  $D_6$ . Srednja vrednost napona na opterećenju razlikuje se od prethodnog slučaja, jer je donja poluperioda cela pošto se komutacija između dioda u donjoj grani vrši prirodno čim se stvore prirodni uslovi za to.

$$U_{sr} = \frac{3}{T} \cdot [2 \cdot A_{150} - 2 \cdot A_{30} - A_{\alpha} - 2 \cdot L \cdot I] \quad (09.11)$$

U izrazu za srednju vrednost napona posmatra se interval od trećine periode i to tako da se od dve iste površine od  $120^\circ$  oduzima površina  $A_{\alpha}$  kao i gubitak napona usled komutacije. U razvijenom obliku ovaj izraz glasi:

$$U_{sr} = \frac{3}{T} \cdot \left[ 2 \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot UT - 2 \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot UT - \sqrt{3} \frac{\sqrt{2}}{2\pi} (1 - \cos \alpha) \cdot UT - 2 \cdot LI \right]$$

Posle sređivanja lako se dobija da je:

$$U_{sr} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \cdot \sqrt{3} \cdot U(1 + \cos \alpha) - \frac{3}{\pi} \cdot XI \quad (09.12)$$

ovaj izraz se za fazne napone može napisati i u obliku:

$$U_{sr} = \frac{3}{2\pi} \left[ \sqrt{6} \cdot U(1 + \cos \alpha) - 2 \cdot XI \right] \quad (09.13)$$

A za linijske napone se može napisati u obliku:

$$U_{sr} = \frac{3}{2\pi} \left[ \sqrt{2} \cdot U_l (1 + \cos \alpha) - 2 \cdot XI \right] \quad (09.14)$$

Ako je  $\alpha = 0$  i ako se zanemare komutacioni gubici, dobija se iz ovog izraza maksimalna srednja vrednost napona

$$U_{sr} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_l \quad (09.15)$$

Ako je  $\alpha = \pi$  dobija se minimalna srednja vrednost napona  $U_{sr} = 0$ .

Za elektronenergetski sistem na brodovima 3x380V, 50Hz može se dobiti maksimalna srednja vrednost napona prema jednačini (09.15) u vrednosti 513V. Ovaj napon je realno niži zbog neizbežnih gubitaka u kolu. Radi regulisanih elektromotornih pogona razvijena je serija jednosmernih motora nominalnog napona 440V. Ovaj napon se može dobiti na izlazu iz trofaznog ispravljača sa uglom kašnjenja  $\alpha = 30^\circ$ . Regulacijom ili promenom ovog ugla kašnjenja okidanja tiristora, izlazni napon se u širim granicama ulaznog napona može držati na stalnoj vrednosti a to znači i da regulisani pogon može imati stalnu brzinu obrtanja bez obzira na ulazne parametre mreže koji se mogu malo menjati.

## 09.06. Literatura

01. Miljanić P., Zabeleške sa predavanja iz Energetskih pretvarača, Beograd, 1985.
02. Nedeljković M., Zbirka rešenih ispitnih zadataka iz Energetskih pretvarača, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1994.
03. Motto J. W., Introduction to solid state Power Electronics, Westinghouse, Youngwood, Pennsylvania, 1977, 61-75.



## 10. ČOPERI (DC/DC pretvarači)

Čoperi su energetska pretvarači koji regulišu nivo jednosmernog napona tako što ga spuštaju ili podižu [01]. Prema tome, čoperi se mogu svrstati u kategoriju DC/DC pretvarača. Ako se prave sa tiristorima, pripadaju grupi pretvarača sa prinudnom komutacijom. Na postojećim plovim objektima su uglavnom postavljeni čoperi sa tiristorima. Napredak tehnologije izrade tranzistora snage uslovio je da su danas racionalnija rešenja sa ovom vrstom prekidača za velike snage. Čoperi sa tiristorima rade do nekoliko stotina Hz, a sa tranzistorima snage i do više desetina kHz.

Podela čopera može se uraditi prema frekvenciji ili periodu rada. Ako je frekvencija ili perioda rada čopera stalna, a period provodenja tiristora promenljiv, kaže se da je čoper sa širinskom modulacijom. Ako je period provodenja glavnog tiristora stalan a period neprovođenja promenljiv, to znači i da je period rada čopera promenljiv kao i frekvencija i kaže se da je čoper sa impulsnom modulacijom.

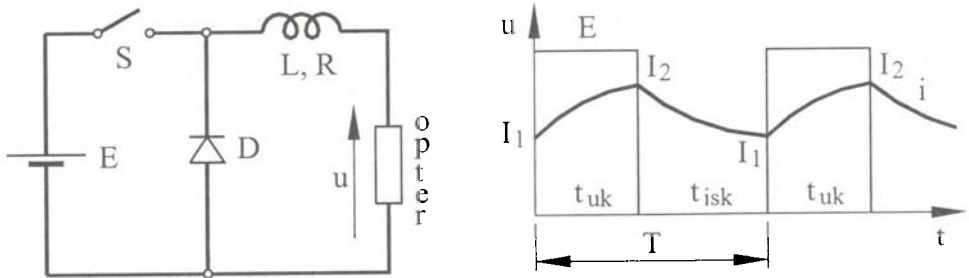
Razvoj regulisanih elektromotornih pogona uslovio je razvoj čopera, kao pretvarača koji su prvi našli veliku primenu za regulaciju jednosmernih mašina napajanih iz jednosmernog izvora. Zbog toga su čak i neki proizvođači poluprovodničkih komponenata [02-03] detaljno objašnjavali osnovne principe rada, kao i proračune vezane za izbor poluprovodničkih komponenata.

### 10.01. Čoper spuštač napona

Pretpostavimo da je napon jednosmernog izvora stalan i jednak  $E$ . Za vreme dok je prekidač  $S$  zatvoren, napon na opterećenju jednak je ovom naponu, a kada je prekidač  $S$  otvoren, napon na opterećenju je nula. Ako je opterećenje induktivno, u prvom periodu dolazi do porasta struje kroz opterećenje pri čemu induktivnost ograničava brzinu porasta ove struje. U drugom periodu, kada je prekidač  $S$  otvoren, zamajna dioda  $D$  postaje provodna, tako da se struja opterećenja zatvara kroz nju. Induktivnost opterećenja podržava ovu struju. Dodatna induktivnost u kolu opterećenja, kao i sama induktivnost opterećenja podržavaju struju opterećenja, koja u ovom periodu opada.

Ako se posmatraju talasni oblici napona na opterećenju, može se napisati za interval  $0 \leq t \leq t_{uk}$  kada je prekidač S uključen, ili zatvoren, naponska jednačina:

$$E - L \frac{di}{dt} - R \cdot i - u = 0 \quad (10.01)$$



Slika 66. Princip rada čopera spuštača napona

U ovoj jednačini moguće je zanemariti omski otpor, kao i pad napona na njemu. Za slučaj ustaljenog režima rada, kada se procesi u potpunosti ponavljaju, i kada se struja menja između graničnih vrednosti  $I_1$  i  $I_2$ , moguće je dobiti da je

$$I_2 = I_1 + \frac{1}{L} \int_0^{t_{uk}} (E - u) \cdot dt \quad (10.02)$$

Znači struja praktično linearno raste od vrednosti  $I_1$  do vrednosti  $I_2$ .

A za vremenski interval  $t_{uk} \leq t \leq T$  u kome je prekidač S otvoren, naponska jednačina glasi:

$$-L \frac{di}{dt} - R \cdot i - u = 0 \quad (10.03)$$

Ako se izvrši integracija ove jednačine za slučaj ustaljenog stanja kada se struja menja od vrednosti  $I_2$  do  $I_1$  (videti sliku 66), i uz zanemarivanje omskog otpora, može se dobiti da je:

$$I_1 = I_2 - \frac{1}{L} \int_{t_{uk}}^T u \cdot dt \quad (10.04)$$

U periodu kada je prekidač isključen, ili otvoren, struja kroz opterećenje linearno opada od vrednosti  $I_2$  na  $I_1$ .

Smenjujući struju  $I_1$  iz jednačine (10.04) u jednačinu (10.02), moguće je dobiti izraz za srednju vrednost napona na izlazu iz čopera spuštača napona.

$$U_{sr} = E \cdot \frac{t_{uk}}{T} = E \cdot \frac{t_{uk}}{t_{uk} + t_{isk}} \quad (10.05)$$

Vreme  $t_{uk}$  ima dve granične vrednosti. Ako je  $t_{uk} = 0$ , sledi da je  $U_{sr} = 0$ , a ako je  $t_{uk} = T$ , pri čemu  $t_{isk} \rightarrow 0$ , srednja vrednost napona  $U_{sr}$  jednaka je elektromotornoj sili izvora  $E$ . Odnos  $\frac{t_{uk}}{T}$  je relativno vreme uključenosti čopera.

Praktično, ovaj odnos za tiristorske čopere iznosi 0,1-0,9, a za tranzistorske može biti i nešto širi.

Period rada čopera jednak je zbiru vremena uključenog i isključenog prekidača i iznosi:

$$T = t_{uk} + t_{isk}$$

Regulacija izlaznog napona može se raditi na dva načina. Jedan je promenom vremena uključenja  $t_{uk}$  a zadržavajući periodu  $T$  stalnom. Drugi je zadržavajući vreme uključenja  $t_{uk}$  stalnim a menjajući frekvenciju ili periodu  $T$  rada čopera.

## 10.02. Čoper podizač napona

Kao i u prethodnom slučaju prikazanom na slici 66, pretpostavićemo da postoji jednosmerni izvor i velika induktivnost vezana redno sa njim. Kondenzator velikog kapaciteta je paralelno vezan sa opterećenjem a dioda redno. Između ova dva kola postoji prekidač koji se uključuje i isključuje naizmenično. Kolo je prikazano na slici 65.

Kada se uključi prekidač  $S$ , raste struja kroz prigušnicu  $L$  i u njoj dolazi do porasta magnetske energije. Kada se prekidač  $S$  isključi, akumulirana energija u prigušnici se prazni preko diode i kroz opterećenje tako da se tada kondenzator puni.

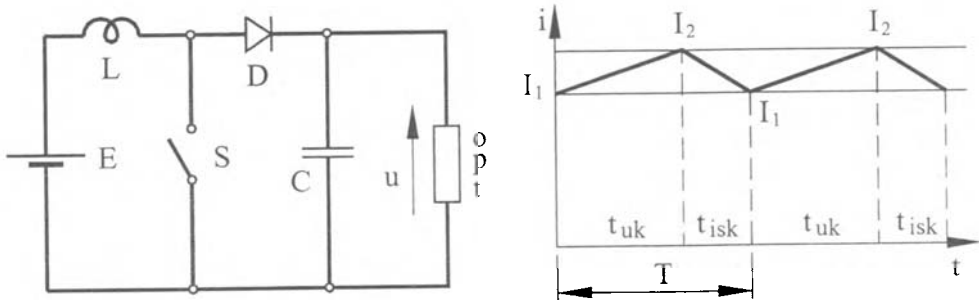
Ako je kapacitivnost  $C$  velika a perioda  $T$  mala, napon na izlazu se malo menja tako da je:

$$u \approx U = const \quad (10.06)$$

Ako se posmatraju talasni oblici napona na opterećenju, može se za interval  $0 \leq t \leq t_{uk}$ , kada je prekidač uključen, napisati naponska jednačina

$$E - L \frac{di}{dt} - R \cdot i = 0 \quad (10.07)$$

Ova jednačina može se, uz zanemarivanje omskog otpora prigušnice, integraliti u granicama od 0 do  $t_{uk}$  na sličan način kao u jednačini (10.02)



Slika 67. Princip rada čopera podizачa napona

A za vremenski interval  $t_{uk} \leq t \leq T$ , kada je prekidač isključen, naponska jednačina glasi:

$$E - L \frac{di}{dt} - R \cdot i - u = 0 \quad (10.08)$$

Ova jednačina može se, uz zanemarivanje omskog otpora prigušnice, integraliti u granicama od  $t_{uk}$  do  $T$  na sličan način kao u jednačini (10.04)

Sabirajući rešenja jednačine (10.07) i (10.08) a uz pretpostavku da je kapacitet kondenzatora jako velik i da se srednja vrednost izlaznog napona iz čopera podizача napona ne menja, može se odrediti srednja vrednost napona na opterećenju.

$$U_{av} = \frac{E}{\frac{T-t_{uk}}{T}} = \frac{E}{1-\frac{t_{uk}}{T}} \quad (10.09)$$

Ova jednačina ima dve granične vrednosti. Kada je  $t_{uk} = 0$ , tada je  $U_{sr} = E$ . Kada je  $t_{uk} \approx T$ , imenilac teži beskonačnoj vrednosti, što znači i da je  $U_{av} \approx \infty$ . Medutim, granični slučaj kada je  $t_{uk} \approx T$  nema fizičkog smisla jer tada nastupa kratak spoj u kolu. Praktično se srednja vrednost napona može podići od 10 % do 10 puta. Srednja vrednost napona na opterećenju utoliko je veća koliko je duže vreme uključenog stanja prekidača.

### 10.03. Čoper sa jednim tiristorom

Čoper sa jednim tiristorom pripada grupi čopera sa sopstvenom komutacijom pa se nekada naziva i samokomutujući čoper. Radi komutacije se koristi rezonantno kolo, na red ili paralelno spojeno sa tiristorom. Tiristor se isključuje čim napon u rezonantnom kolu preokrene polaritet, tako da nije potreban pomoćni tiristor za gašenje glavnog. Karakteristika ovog čopera je da je period provođenja tiristora stalan a učestanost rada a time i period rada promenljiv.

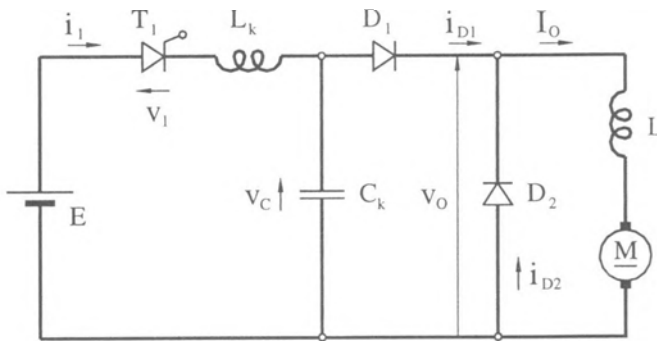
$$t_{uk} = const \quad \text{i} \quad T = var \quad (10.07)$$

Pošto je princip rada čopera sa paralelnim rezonantnim kolom sličan čoperu sa dva tiristora, to ćemo ovde proučiti slučaj čopera sa rednim rezonantnim kolom. Samokomutujući čoperi su dosta primenjivani čoperi, prvenstveno zato što im je elektronika potrebna za rad dosta jednostavna, ali imaju nedostatak da tiristor nije dobro iskorišćen i da se period uključivanja tiristora ne može menjati. Prema shemi na slici 67, rezonantno kolo koje čine komutacione komponente  $L_k$  i  $C_k$  isključuje tiristor pomoću inverzne struje. Dioda  $D_1$  sprečava oscilacije između komutacionog kondenzatora  $C_k$  i induktivnosti opterećenja  $L$ . Zamajna dioda  $D_2$  provodi struju opterećenja kada je tiristor  $T_1$  isključen.

Rad ovog čopera može se prikazati pomoću talasnih oblika prikazanih na slici 69. Period u kojem tiristor provodi prikazan je pomoću pune horizontalne linije iznad talasnih oblika.

$t_1 \leq t \leq t_2$  U periodu uključjenja tiristora, izlazni napon  $V_o$  ne raste sve dok struja kroz tiristor ne postane jednaka struji opterećenja  $I_o$ . Struja kroz tiristor raste linearno. Prema maksimalnoj struji opterećenja  $I_{o\max}$  vreme trajanja ovog perioda određuje se prema jednačini izvedenoj iz Faradejevog zakona elektromagnetne indukcije:

$$t_2 - t_1 = \Delta t = \frac{L_k \cdot I_{o\max}}{E} \quad (10.08)$$



Slika 68. Shema čopera sa jednim tiristorom i rednim rezonantnim kolom

$t_2 \leq t \leq t_3$  Jednosmeran izvor uzrokuje dalji rast struje kroz tiristor tako da iz poznate formule za polovinu rezonantnog perioda sledi:

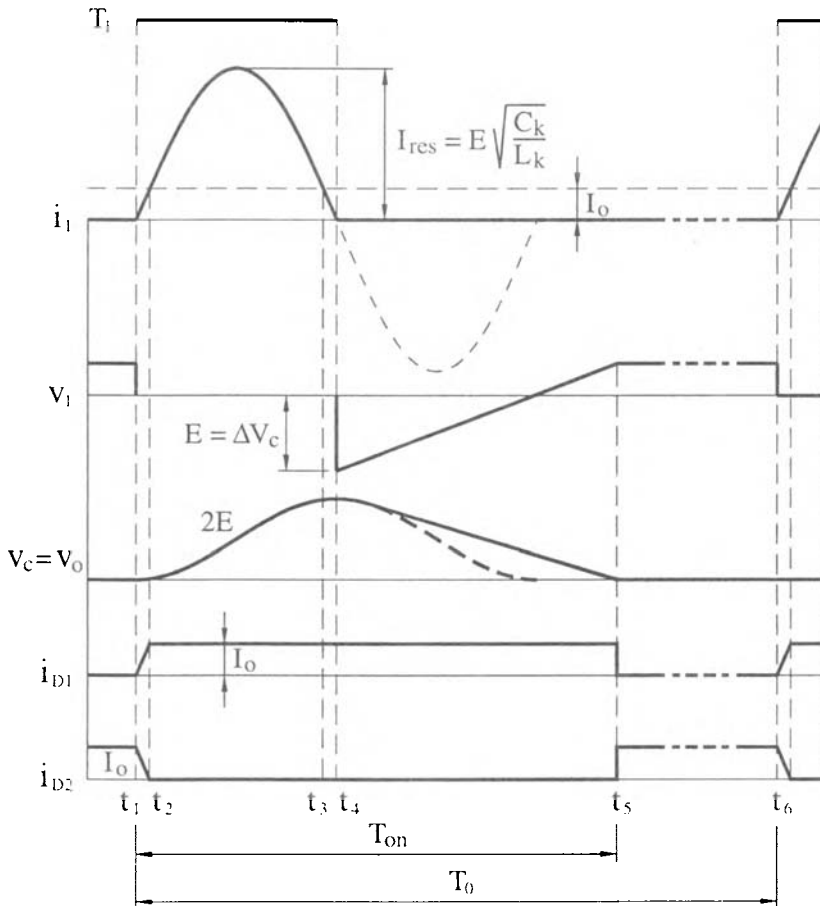
$$t_3 - t_2 = \pi \sqrt{L_k C_k} \quad (10.09)$$

Maksimum rezonantne struje se takode može naći iz poznate jednačine:

$$I_{r\max} = E \sqrt{C_k / L_k} \quad (10.10)$$

Pod pretpostvkom da se gubici u kolu mogu zanemariti,  $C_k$  se tokom ovog perioda naelektriše do vrednosti  $2E$ .

$t_3 \leq t \leq t_4$  U ovom periodu kondenzator počinje da se prazni i struja kroz tiristor po sinusnom zakonu pada na nulu. Radi pouzdanog isključenja tiristora, maksimalna rezonantna struja mora biti barem dva ili više puta veća od maksimalne struje opterećenja.



Slika 69. Talasni oblici napona i struja kod čopera sa jednim tiristorom

$t_4 \leq t \leq t_5$  U trenutku  $t_4$  struja kroz tiristor se obrće, tako da se tiristor mora isključiti. Kondenzator se razelektriše stalnom strujom. Vreme inverzne polarizacije tiristora mora biti veće od katalogskog vremena isključenja tiristora.

$t_5 \leq t \leq t_6$  Kada je izlazni napon iz čopera jednak nuli, struja opterećenja u kolu se održava usled nagomilane energije u induktivnosti opterećenja  $L$ , i u tom periodu provodi zamajna dioda  $D_2$ .

Kod ove vrste čopera, struja kroz tiristor raste sa frekvencijom rada čopera tako da je gornja granica određena vrednošću struje kroz tiristor. Maksimalna dozvoljena frekvencija se određuje pomoću trajanja periode provođenja diode  $D_1$  ili prema vremenu trajanja potpunog pražnjenja kondenzatora  $C_k$  a u skladu sa jednačinom:

$$f_{\max} = \frac{1}{t_{uk} + t_q} \quad (10.11)$$

gde je  $t_q$  vreme oporavka tiristora, ili vreme potrebno da bude inverzno polarisan da bi se potpuno ugasio. Ukoliko čoper treba da radi na višoj učestanosti, vreme oporavka tiristora biće manje od katalogske vrednosti, što može dovesti do gubitka upravljanja rada čopera.

Dobre strane ovog čopera su da je jednostavan, pouzdan i jeftin.

Mane su sledeće:

- vreme provođenja tiristora je stalno i ne može se regulisati
- tiristor je dosta opterećen jer provodi struju tereta i oscilatornu, komutacionu struju
- izlazni napon zavisi od opterećenja
- pri malom opterećenju se znatno povećava izlazni napon.

#### 10.04. Čoper sa dva tiristora

Shema prinudno komutujućeg dvotiristorskog čopera prikazana je na slici 79. U strujnim dijagramima,  $T_1$  je glavni tiristor koji provodi struju opterećenja a  $T_2$  je pomoćni tiristor koji isključuje  $T_1$  pomoću inverzne struje. Karakteristike ovog čopera su:

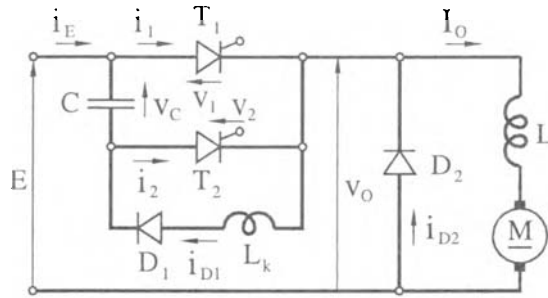
$$t_{uk} = \text{var} \quad \text{i} \quad T = \text{const} \quad (10.12)$$

Kod ovog čopera su neke osobine prethodne vrste čopera popravljene. Prvenstveno osobina da se vreme provođenja tiristora može regulisati. Rad ovog čopera biće



takođe objašnjen preko talasnih oblika napona i struje u karakterističnim vremenskim intervalima.

$t \leq t_1$  Tiristor  $T_1$  provodi i kao posledica toga postoji pun napon na opterećenju. Komutacioni kondenzator  $C_k$  je naelektrisan do napona napajanja  $E$  sa donjim delom na pozitivnom potencijalu.



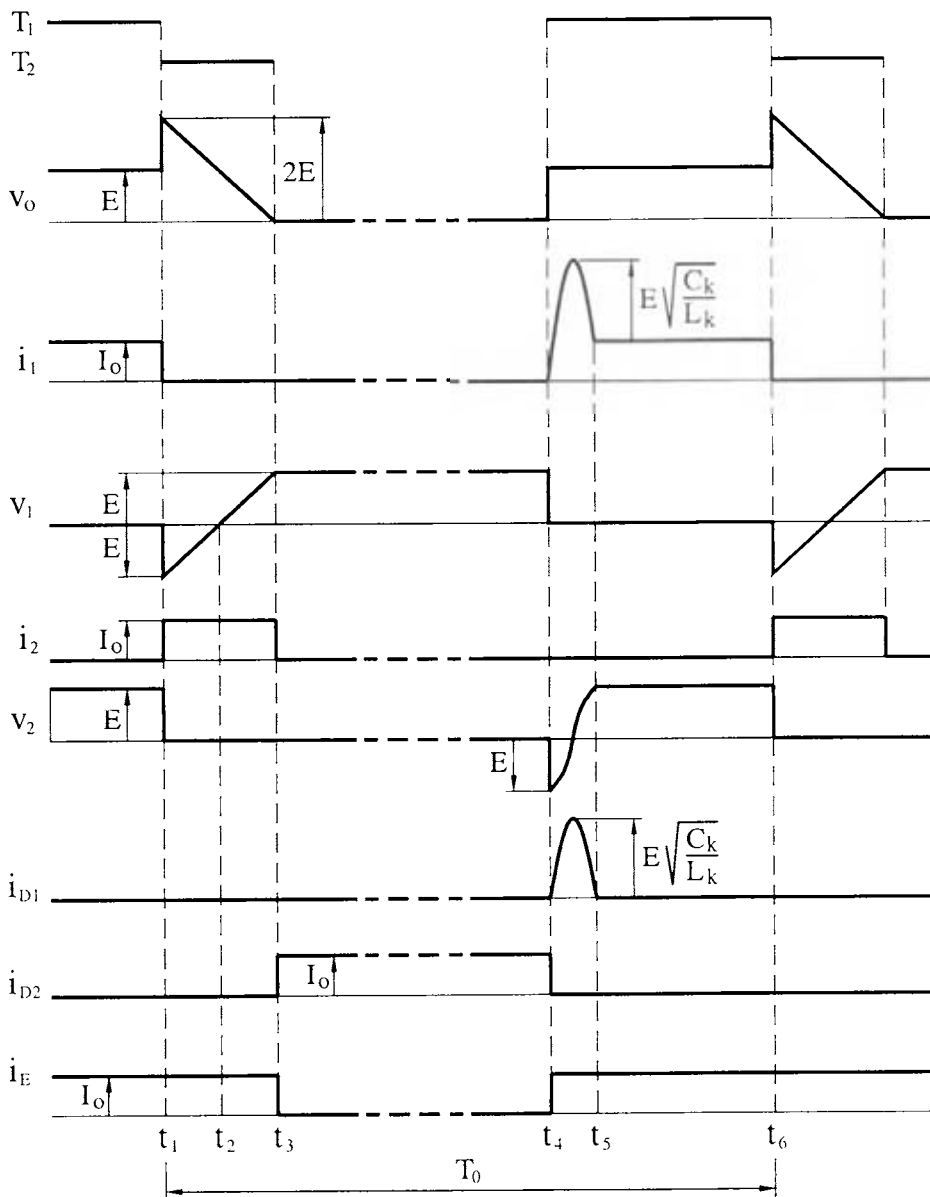
Slika 70. Shema čopera sa dva tiristora

$t_1 \leq t \leq t_2$  Ovo je komutacioni period u kome napon na krajevima kondenzatora  $C_k$  menja polaritet. Kada se uključi tiristor  $T_2$ , isključuje se tiristor  $T_1$  zato što mu je katoda na znatno višem potencijalu od anode, ili zato što kondenzator forsirano okreće smer struje kroz njega. Uključenje tiristor  $T_2$  uzrokuje da izlazni napon dostiže trenutnu vrednost  $2E$ , a struja opterećenja dolazi iz izvora preko kondenzatora  $C_k$  i tiristora  $T_2$ , tako da se ovaj kondenzator linearno prazni. Vreme isključenja tiristora  $T_1$ , koje mora biti veće od katalogskog vremena isključenja tiristora  $t_q$ , iznosi polovinu komutacionog vremena.

$$t_{isk1} = t_2 - t_1 = \frac{E \cdot C_k}{I_o} \quad (10.13)$$

$t_1 \leq t \leq t_3$  U ovom vremenskom intervalu srednja vrednost izlaznog napona iz čopera jednaka je naponu napajanja  $E$ . U trenutku  $t_1$  vrednost izlaznog napona iznosi  $2E$  i tokom ovog perioda linearno se smanjuje do vrednosti  $0$  u trenutku  $t_3$ .

$t_3 \leq t \leq t_4$  U trenutku  $t_3$ , tiristor  $T_2$  je isključen. Izlazni napon iz čopera je nula, tako da induktivnost opterećenja utiče da zamajna dioda  $D_2$  provodi. Tokom



Slika 71. Talasni oblici napona i struja u kolu čopera sa dva tiristora napon na kondenzatoru ima stalnu vrednost  $-E$ .

ovog perioda struja kroz tiristor  $T_1$  je nula, ali je napon na njemu jednak naponu napajanja. Struju opterećenja preuzima zamajna dioda  $D_2$  u celom intervalu s obzirom da se pretpostavlja da je struja opterećenja stalna.

$t_4 \leq t \leq t_5$  Napon na kondenzatoru se rezonantno okreće posle uključenja tiristora  $T_1$  u trenutku  $t_4$ , tako da rezonantna struja protiče kroz tiristor  $T_1$ , komutacionu induktivnost  $L_k$ , diodu  $D_1$  i komutacioni kondenzator  $C_k$ . Dioda  $D_1$  sprečava pražnjenja komutacionog kondenzatora  $C_k$ . Vreme isključenja tiristora  $T_2$  jednako je četvrtini rezonantnog perioda.

$$t_{isk2} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_k C_k} \quad (10.14)$$

i mora biti veće od katalošskog vremena isključenja ovog tiristora.

$t_5 \leq t \leq t_6$  Napon na komutacionom kondenzatoru  $C_k$  je stalan i tako uspostavljen da isključuje tiristor  $T_1$  kada se tiristor  $T_2$  uključuje.

Minimum izlaznog napona iz čopera zavisi od kataloških vremena isključenja tiristora  $t_q$ . Maksimum izlaznog napona čopera mora biti niži od napona napajanja. Nedostaci ovog čopera su da vreme isključenja tiristora zavisi od struje opterećenja, da pomoćni tiristor mora biti okinut prvi pri uključanju uređaja, a kroz glavni tiristor prolazi i dalje velika rezonantna struja komutacije.

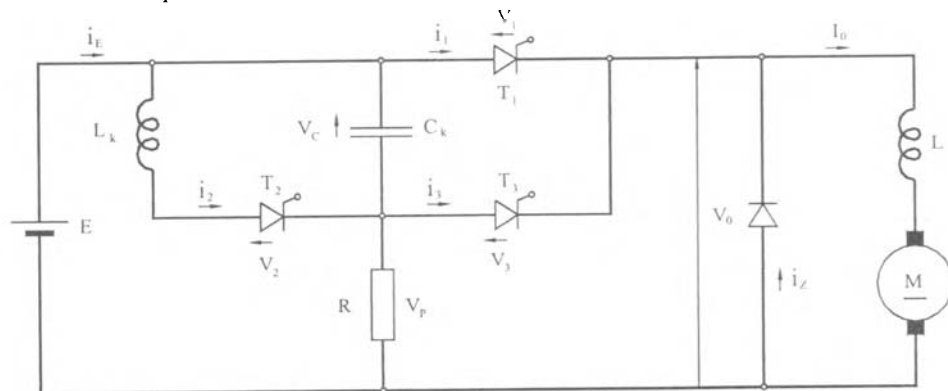
### 10.05. Čoper sa tri tiristora

Kod ove vrste čopera sa tri tiristora [04] otklonjena su oba prethodna nedostatka. Glavni tiristor nije opterećen komutacionom strujom, a period provodenja tiristora može da se menja. U kolu postoje tri tiristora od kojih svaki ima odvojene funkcije: tiristor  $T_1$  napaja strujom opterećenje, tiristor  $T_2$  komutuje napon na komutacionom kondenzatoru  $C_k$ , a tiristor  $T_3$  gasi tiristor  $T_1$ . Ovim se dobija i pouzdan rad nezavisan od opterećenja a pored toga redosled uključivanja tiristora na početku rada nije bitan.

Rad ovog čopera se takode može analizirati preko talasnih oblika napona i struja u karakterističnim vremenskim intervalima. Pretpostavićemo da tiristor  $T_1$  provodi.

$t_1 \leq t \leq t_2$  U trenutku  $t_1$  uključuje se tiristor  $T_2$  i napon na komutacionom kondenzatoru  $C_k$  se okreće. U trenutku  $t_2$  tiristor  $T_2$  se isključuje usled sopstvene komutacije. Interesantno je napomenuti da se ovaj proces može obaviti i istovremeno sa uključenjem tiristora  $T_1$ , što se često radi.

$t_2 \leq t \leq t_3$  Pošto se u ovom periodu vremena komutacioni kondenzator razelektriše preko otpornika  $R$ , ovaj treba da ima veliku vrednost. Njegova uloga je da samo kod stavljanja čopera pod napon, za izvesno vreme napuni kondenzator na vrednost napona izvora  $E$ .

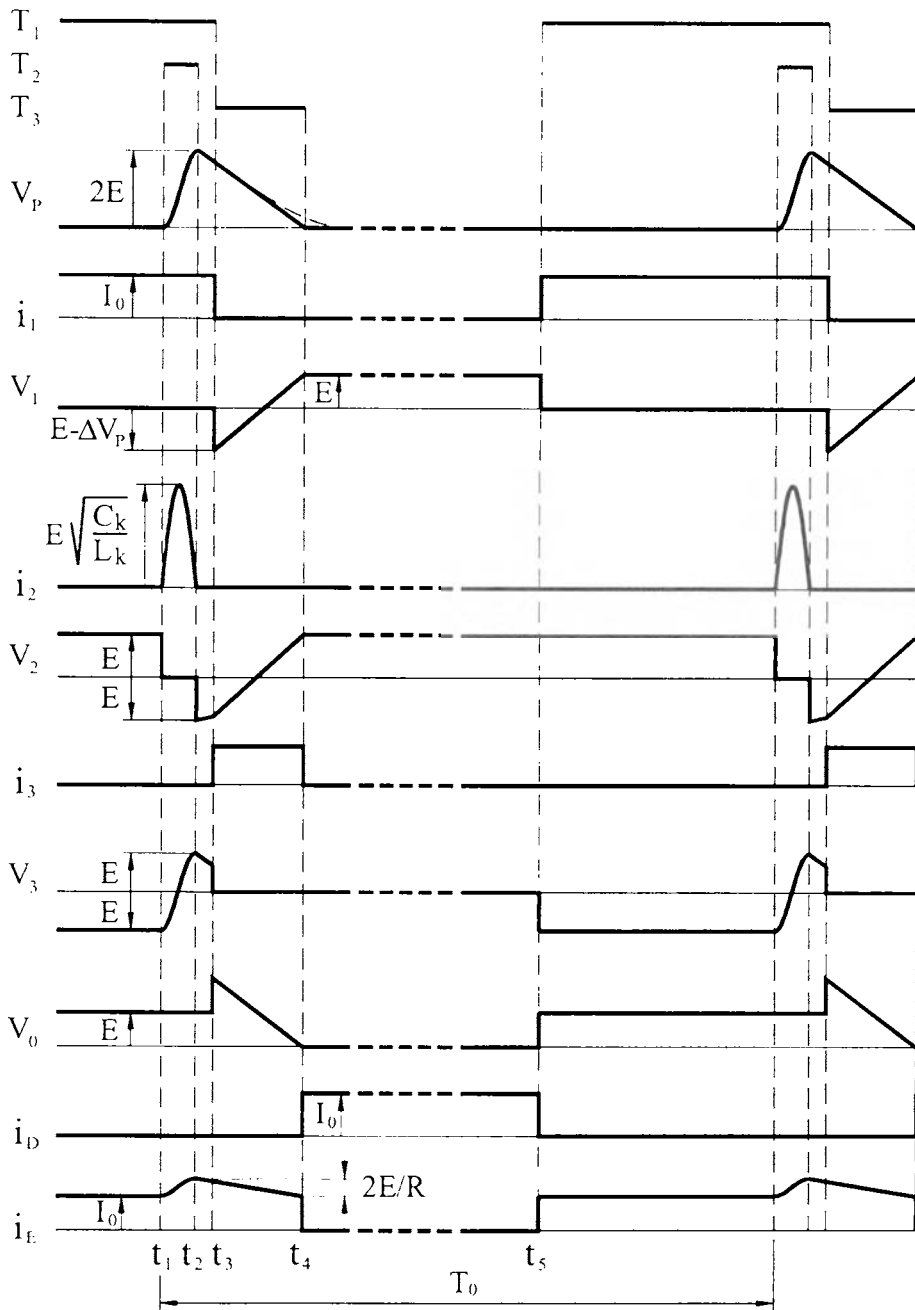


Slika 72. Shema čopera sa tri tiristora

$t_3 \leq t \leq t_4$  U trenutku  $t_3$ , uključuje se tiristor  $T_3$  a isključuje se tiristor  $T_1$  pomoću napona na komutacionom kondenzatoru. Struja opterećenja  $I_o$  prenosi se sa tiristora  $T_1$  na tiristor  $T_3$ , tako da se komutacioni kondenzator  $C_k$  linearno razelektriše. U trenutku  $t_4$ , tiristor  $T_3$  se isključuje usled sopstvene komutacije.

$t_4 \leq t \leq t_5$  U ovom periodu je stabilno stanje kada je izlazni napon iz čopera nula. Struja kroz opterećenje održava se zahvaljujući zamajnoj diodi  $D_1$  i sopstvenoj induktivnosti  $L$ .

$t_5 \leq t$  U trenutku  $t_5$  uključuje se tiristor  $T_1$ . Istovremeno, ili nešto kasnije, uključuje se tiristor  $T_2$ . Na opterećenju se opet javlja pun napon izvora.



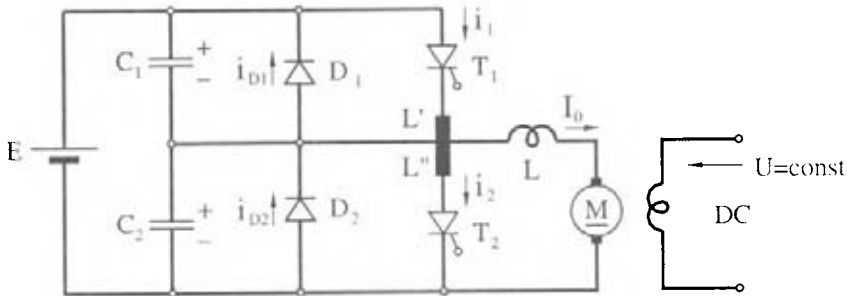
Slika 73. Talasni oblici napona i struja kod čopera sa tri tiristora

Prednosti ovog čopera su da kroz glavni tiristor prolazi samo struja opterećenja, da nije bitan redosled okidanja tiristora na početku rada čopera i da vreme isključenja tiristora ne zavisi od opterećenja. No zato je ovaj čoper nešto skuplji i upravljačka elektronika mu je složenija od prethodnih vrsta čopera.

### 10.06. Čoper za spuštanje i podizanje napona

Ova vrsta čopera koristi se za pogon kao i za rekuperativno ili regenerativno kočenje pogonskog mehanizma. Znači na ovaj način moguće je pogonske jednosmerne mašine generatorski kočiti [05] ili pri kočenju vršiti prebacivanje mehaničke energije u električnu.

Radi korektno realizacije čopera ove vrste, izuzetno je važno da se napravi bifilarna induktivnost. To znači da se na jednom nemagnetskom telu istovremeno motaju dve zavojnice  $L'$  i  $L''$  u istom smeru. Na ovaj način se dobija magnetsko kolo sa jako malim rasipanjem magnetskog fluksa i mogućnost da se praktično trenutno vrši prebacivanje fluksa a time i napona sa jednog na drugi namotaj što je izuzetno važno za proces gašenja tiristora.



Slika 74. Šema čopera sa obostranim dejstvom, za spuštanje i podizanje napona

Sa ovim čoperom moguće je raditi podizanje i spuštanje napona. Često se koriste termini za motorni režim kada se govori o spuštanju napona i generatorski režim ako se govori o podizanju napona.

#### a) Rad u režimu spuštanja napona.

Ovaj režim koristi se za napajanje opterećenja promenljivim naponom iz izvora stalnog napona. Pretpostaviće se da je struja opterećenja stalna ili tačnije da je opterećenje strujni ponor. Rad čopera će se objasniti preko vremenskih intervala.

$t_1 \leq t \leq t_2$  U trenutku  $t_1$  uključuje se tiristor  $T_1$ . Napon na induktivnosti  $L'$  jednak je nuli jer kroz nju protiče stalna struja opterećenja. Napon na kondenzatoru  $C_1$  je takode nula a napon na kondenzatoru  $C_2$  jednak je naponu napajanja.

$t_2 \leq t \leq t_3$  U trenutku  $t_2$  uključuje se tiristor  $T_2$ . Formira se oscilatorno kolo koje čine kondenzator  $C_2$  i bifilarna induktivnost  $L''$  kroz tiristor  $T_2$ . Napon sa jedne grane bifilarne induktivnosti  $L''$  trenutno se prebacuje na drugu granu  $L'$  jer su ove komutacione induktivnosti spregnute. Na gornjoj komutacionoj induktivnosti  $L'$  indukuje se isto toliki napon  $+E$  zbog bifilarnog motanja, pa je ukupan napon na prigušnici  $2E$ . Potencijal katode tiristora  $T_1$  iznosi  $2E$ , tako da se tiristor nalazi pod inverznim naponom  $E - 2E = -E$  usled čega se isključuje.

$t_3 \leq t \leq t_4$  Ovo stanje traje sve dok se kondenzator  $C_2$  ne isprazni. Kondenzator  $C_1$  se istovremeno pri tome puni do vrednosti  $+E$ . Na kraju tog procesa kondenzator  $C_1$  je naelektrisan na vrednost  $+E$  a kondenzator  $C_2$  je potpuno ispražnjen i napon na njemu je nula. U tom trenutku, tiristor  $T_2$  se isključuje a struju opterećenja preuzima dioda  $D_2$  koja postaje provodna. Znači tiristor  $T_2$  se gasi kada se akumulisana energija u komutacionom kolu potroši. Dioda  $D_2$  provodi konstantnu struju opterećenja na osnovu akumulisane reaktivne energije u induktivnosti potrošača ili u dodatnoj prigušnici.

Okidanjem tiristora  $T_1$  opterećenje se opet napaja sa mreže. Pri tome je napon na kondenzatoru  $C_1$  jednak naponu napajanja, a napon na kondenzatoru  $C_2$  jednak je nuli.

*b) Rad u režimu podizanja napona.*

Ovaj režim najčešće se koristi da bi se vršilo generatorsko kočenje jednosmernih električnih mašina. Pored toga, moguće je i iz izvora manjeg napona napajati opterećenje na višem naponskom nivou. I u ovoj analizi, pretpostaviće se da je struja koju daje opterećenje stalna, ali smer joj je od opterećenja ka električnom izvoru. Rad čopera će se objasniti preko vremenskih intervala.

$t_1 \leq t \leq t_2$  U trenutku  $t_1$  uključuje se tiristor  $T_2$ . Napon na bifilarnoj induktivnosti  $L''$  jednak je nuli, jer kroz nju protiče stalna struja opterećenja. Napon na kondenzatoru  $C_2$  je takode nula a napon na kondenzatoru  $C_1$  jednak je naponu napajanja.

$t_2 \leq t \leq t_3$  U trenutku  $t_2$  uključuje se tiristor  $T_1$ . Formira se oscilatorno kolo koje čine kondenzator  $C_1$ , jedna grana bifilarne induktivnosti  $L'$  i tiristor  $T_1$ . Napon sa induktivnosti  $L'$  trenutno se prebacuje na drugu granu induktivnosti  $L''$  jer su ove induktivnosti spregnute. Pošto je napon na sredini bifilarne induktivnosti  $+E$ , to struja kroz tiristor  $T_2$  pada na nulu i on se gasi.

$t_3 \leq t \leq t_4$  Potencijal katode tiristora  $T_1$  iznosi  $2E$ , tako da se tiristor nalazi pod naponom  $E - 2E = -E$  usled čega se i on isključuje. Kada se tiristor  $T_2$  ugasi, struju opterećenja preuzima dioda  $D_1$ . Znači struja iz opterećenja ide u izvor. Kondenzator  $C_2$  se puni na vrednost  $+E$ .

Okidanjem tiristora  $T_2$  opterećenje se opet kratko spaja. Pri tome je napon na kondenzatoru  $C_1$  jednak naponu napajanja, a napon na kondenzatoru  $C_2$  jednak je nuli. Proces se u potpunosti ponavlja.

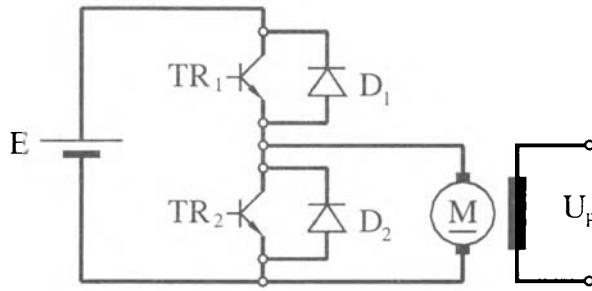
Ova vrsta čopera za obostrani rad predstavlja polovinu monofaznog mostnog invertora i zato je potrebno dobro ga proučiti jer ćemo se sa njegovim radom sresti i kasnije.

## 10.07. Dalji razvoj čopera

Izuzetno buran razvoj poluprovodničkih komponenata uslovio je da se zadnjih godina čoperi snaga i preko 100kW prave skoro isključivo sa tranzistorima snage [06-07]. Pored toga što su oslobođeni problema sa komutacijom, čoperi sa tranzistorima imaju zanatno prostiju elektroniku za upravljanje, manje su osetljivi na smetnje, mogu raditi i na znatno višim frekvencijama koje mogu preći čujni opseg, a povrhn svega su i jeftiniji. To su razlozi zašto su električni pogoni na plovnim objektima manjih snaga, a koji služe za rekreaciju na zatvorenim akvatorijama, pravljeni sa tranzistorskim čoperima [08].

Šema čopera sa obostranim dejstvom, ili čoper predviđenim za rad u prvom i četvrtom kvadrantu prikazana je na slici 74. U režimu spuštanja napona, u pogonu se nalazi tranzistor  $TR_1$  i dioda  $D_2$  kao zamajna. U režimu podizanja napona, u pogonu se nalazi tranzistor  $TR_2$  a dioda  $D_1$  u ovom slučaju služi za povraćaj energije u izvor. Konstruktivno se energetski tranzistori konstruktivno izvode sa paralelno vezanim diodama.





Slika 75. Tranzistorski čoper predviđen za pogon i rekuperativno kočenje

### 10.08. Literatura

01. Miljanić P., Zabeleške sa predavanja iz Energetskih pretvarača, Beograd, 1985.
02. Westinghouse, Silicon controlled Rectifier Designers Handbook, Pennsylvania, 1970.
03. Grafham D.R., Hey J.C., SCR Manual, Fifth Edition, General Electric Company, USA, 1972.
04. Philips, Basic Thyristor Chopper Circuits, Application Information No. 459, 1971.
05. Nikolić Z., Zdravković Z., Jedno rešenje regulatora brzine za autonomno električno vozilo, Zbornik radova IV savetovanja "Energetska elektronika", Sarajevo, 1981, 374-388.
06. Sescasem, Power transistor in the switching mode, Thomson CSF, Paris, 1980, 1-182.
07. Motto J. W., Introduction to solid state Power Electronics, Westinghouse, Youngwood, Pennsylvania, 1977, 92-96.
08. Nikolić Z, Marinković M, Janković Z, Development of the electric vessels with double drive, Proceedings of the First European Inland Waterway navigation Conference, Budapest, 1999, 275 - 283.

## ***11. INVERTORI (DC/AC pretvarači)***

Invertori su energetska pretvarači koji jednosmerni napon pretvaraju u naizmjenični, potrebne frekvencije i amplitude. Frekvencija i amplituda naizmjeničnog napona mogu biti konstantne ili promenljive veličine.

Sa invertorima ili sa invertorskim radom smo se već sreli kod punoupravljivih ispravljača jer je napomenuto da ispravljači sa svim tiristorima u kolu mogu pod određenim uslovima preći iz ispravljačkog u invertorski režim pri čemu vraćaju električnu energiju u mrežu. Prema vrsti komutacije, tiristorski invertori, pripadaju pretvaračima sa prinudnom ili forsiranom komutacijom.

Invertori se mogu podeliti prema karakteru opterećenja, karakteru izlaznog napona i prema stepenu upravljivosti.

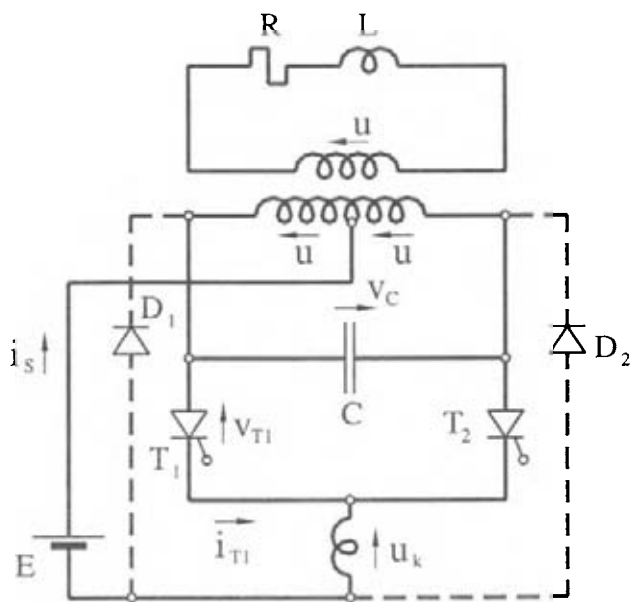
- Prema karakteru opterećenja, invertori se dele na mrežom vodene (ili zavisne) i autonomne (ili nezavisne).  
Mrežom vodeni invertori se koriste uglavnom za vraćanje električne energije iz jednosmernog sistema u naizmjeničnu mrežu. Ovi invertori su punoupravljivi ispravljači koji pod određenim uslovima prelaze u invertorski rad.  
Autonomni invertori mogu biti strujni, naponski i rezonantni. Strujni invertori imaju na red vezanu veliku induktivnost tako da se na izlazu formira struja četvrtastog oblika a daje napon sinusnog oblika. Naponski invertori formiraju na opterećenju napon četvrtastog oblika a oblik i fazno kašnjenje struje zavise od karaktera opterećenja. U rezonantnim invertorima opterećenje sadrži značajnu induktivnost i zajedno sa reaktivnim elementima kola čini oscilatorno kolo sa naponskom rezonancijom. Izlazna frekvencija određena je frekvencijom upravljačke elektronike za okidanje tiristora ili tranzistora snage.
- Prema karakteru izlaznog napona invertori mogu biti jednofazni, trofazni i višefazni.
- Prema stepenu upravljivosti razlikujemo neupravljive i upravljive invertore.

Rad invertora davno je teoretski proučen i analiziran [01-02]. Pored toga, veliki proizvođači poluprovodničkih komponenata [03-04], potrudili su se da pored kataloga naprave i priručnike gde su do detalja objašnjeni principi i kriterijumi za odabiranje poluprovodničkih komponenata i njihova primena u osnovnim invertorskim kolima.

### 11.01. Monofazni inverter sa transformatorom sa srednjom tačkom

Naizmenny napon može se dobiti iz jednosmernog izvora upotrebom monofaznog invertora sa transformatorom sa srednjom tačkom, slika 75. Tipični talasni oblici napona i struje prikazani su na slici 76.

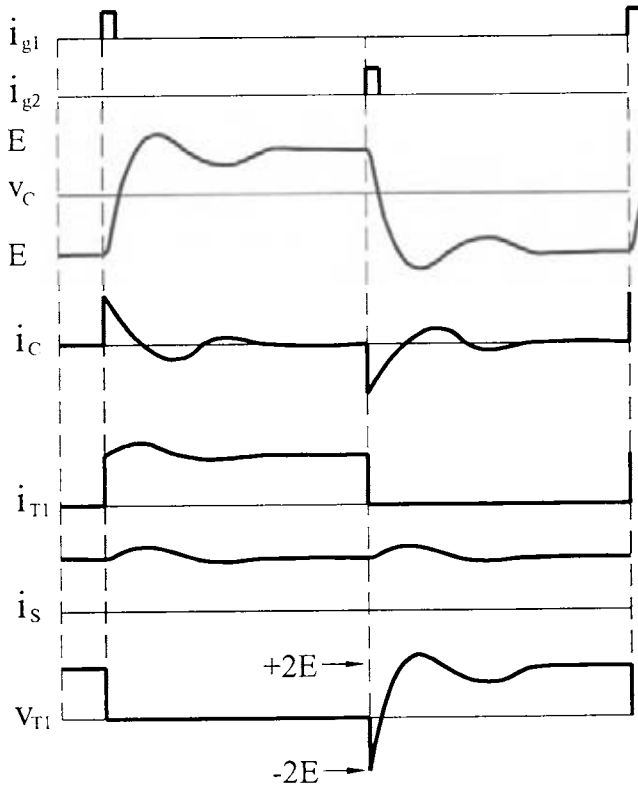
Pretpostavimo da je opterećenje omsko, da je transformator idealan i da svi navojci imaju isti broj navojaka  $N$ . Pored toga, pretpostavimo da je uključen tiristor  $T_1$ . Kondenzator se napuni na vrednost napona  $2E$  pri čemu je levi kraj na negativnom potencijalu. Struja potrošača je  $I_o$  a napon na potrošaču je  $-E$ . U trenutku uključenja tiristora  $T_2$ , iz kondenzatora  $C$  protokne velika komutaciona struja pa se vrlo brzo gasi  $T_1$ . Napon na kondenzatoru menja polaritet za vrlo kratko vreme.



Slika 76. Shema veza monofaznog invertora sa transformatorom sa srednjom tačkom

Kod induktivnih potrošača, struja u potrošaču se i dalje uspostavlja u istom smeru. Kada dolazi do promene smeru napona, potrošač postaje izvor energije, jer je u njemu nagomilana reaktivna energija koja se vraća u izvor. Napon na komutacionoj induktivnosti, neće moći da promeni znak jer će proraditi dioda  $D_2$ . Desni kraj kondenzatora poseduje niži potencijal od napona izvora, jer je struja i dalje u smeru

nasuprot naponu, pa počinje dioda  $D_2$  da provodi. Radi se o takozvanom fenomenu "zarobljene energije". Prigušnica je kratko spojena preko tiristora  $T_2$  i diode  $D_2$ . Kada se zarobljena energija potroši, ugasiće se tiristor  $T_2$ . Kod većih invertora, snaga iznad par kW, diode se vezuju na 5 - 10% navojaka od kraja transformatora. Pomoću ove veze vrši se regeneracija zarobljene energije. Tiristor  $T_2$  se gasi, struja u kolu potrošača je suprotna naponu, a takođe i u primarnom kolu, pa se reaktivna energija potrošača vraća u bateriju iz induktivnosti potrošača. Zbog uloge koju imaju, ove diode nazivaju se diode za povraćaj reaktivne energije.



Slika 77. Talasni oblici napona i struje u kolu invertora

Kada se promeni smer struje u sekundaru, menja se i u primaru i gasi se dioda  $D_2$ . Zbog karaktera opterećenja, tokom celog vremena provođenja tiristora, na gejt se dovode impulsi, takozvani češalj impulsa. Napon na izlazu je pravougaon i ne zavisi od opterećenja. Pošto se talasni oblik napona znatno razlikuje od sinusnog, obavezno se moraju postaviti filtri što poskupljuje uređaj.

Radi jednostavnije analize pretpostavićemo da je prenosni odnos transformatora  $m = 1$ . Za vreme dok provodi tiristor  $T_1$ , napon na opterećenju jednak je naponu izvora. U slučaju kada provodi tiristor  $T_2$ , napon na opterećenju je istog intenziteta samo sa promenjenim predznakom. Efektivna vrednost izlaznog napona se može lako odrediti na sledeći način

$$U_0 = \sqrt{\frac{2}{T_0} \cdot \int_0^{T_0/2} E^2 \cdot dt} = E \quad (11.01)$$

Da bi odredili način formiranja sinusnog talasnog oblika napona razložićemo pravougaoni periodičan talasni oblik napona Furijeovim redom

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos n\omega t + b_n \cdot \sin n\omega t \quad (11.02)$$

Pri određivanju koeficijenata mora se imati u vidu da je

$$f(t) = +1 \quad \text{za} \quad 0 < \omega t < \pi \quad \text{i}$$

$$f(t) = -1 \quad \text{za} \quad \pi < \omega t < 2\pi \quad (11.03)$$

što je očigledno i sa slike 76.

Koeficijenti  $a_n$  se mogu odrediti na osnovu sledećih izraza

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \cos n\omega t \cdot d(\omega t) \quad (11.04)$$

gde je  $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$

Može se pokazati, da su zbog simetrije, svi članovi  $a_n = 0$ .

Koeficijenti  $b_n$  se određuju pomoću formule

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \sin n\omega t \cdot d(\omega t) \quad (11.05)$$

gde je  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

Tako da se posle ubacivanja jednačine (11.03) u (11.05) dobija

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sin n\omega x \cdot d(\omega x) + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -\sin n\omega x \cdot d(\omega x)$$

odakle se posle integraljenja i izjednačenja parnih članova sa nulom, može dobiti da je:

$$b_n = \frac{2}{n\pi} (1 - \cos n\pi)$$

Pošto je funkcija neparna, svi parni članovi  $b_n$  jednaki su nuli a ako je  $n$  neparno, biće

$$b_n = \frac{4}{n \cdot \pi} \quad \text{za} \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (11.06)$$

Posle sređivanja, funkcija se može predstaviti sledećim izrazom

$$f(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \sin n\omega x \quad (11.07)$$

ili

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \omega x + \frac{1}{3} \sin 3\omega x + \frac{1}{5} \sin 5\omega x + \dots \right) \quad (11.08)$$

Ako se kao početno vreme odabere  $\pi/2$  tada se izraz (11.07) može predstaviti u obliku

$$f(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot \sin \frac{n\pi}{2} \cdot \cos n\omega x \quad (11.08)$$

Pri smeni su korišćene trigonometrijske identičnosti

$$\sin\left(\omega x + \frac{\pi}{2}\right) = \cos \omega x \quad \text{i} \quad \sin\left(\omega x + 3\frac{\pi}{2}\right) = -\cos \omega x$$

Koristeći Furijeovu analizu i jednačine (11.07) i (11.09), trenutna vrednost izlaznog napona može se predstaviti sledećim redovima

$$u_o(t) = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \cdot \sin n\alpha t \quad (11.11)$$

ili

$$u_o(t) = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \cdot \cos n\alpha t \cdot \sin \frac{n\pi}{2} \quad (11.12)$$

Efektivna vrednost osnovnog harmonika  $n = 1$  može se lako izračunati iz jednačine (11.10)

$$U_1 = \frac{4 \cdot E}{\sqrt{2 \cdot \pi}} = 0,9 \cdot E \quad (11.11)$$

U izrazu u imeniocu postoji  $\sqrt{2}$  jer je to efektivna a ne maksimalna vrednost.

Poređenjem rezultata, lako se može uočiti da je osnovni ili prvi harmonik najizraženiji. Da bi izlazni naponski talas bio što sličniji sinusnom obliku, potrebno je da se ostali ili viši harmonici ponište ili smanje na najmanju meru.

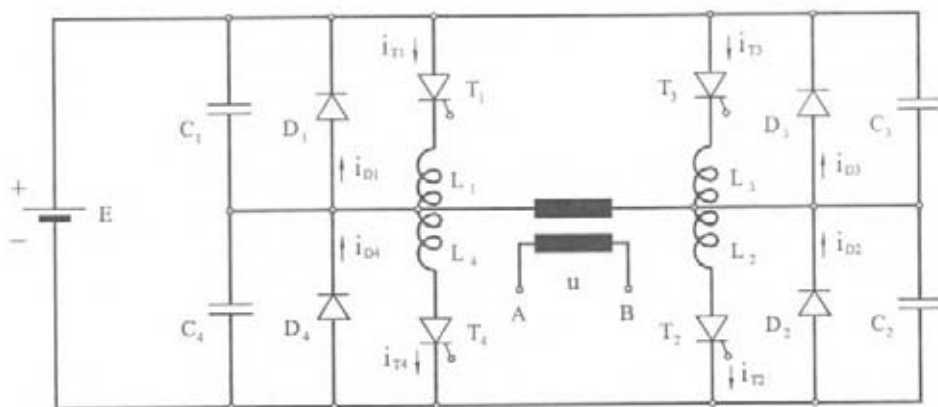
## 11.02. Monofazni mostni inverter

Osnovno kolo za monofazni mostni inverter prikazano je na slici 78. Komutaciono kolo, kao i njegov rad poznati su od ranije ali ćemo opet ukratko ponoviti.

Pretpostavićemo da je opterećenje omsko, da je transformator idealan i da provode tiristori  $T_1$  i  $T_2$ . Kondenzatori  $C_3$  i  $C_4$  su naelektrisani na vrednost  $+E$  pri čemu je gornji kraj oba kondenzatora na višem naponu. Uključenjem tiristora  $T_4$  u bifilarnim namotajima  $L_4$  i  $L_1$  indukuju se elektromotorne sile koja isključuju tiristor  $T_1$ . Analogno tome, istovremenim uključenjem tiristora  $T_3$  isključuje se tiristor  $T_2$ . Napon na krajevima transformatora menja smer kao i na opterećenju. Na omskom opterećenju generišu se četvrtasti talasni oblici.

Uključenjem tiristora  $T_4$ , napon sa kodenzatora  $C_4$  ( $+E$ ) prelazi na prigušnicu  $L_4$ . Trenutna promena fluksa indukuje isto toliko napon i na gornjem delu

prigušnice  $L_3$  (zbog bifilarnog motanja), pa je ukupni napon na prigušnici  $2E$ . Tiristor  $T_1$  je inverzno polarisan naponom  $E$  i on se trenutno gasi, a struja se prebacuje u donju polovinu prigušnice (fluks se ne menja pa se i magnetska energija očuvava). Nekoliko desetina  $\mu s$  prazni se kondenzator  $C_4$  a puni  $C_1$ . Na kraju ovog procesa  $U_{C1} = U_{T1} = E$ . Kada napon na gornjem kraju kondenzatoru  $C_2$  padne na nulu, provodi dioda  $D_2$ . Tiristor  $T_4$  se gasi kada se potroši energija zarobljena u klemu. Posle toga, vraća se magnetska energija iz prigušnice potrošača preko  $D_2$  i  $D_3$  u izvor. Struja teče nasuprot elektromotornoj sili izvora. Ovo stanje traje sve dok se reaktivna energija akumulisana u opterećenju na vrati u izvor i dok struja ne padne na nulu. Struja opterećenja ima težnju da promeni smer. Da bi struja mogla da teče i u suprotnom smeru mora se omogućiti da tiristor  $T_4$  ponovo provede. Pošto se ne zna trenutak kada će se to dogoditi jer to zavisi od prirode opterećenja, na gejt tiristora  $T_4$  u toku cele poluperiode dostavlja se kontinualan impuls ili češalj impulsa.

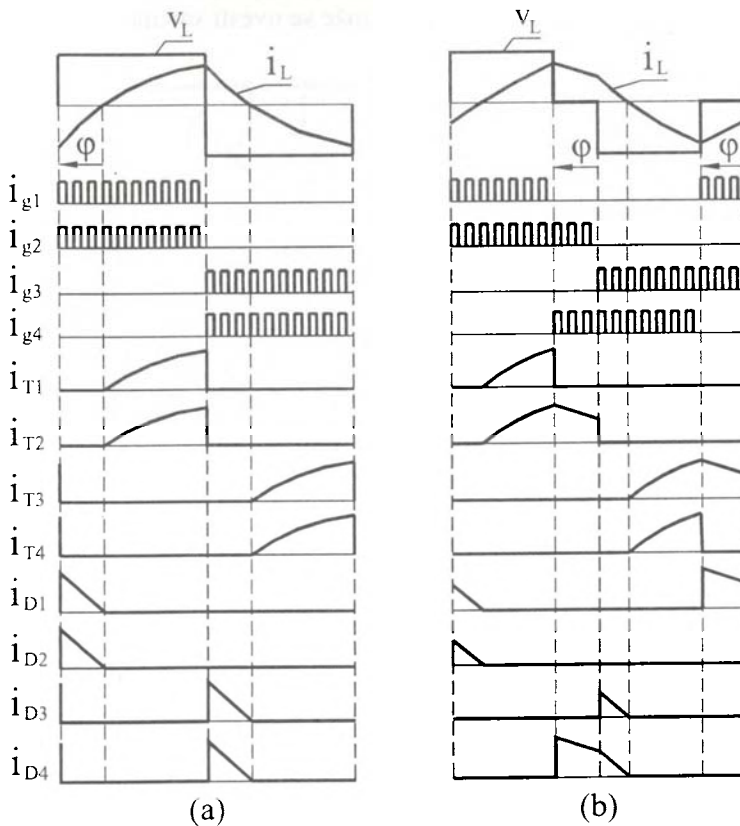


Slika 78. Shema veza monofaznog mostnog invertora

Ukoliko je opterećenje induktivno, struja kasni za naponom pri čemu je izlazni naponski talas pravougaonik. Kada se uključe tiristori  $T_3$  i  $T_4$ , isključuju se tiristori  $T_1$  i  $T_2$ , napon na opterećenju postaje negativan ali ne i struja na opterećenju. Struja opterećenja se zatvara kroz diode  $D_3$  i  $D_4$  tako da se akumulisana energija iz opterećenja vraća u izvor sve dok struja opterećenja ne padne na nulu. Za sve ovo vreme tiristori  $T_3$  i  $T_4$  su posle isključenja tiristora  $T_1$  i  $T_2$  takođe isključeni. Kada struja opterećenja padne na nulu, stvaraju se uslovi da



se tiristori  $T_3$  i  $T_4$  mogu uključiti. Pošto ovaj trenutak uključivanja tiristora zavisi od struje opterećenja,  $i$  nije fiksna, to se na tiristore mora dovoditi niz impulsa ili “češalj” tokom celog perioda.



Slika 79. Talasni oblici napona i struje u kolu za  
a) četvrtast i b) kvazičetvrtast izlazni napon

Kontrola izlaznog napona može se dobiti uvođenjem perioda neprovođenja u četvrtasti talas dajući kvazi četvrtasti talas koji se lakše može pretvoriti u sinusni oblik. Kada se regulacija radi za četvrtast talas, trenutna vrednost izlaznog napona može se predstaviti istim jednačinama (11.10) i (11.11) kao i za monofazni inverter sa transformatorom sa srednjom tačkom. No ukoliko je izlazni napon kvazičetvrtast slika 78.b), efektivna vrednost izlaznog napona može se napisati u obliku:

$$U_0 = \sqrt{\frac{2}{T_0} \cdot \int_0^{t_1} E^2 \cdot dt} = E \cdot \sqrt{\frac{2t_1}{T_0}}$$

ako se umesto vremena radi sa uglovima, može se uvesti smena

$$\frac{2t_1}{T_0} = \frac{2\alpha}{2\pi} = \frac{\alpha}{\pi}$$

tako da se dobija da je

$$U_0 = E \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \quad (11.13)$$

Trenutna vrednost izlaznog napona može se za ovaj slučaj napisati u obliku

$$u_0(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \cdot \sin \frac{n\alpha}{2} \cdot \sin n\omega t \quad (11.14)$$

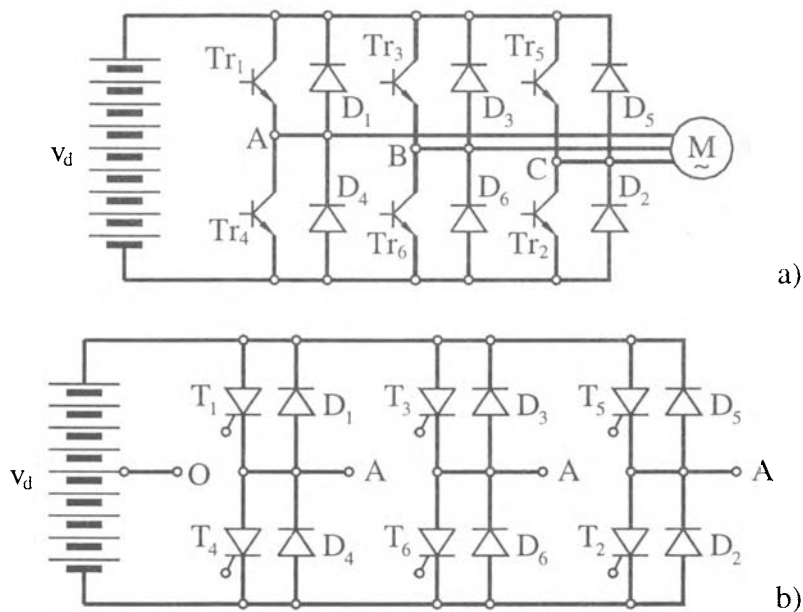
### 11.03. Trofazni mostni invertori

U naizmeničnim mrežama, posebno većih snaga, javljaju se potrebe za trofaznim naizmeničnim naponom. Dobijanje trofaznih napona dosta jednostavno se može izvršiti jednostavnim tripliranjem monofaznih invertora. Trofazni invertori sa kvazičetvrtastim talasnim izlaznim oblicima napona, komercijalno se koriste za naizmenične pogone sa promenljivom brzinom kao što je prikazano na slici 79. a). U kolo monofaznog mostnog invertora dodata je i treća grana, polovina monofaznog mostnog invertora i srednje tačke A, B i C spojene su na trofazni naizmenični motor. Obrnut smer obrtanja se jednostavno dobija promenom redosleda provođenja tranzistora ili tiristora.

Osnovno kolo trofaznog mostnog invertora prikazano je na slici 79. Princip rada trofaznog invertora je isti kao i kod jednofaznog mostnog invertora prethodno objašnjen.

Trofazni šestostepeni ili kvazipravougaoni inverter je naponski izvor široko korišćen u komercijalnim brzinsko podesivim pogonima za naizmenične motore. Izlazne tačke A, B i C spojene su na trofazni naizmeničan motor. Obrnuti smer obrtanja motora lako se postiže promenom faze invertorskog izlaza pomoću

redosleda signala paljenja. Svaki tiristor je uključen ili isključen vreme kome odgovara ugao  $180^\circ$  ili  $\pi$  radijana, a svaka izlazna tačka se naizmenično spaja na pozitivni ili negativni napon. Fazna razlika između prekidačkih sekvenci se održava na vrednosti od  $120^\circ$  da bi se dobio simetričan trofazni napon.

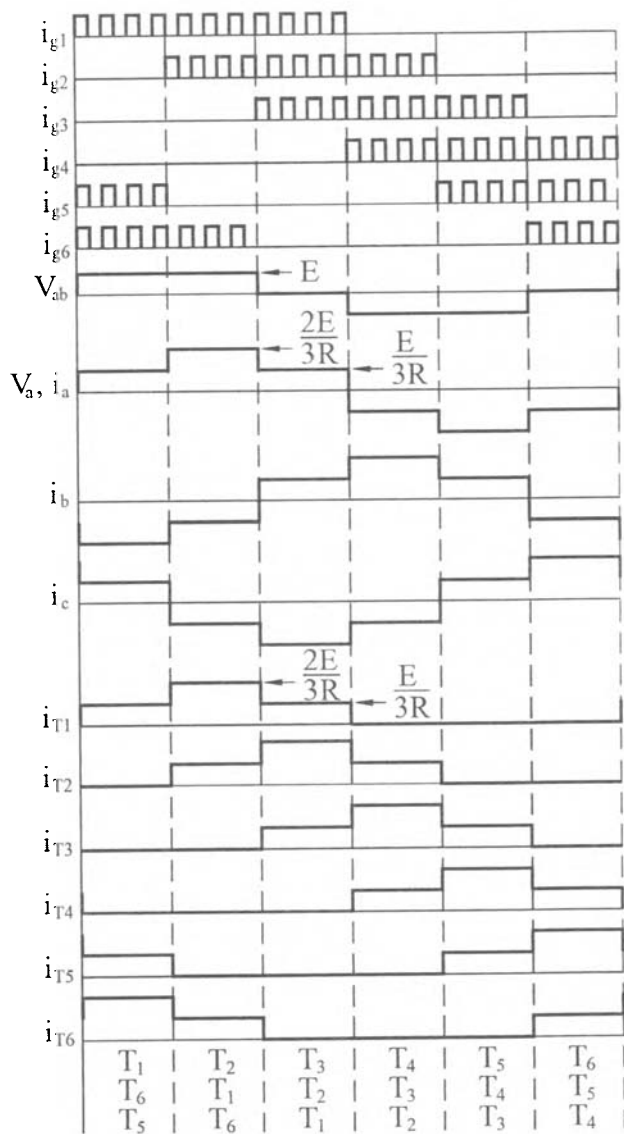


Slika 80. Trofazni mostni invertori a) tranzistorski most napaja naizmenični motor b) opšte tiristorsko trofazno mostno kolo bez komutacionih kola

Posmatrajući srednju tačku jednosmernog napajanja kao referentnu tačku nultog potencijala, polarni naponi  $u_{AO}$ ,  $u_{BO}$  i  $u_{CO}$  imaju pravougaoni oblik. Na slici je vidljivo da su u svakom trenutku u provodnom stanju tri tiristora ili tranzistora.

Polarni napon ima vrednost  $\pm E/2$ . Linijski naponi se mogu dobiti kao razlika dva polarna napona.

$$\begin{aligned}
 u_{AB} &= u_{AO} - u_{BO} \\
 u_{BC} &= u_{BO} - u_{CO} \\
 u_{CA} &= u_{CO} - u_{AO}
 \end{aligned}
 \tag{11.15}$$



Slika 81. Talasni oblici napona i struje u kolu sa uglom uključenja tiristora od  $180^\circ$

Pošto su talasni oblici polarnih napona kvazičetvrtasti, amplitude  $E/2$ , slika 79.b) možemo ih razložiti u Furijeov red sa svim harmonicima. Na taj način se dobija u skladu sa jednačinom (11.10).

$$u_{A_0}(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} \cdot \sin n\omega t$$

ili u razvijenom obliku

$$u_{A_0}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t \dots \right)$$

Slično tome,  $u_{B_0}$  ima kvazičetvrtast oblik sa kašnjenjem od  $120^\circ$ . Izraz za Furijeov red daje se u obliku

$$u_{B_0}(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} \cdot \sin n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

Trenutna vrednost napona  $u_{AB}$  dobijena kao razlika trenutnih vrednosti polarnih napona prema (11.15) izražena Furijeovim redom glasi:

$$u_{AB}(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} \cdot \left[ \sin n\omega t - \sin n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (11.16)$$

Ova jednačina se uvođenjem smena može napisati u obliku

$$u_{AB}(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} \cdot 2 \cdot \sin n \frac{\omega t - (\omega t - 2\pi/3)}{2} \cdot \cos n \frac{\omega t + (\omega t + 2\pi/3)}{2}$$

jednačina se posle sređivanja može napisati u obliku reda

$$u_{AB} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4 \cdot E}{n \cdot \pi} \cdot \sin \frac{n \cdot \pi}{3} \cdot \cos n\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \quad (11.17)$$

Efektivna vrednost tog napona može se naći iz jednačine

$$U_{ABeff} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi/3} u_{AB}^2 \cdot d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot E = 0,8165 \cdot E \quad (11.18)$$

a efektivna vrednost osnovnog ili prvog harmonika

$$U_{ABeff1} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot E = 0,78 \cdot E$$

Odavde se lako može naći i efektivna vrednost faznog napona iz poznate relacije:

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot E = 0,4714 \cdot E$$

Slično trofaznom mostnom ispravljaču, inverter se može tako regulisati da svaki tiristor provodi po  $120^\circ$  izlazne periode. Talasni oblici na slici 80, odnose se na čisto omsko opterećenje. Smatra se da komutaciono kolo deluje na kraju perioda od  $120^\circ$  tako da isključuje odgovarajući tiristor.

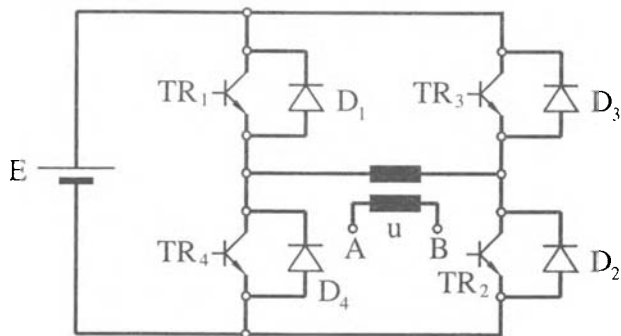
Dijagram na slici pokazuju da struja opterećenja ima kvazi-četvrtasti talas i da svaki tiristor provodi struju opterećenja jednu trećinu periode. Stepnasti talas će biti modifikovan ako se induktivnost pojavi u opterećenju jer će prenos struje opterećenja u diodama držati tiristore zatvorene duže od  $120^\circ$ .

Bolje je uključivati tiristore tako da svaki provodi  $180^\circ$ . Kada je na primer uključen  $T_4$  automatski isključuje tiristor  $T_1$ . A ako opterećenje koga napaja inverter sadrži induktivnost, tada će struja u svakoj fazi kasniti za naponom. Kada se tiristor  $T_4$  uključi, isključi se tiristor  $T_1$ . Jedini put za struju je tada preko diode  $D_4$ . Zbog toga se opterećenje vezuje za pozitivan pol baterije. Tiristor  $T_1$  ne može prihvatiti provođenje sve dok se struja opterećenja ne okrene. Analogno objašnjenje je i za drugu poluperiodu.

#### 11.04. Invertori sa tranzistorima snage

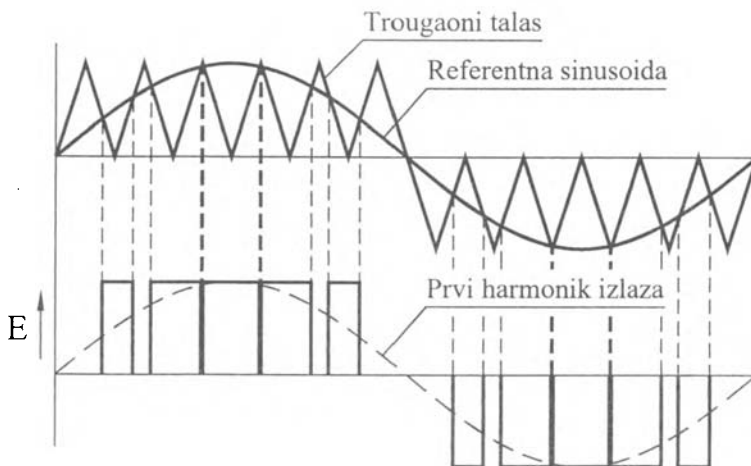
Danas se sve više koriste tranzistori snage u invertorskim kolima, tako da je sledeća šema sa četiri tranzistora poznata kao invertorsko tranzistorsko mostno kolo.

Zbog velike brzine uključanja i isključenja tranzistora, u invertorskim kolima su istisnuli tiristore za snage do nekoliko stotina kW. Pored toga, moguće je izvršiti i bolju kontrolu da bi se na izlazu dobio sinusan talasni oblik napona.



Slika 82. Monofazni inverter sa tranzistorima snage

Invertori koji daju pravougaone ili kvazipravougaone talase imaju značajan sadržaj harmonika što može biti nepoželjno pri određenim primenama. Da bi se sadržaj harmonika smanjio na izlazu invertora se postavlja filter, što značajno utiče na masu uređaja kao i cenu. Da bi se smanjili filtri a posebno koristeći savremene tehnike energetskih tranzistora, koriste se savremena rešenja invertora sa posebnim tehnikama u kojima se koriste PWM širinska modulacija impulsa.



Slika 83. Određivanje vremena provođenja tranzistora za dobijanje PWM talasa

Poboljšanje izlaznog, sinusnog talasnog oblika napona može se postići promenom odnosa vremena uključenja i isključenja i to tako da su impulsi napona ili periode uključenja tranzistora najduže kod maksimalne vrednosti talasa. Ovaj način kontrole je poznat kao "širinsko impulsna modulacija" (PWM – pulse width modulation). Zakon regulacije je takav da zona provođenja svakog impulsa predstavlja vreme ispod preseka sinusnog talasnog oblika i trouglastog napona. Impuls se generiše u vremenu između susednih tačaka preseka sinusnog napona sa

opadajućom i rastućom stranom testerastog trouglastog napona. Širinsko impulsni modulirani talas ima znatno viši sadržaj viših harmonika, ali koji se lako mogu filtrirati tako da se lakše dobija osnovni sinusan talas izlaznog napona.

Upravljački impulsi za tranzistore snage generišu se poređenjem dva signala: nosećeg i referentnog. Noseći signal je trougaonog oblika. Referentni signal je sinusnog oblika frekvencije  $f_r$ . Ova frekvencija ujedno određuje i frekvenciju izlaznog napona. Amplituda referentnog signala definiše i amplitudu izlaznog napona. Broj impulsa po jednoj poluperiodi zavisi od frekvencije nosećeg signala. Na slici je prikazan jednostavan način generisanja upravljačkih signala za tranzistore pomoću jednosmernog trougaonog talasa.

Povezivanjem tri monofazna invertora, moguće je dobiti i trofazni inverter za napajanje trofaznih potrošača. Trofazni inverter se, zapravo može smatrati vezom tri monofazna invertora čiji su izlazni naponi međusobno pomereni za  $120^\circ$ . Postoje tri sinusna referentna talasa međusobno pomereni za  $120^\circ$ . Noseći talas se poredi sa odgovarajućim referentnim signalom tako da se za svaku fazu generišu upravljački signali.

## 11.05. Literatura

01. Bedford B.D. and Hoft R.G., Principles of Inverter Circuits, John Wiley and Sons, New York, 1964.
02. Spredbury, Electronic Inverters, London, 1967.
03. Rice L.R., Silicon Controlled Rectifier Designers Handbook, Westinghouse, 1970.
04. Grafham D.R., Hey J.C., SCR Manual, Fifth Edition, General Electric Company, USA, 1972.
05. Westinghouse, Silicon controlled Rectifier Designers Handbook, Youngwood, Pennsylvania, 1970.
06. Sescasem, Power transistor in the switching mode, Thomson CSF, Paris, 1980, 1-182.
07. Nedeljković M., Zbirka rešenih ispitnih zadataka iz Energetskih pretvarača, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1994.
08. Murphy J.M.D., Turnbull F.G., DC-AC Inverter Circuits, Power Electronic Control of AC motors, Pergamon Press, 101-184.
09. Rashid M. H., Power Electronics Circuits, Devices and Applications, Prentice-Hall international Inc., 1988.



## ***12. CIKLOKONVERTORI (AC/AC pretvarači)***

Ciklokonvertor je uređaj koji naizmjenični napon jedne učestanosti pretvara direktno u naizmjenični napon druge učestanosti, bez prelaznog jednosmernog stanja. Znači, može se reći da je ciklokonverzija direktno pretvaranje naizmjeničnog napona u različitu (promenljivu) frekvenciju, na taj način da se izlazni talas formira sabiranjem odgovarajućih sekcija talasa višefrekventnog izvora. Postoje različite vrste ciklokonvertora [01] u zavisnosti od vrste pogona, i kvaliteta talasnog oblika napona na izlazu. U brodogradnji se ciklokonvertori koriste za pogon naizmjeničnih elektromotora, za opterećenja pretežno induktivnog karaktera. U principu se može izvršiti podela na monofazne i trofazne ciklokonvertore. Tako ćemo ih i objasniti, mada se podela može izvršiti prema broju impulsa kao i prema načinu komutacije na ciklokonvertore sa prirodnom i prinudnom komutacijom.

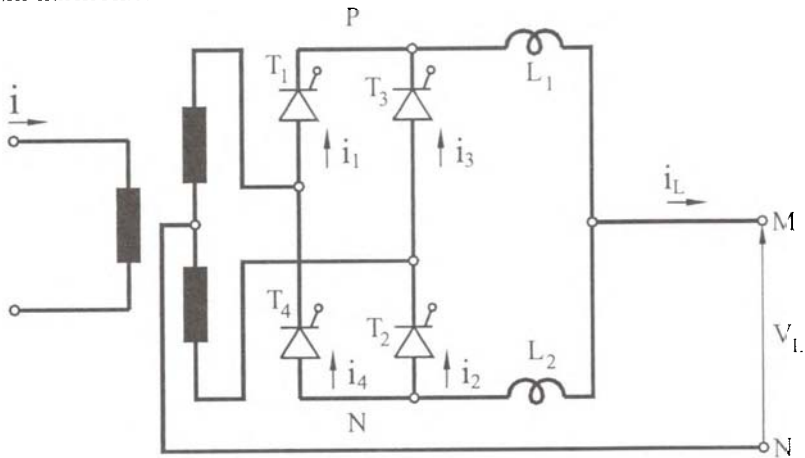
### **12.01. Monofazni ciklokonvertori sa transformatorom sa srednjom tačkom**

Princip rada ciklokonvertora moguće je najjednostavnije objasniti koristeći shemu monofaznog ciklokonvertora sa srednjom tačkom. Pri ovome će se pretpostaviti da je opterećenje čisto omsko, što znači da su prikazani talasni oblici napona isti kao i za struju, samo u drugoj razmeri. Pored ovoga, pretpostavićemo da je komutacija trenutna i da je pad napona na tiristoru koji provodi zanemarljiv.

Svaki ciklokonvertor sastoji se od dve grupe tiristora. Pozitivnu grupu P čine tiristori  $T_1$  i  $T_3$ , a negativnu grupu N čine tiristori  $T_2$  i  $T_4$ . Prva grupa tiristora proizvodi pozitivan napon  $U_{d1}$  koji je jednak razlici potencijala tačaka M i N i daje struju  $I_d$  u pozitivnoj poluperiodi. Negativna grupa tiristora proizvodi napon  $U_{d2}$  koji je takode jednak razlici potencijala tačaka M i N ali koji daje struju  $I_d$  u negativnoj poluperiodi. Prigušnice  $L_1$  i  $L_2$  održavaju kontinualan tok struje i ograničavaju cirkulacione struje.

Pretpostavićemo da tiristori provode bez kašnjenja (ugao okidanja  $\alpha = 0$ ), slično kao da su diode. Talasni oblik napona na opterećenju dobija se na taj način da

pozitivna grupa provodi nekoliko poluperioda. Pretpostavićemo da je to  $m$  poluperioda. U sledećem vremenskom intervalu, negativna grupa tiristora provodi isti broj poluperioda. Osnovni naponski talas dobijen sintetizovanjem ovih talasa ima zbog toga  $m$  puta nižu frekvenciju. Ovaj talasni oblik napona sadrži veliki broj nižih harmonika.



Slika 84. Shema veza monofaznog ciklokonvertora sa transformatorom sa srednjom tačkom

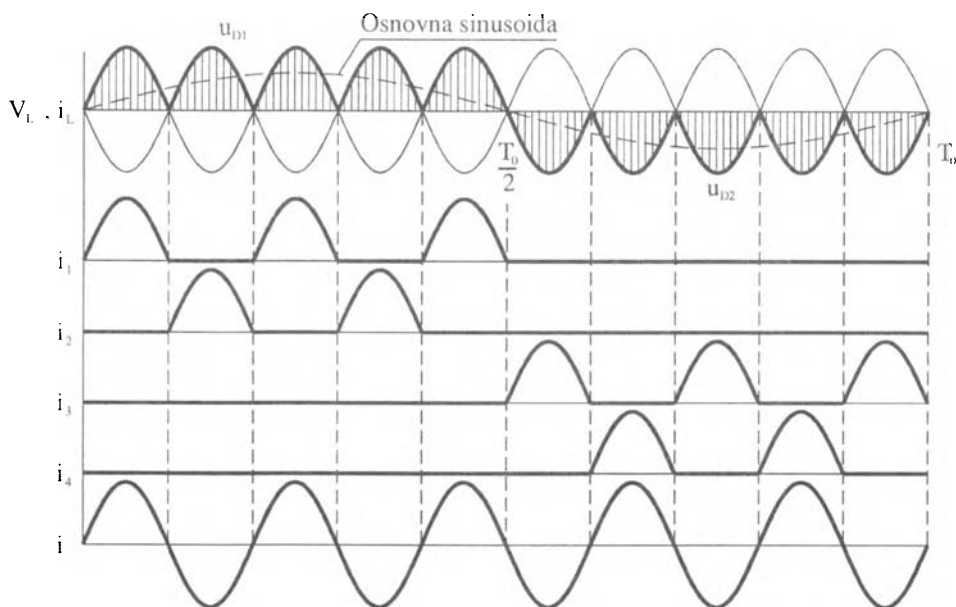
Na slici 85, prikazani su talasni oblici izlaznog napona i dobijeni signali pri pozitivnoj i negativnoj konverziji. Pozitivan napon dobija se u vremenu  $0 - T_0/2$ , a negativna u vremenu  $T_0/2 - T_0$ . Frekvencija izlaznog napona je  $m$  puta niža od osnovne frekvencije i može se naći na osnovu jednačine :

$$f_0 = \frac{1}{T_0}$$

Srednja vrednost napona pozitivne grupe tiristora jednaka je sa srednjom vrednošću napona negativne grupe tiristora i u direktnoj je opoziciji sa njom.

$$U_{d2} = -U_{d1}$$

Međutim, iako je suma srednjih vrednosti napona  $U_{d1} + U_{d2} = 0$  nisu i zbrovi trenutnih vrednosti napona  $u_{d1} + u_{d2}$  jednaki nuli. Usled te razlike u trenutnim vrednostima pojavljuju se struje cirkulacije koje kruže između dve ispravljačke grupe. Ta struja se mora ograničiti dodavanjem odgovarajućih induktivnosti prikazanih na slici 84.



Slika 85. Talasni oblici napona i struja za ugao paljenja tiristora  $\alpha = 0$

## 12.02. Monofazni ciklokonvertori u mostnoj sprezi

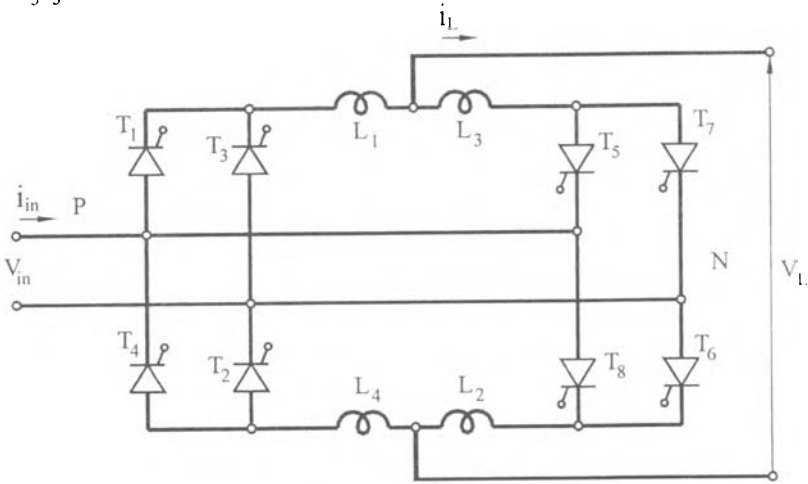
Dva monofazno upravljana pretvarača su izvedeni kao mostni ispravljači. Uglovi paljenja pojedinih grupa su takvi da je izlazni napon jednog konvertora jednak i u opoziciji sa izlaznim naponom drugog konvertora. Kada radi konvertor P (tiristori  $T_1, T_2, T_3, T_4$ ) srednja vrednost izlaznog napona je pozitivna, a ako radi konvertor N (tiristori  $T_5, T_6, T_7, T_8$ ) izlazni napon je negativan. Svaka od grupa tiristora sastoji se od četiri tiristora i čini punoupunjivi mostni monofazni ispravljač.

Da bi srednja vrednost napona pozitivne i negativne grupe tiristora bile jednake, mora biti zadovoljen uslov da se uglovi okidanja tiristora u pozitivnoj i negativnoj grupi razlikuju za ugao  $\pi$ .

$$\alpha_p = \pi - \alpha_n \quad (12.01)$$

U tom slučaju zbir trenutnih vrednosti napona neće sadržati jednosmernu komponentu. Ako uslov (12.01) ne bi bio ispunjen, postojala bi jednosmerna komponenta napona koja bi stvarala jednosmernu struju cirkulacije. Ove struje mogu se ograničiti ako se u to kolo stavlja omsko opterećenje što bi na drugoj

strani bilo nepovoljno obzirom na toplotne gubitke i zagrevanje. Zbog toga se radije stavljaju induktivnosti.



Slika 86. Shema veza monofaznog ciklokonvertora u mostnoj sprezi

Kada napaja induktivno opterećenje, svaka od grupa tiristora mora biti sposobna da radi kao inverter, da bi mogla raditi i u inverznom (negativnom) naponu. Na taj način se može energija vraćati u mrežu, pa ciklokonvertor služi za prolaz energije u oba smera.

Pri prelasku u invertorski rad odgovarajuće grupe konvertora dolazi do cirkulacionih struja. Ove struje se mogu eliminisati zabranom impulsa na gejt konvertora koji ne daje struju opterećenja. Pored toga, prigušnice održavaju kontinualan tok struje i ograničavaju cirkulacione struje.

Opšti izraz za srednju vrednost izlaznog napona može se odrediti na sledeći način [02]: pretpostavimo da postoji sistem sa  $m$  faznih polutalasnih kola u kome svaka faza provodi  $2\pi/m$  u jednoj periodi napajanja. Fazni napon se može prikazati relacijom

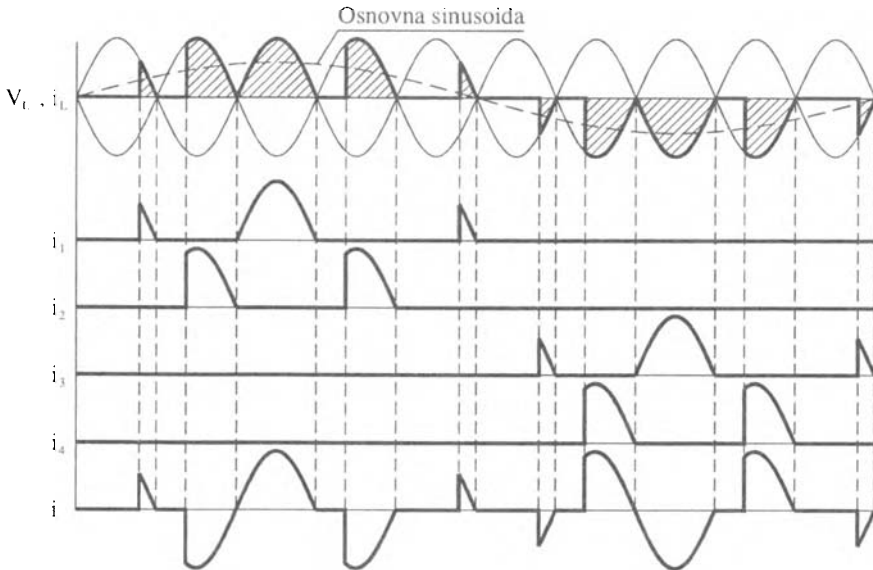
$$u = \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \cos \alpha$$

gde je  $U_f$  efektivna vrednost napona. Ako je okidački ugao nula provodenje tiristora je u granicama od  $(-\pi/m)$  do  $(+\pi/m)$ . Ako je ugao kašnjenja  $\alpha$ , provodenje u fazi se može obaviti u granicama od  $[(-\pi/m) + \alpha]$  do  $[(+\pi/m) + \alpha]$  a srednja vrednost izlaznog napona jednaka je srednjoj visini deblje označene linije na slici

$$U_d = \frac{m}{2\pi} \int_{[-(\pi/m)+\alpha]}^{[(\pi/m)+\alpha]} \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \cos \omega t \cdot d(\omega t)$$

Posle sredivanja dobija se jednačina

$$U_d = \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \left(\frac{m}{\pi}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \cdot \cos \alpha \quad (12.02)$$



Slika 87. Talasni oblici napona i struja sa kontrolom okidanja svakog tiristora

Kada je ugao kašnjenja nula  $U_d$  ima maksimalnu vrednost

$$U_{d0} = \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \left(\frac{m}{\pi}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \quad (12.03)$$

Za trofazni inverter sa transformatorom sa srednjom tačkom je  $m = 3$ , pa se može dobiti

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{2 \cdot \pi} \cdot U_f = 1,17 \cdot U_f$$

Srednja vrednost izlaznog napona sa faznom kontrolom, se može dati u obliku

$$U_d = U_{do} \cdot \cos \alpha$$

Ako je  $U_o$  efektivna vrednost osnovnog harmonika izlaznog napona po fazi ciklokonvertora, onda je pik izlaznog napona za ugao paljenja jednak nuli:

$$\sqrt{2} \cdot U_o = U_{do} = \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \left(\frac{m}{\pi}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)$$

Tako da je:

$$U_o = U_f \cdot \left(\frac{m}{\pi}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)$$

Ako se ugao paljenja tiristora polako menja, izlazni fazni napon se može izračunati za bilo koju tačku perioda kao srednja vrednost izlaznog napona za odgovarajući ugao paljenja. Predpostavićemo i kontinualan režim rada odnosno neprekidnu struju opterećenja, tako da je srednji izlazni napon dat izrazom

$$U_d = U_{do} \cdot \cos \alpha \quad (12.04)$$

Ugao paljenja tiristora ne može biti  $180^\circ$  iz poznatih razloga tako da se ni ugao pozitivne grupe konvertora ne može smanjiti ispod određene minimalne vrednosti  $\alpha_{\min}$ . Zbog toga se uvodi pojam maksimalnog izlaznog napona po fazi

$$U_{d\max} = U_{do} \cdot \cos \alpha_{\min} = r \cdot U_{do} \quad (12.05)$$

gde je  $r = \cos \alpha_{\min}$  označen kao faktor redukcije napona. Prema tome se i efektivna vrednost osnovnog harmonika faznog napona može napisati u obliku

$$U_o = r \cdot U_f \cdot \left(\frac{m}{\pi}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)$$

Na ovaj način se dobija nešto smanjen izlazni napon. U praksi je ovaj napon još niži od teorijski izračunatih vrednosti što je posledica komutacionog preklapanja, cirkulacione struje i pada napona na tiristorima.

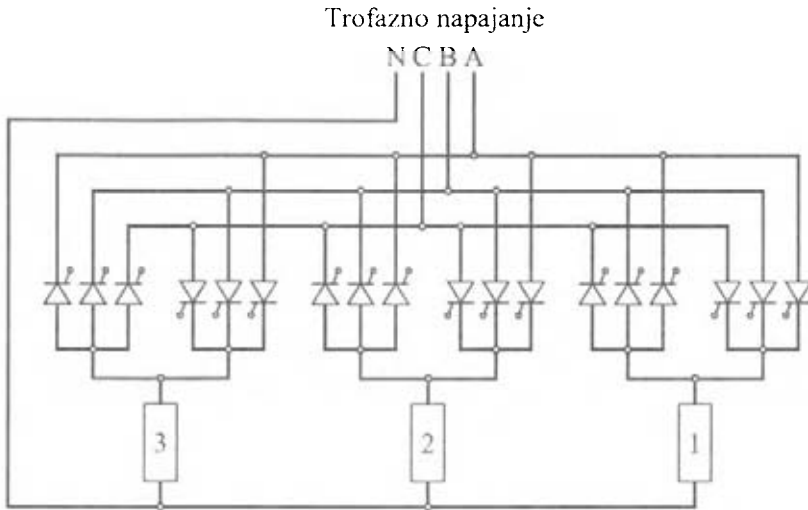
### 12.03. Trofazni tropulsni ciklokonvertori

U ciklokonvertoru su ispravljačka kola tako kontrolisana da se talasni oblik izlaznog napona dobija od segmenata višefaznog ulaznog napona.

Razmatraće se trofazni polumostni fazno kontrolisani ciklokonvertor koji napaja pretežno induktivno opterećenje kontinualnom strujom. Uvešćemo aproksimaciju da se zanemaruju padovi napona na tiristorima i da je komutacija trenutna. Tada je srednja vrednost izlaznog napona data jednačinom:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha$$

pri čemu je  $\alpha$  ugao paljenja tiristora a  $U_{d0}$  srednja vrednost izlaznog napona kada je ugao paljenja nula, tj maksimalna srednja vrednost izlaznog napona.



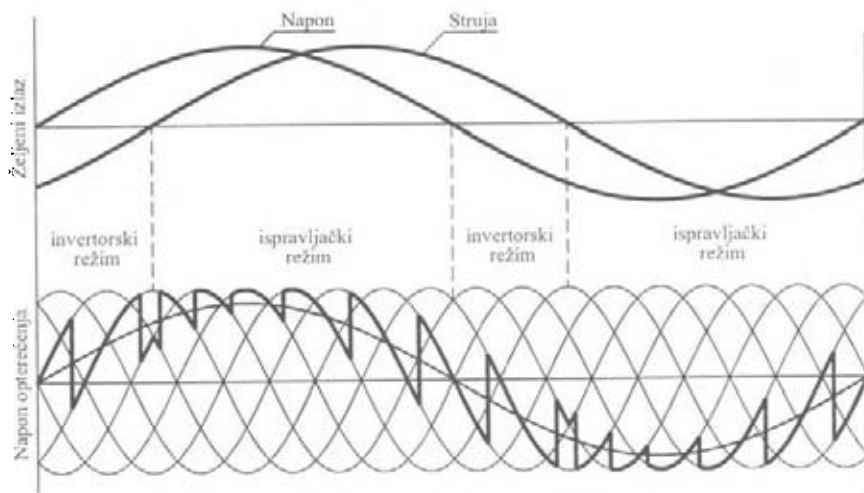
Slika 88. Shema veza trofaznog invertora sa transformatorom sa srednjom tačkom

Ova mogućnost kontrole izlaznog napona preko ugla paljenja je osnova na kojoj radi fazno kontrolisan ciklokonvertor sa prirodnom komutacijom. U tački A je ugao paljenja 0 pa je srednja vrednost izlaznog napona na svojoj maksimalnoj vrednosti  $U_{d0}$ . U tački B je izlazni napon malo redukovana jer je uvedeno određeno kašnjenje u paljenju tiristora. Daljim povećanjem ugla kašnjenja  $\alpha$  dobija se sve veća redukcija napona što na slici odgovara tačkama C, D i E. U tački F je ugao paljenja  $90^\circ$ , pa je izlazni napon  $U_d$  nula. Za uglove paljenja tiristora od  $90^\circ - 180^\circ$  polumostni ispravljač radi u ispravljačkom režimu tako da potrošač napaja električni izvor preko ciklokonvertora.

Pomoću odgovarajućeg upravljačkog kola može se dobiti napon željene niže učestanosti. Ako se menja ugao paljenja u granicama  $0^{\circ} - 180^{\circ}$  i nazad, jedan kompletan ciklus varijacije niže učestanosti je superponiran na srednju vrednost izlaznog napona. Superponirana učestanost je definisana samo stepenom promene ugla paljenja i nezavisna je od ulazne učestanosti.

Sadržaj viših harmonika izlaznog napona se smanjuje ako je smanjen odnos izlazne i ulazne učestanosti i ako se povećava broj tiristora, odnosno faza napajanja. Pozitivna konvertorska grupa dozvoljava tok struje tokom pozitivnog poluciklusa struje, a negativna tokom negativnog poluciklusa struje.

Izlazna učestanost fazno kontrolisanog ciklokonvertora sa prirodnom komutacijom je manja nego učestanost napajanja. Sa osnovnom konfiguracijom, prihvatljiva izlazna snaga, efikasnost i sadržaj harmoika se postiže za interval izlazne učestanosti od 0 do  $1/3$  ulazne učestanosti. Što se više izlazna učestanost približava ulaznoj, raste sadržaj viših harmonika i izobličenje je veće. Kao rezultat toga, javljaju se povećani gubici i postoji pad u ukupnoj efikasnosti sistema. Ako koristimo komplikovanije konvertore, sa većim brojem impulsa, talasni oblik izlaznog napona će se popraviti i maksimalni korisni odnos izlazne i ulazne učestanosti se može povećati do oko  $1/2$ .



Slika 89. Talasni oblici napona i struja

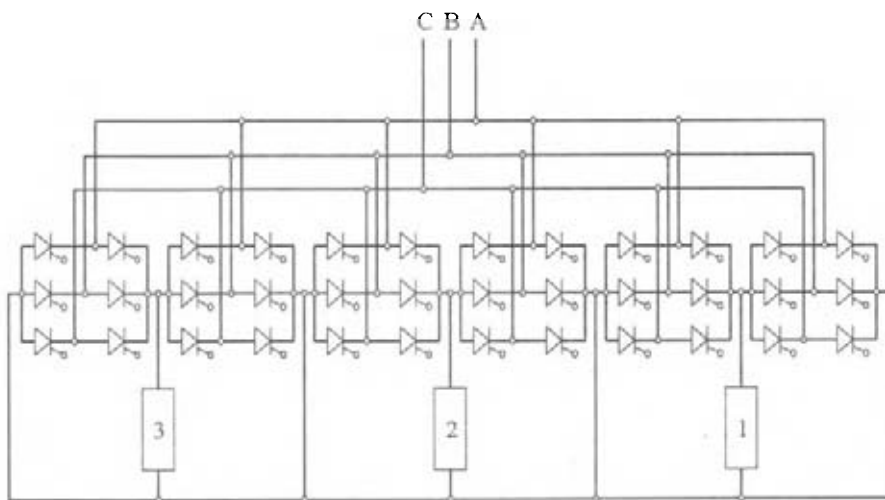
Kada je opterećenje omsko nema potrebe da radne grupe tiristora prelaze u invertujući režim. Kada se napaja pretežno induktivno opterećenje, izlazna struja kasni za naponom. To znači da svaka konvertorska grupa P ili N mora da provodi struju i ako njen izlazni napon promeni polaritet i to znači da radi u invertorskom režimu. Taj rad traje sve dok ne počne druga grupa konvertora da provodi.



Trenutna vrednost snage opterećenja je proizvod trenutnih vrednosti struje i napona opterećenja. U delovima gde je proizvod napona i struje pozitivan opterećenje prima energiju od izvora, a kada je proizvod negativan, opterećenje vraća energiju u električni izvor. Razlika ove dve snage predstavlja snagu koju mreža isporučuje opterećenju. Reaktivna snaga predstavlja snagu koja osciluje između izvora opterećenja.

#### 12.04. Trofazni šestopulsni ciklokonvertori u mostnoj sprezi

Ciklokonvertor sa trofaznim ulazom i monofaznim izlazom prikazan je na slici. Sastoji se od trofaznih kontrolisanih ispravljača koji vrše dvostranu naizmenično jednosmernu konverziju. Dobijeni izlazni talasni oblici napona prikazani su na slici 90. Pozitivan konvertor radi u jednoj polovini periode izlazne frekvencije a negativan konvertor radi u drugoj poluperiodi. Analiza tog ciklokonvertora je slična analizi ciklokonvertora sa monofaznim ulazom i izlazom. Upravljanje naizmeničnim motorima zahteva napon sa promenljivom frekvencijom. Ciklokonvertor može da obezbedi napajanje trofaznom prijemniku ili elektromotoru. Za tu svrhu je potrebno šest konvertora od kojih svaki sadrži po šest tiristora. Za šest punoupunjavljivih trofaznih ispravljača potrebno je 36 tiristora.

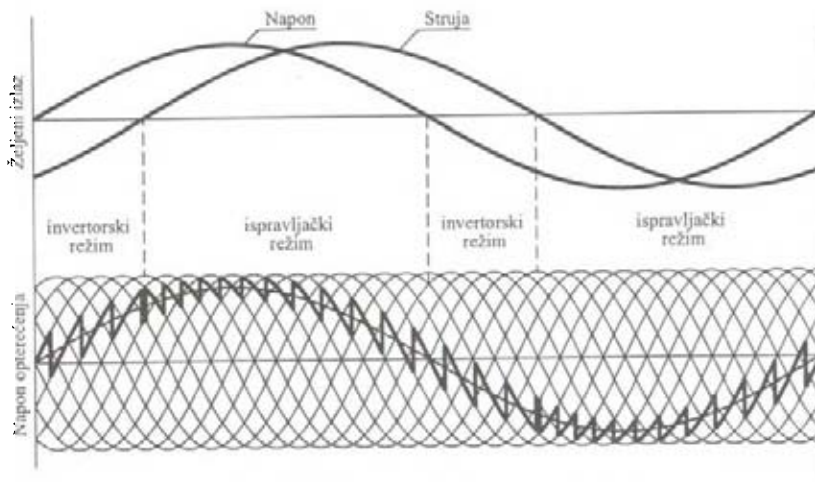


Slika 90. Shema veza trofaznog mostnog šestopulsnog invertora

#### 12.05. Ciklokonvertor sa komutacijom preko opterećenja

Ciklokonvertor sa komutacijom preko opterećenja se razlikuje od prethodno opisanog ciklokonverera sa linijskom komutacijom po tome što tiristori mogu biti komutirani naponom opterećenja suprotnog smera.

U ovom slučaju opterećenje mora imati generatorsku ili kontraelektromotornu silu koja je nezavisna od napona izvora napajanja. Najpoznatiji primer takve mašine je sinhrona mašina sa permanentnim magnetima..



Slika 91. Talasni oblici napona i struja

U takvim slučajevima učestanost napona na opterećenju može biti jednaka ili viša od učestanosti napona napajanja. Okidanje tiristora se podešava na osnovu dva upravljačka signala. Na osnovu prvog reguliše se izlazni napon a na osnovu drugog, obzirom na generisanu kontraelektromotornu silu u sinhronoj mašini, obezbeđuje se da struja protiče u korektnoj fazi opterećene mašine u određeno vreme. Za optimalan rad sinhrona mašine komutacija treba da zauzima interval od  $180^{\circ}$  zajedno sa uglom paljenja tiristora. Ovo međutim znači da se napuštaju granice za komutaciju

## 12.06. Ciklokonvertor sa forsiranom komutacijom

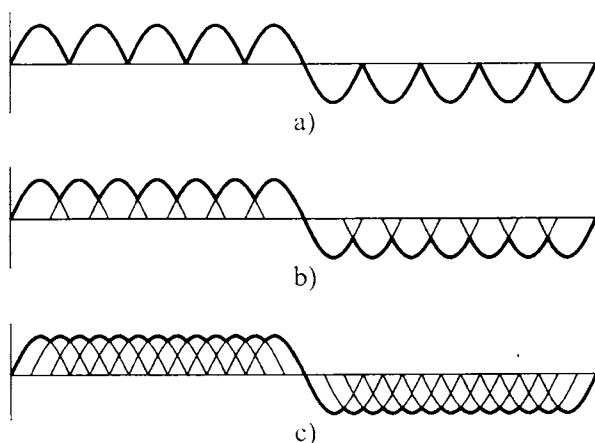
Ciklokonvertor sa linijskom (faznom) komutacijom i komutacijom preko opterećenja koriste inverzni napon izvora ili opterećenja da bi se postigla prirodna komutacija tiristora. Međutim, tiristore je moguće isključiti i forsiranom komutacijom, nezavisnom od napona izvora ili opterećenja. Ova u potpunosti nezavisna tehnika isključivanja tiristora omogućava da izlazna frekvencija bude niža ili viša od ulazne frekvencije. U principu postoje komutacije preko inverznog napona ili inverzne struje. Komutacije se može uraditi sa pomoćnim tiristorima, diodama, kondenzatorima, transformatorima, izvorima itd. što znatno komplikuje način upravljanja ovog kola a povećava i cenu. To su uostalom i razlozi zašto se ovakva kola manje primenjuju. Razvojem uređaja i energetskih elemenata sa

sposobnošću samogašenja ova vrsta ciklokonvertora stekla bi velike šanse za širom primenom.

## 12.07. Envelopski ciklokonvertor

Ciklokonvertorom se može upravljati i na taj način da je provođenje svake grupe tiristora tokom odgovarajuće poluperiode potpuno. Na taj način će upravljačko kolo davati impulse za okidanje tiristora kontinualno tokom odgovarajućih poluperioda a potpuno isključiti grupa u drugoj poluperiodi [03]. Izlazni talasni oblici napona takvog ciklokonvertora predstavljaju envelope ulaznog talasa pa otuda potiče i ime ovog ciklokonvertora.

Upravljačka kola koja se koriste za ovu vrstu ciklokonvertora su znatno jednostavnija mada ovakva regulacija ima i svojih mana. Izlazni talasni oblici napona imaju tendenciju da se pretvaraju u pravougaoni tako da imaju veći sadržaj viših harmonika. Odnos ulazne i izlazne učestanosti nije kontinualno promenljiv nego ograničen na ceo ili deo perioda ciklusa ulaza. Svaka ispravljačka grupa ima periode u kojima radi u invertujućem režimu što stvara dodatnih teškoća tako da se ovi ciklokonvertori praktično koriste za čisto omska opterećenja ili opterećenja sa faktorom snage  $\cos \varphi = 1$ .



Slika 92. Izlazni naponski talasi envelopskog ciklokonvertora  
a) dvopulsni b) tropulsni c) šestopulsni

Za šestofazno polumosni envelopski ciklokonvertor, gde su prisutne različite veličine faznih napona, imamo da je u tom slučaju uspostavljena prirodna komutacija gde je odnos ulaza i izlaza  $1/3$ . Talasni oblik se može smatrati približnom aproksimacijom sinusnog talasa.

Savremeni zakoni regulacije [04-05], i nova energetska rešenja doneće u bliskoj budućnosti i nove uređaje za primenu u brodskim pogonima.

## 12.08. Literatura

01. J.M.D. Murphy, F.G. Turnbull, AC-AC Cycloconverter Circuits, Power Electronic Control of AC motors, Pergamon Press, 1992, 199-214.
02. M. H. Rashid, Power electronics Circuits, Device and Applications, 1988.
03. J. W. Motto, Introduction to solid state Power Electronics, Westinghouse, Youngwood, Pennsylvania, 1977, 75-77.
04. Bucknall R.W.G., Ciaramella K.M., Potential use of matrix converters in marine propulsion applications, Proceedings AES 2003, Edinburgh, UK, 2003, 133 – 142.
05. Large S., et al, Matrix converter solution for aircraft starting, Proceedings AES 2003, Edinburgh, UK, 2003, 143 – 158.

## ***13. ELEKTRIČNA PROPULZIJA BRODA***

Pod električnom propulzijom brodova (nekad se u literaturi naziva i električni pogon broda) podrazumeva se pogon ostvaren pomoću elektromotora. Prvi termin više koriste brodograditelji, a drugi elektroinženjeri koji se bave električnim pogonima na brodovima.

Prema električnom izvoru odakle elektromotor dobija pogonsku energiju, razlikuje se čista električna propulzija (poznata kao neposredni električni pogon) i električni prenos (poznat kao posredni električni pogon). Kod čisto električne propulzije, pogonska energija se dobija iz elektrohemijskog izvora električne energije koga plovni objekat nosi sa sobom, kao na primer kod podmornica, torpeda ili čamaca. Kod električnog prenosa električna energija se dobija od nekog pogonskog agregata (dizel, parnog, nuklearnog) i preko ugrađenog generatora. Do nedavno se električna propulzija brodova koristila znatno manje nego početkom XX veka i to uglavnom u posebnim primenama kod tehničke flote, kao što su bageri, plovne dizalice, specijalni brodovi, ledolomaci, platforme za naftu itd. Zbog određenih prednosti, električna propulzija počela je zadnjih nekoliko godina opet da se primenjuje u svetu prvenstveno kod najvećih i najluksuznijih putničkih brodova.

### **13.01. Istorijski razvoj električne propulzije brodova**

Prva električna propulzija ostvarena je 1838. godine na reci Nevi kada je M. Jakobi [01] jedno kratko vreme pogonio čamac sa 14 osoba primitivnim elektromotorom. Mada su posle Jakobija električni pogoni plovnih objekata primenjivani i u nekim drugim eksperimentima, do kraja 19. veka zadržali su se praktično samo na rekama i jezerima za pogon čamaca i manjih brodova. U ovom periodu, značaju električnog pogona znatno je doprineo razvoj električne propulzije kod podmornica.

Interesantno je navesti da je još 1900. godine, u časopisu "Century Magazine", Nikola Tesla [02] najavio električni pogon velikih brodova, kao što je dve godine pre toga opisao čuveni i dobro poznat čamac sa bežičnim upravljanjem.

Postojao je mali napredak u razvoju električne propulzije brodova sve do 1903. godine kada je napravljen jedan ruski tanker, pogonjen pomoću tri dizel motora sa prigradenim generatorima. Na ovom brodu je svaki generator napajao odgovarajući jednosmerni motor a koji je pokretao odgovarajući propeler [03]. 1904. godine u

Nižnii Novgorodu su bila dva broda "Vandal" i "Sarmat" sa dizel električnim pogonom [04].

Početkom veka napravljeni su brodovi sa jednosmernom električnom propulzijom snage par MW. Već 1908. godine su Nemci napravili brod pogonjen sa turbo-generatorom i sa dva pogonska jednosmerna motora koji su pokretala dva propelera.

Jedan engleski brod bio je 1911. godine opremljen sa dva dizel motora koji su pokretali generatore naizmjenične struje napajajući pogonske asinhronne (indukcione) motore. Generatori su imali jedan par polova, a asinhronni motori su imali po dva namotaja sa različitim brojem pari polova obezbeđujući time po dve brzine obrtanja pogonskih propelera.

Američka mornarica je 1913. godine napravila turbo električno postrojenje naizmjenične struje na brodu Jupiter [03] snage 5.250kW na vratilu. Posle toga, ova propulzija primenjivala se na krstaricama, putničkim i teretnim brodovima, i tehničkoj floti. Na ratnim brodovima SAD 20-tih godina realizovani su ovakvi naizmjenični pogoni snage 22 MW.

Prvi sinhroni motor primenjen je 1919. godine kao pogonski na brodu napravljenim za Američku obalsku stražu. Ovi motori su se dosta primenjivali na najvećim putničkim brodovima.

Ako se razmatraju pogonske mašine za velike brodove, može se zaključiti da su sve do 1910. godine, u propulziji brodova dominirale klipne parne mašine sa 2, 3 ili 4 cilindra. Osnovna karakteristika tih mašina bila je da su imale velike mase i prema tome namenjene samo za manje snage. Zauzimale su veliki prostor i imale dosta veliku specifičnu potrošnju goriva oko 0,7kg/kWh. Imale su i jednu jako dobru osobinu da su se lako prekretale radi vožnje krmom [05].

Prva parna turbina postavljena je na brod krajem 19. veka. Korišćena je uglavnom za pogone brodova sa velikim snagama. Radni pritisci bili su znatno viši nego kod parnih mašina, a samim tim je i stepen iskorišćenja bio viši. Specifična potrošnja goriva iznosila je oko 0,3kg/kWh. Nedostaci ovog pogona bili su nerevirzibilnost pogona kao i relativno velika brzina obrtanja izlaznog vratila, a zahtevana ili potrebna znatno manja brzina obrtanja propelera. Ovi uslovi nametnuli su turboelektričnu propulziju kao rešenje, jer je ova vrlo lako rešavala problem redukcije brzine obrtanja od pogonske mašine do propelera, kao i problem vožnje "krmom". Pored toga, postojala je mogućnost pokretanja dva propelera preko jednog, ili više generatora. U slučaju havarije jednog, drugi generator je mogao da napaja oba propelera smanjenim snagama.

Motori sa unutrašnjim sagorevanjem počeli su da se primenjuju na brodovima početkom ovog veka. Zauzimali su još manje prostora u brodu i imali još viši stepen iskorišćenja goriva. Specifična potrošnja goriva iznosila je oko 0,2kg/kWh. Dok nisu bili razvijeni brodski reduktori, radi redukcije brzine korišćena je električna transmisija snage, što je bilo izvesno povećanje mase pogonskog agregata i investicije. Konstrukcija kvalitetnih brodskih reduktora uslovlila je smanjenje korišćenja električnog prenosa snage. Poznato je da su za najveće pogone konstruisani sporohodni motori sa unutrašnjim sagorevanjem koji direktno pogone propellersko vratilo. Poseduju i mogućnost direktnog reverziranja.

Nuklearni reaktori su se na brodovima pojavili tek pre deceniju ili nešto više. Osnovna karakteristika je da imaju malu masu i zapreminu goriva, tako da mogu dugo vremena da rade autonomno. Mana ovog pogona je težak zaštitni omotač ili ekran između nuklearnog reaktora i prostora za smeštaj posade. Radi regulacije brzine obrtanja propelera, između parne turbine i propellerskog vratila nekad se postavlja električni prenos.

Usavršavanje mehaničkih reduktora prekretnika doprinelo je da se udeo električne propulzije u svetskoj brodogradnji znatno smanji sredinom i krajem XX veka, ali je zbog nekih osobina opet počeo da se javlja zadnjih desetak godina.

### **13.02. Osnovne karakteristike električnog pogona broda**

U odnosu na ostale prenose snage od pogonske mašine do propelera, električni pogon ima nekoliko prednosti:

- kontinualna regulacije brzine propelera
- mogućnost podešavanja optimalne brzine obrtanja propelera
- primena brzohodnih pogonskih mašina sa visokim stepenom iskorišćenja
- generatorski rad pogonske mašine
- odlične manevarske osobine broda obzirom na brz odziv sistema
- brz preket propelera i vožnja krmom istom snagom kao za vožnju napred
- smeštaj pogonskih mašina na najpogodnijem mestu u brodu
- eliminacija uređaja za reverziranje
- mogućnost rada sa više pogonskih mašina u paralelnom radu
- mogućnost isključenja nekih pogonskih mašina pri malim brzinama kretanja
- napajanje brodske mreže sa pogonskih generatora

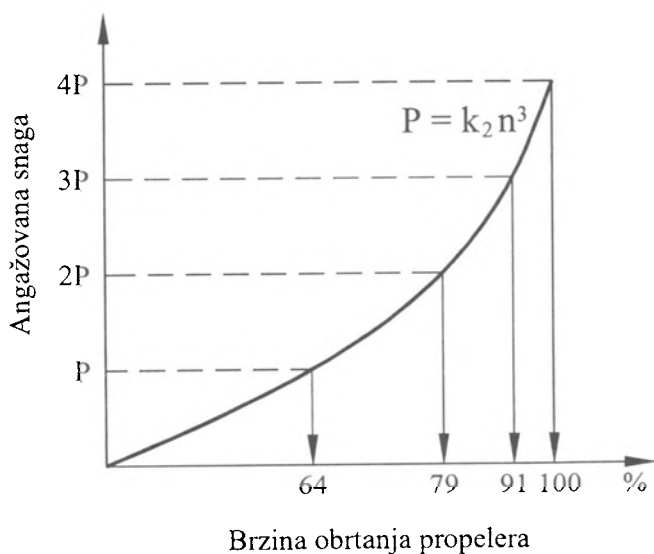
Pored toga, električni pogon poseduje i određene nedostatke u odnosu na direktan prenos:

- niži stepen korisnosti prenosa
- veća masa postrojenja
- veće održavanje

viša investiciona cena

Još jedna važna osobina električnog pogona je da posada mora biti posebno obučena da bi radila bezbedno i pouzdano sa električnim pogonskim uređajima.

Električni pogon između pogonske mašine i propelera ima gubitke oko 15%. To znači da će usloviti i potrošnju goriva za oko 15% višu od odgovarajućeg pogona sa direktnom transmisijom snage. Kod direktnog pogona sa dizel motorom i reduktorom prekretnikom gubici iznose svega oko 5% pri čemu su u reduktoru oko 2% a u spojnici dodatnih 3%. Međutim, određene osobine električnog pogona mogu uticati da se smanji ova razlika jer se sa električnim pogonom brzina broda može podesiti tako da odgovara najefikasnijoj brzini broda.



Slika 93. Karakteristika snage propelera od brzine obrtanja

Ako se radi sa električnom prenosom, i ako brod radi sa određenom manjom brzinom, može se isključiti jedna ili više pogonskih mašina zadržavajući najbolji stepen korisnosti pri tome. Na primer, kod jednopropelnog pogona sa četiri pogonska generatora a na osnovu promene snage u skladu sa trećim stepenom brzine obrtanja propelera

$$P = k_2 \cdot n^3 \quad (13.01)$$

mogu se obezbediti sledeće približne brzine propelera sa različitim brojem generatora iste snage, u radu:



- 4 generatora – 100% brzine propelera
- 3 generatora – 91% brzine propelera
- 2 generatora – 79% brzine propelera
- 1 generator – 64% brzine propelera

Pored toga, direktan pogon ne može stabilno raditi pri niskoj brzini obrtanja, tako da pri manevrisanju može raditi kratko vreme pri minimalnoj brzini u vožnji napred ili krmom i tada se mora zaustaviti. Ovo je neracionalno trošenje energije u poređenju sa vrlo fleksibilnom regulacijom brzine sa električnim pogonom bez efekta na brzinu pogonske mašine.

Danas električni pogon može naći primenu na rečnim remorkerima i bokserima, feribotima, protivpožarnim brodovima, samoutovarnim teretnim brodovima, tankerima, samohodnim bagerima, ledolomcima, kao i ratnim brodovima. Na nekim visoko manevrabilnim brodovima koristi se ovaj pogon radi naglog prekreta (vožnje krmom punom snagom).

### 13.03. Prekret propelera

Prekret propelera predstavlja prelaznu pojavu koja može naročito kod naglog manipulisanja dovesti do neželjenih posledica. Pri naglom preketu propelera ili nagloj promeni brzine obrtanja mogu se javiti određeni problemi zbog mase broda, propellerskog vratila i mase vode koju propeler usporava a zatim ubrzava u suprotnom smeru [06]. Ovaj problem se pažljivo razmatra zbog dobrog manevrisanja broda i brzog prekreta propelera radi izbegavanja sudara.

Pri preketu dolazi do naglog usporavanja što se u najopštijem obliku može predstaviti jednačinom:

$$m \frac{dV}{dt} = T - R \quad (13.02)$$

pri čemu je  $m$  masa broda i dodatna masa vode,  $V$  brzina broda,  $T$  propulzivna sila propelera a  $R$  otpor broda.

Jednačina rada propulzivnog kompleksa glasi:

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_s - M - M_j \quad (13.03)$$

gde je  $I$  moment inercije rotirajućih masa sistema i dodatne mase vode,  $\omega$  je ugaona brzina,  $M_s$  pogonski moment elektromotora,  $M$  moment propelera,  $M_f$  moment trenja.

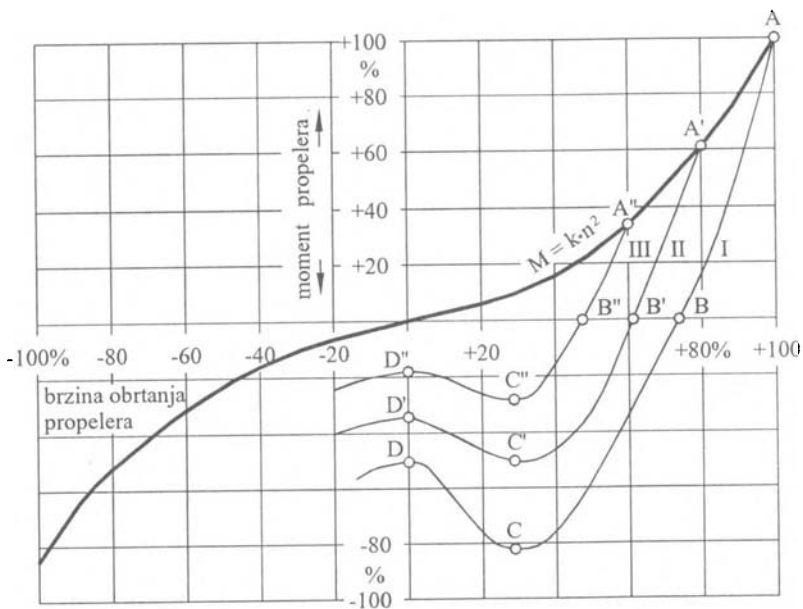
Krive prekreta snimane u bazenu prikazane su na slici i poznate su kao Robinsonove krive. Prikazuju procese kod prekreta propelera. U principu je ta zavisnost kvadratna

$$M = k_1 \cdot n^2 \quad (13.04)$$

Istovremeno se odnos snage od brzine obrtanja propelera može izraziti kubnom zavisnošću

$$P = k_2 \cdot n^3$$

Shematski je zavisnost momenta od brzine obrtanja propelera prikazana punom linijom na slici 94 i detaljnije je objašnjen i preket propelera.



Slika 94. Krive prekreta propelera

Prva kriva (deblje nacrtana) prikazuje osnovnu zavisnost momenta od brzine obrtanja propelera. Pretpostavimo da je preket u nekoj od tačaka  $A$  sa odgovarajućim indeksom. U tački  $B$  propeler ima odgovarajuću brzinu ali ne i

moment na vrtilu koje je u ovoj tački jednak nuli. U nekoj od tačaka označenih slovom *C*, moment propelera ima maksimalnu negativnu vrednost kod brzine obrtanja od približno 30% nominalne. U tačkama *D* prestaje obrtanje propelera, mada još uvek postoji moment na vratilu.

U delu karakteristike od *A* do *B*, pozitivan je moment propelera kao i brzina obrtanja a to znači da propeler dobija snagu od pogonske mašine. U delu karakteristike od *B* do *D*, preko *C* moment propelera je negativan a brzina obrtanja propelera je pozitivna. To znači da je snaga negativna ili da propeler pogoni pogonski elektromotor koji se ponaša kao generator. Usled toga mogu se stvoriti određeni problemi u električnoj mreži.

### 13.04. Vrste električne propulzije brodova

Podela električne propulzije (električnih pogona) brodova može se izvršiti prema nekoliko kriterijuma.

Osnovna podela je prema vrsti izvora odakle propulzivni motor dobija električnu energiju: na *čistu električnu propulziju* ako pogonski motor dobija energiju iz akumulatorskih baterija i na *električni prenos* ako se energija dobija iz generatora.

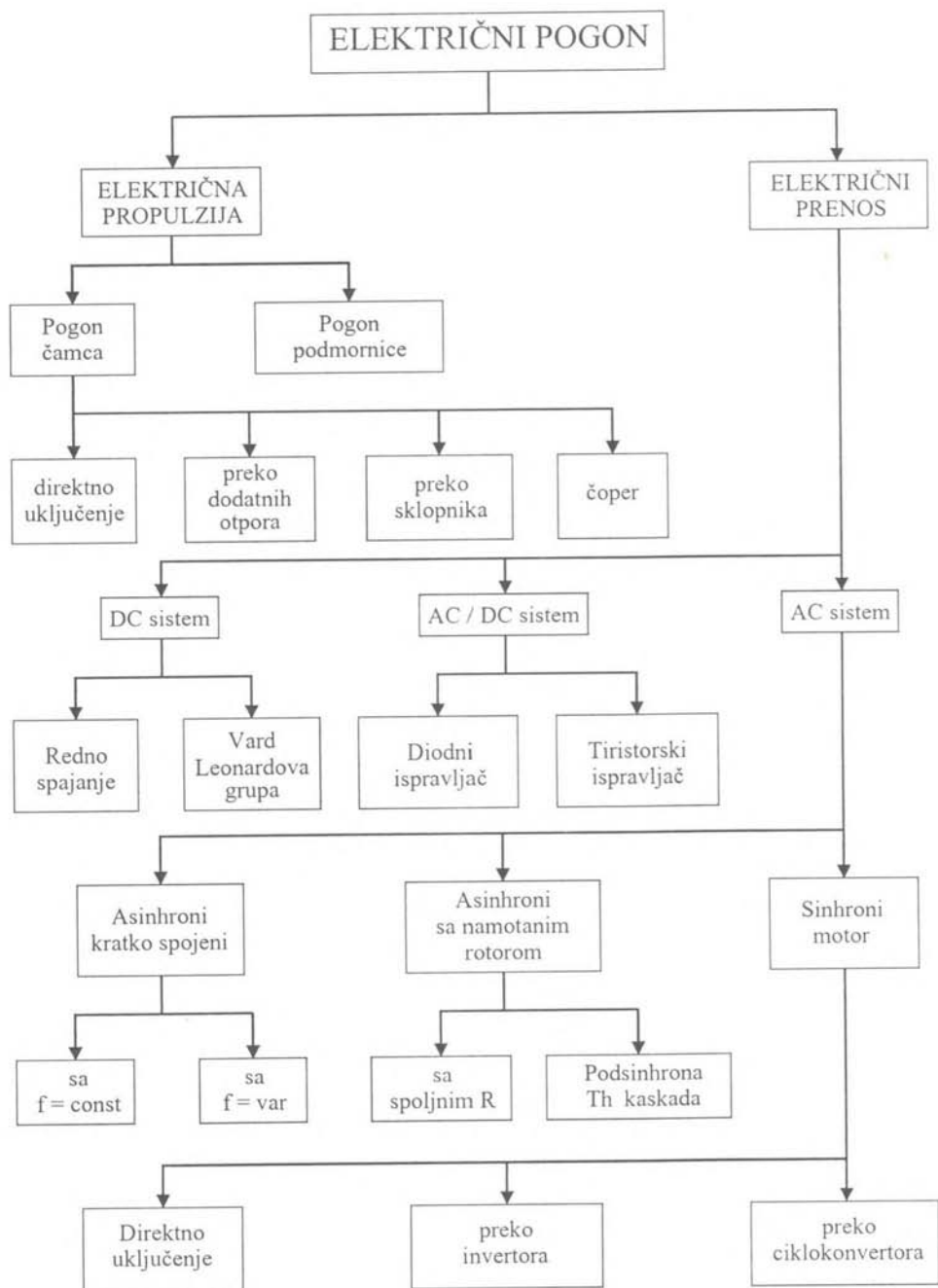
Čista električna propulzija se može koristiti na čamecima ili u podmornicama. Ako se koristi na manjim plovnim objektima, pogonski motori se mogu puštati u pogon direktnim uključanjem na mrežu, zatim preko dodatnih otpora, preko sklopnika i čopera. Zbog značaja, pogon podmornica je posebno obrađen u poglavlju 14.

Prema vrsti pogonskog agregata, električni prenos može se podeliti na turbo električne, dizel električne i nuklearno električne. Ali prema vrsti korišćenih električnih pogonskih mašina, električni prenos može se podeliti na jednosmerne, naizmenično jednosmerne i čisto naizmenične sisteme.

Jednosmerni sistem prenosa snage poseduje jednosmerni generator i jednosmerni motor. Može se ostvariti direktnim pogonom motora preko generatora, sa redno paralelnim spajanjem mašina ili kao Vard-Leonardova grupa.

Naizmenično jednosmerni sistem prenosa snage poseduje naizmenični generator i jednosmerni motor a radi puštanja u pogon i regulacije brzine postoje rešenja sa diodnim ili tiristorskim ispravljačima.

Prema vrsti pogonskih motora, naizmenični prenos snage može se podeliti na pogone sa asinhronim kratkospojenim motorima, asinhronim motorima sa namotanim rotorom i sa sinhronim motorima. U skladu sa postojećim metodama regulacije može se izvršiti podela prvih na sisteme sa konstantnom frekvencijom i sa promenljivom frekvencijom. Pogoni sa asinhronim motorima sa namotanim



Slika 95. Shematski prikaz podele električnih pogona brodova

rotorom mogu biti sa spoljnim promenljivim otporom i sa podsinhronim kaskadama. Pogoni sa sinhronim motorima mogu biti sa direktnim uključenjem, sa inverterom ili ciklokonvertorom mada se ovi pogoni mogu primeniti i za pokretanje asinhronih mašina. Postoji još jedna podela električnih prenosa, obzirom na odnos ulazne i izlazne brzine obrtanja, na sisteme sa fiksnim i promenljivim odnosom.

### 13.05. Električna propulzija plovnih objekata

Obzirom na jednosmeran izvor električne energije električna propulzija plovnih objekata izvodi se za sada isključivo jednosmernim motorima. Postoji nekoliko rešenja. Osnovno je direktno uključenje na izvor. Nešto efikasnija rešenja sa regulacijom su detaljnije objašnjena [07-08], a rešenja puštanja i regulacije brzine pogonskih elektromotora kod podmornica data su u sledećem poglavlju.

#### 01. Direktno puštanje u pogon

Obzirom na veliku snagu električnog izvora, ova metoda ima veliki značaj posebno za male snage pogonskih elektromotora. Ovo rešenje odlikuje se jednostavnim postupkom ali sa velikim strujnim udarima koji mogu štetno uticati na rad elektromotora ili izvora. Zbog toga je za ovu namenu potrebno konstruisati specijalne motore kod kojih se konstruktivno prave izvođenja da su manje polazne struje.

#### 02. Puštanje u pogon pomoću dodatnog otpora

Dodatni otpor priključuje se na red sa pogonskim elektromotorom a na taj način snižava se napon na krajevima motora i smanjuju polazne struje. Više otpora koji se sukcesivno isključuju omogućuje da se ovakvim postupkom vrši i skokovita regulacija brzine. Pošto je ovo rasipna metoda sa niskim stepenom korisnosti, može se primeniti samo za autonomne pogone malih snaga.

#### 03. Puštanje i regulacija brzine preko sklopnika

Relativno jeftin i efikasan ali ne previše regulabilan sistem je pomoću preklopki za regulaciju napona napajanja motora. Često se pokazuje da je ovo dovoljno za određene pogone, jer se jedna brzina može koristiti za manevar, druga za vožnju, a treća za postizanje maksimalnih brzina.

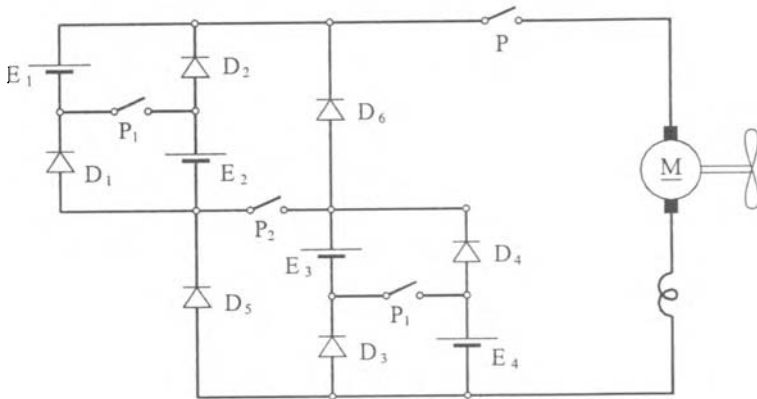
Uslov je da su naponi svih izvora jednaki.

$$E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E \quad (13.05)$$

Uključenjem prekidača  $P$ , svi električni izvori vezani su paralelno i napajaju pogonski elektromotor preko odgovarajućih dioda. Napon na elektromotoru iznosi:

$$U_1 = E - 2 \cdot U_d$$

gde je  $U_d$  - pad napona na diodi.



Slika 96. Promena brzine obrtanja motora promenom napona napajanja ili redno paralelnim spajanjem izvora

Istovremenim uključenjem dva prekidača  $P_1$  vezuju se izvori  $E_1$  i  $E_2$  redno kao i  $E_3$  i  $E_4$ . Obe grupe su spojene paralelno tako da napajaju elektromotor preko odgovarajućih dioda naponom:

$$U_2 = 2 \cdot E - U_d$$

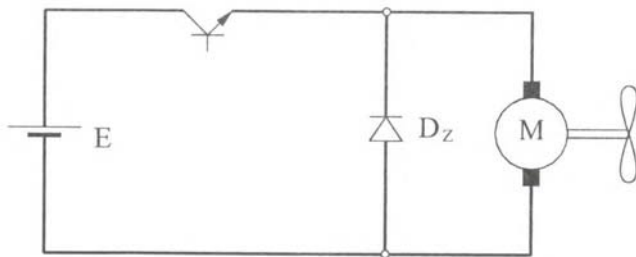
Uključenjem prekidača  $P_2$  sva četiri električna izvora spojena su redno tako da se elektromotor nalazi pod naponom:

$$U_3 = 4 \cdot E$$

Time se postižu i maksimalne performanse elektromotora.

#### 04. Puštanje i regulacija brzine preko čopera

Za električnu propulziju manjih i srednjih snaga, primenjuje se tranzistorski ili tiristorski čoper za regulaciju napona i brzine obrtanja pogonskog jednosmernog elektromotora. Razvoj tehnologije izrade tranzistora snage uslovio je da se ova metoda sve više koristi, posebno za pogon ekološki pogonjenih plovni objekata na zatvorenim akvatorijama [09], kao i za pogone u podmornicama i torpedima.



Slika 97. Regulacija brzine električnog motora čoperom

U poglavlju o energetskim pretvaračima detaljno su objašnjeni ovi regulatori brzine.

### 13.06. Električni prenos snage do propelera

Električni prenos snage počeo se razvijati početkom ovog veka kada postojeća tehnička rešenja nisu mogla da zadovolje želje za većim, snažnijim i manevribilnijim brodovima. Obzirom na stanje tehnike u to vreme, prvo se pojavio turbo-električni pogon [10], da bi se kasnije pojavio i dizel-električni pogon, a još kasnije nuklearno-električni pogon.

U proučavanju električnog prenosa ili posrednog električnog pogona propelera, razmatraće se samo pogon propelera sa fiksnim korakom. Izbor vrste pogona propelera potrebno je oceniti pomoću više kriterijuma: kvaliteta regulacije propelera, manevribilnosti, mogućnosti smeštaja pogona, kao i ekonomskih aspekata (investicioni, montažni, eksploatacioni itd.). Prvi električni prenos snage do propelera ostvaren je pomoću jednosmenih mašina. Pojavom naizmeničnih mašina iskorišćene su sinhronne mašine kao generatori a asinhronni motori kao pogonski, mada su kasnije korišćeni i sinhronni motori kao pogonski. Tokom vremena su pravljene razne kombinacije ovih mašina.

Osnovna podela elektromotornih pogona mogla bi se izvršiti na jednosmerne i naizmenične motore pri čemu bi se ovi drugi mogli podeliti na mašine sa kratkospojenim i namotanim rotorom. Podela prenosa snage i regulacija brzine kretanja broda može se izvršiti i prema vrsti propelera sa zakretnim krilima i fiksnim krilima [11]. Električni sistem prenosa snage može se prema vrsti pogonske mašine, i to hronološki, podeliti na turboelektrični, dizelektrični i na kraju na nuklearnoelektrični pogon. Prema osnovnim karakteristikama pogonskih mašina, razvijena su i posebna rešenja električnog prenosa snage.

**Turboelektrični pogon** je mašinski kompleks koji se koristi za pogon brodova a sastoji se od parne turbine i električne transmisije do pogonskog propelera. Na ovaj način ostvaruje se ista namena sa električnim prenosom kao što kod turbine radi mehanički prenos sa reduktorom. U principu se pogon sastoji od jedne ili više parnih turbina koje rade sa velikim brzinama obrtanja i pokreću naizmenične generatore. Ovi generatori dostavljaju električnu energiju jednom ili više sporohodnih naizmeničnih motora koji pogone propelerska vratila. Ova vrsta propulzije za velike brodove prvi put je ispitana na Američkom brodu Jupiter 1912 godine i napravljena na ratnom brodu New Mexico 1918 godine. Od tada, široko se koristio na brojnim ratnim brodovima, na dva nosača aviona, brojnim razaračima obalske straže, putničkim brodovima i tankerima. Prvi turboelektrični pogon na komercijalnim brodovima sa ABS klasom bio je T. W. Robinson [12]. Plovio je po Velikim Jezerima od 1925. godine i bio je dug 175m. Interesantno je napomenuti da je za vreme II svetskog rata napravljeno 525 ovakvih brodova sa turboelektričnim pogonom.

Turboelektrični pogon je bio prvenstveno uveden radi smanjenja brzine obrtanja između parne turbine i propelera i to kao konkurencija turbinama sa reduktorima. Prednosti turbo-električnog pogona u odnosu na turbinu sa reduktorom bile su: lako manevrisanje, veliki prekretni moment (nije bila potrebna turbina za prekret), miran rad, smanjene vibracije, a u nekim instalacijama veća ekonomičnost pri manjim brzinama kretanja. Mana ovog pogona je nešto niži stepen iskorištenja (90%) u odnosu na pogon sa turbinskim pogonom sa reduktorom.

U odnosu na turbinski pogon sa reduktorom, turbo-električni pogon ima za oko 10% veću potrošnju goriva, ali turboelektrični pogon omogućuje bolji manevar i prekret. Prednost je mirniji rad i kontinuelna regulacija brzine obrtanja propelera. Postoji mogućnost plovidbe broda smanjenom snagom kada jedna od pogonskih mašina ispadne iz pogona. Pored svega toga, turboelektrični pogon je morao da se pojavi na brodovima jer reduktori nisu bili dovoljno kvalitetni i stvarali su dosta problema.

Za pogon brodova je korišćeno nekoliko vrsta elektromotora:

1. Asinhroni motor sa namotanim rotorom i spoljnim otpornikom
2. Asinhroni motor sa kratkospojenim rotorom i dva kaveza
3. Sinhroni motor

U turboelektričnim pogonima, naizmenični generatori i motori su električno povezani tako da se brzina obrtanja pogonskog motora kao i broda menjaju promenom frekvencije generatora. Ovo se postiže promenom brzine obrtanja turbine, i na taj način se dobija redukcija brzine obrtanja od pogonske mašine do propelera slično kao promena brzine broda sa turbinsko-reduktorskom instalacijom.



Brodovi sa asinhronim motorima i namotanim rotorom imali su spoljne otpore sa tečnim reostatom i koristili su praktično samo za vreme manevra. Promena brzine po uzburkanom moru stvarala je posebne probleme. Prednosti ovog pogona su visok polazni i prekretni moment što je esencijalno za pogon brodova. Druga prednost je da u slučaju kvara jednog generatora, brod može da nastavi plovidbu smanjenom brzinom.

Prvi brod sa turboelektričnom propulzijom imao je asinhroni motor sa kratkospojenim rotorom i sa dva kaveza kao pogonski. Jedan namotaj korišćen je za manevar a drugi za režimsku vožnju.

Sinhroni motori nemaju polazni moment, tako da na rotoru poseduju kratkospojene namotaje i kreću u pogon kao asinhroni. Kada se zaletе do asinhronе brzine, vrši se dalje zaletanje do sinhronе brzine obrtanja. Prednosti sinhronih u odnosu na asinhronе motore su sledeće:

1. Veći je vazdušni procep ili međugvožđe između statora i rotora
2. Bolji je faktor snage
3. Manji su, lakši i jeftiniji
4. Imaju manje vibracije jer se obrću istom (sinhronom) brzinom kao i pogonske mašine

Pošto nemaju polazni kao ni inverzni moment, nisu pogodni za brodove koji imaju puno manevrisanja i vožnje "krmom".

**Dizelelektrični pogon** se pojavio tek kada su konstruisani veliki, brodski dizel motori i to prvo u Evropi. Dizel motor je motor sa unutrašnjim sagorevanjem nazvan po pronalazaču Rudolph Diesel-u. Brod "Standard Service" dužine 64m i 1.000 BRT izgrađen 1923. godine za Standard Oil Company of California – kasnije Chevron [12], bio je prvi tanker sa dizelelektričnim pogonom.

Redukcija brzine između dizel motora i propelerskog vratila nije toliko velika, reda 1:2 do 1:4 umesto 1:20 do 1:40 kod turboelektričnog pogona. Prednost dizel motora je širi opseg regulacije brzine obrtanja. Dizel motor ima i nešto veći moment pri smanjenoj brzini obrtanja u odnosu na turbinski pogon.

Dizelelektrični pogon sastojao se od nekoliko srednje brzinskih dizel motora koji imaju konstantnu brzinu obrtanja i pogone jednosmerne generatore. Generatori su spojeni redno i pokreću sporohodne motore na propelerskom vratilu. Za pogon su korišćeni sistemi sa krstastom spregom ili Vard-Leonardova grupa. U oba slučaja na komandnom mostu je postojao reostat za regulaciju pobudne struje a time i brzine obrtanja elektromotora.

Tabela 8. Izgrađeni brodovi početkom ovog veka sa tipičnira turbo-električnim pogonima [13].

Brod	Tip broda	Snaga motora (kW)	Tip motora	Broj gener.	Broj mot.	Brzina gener. (min <sup>-1</sup> )	Brzina motora (min <sup>-1</sup> )	Pari polova gener.	Pari polova motora	Napon (V)	Frekvencija (Hz)
New Mexico	Ratni	20600	Asinhroni	2	4	2100	167	2	24-36	2300	33.2
Saratoga	Teretni	132000	Asinhroni	4	8	1755	317	4	22-44	5000	58.5
President Coolidge	Putnički	20600	Sinhroni	2	2	2660	133	2	40	4000	44.3
Viceroy of India	Putnički	12500	Sinhroni	2	2	3110	110	2	56	3200	51.8
Normandie	Putnički	96000	Sinhroni	4	4	2250	225	4	40	5500	75
J.W. Van Dyne	Tanker	3700	Sinhroni	1	1	3600	90	2	80	2300	60
Carl D. Bradley	Rasuti teret	3500	Asinhroni	1	1	3600	104.5	2	66	2300	60
Pontchartrain	Ob. straža	2200	Sinhroni	1	1	3600	163.5	2	44	2300	60

Tabela 9. Izgrađeni brodovi u periodu od 1928. do 1940. sa tipičnim dizel-električnim pogonima [14].

Brod	Tip broda	Vrsta napona	Ukupna snaga motora (kW)	Broj propelera	Broj motora	Brzina dizel m. (min <sup>-1</sup> )	Brzina motora (min <sup>-1</sup> )	Snaga mašine (kW)
Courageous	Teretni	Jednosmerni	2900	1	4	250	60	882
Brunswick	Tanker	Jednosmerni	2000	1	4	225	95	550
Port Houston	Vatrogasni	Jednosmerni	530	2	2	425	265	400
New York Central	Remorker	Jednosmerni	480	1	2	265	145	300
Navajo	USN remorker	Jednosmerni	2250	1	4	750		700
E.J. Moron	Remorker	Jednosmerni	1000	1	2	750	200	700
Lock Fyne	Mali putnički	Jednosmerni	...	2	2	330	430	735
Wuppertal	Teretni	Naizmenični	...	1	3	250	125	1910
Patria	Putnički	Naizmenični	11000	2	6	250	110	5x2140

Ovaj pogon je idealan za brodove koji često manevrišu. Zbog lake promene brzine obrtanja nije potreban reduktor prekretnik već se prekret rada propelera obavlja električno.

Prednost naizmjeničnog u odnosu na jednosmerni pogon je nešto viši stepen iskorišćenja u odnosu na jednosmerne sisteme i to preko 90% prema 85% a investiciona cena je barem 20% niža.

Brodski dizel motori su razvijeni u Evropi tako da su tu počeli da se i primenjuju a gde i danas postoje veća iskustva nego u Americi. Poznati proizvođači dizel motora su Sulcer, MAN, Burmeister & Wain, Wartsila i drugi.

**Nuklearnoelektrični pogon** je nova vrsta pogona brodova koja je prvi put primenjena pre nekoliko decenija za pogon broda. Sam nuklearni pogon komercijalnog broda realizovan je prvi put na brodu "Savanah" još 1961. godine. Nuklearnoelektrični pogoni se primenjuju na ledolomcima snaga do 32,5MW. Poseduju nuklearni reaktor i parnu turbinu koja pokreće generator naizmjenične struje.

Princip rada ovog postrojenja je poznat. Fisijom atomskog jezgra nuklearnog goriva oslobada se energija. Ovim sistemom kontrolisane lančane reakcije u nuklearnom reaktoru oslobada se velika energija, koja se koristi za zagrevanje vode čija se para koristi u parnim turbinama za pretvaranje toplote u mehaničku energiju. Parne turbine direktno ili preko električne transmisije snage pokreću propelere.

Ovi pogoni imaju određenih prednosti. Ne zavise od spoljnog vazduha i sa jednim punjenjem nuklearnog goriva u stanju su da plove dugo vremena, ili da imaju velike autonomne radijuse kretanja. Pored toga, imaju jako veliku specifičnu snagu.

Osnovni nedostatak ovih pogona je da postoji stalno prisutna određena radioaktivnost za posadu i okolinu tako da se postavljaju veliki i teški zaštitni ekrani oko nuklearnog reaktora.

Pogon realizovan na ledolomcima sastoji se od jednog nuklearnog reaktora koji napaja dve parne turbine sa sinhronim generatorima. Na brodu postoje tri sinhrona motora sa permanentnim magnetima snage 12MW [15] svaki. Za pogon se koristi trofazni napon 6kV. Kao rezervni pogon broda postoje tri dizel generatora snage 2,4MW svaki koji se mogu koristiti za pogon dok nuklearni reaktor ne radi ili kao pomoćni pogon u ekstremnim uslovima eksploatacije. Napravljeni su planovi za gradnju trgovačkih brodova za opšti teret koji bi imali ovakvu pogonsku grupu.

### 13.07. Jednosmerni sistem prenosa snage

Jednosmerni sistem prenosa snage predstavlja osnovni koncept pogona koji danas ima više manje istorijsku ulogu prvenstveno zato što je proizvodnja, razvod kao i potrošnja definitivno prešla na nazmenične sisteme.

Kao pogonski elektromotor uglavnom se koristi jednosmerni redni motor ili motor sa složenom (diferencijalnom) pobudom, ali sa velikim udelom redne pobude. Generator je sa složenom pobudom i velikom mogućnošću regulacije izlaznog napona.

Pogodnosti ovog sistema su jednostavna regulacija obrtanja propelera u celom opsegu regulacije, brz odziv sistema, a nedostaci su velike dimenzije i masa mašine, održavanje kolektora i nemogućnost priključenja naizmeničnih pa čak ni jednosmernih potrošača na pogonski generator. Za pogonski sistem snage 400kW stepeni iskorišćenja generatora i motora su 0,90 i 0,92 tako da je ukupan stepen iskorišćenja oko 0,83.

Poznate regulacije su sa rednim spajanjem pogonskih generatora i motora. Pored toga, dobro je poznata i Vard-Leonardova grupa.

#### 01. Redno spajanje pogonskih generatora i motora

Ovaj spoj naziva se unakrsni spoj mašina. Na slici 98 prikazan je ovaj spoj sa 4 generatora i dva pogonska elektromotora.

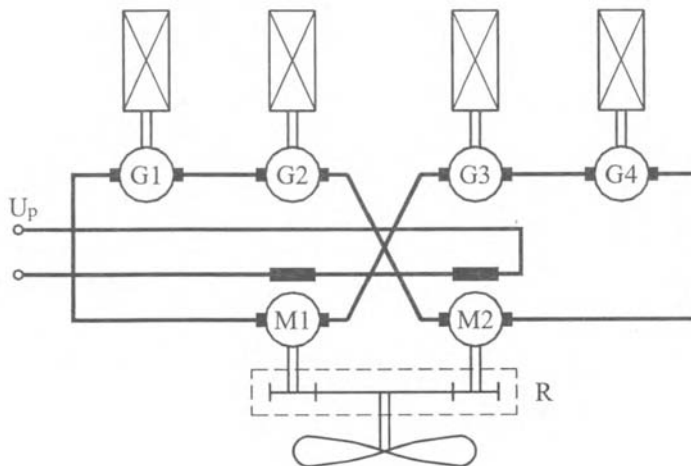
Četiri identična dizel električna agregata [16] sastoje se, od dizel motora koji pokreću pri stalnoj brzini obrtanja generatore jednosmerne struje. Postoje i dva pogonska jednosmerna elektromotora koji preko usklađivača brzine obrtanja pokreću jedan propeler. U pogonu je moguća bilo koja kombinacija generatora i elektromotora jer ista struja protiče kroz celo električno kolo i ravnomerno opterećuje pogonske elektromotore.

Osnovna karakteristika je da se ni u jednoj tački pogona ne prelazi maksimalno dozvoljeni nivo napona od 600V ili 750V prema masi broda, jer toliko je početkom ovog veka iznosio maksimalno dozvoljeni nivo napona prema propisima klasifikacionih društava. Mada je zbir napona svih generatora bio i znatno viši unakrsnim vezivanjem generatora i elektromotora dobija se napred navedena osobina.

Pored toga, ova vrsta pogona nekada se vrlo često koristila za veće snage pogonskih propelera zbog nekoliko sledećih prednosti:

1. Mogućnost da dva pogonska elektromotora pokreću jedan propeler preko reduktora

- Korišćenje više generatora radi pokretanja jednog pogonskog elektromotora



Slika 98. Unakrsni spoj pogonskih mašina

- Mogućnost istovremene kontrole brzine obrtanja oba elektromotora preko pobudne struje sa komandnog mosta
- Izbacivanje jednog ili više generatora iz pogona

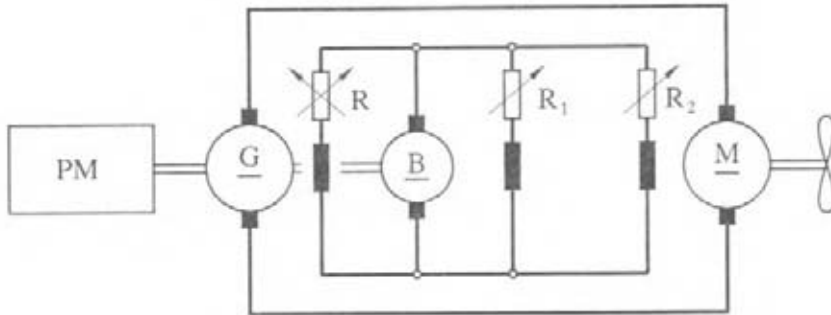
U slučaju havarije jednog ili više generatora, bilo je moguće smanjenom brzinom nastaviti vožnju.

## 02. Vard - Leonardova grupa

Naziv potiče prema pronalazačima ove spregе električnih mašina. Velika pogodnost Vard-Leonardove grupe je regulacija male struje pobude što se može raditi i sa komandnog mosta. Važna karakteristika je da nije potreban reduktor prekretnik. Pored toga, pogonski dizel motori se mogu postaviti na pogodna mesta u mašinskom prostoru. Zbog toga se ovaj prenos i danas koristi na mestima gde se ne mora puna snaga pogonskih motora koristiti za propulziju, kao što su električni bager, brod dizalica, brod vatrogasac, brod spasilac.

Nekada se ova grupa najčešće primenjivala kao regulatorski sistem za jednosmerni električni prenos snage. U principu se sastojala od pogonske mašine koja pogoni jedan jednosmerni generator velike snage i drugi manje snage (budilicu) i pogonskog elektromotora koji direktno pogoni propeler. Ovim generatorima

moгуće je menjati brzinu obrtanja pogonskog motora a time i propelera u punom opsegu promene brzine napred i krmom, tako da nije potreban reduktor prekretnik.



Slika 99. Vard Leonardova grupa

Glavni pogonski generator  $G$  je generator jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Direktno ga pogoni neka pogonska mašina  $PM$  stalnom brzinom, isto kao i pobudni generator. Pomoćni generator (budilica)  $B$  je znatno manje snage od glavnog, a po konstrukciji je samopobudni generator sa paralelnom ili složenom pobudom. Pobuda ovog generatora, kao i izlazni napon mogu se malo korigovati promenom otpora  $R_1$ .

Pogonski elektromotor  $M$  napaja se direktno sa krajeva generatora. Uključivanjem otpora  $R$  i smanjivanjem njegove vrednosti povećava se pobudna struja kao i izlazni napon generatora  $G$ . Ovim povećanjem napona na krajevima elektromotora  $M$  povećava se i njegova brzina obrtanja.

Na ovaj način se regulisanjem pobudne struje generatora  $G$  reguliše brzina obrtanja elektromotora  $M$  što je vrlo ekonomično, jer su pobudne struje znatno manje od armaturnih, pa je moguće kontrolu vršiti daljinski sa komandnog mosta. Nije potreban veliki otpor za puštanje motora  $M$  u pogon, već se to vrši postepenim povećanjem pobudne struje glavnog generatora  $G$ . A ako se u pobudno kolo elektromotora  $M$  ubaci otpornik  $R_2$  radi daljeg smanjenja pobudnog fluksa, opseg regulacije brzine propelera povećava se još više.

Tipičan primer pogona ovom propulzijom dat je na primeru kargo broda Brunswick [14] napravljenog 1928 godine. Četiri dizel motora, svaki snage po  $900\text{kW}$  pri  $250\text{ min}^{-1}$  pokreću jedan propeler preko pogonskih motora snage preko  $3\text{MW}$  pri  $60\text{ min}^{-1}$ . Prekret rada propelera obavlja se jednostavno promenom

smjera struje kroz pobudni namotaj generatora što se takode može raditi daljinski sa komandnog mosta.

Međutim, bilo je i manje uspješnih primera. Jedan od takvih je i primer [17] sa sporohodnim pogonskim elektromotorom koji je direktno pokretao pogonske točkove sa lopaticama brzinama od oko  $40\text{min}^{-1}$ .

Poznato je da su ove vrste pogona brodova na rekama imale određene pogodnosti kao što su mali gaz broda i dobar stepen iskorišćenja pogona kod ekstremno plitkih voda [18]. Mane su: povećana širina broda, niska brzina obrtanja pogonskih točkova i nejednaka apsorpcija točkova na talasima. Pored toga, postoji velika razlika apsorpcionih krivih u nizvodnoj i uzvodnoj plovidbi, tako da je potrebno znatno povećati brzinu obrtanja točkova u uzvodnoj vožnji da bi točkovi sa lopaticama mogli apsorbovati punu snagu pogonskih mašina [19]. I ovde je upravo radi tih nedostataka pogona sa parnom mašinom, električna transmisija imala određenih prednosti. Realizovano rešenje je pokazalo neke prednosti, ali i nedostatke koji su prvenstveno bili uzrokovani niskom brzinom obrtanja pogonskog motora a koji je direktno, bez reduktora, pogonio točkove sa lopaticama. Usled toga su postojale određene vibracije i neravnomernosti u radu celog pogonskog kompleksa.

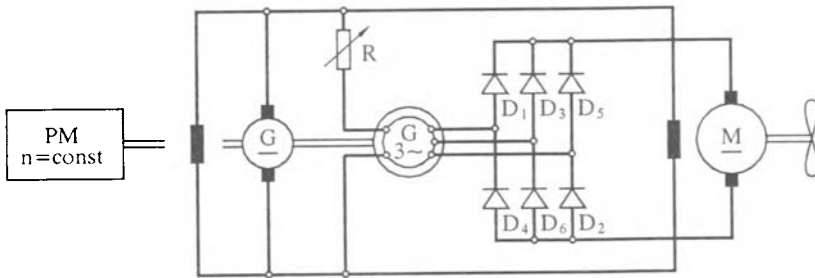
Sistem pogona broda sa Vard-Leonardovom grupom zadržao se i na nekim brodovima za specijalne namene kao što je ledolamac [20] i do kasnih sedamdesetih godina. Na brodu postoji pet dizel motora ukupne snage 16,2MW. Četiri dizel motora pokreće četiri generatora jednosmerne snage. Dva generatora se koriste za pogon propelera napred a dva za pogon krmom. Peti generator je za opštebrodsku potrošnju. Krmene propelere sa fiksnim krilima direktno pokreću jednosmerni elektromotori sa brzinama obrtanja do  $190\text{min}^{-1}$ . Pramčane propelere sa fiksnim krilima direktno pokreću jednosmerni elektromotori sa brzinama obrtanja do  $250\text{min}^{-1}$ .

### **13.08. Naizmenično jednosmerni sistem pogona propelera**

Logičan razvoj i napredak u električnom pogonu bio je da se zameni jednosmerni generator naizmeničnim. Na ovaj način smanjilo se održavanje generatora, povećao se stepen iskorišćenja, a zadržale se dobre osobine pogonskog motora.

Naizmenično jednosmerni sistem električnog prenosa pripada metodi sa promenljivim prenosom a primenjuje se i danas. U današnjem obliku, naizmenično jednosmerni sistem pogona sastoji se od sinhronih dizel agregata stalne brzine obrtanja a time i frekvencije koji napajaju sabirnice a sa kojih se napajaju tiristorski pretvarači koji pokreću jednosmerne motore snage i do nekoliko MW.

Prednosti ovog sistema su sledeće: jeftiniji i robusniji generator sa manje održavanja i većim stepenom iskorišćenja, jednostavna regulacija brzine obrtanja u celom dijapazonu brzine  $(-n - 0 + n)$ , brz odziv sistema i zajednička proizvodnja električne energije za sve potrošače na brodu. Stepem iskorišćenja generatora, ispravljača i motora za snagu od 400kW su 0,93, 0,98 i 0,92, tako da je ukupan stepen iskorišćenja sistema oko 0,84.



Slika 100. Pogon sa generatorom promenljivog izlaznog napona

### 01. Pogon sa generatorom promenljivog izlaznog napona i diodnim ispravljačem

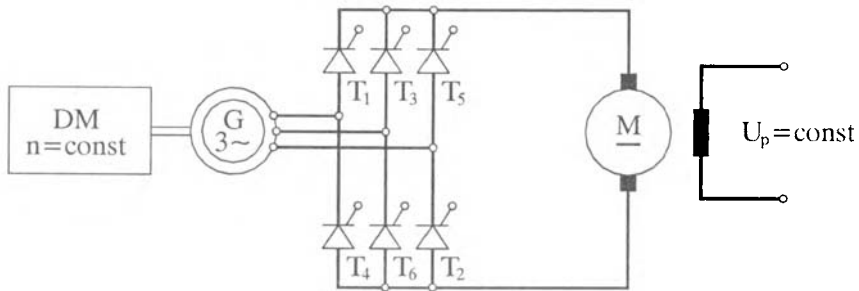
Pogon sa generatorom promenljivog izlaznog napona i diodnim ispravljačem sastoji se od parne mašine *PM* (slika 100) koja se obrće velikom, stalnom brzinom obrtanja i koja direktno pogoni generator naizmenične struje *G* i pobudni generator *B*. Glavni pogonski generator napaja trofazni diodni mostni ispravljač odakle se napaja pogonski jednosmerni elektromotor *M*. Regulisanje izlaznog napona generatora *G* a time i brzine obrtanja motora *M* kao i propelera radi se regulacijom pobudne struje generatora *G* preko otpornika *R*. Prekret rada propelera obavlja se promenom smeru struje kroz pobudni namotaj elektromotora *M*.

### 02. Pogon pomoću generatora stalnog izlaznog napona a sa tiristorskim ispravljačem

Pogon pomoću generatora stalnog izlaznog napona a sa tiristorskim ispravljačem sastoji se od pogonske grupe (slika 101), parne mašine ili dizel motora koji se obrće stalnom brzinom obrtanja. Na izlaznoj strani je direktno priključen naizmenični samopobudni generator koji ima konstantan izlazni napon i frekvenciju i koji napaja trofazni punoupravljivi tiristorski most. Pogonski motor je jednosmeran sa nezavisnom pobudom.



Regulacija brzine obrtanja pogonskog motora kao i propelera radi se promenom ugla paljenja tiristora praktično od nule do maksimalne vrednosti. Prekret rada propelera obavlja se jednostavno promenom smeru struje kroz pobudni, namotaj pogonskog motora.

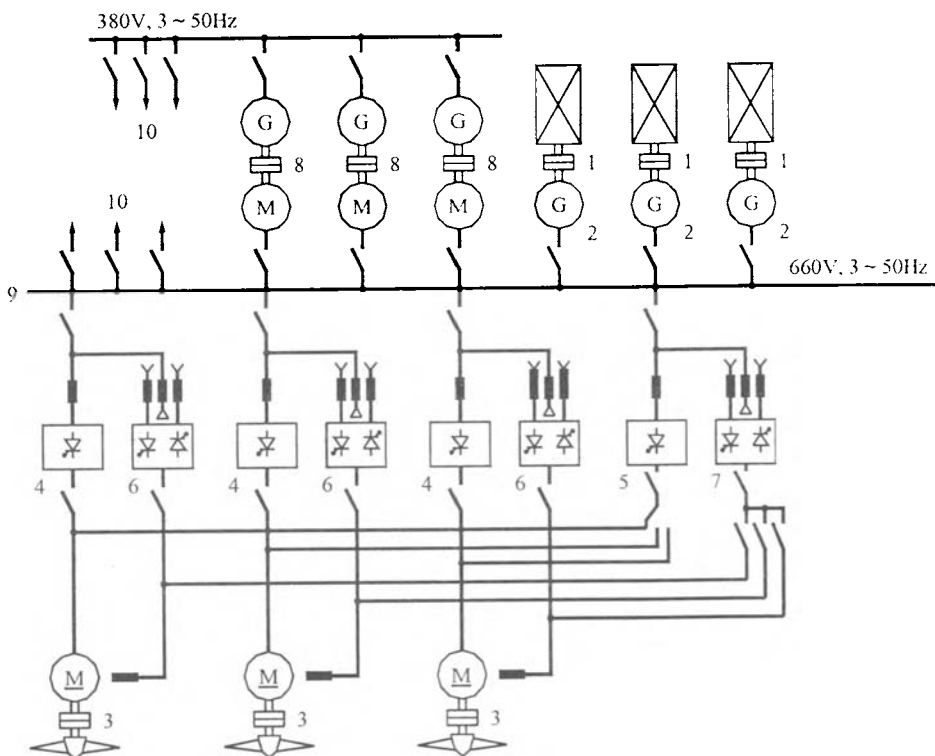


Slika 101. Pogon preko sinhronog generatora i sa tiristorskim ispravljačem

Zbog izuzetno kvalitetne kontinualne regulacije, ovaj sistem našao je mesto i u savremenim rešenjima za regulaciju brzine obrtanja propelera kao što je na primer: pogon ledolomaca, plovnih dizalica itd. Tri ledolomca su 1978. godine izgradena sa ovom vrstom električnog prenosa snage. Na tim brodovima dizelektrična propulzija sastoji se od tri naizmenična dizelektrična generatora ukupne snage 4.650kW pri  $1.000 \text{ min}^{-1}$  koju dostavljaju mreži napon 660V i 50Hz. Sa sabirnica, a preko tiristorskih punoupravljivih ispravljača napajaju se tri pogonska jednosmerna elektromotora koji direktno pogone propelerska vratila. Svaki jednosmeran motor razvija konstantnu snagu u opsegu brzine od 140 do  $360 \text{ min}^{-1}$ . Veći potrošači su kompresor za stvaranje vazdušnog jastuka ispod broda snage 650kW, vučno vitlo potezne sile 700kN i protivpožarna pumpa.

Radi pogonske sigurnosti, u brod su postavljani po jedan rezervni ispravljač za glavni pogon kao i jedan rezervni ispravljač za pobudno kolo. Ovi rezervni ispravljači su u stanju da zamene svaki koji je u kvaru. Pored toga, doskora su na trgovačkim brodovima široko bili prisutni rotacioni konvertori frekvencije, koji su frekvenciju 60Hz pretvarali u 50Hz i napajali brodsku električnu mrežu.

Na prvim platformama za naftu [21] su za namenu dinamičkog pozicioniranja bili postavljeni dizel motori sa sinhronim generatorima. Ovi sinhroni generatori napajali su sabirnice odakle su se napajali preko tiristorskih ispravljača pogonski elektromotora ukupne snage 5MW. Dva su služila za vožnju napred a dva nazad. U drugom trupu postojao je isti pogon.



Slika 102. Jednopolna šema tropropelnog pogona broda pomoću tiristorških ispravljača i jednosmernih motora

1. Pogonski dizel motori 2. Sinhroni generatori 3. Pogonski elektromotori  
 4. Pogonski ispravljači 5. Rezervni ispravljač 6. Pobudni obostrani ispravljači  
 7. Rezervni pobudni ispravljač 8. Rotacioni konvertori 9. Glavne sabirnice  
 10. Brodski potrošači

### 13.09. Pogon propelera trofaznom naizmjeničnom strujom

Pogon propelera trofaznom naizmjeničnom strujom upotrebljava se kod najvećih pogona. Pogonski elektromotori mogu biti asinhroni sa kratkospojenim rotorom, asinhroni sa namotanim rotorom ili sinhroni elektromotori.

Pogon propelera trofaznom naizmjeničnom strujom pojavio se početkom ovog veka uglavnom zbog sledećih razloga:

01. Usklađivanje brzine obrtanja između visokobrzinskih parnih mašina i potrebnih malih brzina obrtanja propelera nije se mogla izvesti sa postojećim reduktorima jer nisu bili dovoljno pouzdani ni kvalitetni za brodsku primenu.

02. Regulacija brzine obrtanja, makar i samo sa dva stepena redukcije brzine za manevar i linijsku vožnju bila je jako potrebna obzirom da parne turbine uglavnom imaju stalnu brzinu obrtanja
03. Prekret propelera je stvarao velike probleme sa postojećom tehnikom, dok se sa električnim prenosom lako mogao obaviti.

### 01. Trofazni sistem sa asinhronim kratkospojenim motorom

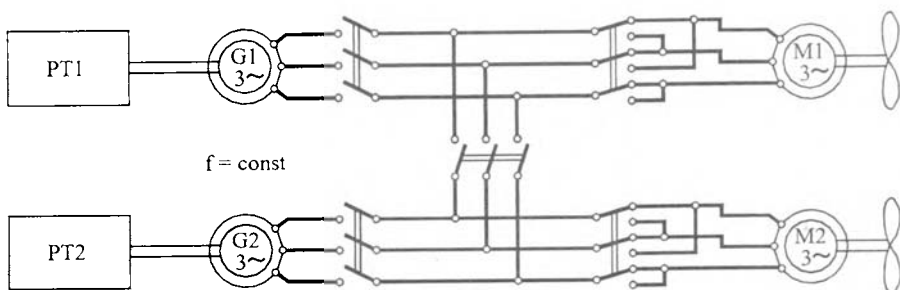
Trofazni sistem pogona propelera sa asinhronim kratkospojenim motorom pripada metodi sa fiksnim električnim prenosom.

Pogonska mašina, u početku parna turbina, pokretala je približno stalnom brzinom sinhroni generator. Asinhroni motor koji je pokretao pogonski propeler i koji je imao znatno veći broj pari polova od generatora da bi se ostvarila redukcija brzine obrtanja, puštao se u pogon direktnim uključanjem na mrežu. Asinhroni motori su imali dva namotaja sa različitim brojem pari polova, kako bi se mogle ostvariti dve brzine obrtanja. Namotaj sa manjim brojem pari polova koristio se za linijsku vožnju. Namotaj sa većim brojem pari polova i manjom brzinom obrtanja motora i propelera koristio se za manevarisanje. Prekret rada propelera dobijao se jednostavnim ukrštanjem dve faze.

Trofazni pogon sa asinhronim kratkospojenim motorom primenjen je još 1918 god. za pogon ratnog broda New Mexico [13]. Brod je imao 2 generatora i 4 pogonska motora ukupne snage 20MW pri  $2.100 \text{ min}^{-1}$ . Napon mreže iznosio je 2.300V a frekvencija 33,2Hz. Generator je imao svega jedan par polova a pogonski motori znatno više čime je vršena redukcija brzine obrtanja prenosa. Pored toga postojala su dva namotaja na statoru. Prvi sa 12 pari polova korišćen je za normalan pogon ili linijsku vožnju pri čemu se dobijala maksimalna brzina pogonskih motora 167min. Drugi namotaj sa 18 polova koristio se za manevar.

Nosač aviona Saratoga imao je ukupnu snagu 134MW dobijenih od 4 pogonska motora sa sinhronim generatorima. Postojalo je i 8 pogonskih motora koji su mogli imati 11 ili 22 para polova. Napon mreže bio je 5.000V a frekvencija 58,5Hz.

Na slici 103 prikazan je sistem dvopropelnog naizmjeničnog električnog prenosa snage sa dva asinhrona motora. U linijskoj vožnji svaki generator pokreće svoj motor i propeler. Potpuno nezavisno se može vršiti promena brzine obrtanja svakog motora. Promena smera obrtanja svakog propelera takode se može raditi potpuno nezavisno. U slučaju havarije jedne pogonske mašine ili generatora, ta grana se može isključiti iz pogona. Zatim se vrši paralelno spajanje oba pogonska elektromotora i brod može manjom brzinom da nastavi plovību.

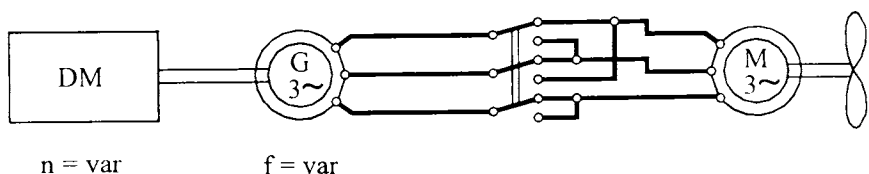


Slika 103. Dvopropelerni naizmienični električni prenos snage

Danas se ova vrsta električnog pogona propelera može sresti kod pogona pramčanog propelera koji se upućuje direktno kod manjih snaga ili preko prebacača zvezda trougao kod većih.

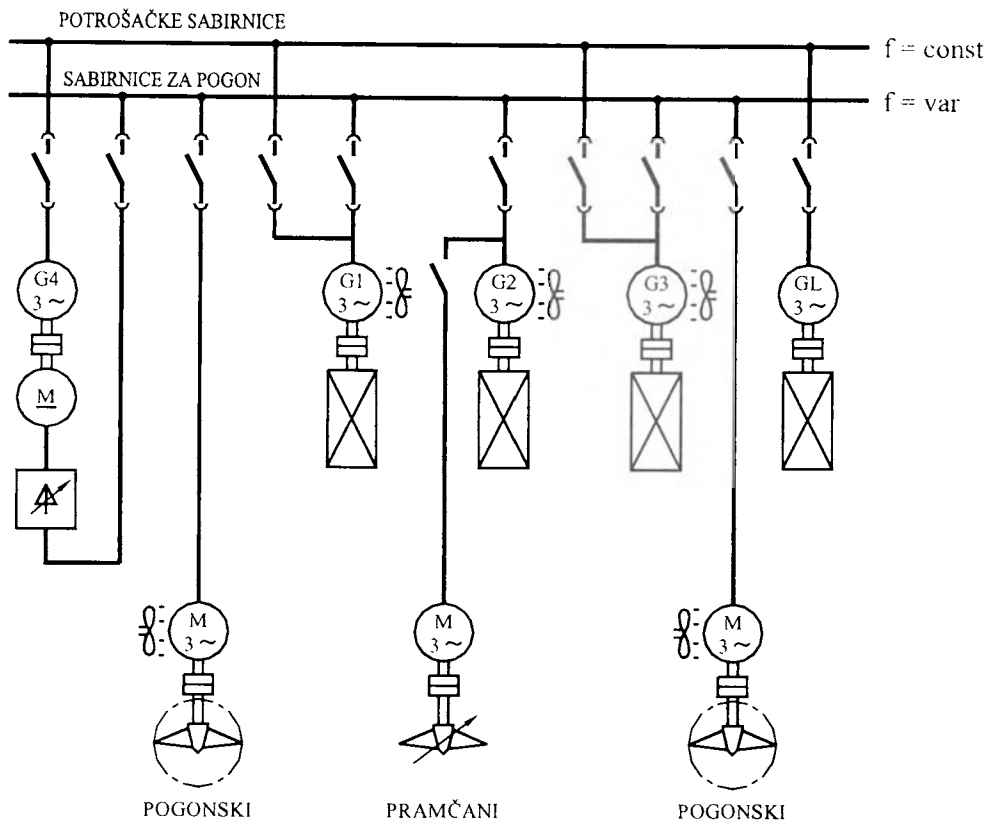
## 02. Trofazni pogon sa promenljivom frekvencijom

Metoda sa promenljivom frekvencijom koristi izvor električne energije koji je trofazni sinhroni generator kod koga se izlazni napon menja u skladu sa brzinom obrtanja dizela a time se i odnos  $U/f$  drži stalan u celom opsegu regulacije. Pošto pogonska mašina treba da ima promenljivu brzinu obrtanja, to se uglavnom koristi dizel motor. Pogonski elektromotor je trofazni asinhroni sa kratkospojenim rotorom. Prekret propelera vrši se jednostavnim ukrštanjem dve faze kod pogonskog elektromotora.



Slika 104. Naizmienični pogon sa asinhronim motorom i promenljivom frekvencijom

Prednosti ovog sistema su kompaktni i robusni generator i motor, malo električno održavanje i jednostavan električni sistem. Mane su regulacija od 30 - 100% nominalne brzine, poteškoće u zajedničkom napajanju brodskih potrošača i problemi u napajanju jednog motora sa više dizel generatora. Stepenn iskorišćenja sistema za snagu od 400kW iznosi oko 0,87 uzevši u obzir stepene iskorišćenja generatora i motora 0,93 i 0,94.

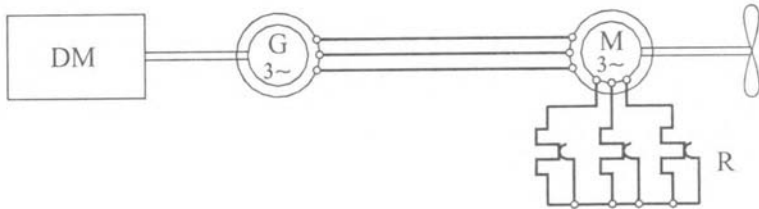


Slika 105. Jednopolna shema pogona broda sa dva krmena i jednim pramčanim propelerom, kod kojih se regulacija brzine obrtanja obavlja promenom frekvencije

Na slici 105 prikazano je praktično rešenje naizmeničnog pogona sa promenljivom frekvencijom. Radi napajanja potrošača stalnom frekvencijom postavljene su posebne sabirnice. Pogonski elektromotori napajaju se sa propulzivnih sabirnica u kojima je frekvencija promenljiva. Jedne i druge sabirnice povezane su osovinskim generatorima sa rotacionim (obrnim) konvertorima frekvencije. Ovi osovinski (vratilni) generatori sastoje se od jednosmernih motora koji se napajaju sa pogonskih sabirnica preko ispravljača. Regulacijom pobudne struje brzina obrtanja ovih jednosmernih motora, a time i trofaznih naizmeničnih generatora je stalna, što ima za posledicu održavanje stalne frekvencije u potrošačkim sabirnicama. Radi smanjenja rada osovinskog generatora u linijskoj plovidbi sa konstantnom brzinom obrtanja pogonskih dizel generatora vrši se direktno napajanje potrošačkih sabirnica sa jednog generatora, a osovinski generator se isključuje iz pogona. Interesantno je napomenuti da se uz svaku veliku električnu mašinu nalazi prigrađen ventilator radi prinudne cirkulacije vazduha i intenzivnijeg hlađenja.

### 03. Trofazni sistem sa asinhronim motorom i namotanim rotorom

Trofazni sistem sa asinhronim motorom i namotanim rotorom razvijen je za brodsku primenu kada se pojavila potreba da brodovi poseduju veliki opseg promene brzine propelera. Kadkad se javljala potreba kratkotrajnih ali malih brzina obrtanja propelera, a što postojeći sistemi sa električnim prenosom nisu mogli ekonomično da ostvare.

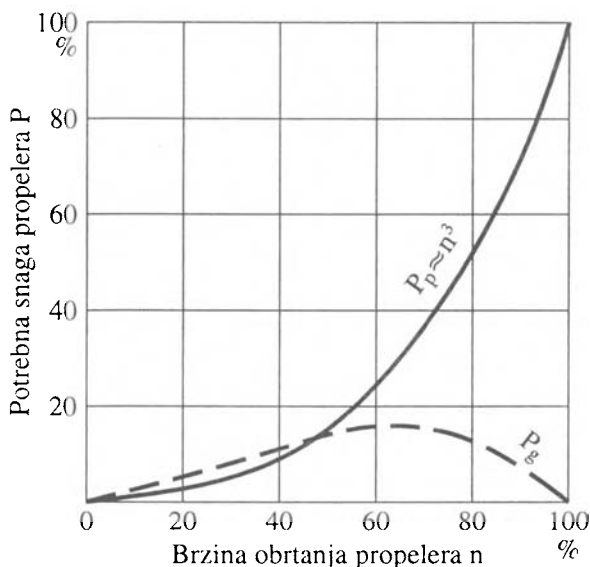


Slika 106. Pogon asinhronog motora sa namotanim rotorom

Asinhroni motor ima namotan rotor i spoljni promenljivi otpor kojim mu se reguliše brzina. Spoljni otpor sa promenljivim klizačem i tečni reostat [22] koriste se da pri smanjenoj brzini obrtanja propelera, uglavnom kod manevrisanja, daju visok pogonski moment. Krajevi otpornika vezani su preko dirki i kliznih prstenova za krajeve pojedinih faza rotora. Pre uključivanja motora na mrežu mora se paziti da su otpornici u položaju maksimalnog otpora. Kada se uključi glavni prekidač, elektromotor počinje da se obrće najmanjom brzinom obrtanja. Postepenim pomeranjem klizača skokovito se smanjuje vrednost otpora koji je uključen u kolo rotora. Na brodovima su se koristili otpornici koji su polako potapani u elektroprovodnu tečnost ili živu. Ovo je međutim na talasima stvaralo velike probleme.

Tipičan primer pogona ovom propulzijom dat je na brodu Tennessee [23], prvom brodu sa ovim pogonom napravljenim dvadesetih godina u Americi. Na ovom brodu, turbinska parna mašina pokreće generator pri maksimalno  $3.600 \text{ min}^{-1}$ . Generator ima jedan par polova i pri maksimalnom opterećenju daje trofazni napon  $2.300 \text{ V}$  frekvencije  $60 \text{ Hz}$ . Jedan pogonski motor snage  $3,6 \text{ MW}$  ima namotan rotor i može ostvariti maksimalnu brzinu pogonskog elektromotora od  $105 \text{ min}^{-1}$ .

Danas se ovaj pogon primenjuje kod manjih brodova (bagera). Metoda je dosta neekonomična (slika 106), posebno za velike opsege regulacije i dužu vožnju pri malim brzinama obrtanja.



Slika 107. Gubici snage kod pogona asinhronim motorima sa namotanim rotorom

Kod maksimalne brzine obrtanja propelera, najveći je stepen korisnosti jer ne postoje gubici u otporniku za regulaciju brzine. Smanjujući brzinu obrtanja, ovi gubici rastu, a snaga propelera opada sa trećim stepenom brzine obrtanja. Ispod 50% nominalne brzine obrtanja, gubici u otporniku su veći od korisne snage propelera. Zbog toga se ova metoda primenjuje kod brodova manjih snaga ili kod brodova koji često manevrišu ali ne plove dugo sa smanjenom snagom.

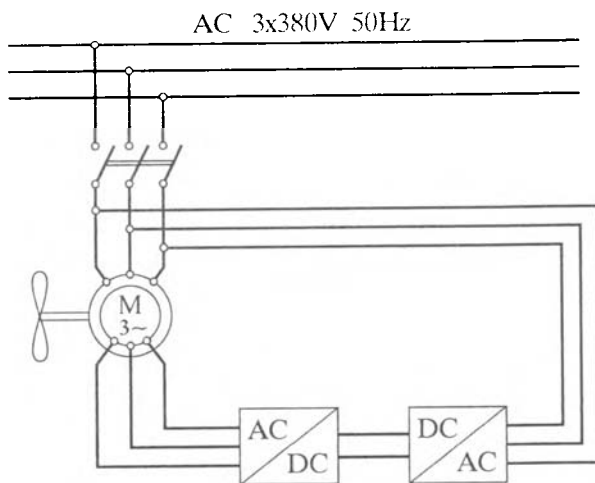
#### 04. Trofazni sistem sa podsinhronom kaskadom

Kod većih pogona, a iz čisto ekonomskih razloga, znači uštede energije, moguće je primeniti statički pretvarač za regulaciju brzine obrtanja asinhronih motora sa namotanim rotorom. Ovo rešenje se naziva podsinhrona tiristorska kaskada.

Pogonski dizel motor se okreće stalnom brzinom obrtanja uslovljavajući i da je frekvencija u električnoj mreži stalna. Na ovu mrežu priključuje se stator asinhronog motora. Rotor mehanički pokreće propeler, a njegovi namotaji napajaju ispravljač. Ovaj ispravljač pretvara trofazni nazimenični napon u jednosmerni i napaja inverter koji svojim sekundarom napaja stator motora. Na ovaj način energija klizanja asinhronih motora vrlo efikasno i racionalno se pretvara u električnu i vraća u brodsku električnu mrežu.

Pogonske električne mašine su proste i robusne ali je održavanje elektromotora nešto veće od asinhronog sa kratkospojenim rotorom. Regulacija je dosta efikasna,

posebno ako je predviđen duži pogon sa smanjenom brzinom obrtanja propelera, ali je rešenje opterećeno problemima koje unosi tiristorska regulacija.



Slika 108. Pogon propelera sa tiristorskom podsinhronom kaskadom

Za pogon snage 400kW, može se uzeti da su stepeni iskorišćenja generatora i motora i podsinhrona kaskade 0,93, 0,94 i 0,92 tako da je ukupan stepen iskorišćenja oko 0,805.

#### 05. Trofazni sistem sa sinhronim motorima

Trofazni sistemi sa sinhronim motorima imaju problema kod pušanja u rad kao i kod održavanja, ali imaju nešto veći vazdušni zazor između statora i rotora od asinhronih motora, a što je izuzetno važno za primenu na brodovima. Pored toga, brzina okretanja propelera je ista kao i kod pogonskih generatora tako da su vibracije na samom brodu nešto manje nego kod asinhronih pogonskih elektromotora.

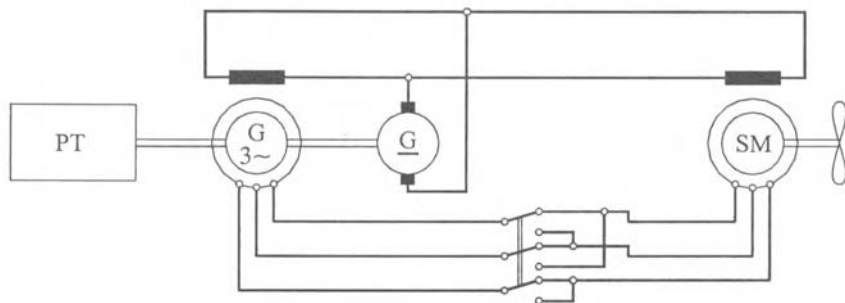
Najveći i najluksuzniji putnički kao i neki trgovački brodovi napravljeni dvadesetih i tridesetih godina ovog veka opremljeni turbo-električnim pogonom imali su sinhronne motore. Pošto je problem pušanja u pogon sinhronih motora dosta velik, ovi motori su se samo zaletali kao asinhroni motori a potom su radili kao sinhroni. Najveća prednost kod ovih motora je postojanje većeg vazdušnog zazora između rotora i statora nego kod asinhronih, tako da su lakše podnosili brodske vibracije.

Prednosti sinhronih motora nad asinhronim sa namotanim rotorom su:

1. veći vazdušni procep
2. bolji stepen iskorišćenja



3. faktor snage  $\cos \varphi = 1,0$
4. manja masa i cena motora
5. manje vibracije na brodu
6. prostija regulacija brzine nego sa namotanim rotorom



Slika 109. Pogon propelera sinhronim motorom

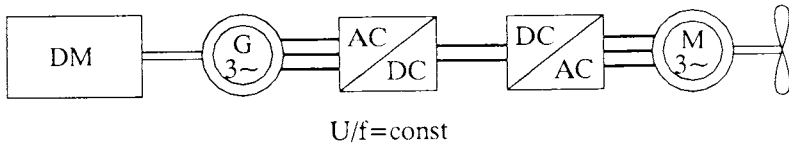
Tipičan primer pogona ovom propulzijom dat je na primeru putničkog broda Normandie [13]. Četiri generatora imaju po dva para polova i pri maksimalnoj brzini obrtanja  $2.250 \text{ min}^{-1}$  i pri maksimalnom opterećenju daju trofazni napon  $5.500 \text{ V}$  frekvencije  $75 \text{ Hz}$ . Četiri pogonska sinhrona motora ukupne snage  $96 \text{ MW}$  imaju po 20 pari polova pri čemu se može dobiti maksimalna brzina pogonskih elektromotora od  $225 \text{ min}^{-1}$ .

Tokom 1937. i 1938. godine postojali su brojni brodski pogoni na Nemačkim brodovima sa dizel-električnim prenosom u kome se koristi naizmenični sistem. U odnosu na jednosmerne sisteme, gube se prednosti električne regulacije tako da se može reći da je ovo električna redukcija umesto mehaničke redukcije. U odnosu na jednosmerne sisteme, stepen iskorišćenja je nešto viši i dostiže  $90\%$  a i pogon je za oko  $20\%$  jeftiniji od jednosmernog.

Drugi primer pogona je na putničkom brodu Patria [14]. Pet pogonskih mašina pokreću naizmenične generatore svaki snage po  $2.140 \text{ kW}$  pri  $250 \text{ min}^{-1}$  daju ukupnu pogonsku snagu  $11 \text{ MW}$  pri naponu  $3.500 \text{ V}$ . Dva pogonska motora, svaki snage  $5,5 \text{ MW}$  pokreću dva propelera sa oko  $110 \text{ min}^{-1}$ . Šesta pogonska mašina snage  $1.600 \text{ kW}$  pri  $250 \text{ min}^{-1}$  pokreće generator koji napaja brodsku električnu mrežu.

## 06. Trofazni sistem sa inverterima

Dalji razvoj naizmjeničnog sistema električnog prenosa snage moguć je sa inverterima. Invertor je vrsta statičkog pretvarača koji jednosmernu energiju pretvara u naizmjeničnu i to stalne ili promenljive frekvencije. Pogonski dizel motor radi u generatorskom režimu sa stalnom brzinom obrtanja što uslovljava konstantan izlazni napon i frekvenciju. Ispravljač je trofazni diodni, a invertor je sa promenljivom frekvencijom koji u stalnom opsegu drži stalan odnos  $U/f$ . Pogonski elektromotor može biti sinhroni motor sa ili bez permanentnih magneta, ali može biti i asinhroni motor sa kratkospojenim rotorom.



Slika 110. Pogon sa invertorom i stalnom ulaznom frekvencijom

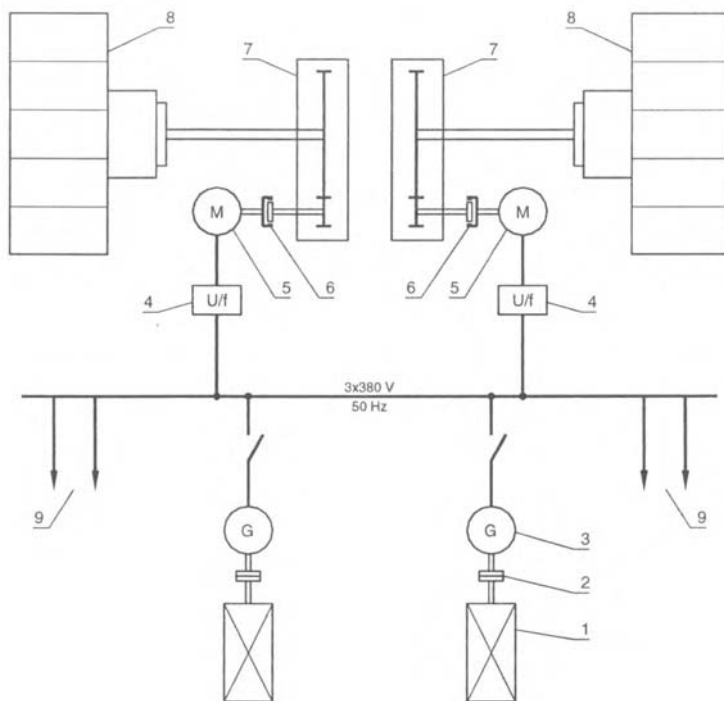
Prednosti ove vrste pogona su robustni generator i motor, jednostavno održavanje, poboljšani režim rada dizel motora, i napajanje brodske električne mreže sa istih sabirnica kao i pogonskih elektromotora. Opseg regulacije brzine dosta je širok. Mane su: složena oprema, izobličenje napona napajanja, obaveza filtriranja napajanja osetljivih potrošača.

Za pogon snagom 400kW može se približno uzeti da su stepeni korisnosti generatora, ispravljača, invertora i elektromotora 0,93, 0,98, 0,95 i 0,94 tako da je ukupan stepen iskorišćenja oko 0,81.

U Beogradu je u toku rekonstrukcija broda točkaša "Krajina" [24]. Na sadašnjem stanju tehnike, kao optimalno rešenje pogona je izabrano i usvojeno električno rešenje pogona broda točkaša sa naizmjeničnim pogonskim motorima i  $U/f$  pretvaračima. Rešenje pogonskog kompleksa [25] prikazano je na slici 106. Sastoji se od dva nezavisna, identična pogonska agregata. Dizel motori imaju snagu po 230kW i konstantnu brzinu obrtanja  $1.500 \text{ min}^{-1}$  pokreću generatore snage po 250kVA. Potrošnja brodske mreže iznosi 100kW, a pogonske elektromotori imaju snagu 120kW svaki.

Pogonski dizel motori (1), preko elastičnih spojnica (2), pokreću generatore naizmjenične struje (3). Ovi generatori u paralelnom radu napajaju sabirnice preko kojih se napaja brodska mreža (9) i oba pogonska uređaja. Regulacija brzine obrtanja pogonskih točkova (8) obavlja se preko uređaja za naponsko frekventnu regulaciju (4) i asinhronih motora (5) odgovarajućih snaga. Pogonski motori (5)

promenljivom brzinom u oba smera obrtanja pogone reduktore (7) radi uskladjivanja brzine obrtanja sa pogonskim točkovima (8). Kao sigurnost radi proklizavanja, postavljena je mehanička spojnica (6). Na taj način se štiti pogonski kompleks od eventualnog upada balvana u pogonske točkove sa lopaticama.



Slika 111. Pogonski kompleks broda kod koga se regulacija brzine obrtanja pogonskih točkova obavlja promenom odnosa U/f u oba smera obrtanja

#### 07. Trofazni sistem sa ciklokonvertorima

Razvoj tiristora i mikroprocesorske tehnologije uslovio je razvoj ciklokonvertora a što je dalje uslovalo i kvalitetnu metodu za korišćenje pogona broda naizmeničnim mašinama sa promenljivom brzinom obrtanja propelera. Postoji nekoliko brodova [26-28] opremljenih ovom vrstom pogona.

Mada je moguća regulacija brzine obrtanja pogonskog elektromotora kao i propelera sa rednom vezom čopera i trofaznog invertora, postoje određene prednosti ciklokonvertora. Poređenje je moguće izvršiti prema nekoliko kriterijuma.

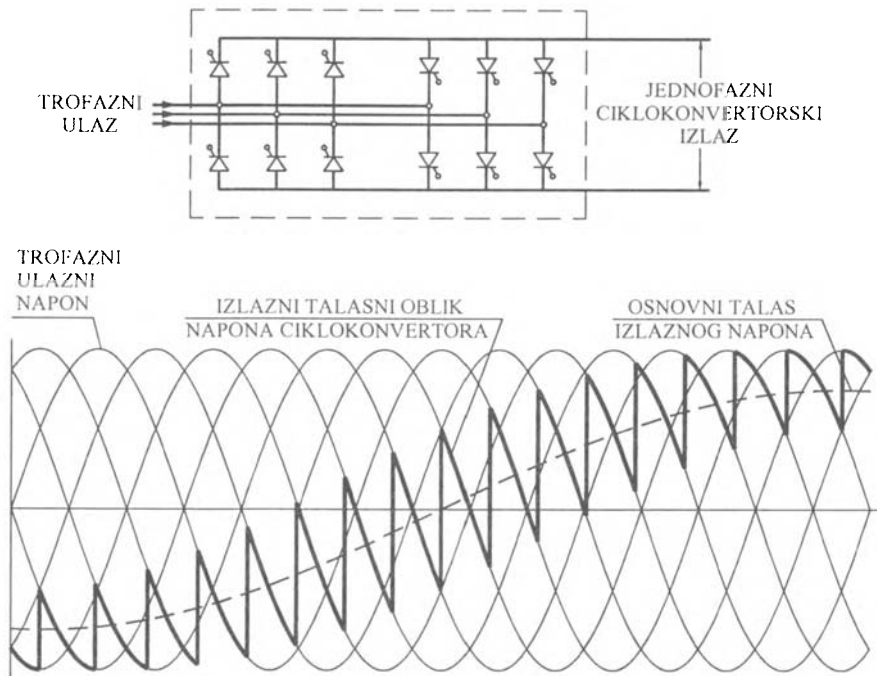
- U ciklokonvertoru se naizmjenični napon i učestanost pretvaraju direktno u naizmjenični napon druge amplitude i frekvencije. To znači da postoji samo jedna konverzija energije što daje i manje gubitke u kolu.
- Dodatni dobitak je u vrsti komutacije. Kod ciklokonvertora je zastupljena prirodna komutacija a kod sistema čoper-invertor prinudna. Kola sa prirodnom komutacijom su kompaktnija i sa manje gubitaka a to znači i efikasnija.
- U ciklokonvertoru je moguć prenos energije u oba smjera a to znači da je moguć i inverzan rad motora pod punim opterećenjem i u istom opsegu brzine.
- Ciklokonvertor daje jako kvalitetan izlazni sinusni talasni oblik napona, jer je talas niže učestanosti dobijen iz većeg broja segmenata talasnog oblika napajanja.
- Kod ciklokonvertora sa prirodnom komutacijom, izlazna učestanost može iznositi maksimalno  $1/3$  ulazne a tek za mnogoimpulsne do  $1/2$  ulazne učestanosti. Ovo se pokazuje kao izuzetno pogodno za primenu na brodu za pogon propelera da bi se izvršila potrebna redukcija brzine između motora i pogonskih elektromotora za pogon propelera bez reduktora.
- Međutim, ciklokonvertor zahteva veliki broj tiristora i njegovo upravljačko kolo je znatno složenije nego kod ostalih kola. Usled toga je ovo kolo skuplje za male snage, tako da se može investiciono prihvatiti tek za snage iznad oko 100kW.
- Ciklokonvertor sa linijskom, prirodnom komutacijom ima nizak ulazni faktor snage, posebno kod redukovanih izlaznih napona.

Na osnovu prethodnog se može zaključiti da ciklokonvertori mogu biti jako korisni za primenu na brodu za glavni pogon ili za pogone sa velikim snagama i malim brzinama obrtanja. Pored toga obezbeđuju izuzetna svojstva broda sa jednostavnim nezavisnim reverzibilnim pogonima.

Ciklokonvertor koristi tiristore koji se na ulazu priključuju na izvor stalne frekvencije da bi napravili naizmjenični napon promenljive niže frekvencije. Na slici 111 prikazan je princip rada i talasni izlazni oblik napona jedne faze, trofaznog ciklokonvertora. Za vreme rada, period provođenja samog tiristora se tako kontroliše da je izlazni talasni oblik napona aproksimacija sinusoide. Na slici je prikazan i osnovni harmonik izlaznog napona.

Ciklokonvertor sa 12 tiristora ima smanjenje amplitude harmonika u izlaznom talasnom obliku, a pored toga, može se i ulazni faktor snage značajno menjati. Mogućnost razvoja velike struje pri nultoj frekvenciji kao i momenta, daju karakteristike asinhronom motoru kao i jednosmernom, obezbeđujući veliki moment kao i brz preket propelera. Ovaj pogon izuzetno je pogodan za ledolomce [29-30]. Tri pogonska dizel motora pokreću sinhronu generatore svaki snage 6.250kVA pri trofaznom naponu 4.160V i frekvenciji 60Hz. Transformator u sprezi trougao-slomljena zvezda između glavnih sabirnica i ulaza ciklokonvertora

koristi se da bi snizio napon na 1.200V kao i da bi se smanjili harmonici. Trofazni ciklokonvertori su napravljeni tako da napajaju dva sinhrona motora svaki snage oko 5.900kW strujama do 1.875A. Frekvencija se menja u opsegu 0-18Hz čime se obezbeduje brzina obrtanja propelera do  $180 \text{ min}^{-1}$ . Postoji i pobuda pogonskih motora bez četkica preko transformatora snage  $2 \times 400 \text{ kVA}$ .



Slika 112. Generisanje monofaznog osnovnog talasa izlaznog napona niže frekvencije iz trofaznog ciklokonvertora

Posebno radi primene za pogon najvećih morskih brodova, razvijeni su sinhroni motori velikih snaga sa permanentnim magnetima koji se mogu postaviti u vodu. Na taj način, ovi sporookretni sinhroni motori direktno pokreću propelere čime se dobijaju izuzetno dobre karakteristike pogona.

### 13.10. Savremeni pogoni brodova

Konvencionalne pogonske jedinice brodova, sastoje se od dizel motora, vratilnog voda i propelera i imaju mnoge nedostatke u slučajevima kada je potrebno da se zadovolje visoki kriterijumi brodova obzirom na fleksibilnost, manevrabilnost i mogućnosti smeštaja pogonskih agregata na brodu. Alternativa se nudi preko

pogona koje nude upravljivost u poprečnom pravcu broda (krmeni ili pramčani propeleri na primer) koji su potrebni za neke primene obzirom na njihove superiorne manevarske sposobnosti. Sa mehaničkim prenosom snage od pogonskog motora preko reduktora prekretnika do propelera (Z propeleri) postoje određene granice za komponente snage iznad nekoliko MW. Zatim, postoje i dosta veliki mehanički gubici u prenosu snage na taj način. Ovi problemi mogu se prevazići smeštajući pogodno napravljene električne pogonske motore na krmene delove trupa ili ispod dna broda, takozvani "pod" pogoni. U ovom slučaju potrebno je generisanu električnu energiju stvorenu na brodu prebaciti električnim kablovima do motora gde se direktno pretvara u mehanički obrtnu snagu, a zatim i u pogonsku snagu propelera preko kratke osovine sa kojom je motor spojen.

Ove kompaktne pogonske jedinice su dostupne na tržištu već nekoliko godina, i poznate su kao "Podid pogoni" ili "POD" skraćeno [31]. Dalje prednosti ovih pogona su višestruke, preko fleksibilnosti dizel električnog koncepta i mogućnosti kontinualne regulacije brzine obrtanja i snage propelera, do lakog prekreta propelera.

Još bolje hidrodinamičke prednosti se dobijaju smeštanjem propelera pod uglom od 3 stepena. Kada se POD pogoni porede sa konvencionalnim dvovratilnim pogonom postoji još više hidrodinamičkih prednosti, kao što su eliminacija kormila i držača propelera. Danas postoje četiri POD proizvođača [32] na tržištu i poznati su pod sledećim trgovačkim imenima

**Azipod (Azimutski podid pogon).** Kvaerner Masa Yards i ABB Industrie razvili su Azipod koji se prodaje od 1990. godine. U međuvremenu, proširen je opseg sa performansama do 25MW. Prva instalacija bila je postavljena na brodu snabdevaču "Seili" snage 1,5MW. Konverzija je izvršena u 1991. godini. Danas, paleta uključuje performanse od 560kW do 19,5MW i razne tipove brodova, od brodova unutrašnje plovidbe preko ledolomaca do luksuznih putničkih brodova za krstarenje. Novi MB "Europa" biće opremljen sa dva Azipoda od kojih će svaki moći da razvija po 6,65MW.

**Mermaid.** KaMeWa (sada Rolls Royce) i Alstom su 1994. godine predstavili njihovu POD verziju sa snagama u opsegu 5 do 25MW. Verzije od 8 do 12MW bile su postavljene u različite putničke brodove, kao i u brod sa tri propelera snage od 7MW za dizanje platforme. Najveće instalisane snage sa 19,5MW svaka je rezervisna za linijske putničke brodove klase Millenium gradjene za Chantiers d, Atlantic.

**SSP (Schottel-Siemens Propulsor).** Kao što ime kazuje, kompanije Schottel i Siemens su partneri u konzorcijumu SSP koja proizvodi propulzore. Rad na razvoju počeo je 1996. godine. Razvijen je širok opseg konvencionalnih azimut pogona sa snagama od oko 5MW do današnjih 30MW za POD. SSP je bio prvo realizovana sa snagom od 5 MW za hemijski tanker i kao dodatni pogon za linijski

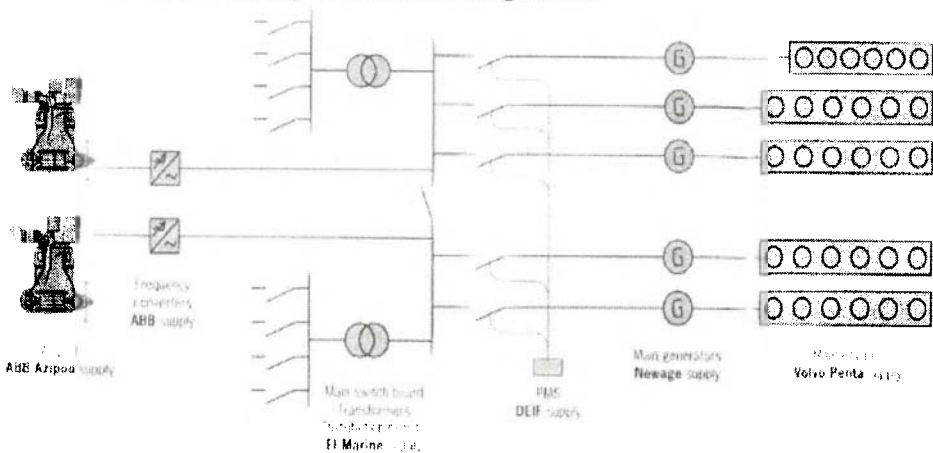
šetni brod svaki snage po 10MW. Treća primena bila je postavljanje dve jedinice snage po 10 MW na svaki od dva Ro-Ro Pax trajekta.

**Dolphin.** Iza ovog trgovačkog imena su kompanije Lips i STN Atlas, koje su predstavile njihov koncept 1998. godine na SMM-u, ali još nije bilo konkretnih realizacija. Proizvodni opseg je od 3MW pa do 19MW izlazne snage.

### 13.11. Savremeni koncept pogona brodova

Glavne komponente POD upravljačkog sistema su:

- Ciklokonvertorska jedinica
- Regulacija brzine obrtanja i snage
- Regulacija momenta
- Sinhroni motor sa permanentnim magnetima



Slika 113. Pogon broda sa četiri glavna i jednim pomoćnim dizel agregatom i sa dva azipoda

Zajedničke brodske sabirnice sa kojih se napaja i pogon broda i opštebrodska potrošnja napona 6,6kV pri 50Hz napaja pet dizel generatora sledećih snaga: 2 x 9,3MVA, 2 x 8,15MVA i 1 x 3,68 MVA. Tipično za ovaj koncept napajanja [33] je da dizel agregati napajaju sva srednje naponska razvodna polja. Opšte napajanje broda naponom 400V dobija se preko dva transformatora svaki snage po 2,4MVA. Niskonaponski rasklop je takodje podeljen na dva dela. Dodatno je postavljeno stabilizovano brodsko napajanje bez viših harmonika za osetljive potrošače. Ovo je obezbedjeno iz primarnog kola preko dva obrtna pretvarača sa 1000MVA svaki.

Pored velikih potrošača kao što su bočni propeleri i jedinica za napajanje hladnom vodom, sredjenaponska mreža napaja potrebnom snagom pogon broda. Dvanaest transformatora, svaki snage 3,250kVA snižava napon potreban za pogon broda.

Svaki transformator je snabdeven sistemom za zaštitu od prenapona zbog njihovih velikih udarnih struja pri uključenju (udarni efekat). Ovi transformatori direktno napajaju srednjim naponom pretvarače, a koji napajaju SSP pogonske motore sa trofaznim naponom promenljive frekvencija i amplitude. Električna energija se dostavlja pogonskim motorima preko kliznih prstenova i konusnih držača.

Električni motori postavljeni ispod dna krmenih delova broda su sinhronne mašine sa permanentnim magnetskim poljem. Permanentni magneti su postavljeni na rotoru mašine, a na statoru se nalaze dva namotaja. Za maksimalnu brzinu propelera od  $176 \text{ min}^{-1}$ , napon na motoru je 1.570V. Motori se hlade pomoću vode koja prolazi oko POD-a. Toplota koja se razvija na krajevima namotaja u medjugvoždju disipira se preko toplotno provodnog zatvorenog POD kućišta. U poredjenju sa konvencionalnim sinhronim mašinama, ovi motori poseduju bolji stepen iskorišćenja i bolji odnos snage prema zapremini motora. Razvijajući eksterni sistem za hladjenje, očekuje se da će osetljivost na greške, kvarove i održavanje za vreme rada biti smanjeni.

Adekvatna zaštita električnog motora je uglavnom obezbedjena preko samog ciklokonvertora. Preko regulatora i zaštitnog koncepta ugradjenog u pretvarač, rad mašine se nadgleda unutar normalnih radnih parametara i isključenja napajanja u slučaju kvara. Daljinski se električni signali kao što su napon, struja i položaj rotora, brojni parametri unutar mašine kao što su temperature namotaja i ležajeva kao i POD specifični parametri kao što su nivo ulja, vibracije i indikatori curenja šalju preko dva redna interfejsa koristeći bezkontaktni prenos informacija (Gausov pretvarač) i prosledjuju sistemu za nadgledanje motora.

Za radni napon do 1350V opseg promene brzine obrtanja motora je od 0 do  $176 \text{ min}^{-1}$ .

Regulacija brzine obrtanja i apsorbirane snage su rezervni za svaki SSP, i obezbedjeni su pomoću odvojenih napojnih linija. U slučaju greške komponente, drugi podsistemi mogu preuzeti ovu funkciju preko upravljačke table. Dodatno, upravljanje SSP uključuje upravljanje momenta motora. Da bi se postigla kontinualna kontrola momenta motora, kontrolni sistem generiše iz trofaznog sistema konstantnog napona i frekvencije trofazni sistem promenljive frekvencije i amplitude. Ovo se omogućuje kontrolisanim okidanjem tiristora u kolu ciklokonvertora da bi se dobile određene karakteristike momenta mašine, pozicija rotora, struja i napon motora. Pozicija rotora se registruje pomoću dve jedinice senzora položaja rotora.

Obzirom na koncept pogona broda, a u skladu sa propisima klasifikacionih društava, uvek je obezbedjen rezervni pogon da bi brod mogao da zadrži plovljivost i upravljivost plovidbom.



Mada se u svetu uglavnom razmišlja o električnim pogonima najvećih brodova u Evropi je razvijen električni pogon manjih snaga, do 600kW čime se zadovoljavaju potebe rečnih brodova, a napravljen je i zajednički projekat rečnog broda [34] koji bi po performansama bio bolji od postojećih.

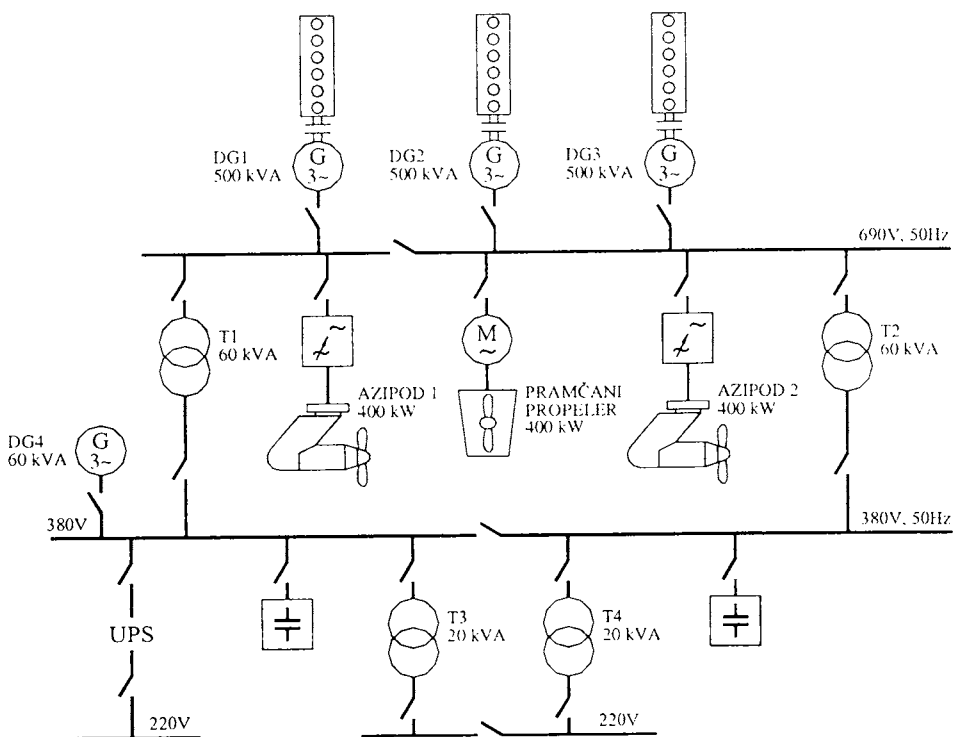
### 13.12. Prednosti dizel električnih pogona

Dizel električni pogoni i pogonska rešenja imaju istaknute određene prednosti koje se razlikuju od broda do broda [35-36]. Sigurnosni aspekti dizel električnog pogona su zajednički obzirom na velike rezervne sisteme na različite načine. Nekoliko pogonskih jedinica sa dizel agregatima omogućuju propulzivne osobine i kormilarenje čak i kad se više dizel agregata izbací iz pogona. Dodatno se jedinice mogu postaviti na različita mesta u brodu, tako da postoji bezbednost i mogućnost plovídbe u slučaju požara i uništenja ili potapanja jednog mašinskog prostora.

Osnovne prednosti dizel električnih pogona su:

- Fleksibilnost – instalisana snaga generatora može se koristiti za različite funkcije broda u različim funkcijama
- Mogućnost podešavanja momenta propelera – pun momenat pri bilo kojoj brzini propelera
- Mogućnost korišćenja optimalnih osobina pogonskih dizel motora pri ustaljenim opterećenjima bez naglih prelaznih procesa čime se dobija optimalna potrošnja dizel goriva a zatim smanjenje emisije štetnih sastojaka i manje zagađenje okoline.
- Više jednakih pogonskih mašina - prostija logika rezervnih mašina, održavanje, obuka posade itd.
- Fleksibilnost u lokaciji glavnih pogonskih mašina da bi se optimizirali teretni prostor i smeštaj tereta
- Rezervni pogoni , oba u slučaju sigurnosti i sloboda održavanja putanje.
- Savremeni motori i monitoring sistemi za nadgledanje rada dozvoljavaju manje osposobljenu posadu
- Dug rad bez održavanja. Nisu potrebni posebni dizel agregati za napajanje brodske električne mreže

Mada električna transmisija nikada nije u potpunosti zapostavljena, zadnjih desetak godina došlo je ponovo do primene ove vrste pogona zahvaljujući u prvom redu nekim izuzetnim karakteristikama koje nudi ovaj pogon a koje su dobijene nekim savremenim tehničkim rešenjima. U prvom redu, to je veliki napredak u konstruisanju pogonskih motora velikih snaga i razvoja energetske elektronike kao izuzetno kvalitetnih rešenja za regulaciju brzine obrtanja i snage pogonskih elektromotora. Na ovoj vrsti propulzije radi nekoliko velikih svetskih firmi.



Slika 114. Jednopolna šema električnog pogona broda ukupnom snagom 1.200kW

U odnosu na ostale prenose snage od pogonske mašine do propelera, električni pogon ima nekoliko prednosti:

Kontinualna regulacija brzine obrtanja naizmeničnih elektromotora. Poznato je da se brzina obrtanja sinhronih mašina uopšte ne menja sa promenom opterećenja, a da se brzina obrtanja asinhronog motora pri opterećenju od praznog hoda do punog opterećenja menja za svega nekoliko procenata. Savremeno i izuzetno kvalitetno rešenje promenom učestanosti primarne mreže (ciklokonvertorom ili inverterom) omogućuje kontinualnu regulaciju brzine obrtanja ovih mašina u punom opsegu. Znači, u celom opsegu promene brzine, da magnetsko kolo ne bi bilo prezasićeno, potrebno je da se odnos napona i frekvencije održava stalan. Drugi zakon je da magnetski fluks bude nominalan.

Odlične manevarske osobine broda. Nezavisnom kontinualnom regulacijom brzina obrtanja svakog propelera, moguće je dobiti situaciju da se jedan obrće u jednom a

drugi u drugom smeru, čime se dobija mogućnost vanrednih manevarskih osobina broda.

Brz prekret propelera i plovidba unazad istom snagom kao za plovidbu napred. Električni pogon omogućava brz prekret jednog ili oba propelera čime se dobija kratak zaustavni put ili čak i dobar manevar broda. Pored toga, električna propulzija omogućava i plovidbu unazad istom snagom kao i za plovidbu unapred.

Eliminacija uređaja za reverziranje. Reverziranje radom propelera dobija se beskontaktno i moguće ga je napraviti mnogo puta na dan bez nekih habanja i oštećenja.

Mogućnost rada sa više pogonskih mašina u paralelnom radu. Ukoliko postoji više pogonkih uređaja (dizel električnih agregata), moguće je u zavisnosti od uslova plovidbe i željenih režima rada stavljati u pogon jedan ili više agregata i time dobijati određenu uštedu u gorivu i radu pogonskih agregata. Pored toga, postoji mogućnost havarijskog rada u smanjenom obimu kada dodje do kvara na jednom agregatu.

Mogućnost isključenja nekih pogonskih mašina pri malim brzinama kretanja. Ako je potrebna stalna mala brzina plovidbe, moguće je samo jedan pogonski agregat uputiti u rad.

Mogućnost podešavanja optimalne brzine obrtanja propelera. Električna propulzija dozvoljava da se brzina obrtanja pogonskih propelera u zavisnosti od uslova plovidbe ili tereta na brodu podesi i održava na optimalnoj vrednosti. To znači da je kriva opterećenja pogonskih dizel motora do određene brzine u skladu sa propelerskom krivom, a posle nominalne tačke se regulacija brzine obrtanja propelera vrši sa stalnom snagom.

Primena brzohodnih pogonskih mašina sa visokim stepenom iskorišćenja. Kako su električni generatori brzohodne (uglavnom  $1500 \text{ min}^{-1}$  za naše područje ili  $1.800 \text{ min}^{-1}$  za američko ) da bi im i cena bila niža, to je omogućeno postavljanje i takvih dizel motora koji su manjih masa i time jeftiniji. Pored toga, ovakve dizel agregate moguće je i agregatno menjati.

Smeštaj pogonskih mašina na najpogodnijem mestu u brodu. Pogonske agregate moguće je postaviti na najpogodnijem mestu na brodu, pri čemu to nije uslovljeno postavljanjem u simetrali sa osovinskim vodom

Generatorski rad pogonske mašine. Pogonski dizel motori rade u generatorskom radu čime se dobijaju povoljnije eksploatacione karakteristike i duži vek trajanja.

Napajanje brodske mreže sa pogonskih generatora. Interesantno je napomenuti da se sa brodskih sabirnicva može napajati i brodska mreža čime se dobija sveobuhvatan sistem električne propulzije. Pored toga, eliminiše se i pomoćni dizel agregat.

GE Marine engines [37] ispituju dve gasne turbine LM2500+, svaka snage 40,500 HP, iz njihovog proizvodnog programa odabrane da se iskoriste za pogon prekookeanskog linijskog putničkog broda queen Mary 2. Brod će koristiti dva gasno turbinska generatorska agregata i četiri dizel mašine. Očekuje se da brod dug 1132 stope a 135 širok dostiže brzinu od 30 čvorova. Očekuje se da do sada najskuplji putnički brod sa cenom od 780Mil\$ primi 2.620 gostiju i ima 1254 člana posade.

150.000 tona težak brod Queen Mary 2 biće prvi brod [38] pokretan sa 4 podid propelera postavljenih ispod trupa. Dva prednja biće fiksna a dva zadnja biće kormilareća. Uradjeni testovi na modelu kormilarećeg sistema pokazali su da će brod biti sposoban da izvrši manevar u skladu sa standardima za slične brodove koristeći različite pogone i kormilarske sisteme.

### 13.13. Savremeni pogoni ratih brodova

U USA se prošle decenije intenzivno radilo na razvoju sinhronog motora sa permanentnim magnetima [39] snage 10MW koji bi se koristio za pogon propelera. Na ovaj način rešilo bi se nekoliko problema: puštanje u pogon bilo bi jednostavno, regulacije brzine mogla bi se obaviti u širokim granicama, preket propelera a time i manevaribilnost broda bili bi jako kvalitetni a stepen korisnosti propulzora bio bi dosta visok. Pored toga, elektromotori naizmjenične struje znatno su lakši od odgovarajućih za jednosmernu struju.

Mornarička US 21.va klasa razarača (DD21) će imati 32 broda i biće prva u porodici bojnih brodova 21 veka. Ovi vojni brodovi sledeće generacije biće razarači višestrukih namena, podešenih za napade na objekte koji se nalaze na kopnu. Razarači za kopnene napade biće prva klasa brodova projektovana i sagrađena za vreme 21 veka koja će se pokretati u skladu sa integrisanom arhitekturom napajanja. Električni pogon će smanjiti cenu [40], buku i održavanje. Interesantno je da će električni pogon, kao i druge promene u propulziji, otvoriti izvanredne mogućnosti za novo projektovanje arhitekture broda, smanjenje korišćenja ljudske snage, povećanje veka trajanja broda, smanjenje oštećenja i povećanje snage za primene u novim vrstama oružja.

Glavne prednosti za električne pogone su podeljene na dve oblasti, sposobnost za ratna dejstva i komfor posade. Tehnologija rada sa električnim pogonom predstavlja veliki potencijal za poboljšanje života ukraćanih mornara jer će ona osloboditi

velike prostore u unutrašnjosti broda čime će se dobiti mogućnosti za značajno poboljšati komfora i smeštaja posade.

Interesatno je šta je naš naučnik Nikola Tesla napisao o električnim pogonima ratnih brodova [41] još 1917. godine. "Prema sadašnjim uslovima, najbolji pogon kod svih vrsta površinskih plovila postiže se sa zavojnom elisom, koja se može pokretati na četiri načina. Prvo, direktno na osovini primarnog pokretača; drugo, pomoću zupčaničkog prenosnika; treće, preko hidrauličkog transformatora i četvrto, pomoću električnog prenosnika snage. Svaka od ovih metoda ima svojih mana i prednosti. Što se tiče poslednje, ona ne samo da je veoma ekonomična nego se njom postižu rezultati koji sa drugim načinima nisu mogući. Električni pogon ima složen uticaj na rezultate u kretanju broda".

Posebno je za primenu na ratnim brodovima, Tesla je dao sledeću napomenu: "Postoji još jedan jači razlog da se usvoji električni pogon. On se zasniva na saznanju da će, kroz neko, ne baš daleko vreme, sadašnja sredstva i metode vođenja rata biti revolucionarno promenjene novim primenama električne sile"

Veruje se da će budući ratni brodovi imati uređaje i oružje velikih snaga. Pored toga, moraće da imaju još veću pouzdanost i sposobnost rada bez grešaka i kvarova. Primena sistema integrisane snage (IPS) imaće prednost efikasnijeg korišćenja snage generatora.

Radi kratkotrajnih izuzetno snažnih opterećenja, ulažu se veliki naponi u istraživanje skladištenja električne energije [42] koja bi se oslobadala u kratkim vremenskim intervalima. Jak energetska impuls treba da lansira ili pokrene neko oružje. U pogledu preopterećenja, dizel električni agregat je prema obavljenim ispitivanjima pogodniji od gasno turbinskih generatora. I pored toga, za sada se veliki kratkotrajan energetska impuls može dobiti iz raznih vrsta akumulatorskih baterija, gorivnih ćelija, mehaničkog zamajca ili baterije kondenzatora.

Za potrebe lansiranja aviona na nosačima aviona prave se sve kraće sletne staze, i zbog toga je potreban elektromagnetski katapult (tabela 03) čiji će razvoj trajati do 2004 godine. Projektom konstrukcije elektromagnetskog katapulta definisane su sledeće karakteristike: Na poletno sletnoj palubi dužine 96 m katapult treba da obezbedi brzinu poletanja aviona od 77 m/s (150 čvorova); minimalno potrebna energija katapulta trebalo bi da iznosi 80 MJ, kako bi vreme poletanja aviona iznosilo 2,49 s; vek trajanja katapulta trebalo bi da iznosi 30 godina.

Mada složen, proces dinamičkog pozicioniranja postaje lako ostvarljiv ako se uzme u obzir savremen razvoj elektronskih uređaja za navigaciju i mogućnosti koje pružaju azipodi i pramčani i krmni trasteri pokretani i regulisani pomoću struje.

### 13.14. Dalji razvoj električne propulzije

Za pogon propelerskog vratila i pretvaranje električne u mehaničku energiju korišćene su sve tri vrste obrtnih mašina: jednosmerne, asinhronne i sinhronne.

Jednosmerni motori su nekada bili rado korišćeni zbog mogućnosti ostvarivanja velikih momenata u celom području obrtanja od nule do nominalne brzine obrtanja. Pored toga, jednosmerni motori manjih snaga mogu se direktno spojiti na električni izvor. Međutim, jednosmerni motori su veći, teži i skuplji od naizmeničnih motora istih snaga i zahtevaju određeno održavanje. Izolacija sa liskunom između segmenata na komutatoru ograničava maksimalan napon napajanja. Maksimalan napon na rotoru je usled toga ograničen na vrednost od oko 1.500V. Maksimalna struja u rotoru posledica je komutacionih ograničenja kao i brzine obrtanja. Zbog toga, jednosmerne mašine danas nisu konkurentne naizmeničnim mašinama za pogone najvećih snaga.

Asinhroni motori su još davno bili primenjeni za električne pogone. Prednosti asinhronih motora su niža investiciona cena, prosta konstrukcija, robustnost i trajnost. Rad sa punim opterećenjem i punom brzinom je jako efikasan i ne zahteva pretvarač između motora i brodske električne mreže. Stepen iskorišćenja za snage iznad MW iznosi 0,96 ali vazdušni zazor između statora i rotora predstavlja za brodsku primenu ograničavajući faktor. Režim konstantne brzine obrtanja ne pokazuje stvarne prednosti ovih motora. U režimu promenljive brzine mogu se videti prave prednosti ovih motora. To uključuje uređaj sa brzim poluprovodnicima i mikroprocesorskom kontrolom i određeno praktično iskustvo. Ne postoji potreba za reduktorom zbog manjih brzina obrtanja.

Sinhroni motori su nekada bili takođe dosta korišćeni. Njihov rad sa konstantnom brzinom obrtanja čak i pod varijacijama opterećenja i promene frekvencije i najviši stepen iskorišćenja, do 97%, čine ih izuzetno pogodnim za pogone sa stalnom brzinom obrtanja. Mogu se napraviti za izuzetno visoke snage, čak veće od asinhronih mašina a sa konstruktivnim rešenjem pobude bez četkica imaju jednostavno održavanje i veliku trajnost. Mana je gubitak sinhronizacije ako se prekine napajanje i viša cena od asinhronih motora. Studija napravljena za ledolomce [43] sa pogonskim motorima snage 11MW, pokazla je da su sinhroni motori najbolji izbor. Za pogon okeanskih linijskih brodova su ipak pogodniji asinhroni motori.

Najnovija naučna dostignuća u razvoju električnih mašina doprinose daljem razvoju električnog pogona. U prvom redu ima se u vidu razvoj superprovodnih generatora i motora. Poznato je da je superprovodnost sposobnost nekih materijala da im električna otpornost potpuno iščezne na nekim temperaturama. Za sada su to temperature bliske apsolutnoj nuli, ali se očekuje razvoj visokotemperaturnih superprovodnika koji bi imali datu osobinu čak i na sobnim temperaturama. Na

ovaj način, povećale bi se magnetne indukcije u mašinama koje bi postale manje, smanjili bi se Džulovi gubici u mašinama tako da bi se povećao stepen korisnosti a time i efikasnost električnog pogona. Na brodovima je već bilo pokušaja sa ovim motorima [44], ali se veći napredak još očekuje.

Napravljeni su pokušaji u ratnim mornaricama visokorazvijenih zemalja sa superprovodnim generatorima i superprovodnim motorima snage oko 5 MW, ali se radi primene u trgovačkoj mornarici ipak treba pričekati zbog teškoća i dosta nerešenih problema [45].

U skladu sa rastom proizvodnje i korišćenjem električnih mašina i na brodovima se u nekim aplikacijama javljaju zahtevi za električnim prenosima snage. Na putničkim brodovima je odnos električne energije za luksuz putnika prema električnoj energiji za pogon broda dosta visok. Zbog toga su ovi tipovi brodova pogodni za električni pogon. Pored toga, brodovi sa električnim pogonima poseduju odlične manevarske osobine [46]. Trajekti, brodovi za krstarenje, snabdevanje, za kretanje na kraćim deonicama. Pogodnost je postavljanje pramčanih i krmenih propulzora. U naftnoj industriji se električna propulzija može široko koristiti. Kod platformi za eksploataciju nafte, za dinamičko pozicioniranje kao i kod mnogih tipova brodova za opsluživanje ovih platformi: brodova dizalica, polagača kablova, brodova za snabdevanje itd.

Električni pogoni se mogu uskoro pojaviti i na tankerima, posebno onih koji saobraćaju na kratkim relacijama a često manevrišu. Za tu namenu, napravljena su rešenja sa energetske jedinice koje bi se smestale na glavnoj palubi, a trofazni električni motori sa permanentnim magnetima, snaga i do 30MW, bili bi potopljeni u vodi. Na ovaj način dobila bi se mnoga preimućstva:

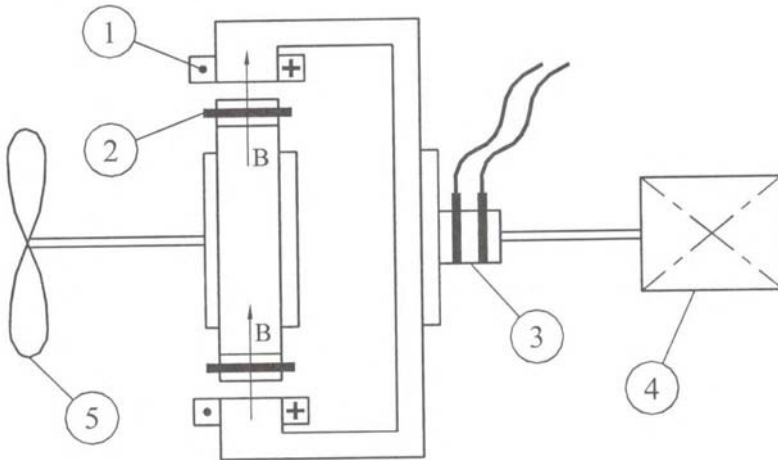
- Ušteda tovarnog prostora
- Bolje manevarske osobine broda
- Eliminisanje kormila
- Eliminisanje propelerskog voda
- Smanjene vibracije na brodu
- Bolje hlađenje pogonskog elektromotora

### 13.15. Elektromagnetske spojnice

Elektromagnetska (ili električna) spojnica je uređaj za prenošenje momenta pomoću elektromagnetske sile u kome nema mehaničkog kontakta između pogonskog i pogonjenog dela.

Ovaj uređaj omogućuje da se koristi nekoliko dizel motora da pogone propeler. Mada se striktno govoreći ovaj sistem ne može razmatrati kao električna

propulzija, sva snaga se prenosi preko vazdušnog zazoru elektromagnetske spojnice. Zato se elektromagnetska spojnica može posmatrati kao kvazi električna propulzija. Sistem koji koristi dva ili četiri dizel motora ima elektromagnetsku spojnicu za svaku mašinu i reduktor sa sporohodnim izlazom za propellersko vratilo i upravljačku jedinicu za kontrolisano spajanje motora.



Slika 115. Princip rada elektromagnetske spojnice

1. Primarni deo pobuđen jednosmernom strujom
2. Sekundarni sa kratkospojenim namotajem
3. Klizni prstenovi
4. Pogonska mašina
5. Vratilo sa propelerom

Konstruktivno se sastoji od dva obrtna čelična diska, na čijim se krajevima nalaze nastavci. Na unutrašnjem nastavku spoljnog diska smešteni su magnetski polovi [47] koji se pobuđuju preko kliznih prstenova iz jednosmernog izvora. Na spoljnom nastavku unutrašnjeg diska nalazi se dinamo limovi unutar kojih se nalaze dvostruki žljebovi sa kratkospojenim namotajima slično asinhronom motoru sa kratkospojenim rotorom i sa dvostrukim namotajima. Okretanjem diska 1 sa strane pogonske mašine, a kada je pobuđen jednosmernom strujom, stvara se obrtno magnetsko polje. Presecanjem kratkospojenih provodnika na disku 2 indukuje se u njima elektromagnetska sila. Ova elektromagnetska sila stvara struju u provodniku da bi se interakcijom sa obrtnim magnetskim poljem stvorila i elektromagnetska sila koja pokreće disk 2 u skladu sa smerom obrtanja diska 1. Da bi se ublažile polazne struje, pravi se kavez od dva namotaja. Gornji, ili bliži polovima je sa većim električnim otporom i služi za polazak, a donji je radni.

U skladu sa teorijom rada asinhronih mašina, disk 2 uvek zaostaje za diskom 1 za neku brzinu  $\Delta n$  koja se definiše preko klizanja

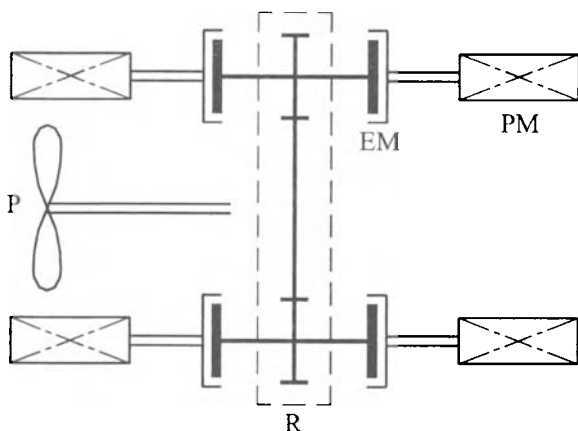


$$s = \frac{\Delta n}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (13.06)$$

Ako je snaga dizel motora  $P_d$  tada će snaga koja se dostavlja propeleru iznositi:

$$P_p = (1 - s) \cdot P_d \quad (13.07)$$

Ukupnim gubicima u elektromagnetskoj spojnici pripada jednosmerna snaga potrebna za pobudu elektromagneta i snaga klizanja (razlika snaga  $P_d$  i  $P_p$ ).



Slika 116. Jednopropelelni pogon sa četiri pogonske mašine, 4 elektromagnetske spojnice i jednim reduktorom

Prednost elektromagnetne spojnice je što deluje kao prigušni element pri naglom opterećenju i rasterećenju propelera, konstruktivno je jednostavan i nije potrebno održavanje jer nema habanja. Danas se retko primenjuje na brodovima, zbog nemogućnosti prekreta kao i zbog kvalitetnijih mehaničkih prenosa.

Kod elektromagnetske spojnice rotiraju oba diska pri čemu je vazdušni zazor između njih reda 5 – 10mm [48]. Klizanje od oko 2% pri punom opterećenju isto je kao i kod hidrauličke spojnice. Stepenn korisnosti hidrauličke spojnice je oko 97%, a elektromagnetske spojnice i reduktora oko 98%. Elektromagnetske spojnice se prave za snage i nekoliko MW.

Kao proširena varijanta elektromagnetske spojnice, napravljena je konstrukcija elektromagnetskog reduktora [16] za snage više desetina MW. Ova konstrukcija sastoji se od elektromagnetske spojnice i sinhronog motora u jednom kućištu. Sa

ovom varijantom elektromagnetskog reduktora moguće je napraviti preket, meko puštanje u pogon i određenu redukciju dosta jednostavno. Zbog navedenih prednosti za elektromagnetske spojnice, elektromagnetski reduktor je nalazio primenu kod brodova sa čestim preketima propelerom [49] mada se danas više ne koristi.

### 13.16. Pravila Jugoslovenskog registra brodova

Jugoslovenski registar brodova svojim pravilima [50] kao i rezolucijama [51], ograničava maksimalno dozvoljeni napon kao i vreme rada elektromotornog pogona pri ukočenom propeleru kod potisnih uređaja sa električnim prenosom snage.

Napon električnog sistema porivnog uređaja ne treba da prelazi veličine navedene u tabeli. Upotrebu viših napona razmatra Jugoregistar.

Tabela 10. Maksimalno dozvoljeni naponi za pogon porivnih uređaja

Redni broj	Opis	Veličina napona (V)	
		Jednosmerni	Trofazni naizmenični
1	Napajanje glavnog strujnog kola električnog pogonskog uređaja	1.200	7.500
2	Strujna kola upravljanja i signalizacije	220	380

Svi elementi porivnog električnog uređaja jednosmerne struje treba da budu predviđeni za rad pri ukočenom motoru pod naponom za vreme od 1 min.

### 13.17. Literatura

- Freidzon I.R., Sudovbie elektromehanizmbi, Gosudarsvenoe soioznoe izdetelbstvo sudostroitelbnoi promibišlennosti, Leningrad, 1958, 5.
- Tesla N., Električni pogon ratnih brodova, Članci, Aleksandar Marinčić, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1995, 432-441.
- Coleman H., Electric Propulsion, Marine engineering, vol.2, Society of Naval Architects and Marine Engeeners, New York, 1944, 459.
- Gilerović IO. M., Spešilov V. S., Tumanov V. A., Perspektivbi razvitna grebnih električeskkih ustanovok, Sudostroenie 4, 1997, 51 – 54.
- Manen J.V., Oassanen P.V., Propulsion, Edvard V. Lewis, Editor, Principles of Naval Architecture, 1998, vol II, 128-129.

06. Jakovlić K., Brodska elektrotehnika, Tehnička enciklopedija, knjiga 2, Zagreb, 1966, 506-526.
07. Nikolić Z., Čamci sa elektropogonom, Plovni putevi, brodogradnja, brodarstvo, vol. III, Beograd, 1981, 9, 34-36.
08. Ranisavljević R., Nikolić Z., Razvoj autonomnog električnog pogona čamaca, Izvori električne energije, Beograd, 1994, 2, 262-271.
09. Nikolić Z, Marinković M, Janković Z, Development of the electric vessels with double drive, Proceedings of the First European Inland Waterway navigation Conference, Budapest, 1999, 275 – 283.
10. Coleman H., Electric Propulsion, Marine engineering, vol.2, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1944, 459-495.
11. Vlahinić I., Električni sistemi plovni objekata, Fakultet za pomorstvo i saobraćaj, Rijeka, 1988, 22-42.
12. – , History of American Bureau of Shipping, 1862-1991, Huston, USA, 1992, 12-19.
13. Chapman L., The Marine Power Plant, McGraw-Hill Book Company Inc, New York, 1942, 219.
14. Chapman L., The Marine Power Plant, McGraw-Hill Book Company Inc, New York, 1942, 269.
15. – , US develops permanent magnet propulsion, The Motor Ship, avgust 1995, 54.
16. Barić J., Propulzija broda, Električna, Pomorska enciklopedija, vol. 6, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1985, 489-493
17. Gras V., Dieselelektrischer Schaufelrad-Schlepper “Szechenyi”, Werft, Reederei, Hafen, Heft 16, Berlin, 1939, 247-256.
18. Šilović S., Sentić A., Brod, propulzija, Tehnička enciklopedija 2, Zagreb, 1966, 213.
19. Nikolic Z., Bilen B., Electric propulsion of the reconstructed paddle wheel ship “Krajina”, Proceedings of the Second European Inland Waterway navigation Conference, Budapest, 2001, 20.1 – 20.6.
20. Lohmann and Stolterfoht, Shaft and thrust bearings for 22.000hp icebreakers, Mitteilung, M70, 1977.
21. Lohmann and Stolterfoht, Drilling Rig for North Sea Operations, Mitteilung, M64, 1974.
22. Smith P. W., Modern Marine Electricity, Cornell Maritime Press, Maryland, 1955, 119-152.
23. Chapman L., The Marine Power Plant, McGraw-Hill Book Company Inc, New York, 1942, 213.
24. Nikolić Z. Bilen B, Dizel-električni pogon rečnih brodova, Zbornik radova Drugog Jugoslovenskog naučno-stručnog skupa “Vodni saobraćaj u 21. veku”, Beograd, 2002, 63 – 69.
25. Nikolić Z., Stamenović B., Marinković M., Diesel – electric propulsion of the reconstructed paddle wheel river ship “Krajina”, Proceedings of AES 2003 Broadening the Horizons, Edinburgh, UK, 2003, 117 – 123.

26. Kurimo R., Sea Trial Experience of the First Passenger Cruiser with Podded propulsors, PRADS 98, Elsevier, Amsterdam, 1998, 743-748.
27. Aalberts P., Koning J., "Pods in Service" initiative provides invaluable data. Marin Report, Decembar 2001, no. 75, 12 -13.
28. Beverly J., Electric Propulsion Drives, Marine engineering, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1992, 304-324.
29. Kallah A.S., Hall B., Watson V.E., Power, propulsion and control systems for the U.S. Coast Guard polar Icebreaker "Healy", American Society of Naval Engineers, Pittsburgh, 1994, 1-13.
30. Simon P., Duriand J.C., New trends in Electric propulsion, The Institute of Marine Engineers, East Cost USA Branch, April 9. 1998, New York, 1-28.
31. – , SSPs generate interest, The Motor Ship, may 2001, 25.
32. – , Annual Report 2000, Germanisher Lloyd, Ship Technology, 2000, 42-45
33. Facinelli W., Muggerridge D., Integrated System Analysis and Design of Podded Ship Propulsors, Marine Technology, Vol. 35, No. 3, July 1998, 151-174.
34. Wrf K., Inbishop innovation in inland shipping, paper 12, Proceedings on Coastal ships and inland waterways, London, 1999, 1 – 9.
35. Niini M., The Need for Enhanced Manoeuvrability, Proceedings Seatrade Cense Shipping Conference, Miami, 1995, Part III, 1-8.
36. – Maneuvering with Podded Propulsors: Pluses and Minuses, Marin Report, Netherland, Octobar 1998, no. 64, 1-9.
37. Watier B., Morrish N.M., The development of 1 – 2 MW Advanced Cycle gas Turbine Alternator for naval use, Proceedings of AES 2003, Edinburgh, 2003, 386-394.
38. Gas Turbines for Queen Mary 2, Marinetalk, Providing solutions for shipbuilding and shiprepair, 31, August 2001.
39. Lloyd, C., Simpson, R., Read, G., The Type 45 Destroyer – powering to success, Proceedings of AES 2003, Edinburgh, 2003, p. 198-210.
40. Newman R.J., For the Navy, an engine of change U.S. News, 12.20.1999.
41. Tesla N., Električni pogon ratnih brodova, Članci, Aleksandar Marinčić, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1995, 432 - 441.
42. Delisle D., Desai B., Robey H., Energy Storage for U.S.Navy Integrated Power System Applications, Proceedings of AES 2003, Edinburgh, 2003, 340-352
43. Aprianen M., Naval Architecture of Electric Ships – past, Present and Future, SNAME Transactions, Vol. 101, 1993, 583-607.
44. Doyle T.J., Stevens H.O., Navy electric drive,  
<http://peas.crane.navy.mil/IPS/intro/part1/index.html>
45. Andersen P., Schmidt W., Wacker B., High-Temperature Superconductor (HTS) technology for power application on board of All Electric Ships (AES), Proceedings of AES 2003, Edinburgh, 2003, 323-327.

46. Bartolo G., Brighenti A., Kroul S., Schulze R., LIUTO Development and Optimisation of the Propulsion System: Study, Design and Tests, PRADS 98, Elsevier Amsterdam, 1998, 771 – 783.
47. Šarov V. S., Elektromagnitnie Mufti Skolženia, Gosenergoizdat, Moskva, 1958.
48. Seward H. L., Electro-Magnetic Coupling, Marine Engineering, volume one, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1942, 222-223.
49. Coleman H., Geared Diesel System with Electric Coupling, Marine engineering, vol.2, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1944, 490-495.
50. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o gradnji brodova unutrašnje plovidbe, Električni uredaji - deo 9, Beograd, 1994.
51. EEC, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovnim putevima, OUN, Njujork, 1993.

## 14. ELEKTRIČNI POGONI PODMORNICA

Pogoni podmornica mogu biti različiti u zavisnosti od namene i veličine podmornice. Zato postoje autonomni električni pogoni i dizel-električni pogoni. Autonomni električni pogoni primenjuju se za pogone kod manjih podmornica koje imaju ograničen radijus kretanja i to uglavnom kod turističkih i vojno-desantnih podmornica. Dizel-električni pogoni primenjuju se kod velikih podmornica čija je autonomija znatno veća, a sastoji se od dizel motora, generatora, pogonskog motora i akumulatora. U površinskoj ili šnorkel plovidbi, koriste se dizel motori pri čemu se i akumulatorske baterije pune, da bi se u podvodnoj plovidbi praznile.

### 14.01. Autonomni električni pogoni podmornica

Podmornice sa autonomnim električnim pogonima su manjih dimenzija i namenjene su za neprimetno i to uglavnom podvodno kretanje. Služe za prevoz diverzanata ili za prevoz i polaganje mina i posle toga se vraćaju u bazu ili na mesto pridviđeno za dopunjavanje akumulatorskih baterija. Zbog toga podmornice poseduju samo određenu količinu akumulisane električne energije. Maksimalna brzina plovidbe iznosi 7,5 čvorova a podvodna autonomija iznosi četiri dana. Namenjene su za dubine ronjenja do 100m mada se teoretski mogu koristiti i za nešto više dubine. Masa im je oko 80 tona a dužina preko 18m. Radi povećane pogonske sigurnosti, postoje dva potpuno nezavisna pogona koji pokreću jedan propeler. Svaki pogon sastoji se od akumulatorske baterije, regulatora brzine i pogonskog elektromotora. Principijelna shema je prikazana na slici 114.

Postupak puštanja u pogon i regulacija brzine obrtanja propelera je jednostavna. Na akumulatorsku bateriju direktno se priključuje pogonski elektromotor sa punom pobudnom strujom. Posle završetka perioda zaletanja ustaljuje se brzina obrtanja propelera na vrednost datu jednačinom (5.10)

$$n = \frac{U}{k \cdot \Phi_m} \quad (14.01)$$

koja je minimalna za ovaj pogon. Polazni moment se može odrediti na osnovu poznate jednačine (5.11)

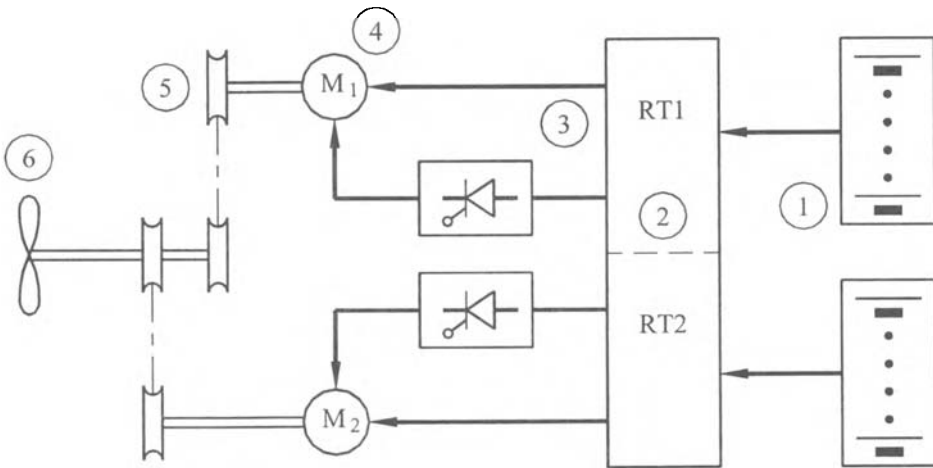
$$M_{pol} = c \cdot \Phi_m \cdot I \quad (14.02)$$

Polazni moment je pri zaletanju i maksimalnom fluksu maksimalan, tako da je i vreme prelaznog procesa kratko. Na ovaj način smanjuju se udarne ili polazne struje, štite se akumulatorske baterije kao i električna instalacija.

Povećanje brzine obrtanja propelera radi se smanjenjem pobudne struje. Smanjenjem pobudne struje smanjuje se i pobudni fluks, brzina elektromotora se povećava kao i apsorbirana snaga pri čemu se treba imati u vidu činjenica da je napon akumulatorskih baterija stalan. Za ovo se koristi mali čoper u pobudnom kolu obzirom da je regulacija pobudne struje racionalnija od regulacije armaturne struje. Maksimalna brzina obrtanja propelera postiže se kada je fluks minimalan i iznosi:

$$n_{max} = \frac{U}{k \cdot \Phi_{min}} \quad (14.03)$$

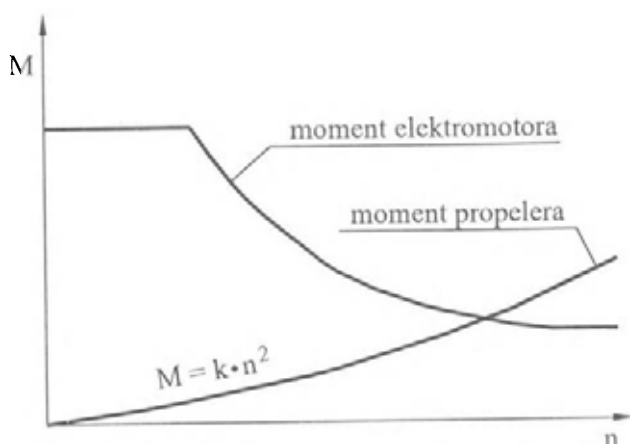
Povećavanjem brzine obrtanja propelera povećava se apsorbirana snaga i zbog toga se i struja elektromotora povećava jer je napon izvora stalan.



Slika 117. Shema pogona desantne podmornice 1. akumulatorska baterija  
 2. razvodna tabla 3. regulator brzine i smera obrtanja elektromotora  
 4. pogonski elektromotor sa nezavisnom pobudom  
 5. kajišni prenos 6. pogonski propeler

Dalje povećanje snage pogona radi se ubacivanjem i drugog elektromotora u pogon. Da bi se dobila puna ili maksimalna snaga u ograničenom vremenskom trajanju, postoji mogućnost rednog vezivanja akumulatorskih baterija i paralelnog vezivanja elektromotora. Ovakav režim se koristi krajnje racionalno i to ograničeno vreme da bi se za kratko vreme podmornica udaljila što brže od cilja. U takvoj plovidbi vrši se intenzivno pražnjenje akumulatorskih baterija pa se ovaj režim ne preporučuje u dužem trajanju jer bi se i elektromotor posle određenog vremena pregrejao i oštetio.

Izvori električne energije su akumulatorske baterije nominalnog napona 288 V i kapaciteta oko 2000 Ah. Pogonski elektromotori su jednosmerni sa nezavisnom pobudom, snage 18 kW. Slabljem pobudnog fluksa vrši se povećanje brzine obrtanja elektromotora, teoretski i do tri puta. Elektromotori imaju znatno višu brzinu obrtanja od optimalne brzine obrtanja propelera. Usklađivanje brzine obrtanja ili redukcija brzine obrtanja elektromotora vrši se kajšnim prenosom. Interesantno je navesti da ove podmornice radi boljeg iskorišćenja prostora kao i deplasmata, ne poseduju sopstven uređaj za punjenje akumulatorskih baterija, tako da se u bazi moraju posedovati posebni ispravljači za ovu namenu.



Slika 118. Momentna karakteristika propelera i pogonskog elektromotora sa slabljenjem pobudnog polja

Ovo rešenje puštanja u rad pogonskih elektromotora je tehnički racionalno rešenje prilagođeno uslovima propelerskog opterećenja imajući u vidu da se snaga propelera menja sa trećim stepenom promene brzine. Zbog toga se pri puštanju u pogon ostvaruje snaga propelera u iznosu 15 - 20 % od maksimalne vrednosti. To je posebno važno radi ograničavanja polaznih ili udarnih struja pogonskog elektromotora na malu vrednost čime se štite i akumulatorske baterije. Regulacija brzine elektromotora može se u principu raditi i regulacijom armaturne struje, no namerno je izabrana regulacija pobudne struje jer je ona za red (barem 10 puta)

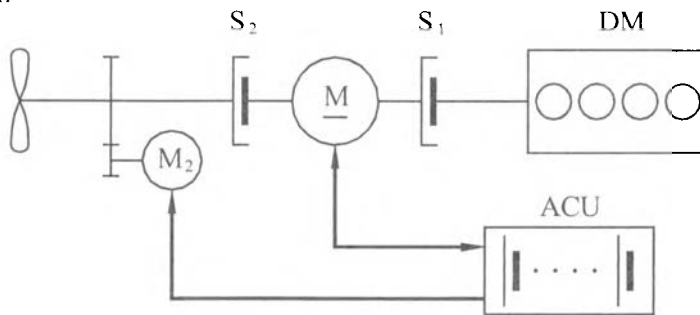


niža od armaturne struje, a to znači da je i regulator brzine, čoper manji, jeftiniji, pouzdaniji a i gubici u njemu su manji.

Pored samog pogona propelera, u podmornici se nalaze sledeći električni potrošači. Kompresor za izranjavanje kao najveći potrošač a zatim elektrohidraulički agregat za kormilarenje. Klima uređaji su takode važni potrošači kao i pumpe za trimovanje i drenažu. Opštebrodska potrošnja obuhvata navigaciju i signalizaciju uglavnom preko pretvarača na naponu od 24 V. Pored toga, ovaj pretvarač napaja i specijalne elektronske uređaje kao i uređaje za komandovanje i upravljanje radom same podmornice.

## 14.02. Dizel električni pogon sa direktnim prenosom snage

Dizel električni pogon sa direktnim prenosom snage pripada klasičnim rešenjima pogona podmornica koje se primenjivalo nekoliko decenija. Dizel-električno postrojenje sastoji se od dizel motora, generatora, pogonskog motora i akumulatorskih baterija. Pošto direktno (bez redukcije brzine obrtanja) pogoni propeler, pogonski dizel motor za ovu namenu mora biti sporohodni, posebno konstruisan za primenu u podmornicama. Električna mašina [01] je jednosmerna sa složenom pobudom i sa dodatnim nezavisnim namotajem zbog generatorskog rada. Snaga mašine iznosi preko MW i obezbeđuje maksimalnu brzinu plovitve oko 45km/h. Radi duže podvodne plovitve, postoje posebni elektromotori za ekonomičnu plovitvu snage oko 50kW pri čemu je brzina podmornice oko 7-10km/h i zbog male brzine obrtanja propelera, šumnost podmornice je vrlo niska. U površinskoj ili šnorkel plovitvi, koriste se dizel motori pri čemu se i akumulatorske baterije pune, da bi bile spremne za pražnjenje u podvodnoj plovitvi.



Slika 119. Shema dizel električnog pogona podmornice sa mehaničkim prenosom snage. DM – pogonski dizel motor, ACU – akumulatorska baterija, M – glavna pogonska mašina M2 – elektromotor za ekonomičan pogon, S1 i S2 – spojnice

Pogon podmornice može se razmotriti preko nekoliko režima rada pogona [02].

**Kod površinske ili šnorkel plovidbe** uključene su obe spojnice  $S1$  i  $S2$  tako da se dizel motor  $DM$  koristi da bi direktno pogonio propeler, a jednosmerna električna mašina  $M$  se praktično koristi kao zamajac. Elektromotor  $M2$  se u ovom režimu ne koristi. Električna mašina  $M$  se u ovom režimu može dodatno pobuđivati iz akumulatorskih baterija, tako da može preći u generatorski rad i dopunjavati akumulatorske baterije. Znači izlazna snaga dizel motora može se podeliti na dva dela. Jedan deo se koristi za pogon propelera a drugi se preko električne mašine koja radi u generatorskom režimu, koristi za dopunjavanje akumulatorke baterije  $ACU$ .

**U podvodnoj plovidbi** se isključuje spojnica  $S1$ , kao i pogonski dizel motor  $DM$ . Plovidba se ostvaruje na taj način što pogonska mašina  $M$  prelazi u motorni režim, dobija pogonsku električnu energiju iz akumulatora i pogoni propeler. Radi duže, ekonomičnije plovidbe moguće je isključiti spojnicu  $S2$  a ostaviti u pogonu samo motor  $M2$  kojim se postiže ekonomična plovidba i manja šumnost. U vojnoj terminologiji se režim rada sa motorom  $M2$  naziva šuljanje.

**U lučkom režimu** uključuje se samo spojnica  $S1$  a isključuje spojnica  $S2$  čime se postiže forsirano punjenje akumulatorskih baterija. Pri ovome se sva snaga dizel motora koristi isključivo za punjenje akumulatorskih baterija.

Na podmornicama se obično nalaze dva autonomna dizel električna pogona. Na ovaj način se postiže određena pogonska sigurnost kod kvara na jednom pogonskom uređaju. Pored toga, postiže se mogućnost dvostrukog rada dizel agregata, jer jedan može raditi u režimu pogona propelera (uključen  $DM1$  i odgovarajuće spojnice  $S1$  i  $S2$ ), istovremeno se drugi dizel motor  $DM2$  može koristiti u lučkom režimu za dopunjavanje akumulatorskih baterija (uključen  $M$  i odgovarajuća spojnica  $S1$ ).

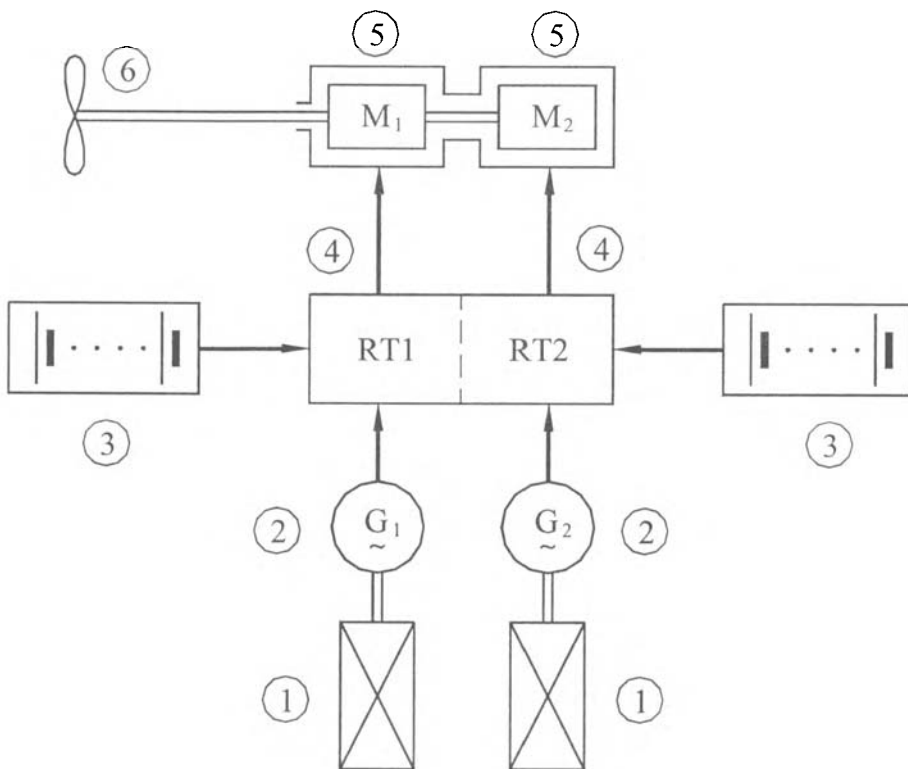
### **14.03. Dizel električni pogon sa električnim prenosom snage na propelere**

Kod dizel električnog pogona sa električnim prenosom snage na propelere, pogonski jednosmerni elektromotori pokreću propeler u svakom režimu rada podmornice. Napravljena je i specijalna konstrukcija dva elektromotora u istom kućištu kako bi se izvršila maksimalna ušteda prostora i mase.

U odnosu na dizel-električne pogone sa direktnim prenosom snage, moguće je primeniti jedan ili više brzohodnih dizel motora, koji su lakši od sporohodnih, i to postavljenim na pogodnim mestima u podmornici. Pri površinskoj plovidbi napaja se pogonski motor punom snagom. Ako se za pogon koristi manja snaga, deo

pogonske snage iz dizel motora može se koristiti za punjenje akumulatorskih baterija preko ispravljača (AC/DC pretvarača). Prednosti ovog pogona su što dizel motor radi u generatorskom režimu i bezkontaktni preokret propelera a nedostatak ove propulzije je u tome što je stepen iskorišćenja nešto niži, povećana je ukupna masa kao i zapremina pogonskog agregata.

Ove podmornice su teške preko 800tona, dugačke preko 55m i postižu maksimalnu brzinu preko 16,5 čvorova.



Slika 120. Shema pogona sa električnim prenosom snage na propelere

1. Pogonski dizel motor
2. Trofazni generator
3. Akumulatorske baterije
4. Razvodna tabla
5. Pogonski elektromotor
6. Propeler

I u ovakvim pogonima postoje uglavnom dva ili više potpuno nezavisnih agregata. Dva pogonska dizel motora imaju snage po 800 kW [03] a generatori imaju izlazne nominalne snage 540 kW. Radi primene u podmornicama konstruisani su specijalni elektromotori u jednom kućištu tako da se oba nalaze na jednom vratilu. Svaki pogonski elektromotor ima nominalnu izlaznu snagu 480 kW. Jednočasovna snaga svakog pogonskog elektromotora iznosi 910kW ali je interesantno da se pri tome mora aktivirati i dodatno prinudno hlađenje. Akumulatorske baterije imaju napone

288 V a petočasovni kapacitet iznosi 12.000 Ah. Regulacija brzine kretanja podmornice radi se regulacijom pobudne struje, ali se može raditi i rednim i paralelnim spajanjem akumulatorskih baterija i elektromotora.

Režimi rada pogonskih agregata su slični kao i kod dizel električnog pogona sa direktnim prenosom snage.

***U površinskoj ili šnorkel plovidbi*** može raditi jedan ili oba dizel agregata koji napaja jedan ili oba pogonska jednosmerna elektromotora. Pogonski elektromotori direktno pokreću propeler a time i podmornicu. Deo snage dizel motora može se koristiti za dopunjavanje akumulatorskih baterija.

***U podvodnoj plovidbi*** svaki elektromotor može da radi potpuno nezavisno napajajući se iz svoje akumulatorske baterije, a to znači da u pogonu može biti jedan elektromotor, drugi, ili oba. Moguće je da se oba spoje redno i da se napajaju iz jedne akumulatorske baterije, a moguće je i da se oba spoje paralelno i napajaju iz redno vezanih akumulatorskih baterija. Normalno da se pri rednom spajanju akumulatorskih baterija a pri paralelnom spajanju pogonskih elektromotora može dobiti maksimalna potisna sila propelera, ali samo kraće vreme i to ispod 1h, da bi se izbegla neposredna opasnost. Pri ovakvom režimu rada elektromotora dolazi i do intenzivnog pražnjenja akumulatorskih baterija.

***U lučkom režimu*** koristi se jedan dizel agregat za forsirano punjenje akumulatorskih baterija.

Dubina ronjenja ovakvih podmornica iznosi i više stotina metara. Svi potrošači su kod ovih podmornica većih snaga a to su uglavnom kompresor za izronjavanje, klima uređaj, sistem hidraulike za kormilarenje i drenažu i sistem za torpednu službu. Pored toga postoje čitav sistem uređaja i opreme koji rade na mrežnom naponu 115 V i 24 V, kao i manje važni potrošači.

#### **14.04. Pogonsko postrojenje dizel električnih pogona**

U US mornarici se od II Svetskog rata nalaze u pogonu podmornice tip "Pampanito" [04]. Jako pouzdana Balao klasa podmornica mogla je da plovi do dubine od 400 stopa, prvenstveno zahvaljujući debljini čelika. Pored toga, podmornica je imala, za to vreme, nov sistem za detekciju ciljeva i torpeda sa električnim pogonom i kompjuter za podešavanje ugla ispaljivanja torpeda.

Pogon podmornice bio je sa dizel električnim agregatima. Četiri glavna dizel motora pokretala su generatore koji su davali potrebnu snagu za električne pogonske motore, ili za dopunjavanje akumulatorskih baterija. Podmornica je uvek radila preko električne transmisije, tako da dizel motori nisu mogli da obrću

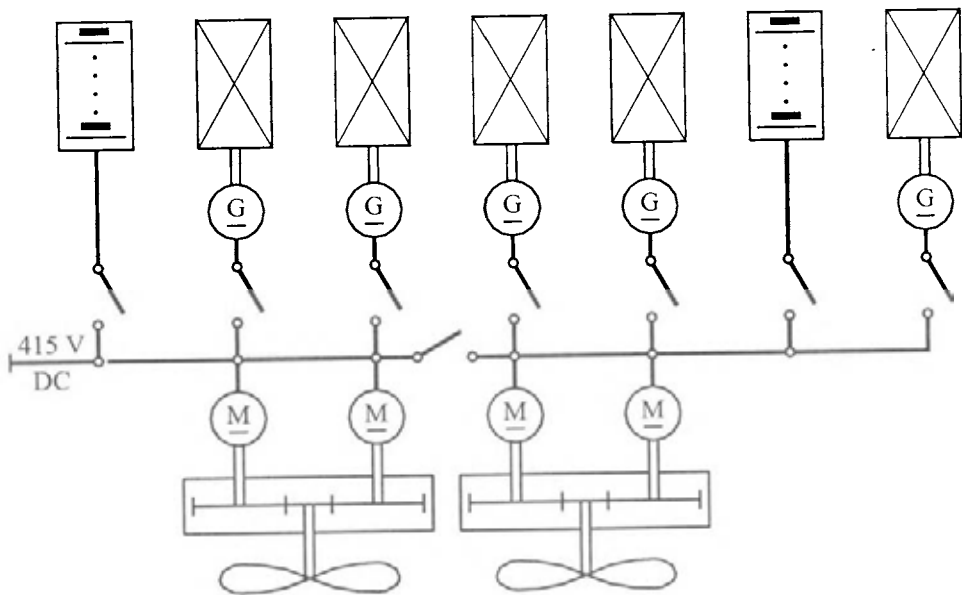
propelerska vratila direktno. Kada je podmornica u površinskoj plovidbi, električna energija potrebna za pogon se dobija iz generatora, a u podvodnom režimu rada energija se dobija iz akumulatorskih baterija. Postoji četiri pogonska motora, po dva spojena na reduktor koji pokreće jedan propeler. Reduktori smanjuju brzinu elektromotora od oko  $1.300 \text{ min}^{-1}$  na brzinu obrtanja propelera od oko  $280 \text{ min}^{-1}$ . Već je sledeća klasa podmornica, Tench klasa, koristila dva sporookretna motora sa dva namotaja koji su direktno pokretali propelerska vratila.

Svaki od četiri glavna dizel motora direktno pogoni po jedan generator. Svaki generator ili bilo koja kombinacija, se može koristiti da napaja akumulatorske baterije ili pokreće pogonske motore. Generatori su potpuno zatvoreni, jednosmerni sa nezavisnom pobudom. Nominalne veličine generatora su: snaga  $1.100 \text{ kW}$  a napon  $415 \text{ V}$  i struja  $2.650 \text{ A}$ . Četiri jednosmerna generatora napona  $415 \text{ V}$ , pri brzini obrtanja od  $720 \text{ min}^{-1}$  dostavljaju mreži električnu snagu od  $1.100 \text{ kW}$  a snagu od  $900 \text{ kW}$  pri  $650 \text{ min}^{-1}$ .

Pomoćni generator je jedan dizel generator nazivne snage  $300 \text{ kW}$  pri  $1.200 \text{ min}^{-1}$ . Pomoćni generator, spojen na pomoćni dizel motor napaja potrebnom snagom pomoćna strujna kola, napaja glavne akumulatorske baterije malom strujom ili se može koristiti da napaja pogonske motore preko akumulatorskih baterija. Generator je sa složenom diferencijalnom pobudom. Mada je samopobudni, pobuda mu se može napajati i iz akumulatorskih baterija. Nazivne veličine mašine su  $300 \text{ kW}$  pri  $1.200 \text{ min}^{-1}$  ili  $345 \text{ V}$  i  $870 \text{ A}$ .

Postoji četiri identična pogonska jednosmerna elektromotora sa složenom pobudom, pri čemu je redni namotaj dominantan. Svaki elektromotor ima snagu  $1.375 \text{ HP}$  ili  $1.010 \text{ kW}$ . Gradjeni su za nominalni napon  $415 \text{ V}$ , struju  $2.600 \text{ A}$  i nominalnu brzinu obrtanja  $1.300 \text{ min}^{-1}$ .

Na podmornici se nalaze dve grupe pogonskih akumulatorskih baterija, pri čemu se svaka sastoji od dve grupe po 126 akumulatorske ćelije. Svaka ćelija je  $15''$  duboka,  $21''$  široka,  $54''$  visoka i teži  $1650$  funti. Svaka ćelija je napravljena od pozitivne i negativne ploče napravljene od olova, svaka sa zajedničkim krajevima, odvojenim izolatorom. Ploče su potopljene u elektrolitski rastvor napravljen od čiste vode i sumporne kiseline specifične težine  $1,25 \text{ gr/cm}^3$  kada je akumulator napunjen. Svaka ćelija ima napon približno  $2 \text{ V}$  i fiksno je spojena redno. Svaka baterijska grupa može raditi nezavisno ili paralelno. Baterije mogu dati približno  $5.320 \text{ A}$  tokom jednog časa,  $930 \text{ A}$  tokom  $10 \text{ h}$  ili  $235 \text{ A}$  u vremenu od  $48$  časova. Ovo znači da podmornica može ploviti u podvodnom režimu  $11$  čvorova jedan sat, ili može ploviti  $95$  milja pri brzini  $5$  čvorova pre nego što napon padne na graničnu vrednost. Priključak sa kopna pokriva opštu potrošnju podmornice i napaja baterije dok je podmornica u vezu.



Slika 121. Shema pogona podmornice tip "Pampanito"

Ukupna snaga ove podmornice mase 1.500t iznosi 6.400HP na površini a 2.740HP u podvodnom režimu.

Postoje dva reduktora ma podmornici. Svaki reduktor ima jedan izlaz i dva ulaza, tako da ga pogone dva elektromotora, a sporokretni izlaz pokreće propelersko vratilo. Ulazi su na  $1300 \text{ min}^{-1}$  a izlaz na  $280 \text{ min}^{-1}$ . Kasnije su ovi reduktori izbačeni jer su korišćeni sporookretni pogonski elektromotora.

Regulatori brzine plovidbe omogućuju početak rada, zaustavljanje, reverziranje i regulaciju brzine pogonskih vratila sa propelerima u površinskoj i podvodnoj plovidbi. Regulacija brzine propelerskih vratila omogućena je rednim, paralelnim i redno paralelnim spajanjem glavnih elektromotora, i grupa akumulatorskih baterija.

U površinskoj plovidbi, oba pogonska elektromotora razvijaju ukupnu snagu od 20HP do 2.700HP po propelerskom vratilu i brzinu propelera pri tome od 67 do  $282 \text{ min}^{-1}$ . Analogno prethodnom, u podvodnoj plovidbi, oba pogonska elektromotora razvijaju snagu od 30HP do 1.720HP po propelerskom vratilu a brzinu propelera u opesegu od 42 do  $219 \text{ min}^{-1}$ .

## 14.05. Savremeni pogoni podmornica

Podmornice Amur [05] pripadaju dizel električnim pogonima. Glavno, jednovratilno pogonsko postrojenje sastoji se od pogonskog elektromotora snage 2.000kW i dve grupe akumulatorskih baterija. Puna podvodna brzina iznosi 16 čvorova. Za podmornice, naoružane brzim i dalekometnim podvodnim oružjem i podvodnim krstarećim projektilima, ovo je dovoljno da osigura korisne osobine pri borbenim zadacima. Podvodni krstareći opseg pri ekonomskoj brzini od oko 3 čvora iznosi 300 NM.

Tabela . Karakteristike familije podmornica tip AMUR

Karakteristike	Amur 450	Amur 750	Amur 950	Amur 1.450	Amur 1.850
Torpeda	4	4	4	6	6
Broj torpeda (kalibar mm)	8 (400)	16 (400)	12 (533)	16 (533)	16 (533)
Deplasman					
-pun, t	700	900	1.300	2.100	2.600
-normalan, t	450	750	950	1.450	1.850
Dimenzije					
-dužina, m	46,0	48,0	56,0	58,0	68,0
-širina, m	4,4	5,0	5,6	7,2	7,2
-visina, m	5,2	5,8	6,4	8,2	8,2
Maksimalna podvodna brzina (čvor)	18	17	19	17	22
Podvodni radijus kretanja milja	250	250	350	300	500
Radijus pri šnorkel plovidbi milja	1.500	3.000	4.000	4.000	6.000
Maksimalna Dubina, m	200	200	250	250	250
Izdržljivost (dana)	20	20	30	30	50
Broj posade	18	21	21	34	37

Za plovidbu u površinskom radu i na periskopskoj dubini, podmornica je opremljena sa dva naizmjenična dizel generatora sa ispravljačima. Nominalne snage dizel generatora bile su izabrane tako da su obezbedile uobičajeno punjenje akumulatorskih baterija i korišćenje posebnih brzih zakona punjenja. Nepostojanje četkica na kolektoru generatora povećalo je radnu sigurnost generatora.

Nova oprema razvijena na Amur podmornicama superiorna je u odnosu na opremu treće generacije prvenstveno u odnosu na vibroakustičke osobine i trajnost. Čak i u

slučaju rada sa visokim intenzitetom, oprema u podmornici ne zahteva fabričku opravku barem 10 godina pošto uđe u eksploataciju. Rubin je završio projektantski rad na celoj familiji dizel električnih podmornica tipa AMUR sa deplasmanom od 565 do 1.850 tona.

#### **14.06. Električni prenos snage kod nuklearnih podmornica**

Nuklearno postrojenje poseduje nuklearni reaktor i parnu turbinu koja pogoni propeler kao i podmornicu. Pošto ne zavisi od atmosferskog vazduha, ovaj pogon ima praktično neograničenu autonomiju rada što mu je i osnovna prednost. Pored pogona, parna turbina se koristi i za pogon trofaznog naizmjeničnog generatora čime se podmiruje brodska potrošnja. Odavde se napaja i jednosmerni sistem mrežnog napona 220V koji napaja posebne električne uređaje.

Prvo nuklearno postrojenje za pogon podmornica primenjeno je još 1955. godine u Sjedinjenim Američkim državama. Podvodna brzina ove podmornice *Nautilus* iznosila je 45km/h. Interesantno je napomenuti da kao rezervni pogon i na ovoj podmornici postoji dizel električni pogon.

Rezervno pogonsko postrojenje [06] je isto kao i kod drugih dizel električnih pogona podmornica. Poseduje snagu 200 - 350kW što omogućava brzinu od oko 10km/h u površinskoj ili šnorkel plovidbi. Pored toga, postoje i akumulatorske baterije koje omogućavaju izvesno autonomno kretanje.

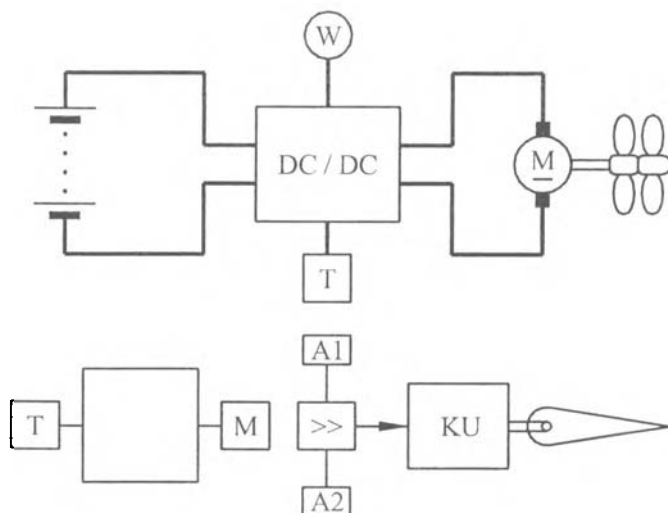
#### **14.07. Torpeda sa električnim pogonom**

Torpeda su projektili sa autonomnim pogonom, namenjena uništavanju stacionarnih i pokretnih ciljeva na moru i kopnu. Sastoje se od eksplozivnog punjenja, pogonskog i upravljačkog dela. Prema sredstvu odakle se lansira, mogu biti podmornička, brodska i vazduhoplovna. U Ratnoj mornarici se primenjuju podmornička i brodska torpeda.

Mada postoje nekoliko vrsta pogonskih uređaja podmorničkih torpeda, do danas su se zadržala podmornička torpeda sa električnim pogonom. Osnovna prednost ovog pogona u odnosu na druga je da pri kretanju i aktiviranju pogona nije dolazilo do izlaza nusprodukata iz pogonskog uređaja, a to znači ni do traga na površini vode koji bi otkrivali položaj torpeda. Pored toga, prisustvo električne energije omogućavalo je automatsko upravljanje po dubini i pravcu na podvodnom putu do cilja.



Pogon torpeda baziran je uglavnom na gasu pod pritiskom, koji posle sagorevanja i pretvaranja energije u mehaničku, potrebnu za obrtanje propelera, izlazi na površinu vode ostavljajući jasan, vidljiv trag. Ovo je uglavnom bio osnovni razlog pojave električnog pogona koji nije ostavljao trag za sobom pri plovidbi.



Slika 122. Šematski prikaz električnog torpeda

W- senzor uključenja pogona propelera T-vremenski relej za obustavljanje pogona  
 K – kontaktni senzor M – magnetni senzor aktiviranja bojeve glave  
 A1 i A2 – akustički senzori KU – kormilarski uredjaj

Električni torpedo, valjkastog i napred zaobljenog oblika se sastoji uglavnom od tri osnovna dela. U prednjem delu je eksplozivno punjenje ili bojeva glava, u srednjem delu je pogonski uredjaj, a na kraju je uredjaj za kormilarenje po smeru kretanja i dubini.

Za vreme Prvog svetskog rata, Nemei su razvili efikasne mine sa magnetskim upaljačem (detonatorom). Princip rada detonatora zasnivao se na kompasu sa iglom koja se kretala. Kada bi se torpedo nalazio ispod trupa čeličnog broda magnetska igla bi se zaljuljala, aktivirali bi se električni kontakti, tako da je mina eksplodirala. Pre drugog svetskog rata napravljen je i osnovni magnetski detonator. U indukcijom kalemu se generisala elektromotorna sila koja se menjala kada je torpedo prolazilo kroz ili ispod ciljnog magnetskog polja. Ova razlika bi se pojačavala dok se ne bi aktiviralo paljene. U početku je rešenje bilo dosta komplikovano ali je kasnije usavršeno.

Pogonski uredjaj torpeda sa električnim pogonom sastoji se od akumulatorske baterije, elektromotora na čijem vratilu se nalazi propeler i regulatora brzine.

Mada se kod nekih torpeda ugrađuju regulatori brzine, najčešće se električni pogon aktivira direktnim uključanjem elektromotora na akumulatorsku bateriju i to onog trenutka kada se torpedo nade u vodi. Vremenski uređaj posle određenog vremena, posebno ako torpedo ne pronade cilj, blokira rad regulatora brzine i obustavlja kretanje torpeda [07] i [08].

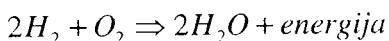
Kod akustičnog navodjenja koriste se podvodni mikrofoni postavljeni po obe uzdužne strane torpeda. Željeni pravac se dobija kada su signali sa obe strane jednaki i položaj za kormilarenje je u neutralnom položaju.

Najnovija laka torpeda NATO standarda [09] imaju manji kalibar prvenstveno zahvaljujući elektrohemijском izvoru električne energije. Za napajanje se koristi poseban tip baterija koji kao elektrolit koristi morsku vodu. Interesantno je navesti da se ovaj tip akumulatorskih baterija jedno vreme razvijao intenzivno i u našoj zemlji [10]. Napajan iz aluminijum-srebro oksid baterije, sa morskom vodom kao elektrolitom, torpedo se pokreće brzinom preko 50 čvorova. Visokobrzinski motor bez četkica poseduje mogućnost regulacije brzine i pokreće višekrilni mlazni propulzor automatski odabranom brzinom u skladu sa fazom upravljanja. Torpedo radi bez problema u vodi dubine preko 1000m, kao i u plitkoj vodi do 25m a omogućavajući sposobnost upravljanja plovidbom sve do 3m.

#### 14.08. AIP - Gorivne ćelije (elektrohemijски generatori)

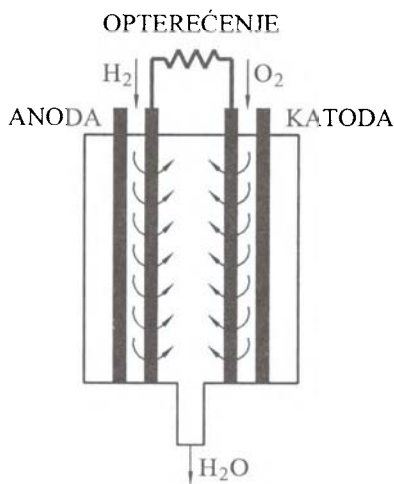
Osnovni problem koji prati podvodnu plovidbu podmornice vezan je za "rezervoar akumulisane energije". Postojeće akumulatorske baterije, i pored toga što su posebno razvijene za ovu primenu, imaju dosta mana u eksploataciji. Napori naučnika usmereni su upravo zbog toga na pronalaženje potpuno novog principa za uskladištenje energije radi podvodne plovidbe. Iz istraživanja sa svemirskog programa proizašao je sistem gorivnih ćelija koji se već primenjuje u eksperimentalnim pogonima [11].

Gorivna ćelija je elektrohemijски uređaj koji služi za pretvaranje hemijske energije u jednosmernu struju. Princip rada ovog uređaja je suprotan od rada elektrolizera i sastoji se od dve elektrode između kojih je elektrolit. Elektrode su od elektrolizera odvojene separatorima, tako da se u taj prostor ubacuju gasovi, najčešće vodonik i kiseonik. Na anodi se vrši oksidacija a na katodi redukcija goriva. Konačan proizvod reakcije je jednosmerna struja u spoljnom kolu između elektroda, i voda u skladu sa jednačinom:



Sam naziv gorivna ćelija proizašao je iz činjenice da gorivo direktno sagoreva uz pretvaranje hemijske u električnu energiju. Prednosti gorivnih ćelija su:

- Potpuno odsustvo bilo kakvih štetnih hemijskih materija
- Visok stepen korisnosti
- Niska temperatura reakcije



Slika 123. Šematski izgled gorivne ćelije

Zbog toga se može očekivati šira primena [12-13] ovih “rezervoara energije” na plovnim objektima i podmornicama.

Američka mornarica razvija prototip nove podmornice za vojne namene i planira da se počne sa narudžbinama početkom ovog veka. Za tu namenu razvijena je verzija prototipa elektromotora se permanentnim magnetima [14] snage oko 18.4MW. Ovaj prototip motora izabrala je US mornarica kao standardni proizvod koji se može koristiti i u vojnim i komercijalnim brodovima. Pored toga, razvijeni su i savremeni uređaji za regulaciju brzine obrtanja motora sa permanentnim magnetima. Na ovaj način dobiće se veći stepen iskorišćenja pogonskog elektromotora, a time i povećanje autonomnog radijusa kretanja podmornice. Pored toga, eliminisali bi se problemi sa varničenjem koje stvara jednosemtni elektromotor, smanjilo bi se održavanje pogonskog agregata kao i problemi sa korozijom komutatora.

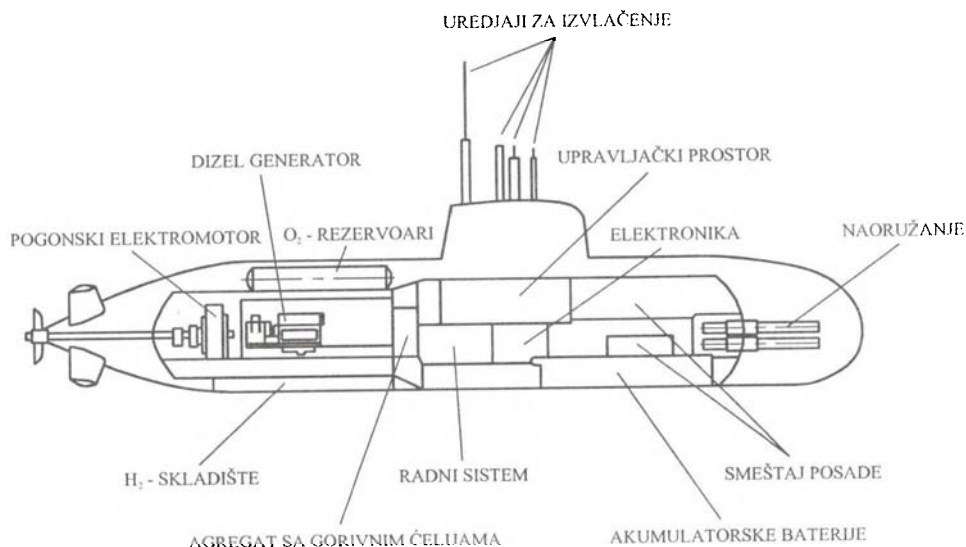
## 14.09. Savremene podmornice

Savremene podmornice odlikuju se velikim autonomnim razdaljinama podvodne plovidbe u prostoru dejstvovanja. Razvijaju se nove podmornice u NATO savezu, kao i kod Rusa.

Što se pogona tiče, i jedni i drugi prave podmornice sa elektrohemijskim generatorima (AIP sistemom).

U212 [15] podmornice su opremljene sa 6 torpeda. Pogonski sistem podmornice sastoji se od konvencionalnog sistema koji se sastoji od dizel generagora i olovnih akumulatorskih baterija i sistema sa gorivnim ćelijama ili propulzija nezavisna od vazduha (AIP – air independent propulsion) koja se koristi za tihu, sporu podvodnu plovidbu sa gorivnim ćelijama opremljenim sa kiseonikom i vodonikom. Sistem poseduje 9 gorivnih ćelija opremljenih sa polimernim elektrolitskim membranama (PEM) svaka snage 30 – 50kW.

Za veće brzine, spoj se pravi sa visokoučinskim olovnim akumulatorskim baterijama. Dizel motor pokreće generator za dopunjavanje baterijske instalacije na nižoj od dve palube na prednjem delu podmornice. Dizel električno postorojenje je postavljeno na prigušnim palubnim platformama sa duplim elastičnim držačima za buku i izolaciju od vibracije. Motor za pokretanje propelera je direktno spojen na sedmokrilni sabljasti propler.



Slika 124. Šematski izgled savremene podmornice U212

Tip 214 ima povećanu dubinu ronjenja od preko 400m usled poboljšanja materijala trupa. Posadu sačinjava 30 osoba zajedno sa 7 oficira. Dužina trupa je 65m a deplasman 1.700 tona. Četiri od osam torpednih cevi biće sposobno za izbacivanje torpeda. Podvodna brzina krstarenja iznosi 6 čvorova. Radijus plovidbe je 12.000 nautičkih milja. Marševska brzina 15 do 20 čvorova. Trajanje misije do 12 nedelja. Konstantno potopljen 3 nedelje bez šnorkela.

Osobine AIP sistema su porasle sa dve Siemens PEM gorivne ćelije [16] koje proizvode 120kW po modulu i daju mogućnost podmornici podvodnu plovidbu od dve nedelje. Oblik trupa se dalje optimizira za hidrodinamičke i nevidljive karakteristike i nižu buku propelera kombinovanu da smanji podmorničine akustične oznake.

Integrirani podvodni sistem senzora integriše sve senzore, komande i kontrolne funkcije ukrcane u podmornicu. Senzori postavljeni na podmornicu sastoje se od sonarnog sistema, periskopa za napad i optroničkog jarbola

Razmatrajući potrebe u 21. veku, Centralni projektni biro za pomorsko inženjerstvo RUBIN, projektovao je zadnju nenuklearnu podmornicu 4-te generacije, Amur 1650 [17]. Amur 1650 je jednotrupna podmornica, podeljena na pet komora. Posедуje jednovratilni električni pogon.

Prvobitno od 1980. godine, razvijena je treća generacija dizel električnih podmornica. Projekat 877 EKM i sledeća modifikovana verzija, Projekat 636 (klasa Kilo prema NATO specifikaciji). Obzirom na akustičku nečujnost ovog tipa podmornice, veruje se da nema premca u svetu. Vojni posmatrači ocenili su Kilo klasu podmornica kao “crnu rupu” u okeanu.

Električni pogonski motor je sa permanentnim magnetima i sa visokim stepenom iskorišćenja. U kombinaciji sa akumulatorskim baterijama velikog kapaciteta obezbeđeno je da Amur-1650 u podvodnoj plovidbi ima autonoman radijus plovidbe od 650 milja pri ekonomskoj brzini [18], a stim u skladu trajanje podvodne izdržljivosti nije manje od 9 dana.

Snabdevanje električnom energijom sa kojom se opskrbljuje Amur-1650 je napravljeno sa AIP postojenjem koje se sastoji od:

- Elektrohemijskog generatora
- Intermetalnog skladišta vodonika i sistema za punjenje
- Skladišta rashladjenog kiseonika i sistema za punjenje
- Protivpožarnog i protiveksplozivnog sistema
- Termostatičkog regulacionog sistema
- Upravljačkog sistema
- Sistema za napajanje

Podmornica je dugačka 67m, široka 7,1m i ima masu 1765t. Posедуje 6 torpednih cevi i 18 torpeda prečnika 533mm. Maksimalna podvodna brzina iznosi 21 čvor, maksimalna dubina plovitbe iznosi 250m. Posadu sačinjava 34 osobe. Izdržljivost je 45 dana a u podvodnoj plovidbi pri ekonomskoj brzini iznosi 650milja.

Interesantno je navesti [19] i da male turističke podmornice, koje mogu da postignu dubinu ronjenja do 6.000m imaju električni pogon. Pogonski jednosmerni elektromotori napajaju se iz akumulatorskih baterija, ali se vrše pripreme za prelaz na gorivne ćelije.

## 14.10. Literatura

01. Korbar A., Pogonsko postrojenje podmornice, Tehnička enciklopedija, 10, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1986, 472-474.
02. Jovanović P., Đorđević N., Brodogradnja i žilavost broda, Beograd, 1997, 299.
03. Sarevski T., Brodomaštinstvo, Savezni sekretarijat za narodnu odbranu: Mornaričkotehnička uprava, Beograd, 1982, 226-230.
04. - The Fleet Type Submarine, <http://www.maritime.org/systems.htm>, Navpers 16160, June 1946.
05. Kormilitsin Y., Amur Family Submarines, Copyright (c) Military Parade JSC, 1997.
06. Kuzevski P., Podmorničarstvo, SSNO - Uprava Ratne mornarice, Beograd, 1977, 204-205.
07. Županski Ž., Torpedo, Pomorska enciklopedija, vol. VII, 560- 566.
08. <http://www.Pon.Military.com> (different articles)
09. <http://www.naval-technology.com/contractors/missiles/eurotorp/index.html>
10. Despić A., Milanović P., Aluminium-air battery for electric vehicles, Recueil des travaux de L'Institute des sciences techniques de L'Academie serbie des sciences et arts, Belgrade, 1979, 1-18.
11. Schmal J. Kluiters C.E., Barendrecht L.P., Testing of a De Nora polymer electrolyte fuel cell stack of 1kW for naval applications, Journal of Power Sources 61, 1996, 255-257.
12. Schmid W., Electrical System, Marine engineering, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1992, 728.
13. Sattler G., Fuel cells going on board, Journal of Power Sources 86, 2000, 61 -- 67.
14. - , US develops permanent magnet propulsion, The Motor Ship, avgust 1995, 54.
15. Klyachko L., Yefremenko V., Niches for Russian shipbuilding industry on the world market, Copyright © Military Parade JSC, 1998.
16. Sattler G., PEFC-s for naval ships and submarines: many tasks, one solution, Journal of Power Sources 71, 1998, 144 -- 149.

17. Kormilitsin Y., AMUR-1650: Russia's 21st-century non-nuclear submarine - Copyright © Military Parade JSC, 01 March 2001
18. Zaharov I.G., Roli voenoga korablestroenia v obespečenii kompleksnoga razvitia sudostroenia Rosii v savremennih usloviah, Sudostroenie, Sankt-Petersburg, 739, 2001, 21 – 26.
19. - , From research to Medicine and Tourism , Germanisher Lloyd Magazin, Underwater technology, Operating 24 / 7, number 1, 2002, 22 – 24.

## ***15. RAZMAGNETISANJE I KONTROLA BRODSKOG MAGNETIZMA***

Razmagnetisanje broda je postupak kojim se brodski magnetizam, nastao indukcijom zemaljskog magnetizma u metalnim delovima brodske trupe, smanjuje ili dovodi u tolerantne granice. Primena razmagnetisanja brodova počela je u Drugom svetskom ratu sa pojavom magnetskih mina koje su Nemci polagali od septembra 1943 na plovnim putevima istočne Engleske i na ušću Temze. U prva tri meseca bila su potopljena 44 saveznička broda. Kada je konačno bio upoznat princip rada i paljibeni sistem magnetskih mina, pronaden je metod za zaštitu brodova nazvan "Degaussing" dobivši simbolično ime po tadašnjoj jedinici za magnetsku indukciju Gaus.

Magnetske mine polagane su na dno do dubine oko 40 - 50 m jer se za veće dubine zahteva daleko veća osetljivost paljbenog sistema i veće eksplozivno punjenje čime mine postaju glomazne i nepodesne za rukovanje. Primena sidrenih nekontaktnih mina doprinela je da se polaganje mina može vršiti do dubina od preko 500 m.

### **15.01. Magnetsko polje zemlje**

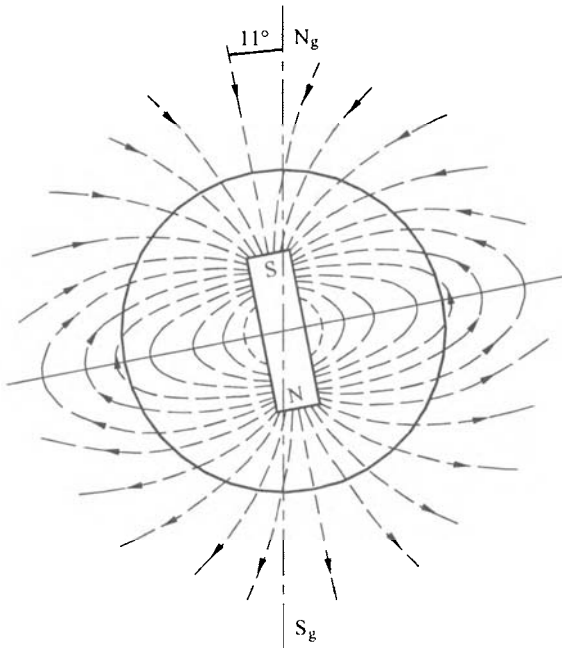
Jedna od karakteristika zemlje je njeno magnetsko polje. Magnetsko polje zemlje usmereno je u pravcu sever - jug i može da se aproksimira magnetom koji je postavljen u centar zemlje (slika 120) i koji je u odnosu na osu rotacije pomeren za oko  $11^\circ$ . Tačke na površini zemlje kroz koje prolazi osa magnetna zovu se magnetski polovi zemlje i karakteristika je da su u tim tačkama silnice magnetskog polja normalne u odnosu na površinu zemlje. Na ekvatoru postoji samo horizontalna komponenta magnetskog polja. Oko 90% magnetskog polja zemlje potiče od magnetskog dipola a preostalih 10% potiče od drugih uzroka, prvenstveno od nekih minerala koji imaju osobinu da se trajno magnetišu. Zbog ovoga dolazi do nehomogenosti magnetskog polja zemlje koje se naziva magnetska anomalija. Ona je dobro su poznata i označena je na magnetskim kartama.

Jačina vektora magnetskog polja na polovima je oko  $51 A/m$  a na ekvatoru je oko  $27,8 A/m$ . Kako je magnetska permeabilnost vakuuma  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ ,



intenzitet vektora magnetske indukcije na polovima iznosi  $64\mu T$  a na ekvatoru  $35\mu T$ . Brod kao veliki feromagnetski materijal u sredini gde se nalazi, menja tj deformiše zemljino magnetsko polje. Time istovremeno dolazi i do magnetisanja broda.

Merenje magnetskog polja broda vrši se komplikovanom aparaturom na bazi merenja magnetske indukcije. Osetljivost magnetometara iznosi i do  $1\mu T$ , jer je i današnja osetljivost nekontaktne magnetne mine [01] oko  $2nT/s$  (što je već na nivou zemljinog magnetskog polja).



Slika 125. Zemljino magnetsko polje

## 15.02. Magnetsko polje broda

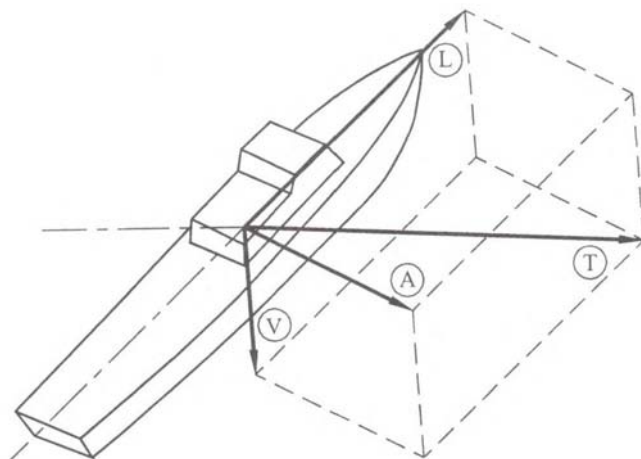
Brod se ponaša kao veliki magnet zbog magnetskog materijala koji se koristi za pravljenje njegovog trupa i mašinskog postrojenja.

Namagnetisanje broda koje nastaje pod uticajem zemljinog magnetskog polja na brodski čelik u toku gradnje broda a koji se pri plovidbi ne menja zove se permanentni brodski magnetizam. Deo namagnetisanja broda koji se tokom plovidbe menja u funkciji položaja broda naziva se indukovani brodski magnetizam.

Tabela 11. Udeo magnetizma u brodskom trupu[02]

VM Vertikalni magnetizam	Permanentni	25 - 30 %
	Indukovani	70 - 75 %
LM Uzdužni magnetizam	Permanentni	65 - 75 %
	Indukovani	25 - 35 %
AM Poprečni magnetizam	Permanentni	25 %
	Indukovani	75 %

Brodski magnetizam nastao zbog delovanja zemljinog magnetskog polja ima tri komponente magnetskog polja koje se nazivaju vertikalni, poprečni i uzdužni magnetizam. Pravci delovanja ovih komponenta magnetskog polja prikazani su na slici 121. Za brod izgrađen na uobičajeni način na našem geografskom položaju procenat učešća permanentnog i indukovanog magnetizma za pojedine komponente u brodskom trupu prikazan je u tabeli 11.



Slika 126. Pravci delovanja zemljinog magnetskog polja na brod

Razmagnetisanjem broda sprečava se otkrivanje broda i on se zaštićuje od nekontaktnih magnetskih podvodnih mina.

### 15.03. Merenje brodskog magnetizma

Merenje brodskog magnetskog polja može se izvesti dok brod plovi ili stoji.

U prvom slučaju mogu postojati dve metode: sa jednom petljom ili sa više solenoida postavljenih po dnu akvatorija a ispod pravca kretanja broda. U oba slučaja postoji kontrolno merica stanica sa fluksmetrom postavljenim na kopnu i

petljom ili solenoidima položenim po dnu akvatorija. Plovidbom broda iznad petlje indukuje se određeni napon kao mera namagnetisanja broda. Taj podatak ne može služiti za tačnu analizu brodskog magnetskog polja. Kontrolno merna stanica sa solenoidima poseduje 8 ili više solenoida postavljenih po dnu. I u ovom slučaju meri se fluks ali veći broj mernih mesta ispod broda daje mogućnost tačnije analize izvora magnetskog polja. U oba slučaja, za rad sa ovom aparaturom potrebna je posebna stručnost pri merenju i podešavanju instrumenata.

Plovidbom broda iznad petlje ili solenoida, brodski magnetizam stvara fluks vektora magnetske indukcije kroz površinu petlje ili solenoida koji se može odrediti na osnovu formule

$$\Phi = \oint_l B \cdot ds$$

Indukovana elektromagnetska sila u petlji ili solenoidu lako se može odrediti na osnovu Faradejevog zakona elektromagnetske indukcije.

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Pri ovome se moraju posedovati tačni podaci o brzini broda koji plovi iznad mernih solenoida i njihovom rastojanju od trupa broda.

U drugom slučaju koristi se savremena metoda merenja brodskog magnetizma pomoću magnetometerskih sonda koje se postavljaju po dnu ispod broda. Broj i dubina postavljanja ovih sonda zavisi od veličine broda. Na ovaj način se merenje brodskog magnetizma može meriti i prenosnim instrumentima.

#### 15.04. Razmagnetisanje broda

Razmagnetisanje brodova je određeni postupak u cilju smanjenja i do njegovog neutralisanja, brodskog magnetizma. Standardno postoje određeni postupci nazvani po engleskoj terminologiji: Deperming, flešing i vajping [03]. Za razmagnetisanje se koriste plovne i kopnene stanice za razmagnetisanje brodova. Sam postupak vrši se jednosmernim generatorima snage više stotina  $kW$ , relativno niskim naponima ali strujama do više hiljada ampera. Za postupak razmagnetisanja broda koriste se kablovi velikih prečnih preseka.

Oprema za kompenzaciju brodskog magnetizma zavisi od namene broda ali se kod nekih specijalnih brodova, ugrađuju navojci u konstrukciju broda još u fazi

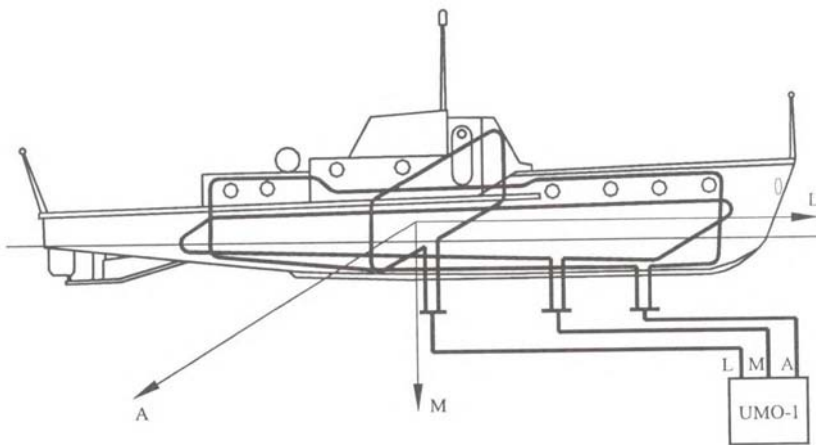
novogradnje. Osnovni sistem za kompenzaciju broskog magnetizma (slika 122) čini nekoliko fiksno postavljenih navojaka za demagnetizaciju.

"M" (main) navojak je horizontalno postavljena kablovska petlja u visini vodne linije. Njime se kompenzuje vertikalni magnetizam.

"A" (athwartship) navojak predstavlja vertikalnu kablovska petlju paralelnu sa kobilicom broda. Ovaj navojak smanjuje poprečni permanentni i indukovani magnetizam.

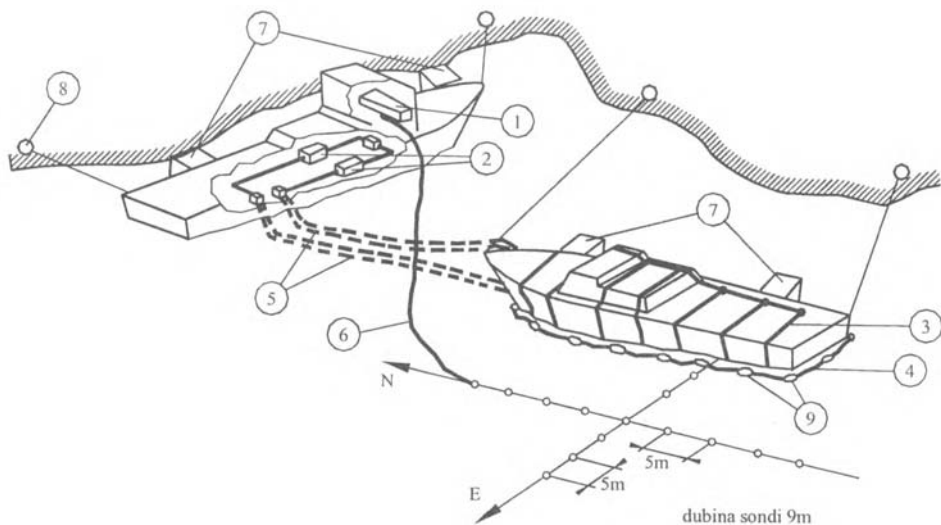
"L" (longitudinal) navojak predstavlja kablovske navojke normalne na uzdužnu osu broda a koji kompenzuje uzdužni indukovani i permanentni magnetizam broda.

Na minolovcu se postavljaju i pomoćni navojci kao što je na primer "F-Q" navojci koji se postavljaju na pramčanom i krlenom delu ispod palube. Lokalno kompenzuju uzdužni magnetizam na ovim delovima.



Slika 127. Fiksno ugrađeni navojci za demagnetizaciju

Razmagnetisanje se može obaviti iz kopnenih ili plovećih stanica za razmagnetisanje [04]. Kopnene se primenjuju za veće, a plovne za manje brodove. U oba slučaja, posle merenje broskog magnetizma, brod se obavija kablovima oko trupa po čitavoj dužini kao i u visine vodne linije. Uključenjem impulsne struje velikog intenziteta, u trajanju 4–6s, kroz ove kablove, stvara se magnetsko polje suprotno od smera magnetskog polja broda tako da se brodski magnetizam poništava.



Slika 128. Razmagnetisanje broda pomoću plovne stanice za razmagnetisanje  
 1.Merna tehnika 2.Energetski deo 3.X-solenoid 4.Z-solenoid 5.Napojni kablovi  
 6.Kablovi sonde 7.Stubovi oslonca 8.Bitve (vez) 9.Plovcji 10.Sonde

Sam postupak kompenzacije se može raditi sa ručnim, poluautomatskim i automatskim upravljanjem. Prva dva postupka koriste se za razmagnetisanje drugih brodova, ali minolovci moraju imati automatsko upravljanje. Pri automatskom upravljanju informacija o brodskom magnetizmu dobija se preko troosne magnetometarske sonde i automatski se podešavaju struje kroz određene navojke.

## 15.05. Literatura

01. Herbert S.L., (Beverley J.A.), Degaussing, Marine engineering, vol. 2, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1944, 769-771.
02. Stojković S., Organizacija i funkcionisanje sistema za razmagnetisanje i kontrolu brodskog magnetizma, Diplomski rad KŠRM, Beograd, 1994, 4-6.
03. Harrington R.L., Degaussing, Marine Engineering, SNAME, New York, 1992, 769 – 771.
04. Perić J., Demagnetizacija, Pomorska enciklopedija, Zagreb, 1975, 154-157.

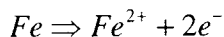
## **16.    **AKTIVNA KATODNA I AKTIVNA VEGETATIVNA ZAŠTITA****

Korozija je spontano razaranje materijala pri uzajamnom delovanju tog materijala sa okolinom. Proces korozije metala u prisustvu elektrolita je elektrohemijski proces, jer je korozija posledica težnje metala da se na njegovoj površini vrši oksidacija elektrona, kada dođu u dodir sa elektrolitičkim rastvorima. Kao rezultat tog dejstva, dolazi do postepene destrukcije materijala. Ovaj proces u velikoj meri utiče na vek trajanja svih plovnih objekata i metalnih konstrukcija trajno ili povremeno potopljenih u vodi.

Obrastanje broskog trupa predstavlja veliki problem posebno u ekonomskom pogledu. Na jednoj strani usled neravnomernog trupa dolazi do smanjivanja brzine broda ili plovnog objekta, a na drugoj strani obrastanje predstavlja osnov za biološku koroziju. Na ratnim brodovima, zbog dugog stajanja u lukama poseban problem predstavlja obrastanje usled čega se podvodni elektronski uređaji onesposobljavaju i blokiraju. Primećeno je da na brodovima koji se nalaze stalno u pogonu sa brzinama plovidbe većim od  $1,5m/s$  slabo dolazi do obrastanja. Pored toga, i kraćim boravkom u slatkoj vodi dolazi do znatnog smanjenja obrastanja.

### **16.01. Normalni električni potencijali metala**

Ako se metal nalazi u kontaktu sa elektrolitom, dolazi do delimičnog rastvaranja ovog metala. Proces rastvaranja odvija se na taj način, da atomi metala, kao pozitivni joni prelaze u rastvor ostavljajući na ploči jedan ili više elektrona, pri čemu je ovaj broj određen prirodnim osobinama metala. Na primer, za slučaj gvožđa kao metala koji se najčešće primenjuje u brodogradnji



Na taj način, pri rastvaranju metala, rastvor postaje pozitivno naelektrisan a metal negativno. Kako se ova naelektrisanja privlače, to se na granici metal-rastvor formira dvojni električni sloj. Ravnotežna potencijalna razlika zavisi od prirode metala, prirode elektrolita i početne koncentracije jona metala u rastvoru. Ova potencijalna razlika između tačke u elektrolitu dovoljno daleko gde se ne oseća

dejstvo električnog polja ili promena potencijala i samog metala, naziva se elektrodni potencijal metala. Pošto se ovi potencijali teško mogu izmeriti sami, mere se posredno preko neke druge, referentne elektrode. I standardno se daju izmereni potencijali pomoću normalne vodonikove elektrode, pa se nazivaju normalni elektrodni potencijali. U tabeli 12 prikazani su standardni ili normalni potencijali nekih metala u vodenim rastvorima odgovarajućih prostih jona u odnosu na standardnu vodoničnu elektrodu.

Tabela 12. Normalni elektrohemijski potencijali nekih metala u vodenim rastvorima odgovarajućih prostih jona na  $25^{\circ}\text{C}$  koji mogu naći primenu u brodogradnji [01].

Metal	Potencijal (V)
$Mg \Rightarrow Mg^{2+} + 2e^{-}$	-2,370
$Al \Rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$	-1,660
$Zn \Rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$	-0,762
$Fe \Rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$	-0,440
$Ni \Rightarrow Ni^{2+} + 2e^{-}$	-0,250
$Sn \Rightarrow Sn^{2+} + 2e^{-}$	-0,136
$Pb \Rightarrow Pb^{2+} + 2e^{-}$	-0,126
$Cu \Rightarrow Cu^{2+} + 2e^{-}$	+0,337

## 16.02. Prirodan proces korozije i faktori koji utiču na koroziju

Na delu trupa broda koji se ponaša kao anoda odvija se hemijski proces reakcije jona gvožđa i hidroksilnih jona iz vode.



Konačan proizvod anodnog rastvaranja gvožđa je nerastvoreni hidroksidni oksid trovalentnog gvožđa koji se taloži na površini metala koji podleže koroziji. Elektroni se kreću kroz gvožđe od anodnog dela (dela se negativnim potencijalom) ka katodnom delu. S obzirom da sa anode odlaze elektroni, to će se oko čelika formirati sloj sa elektronima, tako da će potencijal čelika trupa u odnosu na referentnu tačku u beskonačnosti biti negativan.

Osnovna katodna reakcija je redukcija kiseonika jer morska voda sadrži visoku koncentraciju rastvorenog vodonika, pa je sledeća reakcija



dominantna reakcija na katodi lokalnog galvanskog elementa.

Tako da je opšta ili sumarna reakcija korozije:



Kod prirodnog procesa korozije, na anodnom delu metala javlja se hidroksidni oksid trovalentnog gvožđa a na katodi vodonik.

Korozija zvisi od samog materijala ili od uslova okoline tako da se može izvršiti opšta podela faktora koji utiču na koroziju na:

**Unutrašnje faktore** (potencijal metala u vodi, heterogenost materijala, unutrašnja naprezanja, električna otpornost metala, nekorektna zaštita metala)

### Spoljašnje faktore

- Kao osnovni faktor, *pH* faktor ili eksponent negativne koncentracije vodonikovih jona, ima vrednost na moru od 7,3 do 8,6. U rekama se nalazi u opsegu 6 do 9. Eksperimenti su pokazali da u ovom opsegu promene *pH* vrednosti korozija više zavisi od količine rastvorenog kisonika nego od ove vrednosti *pH*.
- Morska voda sa električnom provodljivošću u Jadranskom moru  $\sigma = (1-5)Sm^{-1}$  ima znatno veće prirodne uslove za koroziju od rečne (Save i Dunava) sa električnom provodnošću  $\sigma = (0,020-0,060)Sm^{-1}$ .
- Oksidacija je povećanje valencije nekog elementa tako da prisustvo kisonika kao najčešćeg agensa utiče na povećanje korozije. Međutim, nekada može uticati na povećanje pasivnosti ako se stvori oksid koji štiti metal od dalje korozije. Na brodu je u principu najveća korozija na mestima gde je i koncentracija rastvorenog kisonika najveća, a to znači na granici vode i vazduha kao i u prostoru oko propelera.
- U kaljuži broda postoje zaštitni filmovi od goriva, masti i ulja koji dosta dobro štite unutrašnju površinu broda od korozije. Zaštitni filmovi mogu biti debeli i tanki. Često tanji zaštitni filmovi mogu dati bolju zaštitu od debelih.
- Temperatura posredno utiče na koroziju. Povećava disocijaciju vode i smanjuje *pH* vrednost. Električna provodnost raste a zaštitni filmovi se bolje razlažu. Sumarno, može se reći da sa porastom temperature raste i aktivnost korozije.
- Pri velikim brzinama kretanja broda ili korozionog fluida oko metala, dolazi do erozije i uklanjanja zaštitnih filmova kao i do bržeg dovodenja agensa korozije, tako da se i sama korozija povećava.



- Heterogenost metala izaziva piting ili tačkastu koroziju.
- Od ostalih faktora bi trebalo spomenuti biokoroziju koju uglavnom stvaraju bakterije koje utiču na mikrobiokoroziju i u krajnjem slučaju utiču na obrastanje. Pored toga, primećeno je da više frekvencije i veće jačine zvuka povećavaju koroziju. Sunčeva svetlost takode povećava brzinu korozije. Postoji uticaj elektromagnetske indukcije što se najbolje može primeniti na propelerskom vratilu kada se obrće. Pored toga, postoji i efekat termospoja ako je jedna strana broda toplija a druga hladnija.

### 16.03. Pasivna i aktivna katodna zaštita (AKZ)

Intenzitet korozije se može smanjiti na dva načina. Stavljanjem izolacionog otpora između čelika i vode (premaži, ulje, plastika) ili postavljanjem određene prenapetosti ili prenapona (pasivna i aktivna katodna zaštita).

Korozija je posledica postojanja anodnih i katodnih površina. Primenjujući katodnu zaštitu uspostavlja se struja na takav način da struktura koja želi da se zaštiti, deluje kao katoda. Ako je zaštitna struja dovoljna, ni jedan deo strukture ne deluje kao anoda. Ali ovo zahteva uvođenje posebnih anoda. Gvožđe se može štiti posebnom elektromotornom silom dobijenom od posebnih anoda. Anode se prave od metala sa negativnijim potencijalom ( $Zn$ ,  $Al$  ili  $Mg$ ) i tokom vremena se razlažu do potpunog uništenja, tako da se ova zaštita naziva protektorska ili žrtvujuća. Nekada se naziva i pasivna jer se tokom vremena na nivo zaštite ne može uticati.

Najpouzdaniji, najkvalitetniji i najekonomičniji način zaštite metalnih delova i konstrukcija u morskoj ili rečnoj vodi danas se postiže sa aktivnom katodnom zaštitom u kombinaciji sa pasivnim premazima. Ovaj način je jako dobar jer se lako može prilagoditi određenim uslovima a kontroliše se na jednostavan i pouzdan način.

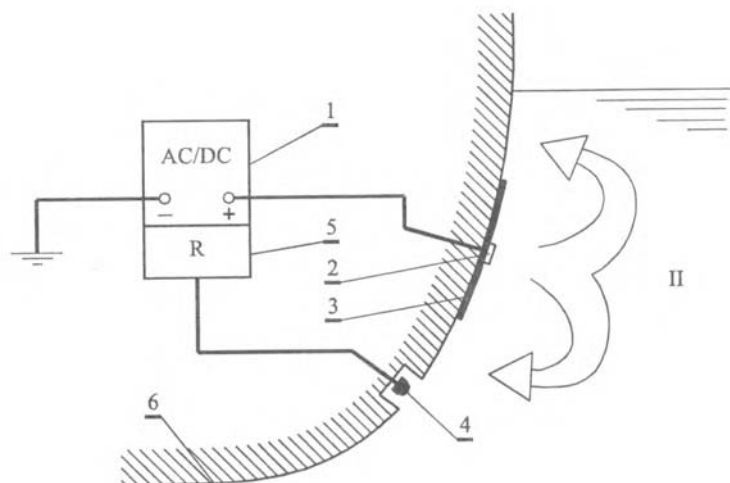
Aktivna katodna zaštita (AKZ) zasnovana je na kompenzaciji prirodne struje korozije pomoću kontra struje. Zaštitna struja prolazi kroz elektrolit do metalne površine koju treba zaštititi. Ova zaštitna struja deluje na lokalnu struju korozije a podešava se tako da ih delimično ili potpuno kompenzuje.

Na taj način će ukupna površina koju treba zaštititi, biti pretvorena u katodu čime se postiže da se štice metal ne razlaže. Danas se u svetu koriste različite anode u sistemu AKZ, od kojih su tzv. dimenziono stabilne anode na bazi titana, razvijene pre otprilike 15 godina, najčešće u upotrebi zbog mogućnosti dugotrajnog rada bez zamene (10, pa i više godina). Za anode sa dovedenom strujom obično se koristi inertan metal kao što je titan ( $Ti$ ), sa aktivnim prevlakama od oksida retkih metala ( $Ru - O$ ) u morskoj vodi. Za primenu u rečnoj vodi, najbolje je koristiti anode od

titana sa prevlakom od platine (*Pt*). Napon na elektrodama a time i izlazna struja sa elektroda mogu se podešavati u širokim granicama čime je omogućeno podešavanje zaštitne struje u određenom opsegu.

Osnovne komponente sistema aktivne katodne zaštite su anode, referentne elektrode i izvor jednosmerne struje, odnosno stanica katodne zaštite. Princip rada sistema aktivne katodne zaštite, bez obzira da li se primenjuje u rečnoj ili morskoj vodi, shematski je prikazan na slici 124.

Potencijal trupa broda se u svakom trenutku meri u odnosu na referentnu elektrodu (4) i pomoću regulacione jedinice (5) na stanici katodne zaštite (1) podešava se jednosmerna struja na izlazu iz ispravljača koja se preko anode (2) i morske ili rečne vode (II) usmerava prema trupu broda izazivajući katodnu polarizaciju trupa. Na taj način se potencijal trupa broda dovodi u oblast u kojoj je čelik zaštićen od korozije (npr.  $-1,00V$  u odnosu na  $Cu/CuSO_4$  referentnu elektrodu). Važna komponenta sistema aktivne katodne zaštite je okoloanodni ekran koji je napravljen od izolacionog materijala propisanih dimenzija i postavljen je oko anode. Okoloanodni ekran sprečava mogućnost prevelike katodne polarizacije čelika i u neposrednoj blizini anode, koja bi mogla izazvati proces izdvajanja vodonika i dovesti do vodonične krstosti materijala u okolini anode. Ovde treba naglasiti da anode i referentne elektrode ne smeju biti u kontaktu sa trupom broda, odnosno da se mora obezbediti propisana izolacija njihovog kontakta sa kablovima koji su postavljeni u unutrašnjosti broda.



Slika 129. Principijelna shema uređaja aktivne katodne zaštite  
 1. Stanica aktivne katodne zaštite 2. Anode 3. Okoloanodni ekran  
 4. Referentna anoda 5. Regulaciona jedinice 6. Trup broda

## 16.04. Merenje zaštitnog potencijala

Ova metoda koristi se za merenje potencijala brodskog trupa kada zaštita deluje i kad je nema. Važno je napomenuti da su svi potencijali izmereni u odnosu na referentnu tačku koja se nalazi u beskonačnosti. Zato će smerovi elektromotornih sila za trup broda kao i za referentnu elektrodu biti kao na slici. Visokoomski ommetar minus krajem spojen je na trup broda, a pozitivnim za referentnu elektrodu.

Kada je isključena stanica katodne zaštite, obavljena merenja pokazuju potencijal korozije brodskog trupa. U skladu sa II Kirhofovom pravilom primenjenim za slučaj prikazan na slici 123, može se napisati:

$$\Sigma E = U_m - E_{\text{Re}} + E_{\text{Fe}} = 0 \quad (16.04)$$

Ako je na primer referentna elektroda od cinka, a to znači da je njen normalni potencijal  $E_{\text{Re}} = -0,762V$ , videti tabelu 12, i ako je potencijal brodskog čelika  $E_{\text{Fe}} = -0,44V$ , (ista tabela), dobiće se očitavanje na visokoomskom voltmetru

$$U_m = E_{\text{Fe}} - E_{\text{Re}} = -0,762 - (-0,44) = -0,322V$$

Postavljanjem ovešanih protektora ili postepenim povećanjem izlaznog napona iz stanice katodne zaštite, mora se pokazivanje na mernom instrumentu polako menjati ka pozitivnijim vrednostima. Kada izmereni potencijal dostigne maksimalno dozvoljenu vrednost  $U_m = +0,15V$ , potencijal brodskog čelika u odnosu na standardnu vodoničnu elektrodu će iznositi:

$$E_{\text{Fe}} = E_{\text{Re}} - U_m = -0,762 - (+0,15) = -0,912V$$

I čelik će biti potpun zaštićen od korozije.

## 16.05. Kriterijum efikasnosti zaštite sistema aktivne katodne zaštite

Osnovni kriterijum aktivne katodne zaštite je zadovoljen ako je struja koja protiče u anodnom kolu smanjena na nulu ili ako ima malu vrednost u suprotnom smeru od struje pri prirodnoj koroziji. Ovaj uslov se često uprosečuje tako da se ističe da potrebna zaštitna gustina struje po jedinici podvodne površine šticehog metalnog objekta iznosi  $20mA/mm^2$ . Međutim, zaštitne struje se ne mogu praktično izmeriti, tako da se metoda merenja zaštitnih gustina struja ne može praktično realizovati.

Drugi metod je merenje potencijala šticeenog metala. Tabela 13, prikazuje zaštitne potencijale prema standardnoj vodoničnoj elektrodi za punu zaštitu za različite metale. Mogućnost merenja ovih parametara i njihovog menjanja tokom eksploatacije znatna je prednost u odnosu na pasivnu zaštitu čija se efikasnost može odrediti tek posle izvlačenja broda na dok.

Nezaštićen čelik ima prirodan potencijal korozije u rečnoj i morskoj vodi u opsegu ( $-350 - 450mV$ ) u odnosu na standardnu vodoničnu elektrodu. Potencijal čelika zaštićen brodskim premazima, a prema obavljenim merenjima je ( $-440mV$  vs. *SHE*) u odnosu na standardnu vodoničnu elektrodu. Ako se ovaj potencijal snizi za 100 do  $350mV$ , tako da iznosi ( $-550$  do  $-800mV$  vs. *SHE*) može se smatrati da je čelik zaštićen. Mada je uglavnom moguće naći samo granice efikasne katodne zaštite u literaturi [02], neki autori [03] vrše podelu ove oblasti. Tako da snižavanje potencijala za ( $50$  do  $250mV$ ) ispod  $-440mV$  predstavlja zonu katodne zaštite. Sniženje potencijala za ( $250$  do  $350mV$ ) predstavlja izvesnu prekomernu zaštitu, a prenapetosti ispod ove vrednosti pripadaju zoni prevetlike zaštite.

Tabela 13. Minimalni potencijali za katodnu zaštitu [04]

Metali	Referentne elektrode i uslovi za korišćenje			
	<i>Cu / CuSO<sub>4</sub></i>	<i>Ag / AgCl</i> kalijum hlorid	<i>Ag / AgCl</i> morska voda	<i>Zn</i> morska voda
<i>Fe</i> – aerobna sredina	-0,85	-0,75	-0,80	+0,25
<i>Fe</i> – anerobna sredina	-0,95	-0,85	-0,90	+0,15
<i>Al</i> – pozitivna granica	-0,95	-0,85	-0,90	+0,15
<i>Al</i> – negativna granica	-1,20	-1,10	-1,15	-0,10

Maksimalni kriterijum elektrohemijske zaštite može se dobiti na osnovu maksimalne prenapetosti metala kod koje još ne dolazi do razvijanja vodonika koji podiže boju i prodire u metal. Zbog ovog razloga, prenapetost najbliže tačke na metalnoj površini trupa od anode ne bi trebalo da pređe vrednost od  $600mV$  u odnosu na standardnu vodoničnu elektrodu.

Ova dva uslova daju i granice potrebnih prenapetosti za elektrohemijsku zaštitu trupova brodova napravljenih od brodskog čelika. U odnosu na *Ag / AgCl* mernu

elektrodu, optimalni opseg prenapona tačaka na trupu broda trebao bi da bude u granicama  $-550$  do  $-850mV$ .

Kvalitet zaštite ogleda se u manjim varijacijama ili u užem opsegu promene talasnosti potencijala. Ovo se može realizovati postavljanjem manjeg broja anoda ali sa većim okoloanodnim ekranima ili pomoću većeg broja anoda sa manjim strujama i manjim okoloanodnim ekranima.

Zbog znatno manje provodljivosti rečne vode zaštitna gustina struje je za rečnu vodu dva reda veličine manja od zaštitne gustine struje koja se mora primeniti u morskoj vodi [05-07]. Na osnovu obavljenih merenja, mogu se navesti specifični parametri potrebni za aktivnu katodnu zaštitu. Potrebna prosečna gustina struje radi zaštite brodskog čelika u morskoj vodi iznosi  $20mA/m^2$  a u rečnoj oko  $0,3mA/m^2$ . Izlazni napon iz stanice katodne zaštite u morskoj vodi iznosi od  $3-5V$  a u rečnoj vodi od  $8-15V$  (radi dobijanja iste prenapetosti na čeliku). Potrebna snaga radi zaštite jedinice površine brodskog čelika iznosi u morskoj vodi  $80mW/m^2$  a u rečnoj vodi  $3,6mW/m^2$ . Interesantno je napomenuti da je raspodela zaštitnog potencijala u morskoj vodi ravnomernija, što je posledica znatno veće provodljivosti morske vode.

## 16.06. Princip rada i osnovne karakteristike aktivne vegetativne zaštite

Posebna pogodnost pri radu sa elektrodama od titana (*Ti*) sa aktivnim prevlakama od rutenijum oksida (*RuO*), a pri aktivnoj katodnoj zaštiti, je da se pri proticanju struje kroz morsku vodu stvara hipohlorid koji ima fungicidno dejstvo. To znači da se na trupu broda uz anode javlja znatno manje obrastanja flore nego na drugim mestima [08-09]. Ovo je podjednako važan problem za brodove kao i za razne metalne konstrukcije u moru, tako da se za sada vrše dugoročna istraživanja u ovom pogledu.

Ako se naprave posebne ćelije u kojima se pojačava proces proticanja struje između elektroda koje se nalaze na bliskom rastojanju, dolazi do sledeće elektrohemijske reakcije:

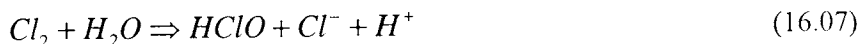
Na katodi se odigrava proces razlaganja vodonika:



Na anodi se odigrava sledeća reakcija:



Obzirom da je hlor jako aktivan, reaguje sa vodom stvarajući hipohlorastu kiselinu



A pošto ova kiselina trenutno podleže disocijaciji, javlja se hipohlorit.



Imajući u vidu da hipohlorit poseduje fungicidno dejstvo, primenom hlorinatora, uređaja gde je intenzivirano stvaranje hipohlorita, u velikoj meri moguće je smanjiti obrastanje od algi i školjki na podvodnim delovima plovnih objekata. Na taj način dobija se aktivna vegetativna zaštita (AVZ).

### 16.07. Moguće primene u brodogradnji

Radi zaštite brodova, podmornica i metalnih konstrukcija u morskoj vodi od korozije i obrastanja napravljeni su eksperimentalni sistemi za ispitivanje i dalje proučavanje [10-14]. Na brodu dizalici koji se pravi u Beogradu, postavljen je jedan takav sistem. Sistem aktivne katodne zaštite treba da se stalno nalazi u pogonu kako bi neprestano štiti trup broda od korozije. Sistem vegetativne zaštite oformljen je sa hlorinatorima koji se preko ograde broda spuštaju u vodu imajući u vidu da ovaj brod uglavnom stoji.

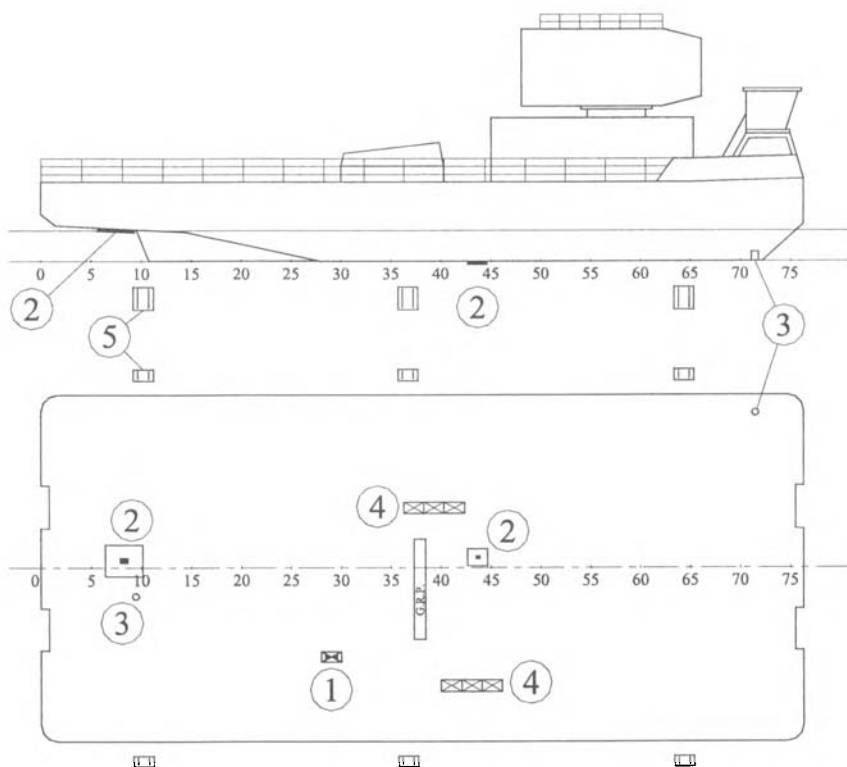
Obavljena ispitivanja i rezultati ispitivanja sistema aktivne katodne zaštite ukazuju da je ovo najefikasnija i najbolja zaštita brodova, plovnih brodova i konstrukcija u vodi, a dugoročno gledano i najisplativija. Upotrebom sistema aktivne katodne zaštite dobija se duže trajanje objekata koji se štiti, a javljaju se i znatno manji troškovi opravke zbog oštećenja uzrokovanih korozijom.

Mada postoji dosta prednosti ovog sistema zaštite, ukratko se može navesti da su osnovne sledeće:

- Kvalitetna i kontrolisana zaštita koja se može podešavati
- Smanjeno održavanje broda
- Dugotrajnost zaštite
- Niža eksploataciona cena

Cena koštanja sistema aktivne katodne zaštite je relativno niska ako se upoređi sa cenom objekta koja treba da se štiti, kao i sa posledicama koje korozija ostavlja.

Investicioni troškovi se isplate u kratkom roku od oko 8 godina pri čemu su troškovi napajanja strujom praktično zanemarljivi.



Slika 130. Sistem aktivne zaštite od korozije i obrastanja

1. Stanica aktivne katodne zaštite 2. Radne elektrode 3. Referentne elektrode za merenje potencijala 4. Ispravljači za aktivnu vegetativnu zaštitu 5. Hlorinatori

## 16.08. Propisi klasifikacionih društava

Stranim, a i delimično našim propisima potpuno je definisan sistem ugradnje, korišćenja i eksploatacije sistema aktivne katodne zaštite. Pošto zadnjih godina domaća tehnika kao i propisi malo kasne za svetskim dostignućima i standardima, to su kod nas za sada važeći propisi uglavnom svedeni na merenju potencijala, referentnim elektrodama i efikasnost katodne zaštite [15-16].

Značaj sistema aktivne katodne zaštite toliko je velik da su ga najveća klasifikaciona društva kao Lloyd [17], ugradila u svoja pravila i kod njegove primene daju određene beneficije pri gradnji broda.

Da bi se primenio sistem aktivne katodne zaštite, moraju se doneti na overu planovi smeštaja anoda i referentnih elektroda, sheme njihovog povezivanja kao i spajanje kormila i propelera radi izjednačavanja potencijala. Prostor gde kabl prolazi kroz oplatu trupa mora se raditi isključivo kroz mali koferdam (meduprostor). Kablovi koji spajaju anode ne treba voditi kroz tankove u kojima je lakozapaljivo ulje. Na mestima gde se kablovi vode kroz koferdame ili čiste balastne tankove tankera, moraju biti štice čeličnim cevima debljine oko 10mm.

Tabela 14. Dozvoljeno procentualno smanjenje debljine čelika kod sistema sa kontrolisanom korozijom

Deo broda	Dozvoljeno smanjenje debljine
Kobilica, dno i bočne strane, paluba. Dno i uzdužna ukrućenja palube	5 procenta
Dno i palubni nosači. Ivične površine tankova i suve pregrade zaštićene samo na jednoj strani	5 procenta
Strukturni delovi tanka minimalne debljine sem uljnih teretnih tankova i suvih tankova zaštićenih sa obe strane	Manja vrednost 1 mm ili 10 procenta
Uzdužne strane, ukrućenja pregrade (unutar zaštićenog prostora), i svi drugi strukturni delovi potpuno unutar prostora, ili koji formiraju granicu između dva zaštićena prostora.	10 procenta

Stranim propisima [13] preciznije su definisani uslovi primene, kao i ceo sistem primene aktivne katodne zaštite.

## 16.09. Literatura

01. Despić A.R., Dražić D.M., Tatić-Janjić O., Osnovi elektrohemijske nauke, Naučna knjiga, Beograd, 1970, 165.
02. British Standard Institution, Code of Practice for Cathodic protection, CP 1021, 1973.
03. Ashworth V., Booker C.J.L., Cathodic Protection: Theory and Practice, John Wiley and Sons limited Ellis Horwood Ltd, England, 1986, 28.
04. Bazzoni B., Faita G., Cathodic protection in natural environments, Journee electrochemic, Florence, 1985.



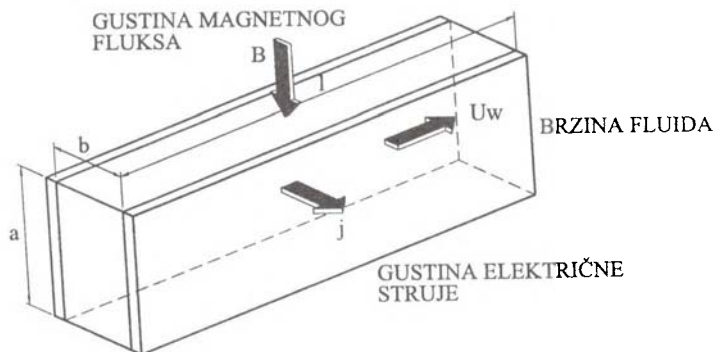
05. Nikolić Z., Metod za određivanje efikasnosti sistema aktivne katodne zaštite plovniha objekata od korozije, Doktorska disertacija, Beograd, 1995.
06. Nikolic. Z., Bilen. B., Impressed current protection in fresh water, Proceedings of the First European Inland Waterway navigation Conference, Budapest, 1999, 284 – 292.
07. Nikolic Z., Bilen B., Impressed current protection of ships in fresh water, International Shipbuilding Progress, Netherlands, 1999, vol.46, number 447, 227-290.
08. Krstajić N., Jović V., Bilen B., Nikolić Z., Zaštita brodova od korozije i obrastanja u morskoj vodi primenom katodne zaštite, Zaštita materijala, vol 35, broj I, 12-14, 1994.
09. Krstajić N., Jović V.D., Bilen B., Nikolić Z., An Attempt for Providing Simultaneous Cathodic Protection and Anti-Fouling of Ships in Sea Water, International Shipbuilding Progress, vol.39, number 419, 279-285, Netherlands, 1992.
10. Nikolić Z., Impressed current protection, Parts 7.2 i 7.3 in Monografi “News in river pushing technology”, Institute of technical sciences SASA, Belgrade, 1997, 75-80.
11. Nikolic Z., Bilen B., Savremena zaštita plovniha i stacionarnih objekata od korozije, Zbornik radova skupa “Vodni saobraćaj u 21. veku”, Beograd, 2.000, 409 – 414.
12. Krstajić N., Jović V., Bilen B., Nikolić Z., Stojković S., Aktivna katodna zaštita čeličnih konstrukcija u rečnoj i morskoj vodi, Vojnotehnički glasnik 6/96, Beograd, 1996, 721 – 729
13. Hrnjez Z. Nikolić Z., Korozija i savremena zaštita metalnih objekata u vodi, Novi glasnik VJ, 6/97, Beograd, 1997, 92 - 95.
14. Standard ratne mornarice, Efikasnost katodne zaštite na podvodnim površinama broskog trupa, SNO 2925, 1969.
15. Standard ratne mornarice, Mjerna elektroda bakar/bakreni sulfat, SNO 2952, 1969.
16. Lloyd Registar, Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 3, London, 1989, Ch 2.5.1.2.
17. British standards, Cathodic protection, (formarly CP 1021) 1991, 20.

## 17. MHD PROPULZIJA

Magnetohidrodinamička (MHD) propulzija je vrsta pogona plovnih objekata kod kojih se potisna sila ostvaruje interakcijom ili međusobnim dejstvom magnetskog i električnog polja. Osnovna karakteristika ove propulzije je da ne postoje pokretni delovi, a s tim u vezi ni buka propelera kao ni vibracije. Kao potpuno nova vrsta pogona plovnih objekata, magnetohidrodinamička propulzija (MHD) pojavila se skoro [01], i to zahvaljujući upravo nekim karakteristikama koje su izgledale pogodne za vojne primene ili pogone podmornica.

### 17.01. Princip rada i osnovne karakteristike

Poznato je da sam princip MHD propulzije predstavlja pokretanje morske vode pod uzajamnim delovanjem električnog i magnetnetskog polja. Kao interakcija ova dva polja dolazi do stvaranja čisto mehaničke sile koja pokreće morsku vodu u smeru označenom na slici 126. Normalno je da bi se plovni objekat kretao u skladu sa Njutnovim zakonom akcije i reakcije u suprotnom smeru.



Slika 131. Shematski prikaz principa rada MHD propulzora

Radi objašnjenja principa rada [02-04], posmatrajmo sliku na kojoj je prikazan zatvoren kanalski tip propulzora kod koga je magnetsko polje stvoreno superprovodnim magnetom u vertikalnom smeru, a struja se uspostavlja između elektroda i prikazana je u horizontalnom smeru.

Elektromagnetska sila koja deluje na morsku vodu, može se naći pomoću poznatog obrasca (4.08):

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B} \quad (17.01)$$

gde su:

$I$  - struja koja protiče između elektroda

$\vec{l}$  - vektor rastojanja između elektroda orijentisan u smeru proticanja struje

$\vec{B}$  - vektor gustina magnetskog fluksa (magnetska indukcija)

Polazeći od osnovne jednačine (3.01) za indukovanu elektromagnetsku silu:

$$E = l \cdot \vec{V} \cdot \vec{B}$$

pri čemu je  $\vec{V}$  vektor brzina proticanja elektroprovodnog fluida na mestu gde seče magnetske linije sila, i jednačine ravnoteže elektromagnetskih sila (5.04) za motorno opterećenje jednosmernih mašina:

$$E = U - \Sigma R \cdot I$$

lako se može izvesti obrazac za brzinu fluida

$$V = \frac{U - \Sigma R \cdot I}{l \cdot B} \quad (17.02)$$

gde je:

$U$  - napon jednosmernog izvora, a

$\Sigma R \cdot I$  - zbir svih ekvivalentnih padova napona od izvora do propulzora.

Jednačina (17.02) može se napisati obzirom na (17.01) u obliku

$$V = \frac{U}{l \cdot B} - F \cdot \frac{\Sigma R}{(l \cdot B)^2} \quad (17.03)$$

Kada bi se plovni objekat kretao bez bilo kakvih hidrodinamičkih i električnih gubitaka, elektromagnetska sila bila bi vrlo mala pa bi se mogla zanemariti. U tom slučaju, kritična brzina vode bila bi maksimalna i iznosila bi:

$$V_k = \frac{U}{l \cdot B} = \frac{E_0}{B} \quad (17.04)$$

gde je:

$$E = \frac{U}{l} - \text{jačina električnog polja u vodi}$$

zamenom se dobija

$$V = V_k - \Delta V \quad (17.05)$$

gde  $\Delta V$  predstavlja pad brzine

$$\Delta V = F \cdot \frac{\Sigma R}{(l \cdot B)^2} \quad (17.06)$$

Povećavajući gustinu struje dolazi do povećanja elektromagnetne sile i brzine vode pri čemu rastu i svi otpori. Ovim dolazi do rasta pada brzine  $\Delta V$  i relativnog usporenja kretanja.

## 17.02. Korisna električna snaga i stepen iskorišćenja

Korisna električna snaga može se dobiti kao vektorski proizvod vektora potisne, električne ( Lorencove ) sile  $\vec{F}$  i vektora brzine kretanja broda  $\vec{V}$ .

$$P_k = \vec{F} \cdot \vec{V} \quad (17.07)$$

pri čemu se potisna električna sila  $\vec{F}$  (17.01) može posle smene  $I = J / s$  izraziti formulom

$$\vec{F} = V \cdot \vec{J} \cdot \vec{B} \quad (17.08)$$

a gde je:

$V$  - zapremina u kojoj je prisutno dejstvo Lorencove sile

$\vec{J}$  - vektor gustine struje

Kako se gustina struje može napisati u poznatom obliku iz osnova elektrotehnike

$$\vec{J} = \sigma \cdot (\vec{E} + \vec{V} \cdot \vec{B}) \quad (17.09)$$

gde je:

$\sigma$  - specifična električna provodnost morske vode ( $Sm^{-1}$ ) lako se dobija konačan izraz za potisnu električnu silu iz jednačine (17.08)

$$\vec{F} = V \cdot \sigma \cdot \vec{E} \cdot \vec{B} - V \cdot \sigma \cdot \vec{V} \cdot B^2 \quad (17.10)$$

ubacivanjem ove jednačine u (17.07) dobija se konačan izraz za korisnu električnu snagu

$$P_k = V \cdot \sigma \cdot (\vec{E} \cdot \vec{B} \cdot \vec{V} - V^2 \cdot B^2) \quad (17.11)$$

Jedan deo korisne snage troši se za savlađivanje otpora trenja zajedno sa otporom forme broda, za savlađivanje pramčanih i krmenih otpora talasa. Najveći gubitak energije je gubitak za zagrevanje morske vode ili Džulov gubitak.

Korisna snaga MHD propulzora može se dobiti kao razlika ukupne, električne snage i snage ukupnih gubitaka

$$P_k = P_E - P_\gamma = P_E - (P_{cu} + P_h + P_j) \quad (17.12)$$

Stepen iskorišćenja jednak je odnosu korisne i električne snage

$$\eta = \frac{P_k}{P_E} = \frac{J \cdot B \cdot V - \sigma \cdot V^2 \cdot B^2}{J \cdot B \cdot V - \sigma \cdot V^2 \cdot B^2 + J \cdot (k_1 \cdot J + k_2 + J / \sigma)} \quad (17.13)$$

Teoretski proračuni pokazuju [05] da ukupan stepen iskorišćenja može dostići 5-20%, pa čak i 30% kod nekih sistema sa otvorenim dejstvom i sa optimalnom konstrukcijom u gradnji što je za sada mala vrednost radi šire komercijalne primene.

### 17.03. Istraživanja u oblasti MHD propulzije

Mada je prvi rad iz ove oblasti patentiran 1961, razvoj je tekao ubrzano tek zadnjih godina. U laboratoriji Vojno tehničkog instituta u Kumodražu Institut tehničkih nauka SANU [06] napravio je i pustio tokom januara 1992 u pogon model MHD propulzora kanalskog tipa sa klasičnim magnetom.

Propulzor ima sledeće karakteristike:

- efektivna vrednost magnetne indukcije	0,7T
- gustina struje na elektrodama	11.720A/m <sup>2</sup>
- efektivna zapremina jednog propulzora	320cm <sup>3</sup>
- ukupna Lorencova sila	4,2N
- brzina vode	1,72m/s

Logično je da Japan [07] kao visokorazvijena i uz to ostrvska zemlja prednjači u ovim istraživanjima. Konstruisan je eksperimentalni brod "YAMOTO-1" kako bi se demonstriralo da se brod stvarno može pogoniti sa MHD propulzorima.

Osnovni tehnički podaci o ovom brodu su:

- dužina preko svega	30,0m
- širina	10,0m
- gaz	2,6m
- deplasman	180t
- brzina broda	cca 8 čvorova
- instalisana snaga	2x2.000kW
- broj MHD propulzora	2 komada
- maksimalna gustina magnetskog fluksa	4T
- gustina struje između elektroda	4.500A/m <sup>2</sup>
- napon između elektroda	200V

Dalji razvoj [08-09] i napredak u proučavanju MHD propulzije biće uslovljen isključivo napretkom tehnologije u pravljenju novih, snažnijih magneta i novih materijala za ovu vrstu pogona brodova i podmornica.

#### 17.04. Literatura

01. Corlett R., Soviet submarine propulsion; signs of a great forward? Jane's Naval Review, 5, 1986, 28-35.
02. Cowling T.G., Magnetohydrodynamics, Interscience Publishers Ltd, New York, 1958.
03. Bilen B., Nikolić Z., Đorđević N., Uvodna razmatranja o elektromagnetnoj propulziji, Zbornik radova VII simpozijuma Teorija i praksa brodogradnje, Pula, 1986, 3, 5.93-5.107.
04. Bilen B., Nikolić Z., Uvodna razmatranja elektromagnetske propulzije brodova, Plovni putevi, brodogradnja, brodarstvo, Beograd 1987, 28/29, 8-13.

05. Huisheng L., Minggu Q., A Study of Efficiency of MHD Propulsion, Superconducting magneto hydrodynamic ship propulsion, Japan, Kobe, 1991, 237-243.
06. Bilen B., Hofman M., Nikolić Z., Petrović Z., Đorđević N., Some results of the MHD propulsion research in Yugoslavia, Superconducting magnetohydrodynamic ship propulsion, Japan, Kobe, 1991, 8.1.1.-8.1.3.
07. Motora S., Imaichi K., Nazato M., Tekezava S., An Outline of the R&D Project on Superconducting MHD Ship Propulsion in Japan, Superconducting magnetohydrodynamic ship propulsion, Japan, Kobe, 1991, 53-68.
08. Bilen B., Nikolić Z., Bilen-Katić B., Žerjal M., A pilot study of the efficiency of an open MHD propulsion system (one dimensional considerations), International Shipbuilding Progress, Netherlands, 1994, vol.41, number 428, 335-360.
09. Bilen B., Nikolić Z., Bilen-Katić B., Stanje i mogućnosti primene MHD propulzije u brodogradnji, Zbornik konferencije Tesla - Treći milenijum, Beograd, 1996, I - 177 do I - 183.



CIP – Katalogizacija u publikaciji  
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

**629.5.035:621.313/314**

NIKOLIĆ, Zoran

Brodске električne mašine i uređaji /  
Zoran Nikolić, Gordana Počuča. - [1. izd.].  
- Beograd : Institut tehničkih nauka SANU,  
2003 (Beograd : Čigoja štampa). – VI, 261  
str. : ilustr. ; 24 cm

Tiraž 300. – Bibliografija uz svako poglavlje.

ISBN 86-80321-06-0

1. Počuča, Gordana

a) Plovni objekti – Električne mašine

b) Plovni objekti – Električni uređaji

**COBISS.SR – ID 108052236**