

# Trofazni brodski generatori SR4B

---

**Vučinić, Saša**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:616195>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-15**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**uniri** DIGITALNA  
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**SAŠA VUČINIĆ**

**TROFAZNI BRODSKI GENERATORI SR4B**

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**TROFAZNI BRODSKI GENERATORI SR4B  
THREE-PHASE MARINE ALTERNATORS SR4B**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Brodski električni strojevi

Mentor/komentor: prof. dr. sc. Dubravko Vučetić

Student/studentica: Saša Vučinić

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112061363

Rijeka, rujan 2023.

Student/studentica: Saša Vučinić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112061363

### IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOGA RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom „TROFAZNI BRODSKI GENERATORI SR4B“

izradio samostalno pod mentorstvom *prof. dr. sc.* Dubravka Vučetića

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnoga/znanstvenoga rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnoga rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnome radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Saša Vučinić', written over a horizontal line.

Saša Vučinić

Student/studentica: Saša Vučinić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

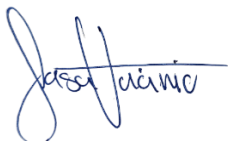
JMBAG: 0112061363

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOGA ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor

Handwritten signature of Saša Vučinić in blue ink.

## SAŽETAK/SUMMARY

Zadatak ovog rada je bio dati detaljan pregled SE i PMPE inačica Caterpillarovog SR4B generatora te opisati njihovo servisiranje i održavanje. Uzbuda generatora ostvaruje se metodom preduzbude s permanentnim magnetima (PMPE) ili metodom samouzbude (SE). SE verzija generatora je osjetljivija na fluktuacije opterećenja nego PMPE verzija. Za kvalitetnu regulaciju napona važna je točnost napona, brzina odziva i stabilnost napona. Automatski regulatori napona (AVR) stalno nadziru i podešavaju napon generatora kako bi ga održavali konstantnim. Tijekom prvog puštanja generatora u pogon važno je nadzirati parametre generatora i pogonskog stroja. Posebno treba pratiti: napon, struju, frekvenciju, tlak ulja i temperaturu pogonskog stroja.

**Ključne riječi:** brod, generator, instalacija, održavanje, preduzbuda

The task of this paper was to provide a detailed overview of the SE and PMPE versions of the Caterpillar SR4B generator and to describe their servicing and maintenance. Excitation of the generator is achieved through either the permanent magnet pilot exciter (PMPE) method or the self-excitation (SE) method. The SE version of the generator is more sensitive to load fluctuations than the PMPE version. Voltage regulation relies on voltage accuracy, response speed, and voltage stability. Automatic voltage regulators (AVR) constantly monitor and adjust the generator voltage to maintain it constant. During the initial startup of the generator, it is important to monitor the generator and prime mover parameters. Specifically, voltage, current, frequency, oil pressure, and prime mover temperature should be closely monitored.

**Keywords:** ship, generator, installation, maintenance, pilot excitation

# SADRŽAJ

SAŽETAK/SUMMARY .....	I
SADRŽAJ.....	II
1. UVOD.....	1
2. O GENERATORU .....	2
2.1. GENERATOR S PREDUZBUNIKOM S PERMANENTNIM MAGNETIMA (PMPE) .....	6
2.2. SAMOUZBUDNI GENERATOR.....	9
3. REGULATOR NAPONA .....	13
3.1. KONSTRUKCIJA REGULATORA NAPONA I MODELI REGULATORA NAPONA.....	13
3.2. RJEŠAVANJE KVAROVA NA REGULATORU NAPONA .....	17
3.2.1. Postupak otkrivanja kvara kada nema izlaznog napona.....	17
3.2.2. Izlazni napon generatora je prenizak – podnapon .....	20
3.2.3. Izlazni napon generatora je previsok - prenapon.....	21
4. EKSPLOATACIJA GENERATORA .....	22
4.1. PRVO PUŠTANJE GENERATORA U POGON .....	23
4.2. OPTEREĆENJE GENERATORA .....	24
4.3. FAKTOR SNAGE .....	25
4.4. MINIMALNA BRZINA GENERATORA.....	26
4.5. AGREGAT U PRIPRAVNOSTI.....	26
4.6. SINKRONIZACIJA GENERATORA .....	27
5. ODRŽAVANJE.....	31
5.1. RJEŠAVANJE PROBLEMA U RADU GENERATORA.....	32
5.2. TEST FUNKCIONALNOSTI GENERATORA .....	32
5.3. ISPITIVANJE NAMOTA .....	35
5.4. ISPITIVANJE IZOLACIJE NAMOTA .....	36

5.4.1. Postupak ispitivanja statora (L4).....	37
5.4.2. Postupak ispitivanja statora uzbude (L1) .....	38
5.4.3. Postupak ispitivanja rotora uzbude (L2) .....	38
5.4.4. Postupak ispitivanja statora preduzbude (L5) .....	38
ZAKLJUČAK.....	39
POPIS LITERATURE.....	41
POPIS SLIKA .....	42
POPIS TABLICA .....	43
POPIS KRATICA .....	44
POPIS OZNAKA .....	45



## 1. UVOD

Za pretvorbu mehaničke energije u električnu putem generatora postoji proces elektromagnetske indukcije, tj. induciranje napona u vodiču koji se kreće u magnetskome polju. Sukladno tome, električni generator se sastoji od pomičnoga dijela (rotor) i nepomičnoga dijela (stator). Jedan od ovih dijelova (stator) sadrži vodiče u kojima se inducira napon, dok drugi (rotor) djeluje kao magnet. Za stvaranje elektromagnetske sile i induciranje napona u električnim strojevima potrebno je prisustvo magnetskoga toka kojega stvaraju ili uzbudna struja ili permanentni magneti.

U drugome poglavlju rada objašnjen je Caterpillarov SR4B generator s preduzbudnikom s permanentnim magnetima (PMPE) i samouzbudna (SE) inačica SR4B generatora. Objašnjena su i načela rada navedenih generatora, njihove razlike, ali i razlike između pojedinih uzbuda.

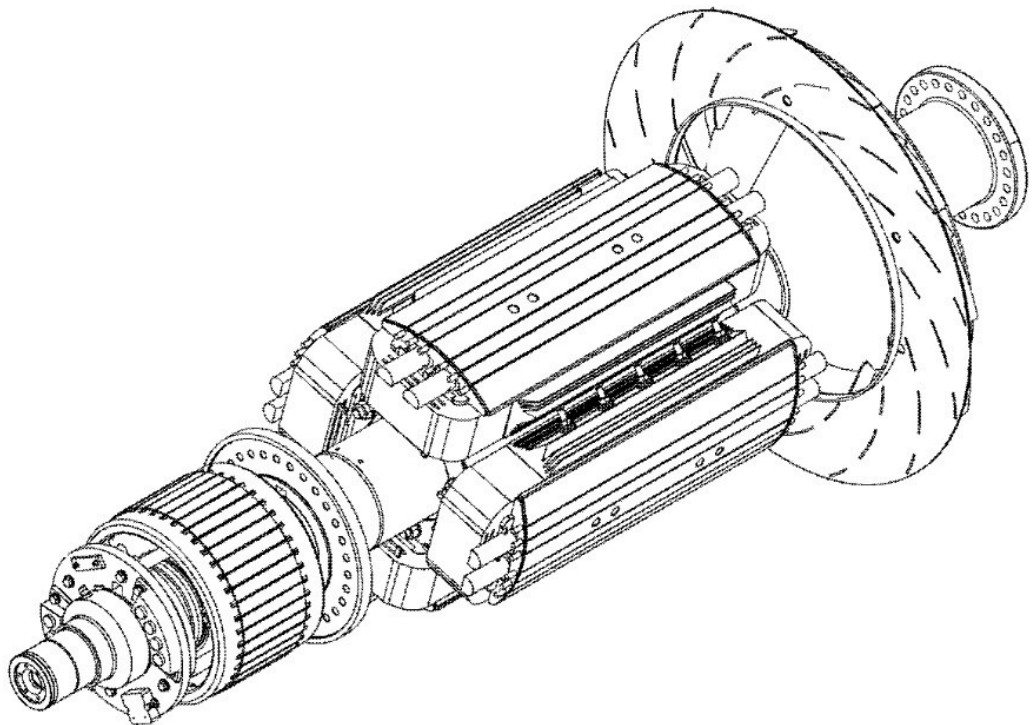
U trećem poglavlju predstavljen je Caterpillarov digitalni regulator napona CDVR (Caterpillar Digital Voltage Regulator). To je mikroprocesorski regulator napona, a svrha mu je reguliranje izlaznoga napona generatora. Opisani su najčešći kvarovi regulatora napona, postupci ispitivanja ispravnosti te postupci popravka i servisiranja istoga.

Četvrto poglavlje objašnjava postupke prvog puštanja generatora u pogon, terećenje i nagla opterećenja. Kako bi se generatori nosili s naglim opterećenjem, moraju biti projektirani tako da u slučaju porasta potrošnje električne energije mogu izuzetno brzo povećati izlaznu snagu. Četvrto poglavlje, također, detaljno objašnjava faktor snage ( $\cos\varphi$ ) SR4B generatora, postupke sinkronizacije generatora na mrežu, što je to agregat u pripravnosti i paralelni rad generatora.

Peto poglavlje opisuje postupke izolacije pojedinih dijelova generatora i njegovoga pogonskog stroja, ali i postupke ispitivanja pomičnih i nepomičnih komponenata (statora i rotora) te ispitivanje njihove izolacije.

## 2. O GENERATORU

Mnogi su često iznenađeni kada saznaju da je generator predviđen za isporučivanje električne energije na lokaciju koja nije povezana s električnom mrežom kako bi pružio rezervno napajanje kada mreža zakaže ili kao dodatak električnoj energiji tijekom vršnih sati. Generatori, ili preciznije agregati, sastoje se od pogonskoga stroja i generatora za proizvodnju električne energije a funkcioniraju tako da pretvaraju mehaničku energiju pogonskoga stroja u električnu energiju.



**Slika 1. Prikaz rotora SR4B generatora**

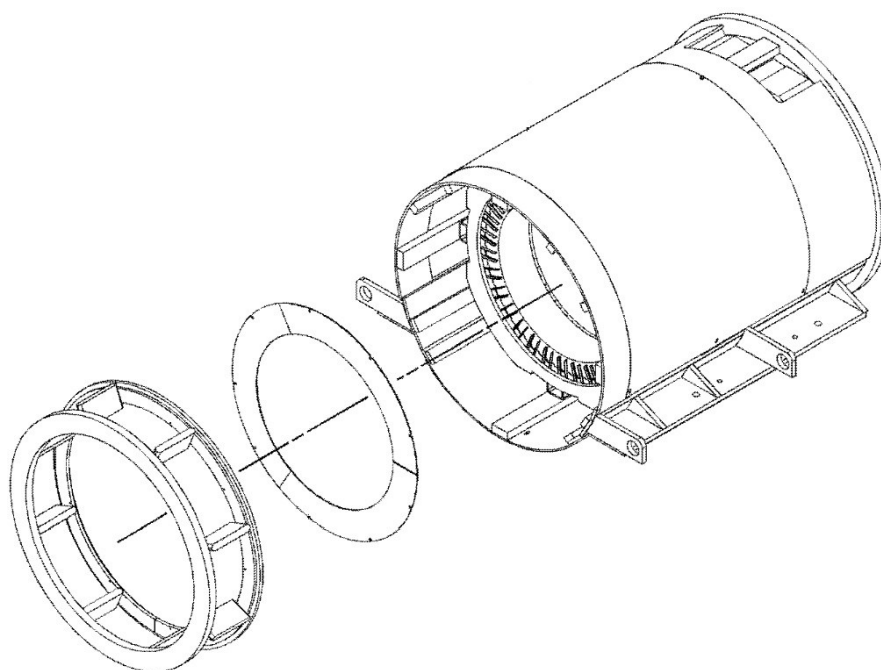
Izvor: Caterpillar 1996, *SR4B Generators*. 820 Standby, Irving, Texas [6]

Rotor (slika 1.) je napravljen od osovine na koju je utisnut paket dinamo-limova (tankih čvrsto stisnutih magnetskih čeličnih lamela spojenih zakovicama, vijcima ili zavarenih zajedno). Štapovi prigušnog kaveza (prigušnog namota) postavljaju se u utore na rotoru, a zatim se međusobno kratko spajaju prstenom ili pločicama za kratko spajanje [9]. Svrha ugradnje prigušnih namota je smanjenje dodatnih gubitaka i pojave prenapona u prijelaznim stanjima, kao i pri nesimetričnim opterećenjima. Također se koriste za

prigušivanje osciliranja rotora uslijed poremećaja u mreži, promjene momenta pogonskoga stroja ili neravnomjernoga opterećenja.

Rotor prolazi kroz "mokri" proces namatanja slojeva s epoksidnom smolom na svakome namotu i golom rotoru generatora. Glavni razlog procesa mokrog namatanja je izolacija svih slojeva namotaja, fiksiranje namota na lamele rotora i izoliranje električnog sustava od mase. Nakon završetka procesa mokrog namotavanja, epoksidna smola rotora se zatim stvrdnjava u pećnici. Strojno namotanom rotoru su potrebna dva postupka uranjanja i stvrdnjavanja epoksidne smole kako bi rotor bio otporan na gljivice, vlagu i ostale vanjske utjecaje. U svrhu zaštite rotora i vratila od korozije i utjecaja vlage, rotor se potpuno premazuje crvenim brtvilom.

Nakon završenog postupka izolacije rotora i vratila, svi modeli testiraju se dva sata na 150% nazivne brzine i na 170°C. Svaki proizvedeni rotor je uravnotežen u dvije ravnine tako da mu dvostruka amplituda oscilacije ne odstupa više od 0,025 mm i testiran je na 125% nazivne brzine prije sklapanja u stator [8].



**Slika 2. Prikaz statora SR4B generatora**

Izvor: Caterpillar 1996, *SR4B Generators*. 820 Standby, Irving, Texas [6]

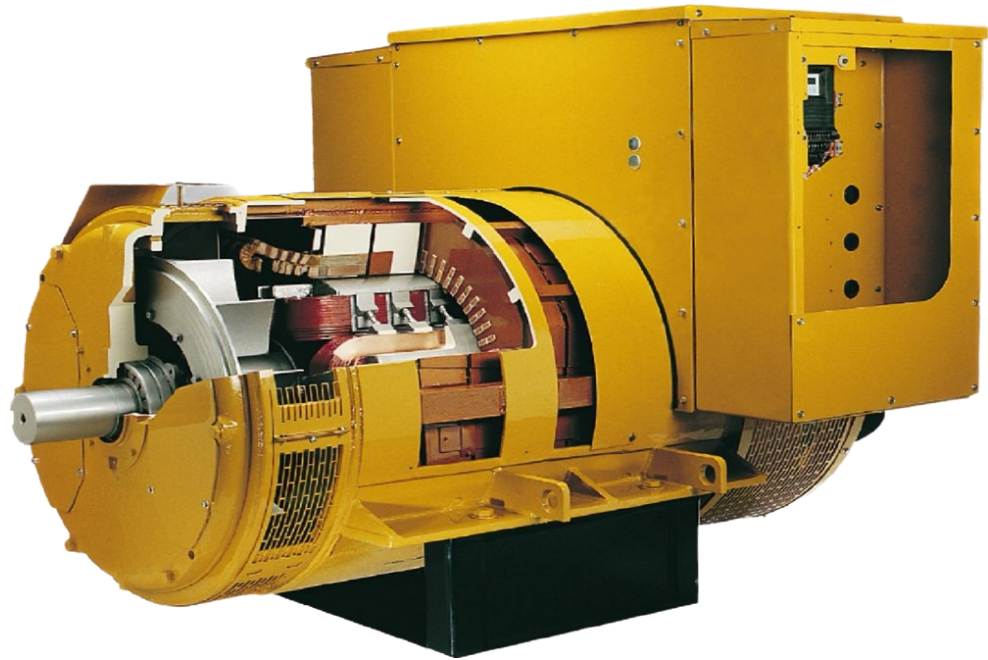
Kako bi se postiglo generiranje kvalitetnog sinusnog valnog oblika izlaznoga napona i njegovo minimalno ukupno harmoničko izobličenje, potrebna je precizna raspodjela i skošenje statorskih utora. Utori statora su izolirani oblogama, separatorima zavojnica i faznim pločama koje osiguravaju minimalnu udaljenost od 25 mm između zavojnice i uzemljenja (slika 2.). Debljina obloga, separatora i faznih ploča pruža izolacijsku zaštitu između faznih vodiča i uzemljenja.

Namotaji statora, predviđeni za postavljanje u generator niskoga napona, podvrgnuti su *high pot* testu od 3000 volti, što je 150% više od zahtjeva NEMA i IEC za generatore od 480 volti) prije nanošenja izolacije. Statori se zatim tretiraju vakumskom impregnacijom poliesterskoga materijala nakon čega se nanosi epoksidna smola. Ovako izoliran stator zatim se podvrgava konačnome *high pot* testu od 2000 volti [6].

*High pot* test generatora je test ispitivanja izolacije na statorskih namota. Izvodi se kako bi se utvrdilo da je izolacija namota dovoljno jaka da izdrži radni napon a da ne dođe do proboja izolacije. Važno je da naponsko opterećenje izolacije traje dulje vrijeme, a ne samo kratkotrajno. Tijekom testa generator se povezuje s visokonaponskim izvorom, a napon se postupno povećava do vrijednosti koja je veća od radnoga napona generatora. Ovaj napon može biti znatno veći od radnoga napona, a često se koristi 50% veći napon od nazivnog napona. Svrha ovoga testa je stvoriti električno koje će probiti bilo kakvo oslabljeno mjesto (grešku) u izolaciji [10].

Ovim testom se također provjerava i postoji li dovoljan razmak između svakoga namota statora i mase (statorskog paketa limova) kako bi se spriječio izboj električne energije s jednoga na drugi namot kroz zrak (električni luk). Ako se otkriju problemi tijekom *high pot* testa, to može ukazivati na potrebu za popravkom ili zamjenom namota prije nego što generator uopće bude sastavljen.

Dva su osnovna modela SR4B generatora: generator s uzбудom pomoću permanentnih magneta (engl. *Permanent Magnet Pilot Exciter, PMPE*) i samouzbudni generator (engl. *Self Excited, SE*). Slika 3. prikazuje uobičajen vanjski izgled SR4B generatora.



**Slika 3. SR4B generator**

Izvor: Caterpillar 1996, *SR4B Generator*, Irving, Texas [1]

Svi SR4B generatori imaju istu osnovnu konstrukciju, ali su moguće neke razlike između pojedinih SR4B generatora [2]. To su [2]:

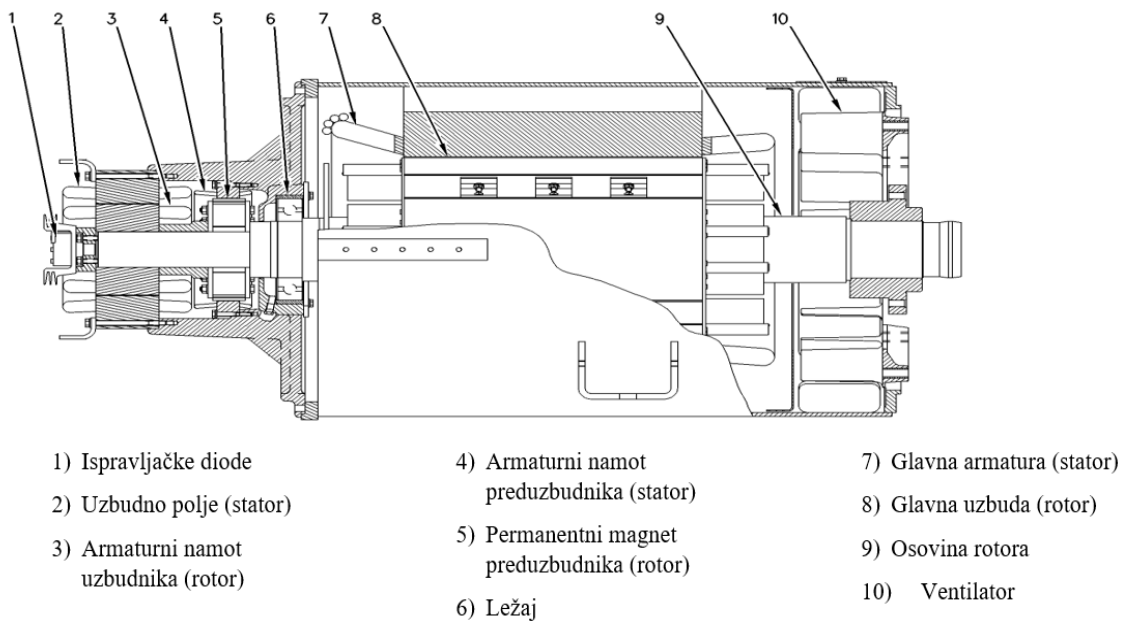
- Uzbuda generatora izvedena je putem metode preduzbude s permanentnim magnetima (engl. *permanent magnet pilot excited*, PMPE) ili metodom samouzbuđivanja (engl. *self-excited*, SE).
- Pozicija ležaja može biti unutar ili izvan kućišta. Pozicija ležaja određuje se prema vibracijskim svojstvima motora, vibracijskim svojstvima generatora, veličini motora i veličini generatora.
- Na PMPE generatorima uzbuda generatora može biti unutarnja ili vanjska.

Iduća poglavlja pobliže objašnjavaju navedene vrste generatora. Između njih je razlika prije svega u njihovome krugu uzbude. Vrsta generatora s preduzbuđivačem s permanentnim magnetima (PMPE) dobiva napajanje za regulaciju napona od strane preduzbude, a ne od glavne armature (statora). Slika 4. prikazuje komponente PMPE generatora [3].

## 2.1. GENERATOR S PREDUZZBUNIKOM S PERMANENTNIM MAGNETIMA (PMPE)

PMPE (engl. *Permanent Magnet Pilot Excited*) inačica SR4B generatora predstavlja jedan od dva načina na koji se može napajati uzбудni namot (engl. *exciter field*) generatora. Ova inačica generatora posebno je korisna za primjene u kojima se zahtijevaju male veličine i težina, a koje također traže pouzdanost i jednostavnost rukovanja.

Preduzbuda s permanentnim magnetima koristi se kao pouzdaniji način pokretanja generatora nakon dugotrajnoga stajanja. To je zato što preduzbudnik koristi permanentne magnete za stvaranje magnetskoga polja koje se koristi za stvaranje glavne uzbude generatora. Zbog toga je preduzbuda često bolja opcija za pokretanje generatora u situacijama kada je generator neko vrijeme neaktivan [2].



**Slika 4. Presjek generatora s uzbuđom s permanentnim magnetima**

Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

Preduzbudnik je mali sinkroni generator s permanentnim magnetima na rotoru i trofaznim namotima na statoru. Rotor mu je mehanički povezan s osovnom uzbuđnika i osovnom glavnog generatora. Nakon pokretanja pogonskog stroja, preduzbudnik daje preko

ARN pouzdanu struju uzbude statoru uzбудnika (nema opasnosti od gubitka zaostalog magnetizma). Inducirani napon u armaturnim namotima na rotoru uzбудnika tjeraju preko rotacijskih dioda struju uzbude kroz rotorske namote glavnog generatora. Tako nastaje magnetsko polje koje omogućuje induciranje trofaznog napona na statoru glavnog generatora.

Glavna prednost PMPE inačice SR4B generatora je u tome što nema potrebe za vanjskim izvorom za napajanje uzbude. Ovo smanjuje potrebu za dodatnim uređajima za regulaciju i kontrolu napajanja te time smanjuje cijenu i složenost generatora. Dodatno, trajni magneti smanjuju održavanje, a ujedno povećavaju pouzdanost generatora.

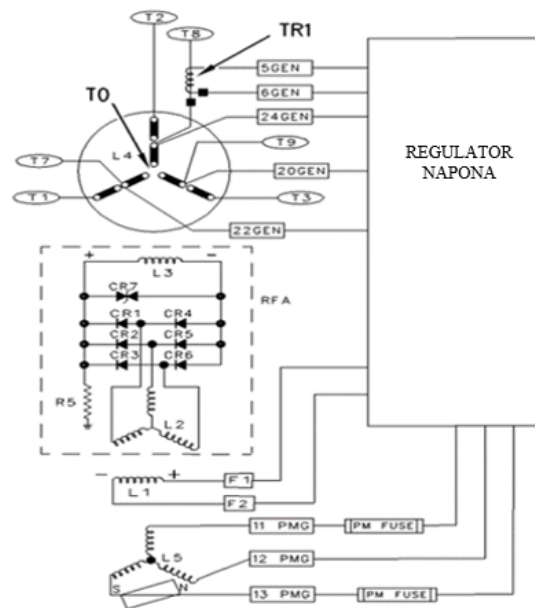
Još jedna važna karakteristika PMPE inačice SR4B generatora je samoventilirajuća konstrukcija koja omogućuje učinkovitu razmjenu zraka u unutrašnjosti generatora. Zrak ulazi u generator kroz rešetkaste otvore na stražnjoj strani generatora, a izlazi kroz rešetkaste otvore na pogonskome kraju generatora. Ovo osigurava da se generator može dobro hladiti i raditi na optimalnoj temperaturi, čime se produžuje životni vijek generatora.

PMPE inačica SR4B generatora je vrlo pouzdana i jednostavna za korištenje. Karakteristike ove inačice su visoka učinkovitost, jednostavnost održavanja i pouzdanost.

Uzbuda pomoću permanentnih magneta u PMPE inačici SR4B generatora omogućuje izuzetno visoke performanse u usporedbi s drugim vrstama generatora. Ova inačica generatora također ima nisku razinu buke, što ju čini idealnim izborom za primjene u kojima je potrebna tišina, poput bolnica, laboratorija ili drugih sličnih okruženja.

Metoda uzbude pomoću preduzbudnika s permanentnim magnetima (PMPE) omogućuje generatoru održavanje stabilnoga napona i frekvencije, bez obzira na promjene opterećenja, što je ključno za primjene gdje su stabilnost i nepromjenjivost napona i frekvencije od velike važnosti. Inačica SR4B generatora s preduzbudnikom s permanentnim magnetima ima visoku učinkovitost, što omogućuje pretvaranje veće količine energije u električnu energiju s manjim gubicima. Također je PMPE inačica SR4B generatora relativno jednostavna za održavanje i popravak, što rezultira manjim vremenom ispada i smanjenim troškovima održavanja [2].

1. (CR1 - CR6) Diode
2. (CR7) Varistor
3. (L1) Uzbudni namot uzбудnika (stator)
4. (L2) Armaturni namot uzбудnika (rotor)
5. (L3) Glavno polje (rotor)
6. (L4) Glavna armatura (stator)
7. (L5) Armaturni namot preduzbudnika
8. (PM) Permanentni magnet
9. (R5) Otpor
- 10.(RFA) Sklop okretnog polja
- 11.(TR1) Dodatni transformator voltage droop-a
- 12.(T0, T1, T2, T3, T7, T8, T9) stezaljke generatora i/ili vodovi generatora



**Slika 5. Električna shema PMPE generatora**

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

Generatori s preduzbudom s permanentnim magnetima dobivaju energiju za regulaciju napona iz uzbude, dok samouzbudni generatori dobivaju napajanje za regulaciju napona iz glavne armature. Uzbuda PMPE generatora sastoji se od permanentnih magneta (engl. *Permanent Magnet*) i armature uzbude (L5) (slika 5.). Generatori s preduzbudom s permanentnim magnetima rade neovisno o izlaznome naponu generatora, te je moguća snažna stabilna uzbuda tijekom priključivanja velikoga opterećenja na generator [2].

To je moguće jer se fluktuacije (ponajprije propad napona), koje se javljaju u izlaznome naponu generatora, ne odražavaju na uzbudi generatora. Fluktuacije do kojih dolazi u izlaznome naponu generatora uzrokovane su uvjetima opterećenja. Neovisan rad uzbude također omogućuje generatoru da izdrži veliku struju u kratkome vremenskom razdoblju. Kada pogonski stroj počne okretati rotor generatora (RFA), permanentni magneti induciraju izmjenični napon u armaturi uzbude (L5). Armatura uzbude ima trofazni namot i generira trofaznu izmjeničnu struju (AC). Rezultantna izmjenična struja teče kroz vodove "11", "12" i "13" do regulatora napona. Unutar regulatora napona trofazna izmjenična struja ispravlja se u istosmjernu (DC). Određena količina istosmjerne struje dovodi se u stator uzbudnika (L1) kroz priključke "F1" i "F2". Istosmjerna struja sada teče do statora uzbudnika (L1), koji stvara magnetsko polje.



Kad armatura generatora (L2) rotira u magnetskome polju inducira se trofazna izmjenična struja koja se zatim ispravlja trofaznim punovalnim mosnim ispravljačkim krugom koji je sklopljen od dioda CR1, CR2, CR3, CR4, CR5 i CR6. Izlaz istosmjerne struje iz mosnoga ispravljača do rotora vodi vodičima (L3) koji se provlače kroz osovinu generatora. Struja koja teče statorom stvara magnetsko polje generatora. Kako se glavno polje okreće, ono inducira trofazni izmjenični napon u glavnoj armaturi (L4) koji se odvodi na priključke za spajanje tereta T0, T1, T2 i T3.

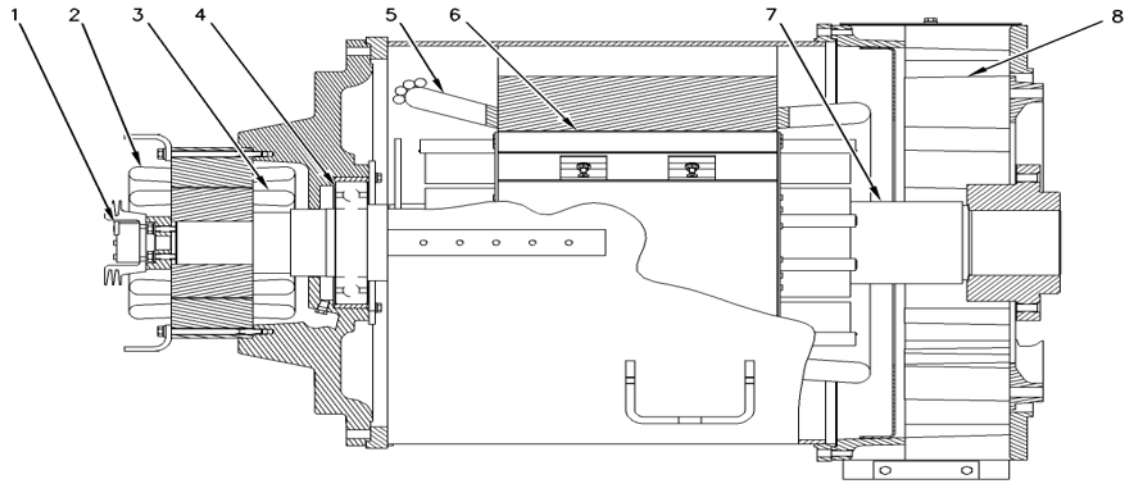
Kako bi se izlazni napon kod promjena opterećenja održao što stabilnijim (konstantnim) potrebno je pratiti i struju generatora. To je funkcija regulatora napona. Regulator napona očitava izlazni napon generatora na stezaljkama "20", "22" i "24" i regulira struju uzbuđivanja kroz vodove "F1" i "F2". Jačina struje ovisi o izmjerenom naponu. Promjena uzbuđivačke struje ima isti učinak na rad generatora bez obzira na vrstu generatora (PMPE generator ili samouzbudni generator)

PMPE generatori osiguravaju početni magnetizam za pokretanje generatora, a permanentni magneti (PM) daju početni magnetizam potreban pri pokretanju PMPE generatora [2].

## **2.2. SAMOUZBUDNI GENERATOR**

Samouzbudna (SE) inačica SR4B generatora predstavlja alternativu PMPE inačici za napajanje uzbuđivačkog namota. Kod ove verzije generatora uzbuđivanje se napaja izlaznim naponom generatora umjesto pomoću permanentnih magneta.

Jedan od ključnih dijelova SE inačice generatora je uzbuđivanje, koja se sastoji od niza namotaja smještenih u utorima rotora. Kada se generator pokrene, izlazni napon inducira se u glavnome namotu i dovodi se do rotorskoga uzbuđivačkog namota preko diodnoga mosta. Taj se proces naziva samouzbudom jer se generator sam uzbuđuje bez potrebe za vanjskim izvorom struje.



- |                                      |                             |                   |
|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 1) Ispravljačke diode                | 4) Ležaj                    |                   |
| 2) Uzbudno polje (stator)            | 5) Glavna armatura (stator) | 7) Osovina rotora |
| 3) Armaturni namot uzbuđnika (rotor) | 6) Glavno polje (rotor)     | 8) Ventilator     |

### Slika 6. Presjek samouzbuđnoga (SE) generatora

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

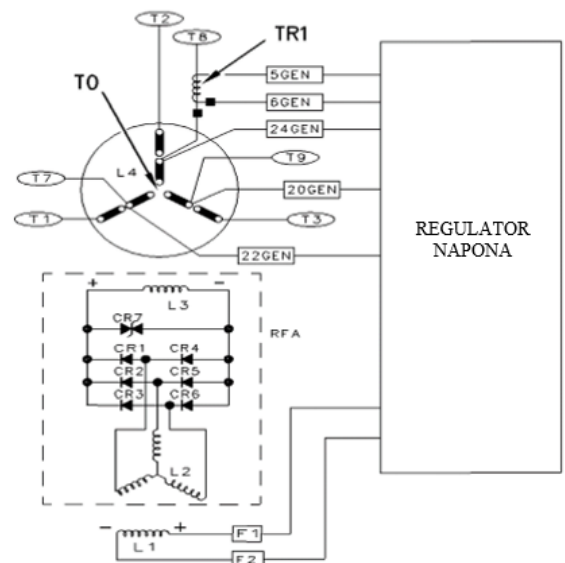
SE inačica generatora je manje učinkovita od PMPE inačice jer za uzbuđu koristi izlazni napon, što znači da se dio proizvedene struje troši na uzbuđu. Međutim, SE inačica jednostavnija je i ekonomičnija za proizvodnju od PMPE inačice.

Kao i kod PMPE inačice, SE inačica SR4B generatora također ima samoventilirajući sustav za hlađenje (slika 6.). To omogućuje rad generatora bez potrebe za vanjskim ventilacijskim sustavom, što ga čini idealnim za primjene u kojima je prostor za instalaciju ograničen.

Važno je napomenuti da SE inačica generatora može biti osjetljivija na fluktuacije opterećenja nego PMPE inačica. To je zbog činjenice da se uzbuđni namot napaja iz izlaznoga napona, što znači da je generator osjetljiv na promjene opterećenja koja mogu utjecati na izlazni napon. Još jedan nedostatak SE SR4B generatora je povećana razina buke u usporedbi s PMPE inačicom. To je zato što ovaj generator za stvaranje polja koristi velike magnetske polove, što tijekom rada može uzrokovati dodatnu buku.

Uz to, SE inačica može biti manje stabilna od PMPE inačice, posebno u uvjetima velikih opterećenja [2].

- 1) (CR1 - CR6) Diode
- 2) (CR7) Varistor
- 3) (L1) Uzbudni namot uzбудnika (stator)
- 4) (L2) Armaturni namot uzбудnika (rotor)
- 5) (L3) Glavno polje (rotor)
- 6) (L4) Glavna armatura (stator)
- 7) (RFA) Sklop okretnog polja
- 8) (TR1) Dodatni transformator pada napona
- 9) (T0, T1, T2, T3, T7, T8, T9) Stezaljke generatora  
i/ili vodovi generatora



**Slika 7. Električna shema samouzbudnoga generatora**

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

Standardni Caterpillarov SR4B generator je PMPE generator, dok su samouzbudni generatori dani kao opcija na izbor krajnjem korisniku. Samouzbudni generatori dobivaju struju uzbude iz armature generatora (izlaz generatora). Kada motor počne okretati sklop rotirajućega polja, rezidualni magnetizam u polju paljenja (L1) uzrokuje induciranje malog izmjeničnoga napona u armaturi generatora (L2). Inducirani napon potjera struju koja se ispravlja trofaznim punovalnim mosnim ispravljačkim krugom. Ovaj ispravljački krug sastoji se od sljedećih dioda: CR1, CR2, CR3, CR4, CR5 i CR6. Istosmjerna struja tada teče kroz uzbuđne namote koji stvaraju glavnu magnetsku indukciju (L3) [2].

Stvorena magnetska indukcija pojačava postojeći zaostali magnetizam glavnoga uzbuđnih polova a time i inducira napon sve dok se ne postigne nazivni napon. Kako se glavno polje okreće, izmjenični napon se inducira na glavnoj armaturi (L4) te se pojavljuje kao trofazni izmjenični napon na sljedećim izlaznim stezaljkama: T0, T1, T2 i T3. Regulator napona očitava izmjenični napon na stezaljkama “20”, “22” i “24” (slika 7.). Tijekom pokretanja regulator napona očitava ovaj izlazni napon i prepoznaje izlaz kao stanje niskoga napona, stoga se izlaz regulatora napona u polje uzbude povećava tako da će napon generatora nastaviti rasti do nazivnoga napona.

Regulator napona ne dozvoljava prekoračenje nazivnog napona nego ga održava konstantnim prilagođavajući uzбудnu struju. Jakost uzbudne struje izravno utječe na izlazni napon generatora. Regulator napona očitava izlazni napon generatora na stezaljkama "20", "22" i "24". Regulator napona daje uzbudnu struju na stezaljke "F1" i "F2" (slika 7.).

Kada regulator napona osjeti smanjenje izlaznoga napona kod npr. povećanja potrošnje električne energije, odmah će povećati uzbudnu struju kako bi se napon što brže vratio na nazivnu vrijednost.

Zavojnice glavnoga polja namotane su na dinamo-limove koji nakon isključivanja uzbudne struje zadržavaju dovoljnu količinu zaostalog magnetizma za proces samouzbuđivanja. Nakon dugotrajnog stajanja i određenih uvjeta rezidualni magnetizam može se previše smanjiti. Preostali magnetizam tada više neće biti dovoljan za pokretanje generatora [2].

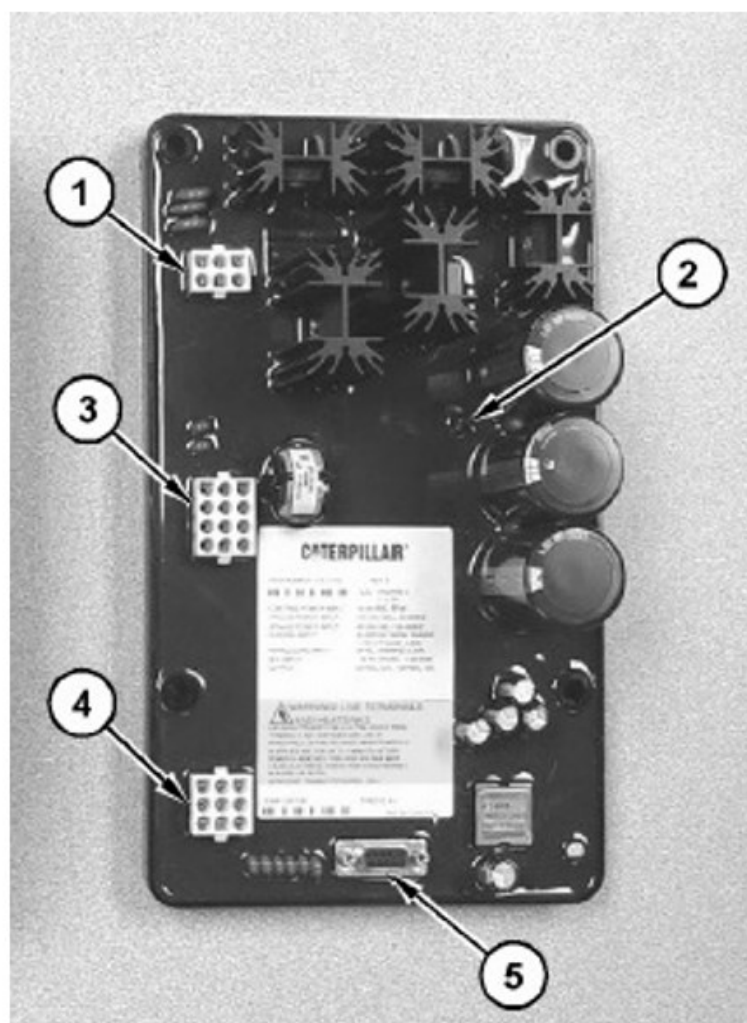
### **3. REGULATOR NAPONA**

Kod Caterpillarovih generatora regulacija napona postiže se putem upravljanja uzbudnom strujom [8]. Za kvalitetnu regulaciju napona važna je točnost napona (da napon bude u propisanim granicama), brzina odziva (da je vrijeme reagiranja na poremećaj i vraćanja na referentnu vrijednost što kraće) te stabilnost napona, što znači da, ukoliko dođe do poremećaja, napon ne oscilira predugo oko referentne vrijednosti.

Automatski regulator napona (skraćeno AVR) elektronički je uređaj koji se koristi u generatorima i automatski održava izlazni napon generatora na unaprijed određenome nivou. Napon generatora može varirati, naročito kod promjene opterećenja ili radne temperature. Automatski regulator napona, radi na stabilizaciji izlaznoga napona generatora u otočnom radu, ali također može i raspodijeliti jalovo opterećenje između više generatora u paralelnom radu [8].

#### **3.1. KONSTRUKCIJA REGULATORA NAPONA I MODELI REGULATORA NAPONA**

Caterpillarov digitalni regulator napona (CDVR) je mikroprocesorski regulator napona. Napajanje Caterpillarovoga digitalnog regulatora može biti izvedeno iz visokofrekventnoga generatora s permanentnim magnetima, iz izlaza generatora ili iz pomoćnih namotaja koji su unaprijed predviđeni na nekim modelima SR4B generatora, dok je napajanje priključka za usporedbu izlaznoga i referentnoga napona Caterpillarovoga digitalnog regulatora napona izvedeno iz vanjskoga istosmjernog izvora 24V [8].



- |                     |                |
|---------------------|----------------|
| 1. 6P konektor      | 4. 9P konektor |
| 2. Signalna lampica | 5. J4 konektor |
| 3. 12P konektor     |                |

**Slika 8. Prikaz Caterpillarovoga digitalnog regulatora napona (CDVR)**

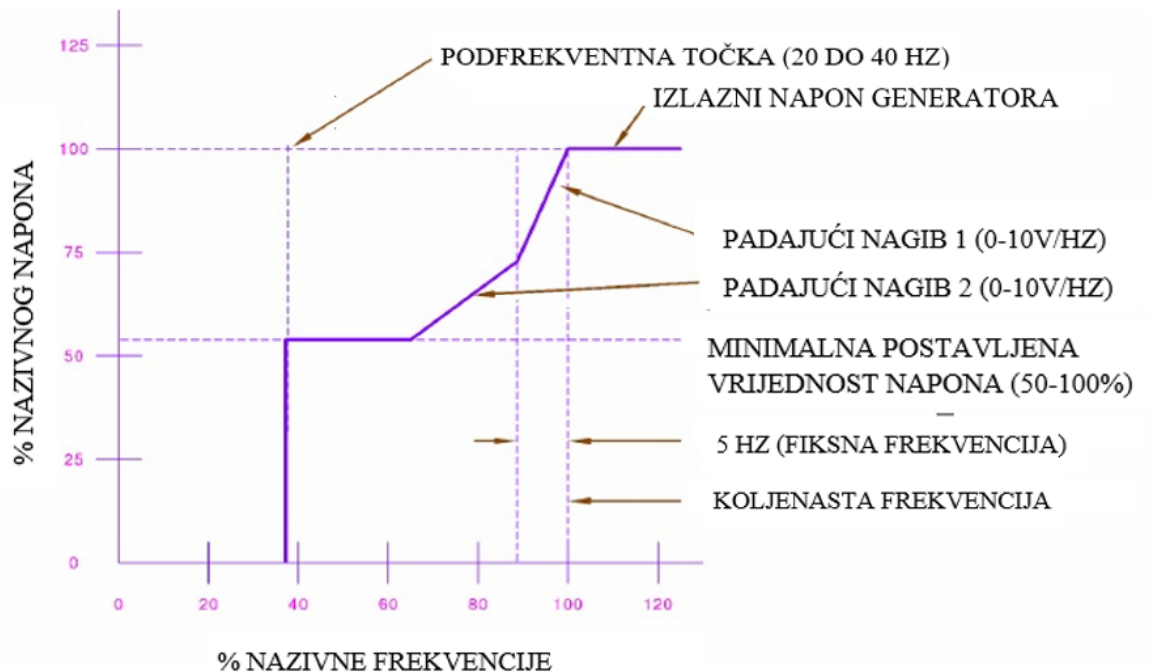
Izvor: Caterpillar 2003, *Specifications System Operation Testing and Adjusting Caterpillar Digital Voltage Regulator (CDVR)*, Irving, Texas [8]

Priključci na digitalni regulator napona izvode se preko tri višepinska priključka (priključak P6, priključak P9, priključak P12), dok se RS232 komunikacija između digitalnoga regulatora napona i računalnoga sustava ostvaruje korištenjem J4 priključka.

Caterpillarov digitalni regulator napona (CDVR) ima sljedeće značajke:

- tri načina upravljanja

1. automatska regulacija napona (AVR)
  2. regulacija faktora snage (PF)
  3. regulacija reaktivne snage (VAR)
- postavke stabilnosti koje se mogu regulirati
  - kontrolu sporog pokretanja s podesivim postavkama vremena u avr modu
  - karakteristiku dvostrukoga nagiba napona u odnosu na frekvenciju (v/hz) (slika 9.)
  - prepoznavanje trofaznoga ili jednofaznoga napona
  - prepoznavanje jednofazne struje
  - prepoznavanje struje statora
  - deset funkcija zaštite.



**Slika 9. Odnos nazivnoga napona i nazivne frekvencije u postocima**

Izvor: Caterpillar 2003, Specifications System Operation Testing and Adjusting Caterpillar Digital Voltage Regulator (CDVR), Irving, Texas [8]

Vrste regulatora napona općenito su volt po hercu ili regulatori nepromjenjivoga napona [8]. Digitalni regulator napona može raditi kao regulator nepromjenjivoga napona ili regulator volt po hercu, ovisno o zahtjevima. Regulatori tipa volt po hercu obično se koriste

s klipnim generatorskim setovima koji su pogonjeni motorom s unutarnjim izgaranjem jer automatski osiguravaju način oporavak motora od nagloga opterećenja.

U digitalnome regulatoru napona performanse oporavka opterećenja mogu se konfigurirati tako da se mogu optimizirati za svaku specifičnu primjenu. Kada se generator u radu naglo jako optereti, past će mu frekvencija i napon. Funkcija opterećenja i rasterećenja smanjuje vrijeme potrebno motoru i generatoru da se oporave te povećava sposobnost preuzimanja velikih tereta. Kod velikog opterećenja, brzina motora će početi padati (frekvencija se smanjuje) [8]. Kako se frekvencija smanjuje ispod frekvencije koljena, referentni napon će se smanjivati na nagibu  $V/Hz$  prema vrijednosti padajućega nagiba 1 (slika 9.). Ako se smanjivanje frekvencije nastavi ispod frekvencije koljena minus 5 Hz, referentni napon će se smanjivati na nagibu  $V/Hz$  prema vrijednosti padajućega nagiba 2 dok se ne postigne minimalna razina napona. Digitalni regulator napona pokušat će regulirati izlazni napon generatora na minimalnome naponu, osim ako se ne postigne podfrekventna točka gdje će se izlazni napon generatora smanjiti na minimalnu vrijednost. Kako se motor oporavlja od povećanja opterećenja, napon će rasti obrnutim redoslijedom kako se smanjivao, osim ako frekvencija ne padne ispod točke podfrekventnosti. Ako je frekvencija pala ispod točke podfrekvencije, za oporavak će se koristiti početni profil.

U nekim primjenama poželjno je održati nepromjenjiv napon nauštrb većega pada frekvencije tijekom promjena opterećenja. Digitalni regulator napona može se prilagoditi takvim primjenama ako se frekvencija koljena konfigurira za nižu vrijednost od uobičajene. Stvarna vrijednost ovisit će o određenoj primjeni. Kada se koristi u ovakvoj primjeni, promjene opterećenja moraju biti male kako bi se motor mogao oporaviti bez pada ispod vrijednosti frekvencije koljena (slika 9.). Kada se na sustav priključi naglo opterećenje, brzina motora se privremeno smanjuje jer motor proizvodi dodatnu potrebnu snagu izgaranjem više goriva. Ako je regulator postavljen da djeluje kao tip regulatora volt po hercu, smanjit će izlazni napon prema nagibu krivulje  $V/Hz$ . Smanjenje napona smanjuje potrebnu snagu opterećenja, omogućujući tako motoru da se brže oporavi zbog prethodno priključenoga naglog opterećenja [8]. Ako je regulator postavljen da djeluje kao tip regulatora nepromjenjivoga napona, regulator neće smanjiti izlazni napon zbog promjene brzine pogonskoga stroja, stoga će pogonskome stroju trebati više vremena da povрати brzinu i zadovolji ukupnu potrebnu snagu opterećenja. Ako je regulator postavljen da djeluje kao tip nepromjenjivoga napona, mora se paziti da priključivanja opterećenja ne budu prejaka kako bi se pogonski stroj mogao oporaviti u prihvatljivome vremenu.



### 3.2. RJEŠAVANJE KVAROVA NA REGULATORU NAPONA

Ako regulator napona ne radi prema očekivanjima, prvo treba provjeriti programibilne postavke za odgovarajuću funkciju. Kvarovi o kojima je riječ neće uzrokovati isključivanje uzbude osim ako uzbuda nije na neki način spojena na sustav alarma ili na upravljač za isključenje u slučaju kvara. Najprije treba otvoriti komunikaciju s regulatorom napona kako bi se utvrdilo koji se kvar dogodio [8].

#### 3.2.1. Postupak otkrivanja kvara kada nema izlaznog napona

- 1) Provjeriti jesu li svi spojevi ispravno povezani. Ako su spojevi ispravni, nastaviti na korak 2), a ako su spojevi nepravilno povezani ili su spojevi nezategnuti, potrebno je pravilno povezati i zategnuti spojeve.
- 2) Potrebno je provjeriti radi li generator s nominalnom brzinom. Ukoliko generator radi s nominalnom brzinom, nastaviti na korak 3). Ako generator nije na nominalnoj brzini, mora se povećati brzina generatora na nominalnu vrijednost.
- 3) Digitalni regulator napona koristi napajanje putem generatora s permanentnim magnetima ili *shunt* generatora. Ukoliko je napajanje digitalnoga regulatora napona izvedeno preko generatora s permanentnim magnetima, tada nastaviti na korak 4), a ako se napaja putem *shunt* generatora, nastaviti na korak 5).
- 4) Provjera ispravnosti ulaznoga napajanja regulatora napona je obvezna. Ako je napon prisutan, prelazi se na korak 5), a u slučaju da nema napona generatora s permanentnim magnetima na ulazu digitalnoga regulatora napona, tada je potrebna provjera prekida u krugu napajanja ili, u težim slučajevima, treba izvršiti popravak generatora s permanentnim magnetima.
- 5) Potrebno je provjeriti je li rezidualni napon na ulazno napajanje najmanje 6VAC. Ako je napon 6VAC ili veći, potrebno je nastaviti na korak 6). Ako je primijenjeni napon manji od 6VAC, potrebno je ugraditi blokirajuće diode u seriju s baterijom kako bi se spriječilo oštećenje regulatora napona i/ili baterije.
- 6) Potrebna je provjera jesu li osigurači neoštećeni. Ukoliko nema neispravnih osigurača, nastavlja se na korak 6), a ako postoji neispravan osigurač, potrebno ga je zamijeniti
- 7) Potrebno je provjeriti je li LED indikator za upozorenje/isključivanje regulatora napona isključen. Ako kvar nije uzrokovao isključivanje uzbude, nastavlja se na korak 14). Ako LED indikator treperi, treba uspostaviti komunikaciju s regulatorom napona kako bi se

utvrdilo je li došlo do zaštitnoga isključivanja uzbude. Ako je došlo do zaštitnoga kvara isključivanja uzbude, nastaviti na korak 8).

- 8) Ukoliko se dogodi kvar na nadzoru dioda uzbude (*Exciter Diode Monitor - EDM*), stroj treba zaustaviti, osigurati da je napajanje regulatora napona isključeno i isključiti priključak P6 na regulatoru napona. Provjera dioda uzbude je neophodna kako bi se utvrdilo postoji li dioda ili diode koje su neispravne ili kratko spojene. Nakon što su popravci završeni, potrebno je ugasiti grešku na regulatoru napona kratkotrajnim zatvaranjem kontakta za resetiranje kvara ili isključivanjem i ponovnim uključivanjem 24V kontrolnoga napajanja. Generator se može ponovno pokrenuti. Ako nema problema s diodama uzbude, moguće je da je postavljena preniska vrijednost EDM izlaznoga signala [8]. Greška EDM-a može se pojaviti kod ispravnih rotirajućih dioda uzbude pri promjenjivim opterećenjima ako je razina izlaznoga signala postavljena prenisko. U tome slučaju potrebno je postaviti razinu izlaznoga signala EDM-a na vrijednost veću od RMS struje prisutne u uzbudi pri normalnim radnim uvjetima kako bi se spriječilo lažno okidanje. Nakon svega, ponovno spojiti priključak P6, te ponovno otkloniti grešku s regulatora napona kratkotrajnim zatvaranjem kontakta za resetiranje kvara ili isključivanjem i ponovnim uključivanjem 24V kontrolnoga napajanja. Generator se sada može ponovno pokrenuti. Ukoliko se nije dogodio kvar na nadzoru dioda uzbude, nastaviti na korak 9).
- 9) Ukoliko se dogodi greška prenapona uzbude, potrebno je zaustaviti stroj i provjeriti generator i spojeni teret radi mogućih kvarova na samome generatoru ili opterećenju koji mogu uzrokovati prekomjernu struju uzbude. Također je potrebno u sustavu regulatora napona provjeriti prisutnost nezategnutih ili nespojenih veza prema ulazima regulatora napona. Svi identificirani kvarovi moraju biti popravljivi, te je nakon provedenih popravaka, potrebno resetirati regulator napona kratkim spajanjem kontakta za resetiranje kvara ili isključivanjem i ponovnim uključivanjem kontrolnoga napajanja od 24 V. Generator se sada može ponovno pokrenuti. Ukoliko se nije dogodio kvar prenapona uzbude, nastaviti na korak 10).
- 10) Ako se dogodi greška gubitka osjeta ulaznoga napona, potrebno je zaustaviti stroj i u sustavu regulatora napona provjeriti prisutnost nezategnutih ili nespojenih veza prema ulazima osjetnika regulatora napona, ali je također potrebno provjeriti generator ili spojeni teret radi mogućih kvarova koji bi mogli uzrokovati da očitani napon bude nizak. Ako je generator opremljen transformatorima koji snižavaju naponski nivo generatora na razine koje su upotrebljive za regulator napona, potrebno je provjeriti ispravnost

transformatora te provjeriti jesu li osigurači transformatora neoštećeni [8]. Ako se utvrdi da su osigurači transformatora oštećeni, treba ih zamijeniti. Svi otkriveni kvarovi moraju biti otklonjeni, a nakon provedenih popravaka potrebno je poništiti greške na regulatoru napona kratkim spajanjem kontakta za resetiranje kvara ili isključivanjem i ponovnim uključivanjem kontrolnoga napajanja od 24 V. Generator se sada može ponovno pokrenuti. Ukoliko se nije dogodila greška gubitka osjetljivosti, nastaviti na korak 11).

- 11) Ukoliko se dogodi greška prekomjerne uzbudne struje, potrebno je zaustaviti stroj i provjeriti generator i spojeni teret radi mogućih kvarova na samome generatoru ili opterećenju koji bi mogli uzrokovati preveliku uzbudnu struju. Također je potrebno u sustavu regulatora napona provjeriti prisutnost nezategnutih ili nespojenih veza prema ulazima osjetljivosti regulatora napona. Greška prekomjerne struje uzbude detektira se kada izlazna struja iz regulatora napona prelazi otprilike 28 A. Ukoliko se nije dogodila greška prekomjerne struje uzbude i izlazna struja iz regulatora napona je manja od otprilike 28 A, nastaviti na korak 12). Ukoliko se dogodio kvar, on mora biti otklonjen, nakon čega treba ponovno otkloniti grešku s regulatora napona kratkim spajanjem kontakta za resetiranje kvara ili isključivanjem i ponovnim uključivanjem kontrolnoga napajanja od 24 V. Generator se nakon ovoga koraka može ponovno pokrenuti [8].
- 12) Ukoliko se dogodi greška interne memorije regulatora napona, pokušaj resetiranja regulatora napona kratkim spajanjem kontakta za resetiranje kvara ili isključivanjem i ponovnim uključivanjem kontrolnoga napajanja od 24V može pomoći. Ukoliko se nije dogodila greška interne memorije regulatora, nastavi na korak 13), a ukoliko se nakon resetiranja regulatora napona ponovi nova greška interne memorije, potrebno je zamijeniti regulator napona.
- 13) Ukoliko se dogodi greška sklopovlja za otkrivanje kvara (engl. *Internal Watchdog Failure*), treba poništiti greške na regulatoru napona kratkim spajanjem kontakta za resetiranje kvara ili isključivanjem i ponovnim uključivanjem kontrolnoga napajanja od 24 V. Ukoliko se takva greška nije dogodila, potrebno je nastaviti na korak 14). Ukoliko se i nakon ponovnoga pokretanja regulatora napona ponovi nova greška sklopovlja za otkrivanje kvara, potrebno je zamijeniti regulator napona.
- 14) Potrebna je zamjena regulatora napona. Ukoliko zamjena regulatora napona ne riješi problem, sljedeći korak je krenuti s inspekcijom problema na generatoru

### 3.2.2. Izlazni napon generatora je prenizak – podnapon

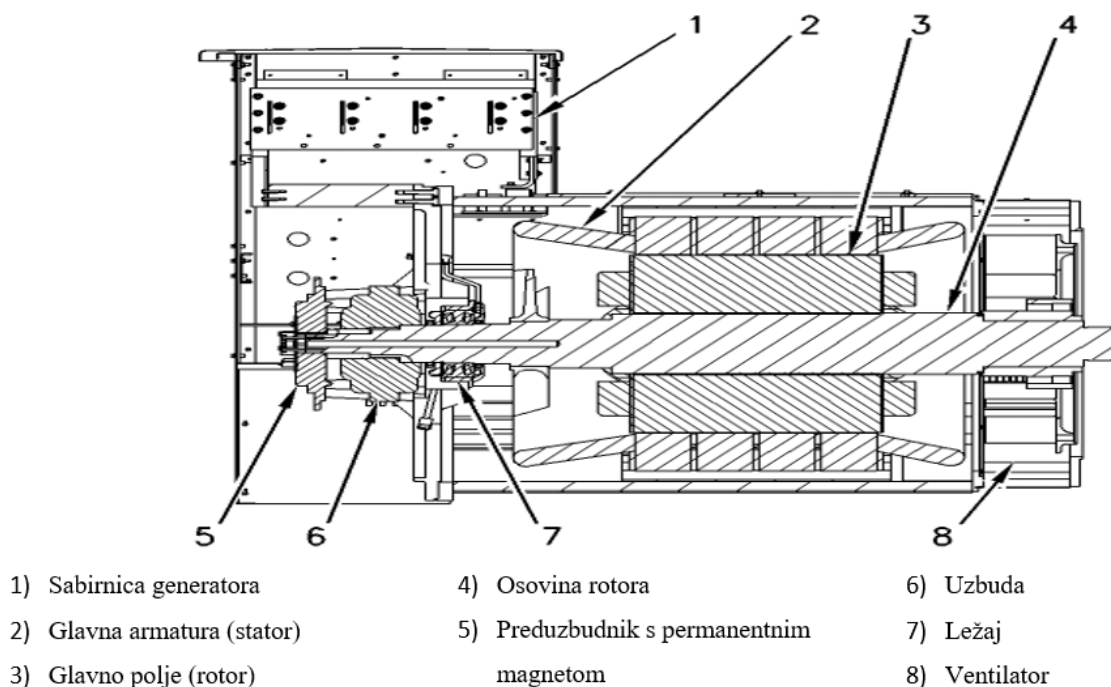
- 1) Prvi korak je provjera da podešenje izlaznoga napona nije postavljeno na prenisku razinu. Ako je podešenje napona ispravno, prelazi se na korak 2). Ukoliko je podešenje napona prenisko, slijedi prilagodba napona na ispravnu vrijednost – povišenje.
- 2) Provjeriti da podfrekventna točka nije postavljena na višu razinu od frekvencije generatora. Ukoliko je postavljena na ispravnu razinu, prelazi se na korak 3), a ako nije, treba ispravno podesiti podfrekventnu točku ispod nazivne frekvencije generatora.
- 3) Potrebno je uvjeriti se da generator radi na nazivnoj frekvenciji. Ako radi, onda se prelazi na korak 4), a ako ne radi na nazivnoj frekvenciji, potrebno je ubrzati generator.
- 4) Ukoliko je regulator napajan iz generatora s permanentnim magnetima, nastaviti na korak 4), a ako je napajan iz *shunt* generatora, prijeći na korak 6).
- 5) Provjera ispravnosti napajanja na regulatoru napona. Ako je napon na potrebnome nivou, nastaviti na korak 7). Ukoliko je ulazni napon regulatora napona prenizak, potrebna je inspekcija kvara ili mogući popravak generatora s permanentnim magnetima koji napaja regulator napona [8].
- 6) Provjeriti ima li mjerni transformator (ako je korišten) ispravan omjer ulaznoga i izlaznoga napona i isporučuje li ispravni napon napajanja. Ako je omjer ulaznoga i izlaznoga napona mjernoga transformatora ispravan, nastaviti na korak 7). Ako je omjer ulaznoga i izlaznoga napona mjernoga transformatora neispravan, premalen ili transformator ne opskrbljuje dovoljnu snagu regulatoru napajanja, zamjena mjernoga transformatora je neophodna.
- 7) Provjeriti ima li mjerni transformator ispravan omjer namotaja i radi li ispravno. Ako senzorski naponski mjerni transformator ispravno radi, prijeđite na korak 8). Ako je omjer namotaja transformatora neispravan, zamijenite mjerni transformator.
- 8) Niski izlazni napon generatora može se javiti pri radu u *droop* režimu s, na njega spojenim, induktivnim opterećenjem. Ako niski izlazni napon nije uzrokovana *droop* funkcijom, nastavlja se na korak 9)
- 9) Potrebna je zamjena regulatora napona [8].

### 3.2.3. Izlazni napon generatora je previsok - prenapon

- 1) Provjeriti je li podešenje izlaznoga napona postavljeno na previsoku vrijednost. Ako je podešavanje napona ispravno, nastaviti na korak 2), ali ako je podešavanje napona previsoko, potrebna je prilagodba napona na ispravne vrijednosti.
- 2) Provjeriti ima li mjerni transformator ispravan omjer namotaja. Ako je naponski mjerni transformator ispravan, nastavlja se na korak 3). Ako je omjer namotaja mjernoga transformatora neispravan, treba zamijeniti mjerni transformator ispravnim.
- 3) Visoki izlazni napon generatora može se dogoditi ako generator radi u *droop* režimu rada sa spojenim induktivnim teretom. Ako visoki izlazni napon nije uzrokovan *droop* režimom rada, prelazi se na korak 4).
- 4) Visoki izlazni napon generatora može se javiti pri radu u načinu kompenzacije gubitka napona sa spojenim velikim teretom. Ako prenapon nije uzrokovan funkcijom kompenzacije gubitka napona, nastavlja se na korak 5).
- 5) Potrebna je provjera ispravnosti osigurača za mjerni transformator. Ako su osigurači za mjerni transformator ispravni, nastavlja se na korak 6). Ako su osigurači za mjerni transformator neispravni, zamijenite osigurače [8].
- 6) Potrebna je provjera pomoćnoga ulaznog napajanja regulatoru napona. Napon viši od predviđenoga na ulazu u regulator napajanja uzrokovat će viši izlazni napon od predviđenoga napona generatora. Ako je napon prisutan na pomoćnom napajanju, uklonite to napajanje tako da uklonite žice putem kojih se regulator napona napaja. Ako se žice uklone i napon generatora se vrati na željenu razinu, istražite odakle dolazi napon; moguće je da je to uređaj za regulaciju reaktivne snage i faktora snage, ili drugi izvor kontrole. Ako pomoćni ulazni napon nije prisutan ili je iznimno visok, nastavlja se na korak 7).
- 7) Zadnji korak i rješenje je zamjena regulatora napona [8].

## 4. EKSPLOATACIJA GENERATORA

Sabirnice generatora (1) služe povezivanju generatora na mrežu. One su zapravo goli (neizolirani) bakreni vodiči koji služe povezivanju unutarnjih dijelova generatora s mrežom na koju se taj generator spaja. Stator (2) se spaja na kućište zamašnjaka. Kako se glavno magnetsko polje okreće s osovinom rotora, tako se okreću i njegove silnice koje sijeku statorske vodiče i u njima induciraju napon. Fleksibilna spojka povezuje osovinu rotora (4) sa zamašnjakom motora. Glavna uzbuda (3) spojena je izravno na osovinu rotora. Motor daje snagu za okretanje osovine rotora (4), kao i statora uzbude (6) i statora glavnoga polja (3). Komponente ispravljača pretvaraju izmjeničnu struju u istosmjernu struju potrebnu za uzbudu. Ova istosmjerna struja dovodi se u stator generatora te se oko polova statora stvara magnetsko polje. Dva ispravljača napajaju rotor (3) istosmjernom strujom. Generator SR4B je samoventilirajući generator, što znači da zrak ulazi u generator kroz zaklonjene otvore koji se nalaze na stražnjoj strani generatora. Ventilator, koji odvodi toplinu iz kućišta generatora (8), spaja se na osovinu rotora (4), dok ležaj (7) podupire osovinu rotora na uzbudnome kraju generatora.



**Slika 10. Presjek SR4B generatora**

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

Napomena: Neki veći generatori zbog svoje robusnosti imaju dva ležaja. U tim slučajevima postoje ležaji na svakom kraju osovine generatora [2].

#### **4.1. PRVO PUŠTANJE GENERATORA U POGON**

Prije prvoga pokretanja naročito je potrebno obaviti ispitivanja izolacije statora, što je objašnjeno u poglavlju 5.4.4. Tijekom prvoga puštanja generatora u pogon važno je nadzirati parametre generatora, ali i njegovoga pogonskog stroja. Posebno treba pratiti parametre poput napona, struja, frekvencije, tlaka ulja i temperature pogonskoga stroja itd. Cilj je osigurati održavanje parametara unutar propisanih granica.

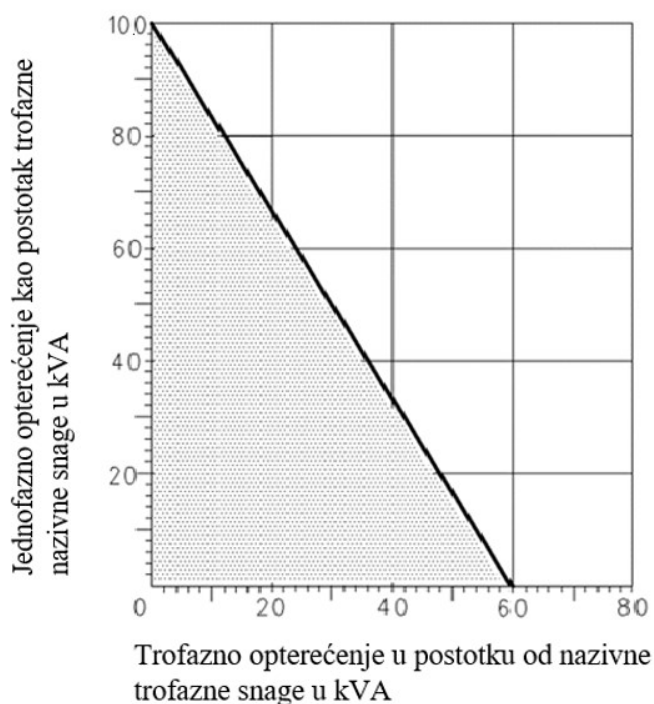
Postupak prvoga pokretanja generatora prikazan je sljedećim koracima [3]:

1. Obaviti sve prethodne provjere za pokretanje motora.
  - a. Provjeriti jesu li svi dijelovi ispravno priključeni i da nema drugih ljudi u blizini generatora.
2. Provjeriti je li glavni prekidač otvoren.
  - a. Mora biti u otvorenome stanju. Ukoliko nije, potrebno ga je staviti u otvoreni položaj.
3. Pokrenuti pogonski stroj (u ovome slučaju dizelski motor) i pustiti ga neko vrijeme da radi kako bi se ugrijao, tj. dosegno radnu temperaturu.
4. Generator se sada može pokrenuti pri praznome hodu kako bi se provjerila osnovna funkcionalnost bez opterećenja.
5. Zatvoriti glavni prekidač.
6. Nakon što generator radi stabilno u praznome hodu, postupno se može opteretiti u skladu s preporukama kako bi se postupno povećavala proizvodnja električne energije.
7. Potrebno je podešavanje regulatora okretaja kako bi se pogonski stroj, s time i generator, okretao nazivnom frekvencijom.

Važno je da se postupak izvodi pod nadzorom kako bi se osigurala sigurnost i optimalne performanse generatora.

## 4.2. OPTEREĆENJE GENERATORA

Kod instaliranja generatora ili ponovnoga spajanja na mrežu, struja po pojedinoj fazi generatora nikako ne smije prelaziti nazivne vrijednosti koje su upisane na natpisnoj pločici. Svaka faza treba biti pod istim opterećenjem jer to omogućuje motoru da radi s punom nazivnom snagom. Ako struja jedne faze premašuje struju naznačenu na natpisnoj pločici, električna neravnoteža može rezultirati električnim preopterećenjem i pregrijavanjem. Dopusštene kombinacije neuravnoteženih opterećenja prikazane su na slici 11. Kada se radi sa značajnim jednofaznim opterećenjima, mogu se koristiti kombinacije jednofaznoga opterećenja i trofaznoga opterećenja, ali takve kombinacije trebaju biti smještene ispod krivulje na slici 11. [3].



**Slika 11. Presjek SR4B generatora**

Izvor: Caterpillar 2009, *Operation and Maintenance Manual*, C28 and C30 generator sets, Irving, Texas [3]

Naglo opterećenje znači da se na generator, dok on i njegov pogonski stroj rade uredno, priključi znatno veći teret od predviđenoga i unaprijed propisanoga. To uzrokuje smanjenje brzine pogonskoga stroja, i pad frekvencije i napona generatora. Naglo opterećenje generatora predstavlja kratkotrajni porast potrošnje električne energije koju generator treba



isporučiti. Ovo opterećenje može biti uzrokovano, primjerice, uključanjem velikoga elektromotora ili drugoga uređaja s velikom potrošnjom struje.

Kako bi se nosili s naglim opterećenjem, generatori moraju biti projektirani i proizvedeni da mogu brzo povećati izlaznu snagu kako bi zadovoljili porast potrošnje električne energije. Međutim, ako naglo opterećenje premaši izlaznu snagu generatora, to može dovesti do pada izlaznoga napona i frekvencije, a u krajnjem slučaju i do prekida napajanja električnom energijom.

Stoga je važno da generatori budu pravilno dimenzionirani i održavani kako bi mogli adekvatno podnijeti nagla opterećenja. Generatori koji se koriste kao izvori rezervne energije trebaju biti posebno opremljeni i programirani kako bi automatski reagirali na nagla opterećenja i osigurali neprekidno napajanje električnom energijom u kritičnim situacijama. Sposobnost nagloga opterećivanja generatora i njegovoga pogonskog stroja ovisi o sljedećim čimbenicima [3]:

1. odzivu motora
2. odzivu regulatora napona
3. vrsti regulatora napona
4. nadmorskoj visini rada generatora (na većim nadmorskim visinama zrak postaje rjeđi, što znači da motor dobiva manje kisika, a to može utjecati na sposobnost generatora da isporučuje nazivnu snagu)
5. vrsti tereta
6. postotku opterećenja prije nagloga opterećenja.

### **4.3. FAKTOR SNAGE**

Faktor snage ( $\cos\phi$ ) (PF) generatora SR4B prikazuje omjer radne snage (P) i prividne snage (S). Prividna snaga je produkt efektivne vrijednosti struje (I) i efektivne vrijednosti napona (V) te se mjeri u volt-amperima (VA), dok je radna snaga izražena u vatima (W) i predstavlja stvarnu korisnu snagu koja se prenosi na teret. Faktor snage sustava može se odrediti pomoću mjerača faktora snage ili računski. Povećanjem faktora snage, uz istu djelatnu snagu potrošnje smanjit će se struja generatora. Primjerice, potrošnja s faktorom snage od 0,8 ukupne snage potrošača od 100 kW korisne snage opterećuje generator sa 125 kVA, dok kod faktora snage od 1,0 opterećuje generator sa samo 100 kVA. Visoki faktor

snage rezultirat će punim opterećenjem motora pri manjoj jačini struje generatora od nazivne. Nazivni faktor snage SR4B generatora je 0,8 [4].

#### 4.4. MINIMALNA BRZINA GENERATORA

Dizel generatori obično imaju postavku minimalne brzine. Minimalne brzine kod generatora od 60 Hz približno iznose 66% nazivne brzine, a kod generatora od 50 Hz približno 80% nazivne brzine. Ne postoji onemogućavanje minimalnih brzina na agregatima s elektroničkim regulatorima, dok su na agregatima s mehaničkim regulatorima te minimalne brzine postavljene tvornički. Minimalne brzine u praznome hodu može podesiti samo proizvođač agregata.

Minimalna brzina generatora (engl. *idle speed*, funkcija) kod agregata omogućuje rad dizelskog motora na minimalnoj brzini prije gašenja ili nakon pokretanja kao pripremu za skori rad na punoj. To omogućuje motoru da se postupno ohladi prije gašenja ili zagrije prije opterećenja. Ovo stanje značajno produljuje životni vijek motora i smanjuje trošenje dijelova. Također, *idle speed* omogućuje kontrolu i ispitivanje različitih parametara generatora pri minimalnoj brzini, što olakšava otkrivanje bilo kakvih problema ili nedostataka.

Rad generatorskoga seta pri niskoj brzini u praznome hodu dulje vrijeme uzrokovat će isključivanje regulatora napona. Ukoliko se to dogodi, generator se mora potpuno isključiti pa ponovno pokrenuti [4].

#### 4.5. AGREGAT U PRIPRAVNOSTI

Agregat u pripravnosti predstavlja generator koji je uključen, ali trenutno ne proizvodi električnu energiju. To se obično radi kada se generator koristi kao rezervni izvor napajanja u slučaju nestanka struje. Agregat u pripravnosti može biti dio postrojenja za napajanje električnom energijom, kao što je to slučaj u bolnicama, tvornicama, podatkovnim centrima i sl. On se koristi kako bi se osigurala neprekidna opskrba energijom te se aktivira samo kada se javi prekid u napajanju.

Generator u pripravnosti obično se drži u načinu rada na minimalnoj brzini, čime se smanjuje potrošnja goriva i trošenje dijelova generatora. Ovaj način rada omogućuje brži

početak rada i spremanje generatora za sljedeći prekid u napajanju. Kada se aktivira generator u pripravnosti, on automatski počinje proizvoditi električnu energiju i preuzima ulogu izvora napajanja, obično u roku od nekoliko sekundi. Ovo je važno za održavanje kontinuiteta procesa i sigurnosti, naročito u slučajevima kada su kritični uređaji uključeni u procesima.

Generator u pripravnosti također igra važnu ulogu u smanjenju rizika od oštećenja elektroenergetskih sustava. Kada se javi prekid u napajanju, generator u pripravnosti preuzima ulogu glavnoga napajanja i time sprječava pad sustava ili gubitak napajanja u kritičnim situacijama. Ovo je osobito važno u slučajevima kada je potrebno održavati stabilnost elektroenergetskoga sustava.

Kako bi se osigurao optimalan rad generatora u pripravnosti, potrebno je redovito provjeravati njegovo stanje i održavanje. Ovo uključuje redovite provjere električnih i mehaničkih dijelova, kao i redovito čišćenje i servisiranje. Osim toga, potrebno je provoditi redovite testove agregata u pripravnosti kako bi se osiguralo da je u stanju preuzeti ulogu izvora napajanja u slučaju prekida u napajanju. Pravilno održavanje i testiranje generatora u pripravnosti može pomoći u osiguravanju kontinuiteta procesa. Većina generatora u stanju pripravnosti dolazi s prethodno postavljenim kontrolama koje će automatski pokrenuti jedinicu. Jedinice u pripravnosti pokreću se, preuzimaju teret, rade i zaustavljaju bez prisutnosti operatera. Uvijek je potrebno odraditi i provjeru osigurača, odnosno da su svi prekidači ispravno postavljeni, što znači da kontrola za pokretanje mora biti u automatskome režimu rada te da prekidači za zaustavljanje u nuždi trebaju biti u položaju RUN [4].

#### **4.6. SINKRONIZACIJA GENERATORA**

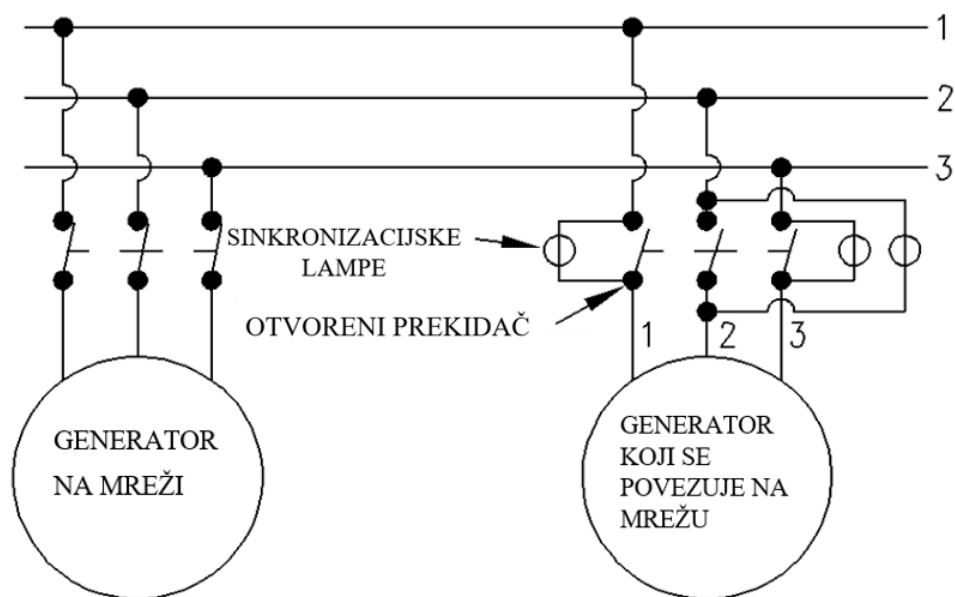
Priprema generatora za paralelni rad zahtijeva posebnu pozornost i potrebno je ispuniti nekoliko uvjeta prije stavljanja više generatorskih jedinica u paralelni rad:

1. isti redosljed faza generatora i mreže
2. približno jednake frekvencije generatora i mreže
3. jednak iznos napona generatora i mreže
4. istofaznost napona generatora i mreže.

## 1) Provjera redoslijeda faza

U paralelnome radu redoslijed faza je iznimno važan čimbenik za ispravno funkcioniranje generatora. Postoje dvije metode kojima se može utvrditi postoji li usklađenost faza između generatora koji se povezuje na mrežu i generatora koji već radi na mreži [4]:

- korištenjem uređaja za mjerenje fazne rotacije, odnosno sinkronoskopom
- korištenjem seta sinkronizacijskih lampa (engl. *synchronising lamps*).



**Slika 12. Postupak određivanja fazne rotacije putem sinkronizacijskih lampa u tamnom spoju**

Izvor: Caterpillar 2000, *Operation and Maintenance Manual, SR4B generators and control panels*, Irving, Texas [4]

Kako bi se ovaj postupak izveo, povezuju se žarulje između vodova generatora i odgovarajućih faza mreže ili generatora koji je već spojen na mrežu. Primjerice, spajanjem priključka 1 s vodom 1 preko otvorenoga prekidača.

Nakon pokretanja jedinica koje će raditi paralelno, postupak se nastavlja ubrzavanjem jedinica. Kako se jedinice približavaju istoj brzini, vidljivo je usporavanje treperenja svjetala [4].

Kada se primijeti da svjetla sinkronizacijskih lampa trepere u nizu, to ukazuje na pogrešan redoslijed faza na jednome od generatora. U tome slučaju jedinice se moraju zaustaviti, a vodovi generatora 1 i 3 na prekidaču moraju se zamijeniti kako bi se promijenio smjer rotacije faza. Priključak 2 uvijek treba biti spojen na liniju 2.

Nakon što su ove promjene provedene, oba generatora će imati istu fazu rotacije kada svjetla sinkronizacijskih lampa budu sinkronizirano treperila, čime se zadovoljava prvi uvjet za inicijalno pokretanje u paralelnome režimu rada [4].

## 2) Prilagodavanje frekvencije

Jedinice koje će raditi paralelno moraju raditi na istoj frekvenciji. Frekvencija izmjenične struje postavlja se regulacijom brzine, što se u slučaju dizelskih generatora ostvaruje prilagodbom dovoda goriva [4].

- a) Potrebno je ostaviti svaki generator i njegov pogonski stroj da radi pod opterećenjem oko 30 minuta.
- b) Potrebno je podesiti brzinu kako bi se dobila nazivna frekvencija pri punome opterećenju.
- c) Potrebno je skinuti opterećenje i provjeriti brzinu praznoga hoda za generatore. Brzina praznoga hoda trebala bi biti otprilike 2 do 5 posto iznad brzine punoga opterećenja.
- d) Za najdosljednije rezultate treba ponavljati korake b) i c) sve dok se ne ispuni drugi uvjet "početnoga pokretanja".

## 3) Prilagodavanje napona

Kako bi se jedinica za paralelni rad mogla namjestiti, potrebno je spojiti strujni transformator na za to predviđene kontakte na regulatoru napona. *Quadrature droop* je električna osobitost generatora koja se koristi u sinkronim generatorima kako bi se osigurala stabilna podjela opterećenja između dvaju ili više generatora koji rade u paralelnome režimu rada. Potenciometar za *quadrature droop* na regulatoru napona treba biti postavljen u položaj za ravnomjernu podjelu opterećenja. Nakon postavljanja nazivnoga opterećenja napon bi

trebao pasti za 2% do 3%. Ako se napon poveća, potrebno je zamijeniti izlaze na sekundaru transformatora.

Kada se generatori spajaju u paralelni režim rada, potrebno je osigurati da naponi praznoga hoda budu jednaki za sve generatore. Da bi se postigla razmjena snage od 0 kW, generatori se paralelno spajaju uz precizno podešavanje brzine. Ako postoji struja izjednačenja između generatora, potrebno ju je pokušati smanjiti prilagođivanjem napona na jednome od generatora.

Frekvencija jedinice koja se spaja na mrežu, trebala bi biti malo veća od frekvencije mreže. To će dolaznoj jedinici omogućiti preuzimanje dio opterećenja umjesto da povećava opterećenje sustava [4].

#### **4) Raspodjela opterećenja i struje**

Nakon što su generatori stavljeni u paralelni režim rada, na njih se priključuje opterećenje. Snaga među generatorima, koji su u paralelnome režimu rada, izjednačuje se ili proporcionalno dijeli između jedinica promjenom brzine, dok se finim uglađivanjem funkcije *quadrature droopa* izjednačava struja među generatorima [4].

Nakon otprilike sat vremena temperatura generatora će se stabilizirati. Tada treba prilagoditi reostat *voltage droop-a* svakoga generatora. To će osigurati ravnomjernu raspodjelu reaktivnoga opterećenja i ograničiti struje izjednačenja. [4].

## 5. ODRŽAVANJE

Za ispravno održavanje generatora neophodno je koristiti ispitnu električnu opremu. Ona ponajprije mora biti potpuno sigurna za ispitivača i ljude u njegovoj blizini. Također, instrumenti moraju biti provjereno precizni. Prilikom servisiranja ili ispitivanja generatora potrebno je:

1. Uvjeriti se da je generator isključen (odvojen od električne mreže i/ili drugoga generatora) te da je ili zaključan ili označen da nije u upotrebi.
2. Ukloniti sve osigurače.
3. Provjeriti je li pogonski stroj generatora zaustavljen.
4. Provjeriti da baterije nisu spojene.
5. Provjeriti jesu li svi kondenzatori ispražnjeni.

Instrumenti potrebni za ispitivanje i servisiranje generatora nalaze se u Tablici 1.

**Tablica 1. Popis servisne opreme i opreme koja služi ispitivanju ispravnosti generatora**

POTREBNI ALATI		
Serijski broj alata	Alat	Količina
6V - 7070	Digitalni multimetar koji se koristi za mjerenje napona, otpora te struje do 10 ampera. Ispravljачke diode se mogu ispitati pomoću multimetra ali posebnom funkcijom <i>diode function</i> .	
9U - 7330	Digitalni multimetar (opcionalni) koji se koristi za mjerenje napona, struje, frekvencije i kapaciteta.	1
8T - 0900	AC/DC strujna mjerna kliješta. Koriste se za mjerenje struje do 1200 ampera.	1
9U - 6003	Ispitivač izolacije (megaohmmetar). Koristi se za mjerenje izolacijskog otpora statora, rotora, statora predubudnika i rotora predubudnika.	1
	Miliometar (Wheatstoneov most). Koristi se za mjerenje otpora namotaja glavnog statora i polja predubudnika.	1

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

Ako se to ne učini, može doći do ozbiljnih ozljeda ili smrti. Treba provjeriti je li napon u rotoru, statoru i generatoru ispražnjen.

## **5.1. RJEŠAVANJE PROBLEMA U RADU GENERATORA**

Za svaki problem može postojati nekoliko uzroka. Preporučuju se posebni pregledi ili ispitivanja kako bi se lakše uočile neispravne komponente. Generator je sastavni dio agregata te ga treba ispitivati zajedno s motorom. Problem se mora definirati a greška locirati prije nego što se mogu ispraviti.

Za identifikaciju greške potrebno je koristiti sljedeće postupke [2]:

1. Izvršiti vizualne provjere radi lakše identifikacije.
2. Koristiti rezultate prethodnih testova obavljenih prema servisnome priručniku regulatora napona.
3. Izvesti test funkcionalnosti generatora, koji će pomoći u pronalaženju greške.

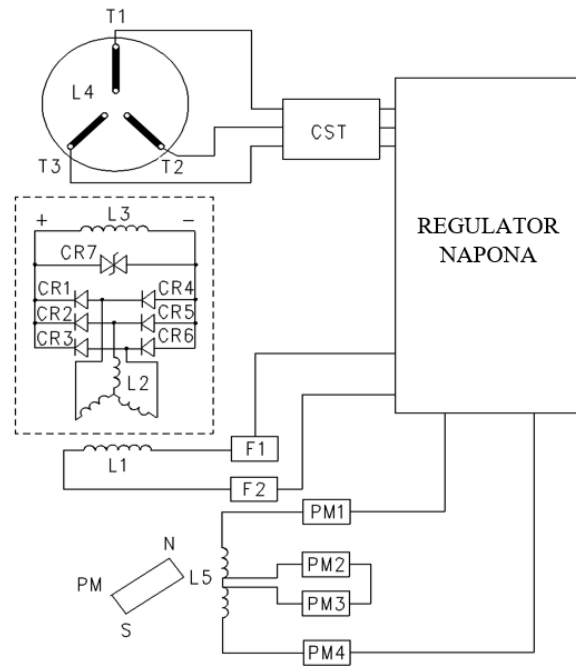
Vizualni pregled generatora često može brzo otkriti moguće uzroke kvara. Posebno je važno pregledavanje svih ožičenja te obraćanje pozornosti na istrošenost izolacije ili mogući nedostatak izolacije. Važno je uvjeriti se da su svi spojevi na priključcima vodiča čvrsti i da nisu korodirani. Promjena boje električnih kontakata ukazuje na to da su bili pod velikim strujnim opterećenjem. Veliki dio električnih problema uzrokovan je mehaničkim nedostacima. Pozorno se mora pregledati cjelokupna instalacija, a mehaničke nedostatke potrebno je popraviti [2].

## **5.2. TEST FUNKCIONALNOSTI GENERATORA**

Test funkcionalnosti generatora je pojednostavljeni test koji se može izvesti kako bi se utvrdilo je li generator ispravan za korištenje. Završni test bi se trebalo izvoditi na generatoru i njegovome pogonskom stroju dok je generator pod opterećenjem. Test funkcionalnosti generatora određuje inducira li se napon i jesu li fazni naponi uravnoteženi. Osim toga, ovaj test utvrđuje promjenu izlaznoga napona s promjenom brzine motora.



- 1) (CR1 do CR6) Ispravljačke diode
- 2) (CR7) Varistor
- 3) (L1) Uzbudno polje (stator)
- 4) (L2) Armatura uzbude (rotor)
- 5) (L3) Glavno polje (rotor)
- 6) (L4) Glavna armatura (stator)
- 7) (L5) Armatura uzbude
- 8) (PM) Permanentni magneti
- 9) (RFA) Sklop rotirajućeg polja
- 10) (CST) Opcionalni transformator
- 11) (T1, T2, T3) Stezaljke generatora i/ili vodovi generatora



**Slika 13. Električna shema PMPE generatora**

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

**Tablica 2. Potrebni alati za ispitivanje generatora i regulatora napona**

POTREBNI ALATI		
Serijski broj alata	Alat	Količina
6V-7070	Multimetar	1
	12V DC Baterija	1

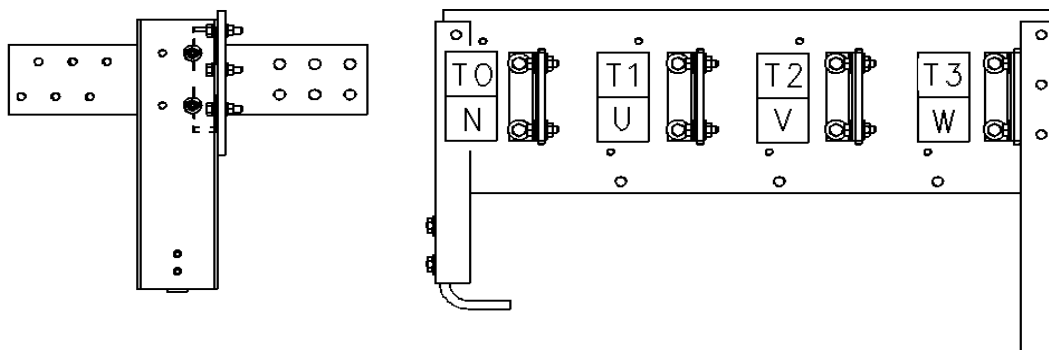
Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

Test funkcionalnosti generatora i njegovoga pogonskog stroja sastoji se od sljedećih koraka:

1. Odvojiti žice F1 i F2 od regulatora napona. (slika 13.)
2. Spojiti automobilsku bateriju (akumulator) od 12 VDC na žice F1+ i F2-.

3. Ne dopustiti da izlazni napon generatora na sabirnicama (slika 14.) premaši nazivni napon na natpisnoj pločici.
4. Potrebno je da generator radi na pola nazivne brzine.
5. Izmjeriti izmjenični napon na priključcima i zabilježiti rezultate (Tablica 3.).
6. Pratiti napone dok se brzina smanjuje, a zatim povećavati brzinu generatorskoga agregata za 10%, ali ne prekoračiti polovicu nazivne brzine.
7. Izmjereni naponi u koraku 4 trebaju biti najmanje 85 VAC. S povećanjem brzine generatora od 10%, naponi u koraku 5 trebali bi pokazati porast od 10%. Sa smanjenjem brzine generatora od 10%, naponi u koraku 5 trebali bi pokazati pad od 10%.

U slučaju da se brzina pogonskoga stroja ne može podesiti na pola nazivne brzine, može se koristiti baterija od 6 VDC. Baterija od 6 VDC bila bi spojena na žice F1+ i F2- u koraku 2.



**Slika 14. Sabirnice generatora**

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

**Tablica 3. Tablica za praćenje napona na sabirnici generatora**

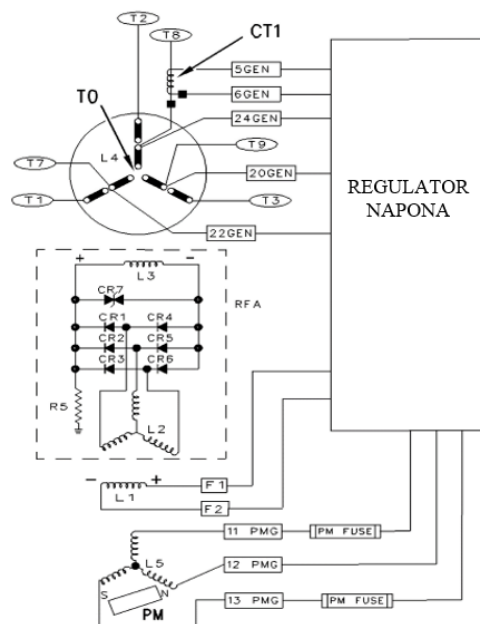
<b>IZMJENIČNI NAPON PO POJEDINIM PRIKLJUČCIMA</b>		
<b>Brzina generatora (pogonskog stroja)</b>	<b>Priključci</b>	<b>Izmjenični napon</b>
50% nazivne brzine	T1, T2	
	T1, T3	
	T2, T3	
Smanjenje brzine po 10%	T1, T2	
	T1, T3	
	T2, T3	
Povećanje brzine po 10%, <b>najviše do 50%</b> <b>nazivne brzine</b>	T1, T2	
	T1, T3	
	T2, T3	

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

### 5.3. ISPITIVANJE NAMOTA

Svrha ispitivanja namota je prije svega potvrditi njihovu neprekinutost. Potrebno je izmjeriti otpor sljedećih namota: (L1), (L2), (L3), (L4) i (L5). Namoti koji se ispituju moraju se odvojiti od ostalih komponenata kako bi se izmjerio njihov točan otpor. Temperatura namotaja utječe na otpor tako da se s porastom temperature otpor namotaja povećava, a smanjenjem temperature smanjuje [2]. Ispravno se mjerenje prema tome, može se izvesti samo kada su namotaji na sobnoj temperaturi. Mjerenja otpora su aproksimativna, odnosno ne mogu biti precizna, ali ako izmjerena vrijednost nije blizu približne zadane vrijednosti, postoji mogućnost da je namotaj oštećen. Također te ne bi trebao postojati spoj između namotaja i uzemljenja, kao ni spoj između bilo kojega namotaja i drugoga namotaja.

1. (CR1-C6) Ispravljačke diode
2. (CR7) Varistor
3. (L1) stator preduzbude
4. (L2) rotor uzbude
5. (L3) Rotor
6. (L4) stator
7. (L5) stator uzbude
8. (PM) Permanentni magneti
9. (RFA) Sklop okretnog polja
10. (CT1) Opcionalni transformator pada napona
11. (T0, T1, T2, T3, T7, T8, T9) priključci generatora



**Slika 15. Dijagram ožičenja PMPE generatora**

Izvor: Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas [2]

Namotaji armature imaju vrlo mali otpor: (L2), (L4) i (L5), pa će otpor ovih namotaja biti blizu 0 oma [2]:

- a) rotor uzbude (L2) – manje od 0,1 oma
- b) stator (L4) - manje od 0,1 oma
- c) stator preduzbude (L5) – manje od 0,1 oma.

Namotaja polja imaju još uvijek mali, ali ipak značajno veći otpor (L1) i (L3):

- a) stator uzbude (L1) – približno 3,0 oma do 6,0 oma
- b) rotor (L3) – približno 0,75 oma do 2,0 oma.

#### 5.4. ISPITIVANJE IZOLACIJE NAMOTA

Ispitivanjem se mjeri otpor izolacije namota. Ispitivač izolacije (megaohmmetar) proizvodi visoki napon između ispitnih vodova. Tijekom testa teče mala struja te instrument pretvara ovu struju u očitavanje velikog otpora. Ispitivanje izolacije provodi se u sklopu periodičnoga održavanja kako bi se otkrilo pogoršanje izolacije namota. Kada dođe do brzoga smanjenja izolacijskoga otpora u kratkome vremenu, generator je potrebno servisirati, odnosno očistiti. Kada se generatori nisu koristili neko vrijeme, moguće je

skupljanje vlage, stoga bi ispitivanje izolacije trebalo provesti na generatorima koji su bili u stanju mirovanja [2]. Ako je poznato i da postoji vlaga na namotima, potrebno ih je osušiti prije ispitivanja.

Slabljenje izolacije namota može biti posljedica:

- a) vlage (voda)
- b) prašine
- c) masti
- d) drugih stranih tvari unutar generatora.

Namot je potrebno popraviti ili ga treba zamijeniti ako izmjereni otpor izolacije pada ispod propisane vrijednosti a postupak čišćenja i sušenja ne popravlja očitavanje. Otpor izolacije je aproksimativna vrijednost. Generator može raditi i s manjim vrijednostima, ali je veća vjerojatnost kvara generatora koji ima nizak otpor izolacije namotaja. Ispitivanje izolacije daje točne rezultate samo kada su namoti generatora bez vlage i kada su na sobnoj temperaturi. Svaki namot mora imati minimalni izolacijski otpor od jednoga megaoma [2].

#### **5.4.1. Postupak ispitivanja statora (L4)**

1. Prvi korak je uklanjanje opterećenja s generatora otvaranjem prekidača ili razdvajanjem opterećenja putem priključaka (T1), (T2), (T3) i (T0). Potrebno je spriječiti da se ovi vodiči dodiruju međusobno i da dodiruju tlo.
2. Drugi korak je izolacija statora (L4) od regulatora napona razdvajanjem vodiča s priključaka 20, 22 i 24. Ako je nula generatora (T0) spojena na kućište generatora ili uzemljenje, vezu je potrebno prekinuti.
3. Potom se povezuje jedan kraj izolacijskog ispitivača (megaohmmetra) s uzemljenjem generatora.
4. Drugi ispitni kabel ispitivača spaja se na nulu generatora (T0).
5. Izolacijski otpor mora biti  $1M\Omega$  ili veći.

#### **5.4.2. Postupak ispitivanja statora uzbude (L1)**

1. Počinje se od izoliranja statora uzbude (L1) od regulatora napona razdvajanjem vodiča F1 i F2. Mora se osigurati da se ove žice dodiruju međusobno i da dodiruju uzemljenje.
2. Potom se povezuje jedan kraj ispitivača izolacije (megaohmmetra) s kućištem generatora (uzemljenje).
3. Drugi se kraj ispitivača povezuje s namotajima uzbude (F1 ili F2).
4. Mjeri se otpor izolacije namotaja statora uzbude prema uzemljenju. Otpor izolacije mora biti najmanje 0,25 MΩ.

#### **5.4.3. Postupak ispitivanja rotora uzbude (L2)**

1. Prvi korak je izoliranje rotora uzbude (L2) od ispravljačkoga kruga razdvajanjem triju vodiča.
2. Potom se povezuje jedan kraj ispitivača izolacije (megaohmmetra) s vratilom rotora.
3. Drugi kraj ispitivača povezuje se s bilo kojim vodičem rotora uzbude.
4. Otpor izolacije mora biti najmanje 0,25 MΩ.

#### **5.4.4. Postupak ispitivanja statora predubude (L5)**

1. Prvo se izolira armatura (stator) predubudnika (L5) od regulatora napona. Razdvoje se vodovi 26, 28 i 30 predubudnika s priključnih točaka. Ove žice obično se povezuju na sabirnicu ili se povezuju na regulator napona.
2. Potom se povezuje jedan kraj ispitivača izolacije (megaohmmetra) s uzemljenjem generatora.
3. Drugi kraj izolacijskoga ispitivača povezuje se s bilo kojim od vodiča statora predubudnika.
4. Otpor izolacije mora biti minimalno 0,25 MΩ.

## ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada bio je prikazati ovaj često upotrebljavani generator koji se koristi i na brodovima u niskonaponskim i visokonaponskim inačicama. Opisani su načini uzbude odnosno samouzbudna izvedba (SE) i izvedba s preduzbudom pomoću preduzбудnika s permanentnim magnetima (PMPE), njihovi dijelovi, načine ispitivanja, postupci servisiranja i rješavanja kvarova pojedinih komponenata. Najveća razlika između SR4B generatora sa samouzbudom i s uzbudom pomoću preduzбудnika s permanentnim magnetima je ta da SR4B generator s preduzбудnikom s permanentnim magnetom (PMPE) dobiva napajanje za regulaciju napona od strane preduzbude, a ne od glavne armature (statora). SE inačica generatora je manje učinkovita od PMPE inačice, jer zahtijeva izlazni napon za uzbudu, što znači da se dio generirane struje troši i na samu uzbudu, ali je to u biti zanemariva razlika u utrošku energije. SE inačica je jednostavnija i ekonomičnija za proizvodnju od PMPE inačice. Naspram toga, a to je posebice važno za brodsku primjenu, preduzbuda se koristi kao pouzdaniji način pokretanja generatora nakon dugotrajnoga stajanja. To je zato što preduzбудnik koristi sigurne permanentne magnete za stvaranje magnetskoga polja koje se koristi za pokretanje glavne uzbude generatora. S druge strane magnetski polovi s uzbudnim namotima kod SE inačice kod dugotrajnog stajanja u prisutnosti vlage i promjena temperature mogu ponekad izgubiti zaostali magnetizam neophodan za pokretanje samouzbude. Zbog toga je preduzbuda bolja opcija za napajanje uzbude generatora u situacijama kada je generator neko vrijeme, npr. zbog nedostatka rezervnih dijelova pomoćnog motora neaktivan.

Posebno je važno testiranje i ispitivanje ispravnosti SR4B generatora, ali i njegovih dijelova, kao što su regulator napona i pripadajući pogonski stroj, koristeći pritom propisanu i unaprijed provjerenu opremu za ispitivanje, kao što su megaohmmetar, digitalni multimetar, baterija od 12V i AD/DC strujna kliješta. Potrebno je da sva oprema bude ispravna i prethodno ispitana jer neprikladna i neprovjerena ispitna oprema može zakazati i predstavljati opasnost od strujnog udara za korisnika. Isto tako, generator i njegovi pripadajući dijelovi ispituju se potpuno suhi i na sobnoj temperaturi budući da temperatura i vlaga utječu na otpor izolacije i otpor statora.. Svaki namot mora imati minimalni izolacijski otpor od jednoga megaoma. Vizualni pregled generatora također može otkriti moguće uzroke kvara, pa je uvijek potrebno posebno pregledati svih ožičenja te obratiti pozornost na istrošenost ili oštećenje izolacije. Promjena boje električnih komponenata ukazuje na to da su bile izložene povećanom zagrijavanju najčešće zbog velike struje ili lošeg kontakta.

Veliki dio električnih problema uzrokovan je mehaničkim kvarovima koji se lako uočavaju i otklanjaju.



## POPIS LITERATURE

- [1] Caterpillar 1996, *SR4B generator*, Irving, Texas.
- [2] Caterpillar 2002, *Systems operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly SR4B Generator*, Irving, Texas.
- [3] Caterpillar 2009, *Operation and Maintenance Manual*, C28 and C30 generator sets, Irving, Texas.
- [4] Caterpillar 2000, *Operation and Maintenance Manual*, SR4B generators and control panels, Irving, Texas.
- [5] Boldea, I. 2006, *The Electric Generators Handbook: Synchronous generators*, Boca Raton, FL: CRC Press.
- [6] Caterpillar 1996, *SR4B Generators. 820 Standby*, Irving, Texas
- [7] Caterpillar 2008, *Systems operation, Connection Diagrams: SR4 and SR4B Generators, Voltage Regulators, Options*, Irving, Texas
- [8] Caterpillar 2003, *Specifications System Operation Testing and Adjusting Caterpillar Digital Voltage Regulator (CDVR)*, Irving, Texas
- [9] Caterpillar 2008, *Application and installation guide, Generator systems*, Irving, Texas
- [10] Jignesh, P. 2011, *What is HIPOT Testing (Dielectric Strength Test)*, 22 December, Member of Institution of Engineers (MIE), India, online: <https://electrical-engineering-portal.com/what-is-hipot-testing-dielectric-strength-test> (26.5.2023.)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz rotora SR4B generatora.....	2
Slika 2. Prikaz statora SR4B generatora.....	3
Slika 3. SR4B generator .....	5
Slika 4. Presjek generatora s uzбудom s permanentnim magnetima .....	6
Slika 5. Električna shema PMPE generatora .....	8
Slika 6. Presjek samouzbuđnoga (SE) generatora .....	10
Slika 7. Električna shema samouzbuđnoga generatora .....	11
Slika 8. Prikaz Caterpillarovoga digitalnog regulatora napona (CDVR) .....	14
Slika 9. Odnos nazivnoga napona i nazivne frekvencije u postocima.....	15
Slika 10. Presjek SR4B generatora.....	22
Slika 11. Presjek SR4B generatora.....	24
Slika 12. Postupak određivanja fazne rotacije putem sinkronizacijskih lampa u tamnom spoju .....	28
Slika 13. Električna shema PMPE generatora .....	33
Slika 14. Sabirnice generatora .....	34
Slika 15. Dijagram ožičenja PMPE generatora .....	36

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Popis servisne opreme i opreme koja služi ispitivanju ispravnosti generatora .....	31
Tablica 2. Potrebni alati za ispitivanje generatora i regulatora napona.....	33
Tablica 3. Tablica za praćenje napona na sabirnici generatora .....	35

## POPIS KRATICA

Kratika	Puni naziv na stranome jeziku	Tumačenje na hrvatskome jeziku
AC	engl. <i>Alternating Current</i>	izmjenična struja
AVR	engl. <i>Automatic Voltage Regulator</i>	automatski regulator napona
CDVR	engl. <i>Caterpillar Digital Voltage Regulator</i>	Caterpillarov digitalni regulator napona
DC	engl. <i>Direct Current</i>	istosmjerna struja
EDM	engl. <i>Exciter Diode Monitor</i>	nadzor dioda uzbude
PF	engl. <i>power factor</i>	faktor snage
PMPE	engl. <i>Permanent Magnet Pilot Exciter</i>	preduzbudnik s permanentnim magnetima
RFA	engl. <i>Rotating Field Assembly</i>	sklop rotirajućeg polja
SE	engl. <i>Self Excited</i>	samoubuda

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Značenje
I	struja
U	napon
R	otpor
$\cos\varphi$	faktor snage
V	volt
kVA	kilovoltamper
W	snaga
P	radna snaga
S	prividna snaga
Hz	frekvencija