OPTIMIRANJE ODRŽAVANJA ELEKTROAGREGATA U SLOŽENIM SUSTAVIMA

Barešić, Dejan

Doctoral thesis / Disertacija

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:085963

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Dejan Barešić

OPTIMIRANJE ODRŽAVANJA ELEKTROAGREGATA U SLOŽENIM SUSTAVIMA

Doktorski rad

Osijek, 2019.

Doktorski rad izrađen je u Zavodu za elektrostrojarstvo, Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku

Mentor: prof. dr. sc. Željko Hederić

Doktorski rad ima: 116 stranica.

Doktorski rad br.: 73

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, predsjednik
2. Prof. dr. sc. Željko Hederić, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, član
3. Izv. prof. dr. sc. Neven Bulić, Sveučilište u Rijeci Tehnički fakultet, član

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, predsjednik
2. Prof. dr. sc. Željko Hederić, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, mentor
3. Prof. dr. sc. Srete Nikolovski, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, član
4. Izv. prof. dr. sc. Damir Blažević, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, član
5. Izv. prof. dr. sc. Neven Bulić, Sveučilište u Rijeci Tehnički fakultet, član

ZAHVALA

Zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Željku Hederiću koji je svojim znanjem i iskustvom dao značajan doprinos u izradi ovoga rada.
Posebno mu zahvaljujem na strpljenju i svestranoj podršci pri provedbi istraživanja.

Zahvaljujem se i izv. prof. dr. sc. Marinku Barukčiću na savjetima i podršci od samih početaka provedbe i objave rezultata istraživanja.

Zahvaljujem se kolegama iz Remontnog zavoda i Zapovjedništva za potporu na pomoći oko pribavljanja sredstava za provedbu ispitivanja te nadređenim zapovjednicima oko ishođenja suglasnosti za provedbu istraživanja.

Zahvaljujem se i radnim kolegama iz Centra za obrambene i strateške studije na razumijevanju i moralnoj podršci za vrijeme izrade rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima koji su mi omogućili da postanem ovo što jesam.

PREGLED SLIKA

Slika 2.1. Podjela održavanja prema izvršitelju i mjestu provedbe……. 5

Slika 2.2. Povijesni razvoj strategija održavanja [9]…… 6

Slika 2.3. Blok dijagram korektivnog održavanja elektroagregata…….. 7

Slika 2.4. Podjela preventivnog održavanja u složenim sustavima 8

Slika 3.1. Ovisnost frekvencije o opterećenju generatora [15]…… 21

Slika 3.2. Devijacija frekvencije od linearne karakteristike pri promjeni opterećenja od praznog hoda do nazivne snage tereta [15]……. 22

Slika 3.3. Frekvencijski pojas u stacionarnom stanju [15]…….. 22

Slika 3.4. Dinamička karakteristika frekvencije pri naglom opterećenju i rasterećenju generatora [15]……. 24

Slika 3.5. Dinamičke karakteristike napona pri naglim promjenama opterećenja [15]…….... 26

Slika 3.6. Prijelazna karakteristika napona nakon naglog opterećenja [15]…… 27

Slika 3.7. Prijelazna karakteristika napona nakon naglog rasterećenja [15]…… 27

Slika 3.8. Ispitivanje elektroagregata za potrebe kategorizacije……..... 36

Slika 3.9. Ovisnost brzine vrtnje o opterećenju elektroagregata pri uporabi različitih pogonskih goriva…….. 38

Slika 3.10. Dijagram snage, okretnog momenta i specifične potrošnje goriva (be) dizel motora serije 3L912[27]……..... 40

Slika 3.11. Simulacijski model u Matlab Simulinku za potrebe podešavanje parametara elektroagregata……. 41

Slika 3.12. Dinamičke promjene snage motora, brzine vrtnje i napona generatora pri uporabi dizel goriva…… 44

Slika 3.13. Razvijene snage pogonskog motora za dva različita goriva bez podešavanja ubrizgavanja……. 44

Slika 3.14. Brzine vrtnje generatora za dva različita goriva bez podešavanja ubrizgavanja 45

Slika 3.15. Propad napona generatora pri udarnom opterećenju za dva različita goriva bez podešavanja ubrizgavanja…… 46

Slika 3.16. Nadvišenje napona generatora pri naglom rasterećenju za dva različita goriva bez podešavanja ubrizgavanja……. 46

Slika 3.17. Razvijene snage pogonskog motora za dva različita goriva s podešenim ubrizgavanjem……..... 47

Slika 3.18. Brzine vrtnje generatora za dva različita goriva s podešenim ubrizgavanjem…… 48

Slika 3.19. Propad napona generatora pri udarnom opterećenju za dva različita goriva s podešenim ubrizgavanjem……... 48

Slika 3.20. Nadvišenje napona generatora pri naglom rasterećenju za dva različita goriva s podešenim ubrizgavanjem……... 49

Slika 3.21. Propadi brzine vrtnje prije i nakon podešavanja sustava ubrizgavanja goriva…… 50

Slika 3.22. Nadvišenja brzine vrtnje prije i nakon podešavanja sustava ubrizgavanja goriva 50

Slika 4.1. Bayesova mreža za detekciju kvara na elektroagregatu……..... 55

Slika 4.2. Određivanje vjerojatnosti kvara na temelju informacija i dijagnostičkih testiranja 56

Slika 4.3. Shema sinkronog beskontaktnog generatora s razmatranim kvarovima……. 59

Slika 4.4. Rotirajući ispravljač sinkronog beskontaktnog generatora (1-nosač dioda, 2-diodna "+" strana, 3- diodna "–" strana, 4- varistor)……..... 60

Slika 4.5. Kratki spoj armaturnog namota (C – kratki spoj između namota i mase, D – kratki spoj između dva armaturna namota)…….. 60

Slika 4.6. Osnovni model za simulaciju kvarova generatora……... 61

Slika 4.7. Brzine vrtnje generatora u ispravnom stanju i stanju kvara sa 100% i 25% opterećenja……... 62

Slika 4.8. Izlazni napon generatora u dva različita stanja (ispravno stanje i stanje kvara)….. 62

Slika 4.9. Brzina vrtnje u ispravnom stanju i stanju kratkog spoja dviju faza uzbudnika….. 63

Slika 4.10. Izlazni napon generatora pri nastanku kratkog spoja između faza rotora uzbudnika u petoj sekundi……... 63

Slika 4.11. Brzina vrtnje generatora u slučaju kratkog spoja između jedne faze armaturnog namota i mase generatora…… 64

Slika 4.12. Brzine vrtnje generatora u slučajevima kratkog spoja između dvije faze armaturnog namota……..... 65

Slika 5.1. Hijerarhijski model AHP metode…… 67

Slika 5.2. Struktura odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima u Model View prozoru Expert Choice programa……. 74

Slika 5.3. Uspoređivanje važnosti kriterija za odabir elektroagregata prema ekonomskim kriterijima……. 75

Slika 5.4. Izračunate važnosti kriterija iz procijenjenih omjera za odabir prema ekonomskim kriterijima…….. 76

Slika 5.5. Usporedba različitih tipova elektroagregata prema kriteriju potrošnje goriva po dobivenom kWh električne energije…… 76

Slika 5.6. Prioriteti najoptimalnijih tipova elektroagregata prema potrošnji goriva…… 77

Slika 5.7. Rezultati odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima…….. 78

Slika 5.8. Struktura odabira elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti u Model View prozoru Expert Choice programa…… 81

Slika 5.9. Uspoređivanje važnosti kriterija za odabir elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti……... 82

Slika 5.10. Izračunate važnosti kriterija iz procijenjenih omjera za odabir prema kriterijima raspoloživosti……... 83

Slika 5.11. Usporedba različitih tipova elektroagregata prema kriteriju količine elektroagregata……. 83

Slika 5.12. Prioriteti najoptimalnijih tipova elektroagregata prema količini……..... 84

Slika 5.13. Rezultati odabira elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti…… 84

PREGLED TABLICA

Tablica 3.1. Tehnički zahtjevi za uvjete sigurnog rada elektroagregata……... 14

Tablica 3.2. Granične vrijednosti za svrstavanje elektroagregata [15]……. 29

Tablica 3.3. Usporedba svojstava dizel goriva i NATO goriva F-34 [18]…… 31

Tablica 3.4. Tehnički podaci pogonskog motora…….. 34

Tablica 3.5. Tehničke karakteristike generatora…… 34

Tablica 3.6. Rezultati tvorničkog ispitivanja……. 35

Tablica 3.7. Rezultati ispitivanja provedenog za potrebe kategorizacije elektroagregata s dizel gorivom……. 37

Tablica 3.8. Rezultati ispitivanja provedenog za potrebe kategorizacije elektroagregata s kerozinskim gorivom F-34…… 38

Tablica 5.1. Saaty-eva skala relativne važnosti [51]……. 68

Tablica 5.2. Vrijednosti *RI* slučajnih indeksa [54]…… 70

PREGLED OZNAKA I SIMBOLA

Oznaka	Značenje
P_n	nazivna snaga
n_0	brzina vrtnje u praznom hodu
n_n	brzina vrtnje pri nazivnom opterećenju
n_{50}	brzina vrtnje pri 50 % opterećenja
U_{sr}	srednja vrijednost napona
U_{max}	maksimalna vrijednost izmjerenog napona
U_{min}	minimalna vrijednost izmjerenog napona
ΔU	promjena napona generatora
U_0	srednja vrijednost napona u praznom hodu
U_n	srednja vrijednost napona pri nazivnom opterećenju
p	broj pari polova sinkronog generatora
δf_{st}	Propad frekvencije u postocima
$f_{i,r}$	frekvencija neopterećenog generatora
g_c	količina goriva
g_{c0}	količina goriva u praznom hodu
h_0	položaj ručice goriva u praznom hodu
i_D, i_Q, r_D, r_Q	struje i otpori u ekvivalentnom prigušnom namotu
J_{dg}	moment inercije dizel agregata
J_{dm}	moment inercije dizel motora
k	statičko pojačanje
k_1	faktor pojačanja motora
k_2	faktor pojačanja aktuatora
M_{elm}	elektromagnetski moment sinkronog generatora
M_m, M_f	zakretni moment motora i moment tereta

m_T	zakretni moment pogonskog stroja
m_{T0}	moment pogonskog stroja u početnom stanju
N	opterećenje sustava napajanja
p_k	tlak zraka u usisnom razvodniku
r, r_1	radni otpor armaturnog i uzbudnog namota
t	vrijeme
T_1	inercijska vremenska konstanta regulatora
T_2	prigušna vremenska konstanta regulatora
u_d, u_q, i_d, i_q	napon i struja u uzdužnoj i poprečnoj osi stroja
u_1, i_1	uzbudni napon i struja
x_D, x_Q	reaktancije prigušnog namota u *d* i *q* osi
x_d, x_q	sinkrone reaktancije armaturnog namota u *d* i *q* osi
x_{ad}, x_{aq}	reaktancije armaturnog napona u *d* i *q* osi
x_1, e_q	reaktancija i napon uzbudnog namota
Δh	pomak ručice goriva
$\Delta\omega$	promjena brzine vrtnje
Θ	faktor efektivnosti brzinskog režima
Ψ_d, Ψ_q, Ψ_D, Ψ_Q	ulančeni tokovi u uzdužnoj i poprečnoj osi armaturnog i ekvivalentnog prigušnog namota
Ψ_1	ulančeni tok s uzbudnim namotom

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Područje i metodologija istraživanja 1
1.2. Ciljevi i znanstveni doprinosi 3

2. ODRŽAVANJE ELEKTROAGREGATA U SLOŽENIM SUSTAVIMA 4

2.1. Provedba održavanja u složenim sustavima 4
2.2. Korektivno održavanje 6
2.3. Preventivno održavanje 8

3. ODABIR ISPITIVANJA ZA ODREĐIVANJE SVOJSTVENIH POLAZATELJA ELEKTROAGREGATA 10

3.1. Teoretske podloge za razmatranje elektroagregata 12
3.2. Određivanje svojstvenih pokazatelja prema Propisu o kvaliteti proizvoda 13
3.2.1. Zahtjevi za regulaciju stabilnosti napona i brzine vrtnje elektroagregata 15
3.3. Određivanje svojstvenih pokazatelja prema međunarodnom standardu 19
3.4. Uporaba kerozinskog goriva NATO oznake F-34 za pogon dizel elektroagregata 30
3.4.1. Kerozinsko gorivo NATO oznake F-34 i usporedba s dizel gorivom 30
3.5. Provedena ispitivanja u svrhu kategorizacije elektroagregata 32
3.6. Ispitivanje elektroagregata P-B40.R1 33
3.6.1. Metodologija i rezultati ispitivanja provedenih u Oružanim snagama Republike Hrvatske 35
3.7. Analiza i mogućnosti prilagodbe elektroagregata za rad u međunarodnim vojnom operacijama 39
3.7.1. Simulacija rada elektroagregata i metodologija prilagodbe regulatora za potrebe korištenja različitih vrsta goriva 41

4. MODELIRANJE EKSPERTNOG SUSTAVA ZA DETEKCIJU KVARA U SVRHU OPTIMIRANJE ODRŽAVANJA 52

4.1. Modeliranje sustava za detekciju kvara 53
4.1.1. Bayesova metoda 53
4.1.2. Bayesova mreža 54
4.1.3. Dijagnostička testiranja elektroagregata u svrhu detekcije kvara 57
4.1.4. Simulacija izlaznih karakteristika u slučaju kvara 61

5. MODELIRANJE SUSTAVA ZA ODABIR OPTIMALNIH TIPOVA ELEKTROAGRAGATA 66

5.1. Analitičko hijerarhijski proces (AHP) 66
5.2. Izbor optimalnih elektroagregata prema ekonomskim kriterijima 70
5.3. Izbor optimalnih elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti 78

6. ZAKLJUČAK 86

LITERATURA 88

SAŽETAK 92

ABSTRACT 93

ŽIVOTOPIS 94

PRILOZI 95

1. UVOD

Sustav opskrbe električnom energijom ubraja se u nacionalnu kritičnu infrastrukturu čiji prekid djelovanja ili isporuke može imati ozbiljne posljedice na nacionalnu sigurnost, zdravlje i živote ljudi. Do prekida isporuke električne energije iz elektroenergetskog sustava uglavnom dolazi u slučaju elementarnih nepogoda i ratnih djelovanja pri čemu nastaju oštećenja na elektranama i dalekovodima.

U tom slučaju bitno je imati ispravne pričuvne izvore napajanja čiji su sastavni dio stacionarni i mobilni elektroagregati. Oni se koriste u Složenim sustavima kao što su Vojne organizacije, Državne uprave za zaštitu i spašavanje, Uredi za upravljanje u kriznim situacijama i sl. Njihova pouzdanost i učinkovitost ovisi o redovitom održavanju a to iziskuje određena financijska sredstva i angažiranost materijalno tehničkih i ljudskih resursa. Budući da se radi o velikom broju sredstava, svako i najmanje pojednostavljenje postupka održavanja i upotrebe od bitnog je značaja pri uštedi navedenih resursa.

Ideja i povod za izradu disertacije dolaze iz višegodišnjeg iskustva i uočene problematike na održavanju vojne tehnike u Remontnom zavodu Hrvatske vojske. Pri održavanju vojne tehnike primjenjuju se poznate i razrađene metode i strategije održavanja [1,2]. Cilj je u okviru postojećih metoda i strategija provesti optimizaciju održavanja elektroagregata.

To je moguće primjenom informacijskog sustava u kojem se nalazi baza podataka koja se kontinuirano ažurira. Podaci iz baze primjenjuje se u pojedinim segmentima optimizacijskog procesa. Stoga je posjedovanje vjerodostojne baze jedan od ključnih elemenata u provedbi optimizacije održavanja. Iz baze podataka vidljivi su svojstveni pokazatelje svakog elektroagregata nužni za provedbu kategorizacije. Provedbom kategorizacije omogućit će se smanjenje velikog broja različitih tipova. Odabir najoptimalnijih elektroagregata provodi se višekriterijskom analizom prema ekonomskim kriterijima i kriterijima raspoloživosti.

1.1. Područje i metodologija istraživanja

U Oružanim snagama Republike Hrvatske čuva se i koristi velik broj elektroagregata. Neki su zatečeni od Jugoslavenske narodne armije a neki su pribavljeni za vrijeme i nakon Domovinskog rata, tako da sada osim velike količine postoji i velik broj različitih tipova što predstavlja problem kod skladištenja, upotrebe i održavanja. Osim u Republici Hrvatskoj

koriste se i u međunarodnim vojnim operacijama gdje služe kako pričuvni ili primarni izvori napajanja, ovisno o izvedbi i potrebama.

Održavanje elektroagregata kao i većine vojne opreme provodi se u tri stupnja:

- prvi stupanj održavanja (temeljno održavanje)
- drugi stupanj održavanja (radioničko održavanje)
- treći stupanj održavanja (remont)

Prema strategijama održavanje se dijeli na:

- opsluživanje
- preventivno održavanje
- korektivno održavanje

Navedene metode održavanja prihvaćene su za većinu vojne opreme i prihvatljive su za unificirana sredstva, odnosno kad se pojavljuje veći broj sredstava istog tipa. Kao što je navedeno, u Oružanim snagama pojavio se velik broj raznovrsnih elektroagregata za koje je potrebno predložiti i definirati najpovoljnije rješenje daljnjeg statusa.

Dio sredstava je u postrojbama na upotrebi a dio se čuva u skladištima strateških pričuva. Od toga je dio neispravnih sredstava koja treba popraviti ili predložiti za pokretanje postupka otpisa. Kako se radi o ukupno velikoj količini sredstava i visokim troškovima održavanja, potrebno je izraditi daljnju analizu i predložiti metode za poboljšanje održavanja i upotrebe sredstava.

Provedenim istraživanjem utvrđeno je:

- da postoji velika količina različitih elektroagregata (različiti po tipu, snazi, vrsti pogonskog goriva, stupnju istrošenosti)
- odstupanje kod označavanja
- velik raspon istrošenosti
- da ne postoji kompletna tehnička dokumentacija za sva sredstva

Osim utvrđenog stanja, pri razmatranju i predlaganju rješenja potrebno je uzeti u obzir i novije zahtjeve koji su nametnuti pristupanjem Republike Hrvatske NATO savezu. Jedan od zahtjeva je mogućnost upotrebe opreme i sredstava u međunarodnim vojnim operacijama što je jedan od vrlo bitnih čimbenika u provedbi ovog istraživanja i predlaganju rješenja. Znači da je potrebno sagledati mogućnost upotrebe određenih tipova elektroagregata u međunarodnim vojnim operacijama gdje se pojavljuju različiti režimi rada. Naročito bitno je sagledati mogućnost rada dizel elektroagregata pri upotrebi kerozinskog goriva NATO oznake F-34 koje je zasnovano na civilnom zrakoplovnom gorivu JET A-1 (JP-8) [3, 4] koje je lako dostupno u području operacija.

U početnoj fazi istraživanja sagledane su metode održavanja vojne tehnike i proveden vizualni pregled na približno 25% elektroagregata pri čemu je utvrđena potreba definiranja jednoznačnosti označavanja. Da bi se odredili svojstveni pokazatelji elektroagregata u drugoj fazi istraživanja definirana su ispitivanja koja je potrebno prevesti.

U trećoj fazi provedena su ispitivanja u stacionarnom stanju i simulacije za određivanje dinamičkih promjena napona i frekvencije. Nakon toga razrađen je model ekspertnog sustava za detekciju kvara u sklopljenom stanju koji daje značajan doprinos u procesu optimizacije održavanja elektroagregata.

U završnoj fazi, višekriterijskom analizom proveden je odabir najoptimalnijih tipova elektroagregata u svrhu održavanja prema različitim kriterijima.

1.2. Ciljevi i znanstveni doprinosi

Cilj ove disertacije je razrada i unaprjeđenje održavanja elektroagregata u Specijalnim sustavima. Kao što je već navedeno, namjera je zadržati postojeće metode održavanja a unaprjeđenje postići na način da se provede kategorizacija i razvrstavanje agregata prema svojstvenim pokazateljima. Za određivanje svojstvenih pokazatelja potrebno je provesti ispitivanja na pojedinim agregatima a neke pokazatelje odrediti provedbom simulacija na računalu, u programskom paketu Matlab Simulink. Nakon provedene kategorizacije i definiranja svojstvenih pokazatelja razvit će se Ekspertni sustav za optimalno upravljanje održavanjem.

Izvorni znanstveni doprinosi doktorske disertacije su sljedeći:

- Odabir ispitivanja za određivanje svojstvenih pokazatelja elektroagregata.
- Metodologija određivanja parametara baze podataka za kategorizaciju elektroagregata u svrhu održavanja.
- Modeliranje ekspertnog sustava za optimalno upravljanje održavanjem elektroagregata prema ekonomskim i kriterijima raspoloživosti.
- Vrednovanje modela ekspertnog sustava za optimalno upravljanje održavanjem elektroagregata na primjeru složenog sustava Oružanih snaga Republike Hrvatske.

2. ODRŽAVANJE ELEKTROAGREGATA U SLOŽENIM SUSTAVIMA

U složenim sustavima, kao što su vojne organizacije pojavljuju se različita tehnička sredstava od kojih se zahtjeva visok stupanj pouzdanosti i raspoloživosti. Da bi se to postiglo, potrebno je imati dobro razrađen sustav održavanja. Zbog toga se kontinuirano razrađuju metode koje pridonose optimizaciji održavanja i produktivnosti rada servisno tehničkih radionica. U vojnim organizacijama nastoji se da svi postupci i radnje budu detaljno opisani, jednoznačni i nedvosmisleni. Tako i pri održavanju vojne opreme postoje propisane metode i strategije održavanja kojih se treba pridržavati, a koje su tako koncipirane da obuhvaćaju većinu vojne opreme. U ovoj disertaciji je cilj prikazati metodologiju koja pridonosi optimizaciji održavanja elektroagregata a koja je u skladu s postojećim metodama i strategijama i eventualnim budućim strategijama o kojima se razmišlja u Hrvatskoj vojsci.

Za sada se održavanje provodi, kao i drugim složenim sustavima prema preventivnoj i korektivnoj metodi [5,6,7]. Težnja je da se dostigne što viši stupanj učinkovitosti, pouzdanosti i samoodržavanja sredstava. Da bi se to postiglo nužan je razvoj ekspertnog sustava o čemu će se detaljnije govoriti u nastavku.

Kako bi održavanje bilo što učinkovitije, u složenim sustavima treba težiti što manjem broju različitih vrsta elektroagregata. Uz smanjenje broja različitih vrsta, potrebno je provesti i grupiranje sredstava prema tehničkim karakteristikama i različitim zahtjevima koji u vrijeme proizvodnje nisu definirani.

2.1. Provedba održavanja u složenim sustavima

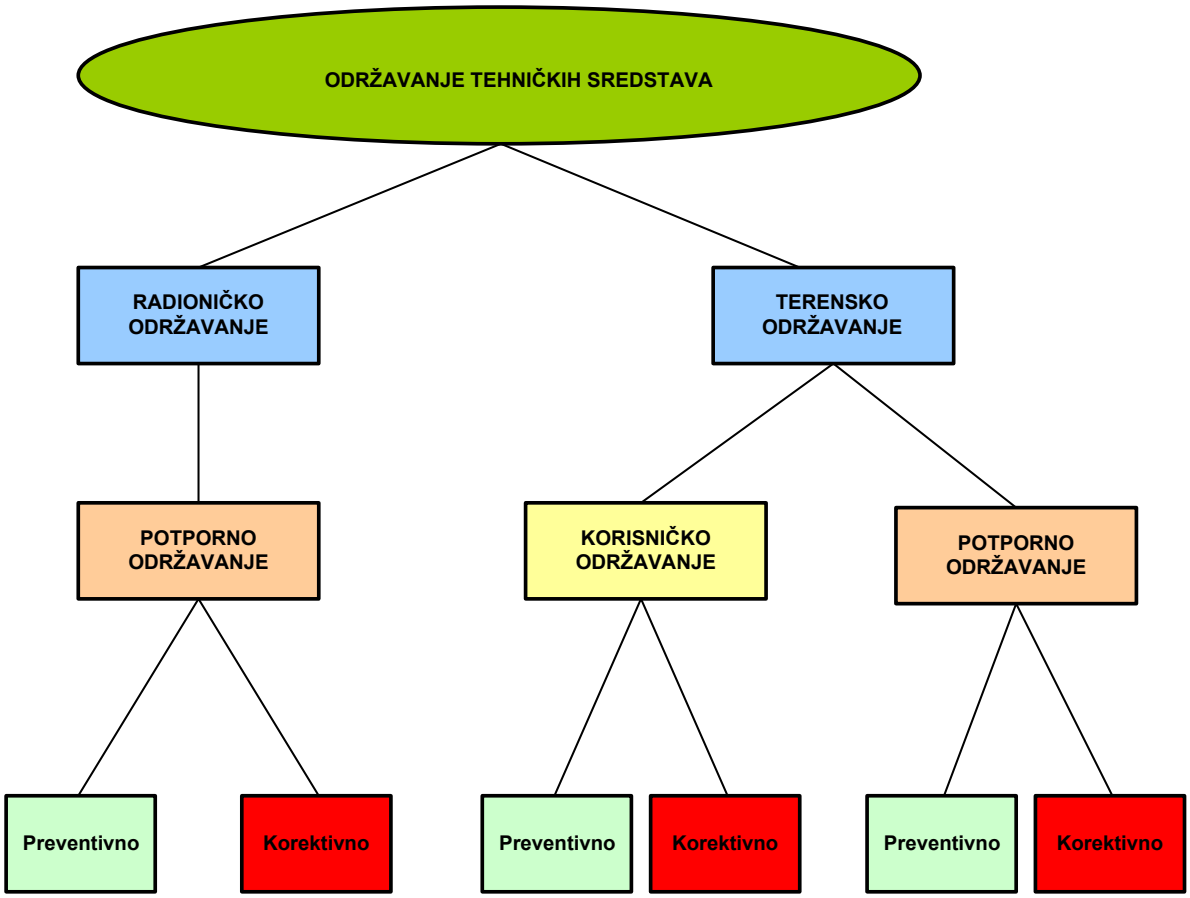
Postoje različite definicije Održavanja, a najčešće primjenjivana definicija u vojnim organizacijama je:

„Održavanje materijalnih sredstava je funkcija logistike kojom se osigurava ispravnost, pouzdanost i operativna raspoloživost materijalnih sredstava za namjensku uporabu u njihovom životnom vijeku. Održavanjem se podupire borbena spremnost te pokretljivost i održivost snaga tijekom obavljanja zadaća u sklopu zadanih misija“ [8].

Cilj održavanja je sprečavanje pojave neispravnosti i otkaza sredstva, odnosno vraćanje sredstva u stanje tehničke ispravnosti.

U složenim sustavima sredstva se često upotrebljavaju na različitim lokacijama pa je osim radioničkog održavanja nužno i terensko održavanje, koje isto kao i radioničko može biti preventivno i korektivno.

Održavanje koje provodi cjelina u kojoj se sredstvo koristi nazivamo korisničko održavanje, a održavanje za koje se traži usluga specijaliziranih radionica s visoko kvalificiranim djelatnicima u održavanju nazivamo potporno održavanje. Podjela održavanja s obzirom na mjesto provedbe i cjelinu koja provodi održavanje vidi se na slici 2.1.

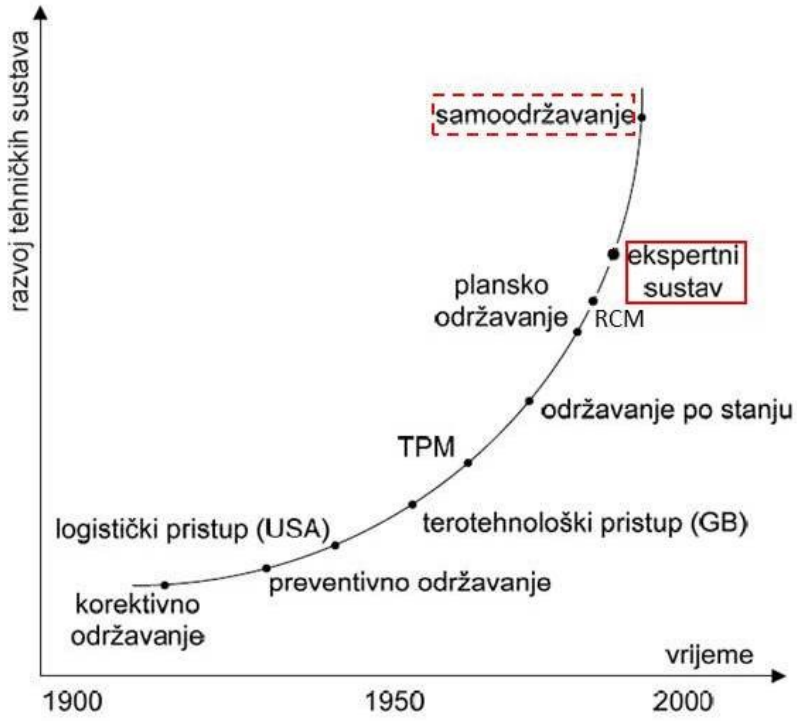


Slika 2.1. Podjela održavanja prema izvršitelju i mjestu provedbe

Općenito gledajući povijesni razvoj održavanja prvo se počelo s korektivnim održavanjem, a zatim s preventivnim održavanjem. Razvojem tehničkih sustava razmatraju se različiti pristupi održavanju s težnjom dostizanja samoodržavanja. Da bi se to postiglo nužno je imati dobro

razvijen ekspertni sustava koji prethodi samoodržavanju. U složenim sustavima uglavnom se primjenjuje oprema koja je izrađena prema visokim zahtjevima za pouzdanost i sigurnost. Stoga se od nje očekuje i znatno duži period eksploatacije. Produženi eksploatacijski period utječe na rjeđe zanavljanje opreme, tako da sada koristimo opremu od koje se u procesu proizvodnje nije zahtijevala mogućnost samoodržavanja, niti se radilo na razvoju ekspertnog sustava koji znatno pojednostavljuje proces održavanja sredstava.

U specijalnim sustavima sredstava se održavaju po dvije osnovne metode održavanja: preventivnoj i korektivnoj. Osnovnim metodama održavanja cilj je pridružiti ekspertni sustav koji pridonosi optimizaciji procesa održavanja.



Slika 2.2. Povijesni razvoj strategija održavanja [9]

2.2. Korektivno održavanje

Korektivno održavanje je prva koncepcija koja se pojavila u održavanju. Zasniva se na otklanjanju kvara koji je nastao prije poduzimanja korektivnih radnji [10]. Korektivno održavanje otklanja oštećenja, kvarove i havarije nakon njihove pojave.

Oštećenje je promjena stanja radnog sustava ili njegovih komponenti koja još ne smeta funkcioniranju radnog sustava ali se može razviti u kvar.

Kvar je promjena radnog stanja sustava, sklopova ili komponenti koja remeti normalno funkcioniranje tog sustava.

Havarija je teži oblik kvara sustava kod kojeg dolazi do potpunog uništenja radnog sustava ili neke od njegovih komponenti s mogućim negativnim djelovanjem na okoliš [11].
Korektivno održavanje ima prednosti i nedostataka [12].

Prednosti korektivnog održavanja su:

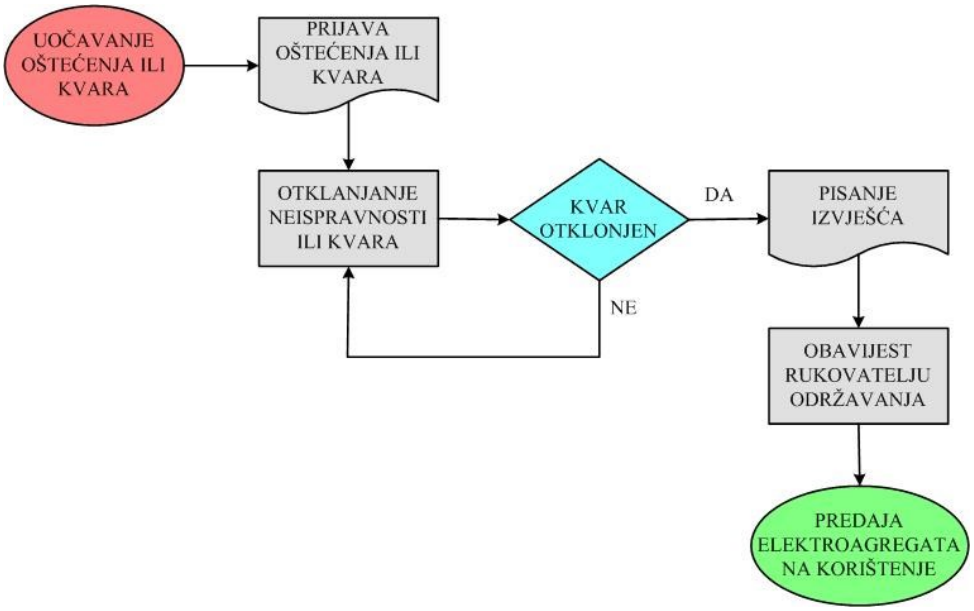
- postiže se dugotrajnije i potpuno iskorištenje dijelova
- ne treba poznavati zakonitost pojave neispravnosti dijelova

Nedostaci korektivnog održavanja su:

- sustavi naglo ispadaju iz rada pa postoji rizik po pitanju sigurnosti i oštećenja druge opreme i nastanka havarijskih kvarova
- vrijeme pojave neispravnosti ne može se predvidjeti
- uglavnom pojava dužih zastoja prouzročena održavanjem
- nije moguće planiranje periodičnosti i cikličnosti održavanja

U složenim sustavima treba izbjegavati korektivno održavanje elektroagregata, a ako do njega i dođe prvi korak nakon uočenog kvara je prijava neispravnosti. Nakon toga slijede zahvati za otklanjanje kvara i izvješćivanje o poduzetim radnjama i predaja sredstva korisniku.

Blok dijagram korektivnog održavanja prikazan je na slici 2.3.

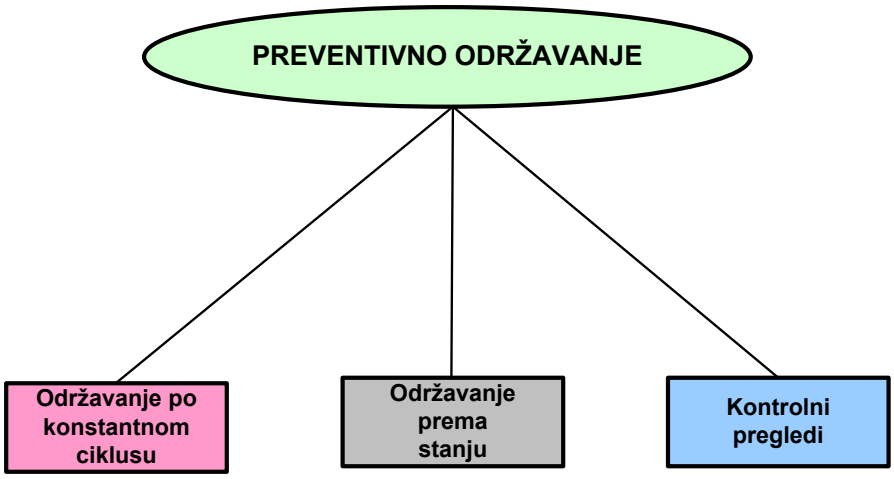


Slika 2.3. Blok dijagram korektivnog održavanja elektroagregata

2.3. Preventivno održavanje

Preventivno održavanje provodi se prije nego što dođe do oštećenja ili kvara po unaprijed utvrđenom planu. Na taj način sprečavaju se mogući uzročnici kvara i kontinuirano se održava radna sposobnost tehničkih sredstava. Kod preventivnog održavanja postoje točno razrađeni tehnološki postupci po kojima se provodi proces održavanja.

Osnovna podjela preventivnog održavanja u složenim sustavima prikazana je na slici 2.4.



Slika 2.4. Podjela preventivnog održavanja u složenim sustavima

Održavanje po konstantnom ciklusu može se nazvati i plansko preventivno održavanje a uključuje radove kao što su pregledi, pranja i čišćenja, podmazivanja i zamjene nekih dijelova. Navedene aktivnosti odvijaju se planski po nekom od kriterija kao što su vrijeme rada, količina proizvedene električne energije, količina potrošenog goriva, broj uključivanja sredstva i sl. Radnje koje se provode definirane su u tehničkoj dokumentaciji i uputama za održavanje. Cilj pregleda koji se provode u održavanju po konstantnom ciklusu je utvrditi stanje ispravnosti elemenata i sklopova te pravovremeno poduzimanje mjera za otklanjanje utvrđenih neispravnosti. Na taj način sredstva se održavaju u stanju ispravnosti u narednom ciklusu eksploatacije.

Održavanje prema stanju je oblik preventivnog održavanja koji se izvodi prije nastanka kvara. Kod održavanja prema stanju prate se parametri sredstva i intervenira se ako su parametri izvan dopuštenih granica. Teoretska postavka metode održavanja po stanju zasniva se na pregledu stanja, odnosno na diskretnom ili kontinuiranom praćenju stanja sastavnih elemenata sustava, te na uočavanju i prognoziranju vremenskog trenutka dostizanja graničnih vrijednosti parametara stanja [13].

Kontrolni pregledi se provode radi uvida u stanje planiranja i provedbe održavanja i ispravnosti tehničkih sredstava. Njihovom provedbom se provjerava ispravnost sredstava, pravovremenost, sadržaj i kakvoća temeljnog i radioničkog održavanja te glavnog remonta u postrojbama i ustanovama [12].

3. ODABIR ISPITIVANJA ZA ODREĐIVANJE SVOJSTVENIH POKAZATELJA ELEKTROAGREGATA

U slučaju neposredne ugroženosti i ratnih djelovanja uglavnom dolazi do značajnije nabave tehničkih sredstava. Sredstva se zaprimaju od različitih isporučitelja, dio ih je iz uvoza a dio iz domaće proizvodnje. Zbog žurnosti opskrbe i primopredaje ne pridaje se dovoljno pozornosti na kvalitetu isporučene opreme, odnosno zahtjeve koje treba ispunjavati. U takvim slučajevima tehnička dokumentacija je uglavnom dosta oskudna i sredstva se ne ispituju prema propisanim obrascima pa njihove mogućnosti nisu jednoznačno definirane.

Uz nova sredstva koja se zaprimaju, u specijalnim sustavima se već nalaze i sredstva koja su otprije na uporabi i koja su zaprimljena prema tada važećim propisima o kvaliteti proizvoda.

To dovodi do povećanog broja različitih tipova sredstava što otežava korištenje i održavanje. Naročito je došlo do izražaja za vrijeme Domovinskog rata kada je od Jugoslavenske narodne armije preuzet dio sredstava koja su uglavnom bila porijeklom iz zemalja istočne Europe.

Uz različite zahtjeve koja sredstava trebaju ispunjavati za vrijeme isporuke, često se pojavljuju i dodatni zahtjevi koji se javljaju za vrijeme uporabe.

Jedan od bitnih primjera je primjena vojne opreme u međunarodnim vojnim operacijama. U tom slučaju pojedine članice uglavnom trebaju prilagoditi svoju opremu kako bi bila kompatibilna s opremom drugih članica i koko bi se mogla koristiti u različitim režimima rada.

Zbog toga je nužno detaljno poznavanje opreme i mogućnost njene prilagodbe različitim režimima rada kojima može biti izložena.

Budući da se oprema često koristi u međunarodnom okruženju, bitno je, osim Protokola o kvaliteti proizvoda [14] koji se češće koriste u nacionalnom okruženju, opremu svrstati i prema nekom poznatom međunarodnom standardu (npr. ISO). U tom slučaju karakteristike sredstava su jednoznačno definirane i znatno pojednostavljuju primjenu u međunarodnom okruženju.

Osim kriterija definiranih međunarodnim standardom mogu se postaviti i dodatni zahtjevi korisnika koje je potrebno precizno definirati i dokumentirati za određena sredstva.

Kod elektroagregata je bitna kvaliteta električne energije koju predaju potrošačima.

Temeljni parametri kvalitete električne energije su značajke napona u odnosu na frekvenciju, amplitudu, valni oblik i simetriju trofaznog sustava.

Zbog loše kvalitete isporučene električne energije može doći do oštećenja priključenih potrošača koji u složenim sustavima često imaju ulogu zaštite osoba i imovine.

Elektroagregati koji se koriste u složenim sustavima morili su zadovoljiti Protokole o kvaliteti proizvoda da bi mogli biti zaprimljeni u određeni sustav.

Svi elektroagregati koji su preuzeti u sustav Oružanih snaga Republike Hrvatske od Jugoslavenske narodne armije zadovoljavali su Protokole o kvaliteti proizvode.

Osim elektroagregata koji su preuzeti od JNA, u OSRH su zaprimani i novi elektroagregati s tržišta od proizvođača vojne i nevojne opreme od kojih je većina pri primopredaji zadovoljavala Protokole o kvaliteti proizvoda.

Tako da danas u OSRH imamo elektroagregata za koje znamo ili možemo pretpostaviti da zadovoljavaju protokole o kvaliteti proizvoda. Osim tih agregata imamo i nova sredstva, zapadne tehnologije koja su kupljena ili pribavljena različitim donacijama a koja se pozivaju na NATO STANAG. Osim tih sredstava u sustav se zaprimaju i elektroagregati koji su proizvedeni na području Europske unije i koja se pri predaji u sustav deklariraju prema nekim drugim standardima, kao što su npr. ISO, IEC i sl.

Slične situacije pojavljuju se i u drugim državama u regiji, i to predstavlja problem koji se pojavljuje u zajedničkim djelovanjima kao što su međunarodne vojne operacije.

Da bi se pojednostavila upotreba i održavanje predlaže se grupiranje elektroagregata u određene skupine. Za grupiranje je potrebno dobro poznavanje njihovih karakteristika i zahtjeva koje nameću određeni standardi i zahtjevi korisnika. Zbog toga je nužna provedba određenih ispitivanja.

Sve elektroagregate u određenom sustavu treba grupirati na:

1. Perspektivne
2. Neperspektivne

Predlaže se za sve perspektivne agregate definiranje zadovoljavanja:

- Propisa o kvaliteti proizvoda,
- ISO 8528 [15]
- NATO STANAG 4133,
- Mogućnost korištenja jedinstvenog goriva NATO oznake F-34 [16] za pogon dizel elektroagregat

Nakon definiranja njihovih mogućnosti, elektroagregate podijeliti u dvije skupine:

1. Elektroagregati za primjenu u međunarodnim vojnim operacijama

2.Elektroagregati za primjenu u vojnim sustavima za obranu teritorijalne cjelovitosti države i pomoć u slučaju elementarnih nepogoda

Određivanje svojstvenih parametara elektroagregata značajno će doprinijeti pri izradi i prihvaćanju Hrvatskih vojnih normi [17].

Za određivanje svojstvenih pokazatelja elektroagregata potrebna je provedba određenih ispitivanja. Za provedbu ispitivanja potrebno je definirati određene parametre koje elektroagregati u složenim sustavima moraju zadovoljavati, i eventualne mogućnosti njihove prilagodbe kako bi se neki od postavljenih uvjeta zadovoljili.

Kao što je već navedeno, elektroagregati služe za pretvorbu energije, a njihov krajnji proizvod je električna energija. Za ispravan rad električnih trošila bitna je kvalitete električne energije.

Iz tog razloga, naglasak je na provjeri izlaznih karakteristika elektroagregata, odnosno provjeri napona i frekvencije u različitim režimima rada.

Pod različitim režimima rada podrazumijevaju se uvjeti okoline, kvaliteta i vrsta pogonskog goriva i svojstva potrošača koja se priključuju na izlaz generatora.

Budući da za sva sredstva ne postoji tehnička dokumentacija kojom je to propisano, ili je u međuvremenu došlo do određenih promjenama u zahtjevima korisnika, nužno je definiranje određenih ispitivanja iz kojih će se vidjeti svojstveni pokazatelji određenih tipova elektroagregata.

3.1. Teoretske podloge za razmatranje elektroagregata

Osnovni dijelovi elektroagregata su pogonski motor i generator.

Kod elektroagregata manjih snaga koriste se benzinski i dizel motori za pogon generatora, a kod većih snaga za pogon se koriste dizel motori. U složenim sustavima benzinski agregati su uglavnom snage do 5 kW, a dizel elektroagregati su uglavnom snage iznad 3 kW.

Po brojnosti, najzastupljeniji elektroagregati koji se koriste u složenim sustavima su snage od 7,5 do 50 kW. Uglavnom se sastoje od pogonskog dizel motora i sinkronog generatora.

Kao što je već navedeno, kode razmatranja elektroagregata bitnu ulogu ima kvaliteta električne energije koju dobivamo na izlazu generatora, odnosno stabilnost napona i frekvencije.

Da bi imali stabilan napon i frekvenciju bitno je imati stabilnu brzinu vrtnje elektroagregata.

Frekvencija generatora ovisna je o brzini vrtnje generatora. Koko je generator mehanički vezan na pogonski motor, brzina vrtnje generatora i motora su proporcionalne, i u najčešće slučajeva je to odnos 1:1. Postoje izvedbe elektroagregata koje imaju i međusklop s određenim prijenosnim omjerom brizne vrtnje, ali se rijetko susreću pa se u ovome radu neće razmatrati.

Regulacija brzine vrtnje odvija se na pogonskom dizel motoru, a regulacija napona na generatoru.

3.2. Određivanje svojstvenih pokazatelja prema Propisu o kvaliteti proizvoda

Propis o kvaliteti proizvoda (PKP) smatra se aktom standardizacije, koji propisuje zahtjeve kvalitete osnovnog sredstva kao sustava, odnosno njegovih podsustava ili uređaja, metode za ispitivanje i kriterije za utvrđivanje kvalitete.

PKP koriste sudionici u razvoju i proizvodnji, eksperimentalni i ispitni centri te tehničke uprave i taktički nosioci kao akt standardizacije.

Prethodno je navedeno da je dio elektroagregata koji se koriste u Oružanim snagama Republike Hrvatske (OSRH) ispitan prema PKP-u „Elektroagregati izmjenične i istosmjerne struje, snage do 1MW“[14].

Znači za te agregate sigurni smo da u tehnički ispravnom stanju zadovoljavaju propisane kriterije u navedenom PKP-u.

Osim tih agregata u OSRH koriste se elektroagregati koji su zaprimljeni u sustav po nekim drugim kriterijima, odnosno nisu provjereni prema PKP-u. Da bi se jednoznačno definirale njihove mogućnosti, i moglo pozvati na određeni dokument potrebno je provesti određena ispitivanja iz kojih će se utvrditi njihove karakteristike. Nužna je provjera izlaznih parametara agregata u slučaju različitih režima rada.

Prema PKP-u elektroagregati moraju ispravno raditi u uvjetima navedenim u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Tehnički zahtjevi za uvjete sigurnog rada elektroagregata

UVJETI RADA	Elektroagregati	
	stacionarni	pokretni
Temperatura okolnog zraka [^{0}C]	+5 do +40	-25 do +40
Relativna vlažnost zrak [%]	do 98 pri 25 ^{0}C	
Nadmorska visina [m]	do 2000	

Pod uvjetima navedenim u tablici 3.1. svaki elektroagregat mora izdržati 10 % preopterećenja po snazi u toku jednog sata.

Srednje vrijeme između dva kvara T_0 ne smije biti manje od:

- 600 sati za dizel agregate s četveropolnim generatorom
- 400 sati za dizel agregate s dvopolnim generatorom
- 300 sati za benzinske agregate s dvopolnim generatorom

a određuje se prema izrazu

$$T_0 = \frac{t_r}{n_O}, \tag{3-1}$$

pri čemu je

t_r - ukupno vrijeme rada agregata,

n_O – broj potpunih ili djelomičnih otkaza elektroagregata.

Koeficijent spremnosti K_s za vrijeme jamstvenog roka ne smije biti manji od 0.95 a određuje se prema izrazu

$$K_s = \frac{t_r}{t_r + t_p} \tag{3-2}$$

pri čemu je

t_p – vrijeme svih prekida uzrokovanih osnovnim i tehničkim održavanjem za vrijeme rada t_r.

3.2.1. Zahtjevi za regulaciju stabilnosti napona i brzine vrtnje elektroagregata

Sustav za automatsku regulaciju napona mora osigurati :

1. održavanje napona pri postepenoj promjeni opterećenja od praznog hoda do nazivnog, u granicama ± 2 % srednje regulirane vrijednosti
2. da nestabilnost napona pri bilo kojem stalnom opterećenju od 0 do nazivnog, ostane u granicama ± 1 % srednje reguliranog napona
3. da najviše promjene napona koje nastaju pri naglim udarnim opterećenjima i rasterećenjima 0 - 100 % P_n mjereno 0.1 sekundu od početka promjene ne budu veće od 10 % zadanog napona
4. postepeno ručno podešavanje nivoa automatski reguliranog napona, pri svim opterećenjima od praznog hoda do nazivnog, u rasponu 100 ± 5 % nazivnog napona
5. sustav za automatsku regulaciju brzine vrtnje, odnosno frekvencije mora osigurati

   - da nagib regulacijske karakteristike, izračunat po izrazu

   $$\frac{n_0 - n_n}{n_{50}} \cdot 100 \qquad (3\text{-}3)$$

   ne bude veći od 4 %

   pri čemu je

   n_0 – brzina vrtnje u praznom hodu

   n_n – brzina vrtnje pri nazivnom opterećenju

   n_{50} – brzina vrtnje pri 50 % opterećenja.

6. nestabilnost brzine vrtnje ne smije biti veća od 2 % u rasponu opterećenja od 0 do nazivnog
7. najveći pad brzine vrtnje koji nastaje pri udarnom opterećenju generatora od 0 do 100 % nazivne snage ne smije biti veći od 8 %
8. trajanje prijelaznih pojava, odnosno vrijeme koje protekne od trenutka udarnog opterećenja ili rasterećenja elektroagregata do trenutka kada se promjene brzine vrtnje svedu u granice od 2 % ne bude duže od 3 s.

Provjera prethodno navedenih zahtjeva provodi se ispitivanjem i ocjenom rezultata.

Ispitivanju se pristupa nakon ustaljenog toplinskog stanja elektroagregata kao što je navedeno u nastavku.

1.1. Pri neopterećenom stanju generatora i nazivnoj brzini motora, pomoću preklopke za ručnu regulaciju, napon generatora se dovede na nazivnu vrijednost. Zatim se agregat postepeno

opterećuje od 0 do 100 % nazivne snage, pri faktorima snage 0.8 i 1, u razmacima do 25 % nazivne snage. Pri svakom opterećenju ne dirajući više preklopku za regulaciju napona, mjeri se napon generatora.

Veličine promjene napona određuju se u odnosu na srednju vrijednost automatski održavanog napona U_{sr}, koji se izračunava prema izrazu:

$$U_{sr} = \frac{U_{max}+U_{min}}{2} \tag{3-4}$$

pri čemu je

U_{max} – maksimalna vrijednost izmjerenog napona,

U_{min} – minimalna vrijednost izmjerenog napona.

Promjena napona generatora, ΔU do koje dolazi pri promjeni opterećenja, izražena u postocima, izračunava se prema izrazu

$$\Delta U = \frac{U_{max}-U_{min}}{2U_{sr}} \cdot 100 \tag{3-5}$$

Ukoliko promjene napona elektroagregata, koje nastaju pri promjeni opterećenja, ostanu u granicama ± 2 % srednje vrijednosti automatski održavanog napona, zahtjev 1. je ispunjen.

1.2. Agregat s ustaljenim toplinskim stanjem postupno se opterećuje od 0 do 100 % nazivne snage u stupnjevima od 25 %. Pri svakom od ovih opterećenja agregat se ostavlja raditi po 5 minuta. Za vrijeme ispitivanja neprekidno se prati pokazivanje voltmetara a na kraju svake minute upisuju se ekstremne vrijednosti očitane u protekloj minuti.

Nestabilnost napona agregata, odnosno promjene napona koje nastaju pri stalnom opterećenju, izračunava se kao u 1.1.

Ako je nestabilnost napona u granicama ± 1 %, kod svih stalnih opterećenja od 0 do nazivnog, zahtjev 2. je ispunjen.

1.3. Agregat u ustaljenom toplinskom stanju opterećuje se naglo s nazivnom snagom, nakon što se napon ustali na novu vrijednost, koja mora biti u granicama stabilnosti prema točki 2., provede se njegovo mjerenje. Zatim se agregat naglo rastereti i kad se napon ustali na novu vrijednost također se provede mjerenje. Prijelazne pojave napona snimaju se osciloskopom.

Nakon obrade snimljenog napona, uz primjenu rezultata mjerenja ustaljenih vrijednosti napona pomoću voltmetra, očitaju se:

- srednja vrijednost napona u praznom hodu U_0,
- srednja vrijednost napona pri nazivnom opterećenju U_n,

- napon koji nastaje pri udarnom opterećenju U_{min} izmjeren 0.1 sekundu od trenutka naglog opterećenja
- napon koji se pojavljuje pri naglom rasterećenju agregata U_{max}, izmjeren 0.1 sec od trenutka naglog rasterećenja agregata.

Iz dobivenih vrijednosti, promjene napona se izračunavaju na sljedeći način:

- pri udarnom opterećenju

$$\Delta U_{0-n} = \frac{U_0 - U_{min}}{U_0} \cdot 100 \quad (3\text{-}6)$$

- pri udarnom rasterećenju

$$\Delta U_{n-0} = \frac{U_{max} - U_n}{U_n} \cdot 100 \quad (3\text{-}7)$$

Ukoliko promjene napona do kojih dolazi pri udarnim opterećenjima i rasterećenjima ostanu u granicam 10 % zahtjev 3. je ispunjen.

1.4. Provjera mogućnosti ručne regulacije napona pomoću regulacijskog potenciometra ili preklopke provodi se u praznom hodu i nazivnom opterećenju elektroagregata prema sljedećem postupku:

- u praznom hodu i brzini vrtnje koja odgovara nazivnoj karakteristici motora, očitava se pokazivanje voltmetra u krajnjim položajima potenciometra ili preklopkeU_{0min} i U_{max},
- pri krajnjem položaju regulacijskog potenciometra, koji odgovara najvećem mogućem naponu generatora, uključuje se nazivno opterećenje agregata i provodi očitanje voltmetra U_{nmax},
- zatim se potenciometar ili preklopka dovede u drugi krajnji položaj, opterećenje podigne na nazivnu vrijednost i provodi očitanje napona U_{min}.

Područje ručne regulacije napona ΔU u postocima se izračunava prema izrazu

$$\Delta U = \frac{U_{max/min} - U_n}{U_n} \cdot 100 \quad (3\text{-}8)$$

pri čemu je U_n nazivni napon elektroagregata u voltima.

Ako je ručnom regulacijom omogućena kontinuirana ili stupnjevita, ali u stupnjevima manjim od 2 %, promjena nivoa automatski reguliranog napona u rasponu 100 ± 5 % nazivnog, zahtjev 4. je ispunjen.

1.5. Nestabilnost brzine vrtnje, odnosno frekvencije, ispituje se istovremeno s provjerom nestabilnosti napona agregata, po postupku navedenom u 1.1.

Brzina vrtnje, odnosno frekvencija mjeri se pri opterećenju elektroagregata sa 0; 25 %, 50 %, i 100 % nazivne snage.

Nestabilnost brzine vrtnje se izračunava prema izrazu

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_n}{n_{50}} \cdot 100 \quad (3\text{-}9)$$

pri čemu je

n_0 –brzina vrtnje u praznom hodu

n_n – brzina vrtnje pri nazivnom opterećenju

n_{50} – brzina vrtnje pri 50 % opterećenja

$$n_{sr} = \frac{n_{max} + n_{min}}{2} \quad (3\text{-}10)$$

Brzinu vrtnje kod izmjeničnih agregata možemo mjeriti posredno, preko frekvencije. Odnos između brzine vrtnje i frekvencije određen je izrazom:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (3\text{-}11)$$

pri čemu je p –broj pari polova sinkronog generatora.

Ukoliko pad brzine vrtnje, odnosno frekvencije nije veći od 4 %, zahtjev 5. je ispunjen.

1.6. Nestabilnost brzine vrtnje ispituje se pomoću frekvencmetra ili osciloskopa, istovremeno s provjerom nestabilnosti napona elektroagregata, po postupku propisanom u točki 1.2. Pri tome se mjerenje brzine vrtnje obavlja istovremeno s mjerenjem napona. Nestabilnost brzine vrtnje se izračunava na sljedeći način:

$$\Delta n = \frac{n_{max} - n_{min}}{2 n_{sr}} \cdot 100 \quad (3\text{-}12)$$

pri čemu je:

n_{max} – najveća izmjerena brzina vrtnje

n_{min} – najmanja izmjerena brzina vrtnje

n_{sr} – srednja vrijednost brzine vrtnje, koja se izračunava prema izrazu

$$n_{sr} = \frac{n_{max} - n_{min}}{2} \quad (3\text{-}13)$$

Ako nestabilnost brzine vrtnje pri opterećenjima od 0 do nazivne snage, nije veća od ± 1 % zahtjev 6. je ispunjen.

1.7. Ispitivanje promjene brzine vrtnje pri udarnim opterećenima i rasterećenjima elektroagregata i utvrđivanje trajanja prijelaznih režima provodi se istovremeno s ispitivanjem promjene napona pri udarnim opterećenjima, po postupku propisanom u 1.3. Tom prilikom se na oscilogramu, zajedno s promjenom napona snima i promjena brzine vrtnje. Tahometrom se

mjere ustaljene vrijednosti brzine vrtnje na osnovu kojih se provodi obrada snimljenih oscilograma brzine.

Sa obrađenog oscilograma brzine očitavaju se:

- srednja vrijednost brzine u praznom hodu n_0,
- srednja vrijednost brzine pri nazivnom opterećenju n_n,
- najniža brzina vrtnje koja nastaje pri udarnom opterećenju n_{min},
- najveća brzina vrtnje koja se pojavljuje pri naglom rasterećenju n_{max},
- vrijeme trajanja prijelazne pojave, odnosno vrijeme koje protekne od trenutka naglog opterećenja ili rasterećenja agregata do trenutka kada promjena brzine vrtnje postane manja od ± 1 % novo ustaljene vrijednosti.

Na osnovu ovih vrijednosti, promjene brzine vrtnje izračunavaju se prema sljedećim izrazima:

$$\Delta n_{0-n} = \frac{n_0 - n_{min}}{n_0} \cdot 100 \tag{3-14}$$

pri udarnom opterećenju,

odnosno

$$\Delta n_{n-0} = \frac{n_{max} - n_n}{n_n} \cdot 100 \tag{3-15}$$

pri naglom rasterećenju.

Ako promjena brzine vrtnje ne bude veća od 8 %, a vrijeme trajanja prijelaznih pojava kraće od 3 s, zahtjev i 1.7. i 1.8. su ispunjeni.

3.3. Određivanje svojstvenih pokazatelja prema međunarodnom standardu

Elektroagregati iz složenih sustava sve češće se primjenjuju u međunarodnom okruženju, pri čemu služe za napajanje različitih električnih trošila. Osim različitih trošila pojavljuju se i različiti režimi rada, kao npr. različiti klimatski i geografski uvjeti, te različite vrste goriva za napajanje motora s unutarnjim izgaranjem koji pokreću sinkrone generatore.

U takvim uvjetima može doći do lošije kvalitete električne energiju koju generatori predaju potrošačima, što može prouzročiti i oštećenja potrošača.

Zbog toga je poželjno definirati mogućnost primjene sredstava u međunarodnim okruženju, na način da se za sva sredstva koja se primjenjuju u međunarodnom okruženju definiraju svojstveni

pokazatelji prema poznatim međunarodnim standardima. Elektroagregati se mogu definirati prema ISO 8528 [15]. U tom slučaju jednoznačno su definirana svojstva svih elektroagregata što značajno pridonosi interoperabilnosti opreme i pojednostavljuje sporazumijevanje među različitim nacionalnim sastavnicama.

Dio elektroagregata koji se koriste u složenim sustavima Republike Hrvatske zaprimljen je po tada važećem nacionalnom standardu, i nije poznato u koju skupinu elektroagregata prema ISO standardu se mogu svrstati. ISO 8528 elektroagregate svrstava u 4 skupine, G1, G2, G3 i G4.

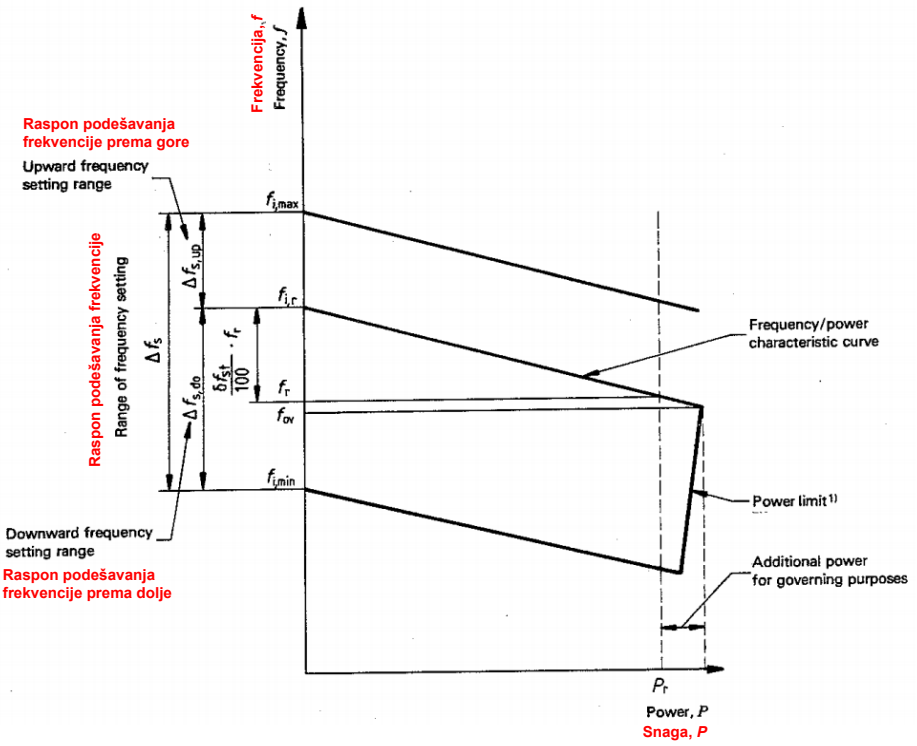
Skupini G1 pripadaju elektroagregati koji moraju udovoljavati minimalnim zahtjevima. Skupini G2 pripadaju elektroagregati koji udovoljavaju strožim zahtjevima, a u skupini G3 pripadaju elektroagregati prema kojima se nameću vrlo visoki zahtjevi. Skupina G4 je posebna skupina kojoj pripadaju elektroagregati čija svojstva su definirana između proizvođača i korisnika.

Kode elektroagregata koji se primjenjuju u međunarodnim vojnim operacijama najznačajnije je poznavanje izlaznih karakteristika u slučaju različitih režima rada. Jer nestabilnost i nepravilan iznos frekvencije i napona mogu oštetiti potrošače koji najčešće u takvim uvjetima imaju ulogu zaštite ljudstva i imovine. Zbog toga posebno se treba usredotočiti na kvalitetu električne energije koja se u tom slučaju predaje potrošačima. Dobrim poznavanjem izlaznih karakteristika generatora u različitim režimima rada, elektroagregati se mogu pravilno svrstati u pojedinu grupu. Zato je nužna provedba osnovnih ispitivanja kojima se određuju svojstva elektroagregata.

Za svrstavanje elektroagregata koji se koriste u Oružanim snagama, a koji prethodno nisu definirani prema ISO prvo je potrebno provesti provjeru svojstvenih pokazatelja pomoću ispitivanje koja su navedena u nastavku.

1.Provjera statičke karakteristike frekvencije

1.1.Provjera propada frekvencije δf_{st} prema slici 3.1, odnosno razlike frekvencije neopterećenog i opterećenog generatora.

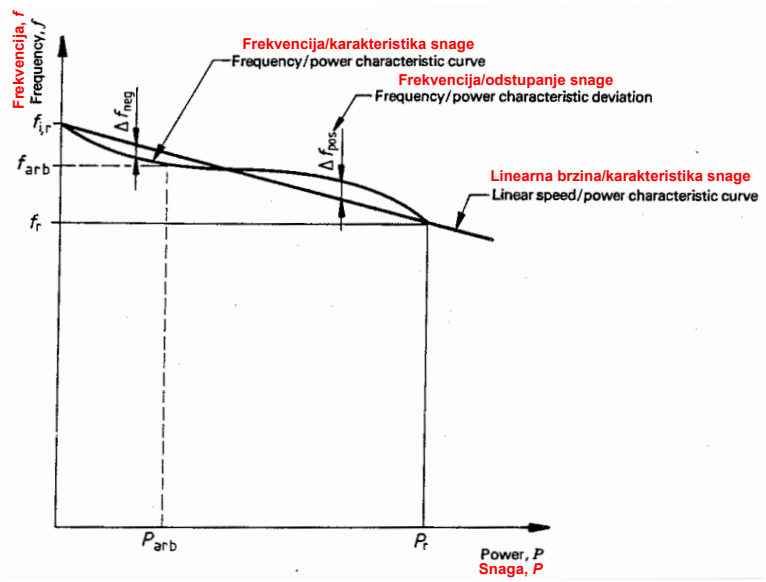


Slika 3.1. Ovisnost frekvencije o opterećenju generatora [15]

$$\delta f_{st} = \frac{f_{i,r} - f_r}{f_r} \cdot 100 \qquad (3\text{-}16)$$

Najveći dozvoljeni propad frekvencije je 8 %, da bi se agregat mogao svrstati u skupinu G1 [15], za skupine G2, i G3 zahtjevi su stroži, tako da za G2 dozvoljeni propad frekvencije je do 5%, a za G3 je svega 3%.

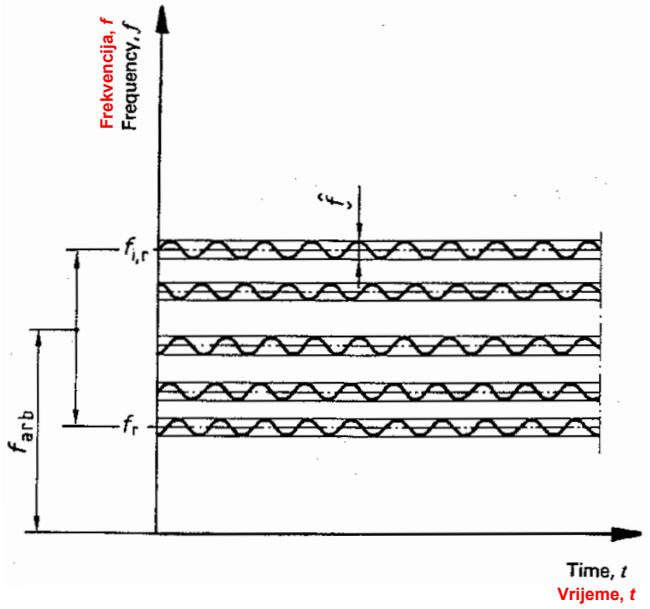
1.2. Provjera devijacije frekvencije $\Delta\delta f_{st}$, odnosno odstupanje frekvencije od linearne karakteristike prema slici 3.2.



Slika 3.2. Devijacija frekvencije od linearne karakteristike pri promjeni opterećenja od praznog hoda do nazivne snage tereta [15]

$$\Delta\delta f_{st} = \frac{\Delta f}{f_r} \cdot 100 \tag{3-17}$$

1.3. Frekvencijski pojas u stacionarnom stanju β_f (slika 3.3.)



Slika 3.3. Frekvencijski pojas u stacionarnom stanju [15]

$$\beta_f = \frac{f'}{f_r} \cdot 100$$

Oscilacija frekvencijskog pojasa pri konstantnom opterećenju oko srednje vrijednosti izražena u postocima nazivne frekvencije (uz uvjet da je opterećenje veće od 20 % nazivnog).

2. Parametri podešavanja frekvencije (slika 3.1.)

2.1. Raspon podešavanja frekvencije Δf_s, odnosno raspon između najviše $f_{i,max}$ i najniže $f_{i,min}$ frekvencije neopterećenog generatora

$$\Delta f_s = f_{i,max} - f_{i,min} \tag{3-18}$$

Raspon podešavanja frekvencije δf_s izražen u postocima u odnosu na deklariranu frekvenciju

$$\delta f_s = \frac{f_{i,max} - f_{i,min}}{f_r} \cdot 100 \tag{3-19}$$

2.1.1. Raspon frekvencije prema dolje

$$\Delta f_{s,do} = f_{i,r} - f_{i,min} \tag{3-20}$$

Raspon podešavanja frekvencije $\delta f_{s,do}$ prema dolje izražen u postocima

$$\delta f_s = \frac{f_{i,r} - f_{i,min}}{f_r} \cdot 100 \tag{3-21}$$

2.1.2. Raspon frekvencije prema gore

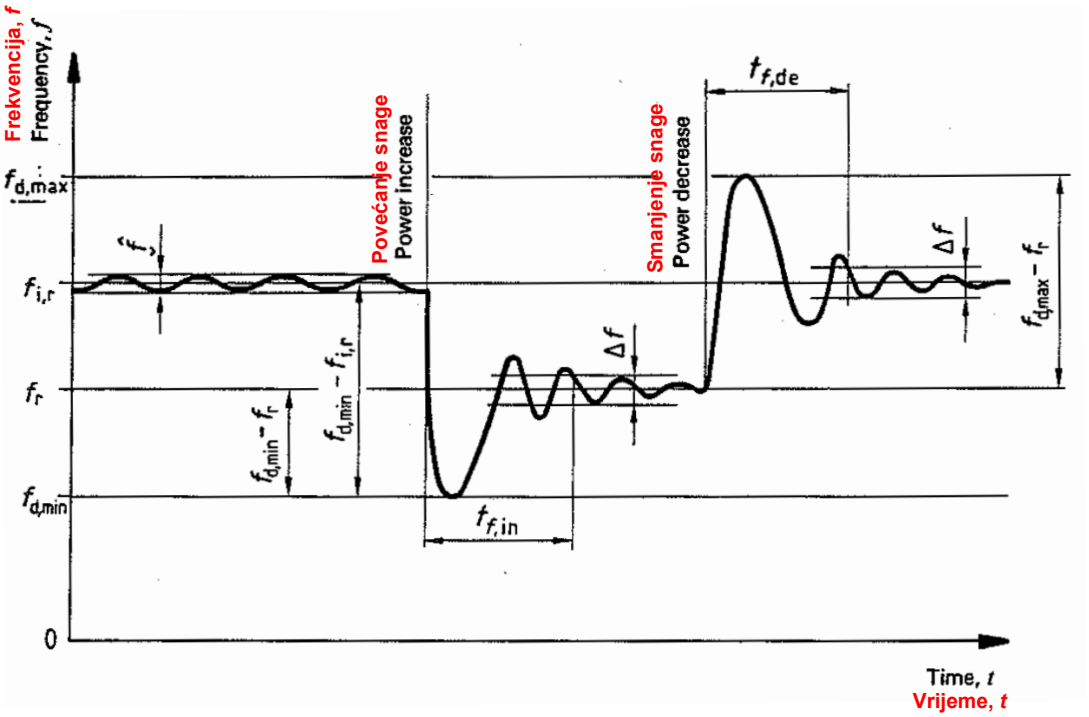
$$\Delta f_{s,up} = f_{i,max} - f_{i,r} \tag{3-22}$$

Raspon podešavanja frekvencije $\delta f_{s,up}$ prema gore izražen u postocima

$$\delta f_{s,up} = \frac{f_{i,max} - f_{i,r}}{f_r} \cdot 100 \tag{2-23}$$

3. Dinamičke karakteristike frekvencije

Pri naglom opterećenju i rasterećenju generatora dolazi do oscilacija brzine vrtnje, što izravno utječe ne promjenu, odnosno dovodi do nestabilnosti frekvencije (slika 3.4.).



Slika 3.4. Dinamička karakteristika frekvencije pri naglom opterećenju i rasterećenju generatora [15]

3.1. Maksimalna frekvencija do koje dolazi pri naglom rasterećenju generatora $f_{d,max}$

3.2. Minimalna frekvencija do koje dolazi pri naglom opterećenju generatora $f_{d,min}$

3.3. Prijelazna frekvencijska razlika δf_d, razlika između početne frekvencije i nakon naglih promjena opterećenja.

- pri naglom opterećenju

$$\delta f_d^- = \frac{f_{d,min} - f_{arb}}{f_r} \cdot 100 \tag{3-24}$$

- pri naglom rasterećenju

$$\delta f_d^+ = \frac{f_{d,max} - f_{arb}}{f_r} \cdot 100 \tag{3-25}$$

3.4. Prijelazno odstupanje frekvencije δf_{dyn} do kojeg dolazi pri naglom opterećenju ili rasterećenju generatora

- pri naglom opterećenju

$$\delta f_{dyn}^- = \frac{f_{d,min} - f_f}{f_r} \cdot 100 \tag{3-26}$$

- pri naglom rasterećenju

$$\delta f_{dyn}^+ = \frac{f_{d,max} - f_r}{f_r} \cdot 100 \tag{3-27}$$

3.5. Vrijeme oporavka frekvencije

- $t_{f,in}$ interval koji nastaje nakon ravnotežnog frekvencijskog pojasa usljed naglog opterećenja i ponovnog ulaska u frekvencijsko područje stacionarnog stanja Δf
- $t_{f,de}$ interval koji nastaje nakon ravnotežnog frekvencijskog pojasa uslijed naglog rasterećenja i ponovnog ulaska u frekvencijsko područje stacionarnog stanja Δf

3.6. Tolerancije frekvencije α_f

-izražena kao postotak nazivne frekvencije

$$\alpha_f = \frac{\Delta f}{f_r} \cdot 100 \tag{3-28}$$

4. Provjera statičke karakteristike napona

4.1. Nazivni napon U_r, napon između dvije linije

4.2. Podešavani napona U_s

4.3. Napon neopterećenog generatora pri nazivnoj frekvenciji U_0

4.4. Odstupanje napona u stacionarnom stanju δU_{st}- maksimalno odstupanje napona pri nazivnoj frekvenciji za različita opterećenja (od praznog hoda do nazivnog opterećenja), odstupanje je izraženo u postocima nazivnog napona.

$$\delta U_{st} = \frac{U_{st,max} - U_{st,min}}{2U_r} \cdot 100 \tag{3-29}$$

5. Parametri podešavanja napona

5.1. Raspon podešavanja napona ΔU_s, odnosno raspon maksimalno mogućeg podešavanja napona pri nazivnoj frekvenciji i različitim opterećenjima

$$\Delta U_s = \Delta U_{s,up} + \Delta U_{s,do} \tag{3-30}$$

5.2. Raspon napona izražen u postocima nazivnog napona

$$\delta U_s = \frac{\Delta U_{s,up} + \Delta U_{s,do}}{U_r} \cdot 100 \tag{3-31}$$

5.3. Raspon podešavanja napona prema dolje $\Delta U_{s,do}$, odnosno razlika nazivnog i podešenog donjeg napona za različita opterećenja pri nazivnoj frekvencije

$$\Delta U_{s,do} = U_r - U_{s,do} \tag{3-32}$$

Raspon podešavanja napona prema dolje izraženo u postocima nazivnog napona

$$\delta U_{s,do} = \frac{U_r - U_{s,do}}{U_r} \cdot 100 \tag{3-33}$$

5.4. Raspon podešavanja napona prema gore $\Delta U_{s,up}$, odnosno razlika gornjeg podešenog i nazivnog napona za različita opterećenja pri nazivnoj frekvenciji

$$\Delta U_{s,up} = U_{s,up} - U_r \tag{3-34}$$

Raspon podešavanja napona prema gore izraženo u postocima nazivnog napona

$$\delta U_{s,up} = \frac{U_{s,up} - U_r}{U_r} \cdot 100 \tag{3-35}$$

6. Dinamičke karakteristike napona (slika 3.5.)

6.1. Maksimalni napon do kojeg dolazi prilikom naglog rasterećenja generatora $U_{\text{din,max}}$

6.2. Minimalni napon do kojeg dolazi prilikom naglog opterećenja generatora $U_{\text{din,min}}$

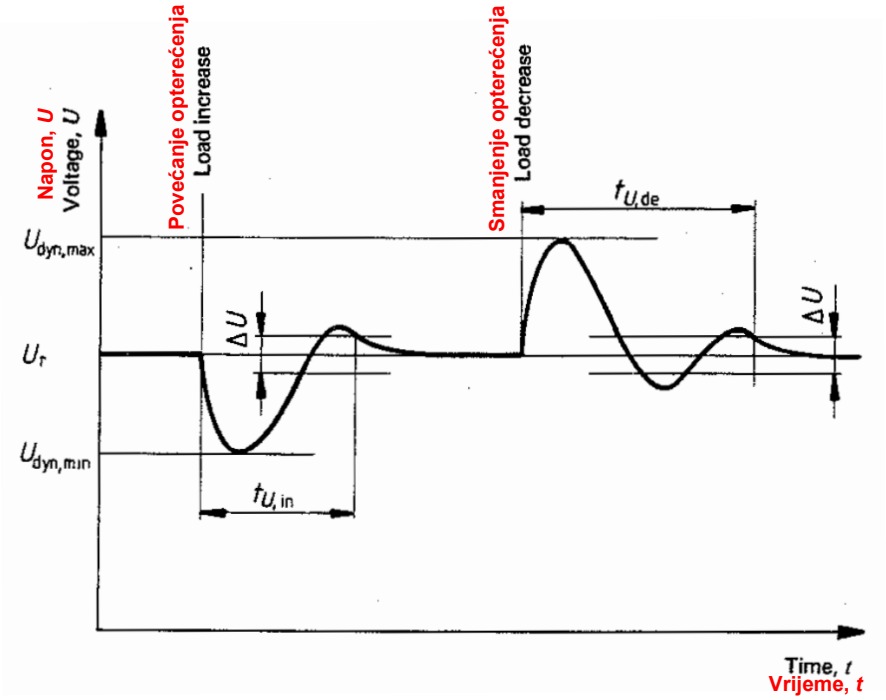
6.3. Odstupanje napona pri naglom opterećenju $U_{\text{din,min}}$ i rasterećenu $U_{\text{din,max}}$ generatora pri nazivnoj frekvenciji, izraženo u postocima nazivnog napona U_{r}.

- pri naglom opterećenju

$$\delta U_{din}^{-} = \frac{U_{din,min} - U_r}{U_r} \cdot 100 \tag{3-36}$$

- pri naglom rasterećenju

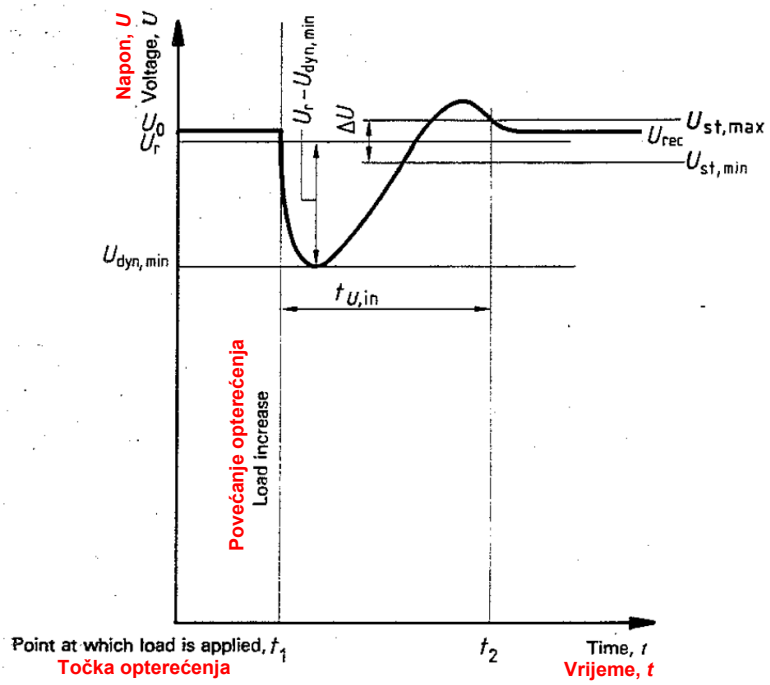
$$\delta U_{din}^{+} = \frac{U_{din,max} - U_r}{U_r} \cdot 100 \tag{3-37}$$



Slika 3.5. Dinamičke karakteristike napona pri naglim promjenama opterećenja [15]

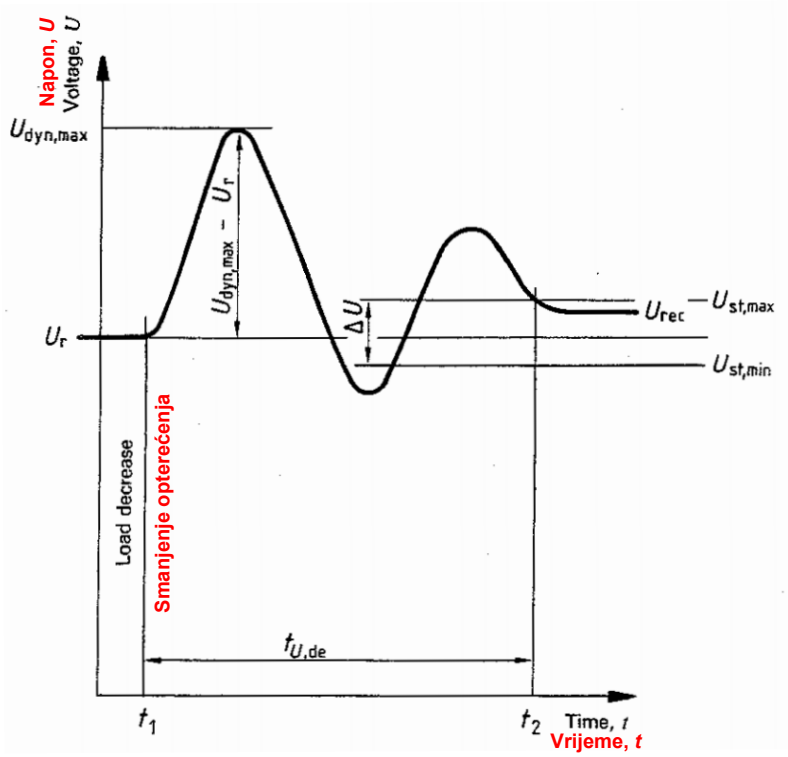
6.4. Stalni napon U_{rec} nalazi se unutar granice odstupanja ΔU

- nakon naglog opterećenja (slika 3.6.)



Slika 3.6. Prijelazna karakteristika napona nakon naglog opterećenja [15]

- nakon naglog rasterećenja (slika 3.7.)



Slika 3.7. Prijelazna karakteristika napona nakon naglog rasterećenja [15]

6.5. Vrijeme oporavka napona t_U – interval od točke (t_1) u kojoj dolazi do promjene opterećenja do točke (t_2) u kojoj se napon vraća u specificirano stacionarno područje ΔU (slika 3.5., 3.6. i 3.7.)

$$t_U = t_2 - t_1 \tag{3-38}$$

6.6. Stacionarno područje napona ΔU – područje u koje dolazi napon unutar određenog vremenskog intervala nakon naglog opterećenja ili rasterećenja generatora.

$$\Delta U = 2\delta U_{st} \cdot \frac{U_r}{100} \tag{3-39}$$

6.7. Odstupanje napona α_U izraženo kao postotak nazivnog napona

$$\alpha_U = \frac{\Delta U}{U_r} \cdot 100 \tag{3-40}$$

U tablici 3.2. navedene su vrijednosti prema kojima se elektroagregati grupiraju u skupine G1 do G4 [15].

Tablica 3.2. Granične vrijednosti za svrstavanje elektroagregata [15]

Parametar Parameter		Simbol Symbol	Jedinica Unit	Referenca Reference	Granične vrijednosti Operating limit values			
					Performance class G1	G2	G3	G4
Frequency droop		δf_{st}	%	5.1.1	< 8	< 5	< 3	AMC[1]
Steady-state frequency band		β_f	%	5.1.4	< 2,5	< 1,5 [2]	< 0,5	AMC
Related range of downward frequency setting		$\delta f_{s,do}$	%	5.2.1.1	> $(2,5 + \delta f_{st})$			AMC
Related range of upward frequency setting		$\delta f_{s,up}$	%	5.2.1.2	> + 2,5 [3]			AMC
Rate of change of frequency setting		v_f	%/s	5.2.2	0,2 to 1			AMC
Transient frequency difference from initial frequency	100 % sudden power decrease	δf_d	%	5.3.3	< + 18	< + 12	< + 10	AMC
	sudden power increase[4] [5]				< − $(15 + \delta f_{st})$ [4]	< − $(10 + \delta f_{st})$ [4]	< − $(7 + \delta f_{st})$ [4]	
Transient frequency deviation from rated frequency	100 % sudden power decrease	δf_{dyn}	%	5.3.4	< + 18	< + 12	< + 10	AMC
	sudden power increase[4] [5]				< − 15 [4] < − 25 [5]	< − 10 [4] < − 20 [5]	< − 7 [4] < − 15 [5]	
Frequency recovery time		$t_{f,in}$ $t_{f,de}$	s	5.3.5	< 10 [6]	< 5 [6]	< 3 [6]	AMC
					< 10 [4]	< 5 [4]	< 3 [4]	
Related frequency tolerance band		α_f	%	5.3.6	3,5	2	2	AMC
Steady-state voltage deviation		δU_{st}	%	7.1.4	< ± 5 < ± 10 [7]	< ± 2,5 < ± 1 [8]	< ± 1	AMC
Voltage unbalance		$\delta U_{2,0}$	%	7.1.5	1 [9]	1 [9]	1 [9]	1 [9]
Range of voltage setting		δU_s	%	7.2.1	± 5			AMC
Rate of change of voltage setting		v_U	%/s	7.2.4	0,2 to 1			AMC
Transient voltage deviation	100 % sudden power decrease	δU^+_{dyn} δU^-_{dyn}	%	7.3.3	< + 35	< + 25	< + 20	AMC
	sudden power increase[4] [5]				< − 25 [4]	< − 20 [4]	< − 15 [4]	
Voltage recovery time[10]		$t_{U,in}$ $t_{U,de}$	s	7.3.5	< 10 < 10 [4]	< 6 < 6 [4]	< 4 < 4 [4]	AMC
Voltage modulation[11] [12]		$\hat{U}_{mod,s}$	%	7.3.7	AMC	0,3 [13] [14]	0,3 [14]	AMC
Active power sharing[15]	between 80 % and 100 % of the nominal rating	ΔP	%	13.1	—	< ± 5	< ± 5	AMC
	between 20 % and 80 % of the nominal rating					< ± 10	< ± 10	

3.4. Uporaba kerozinskog goriva NATO oznake F-34 za pogon dizel elektroagregata

Za pogon određenih tipova elektroagregata moguće je koristiti kerozinsko gorivo NATO oznake F-34. Budući da je većina elektroagregata koji se primjenjuju u složenim sustavima projektirana za uporabu standardnog dizelskog ili benzinskog goriva, mogućnost pogona elektroagregata s kerozinskim gorivom nije definirana od strane proizvođača. Kerozinsko gorivo F-34 sličnih je svojstva kao dizel gorivo pa se zbog nekih svojih prednosti počelo primjenjivati kao jedinstveno gorivo („Single Fuel Concept“) [16] za pogon dizel motora u međunarodnim vojnim operacijama. Budući da se izlazne karakteristike dizel motora nešto razlikuju pri primjeni kerozinskog goriva postavlja se pitanje kao pogonsko gorivo F-34 utječe na izlazne karakteristike elektroagregata. Da bi se definirala mogućnost primjene i režimi rada potrebno je provesti određena ispitivanja s kerozinskim gorivom F-34.

3.4.1. Kerozinsko gorivo NATO oznake F-34 i usporedba s dizel gorivom

Kerozinsko gorivo NATO oznake F-34, ili JP-8 u Americi dobiva se dodavanjem aditiva kerozinskom gorivu JET A-1 (oznake GM-1 u Hrvatskoj) koje se koristi u civilnom zrakoplovstvu. Uspoređujući ga s dizel gorivo ima niz prednosti a i nedostataka [18].

Prednosti su:

- stabilnost pri skladištenju
- jednostavniji logistički lanac nabave,
- bolja operabilnost pri nižim temperaturama,
- manja emisija ispušnih plinova

Nedostaci su:

- manja snaga dizel motora,
- manja mazivost,
- teži hladni start,
- svojstva otapala.

Svojstvo otapala predstavlja bitan problem kod starijih sredstava jer dolazi do otapanja naslaga koje ostaju od dizel goriva na stjenkama rezervoara i sustava za dovod goriva, što dovodi do začepljenja filtara goriva. Zbog toga je pri prijelazu na gorivo F-34 potrebna češća zamjena filtara i ispiranje rezervoara goriva [19].

U tablici 3.3. prikazan je usporedba s dizel gorivom iz koje se vidi da ima:

- manju gustoću

- bolje značajke na nižim temperaturama sa značajno nižom točkom stinjavanja

- manji cetanski broj

- približno 5 % nižu ogrjevnu vrijednost

Niži cetanski broj utječe na teži start pri nižim temperaturama a smanjena toplinska vrijednost dovodi do smanjenja snage dizel motora, zbog čega je u nekim slučajevima potrebno podešavanje sustava za ubrizgavanje goriva.

Tablica 3.3. Usporedba svojstava dizel goriva i NATO goriva F-34 [18]

	Dizel gorivo	**NATO gorivo F-34**
Gustoća [kg/m^3]	800-845	775-830
Točka destilacije [^{0}C] Točka paljenja [^{0}C] Točka stinjavanja [^{0}C]	370 56 min -18 max	228 38 min < -50
Viskoznost (kinematska) - pri 40 ^{0}C: mm^2/s - pri -20 ^{0}C: mm^2/s	2 - 4.5	 1.2 * 8 max.
Cetanski broj	49 min**	42 prosjek * 37 min
Prosječna kalorična vrijednost (MJ/l)	36 *	34.3 *

* prosječne vrijednosti

** najmanje ograničenje 45

3.5. Provedena ispitivanja u svrhu kategorizacije elektroagregata

Za potrebe kategorizacije elektroagregata u Oružanim snagama provedena su različita ispitivanja.

Težište ispitivanja je na provjeri izlaznih karakteristika elektroagregata za različite režime rada. Na temelju dobivenih izlaznih karakteristika agregati se mogu svrstati u određene kategorije što značajno pojednostavljuje primjenu i održavanje elektroagregata u složenim sustavima.

Temeljem dobivenih rezultata dobiva se šira slika o mogućnostima i načinima prilagodbe elektroagregata za primjenu u posebnim uvjetima rada, kao što su na primjer otežani uvjeti koji se pojavljuju u međunarodnim vojnim operacijama.

Zbog interoperabilnosti opreme i lakšeg sporazumijevanja s ostalim članicama koje djeluju u određenoj međunarodnoj vojnoj operaciji poželjno je imati opremu koja je definirana određenim standardom ili normom.

U Republici Hrvatskoj postepeno se usvajaju hrvatske vojne norme [17] što je dosta zahtjevna zadaća. Do usvajanja hrvatskih vojnih normi sredstva je potrebno kategorizirati prema određenom međunarodnom standardu (npr. ISO) za što je potrebno poznavanje njihovih karakteristika. Detaljno poznavanje karakteristika odnosno mogućnosti prilagodbe nekim zahtjevima olakšat će postupak izrade i usvajanje hrvatske vojne norme koja se odnosi na elektroagregate.

Zbog širih spoznaja koje su nužne za kategorizaciju elektroagregata provedena su ispitivanja u Oružanim snagama, pri čemu je naglasak na ispitivanju mogućnosti upotrebe kerozinskog goriva NATO oznake F-34 za pogon dizel elektroagregata. Dio standardnih ispitivanja s dizel gorivom proveden je i od strane proizvođača (vidjeti u Prilogu A) što je olakšalo nastavak ispitivanja i poslužilo za provjeru i usporedbu dobivenih rezultata.

Procedura ključnog ispitivanja s kerozinskim gorivom prikazana u nastavku provedena je na elektroagregatu P-B40.R1.

Cilj je da se u međunarodnim vojnim operacijama primjenjuje „Koncept jedne vrste goriva“ [20], što je i Republika Hrvatska prihvatila još tijekom procesa približavanja NATO savezu. „Koncept jedne vrste goriva“ znači osigurati da svi zrakoplovi, vozila i oprema s turbo punjenim motorima ili s ubrizgavanjem goriva pod pritiskom, predviđeni za sudjelovanje u NATO operacijama, mogu djelovati uporabom goriva temeljenog na kerozinskom zrakoplovnom gorivu.

Prethodno ovome ispitivanju, u Oružanim snagama Republike hrvatske provedena su ispitivanja na motornim vozilima TAM 150T11 i Torpedo TK-130, pri čemu nisu uočena oštećenja na motorima i njihovim sklopovima ali je uočena povećana potrošnja goriva i manja snaga motora. Povezano s time i manja maksimalna brzina vozila te duži vremenski period za dostizanje određene brzine [19]. Dobivene razlike nisu zanemarive pa se postavilo pitanje ponašanje rada elektroagregata pri uporabi navedenog goriva. Pretpostavilo se da je zbog niže kalorične vrijednosti goriva F-34 smanjena snaga pogonskog dizel motora, što bi pri nazivnom opterećenju elektroagregata moglo izravno utjecati na smanjenje frekvencije izlaznog napona.

Ciljano se pristupilo ispitivanju na elektroagregatu P-B40.R1 iz više razloga.

Pogonski motor elektroagregata sličan je pogonskim motorima koji su ugrađeni u vozila TAM 150T11 i Torpedo TK-130 na kojima je provedeno ispitivanje i nisu uočena oštećenja ali su uočene razlike u snazi i brzini vrtnje što je ključno za pravilan rad elektroagregata. Osim toga navedeni tip elektroagregata često se primjenjuje u Oružanim snagama i pokazao se vrlo pouzdanim. Također postoji i niz drugih tipova elektroagregata slične izvedbe i vrlo sličnog sustava za ubrizgavanje goriva pa se metodologija provedenih ispitivanja na elektroagregatu P-B40.R1 može jednostavno primijeniti i na tim elektroagregatima. Za očekivati je i dobivanje sličnih karakteristika što također olakšava praćenje i usporedbu dobivenih rezultata.

3.6. Ispitivanje elektroagregata P-B40.R1

Elektroagregat P-B40.R1 često se primjenjuje u Oružanim snagama Republike Hrvatske zbog svoje pouzdanosti i jednostavnosti u održavanju. Monoblok se sastoji od međusobno povezanog pogonskog dizel motora i generatora koji su preko gumenih amortizera pričvršćeni na podvozje. Upravljački ormar smješten je sa stražnje strane iznad generatora i sastoji se od sklopova za mjerenje, nadzor, upravljanje, zaštitu i signalizaciju stanja i kvarova. Osim ovih sklopova na podvozje je montiran rezervoar i akumulator. Svi sklopovi zaštićeni su limenim pokrovom [21].

Pogonski motor je T3L 912 Torpedo Rijeka s direktnim ubrizgavanjem goriva, zrakom hlađen i podmazivan zupčastom uljnom pumpom. U tablici 3.4. navedeni su tehnički podaci pogonskog motora na koji je prirubno povezan četveropolni samouzbudni generator „KONČAR“ tip SGB200 SM-4. Generator ima beskontaktni sustav uzbude koji se bazira na trofazno sinkronom uzbudniku s cilindričnom armaturom na rotoru i izraženim polovima na statoru. Regulator napona izveden je kao kompaundni s trofaznim kompaundnim transformatorom [22].

Tablica 3.4. Tehnički podaci pogonskog motora

Proizvođač	Torpedo Rijeka
Tipska oznaka	T3L912
Trajna snaga (kW)	24
Broj cilindara	3
Radni volumen (cm^3)	2826
Masa (kg)	285
Min. temp. sigurnog starta (^0C)	18

Regulaciju snage koja je promjenjiva, ovisi o potrebama trošila provodi regulator koji se nalazi u sklopu visokotlačne pumpe pogonskog motora. Kada dođe do opterećenja elektroagregata, mora se povećati mehanička snaga na vratilu pogonskog stroja, a da bi se to ostvarilo potrebno je povećati količinu ubrizganog goriva koju određuje navedeni regulator.

Regulacija izlaznog napona koji je ovisan o struji opterećenja provodi se preko uzbudne struje.

Tehničke karakteristike generatora navedene su u tablici 3.5.

Tablica 3.5. Tehničke karakteristike generatora

Proizvođač	Končar-ERS
Tipska oznaka	SGB 200 SM-4
Trajna snaga (kVA)	40
Nazivna struja (A)	57.7
cos φ	0.8
Brzina vrtnje (n/min)	1500

Deklarirana snaga ovog elektroagregata kao cjeline je 25 kVA, a iz tablice 3.4 je vidljiva trajna snaga pogonskog motora koja je u ovom primjeru manja od snage generatora. U tablici 3.6. prikazani su rezultati tvorničkog ispitivanja [23], koje je provedeno s različitim opterećenjima, a iz kojih je vidljivo da s porastom opterećenja dolazi do pada napona i frekvencije.

Tablica 3.6. Rezultati tvorničkog ispitivanja

P (%)	U (V)	I (A)	cos (φ)	f (Hz)
0	400	0	-	51.2
25	399	7.2	1.0	51.0
25	399	9.0	0.8	50.7
50	399	14.4	1.0	50.7
50	399	18.0	0.8	50.4
75	398	21.6	1.0	50.4
75	398	27.0	0.8	50.0
100	398	28.8	1.0	50.0
100	398	36.1	0.8	50.0
110	398	31.7	1.0	49.9

Navedeni podaci služe za usporedbu s rezultatima ispitivanja u Oružanim snagama Republike Hrvatske koje je provedeno za potrebe kategorizacije elektroagregata i optimizacije održavanja.

3.6.1. Metodologija i rezultati ispitivanja provedenih u Oružanim snagama Republike Hrvatske

Da bi se sa sigurnošću moglo govoriti o utjecaju pogonskog goriva na izlazne karakteristike stroja pristupilo se ispitivanju. Prvo je provedeno ispitivanje s dizel gorivom a zatim s kerozinskom gorivom F-34 pri čemu su primijenjene iste metode [24]. Najprije je izvršeno zagrijavanje motora u prazno hodu što je prikazano u prvom stupcu tablice 3.7. a nakon toga rad u četiri etape, pri čemu se krenulo od manjeg opterećenja prema većem. Pri sva četiri opterećenja utrošeno je po 2.5 litre goriva i praćena je količina dobivene električne energije preko trofaznog brojila (slika 3.8.)



Slika 3.8. Ispitivanje elektroagregata za potrebe kategorizacije

Osim dobivene električne energije, mjerena je struja, napon, brzina vrtnje i vrijeme potrebno za potrošnju 2.5 litre goriva.

U nastavku je prikazan redosljed radnji koje su provedene:

1. odspajanje sustava za dovod goriva između spremnika goriva i niskotlačne pumpe za gorivo (ac pumpa)
2. povezivanje fleksibilnog crijeva s niskotlačnom pumpom preko predfiltra kako bi se mogao ostvariti dovod goriva iz menzure
3. ulijevanje goriva u menzuru
4. odzračivanje sustava za dovod goriva
5. ponovno dolijevanje goriva do iznosa 10 litara
6. priključivanje otporničkog trošila na elektroagregat preko brojila električne energije što omogućuje točno praćenje dobivene električne energije
7. startanje elektroagregata i rad u praznom hodu 10 minuta za zagrijavanje pogonskog motora

8. zaustavljanje elektroagregata, dolijevanje goriva do iznosa 10 litara pri čemu je evidentirana količina utrošenog goriva u praznom hodu
9. ponovno startanje elektroagregat, opterećenje na 40 %
10. rad do potrošnje 2.5 litre goriva, višestruko uzorkovanje brzine vrtnje, struje i napona, a po potrošnji 2.5 litre goriva evidentiranje dobivene električne energije i proteklo vrijeme
11. druga etapa, opterećenje 60 %, rad do potrošnje 2.5 litre goriva, evidentiranje dobivenih vrijednosti
12. treća etapa, opterećenje 75 %, rad do potrošnje 2.5 litre goriva, evidentiranje dobivenih vrijednosti
13. četvrta etapa, opterećenje 100 %, potrošnja 2.5 litara goriva, evidentiranje dobivenih vrijednosti

Po završetku ovog procesa mjerenja mogla se točno odrediti količina dobivene električne energije iz 10 litara utrošenog goriva pri različitim opterećenjima.

Kako bi se ovo ispitivanje dopunilo, odnosno kako bi se vidjela maksimalna snaga koju elektroagregat može dati, izvršena je dopuna goriva i provedeno kratkotrajno terećenje elektroagregata iznad nazivnih vrijednosti.

U tablici 3.7. prikazani su rezultati s dizel gorivom, isto je provedeno i s kerozinskim gorivom F-34 što je prikazano u tablici 3.8. Dobiveni rezultati prikazani su usporedno grafički na slici 3.9.

Tablica 3.7. Rezultati ispitivanja provedenog za potrebe kategorizacije elektroagregata s dizel gorivom

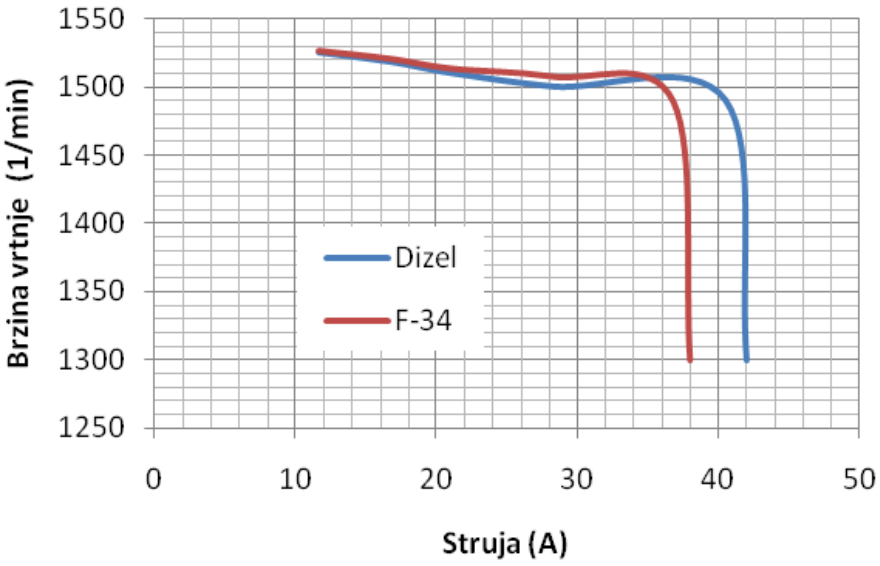
Vrijeme (min)	10	53	39	33	30
Opterećenje P_n (%)	0	40	60	75	100
Napon (V)	400	398	397	396	395
Struja (A)	0	11.6	16.8	21.0	28.3
Brzina vrtnje (n/min)	1542	1525	1518	1510	1500
Potrošnja goriva (l)	0.24	2.5	2.5	2.5	2.5
Dobiveno el. energije (kWh)	0	7.24	7.33	7.79	8.97
Ukupno dobiveno el. energije (kWh)		31.33			

Za opterećenja do nazivnih vrijednosti deklariranih od strane proizvođača, nema značajnijeg opadanja brzine vrtnje. Razlika je utvrđena pri opterećenjima koja su iznad deklariranih. Tu se pokazalo da dizel gorivo omogućava rad s približno 10 % više opterećenja pri čemu neće doći do zaustavljanja pogonskog motora.

Tablica 3.8. Rezultati ispitivanja provedenog za potrebe kategorizacije elektroagregata s kerozinskim gorivom F-34

Vrijeme (min)	10	53	39	33	30
Opterećenje P_n (%)	0	40	60	75	100
Napon (V)	400	398	397	396	395
Struja (A)	0	11.6	16.8	21.0	28.3
Brzina vrtnje (n/min)	1548	1527	1521	1514	1508
Potrošnja goriva (l)	0.29	2.5	2.5	2.5	2.5
Dobiveno el. energije (kWh)	0	6.86	7.26	7.61	8.65
Ukupno dobiveno el. energije (kWh)		30.38			

Na slici 3.9. vidi se da nema značajnijih razlika u brzini vrtnje pri korištenju dizel goriva i kerozinskog goriva F-34 do nazivnih opterećenja. Značajnija razlika utvrđena je iznad nazivnih opterećenja.



Slika 3.9. Ovisnost brzine vrtnje o opterećenju elektroagregata pri uporabi različitih pogonskih goriva

Manja odstupanja prikazanih rezultata mogla su nastati uslijed nesigurnosti mjerne opreme.

Za prikazano ispitivanje korištena je sljedeća oprema:

- Elektroagregata „Končar“ P-B40.R1, br. Z28028-260865
- Trofazno brojilo „Iskra“, tip: T310CDV
- Menzura „BORAL“ Pula 10 l
- Mjerač brzine vrtnje „SKF Optical Tachometer TMOT6
- Strujna kliješta „HEME International“
- Voltmetar „WAVETEC“ 15 XL
- Otporničko trošilo 60 kW

3.7. Analiza i mogućnosti prilagodbe elektroagregata za rad u međunarodnim vojnom operacijama

Kao što je prethodno navedeno, za optimizaciju održavanja elektroagregata nužno je provesti kategorizaciju, odnosno svrstavanje elektroagregata u određene kategorije. U jednoj kategoriji potrebno je imati elektroagregate koji se mogu koristiti u međunarodnim vojnim operacijama. Ta kategorija elektroagregata često puta je izložena otežanim uvjetima rada, ne samo zbog priključenja različitih tereta, već i zbog uvjeta okoline kao što su različiti temperaturni uvjeti i različite nadmorske visine. Osim toga pojavljuju se i različite vrste pogonskog goriva. Sve to ima utjecaj na izlazne karakteristike elektroagregata i kvalitetu električne energije. Zbog toga je potrebno detaljno poznavanje karakteristika elektroagregata koji su u navedenoj kategoriji i mogućnost njihove prilagodbe za rad u otežanim uvjetima.

Iz provedenih ispitivanja utvrđena je mogućnost upotrebe kerozinskog goriva F-34 na nekim tipovima elektroagregata ali s određenim ograničenjima. Da bi ti elektroagregati zadovoljili zahtjeve standarda ISO 8528 i da bi se na njega moglo pozivati u komunikaciji s drugim članicama saveza potrebno je provesti određene prilagodbe ili ograničiti izlaznu snagu generatora koja je u nekim slučajevima ispod deklarirane nazivne snage.

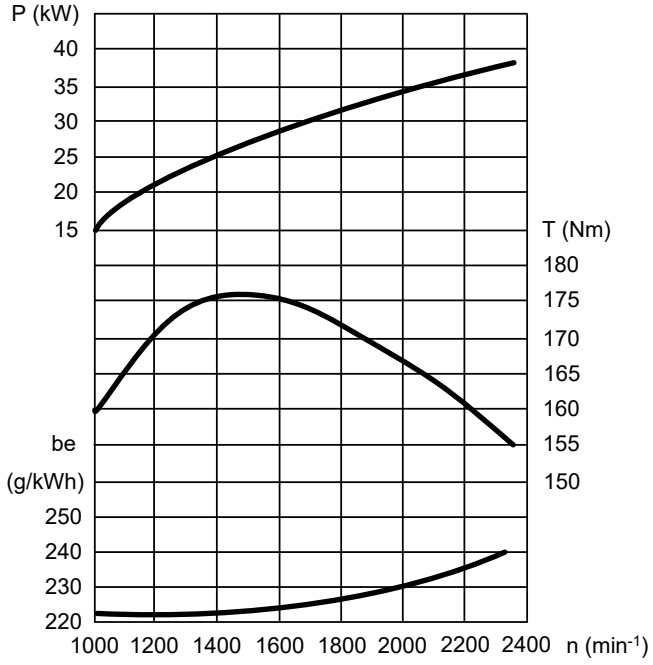
Cilj ove analize je, osim za potrebe prilagodbe navedenog elektroagregata, stvoriti univerzalnu metodologiju provedbe ispitivanja i podešavanja različitih tipova elektroagregata. Zbog složenosti i opširnosti postupaka prvo je provedeno ispitivanje za definiranje ponašanja u stacionarnom stanju u kojem je promatran pad napona i frekvencije pri kontinuiranom opterećenju, odnosno promatrana je razlika napona neopterećenog i opterećenog elektroagregata. Pri tome nisu promatrane prijelazne pojave do kojih dolazi u trenutku uključenja tereta. Za

predviđanje dinamičkih promjena sačinjen je simulacijski model elektroagregata u programskom paketu Matlab Simulink pomoću kojeg su praćene i izučavane dinamičke promjene napona i frekvencije do kojih dolazi pri udarnim opterećenjima. Dobiveni rezultati objavljeni su u časopisu „A“ kategorije [25].

U tablicama 3.7. i 3.8. prikazane su vrijednosti ispitivanja koje je provedeno s dva različita goriva, eurodizel (ED) i kerozinsko gorivo (F-34), koje su bitne za određivanje klase prema Protokolu o kvaliteti proizvoda [14] i standardu ISO 8528 [15].

Tijekom ispitivanja evidentirana je i povećana potrošnja kerozinskog goriva u odnosu na dizel gorivo (vidjeti tablica 3.8).

Do povećane potrošnje dolazi zbog manje energetske vrijednosti i manjeg cetanskog broja kerozinskog goriva [26]. Za određivanje parametara simulacijskog modela osim navedenih ispitivanja bitnu ulogu imaju karakteristike snage i momenta pogonskog motora. Na slici 3.10. prikazana je karakteristika motora F3L912 koja je preuzeta iz kataloga motora Deutz, serije 912 [27]. Po licenci navedenog motora izrađen je pogonski motor elektroagregata P-B40.R1 koji nosi oznaku T3L912 i istih je pogonskih karakteristika.



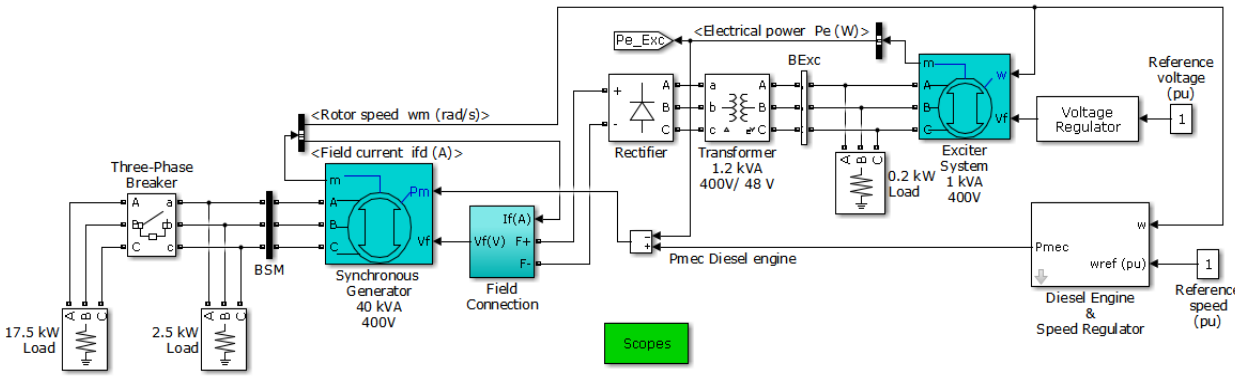
Slika 3.10. Dijagram snage, okretnog momenta i specifične potrošnje goriva (be) dizel motora serije 3L912 [27]

3.7.1. Simulacija rada elektroagregata i metodologija prilagodbe regulatora za potrebe korištenja različitih vrsta goriva

Prethodnim izučavanjem utvrđeno je da korištenjem kerozinskog goriva F-34 dolazi do kašnjenja paljenja dizel motora [28, 29, 30, 31], odnosno povećanja vremena između početka ubrizgavanja goriva i početka izgaranja. Uporaba kerozinskog goriva povećava nestabilnost rada dizel motora [32], što utječe na kvalitetu proizvedene električne energije, a naročito dolazi do izražaja kod nazivnih opterećenja i rasterećenja generatora.

Generatori pokretani turbo punjenim motorima još su osjetljiviji, odnosno njihovo vrijeme reakcije je dulje u slučaju naglog opterećenja [33]. To se manifestira povećanim propadima i nadvišenjima napona i frekvencije. Kako bi se ograničilo dinamičke promjene koje nastaju i svelo u dopuštene granice pristupilo se razradi simulacijskog modela (slika 3.11., uvećano u prilogu B) čiji rezultati će poslužiti za podešavanje parametara i prilagodbu regulatora brzine vrtnje dizel motora i regulatora napona sinkronog generatora na stvarnim primjerima. Simulacijski model ne uključuje izravno vrstu goriva, već se preko poznate razlike cetanskih brojeva različitih goriva i utvrđene manje snage pogonskog motora podešava vrijeme kašnjenja motora Td [31], koje se koristi u provedbi simulacije.

Ovdje se ne određuje točan iznos vremena T_d, nego se provjerava kako smanjenje vremena T_d utječe na izlazne karakteristike generatora (napon i frekvenciju) u slučaju korištenja goriva s manjim cetanskim brojem.



Slika 3.11. Simulacijski model u Matlab Simulinku za potrebe podešavanje parametara elektroagregata

Dizel motor i regulator brzine vrtnje opisani su diferencijalnim jednadžbama [34]:

- diferencijalna jednadžba motora

$$J_{dm}\frac{d\omega}{dt} = M_m(g_c, p_k, \omega) - M_f(\omega, N) \tag{3-41}$$

- diferencijalna jednadžba regulatora brzine vrtnje

$$\begin{aligned} &T_1^2(\omega,h)\frac{d^2 g_c}{dt} + T_2(\omega,h)\frac{dg_c}{dt} + k_M(\omega,h)\Delta g_c = \\ &= k_1(h)\Delta h + k_2(\omega,h)\Delta\omega \end{aligned} \tag{3-42}$$

gdje je:

$$k_1(h) = \frac{g_{c0}}{h_0},\ k_2(\omega,h) = \Theta(\omega,h)\frac{g_{c0}}{h_0}$$

Provedena istraživanja [35] su pokazala da se može prihvatiti pretpostavka proporcionalnosti momenta motora o količini ubrizganog goriva. Time se jednadžbe (3-40 i 3-41) uz uvođenje početnih uvjeta mogu napisati u sljedećem obliku:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{dg}}(M_m - M_{el}) \tag{3-43}$$

$$\frac{dm_T}{dt} = \Delta m_T \tag{3-44}$$

$$\frac{d\Delta m_T}{dt} = (-T_2\Delta m_T - m_T - k\omega + k\omega_0 + m_{T0})\frac{1}{T_1^2} \tag{3-45}$$

Diferencijalne jednadžbe sinkronog generatora u d-q koordinatama glase:

$$-u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q\frac{dy}{dt} + ri_d \tag{3-46}$$

$$-u_q = \psi_d\frac{dy}{dt} + \frac{d\psi_q}{dt} + ri_q \tag{3-47}$$

$$0 = \frac{d\psi_D}{dt} + r_D i_D \tag{3-48}$$

$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1 \tag{3-49}$$

$$J_{DG}\frac{dy^2}{dt} = M_m - M_{elm} \tag{3-50}$$

gdje je:

$$\psi_d = x_d i_d + e_q + i_D x_{ad};\ \psi_q = x_q i_q + i_Q x_{aq}$$

$$\psi_D = i_d x_{ad} + e_q + i_D x_D;\ \psi_Q = i_q x_{aq} + i_Q x_Q$$

$$\psi_1 = i_d x_{ad} + i_1 x_1 + i_D x_{ad};\ M_{elm} = -\psi_d i_q + \psi_q i_d$$

Za postavljanje simulacijskog modela korišteni su parametri iz tehničke dokumentacije i rezultati provedenih ispitivanja. Dodatni parametri do kojih se nije došlo iz tehničke dokumentacije i provedenim istraživanjem dobiveni su matematičkom interpolacijom postojećih vrijednosti većih i manjih agregatskih jedinica koje postoje u sadržaju programskog paketa Matlab Simulink. Znači za kalibraciju simulacijskog modela prvo su upotrijebljeni parametri koji su navedeni u tehničkoj dokumentaciji [21, 22, 23] (snaga, brzina vrtnje, napon, struja, frekvencija, struja i napon uzbudnog kruga).

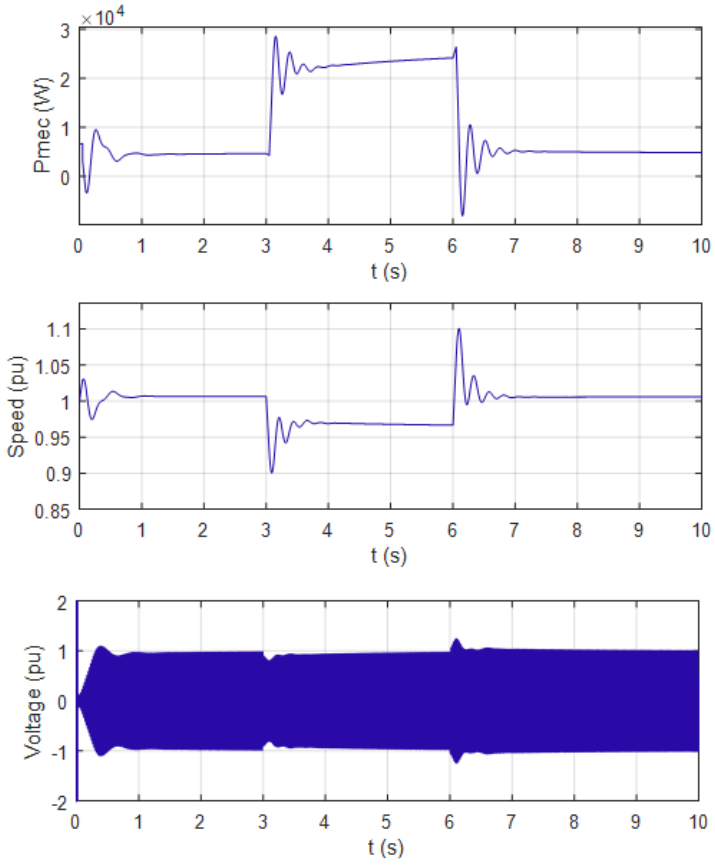
Za potrebe prikazanog modela potrebni su bili i dodatni parametri koji su dobiveni provedenim ispitivanjem [24], kao što je npr. utvrđena manja snaga dizel motora za približno 10 % pri uporabi kerozinskog goriva. Ispitivanja s dizel gorivom su provedena i na sličnom elektroagregatu [34, 35].

Cilj ove simulacije je iznalaženje rješenja i definiranje potrebnih zahvata za dobivanje istih karakteristika elektroagregata neovisno o vrsti pogonskog goriva (dizel ili F-34).

Želi se dobiti da elektroagregat pri korištenju goriva F-34 zadrži iste performanse kao da koristi dizel gorivo.

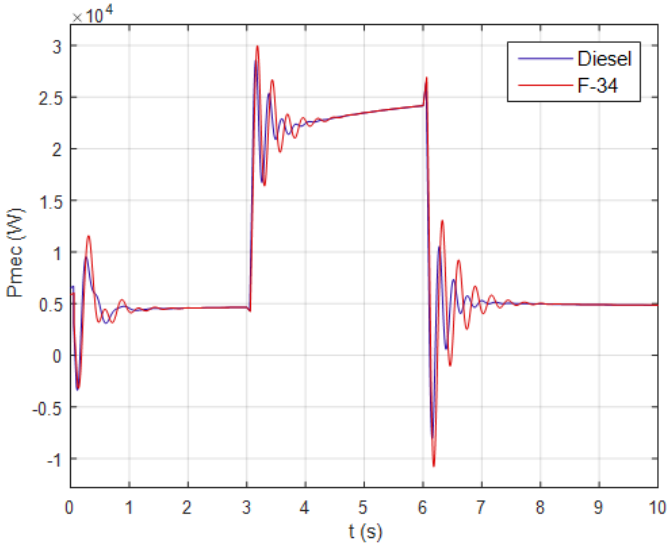
Prema performansama elektroagregati se svrstavaju u četiri grupe (G1, G2, G3 i G4) [15]. Grupi G4 pripadaju elektroagregati koji zadovoljavaju najstrože zahtjeve za kvalitetu proizvedene električne energije, odnosno koji imaju najstabilniji napon i frekvenciju generatora. Grupi G1 pripadaju elektroagregati kojima se dozvoljavaju najveća odstupanja napona i frekvencije.

U izvođenju simulacija poseban naglasak je na izučavanju dinamičkih promjena napona i frekvencije, odnosno propada i nadvišenja do kojih dolazi pri udarnim opterećenjima i rasterećenjima generatora. Na slici 3.12. prikazana je promjena snage pogonskog motora (P_{mec}), brzine vrtnje (*Speed*) i napona generatora (*Voltage*) u periodu od 10 sekundi. Udarno opterećenje nastupa nakon 3 sekunde a rasterećenje nakon 6 sekundi. Vrijednosti simulacije na slici 3.12. odnose se na dizel gorivo i podudaraju se s grafovima prikazanim u ISO 8528. Rezultati simulacija u prvoj sekundi nisu od bitnog značaja i mogu se zanemariti.



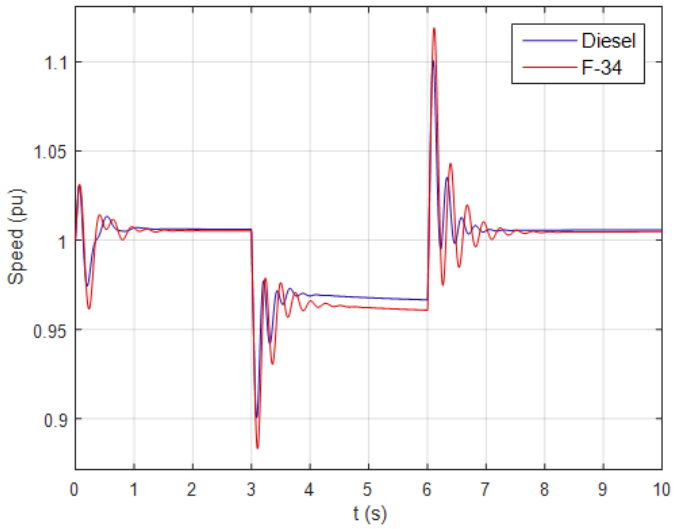
Slika 3.12. Dinamičke promjene snage motora, brzine vrtnje i napona generatora pri uporabi dizel goriva

Na sljedećim slikama (slike 3.13. do 3.22.) prikazana je usporedba rezultata provedenih simulacija za različita goriva.



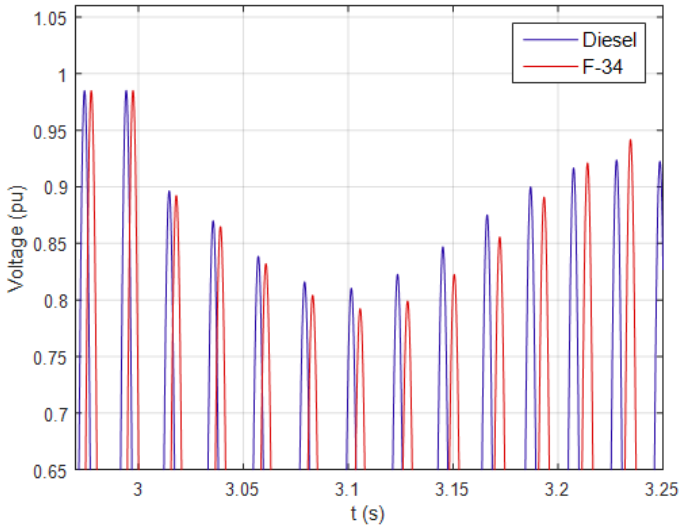
Slika 3.13. Razvijene snage pogonskog motora za dva različita goriva bez podešavanja ubrizgavanja

Na slici 3.14. vidljiv je propad brzine vrtnje koji nastupa nakon 3 sekunde od početka simulacije, prilikom uključenja tereta i nadvišenje brzine koje nastupa nakon 6 sekundi, prilikom isključenja tereta. Vidljivo je da do većih propada i nadvišenja dolazi pri uporabi kerozinskog goriva F-34. Također je vidljivo sa prethodne slike (slika 3.13.) da dolazi do većih oscilacija razvijene snage pogonskog motora pri uporabi goriva F-34. Analizirajući dobivene rezultate prema [8] može se zaključiti da su propadi i nadvišenja brzine vrtnje iznad dopuštenih granica propisanih za klasu agregata G2 u slučaju korištenja F-34. Npr. za klasu G2 dopušteno nadvišenje frekvencije pri naglom rasterećenju generatora koji je bio opterećen sa 100 % nazivne (nominalne) snage je 12 %, što znači da je i dozvoljena promjena brzine u tom slučaju maksimalno 12 %. Maksimalno dozvoljeno nadvišenje napona pri naglom rasterećenju je 25 %. To znači da bi u ovom slučaju agregat pri uporabi goriva F-34 prema ISO klasifikaciji bio svrstan u nižu klasu (G1), koja postavlja niže zahtjeve za kvalitetu proizvedene energije.

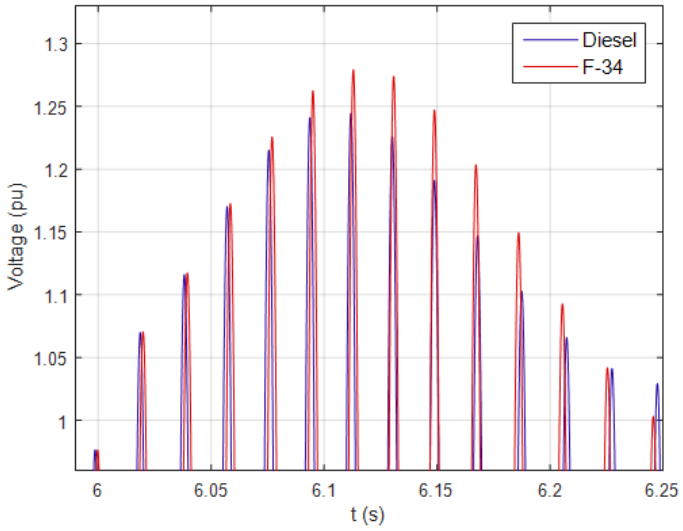


Slika 3.14. Brzine vrtnje generatora za dva različita goriva bez podešavanja ubrizgavanja

Također, isto se događa i s propadima i nadvišenjima napona što je vidljivo na slici 3.15. i 3.16. Na slici 3.15. se vidi da je propad napona pri uporabi goriva F-34 veći od 20%, znači u određenom trenutku pada ispod vrijednosti 0,8 koja je granična za klasu G2. Isto se događa i s nadvišenjima, što je vidljivo na slici 3.16., gdje pri uporabi goriva F-34 prelazi 25 % postavljene vrijednosti.



Slika 3.15. Propad napona generatora pri udarnom opterećenju za dva različita goriva bez podešavanja ubrizgavanja



Slika 3.16. Nadvišenje napona generatora pri naglom rasterećenju za dva različita goriva bez podešavanja ubrizgavanja

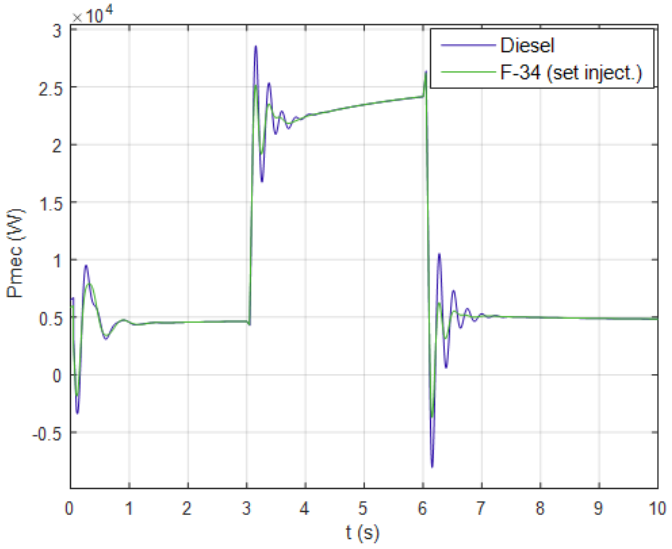
U nastojanju da se dobije što bolja kvaliteta proizvedene električne energije pri uporabi kerozinskog goriva pristupilo se izučavanju regulatora brzine vrtnje pogonskog motora i regulatora napona generatora. Pri tom je utvrđeno da se podešavanjem regulacijskih parametara mogu dobiti vrlo slične karakteristike u pojedinim područjima bez obzira na vrstu pogonskog goriva.

U našem slučaju je bitno područje dinamičkih promjena pri udarnim opterećenjima i rasterećenjima generatora. Kod nazivnih kontinuiranih opterećenja poznato je da su veći propadi kod goriva F-34 ali su u dozvoljenim granicama propisanim u klasi G2. To se najbolje vidi na slici 3.14. u području između 5. i 6. sekunde.

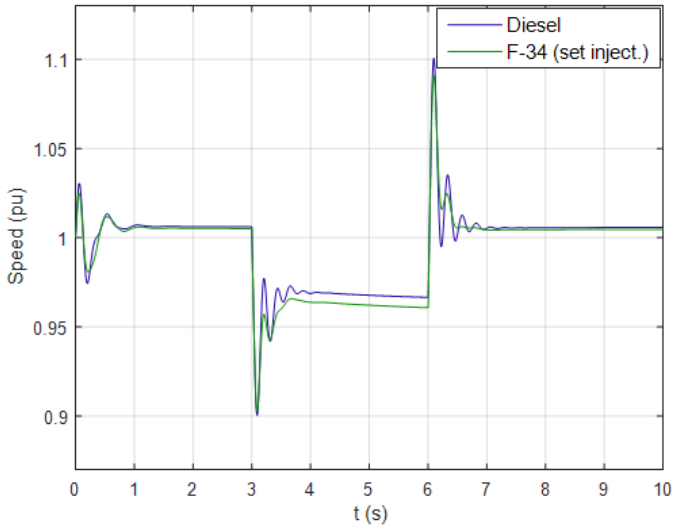
Budući da postoje različite mogućnosti podešavanja regulatora, cilj je odabrati najjednostavniju metodu koju je moguće primijeniti na različite tipove elektroagregata.

Izučavanjem kerozinskog goriva F-34 utvrđen je manji cetanski broj što može dovesti do otežanog starta motora pri nižim temperaturama i do kašnjenja paljenja u cilindru motora. Uzimanjem u obzir rezultate dosad provedenih istraživanja uz ostale simulacije pristupilo se provedbi simuliranja s različitim vrijednostima kašnjenja motora *Td*. Pri tom je utvrđeno da se ranijim ubrizgavanjem goriva znatno može utjecati na karakteristike frekvencije i napona generatora pri udarnim opterećenjima i rasterećenjima. Podešavanjem ubrizgavanja, odnosno smanjenjem vremena *Td* za 10% u provedbi simulacije za kerozinsko gorivo, dobivene su vrijednosti prikazane na slikama 3.17. do 3.20. iz kojih se vidi da su nadvišenja, propadi i oscilacije znatno smanjeni, odnosno poistovjećuju se za oba goriva. U tom slučaju elektroagregat pripada istoj klasi bez obzira na vrstu upotrijebljenog goriva.

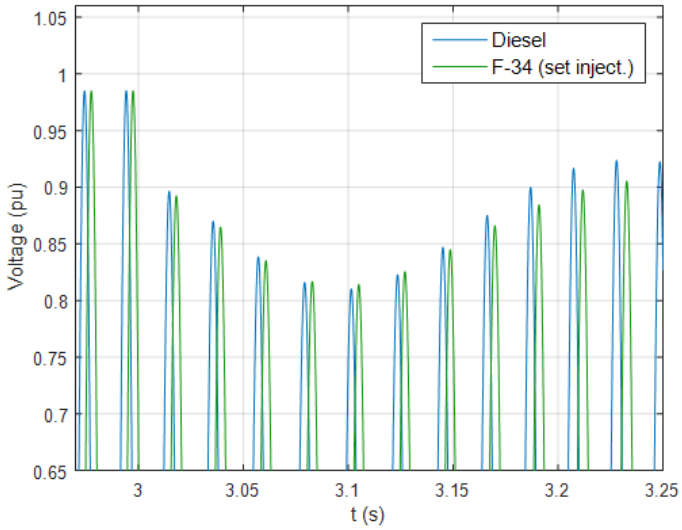
Ovaj zahvat je relativno jednostavan za primjenu i moguće ga je izvesti na različitim sustavima ubrizgavanja. Kod starijih sustava podešavanjem visokotlačne pumpe, a kod novijih sustava promjenom električnih parametara regulatora brzine vrtnje pogonskog motora.



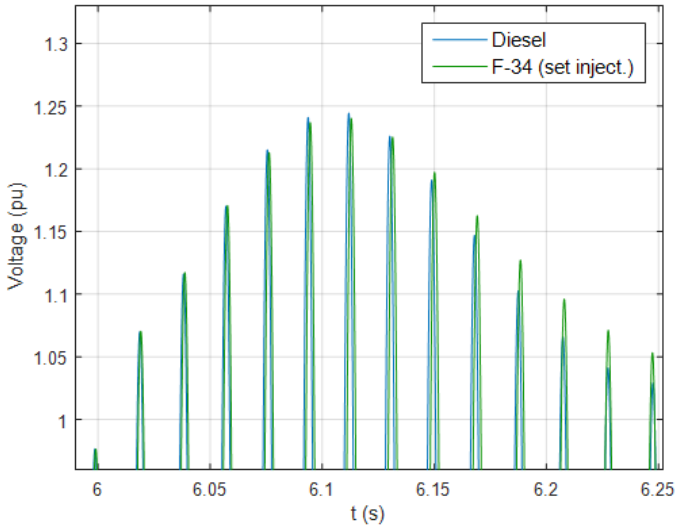
Slika 3.17. Razvijene snage pogonskog motora za dva različita goriva s podešenim ubrizgavanjem



Slika 3.18. Brzine vrtnje generatora za dva različita goriva s podešenim ubrizgavanjem



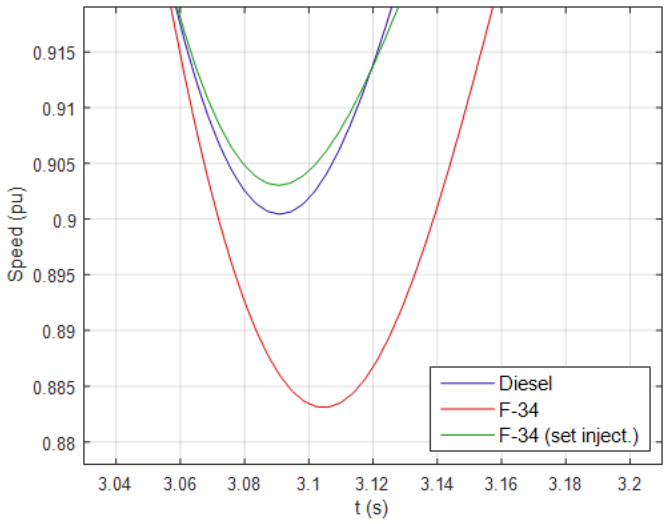
Slika 3.19. Propad napona generatora pri udarnom opterećenju za dva različita goriva s podešenim ubrizgavanjem



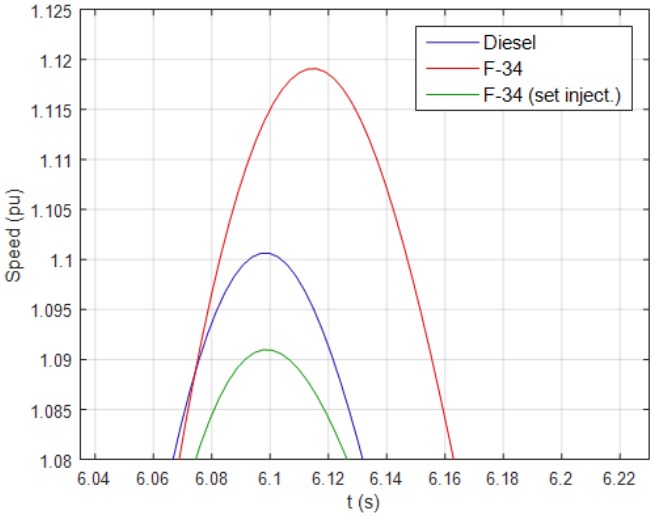
Slika 3.20. Nadvišenje napona generatora pri naglom rasterećenju za dva različita goriva s podešenim ubrizgavanjem

Dosad provedenim istraživanjem utvrđeno je da potrebno zakretanje visokotlačne pumpe u raniju fazu nema značajnijeg negativnog utjecaja na rad pogonskog motora. Isti motori često se koriste i u različitim radnim strojevima gdje se vrte na povećanim brzinama te su podešeni na raniji stupanj paljenja, što također potvrđuje mogućnost rada s nešto ranijim stupnjem paljenja bez nastanka oštećenja motora.

Na slici 3.21. i 3.22. uvećano su prikazani propadi i nadvišenja brzine vrtnje do kojih dolazi pri udarnom opterećenju i rasterećenju generatora. Prvo je simulacijom dobivena krivulja plave boje za pogon s dizel gorivom i tvorničkim postavkama motora. Zatim je dobivena krivulja crvene boje za pogon s gorivom F-34, također s tvorničkim postavkama. Tu je vidljivo da dolazi do značajnijih propada, odnosno nadvišenja brzine vrtnje, a može se uočiti i kašnjenje propada i nadvišenja do kojeg dolazi zbog kasnijeg paljenja goriva F-34. Da bi se izbjegli povećani propadi i nadvišenja s gorivom F-34, pristupilo se podešavanju vremena kašnjenja motora te je dobivena krivulja zelene boje. Ona potvrđuje da je moguće smanjiti propade i nadvišenja brzine vrtnje pri uporabi goriva F-34 i dovesti ih u granice definirane ISO 8528 pomoću podešavanja vremena ubrizgavanja goriva.



Slika 3.21. Propadi brzine vrtnje prije i nakon podešavanja sustava ubrizgavanja goriva



Slika 3.22. Nadvišenja brzine vrtnje prije i nakon podešavanja sustava ubrizgavanja goriva

Dosad provedena istraživanja ukazuju da pri udarnim opterećenjima i rasterećenjima generatora dolazi do oscilacija snage pogonskog motora i brzine vrtnje, što izravno utječe na povećane propade, odnosno nadvišenja frekvencije i napona generatora.

Propadi i nadvišenja do kojih dolazi izraženiji su pri uporabi kerozinskog goriva F-34. Iz provedenih simulacija može se zaključiti da se promjenom regulacijskih parametara smanjuju oscilacije do kojih dolazi zbog manje energetske vrijednosti i lošijeg cetanskog broja navedenog goriva. Najjednostavnija metoda koja je primjenjiva na većinu elektroagregata je podešavanje sustava ubrizgavanja, odnosno smanjenje vremena kašnjenja motora. Time se dinamičke

promjene do kojih dolazi pri uporabi goriva F-34 mogu izjednačiti s promjenama koje nastaju pri uporabi dizel goriva.

Naglasak ovog istraživanja je na dinamičkim promjenama jer su u ovom slučaju najkritičnije i definiraju klasa agregata. Svođenjem dinamičkih promjena pri uporabi F-34 u određene granice znatno se pojednostavljuje primjena sredstava u različitim režimima rada, odnosno u tom slučaju elektroagregati se dovode u stanje da udovoljavaju zahtjeve iz Propisa o kvaliteti proizvoda i ISO 8528 za obje vrste goriva.

4. MODELIRANJE EKSPERTNOG SUSTAVA ZA DETEKCIJU KVARA U SVRHU OPTIMIRANJE ODRŽAVANJA

U složenim sustavima, kao što su vojne organizacije pojavljuju se različita tehnička sredstava od kojih se zahtjeva visok stupanj pouzdanosti i raspoloživosti. Da bi se to postiglo, potrebno je imati dobro razrađen sustav održavanja koji će u što kraćem vremenu kod neispravnih sredstava uspostaviti radnu sposobnost. Zbog toga se kontinuirano razrađuju metode koje pridonose optimizaciji održavanja i produktivnosti rada servisno tehničkih radionica [36].

Kod složenih tehničkih sredstava, kao što su elektroagregati, velik dio vremena u procesu održavanja odnosi se na utvrđivanje tehničkog stanja, odnosno detekciju kvara. Kako bi se skratilo vrijeme utvrđivanja kvara razvija se Ekspertni sustava za detekciju čija je zadaća na temelju lako uočljivih neispravnosti u sklopljenom stanju definirati mjesto teško detektirajućeg kvara.

Metodologija razvoja Expertnog sustava prikazana je u znanstvenom radu koji je također objavljenom u časopisu „A“ kategorije [37].

Za pravilan rad ekspertnog sustava bitno je imati vjerodostojnu “bazu znanja“ [38]. Za sačinjavanje baze znanja koja uključuje vjerojatnosti pojave određenih kvarova provedeno je prikupljanje informacija od specijaliziranih mehaničara koji imaju dugogodišnje iskustvo u održavanju elektoroagregata. Osim toga, provedena je i raščlamba kvarova koji su evidentirani u proteklih 15 godina u dokumentaciji sačinjenoj pri prijemu sredstava na remont. Prikupljeni podaci obrađuju se u programskom paketu GeNIe koji primjenom Bayesove metode [39] provodi proračun pravih vrijednosti koje povećavaju ili umanjuju vjerojatnosti određenih kvarova.

Za oblikovanje Bayesove mreže i doradu dosad sačinjene baze znanja bitno je imati realne pokazatelje kao što su dijagnostička testiranja. U ovom slučaju to su rezultati izlaznih karakterisitka elektroagregata, od kojih se jedan dio dobiva mjerenjem, a drugi dio simulacijom na računalu prema razvijenom simulacijskom modelu prikazanom na slici 4.6.. Rezultati dijagnostičkih testiranja unose se u Bayesovu mrežu koja je djelomično prikazana na slici 4.2. i služe za donošenje odluke o mjestu nastanka teško detektirajućeg kvara.

4.1. Modeliranje sustava za detekciju kvara

4.1.1. Bayesova metoda

Obrada prikupljenih informacija provodi se po Bayesovoj shemi koja se temelji na klasičnoj teoriji vjerojatnosti. Preko uvjetne vjerojatnosti određuje se vjerojatnost nekog događaja „y“ ako je poznato da se dogodio događaj „x“. Događajem „x“ smatra se informacija dobivena sa senzora, a „y“ nam predstavlja vjerojatnost stanja elektroagregata, odnosno vjerojatnost određenog kvara koju treba saznati. Ta se vjerojatnost naziva uvjetna vjerojatnost p(y|x).

$$p(y \mid x) = \frac{p(x \wedge y)}{p(x)} \tag{4-1}$$

Ako su dva događaja nezavisna tada vrijedi

$$p(x \mid y) = p(x) \tag{4-2}$$

$$p(y \mid x) = p(y) \tag{4-3}$$

Prema definiciji, obrat, tj. vjerojatnost događaja x uz uvjet da se dogodio y je:

$$p(x \mid y) = \frac{p(y \wedge x)}{p(y)} \tag{4-4}$$

$$Iz(4-4) \Rightarrow p(y \wedge x) = p(x \mid y)p(y) \tag{4-5}$$

Zbog komutativnosti

$$p(x \wedge y) = p(x \mid y)p(y) \tag{4-6}$$

Uvrštavanjem (4-6) u (4-1) dobiva se najjednostavniji oblik Bayesovog pravila.

$$p(y \mid x) = \frac{p(x \mid y)p(y)}{p(x)} \tag{4-7}$$

$$\begin{aligned} &p(x) = p(x \wedge y) = p(x \wedge (y \vee \sim \mathrm{y})) = \\ &p((x \wedge y) \vee (x \wedge \sim y)) \end{aligned} \tag{4-8}$$

Iz definicije vjerojatnosti

$$(x \wedge y) \cap (x \wedge \sim y) = \Phi \tag{4-9}$$

$$p(x) = p(x \wedge y) + (x \wedge \sim y) \tag{4-10}$$

$$p(x \wedge y) = p(x \mid y)p(y) \tag{4-11}$$

$$p(x \wedge \sim y) = p(x \mid \sim y)\, p(\sim y) \tag{4-12}$$

$$p(x) = p(x \mid y)\, p(y) + p(x \mid \sim y)\, p(\sim y) \tag{4-13}$$

Raspisivanjem članova temeljem definicije uvjetne vjerojatnosti dobiva se Bayesovo pravilo [40]

$$p(y \mid x) = \frac{p(x \mid y)\, p(y)}{p(x \mid y)\, p(y) + p(x \mid \sim y)\, p(\sim y)} \tag{4-14}$$

Iz Bayesovog pravila slijedi Bayesova shema u produkcijskim sustavima:

AKO je X istina, tada je zaključak Y sa vjerojatnošću p.

Bayesovim pravilom može se zaključiti o vjerojatnosti X-a.

Interpretacijom ovoga pravila uz formulu (4-7):

• Y iz pravila označava jeden dokaz ili činjenicu (engl. evidence)→E

• X iz pravila označava pretpostavku ili hipotezu (engl. hypothesis) →H

$$p(H \mid E) = \frac{p(E \mid H)\, p(H)}{p(E)} \tag{4-15}$$

$$p(H \mid E) = \frac{p(E \mid H)\, p(H)}{p(E \mid H)\, p(H) + p(E \mid \sim H)\, p(\sim H)} \tag{4-16}$$

4.1.2. Bayesova mreža

Bayesova mreža predstavlja strukturu znanja i modelira odnos između mogućih kvarova, njihovih uzroka, informacija o agregatu i dijagnostičkih testova.

Detekcija kvara provodi se na sličnim principima koji su već razrađeni u primjeru iz područja medicine za dijagnosticiranje bolesti pacijenta [41]. Na slici 4.1. prikazana je Bayesova mreža pojednostavljenog expertnog sustava za detektiranje kvara na elektroagregatu u sklopljenom stanju a sačinjena je u programskom paketu GeNIe. Na istim principima zasniva se rad složenog expertnog sustava sa znatno većim brojem čvorova koji se razvija za detekciju kvara na vojnim elektroagregatima.

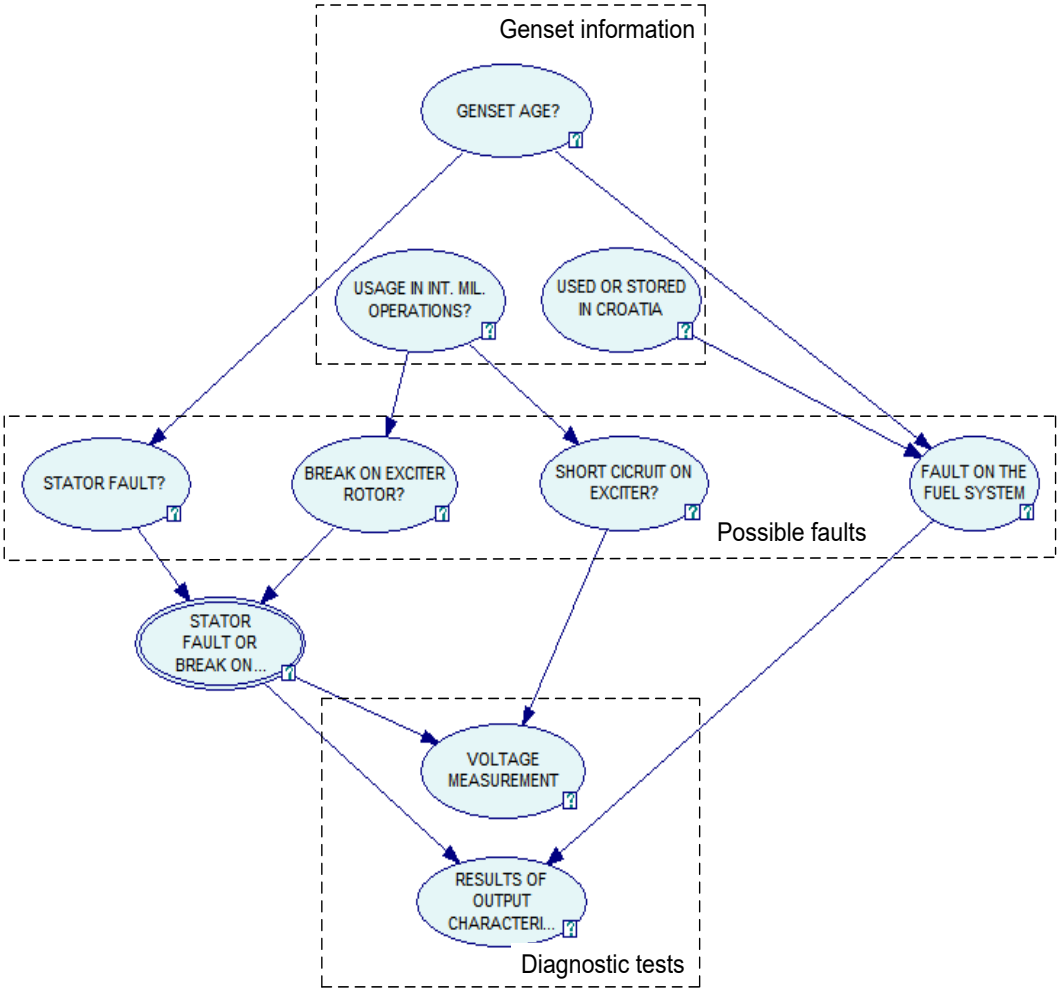
Znanje o odnosima između varijabli modelira se uzročnim vezama i lokalnim razdiobama uvjetnih vjerojatnosti. Propagacijski algoritam procesira informacije o odnosima varijabli što rezultira u bezuvjetnim ili marginalnim razdiobama vjerojatnosti svakog čvora.

Bezuvjetne ili marginalne vjerojatnosti čvora predstavljaju funkciju vjerovanja toga čvora.

Unošenjem evidencija o elektroagregatu kao što su starost i mjesto uporabe mijenjaju se vjerovanja u relevantno povezane čvorove. Informacija se propagira kroz mrežu i mijenja funkcije vjerovanja zavisnih čvorova.

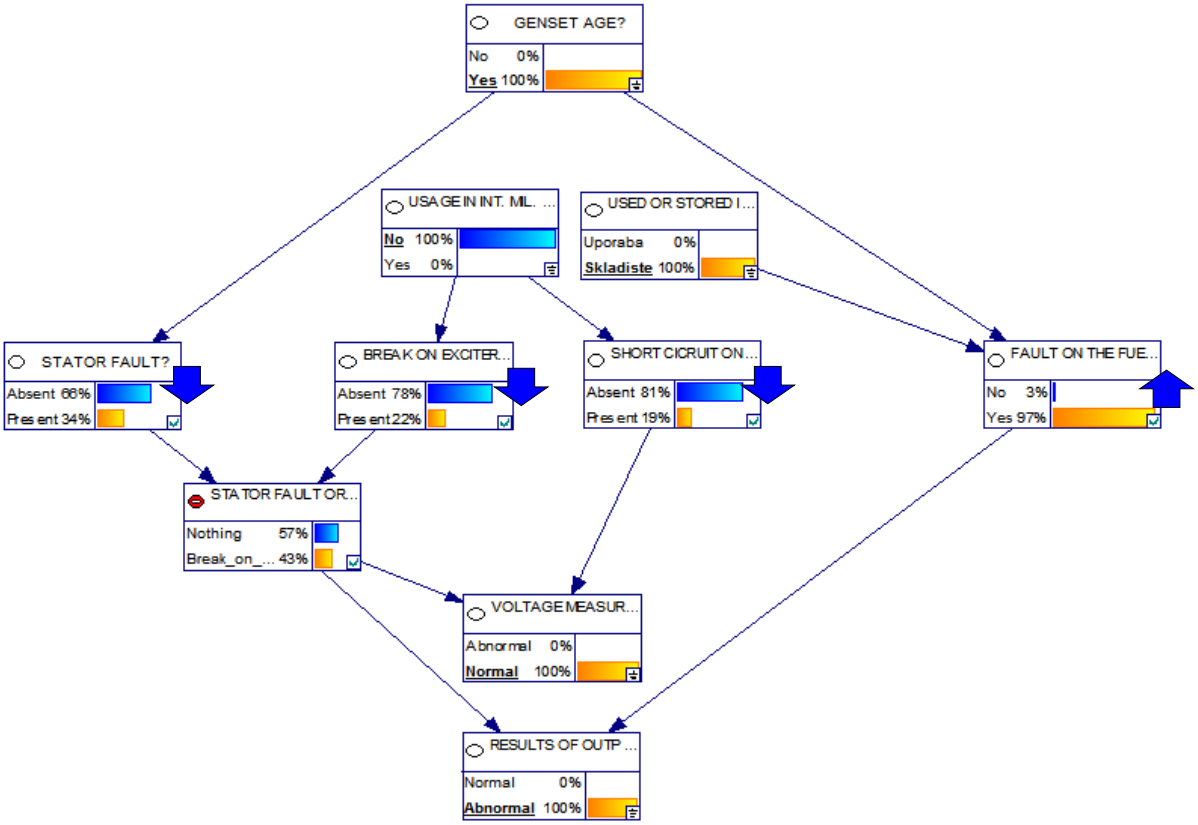
Nakon unošenja poznatih evidencija o sredstvu, slijede dijagnostička testiranja u sklopljenom stanju, kao što su provjera dinamičke karakteristike frekvencije i izlaznog napona generatora. U primjer mreže sa slike 4.1. u kojoj su prethodno definirane lokalne uvjetne vjerojatnosti uneseni su sljedeći podaci:

- sredstvo je staro (starije od 15 godina)
- sredstvo nije korišteno u međunarodnim vojnim operacijama
- sredstvo je bilo u skladištu strateške pričuve (prethodnih 5 godina)
- za vrijeme testiranja dinamička karakteristika frekvencije ne zadovoljava
- izlazni napon generator zadovoljava.



Slika 4.1. Bayesova mreža za detekciju kvara na elektroagregatu

Rezultati obrađenih podataka u programskom paketu GeNIe prikazani su na slici 4.2. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je za slučaj elektroagregata starijeg od 15 godina koji je čuvan u skladištu strateških pričuva najveća vjerojatnost kvara na sustavu za dovod goriva uz uvjet odstupanja dinamičke karakteristike frekvencije. Karakteristika frekvencije izravno je povezana s brzinom vrtnje sinkronog generator koja je simulirana za različite kvarove u programskom paketu Matlab Simulink i prikazana je na slikama u sljedećem poglavlju.



Slika 4.2. Određivanje vjerojatnosti kvara na temelju informacija i dijagnostičkih testiranja

Iz Bayesove mreže na slici 4.1. vidi se da su razmatrana 4 različita kvara:

- Kvar na statoru generator
- Prekid na uzbudnom sustavu generatora
- Kratki spoj na uzbudnom sustavu generator
- Kvar na sustavu za dovod goriva

Navedeni kvarovi ovisni su o informacijama o elektroagregatu koje su evidentirane u tehničkoj dokumentaciji:

- godina proizvodnje (starost)

- mjesto i način primjene (sredstvo skladišteno na skladištu strateških pričuva ili korišteno u međunarodnim vojnim operacijama ili u R. Hrvatskoj)

Osim evidentiranih informacija, vjerojatnost pojedinog kvara ovisi i o izlaznim karakteristikama elektroagregata kao što su:

- dinamička karakteristika frekvencije

- vrijednost izlaznog napona generatora.

Izlazne karakteristike provjeravaju se mjerenjem i uspoređuju se s karakteristikama koje su dobivene simulacijama kvarova u programskom paketu Matlab Simulink.

Za primjer sa slike 4.2. u koji su uneseni prethodno navedeni podaci dobivena je najveća vjerojatnost (97 %) kvara na sustavu za dovod goriva. To se i potvrdilo u primjerima iz prakse gdje je pri pokretanju elektroagregata koji su duže vrijeme stajali u skladištu došlo do kvara u dovodu goriva. Uglavnom su to začepljenja do kojih dolazi zbog korozije koja se stvara u rezervoarima, a koji su uglavnom metalni na starijim tipovima sredstava. Osim začepljenja, kod starijih elektroagregata u sustavu za dovod goriva pojavljuje se i zrak koji je uzrokovan dužim periodom ne korištenja sredstava i dotrajalošću gumenih cijevi i brtvi na dovodu goriva, što se također karakterizira kao kvar na sustavu za dovod goriva. Zbog navedenog kvara dolazi do poremećaja u dobavi goriva što izravno utječe na snagu pogonskog dizel motora [31]. Promjena snage pri nazivnom opterećenju dovodi do neravnomjernosti rada a to se pri dijagnosticiranju manifestira oscilacijama frekvencije izlaznog napona generatora.

4.1.3. Dijagnostička testiranja elektroagregata u svrhu detekcije kvara

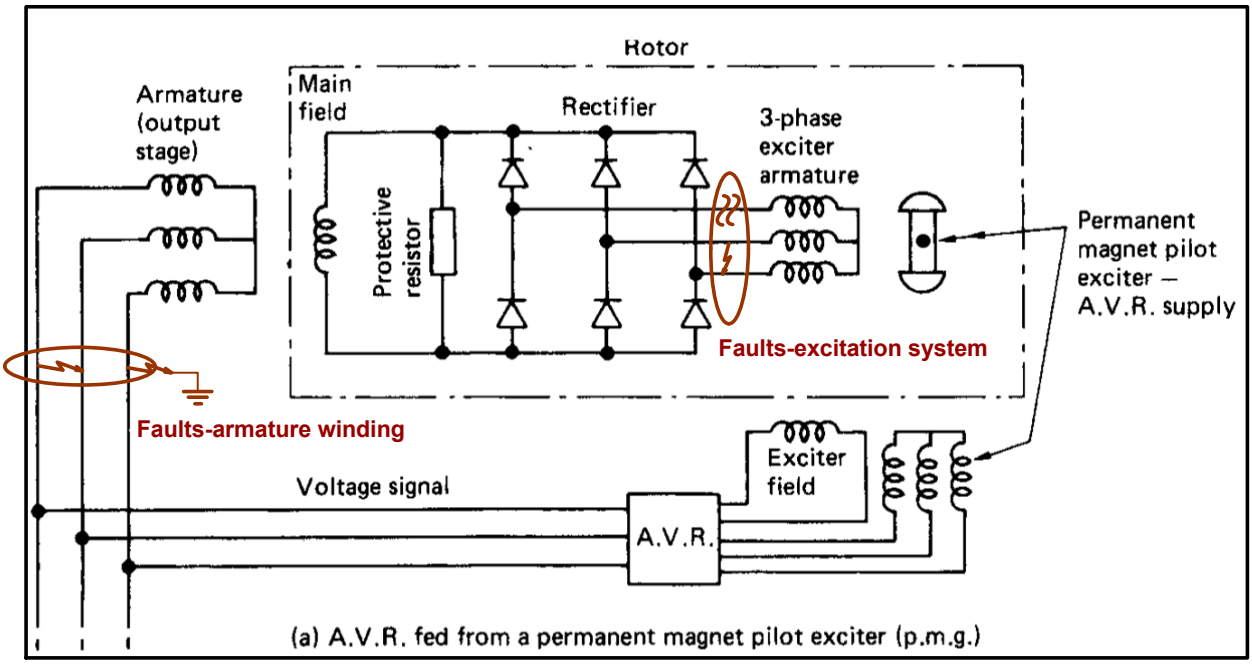
U remontnim centrima i tehničkim radionicama radnje se provode prema propisanom tehnološkom procesu, po kojem se najprije kompletira Zapisnik o prijemu sredstva na remont u kojem se uz ostale informacije o sredstvu navode i uočene neispravnosti od strane korisnika. Potom se obavlja priprema za popravak i dijagnostika u sklopljenom stanju što predstavlja složen postupak, pogotovo kod složenih sustava kao što su elektroagregati. Dosad ustaljena metoda je, ukoliko je moguće startati pogonski motor i dovesti generator u sinkronu brzinu, snimiti izlazne karakteristika elektroagregata. Ispitivanje se provodi prema Propisu o kvaliteti proizvoda (PKP), a ukoliko ne postoji, djelomično se provodi prema ISO 8528. Po PKP elektroagregat se najprije ispituje u praznom hodu a nakon toga pod teretom. Tehničke radionice opremljene su radnim

(otporničkim) teretom što zadovoljava propisana ispitivanja. Provedenim ispitivanjima moguće je detektirati jednostavnije kvarove u sklopljenom stanju. U današnje vrijeme postoje različiti programski alati pomoću kojih se mogu simulirati različiti kvarovi što je značajno za dijagnosticiranje složenijih kvarova.

Kako bi se dijagnosticiranje kvarova pojednostavilo, cilj je razviti Ekspertni sustav za čiji je rad potrebna što vjerodostojnija "baza znanja". Prethodno je navedeno da je do sada sačinjena "baza znanja" u kojoj su evidentirane vjerojatnosti pojave određenih kvarova. Za detektiranje kvara prema Bayesovoj mreži (slika 4.1.), nužno je imati i rezultate dijagnostičkih testiranja koji obuhvaćaju rezultate provedenih mjerenja i simulacija.

Stoga je u ovom radu razvijen i simulacijski model elektoragregata u programskom paketu Matlab Simulink na kojem je moguće simulirati kvarove agregata i u tom slučaju dobiti prikaz izlaznih karakteristika.

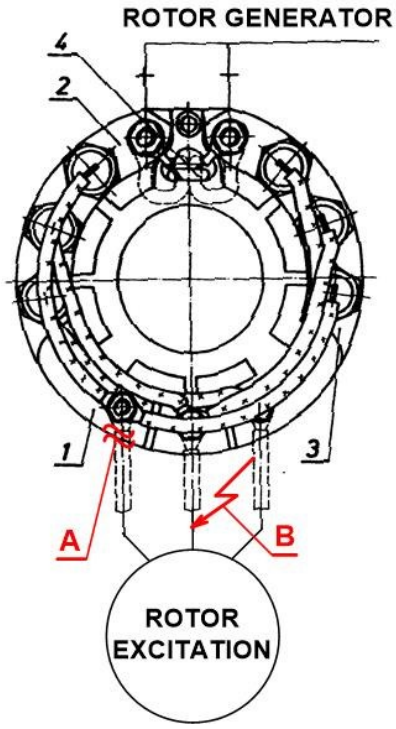
Elektroagregati su složena sredstva koja se sastoje od pogonskog motora s unutarnjim izgaranjem, sinkronog generator i automatiziranog sustava za upravljanje gdje je moguć širok spektar grešaka. Kako bi se pojednostavio prikaz rezultata simulacija i smanjio broj dijagnostičkih testiranja u ovome radu pristupilo se izučavanju grešaka na sinkronim generatorima. Dosad provedenim istraživanjima na generatorima vojnih elektroagregata utvrđeni su najčešći kvarovi na uzbudnom sustavu a potom na armaturnom namotu generatora (slika 4.3.). U provedenom istraživanju najzastupljeniji su bili prijevozni dizel elektroagregati sa sinkronim beskontaktnim generatorima čiji se sustav uzbude bazira na trofaznom sinkronom uzbudniku s cilindričnom armaturom na rotoru i izraženim polovima na statoru s koncentričnim uzbudnim namotom [42, 43, 44].



Slika 4.3. Shema sinkronog beskontaktnog generatora s razmatranim kvarovima

- Utvrđeni kvarovi na uzbudnom sustavu generatora

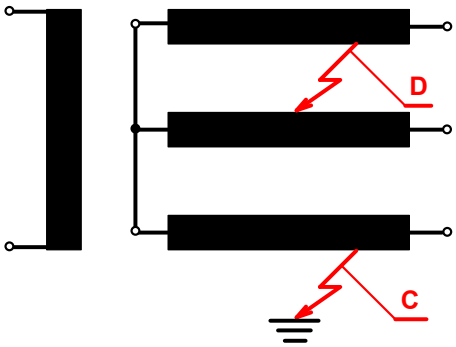
Na uzbudnom sustavu sinkronog beskontaktnog generatora najčešće se događa kvar na diodama ispravljača (prekidi i kratki spojevi dioda) koji su do sada već razrađeni. Osim ovog kvara na uzbudnom sustavu vojnih agregata uočeni su i kvarovi uzrokovani prekidom kontakata i kratkim spojevima između faza rotora uzbudnika [45]. Labav kontakt, odnosno prekidi pojavljuju se ispod vijčanog spoja koji povezuje vodič rotora uzbudnika i rotirajući ispravljač (pozicija A, na slici 4.4.). Kratki spoj pojavljuje se između dviju faza rotora uzbudnika (pozicija B, na slici 4.4.). Jedan od uzročnika nastalih kvarova su centrifugalne sile do kojih dolazi usljed vrtnje rotirajućeg sustava uzbudnika, koje pogotovo dolaze do izražaja na sredstvima koja se koriste u području međunarodnih vojnih operacija za napajanje trošila koja rade na frekvenciji 60 Hz. Osim centrifugalnih sila uzrok kvara na uzbudnom sustavu mogu biti i povećane struje uzbudnog namota koje ovise o vrsti priključenog tereta, a povećavaju se i pri smanjenju brzine vrtnje pri nazivnim opterećenjima. Smanjenje brzine vrtnje uočeno je pri uporabi kerozinskog goriva JP-8 (F-34) koje se također koristi za pogon dizel elektroagregata u međunarodnim vojnim operacijama [32].



Slika 4.4. Rotirajući ispravljač sinkronog beskontaktnog generatora (1-nosač dioda, 2-diodna "+" strana, 3- diodna "–" strana, 4- varistor)

- Utvrđeni kvarovi na armaturnom namotu generatora

Najveći broj utvrđenih kvarova na armaturnom namotu prethodno navedene konstrukcije generatora je bio spoj jedne faze s masom generatora (slučaj C na slici 4.5.), a potom kratki spoj između dviju faza generatora (slučaj D na slici 4.5.)

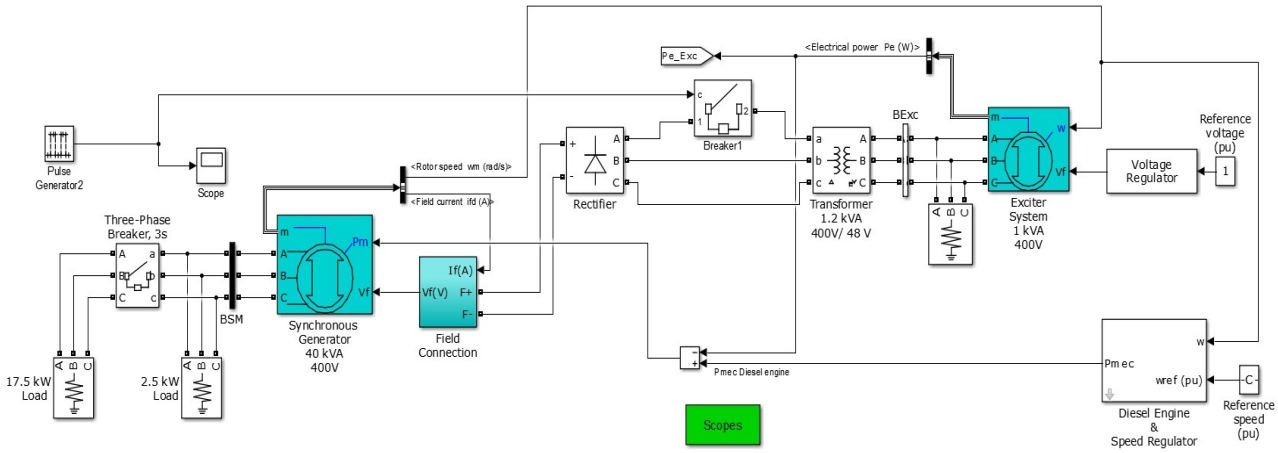


Slika 4.5. Kratki spoj armaturnog namota (C – kratki spoj između namota i mase, D – kratki spoj između dva armaturna namota)

Uglavnom su ti kvarovi detektirani na starijim elektroagregatima i vrlo rijetko se pojavljuju na novijim agregatima. To se povezuje sa starenjem izolacije namota što dovodi do smanjenja otpora izolacije i proboja na najkritičnijim mjestima.

4.1.4. Simulacija izlaznih karakteristika u slučaju kvara

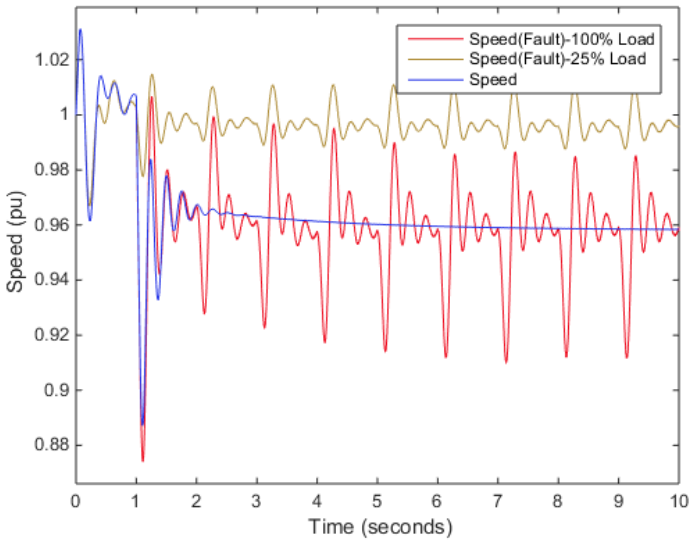
Poznavanje ponašanja sredstava, odnosno izlaznih karakteristika u slučaju kvara nužno je za donošenja pravilne odluke o nastalom kvaru. U tu svrhu razvijen je simulacijski model u programskom paketu Matlab Simulink prikazan na slici 4.6. (uvećana slika u prilogu C) i proveden niz simulacija od kojih je dio rezultata prikazan na slikama 4.7. do 4.12. Rezultati simulacije služit će za dopunjavanje „baze znanja“, odnosno kao dijagnostička testiranja potrebna za donošenje odluka u Bayesovoj mreži prikazanoj na slici 4.1.



Slika 4.6. Osnovni model za simulaciju kvarova generatora

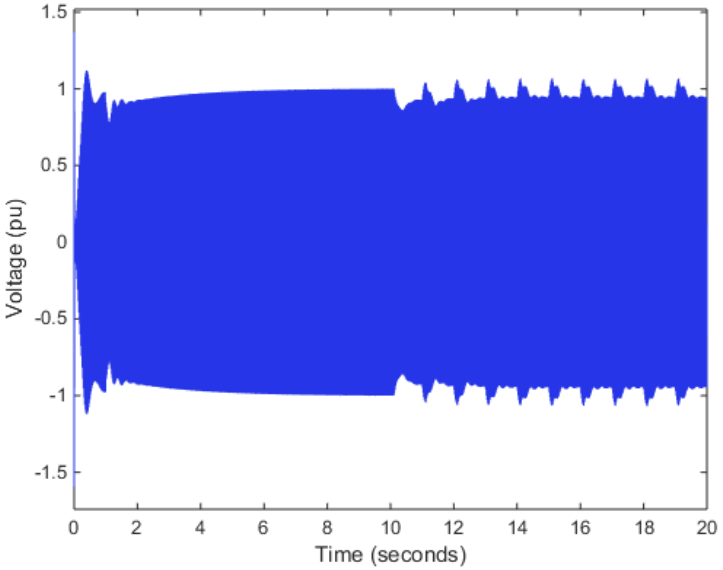
- Loš kontakt na rotirajućem ispravljaču

Na slici 4.7. plavom bojom je prikazana brzine vrtnje agregata koja je dobivena simulacijom a podudara se s realnim rezultatima koji se dobivaju mjerenjem prema Protokolu o kvaliteti proizvoda pod nazivnim opterećenjem. Crvenom i smeđom bojom prikazane su brzine vrtnje koje se dobiju simulacijom kvara, odnosno lošeg kontakta na rotirajućem ispravljaču. Crveno bojom prikazana je oscilacija brzine pri nazivnom opterećenju a smeđom pri 25% nazivnog opterećenja. Dobiveni rezultati ujedno i potvrđuju model ekspertnog sustava, odnosno „bazu znanja“ koja je dobivena anketiranjem djelatnika i raščlambom kvarova pri prijmu sredstava na remont. Dobiveni rezultati potvrđuju poveznicu Provjere statičke karakteristike frekvencije (brzine vrtnje) i lošeg kontakta na regulatoru napona [46], iako se brzina vrtnje regulira odvojenim regulatorom na pogonskom dizel motoru.



Slika 4.7. Brzine vrtnje generatora u ispravnom stanju i stanju kvara sa 100% i 25% opterećenja

Na slici 4.8. prikazan je rezultat simulacije napona generatora. Zbog jednostavnije predodžbe u prvih deset sekundi je simuliran rad u ispravnom stanju a nakon 10 sekundi nastupa kvar na rotirajućem ispravljaču (loš kontakt), te dolazi do oscilacija izlaznog napona.

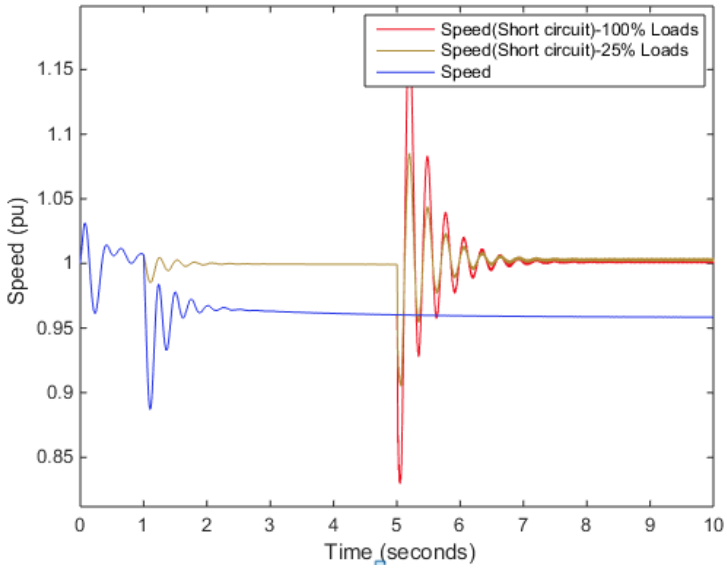


Slika 4.8. Izlazni napon generatora u dva različita stanja (ispravno stanje i stanje kvara)

- Kratki spoj između faza rotora uzbudnika

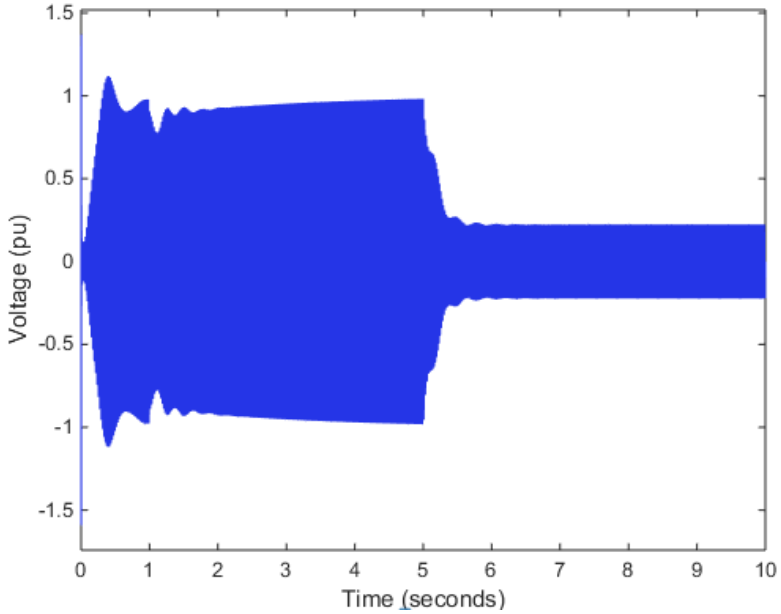
Na slici 4.9. prikazan je odnos brzine vrtnje u ispravnom stanju pod nazivnim opterećenjem (krivulja plave boje) i brzine vrtnje u slučaju kratkog spoja dviju faza rotora uzbudnika koji

nastupa u petoj sekundi simulacije, crvena linija s nazivnim opterećenjem, a smeđa s 25% nazivnog opterećenja.



Slika 4.9. Brzina vrtnje u ispravnom stanju i stanju kratkog spoja dviju faza uzbudnika

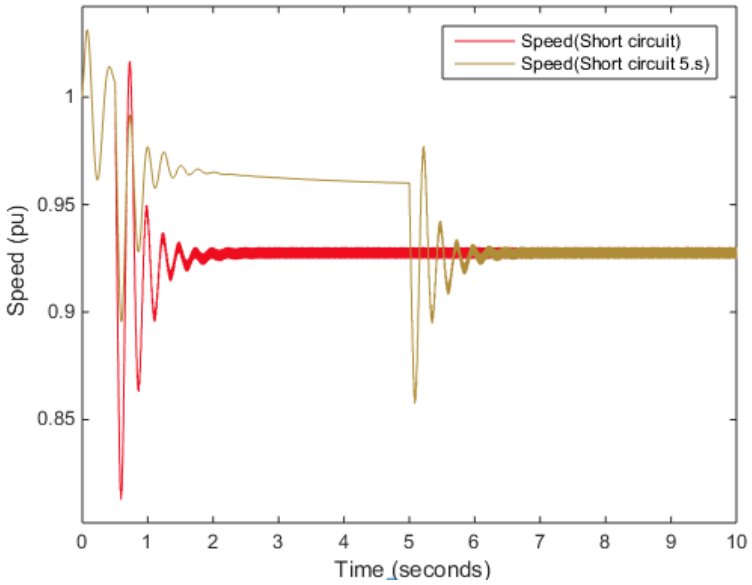
Na slici 4.10. prikazan je napon generatora na način da je u prvih 5 sekundi simuliran rad u ispravnom stanju a nakon toga simuliran je kratki spoj faza rotora uzbudnika, što uzrokuje očiti pad napona generatora.



Slika 4.10. Izlazni napon generatora pri nastanku kratkog spoja između faza rotora uzbudnika u petoj sekundi

➢ Kratki spoj između jedne faze armaturnog namota i mase generatora

Do kratkog spoja između faze i mase generatora dolazi zbog proboja izolacije namota generatora. Na slici 4.11. prikazana je simulacija brzine vrtnje agregata za dva slučaja. Prvi slučaj (krivulja crvene boje) prikazuje brzinu vrtnje u slučaju da je generator bio u kratkom spoju (proboj na masu) već prije početka testiranja. U drugom slučaju (krivulja smeđe boje) prikazuje brzinu vrtnje kad u petoj sekundi testiranja dođe do kratkog spoja (proboja na masu). To je slučaj koji se u stvarnosti može dogoditi, jer prijelazni otpor u stanju mirovanja i nezagrijanog sredstva može biti nešto veći, a pri ispitivanju, nastankom vibracija i povišenjem temperature dolazi do smanjenja prijelaznog otpora.

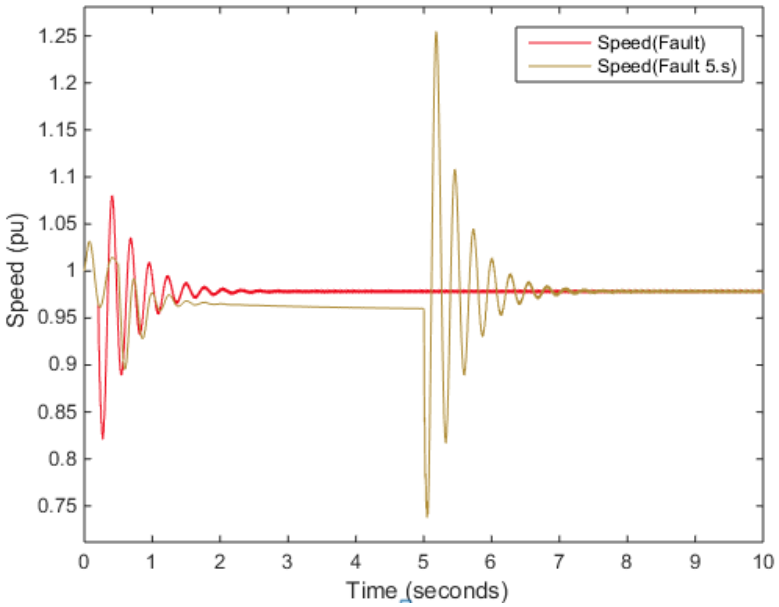


Slika 4.11. Brzina vrtnje generatora u slučaju kratkog spoja između jedne faze armaturnog namota i mase generatora

➢ Kratki spoj između dviju faza armaturnog namota

Na slici 4.12. prikazana je brzina vrtnje agregata u slučaju nastanka kratkog spoja između dvije faze generatora.

Kao u prethodnom primjeru, krivuljom crvene boje prikazana je brzina vrtnje agregata gdje je došlo do proboja prije početka testiranja a krivuljom smeđe boje prikazan je brzina vrtnje agregata gdje je do proboja došlo za vrijeme testiranja.



Slika 4.12. Brzine vrtnje generatora u slučajevima kratkog spoja između dvije faze armaturnog namota

5. MODELIRANJE SUSTAVA ZA ODABIR OPTIMALNIH TIPOVA ELEKTROAGRAGATA

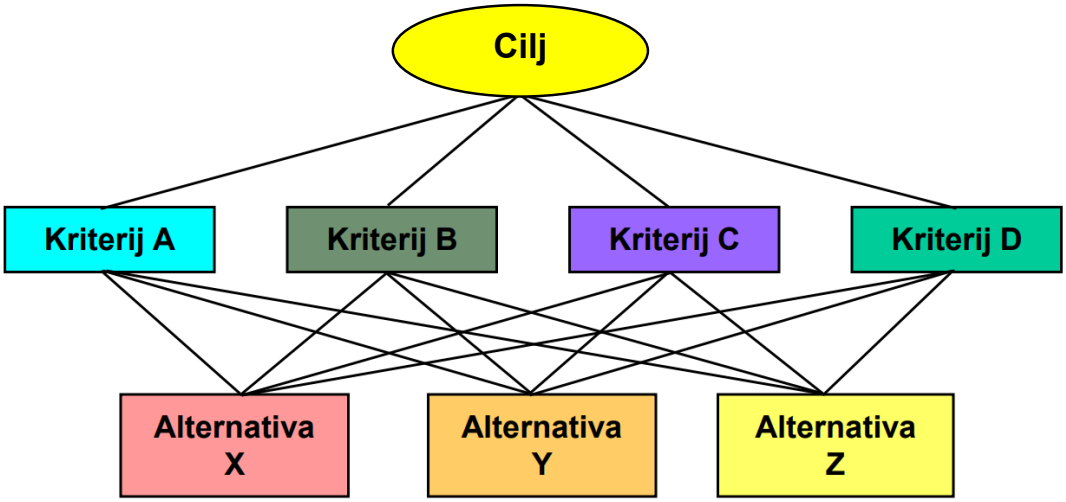
U svrhu optimiranja održavanja predlaže se smanjenje velikog broja različitih tipova elektroagregata. Donošenje ispravne odluke značajno pridonosi optimizaciji održavanja sredstava u složenim sustavima kao što su vojne organizacije. Pri tome, važnu ulogu ima pravilan odabir sredstava koja će se održavati i koristiti u različitim situacijama. I male uštede koje nastaju pravilnom primjenom i održavanjem pojedinog sredstava značajno pridonose ukupnim uštedama koje nastaju u cjelokupnom sustavu. Zbog toga se u velikim sustavima kontinuirano istražuju metode koje optimiranju primjenu sredstava.

U vojnim organizacijama uglavnom se primjenjuju sredstva koja su namjenski proizvedena za vojnu uporabu te se ubrajaju u sredstva s produženim životnim vijekom. Tako npr. životni vijek određenih tipova elektroagregata može biti 40 i više godina. Zbog dugog životnog vijeka i kontinuiranog zanavljanja sredstava, u vojnim organizacijama često se pojavljuje velik broj različitih tipova. Da bi se dao prioritet u korištenju, a time i održavanju određenih tipova elektroagregata potrebno je sagledati niz različitih kriterija i donijeti ispravne odluke. U slučaju donošenja krive odluke nastaje značajna štete, upravo zbog velikog broja sredstava. To naročito treba imati u vidu prilikom otpisa opreme. Da bi se izbjegle takve paušalne odluke pristupilo se modeliranju sustava za optimalan odabir elektroagregata, primjenom višekriterijske analize. Jedna od često primjenjivanih metoda je AHP metoda (Analitičko hijerarhijski proces) [47, 48, 49] koja je primijenjena i opisana u nastavku.

5.1. Analitičko hijerarhijski proces (AHP)

Analitičko hijerarhijski proces ili AHP metodu kreirao je poznati profesor Thomas L. Saaty sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća. Metoda se ubraja u jednu od najpoznatijih i najčešće primjenjivanih metoda za višekriterijsko odlučivanje. Popularnost joj proizlazi iz činjenice da je vrlo bliska načinu na koji pojedinac intuitivno rješava složene probleme, rastavljajući ih na jednostavnije.

Rješavanje složenih problema odlučivanja pomoću ove metode temelji se na njihovom rastavljanju na komponente. To su cilj, kriteriji i alternative. Oni se povezuju u hijerarhijsku strukturu (slika 5.1.).



Slika 5.1. Hijerarhijski model AHP metode

Primjena AHP metode može se objasniti kroz četiri koraka [50]:

1. Razvije se hijerarhijski model problema odlučivanja s ciljem na vrhu, kriterijima i podkriterijima na nižim razinama, te alternativama na dnu modela.

2. Na svakoj razini hijerarhijske strukture u parovima se međusobno uspoređuju elementi strukture, pri čemu se preferencije donositelja odluke izražavaju uz pomoć odgovarajuće ljestvice koja ima 5 stupnjeva i 4 međustupnja verbalno opisanih intenziteta i odgovarajuće numeričke vrijednosti u rasponu od 1-9 (tablica 5.1.). U tablici 5.1. prikazana je Saaty-eva skala za uspoređivanje relativnih važnosti elemenata AHP modela.

3. Iz procjena relativnih važnosti elemenata odgovarajuće razine hijerarhijske strukture problema pomoću matematičkog modela izračunavaju se lokalni prioriteti (težine) kriterija, podkriterija i alternativa, koji se zatim sintetiziraju u ukupne prioritete alternativa.

4. Provodi se analiza osjetljivosti.

Tablica 5.1. Saaty-eva skala relativne važnosti [51]

Intenzitet važnosti	Definicija	Objašnjenje
1	Jednako važno	Dvije aktivnosti jednako doprinose cilju.
3	Umjereno važnije	Na temelju iskustva i procjena, daje se umjerena, prednost jednoj aktivnosti u odnosu na drugu.
5	Strogo važnije	Na temelju iskustva i procjena, strogo se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu.
7	Vrlo stroga, dokazana važnost	Jedna aktivnost izrazito se favorizira u odnosu na drugu, njezina dominacija dokazuje se u praksi.
9	Ekstremna važnost	Dokazi na temelju kojih se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu, potvrđeni su s najvećom uvjerljivošću.
2, 4, 6, 8	Međuvrijednosti	
1,1 – 1,9	Decimalne vrijednosti	Pri usporedbi aktivnosti koje su po važnosti blizu jedna drugoj, potrebne su decimalne vrijednosti kako bi se preciznije izrazila razlika u njihovoj važnosti

Analitičko hijerarhijski proces se temelji na sljedećim aksiomima [52]:

1. Uvjet reciprociteta: Kada se uspoređuju dva elementa iz para, ako prvi dominira nad drugim intenzitetom *x* prema Saatyevoj skali, tada drugi element dominira nad prvim intenzitetom 1/x.
2. Homogenost: Usporedba ima smisla samo ako su elementi usporedivi. Kad se uspoređuju dva elementa po Saatyevoj skali, ona mora biti dovoljna da se na njoj napravi usporedba, odnosno napravi konzistentna tablica usporedbi.
3. Zavisnost: Uspoređivanje elemenata u parovima s jedne razine hijerarhije moguće je samo u odnosu na elemente više razine hijerarhije.

4. Očekivanje: Svaka promjena u strukturi hijerarhije zahtjeva ponovno računanje prioriteta u ovoj hijerarhiji.

Matematički modela AHP-a prikazan je u nastavku [53].

Neka je n broj kriterija (ili alternativa) čije težine (prioritete) w_i treba odrediti na temelju procjene vrijednosti njihovih omjera koji se označavaju s $a_{ij}= w_i/w_j$. Od omjera relativnih važnosti a_{ij} formira se matrica relativnih važnosti A:

$$A=\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Matrica A za slučaj konzistentnih procjena za koje vrijedi $a_{ij}= a_{ik} \times a_{kj}$ zadovoljava jednadžbu $Aw=nw$, gdje je w vektor prioriteta:

$$A=\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}=n\cdot\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$

Budući da matrica A ima posebna svojstva (svi njezini redovi proporcionalni su prvom redu, svi elementi su pozitivni i zadovoljavaju svojstvo reciprociteta $a_{ij}=1/a_{ji}$), rang matrice je 1 zbog čega je samo jedna njezina svojstvena vrijednost različita od 0 i jednaka je n (sve ostale svojstvene vrijednosti su jednake 0).

Ukoliko matrica A sadrži nekonzistentne procjene, vektor težina w može se dobiti rješavanjem jednadžbe:

$$(A - \lambda_{max}I)w=0 \text{ uz uvet} \qquad \Sigma\, w_i = 1$$

gdje je λ_{max} najveća svojstvena vrijednost matrice A. Zbog svojstava matrice A vrijedi $\lambda_{max} \geq n$, a razlika $\lambda_{max} - n$ koristi se u mjerenju konzistencije procjena. Uz pomoć indeksa konzistencije $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ izračunava se omjer konzistencije $CR=CI/RI$, gdje je RI slučajni indeks, odnosno indeks konzistencije za matrice reda n slučajno generiranih usporedbi u parovima (tablica 5.2.).

Tablica 5.2. Vrijednosti *RI* slučajnih indeksa [54]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

5.2. Izbor optimalnih elektroagregata prema ekonomskim kriterijima

Za izbor optimalnih elektroagregata razvijen je model koji se temelji na višekriterijskom odlučivanju. Za donošenje odluke primijenjena je AHP metoda.

Model je naročito pogodan za primjenu u složenim sustavima kao što su vojne organizacije gdje su evidentirani i pohranjeni dugogodišnji podaci o stanju sredstava. To značajno olakšava prikupljanje vrijednih informacija o stanju elektroagregata a čija brojnost i vjerodostojnost je osnova za ispravan rad modela. Svi potrebni podaci za ovaj model su evidentirani u postojećim bazama, tj. u tehničkim knjižicama, radnim nalozima i tehničkoj dokumentaciji. Tehničku knjižicu posjeduje svaki elektroagregata u kojoj su vidljivi osnovni podaci o sredstvu, kao npr. tip sredstva, godina proizvodnje, osnovni podaci o provedenim servisima s datumom i stanjem brojila te podaci o korisnicima. U tehničkoj knjižici navodi se i prosječna potrošnja goriva, kao i vrsta goriva i ulja koju koristi određeni tip elektroagregata.

Radni nalozi o kojima se govori su dokumenti koji se koriste u tehničkim radionicama. U njima se nalaze detaljni podaci o provedbi održavanja sredstva. Jedan među prvim dokumentima radnog naloga je zapisnik o prijemu sredstva na remont. U njemu su navedeni podaci o stanju sredstva pri prijemu na remont, s detaljnim saznanjima uočenim od strane korisnika. Nakon toga uglavnom se provodi pregled u sklopljenom stanju, a po potrebi provodi se rastavljanje elektroagregata na sklopove i elemente te se sačinjava defektacija elektroagregata. Prema sačinjenoj defektaciji izuzimaju se pričuvni dijelovi iz skladišta, a dijelovi kojih nema na skladištu naručuju se preko ugovorenih dobavljača. Nakon dostave dijelova provodi se sastavljanje i ispitivanje elektroagregata. Po provedenom ispitivanju sredstvo se predaje korisniku a svi koraci od prijema do predaje sredstava detaljno se evidentiraju kroz radni nalog.

Model je ciljano osmišljen tako da se što više potrebnih informacija može dobiti iz prethodno navedenih dokumenata, a informacije koje nisu navedene u dokumentima mogu se dobiti provedbom jednostavnijih ispitivanja koja se mogu provesti s postojećom opremom unutar vojne organizacije.

Za izbor optimalnih elektroagregata gdje se pojavljuje više kriterija korišten je programski paket Expert Choice. Navedeni paket često se koristi pri odabiru optimalnih rješenja [54, 55, 56].

Temeljem utvrđene problematike pri održavanju elektroagregata identificiran je cilj, kriteriji i alternative.

Za izbor optimalnih elektroagregata s ekonomskog gledišta uključeno je pet kriterija.

1. kriterij: Potrošnja goriva po dobivenom kWh električne energije pri nazivnom opterećenju

Kod vojnih elektroagregata za pogon generatora koriste se motori s unutarnjim izgaranje. Oni pretvaraju kemijsku energiju goriva u mehanički rad, koji se u generatorima pretvara u električnu energiju. Ekonomski gledano, prema ovom kriteriju, isplativiji za korištenje su elektroagregati koji predaju više električne energije uz jednaku količinu utrošenog goriva.
Model uzima u obzir istu vrstu goriva, znači da je cijena goriva jednaka. Iz tog razloga se razmatra odnos dobivene električne energije i utrošene količine goriva. U suprotnom bi se razmatrao odnos dobivene električne energije i cijena utrošenog goriva.
Ovaj kriterij uzima podatak o potrošnji goriva pri nazivom opterećenju elektroagregata. U tom slučaju određeni tip elektroagregata troši minimalnu količinu goriva po predanom kWh električne energije. Radi predodžbe, potrošnja goriva kod vojnih elektroagregata pogonjenih dizel motorima, pri nazivnim opterećenjima kreće se od 200 do 250 g/kWh [24, 27]. Smanjenjem opterećenja, odnosno smanjenjem izlazne snage generatora povećava se potrošnja goriva po kWh dobivene električne energije.

2. kriterij: Troškovi redovitog servisa, koji se promatraju za 1000 radnih sati pogonskog motora
Period između dva servisa propisan je od strane proizvođača, a u iznimnim slučajevima može se donijeti odluka od strane korisnika u kojoj se mijenja period provedbe. To se uglavnom rijetko događa, i ako se dogodi, prije donošenja odluke provode se detaljna istraživanja.
Kao što je navedeno, u ovom kriteriju razmatra se period od 1000 radnih sati.
Period redovitih servisa kod starijih tipova elektroagregata je uglavnom 100 radnih sat, a kod novijih tipova 200 i više radnih sati. Znači da će nekim tipovima u navedenom periodu trebati obaviti 10 servisa, a na nekima 5 i manje. Za servise koji se provode na većem broju radnih sati uglavnom se koriste kvalitetnija ulja čija je i cijena znatno viša. Osim ulja, i cijena ostalih dijelova koji se mijenjaju, filtri i slično je uglavnom viša. Pod troškovima se podrazumijeva zbroj troškova materijala, dijelova i troškova rada. Cijena zamijenjenih dijelova i utrošenog materijala, kao i cijena sata rada mogu se relativno jednostavno i točno odrediti.

3. kriterij: Troškovi korektivnog održavanja u periodu od 2000 radnih sati.

Različiti tipovi elektroagregata imaju i različit stupanj pouzdanosti [57], odnosno različita su im svojstva pojavljivanja kvarova. Neki tipovi elektroagregata češće će se kvariti i nastajat će potreba za korektivnim održavanjem, a neki rjeđe. Sama učestalost kvara ne mora biti presudna, jer je bitna i težina kvara, odnosno troškovi koji nastaju pri korektivnom održavanju. Troškovi korektivnog održavanja također podrazumijevaju zbroj troškova materijala i troškova rada. U ovom slučaju ne obračunavaju se troškovi koji nastaju zbog zastoja sredstva.

4. kriterij: Troškovi skladištenja koji uključuju troškove konzervacije i dekonzervacije sredstva. Ovim troškovima pridodani su i troškovi koji nastaju ponovnim puštanjem sredstva u rad. Sredstva koja nisu u uporabi čuvaju se u skladištima strateških pričuva. Na elektroagregatima koji su izvan uporabe duže od tri mjeseca provodi se konzervacija. Konzervacija može biti kratkoročna ili dugoročna. Kratkoročna konzervacija provodi se na elektroagregatima koji se čuvaju od 3 do 12 mjeseci, a dugoročna na agregatima koji se čuvaju od 1 do 3 godine. Postupak konzervacije i dekonzervacije točno je propisan, a provode ga rukovatelj, mehaničar i električar. Kod nekih vrsta agregata postupak upuštanja agregata u rad nakon dugoročne konzervacije je zahtjevan i iziskuje značajan utrošak vremena djelatnika koji provode dekonzervaciju i upuštanje u rad.

5. kriterij: Troškovi opsluživanja, nastaju tijekom eksploatacije sredstava. U praksi i literaturi poznati su kao troškovi temeljnog održavanja.

Opsluživanje se dijeli na [12]:

- čišćenje, pranje i dopuna gorivom, mazivom i radnim medijima
- dnevni pregledi (pregled prije uporabe, pregled tijekom uporabe, pregled nakon uporabe)
- tjedni pregledi.

Kod elektroagregata troškovi opsluživanja mogu se značajno razlikovati. Stariji tipovi elektroagregata moraju biti pod trajnim nadzorom rukovatelja jer nemaju ugrađen sustav za nadzor i zaštitu. To značajno povećava troškove opsluživanja. Noviji tipovi elektroagregata, koji imaju ugrađen sustav za zaštitu i upravljanje ne moraju biti pod nadzorom rukovatelje, čime se troškovi opsluživanja smanjuju.

Kao moguće alternative razmatralo se 6 različitih tipova elektroagregata. Budući da za sredstva koja se koriste u Oružanim snagama nije uobičajeno detaljno iznošenje podataka, elektroagregati su označeni kao:

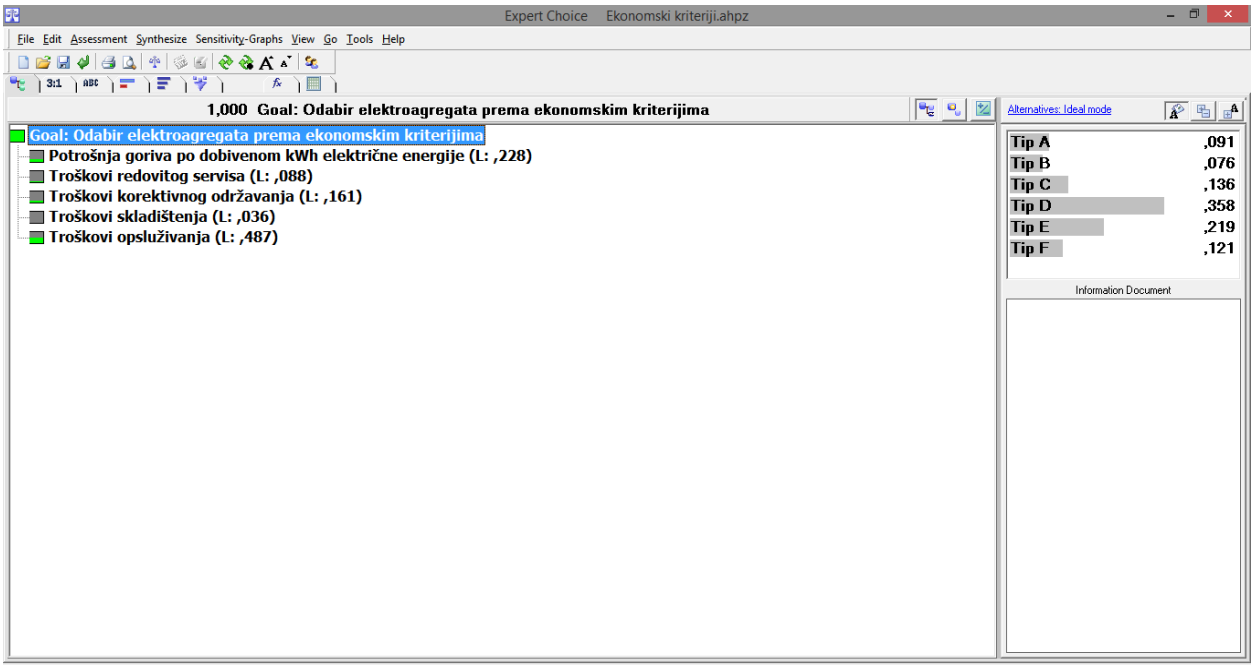
Tip A: Proizveden na području bivše SFRJ.
Tip B: Proizveden u Njemačkoj Demokratskoj Republici
Tip C: Proizveden na području bivše SFRJ
Tip D: Proizveden u Republici Hrvatskoj
Tip E: Proizveden u Velikoj Britaniji
Tip F: Proizveden u Republici Hrvatskoj

Za prikaz predloženog modela nisu bitne detaljne karakteristike, bitna je procedura i princip rada modela, kako bi se isti mogao primijeniti i na ostale tipove elektroagregata. Osim elektroagregata, uz manje dopune moglo bi se primijeniti i na ostala sredstva koja se primjenjuju u složenim sustavima.

Za donošenje odluke o optimalnim tipovima elektroagregata primijenjen je programski paket Expert Choice. Odluka se donosi temeljem prethodno navedenih i opisanih kriterija, a podaci o alternativama, odnosno svakom tipu elektroagregata vidljivi su u tehničkoj dokumentaciji sredstava koja obuhvaća tehničku knjižicu, tehničke upute i radne naloge o održavanju sredstava. Nedostajući podaci dobiju se provedbom ispitivanja, od kojih je dio opisan u 3. poglavlju.

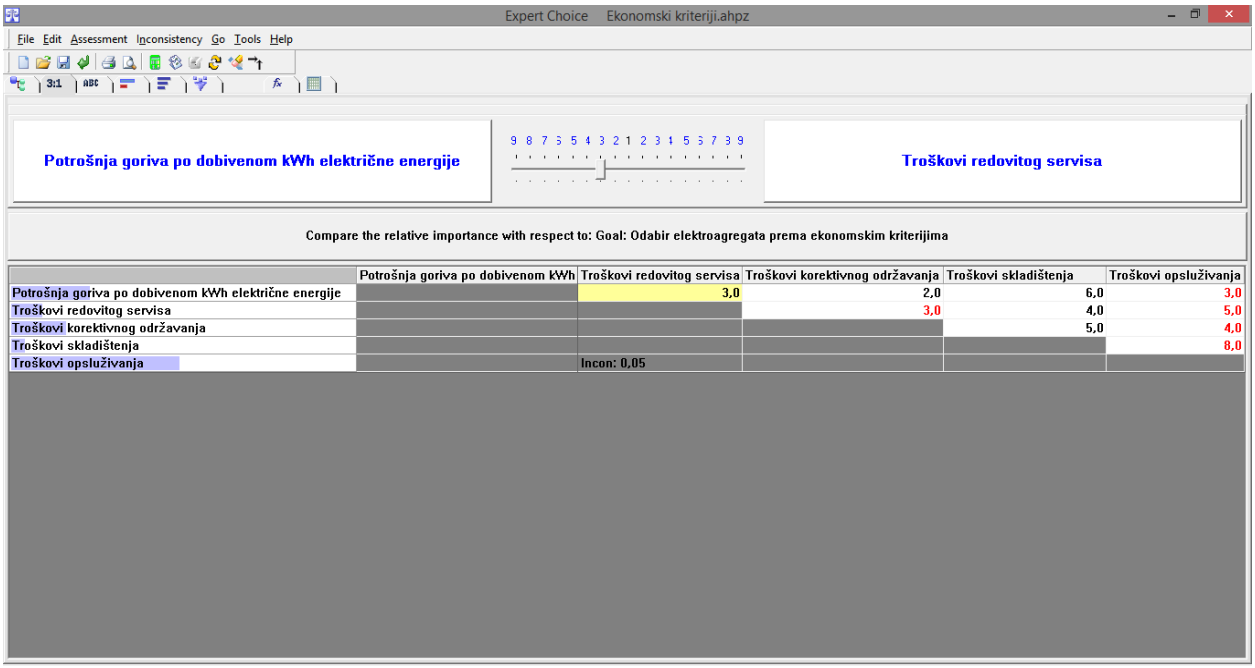
Princip rada modela i rezultati obrade podataka prikazani su preko slika iz programskog paketa Expert Choice.

Na slici 5.2. prikazan je odabir elektroagregata prama ekonomskim kriterijima. Navedeni su kriteriji prema kojima je proveden odabir i ponuđene alternative između 6 različitih tipova elektroagregata, *Tip A,……Tip F*.



Slika 5.2. Struktura odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima u Model View prozoru Expert Choice programa

Za prethodno definirane i obrazložene kriterije potrebno je odrediti omjere važnosti i unijeti ih u programski paket. Svi kriteriji se međusobno uspoređuju u parovima, na način da se definira koliko puta je jedan kriterij važniji od drugog kriterija. Kriteriji se uspoređuju poznatom Saatyevom skalom. Iz slike 5.3. vidljiv je odnos važnosti kriterija, tj. odnos važnosti Potrošnje goriva po dobivenom kWh električne energije pri nazivnom opterećenju i Troškova redovitog servisa, ostali odnosi prikazani su u Prilogu D (slike D1 do D9). Iz slike se može očitati da se kriterij potrošnje goriva smatra umjereno važnijim od kriterija troškova redovitog servisa. To je i logično, jer su troškovi potrošnje goriva elektroagregata u složenim sustavima značajniji, odnosno veći od troškova redovitog servisa.



Slika 5.3. Uspoređivanje važnosti kriterija za odabir elektroagregata prema ekonomskim kriterijima

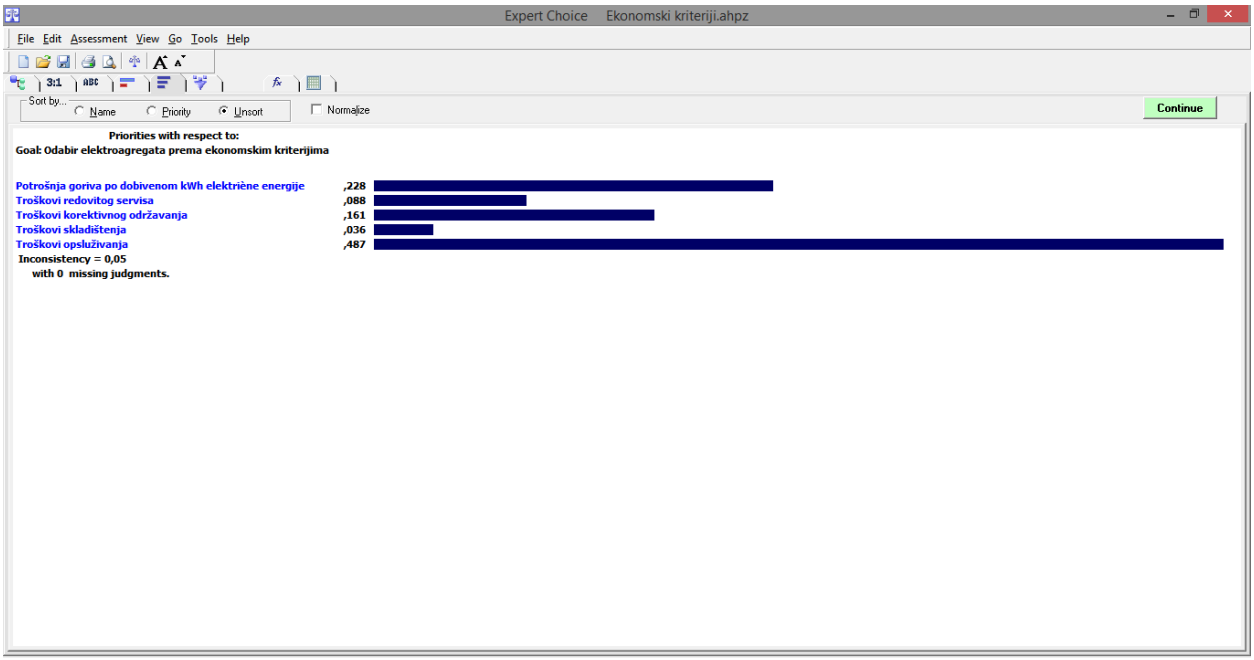
Vidi se i da su troškovi potrošnje goriva značajniji i od troškova korektivnog održavanj i od troškova skladištenje.

Jedino su troškovi opsluživanja umjereno važniji od troškova potrošnje goriva, što je navedeno u tablici prethodne slike brojem 3 u crvenoj boji, a predstavlja inverziju u matrici. Razumljivo je da su troškovi opsluživanja značajniji od troškova potrošnje goriva, i to naročito dolazi do izražaja u međunarodnim vojnim operacijama, na tipovima elektroagregata koji imaju manju potrošnju goriva i uglavnom starijim sredstvima koja nisu opremljena sustavom za zaštitu i upravljanje.

Da su omjeri važnosti kriterija dobro određeni ukazuje i mala nekonzistentnost, 5% (Incon:0.05). Ako je konzistentnost ispod 10% omjeri su dobro određeni.

Na slici 5.4 prikazane su važnosti kriterija izračunate u programskom paketu Expert Choice.

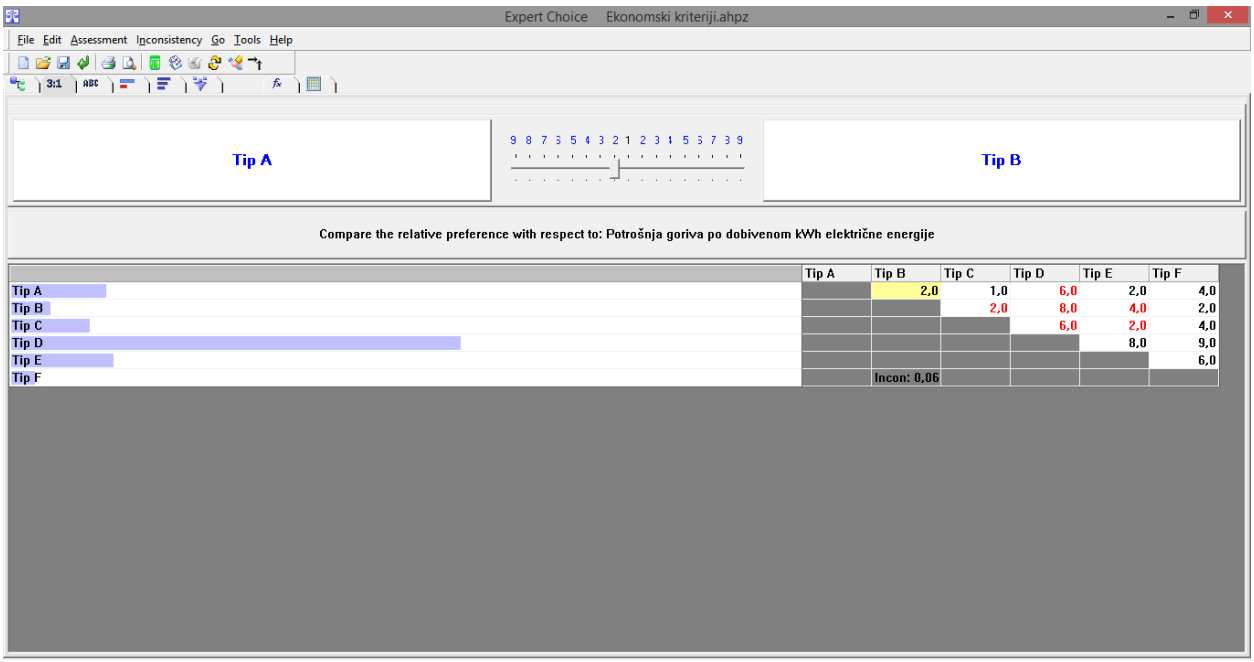
Najveću težinu imaju troškovi opsluživanja, a najmanju troškovi skladištenja.



Slika 5.4. Izračunate važnosti kriterija iz procijenjenih omjera za odabir prema ekonomskim kriterijima

Nakon obrade važnosti kriterija u parovima se procjenjuju omjeri prioriteta alternativa, odnosno tipovi elektroagregata.

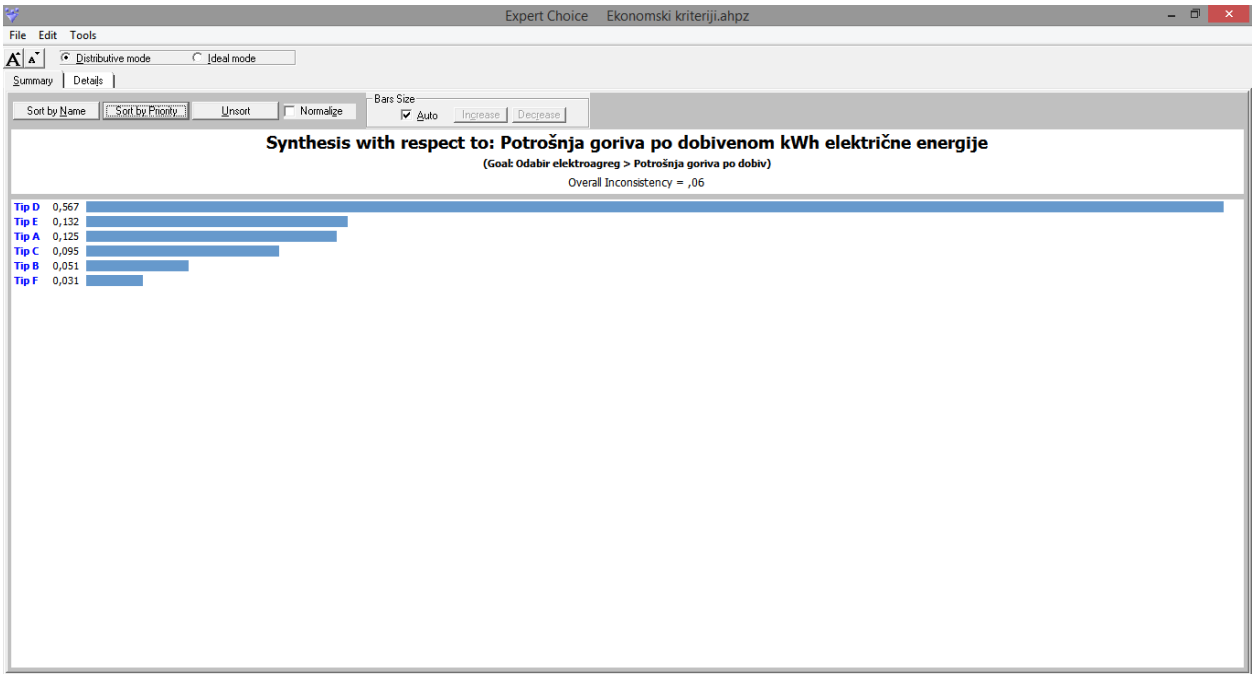
Na sljedećoj slici je vidljiva usporedba različitih tipova elektroagregata prema prvom navedenom kriteriju, odnosno prema potrošnji goriva po dobivenom kWh električne energije. Iz tablice sa slike u kojoj su navedene brojčane vrijednosti može se zaključiti o procijenjenim odnosima.



Slika 5.5. Usporedba različitih tipova elektroagregata prema kriteriju potrošnje goriva po dobivenom kWh električne energije

Na slici 5.6. po redosljedu su prikazani optimalni tipovi elektroagregata po potrošnji goriva po dobivenom kWh električne energije. Iz dobivenih rezultata prikazanih na slici vidljivo je da je *Tip D* najoptimalniji po pitanju potrošnje goriva. To je i za očekivati, budući da se radi o specifičnom elektroagregatu kod kojega je snaga pogonskog dizel motora manja od deklarirane snage generatora. Kod većine elektroagregata snaga pogonskog motora veća je od snage generatora. To nije nužan uvjet, bitno je da je deklarirana snaga elektroagregata uvijek manja od deklarirane snage pogonskog motora i deklarirane snage generatora.

U ovakvom slučaju deklarirana snaga elektroagregata malo je manja od deklarirane sage pogonskog motora. Zbog toga se može reći da je pogonski motor pri nazivnoj snazi elektroagregata gotovo maksimalno opterećen. Pri tome predaje maksimalnu snagu i potrošnja mu je minimalna ako gledamo kao odnos potrošnje po kWh predane energije. Ukoliko je snaga pogonskog motora značajno veće od deklarirane snage elektroagregata potrošnja mu se povećava. Osim navedenog, može se reći da se u ovom slučaju radi i o pogonskom dizel motoru koji je općenito nešto štedljiviji u odnosu na druge tipove motora koji su ugrađivani na vojne elektroagregate.



Slika 5.6. Prioriteti najoptimalnijih tipova elektroagregata prema potrošnji goriva

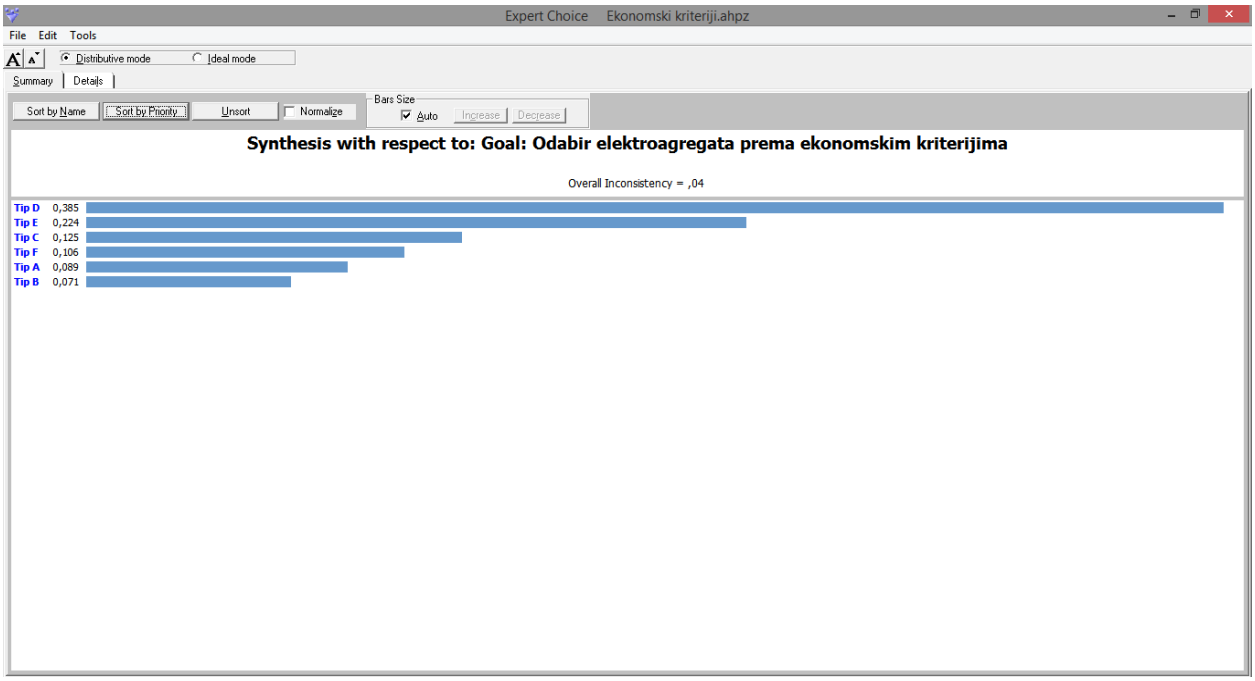
Na istom principu kao što je prethodno prikazano provedena je usporedba elektroagregata, *Tip A,.....,Tip F* prema ostalim ekonomskim kriterijima. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama u prilogu B.

Nakon provedene analize Odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima dobiveni su rezultati prikazani na slici 5.7. Iz dobivenih rezultat se vidi da je *Tip D* najoptimalniji prema ekonomskim kriterijima.

Najlošije karakteristike prema ekonomskim kriterijima ima *Tip B*.

Dobru strukturiranost modela potvrđuje inkonzistentnost od 0.04, odnosno 4%.

Provedba analize osjetljivosti [58,59] u programu Expert Choice prikazana je u Prilogu D na slika D10 do D14.



Slika 5.7. Rezultati odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima

Pomoću programskog paketa Exper Choice može se provesti i analiza osjetljivosti kako bi se vidjelo u kojoj mjeri promjena ulaznih podataka utječe na ukupne prioritete alternativa. Postoji pet različitih vrsta osjetljivosti. Grafički prikaz svih pet vrsta provedbe osjetljivosti u slučaju odabira prema ekonomskim kriterijima prikazan je na slikama u Prilogu D.

5.3. Izbor optimalnih elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti

Za odabir elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti razmatrano je 7 kriterija.

Model je također razrađen u programskom paketu Exper Choice, a cilj, kriteriji i alternative vidljivi su na slici 5.8. Razmatrani su isti tipovi elektroagregata kao u prethodnom slučaju, *Tip*

A,.....,Tip F ali prema drugim kriterijima. Kriteriji prema kojima su razmatrani navedeni su u nastavku.

1. kriterij: Količina elektroagregata - misli se na broj elektroagregata istog tipa u nekom složenom sustavu. Kao što je prethodno navedeno, u složenim sustavima kao što su vojne organizacije primjenjuju se različiti tipovi elektroagregata. U ovom slučaju razmatramo 6 tipova elektroagregata. Od razmatranih tipova najveći je broj Tipa C, a najmanji broj Tipa A. Što se tiče pogodnosti održavanja, interes je imati što manji broj različitih tipova elektroagregata.

2. kriterij: Postotak ispravnih elektroagregata – od ukupnog broja razmatranih elektroagregata određeni dio je neispravnih i čeka prijem na popravak. Pod ovim kriterijem razmatra se postotak ispravnih elektroagregata. Kod nekih tipova je veći postotak ispravnih, što ne znači da je i ukupan broj ispravnih elektroagregata toga tipa veći. Budući da se brojčani iznos elektroagregata razmatra u prvom kriteriju, u ovom kriteriju je potrebno razmotriti postotak ispravnih elektroagregata određenog tipa.

3. kriterij: Stupanj zadovoljenja kriterija ISO standarda i PKP-a

U trećem poglavlju gdje se govorilo o određivanju svojstvenih pokazatelja elektroagregata detaljno su opisani kriteriji ISO standarda 8528. Pri tome se vidi da se elektroagregati svrstavaju u 4 grupe, G1, G2, G3, G4. G1 je grupa s najnižim kriterijima, a G4 je grupa u kojoj su postavljeni najviši kriteriji. Budući da vojni elektroagregati trebaju biti raspoloživi i za primjenu u međunarodnim vojnim operacijama, nužno je poznavanje njihovih mogućnosti i definiranje kojoj grupi ISO standarda pripadaju. Često služe za napajanje visoko sofisticirane opreme pa je poželjno da zadovoljavaju što više kriterije. Osim ISO standarda vojni elektroagregati trebaju zadovoljavati i Propise o kvaliteti proizvoda.

Pod ovim kriterijem se daje procjena o stupnju zadovoljenja kriterija ISO standarda i PKP-a, odnosno veća težina se daje tipu elektroagregata koji zadovoljava više kriterije ISO standarda i koji zadovoljava veći broj stavaka Propisa o kvaliteti proizvoda. Što je taj broj veći, to je i raspoloživost sredstva veća. Može se koristiti u težim uvjetima i pri tome davati maksimalnu kvalitetu električne energije i zadržati maksimalan stupanj pouzdanosti.

4. kriterij: Zadržavanje svojstvenih parametara pri uporabi F-34

Pod ovim kriterijem razmatra se koji tipovi elektroagregata za svoj pogon mogu koristiti kerozinsko gorivo F-34 a da pri tome zadrže što sličnije izlazne karakteristike generatora i kod kojih tipova elektroagregata neće doći do značajnijeg smanjenje pouzdanosti. Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima kod nekih tipova elektroagregata može doći do smanjenja

kvalitete električne energije ukoliko se koriste kerozinsko gorivo. Razlog tome su drugačija svojstva kerozinskog goriva u odnosu na dizel gorivo. Zbog toga dolazi do manje snage pogonskog motora što pri nazivnim opterećenjima generatora može utjecati na smanjenje brzine vrtnje, a time izravno i na smanjenje izlazne frekvencije generatora. Osim smanjenja frekvencije može doći i do povećanih propada napona pri udarnim opterećenjima generatora. Ovisno o vrsti sustava za dovod i ubrizgavanje goriva, kod nekih tipova elektroagregata moguće je i smanjenje pouzdanosti pri dužoj uporabi kerozinskog goriva F-34. Uzimajući u obzir sve navedeno pod razmatranjem ovog kriterija, tipovima elektroagregata koji mogu koristiti kerozinsko gorivo, a da pri tome ne dolazi do značajnijih promjena daje se veća težina u ovome modelu, a elektroagregatima kod kojih nastaju značajnije promjene daje se manja težina. Elektroagregati kod kojih su male promjene, mogu koristiti kerozinsko gorivo i biti raspoloživi za primjenu u međunarodnim vojnim operacijama gdje se zahtjeva mogućnost uporabe kerozinskog goriva za pogon dizel motora.

5. kriterij: Odnos „rad-kvar“

Pod ovim kriterijem razmatra se odnos vremena stvarnog rada [2] i vremena kvara (zastoja). Kod nekih tipova elektroagregata kvarovi se pojavljuju rjeđe a kod nekih češće. Osim učestalosti pojave kvara, ovim kriterijem je obuhvaćeno i ukupno vrijeme u kojem je elektroagregat u kvaru. Kod nekih tipova elektroagregata kvarovi se mogu rjeđe pojavljivati ali proces dovođenja u ispravno stanje može biti duži. Na primjer ako je vrijeme detekcije kvara veće, ili otežana nabava pričuvnih dijelova. Znači ovaj kriterij obuhvaća odnos vremena ukupnog stvarnog rada i ukupnog vremena zastoja koje uključuje zbroj vremena svih zastoja.

U vojnim organizacijama lako je prikupiti podatke o vremenima rada i zastoja, jer se svi zahvati na tehničkim sredstvima evidentiraju u tehničku dokumentaciju.

6. kriterij: Mogućnost nabave pričuvnih dijelova

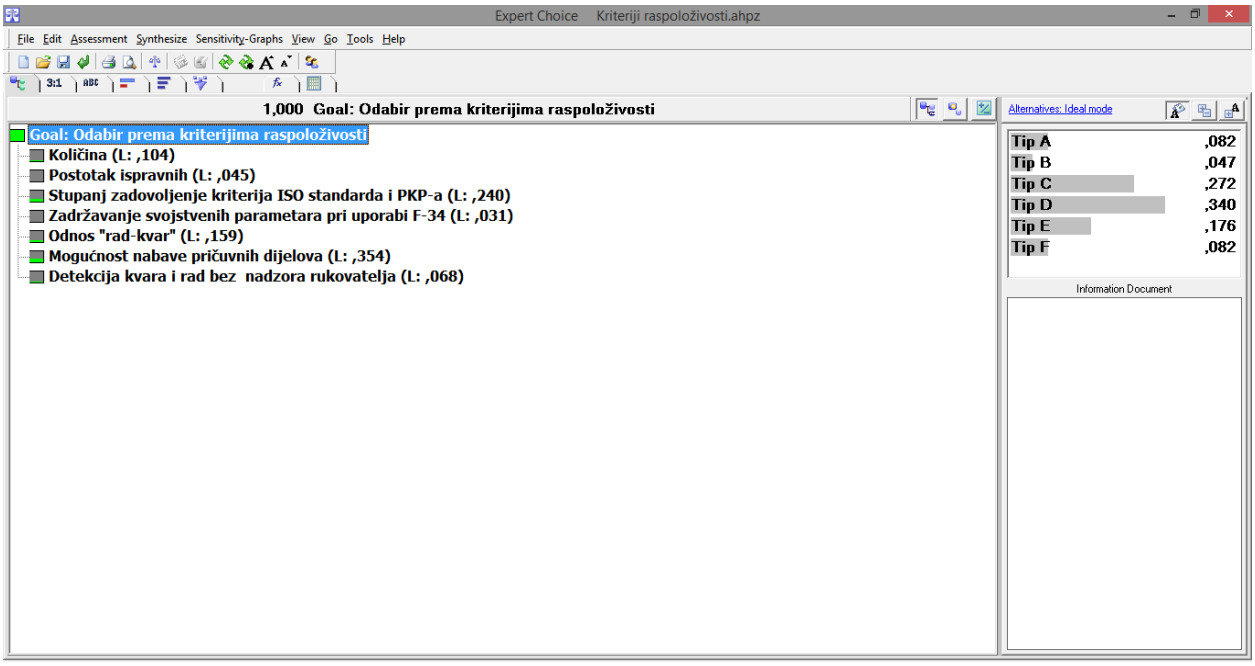
Pod ovim kriterijem procjenjuje se mogućnost nabave pričuvnih dijelova. Za neke tipove nabava pričuvnih dijelova je jednostavna i brza. Prvi uvjet za jednostavnu nabavu je postojanost kompletne tehničke dokumentacije s katalogom pričuvnih dijelova. Nadalje, pokazalo se da je jednostavna nabava dijelova za elektroagregata proizvedene u Republici Hrvatskoj. Jednostavnost nabave značajno ovisi i o univerzalnosti sklopova. Na primjer neki pogonski motori, ili njihovi sastavni dijelovi koriste se i na drugim radnim strojevima ili teretnim vozilima. To također značajno olakšava nabavu pričuvnih dijelova.

Najteža je nabava pričuvnih dijelova uglavnom za starije tipove elektroagregata i za koje ne postoji tehnička dokumentacija.

7. kriterij: Detekcija kvara i rad bez nadzora rukovatelja

Ovim kriterijem procjenjuje se jednostavnost detekcije kvara i mogućnost rada bez trajnog nadzora rukovatelja. Za optimiranje održavanja je interes da je vrijeme detekcije kvara što kraće, odnosno da postoje sustavi i oprema za detekciju kvara u sklopljenom stanju. Kod nekih novijih tipova elektroagregata postoje sustavi za ispis greške ili koda greške na temelju kojeg se može detektirati kvar. Stariji tipovi elektroagregata uglavnom nemaju sustav za ispis kvara, opremljeni su s većim ili manjim brojem senzora čija informacija može poslužiti za detekciju kvara. Najstariji tipovi elektroagregata uglavnom imaju mali broj senzora i nemaju sustav za zaštitu i upravljanje. Zbog toga je nužno da su pod trajnim nadzorom rukovatelja, što iziskuje značajne troškove. Kod nekih tipova elektroagregata detekcija nekih kvarova moguća je u sklopljenom stanju, a kod nekih zahtijeva određeni stupanj rasklapanja. Na primjer, kod elektroagregata sa statičkom uzbudom moguće je jednostavno utvrditi kvar na uzbudnom sustavu, dovođenjem vanjske uzbude, dok je to teže kod elektroagregata s rotirajućim ispravljačima [60].

Svi navedeni elementi uzimaju se u obzir pri procjeni težine kriterija.

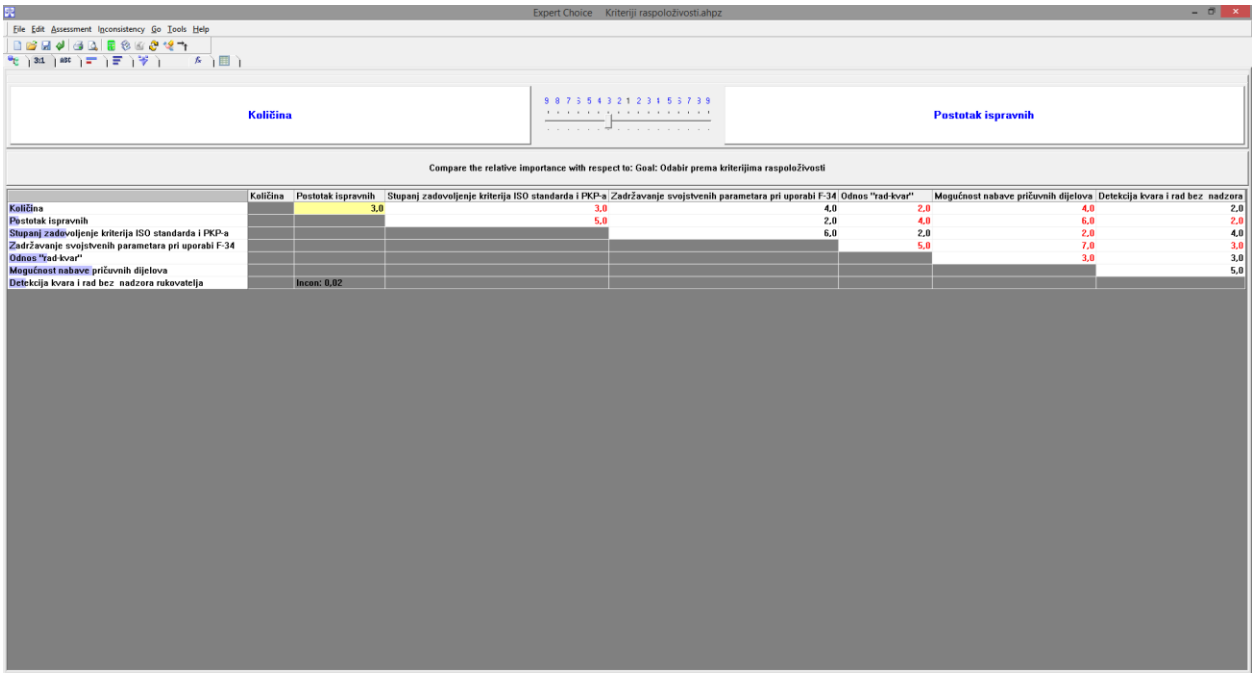


Slika 5.8. Struktura odabira elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti u Model View prozoru Expert Choice programa

Omjeri važnosti za navedene kriterije unijeti su u programski paket i vidljivi na slici 5.9. Ostali odnosi prikazani su u Prilogu D (slike D15 do D34). I ovi kriteriji se uspoređuju prema Saatyevoj skali, na način da se odredi koliko puta je jedan kriterij važniji od drugoga. Iz slike se vidi da je kriterij *Količina* umjereno važniji od kriterija *Postotak ispravnih*. Krteriji, *Stupanj zadovoljenja ISO standarda i PKP-a, Odnos „rad-kvar“* i *Mogućnost nabave pričuvnih dijelova“*, važniji su od kriterija *Količina*. Na to upućuju vrijednosti navedene u crvenoj boji, koje predstavljaju inverziju u matrici.

Na istom principu mogu se iščitati i odnosi ostalih usporedbi.

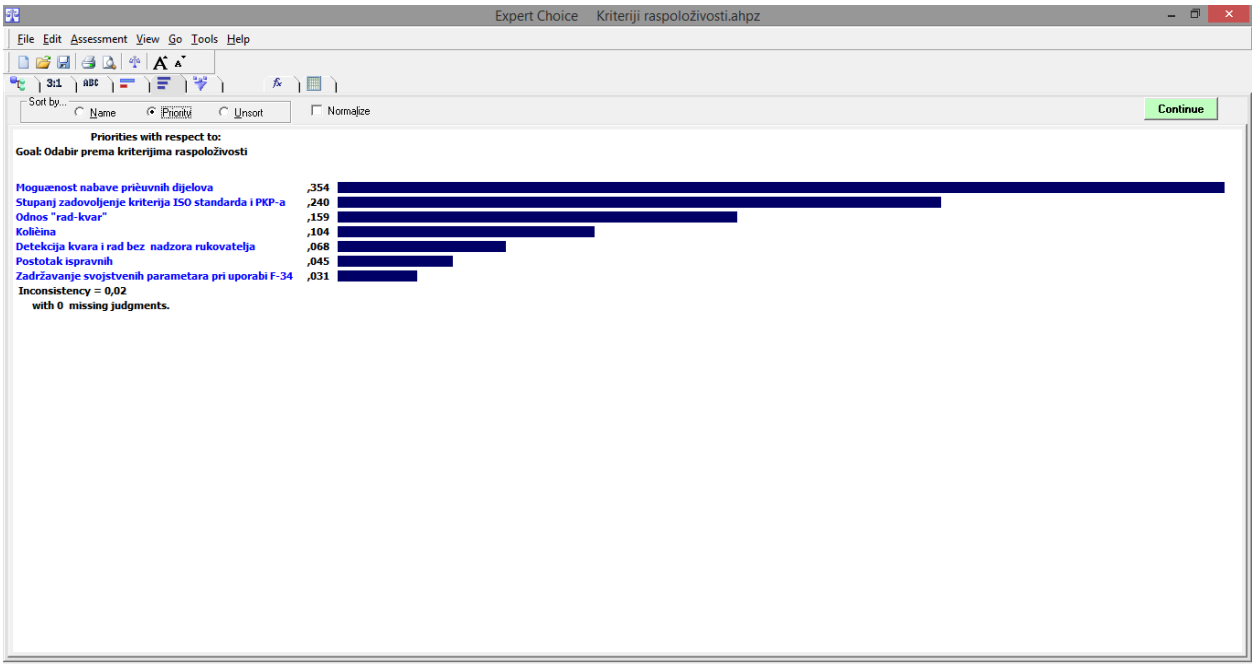
Iznos nekonzistentnosti 0,02 ili 2% upućuje da su omjeri važnosti kriterija dobro odabrani.



Slika 5.9. Uspoređivanje važnosti kriterija za odabir elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti

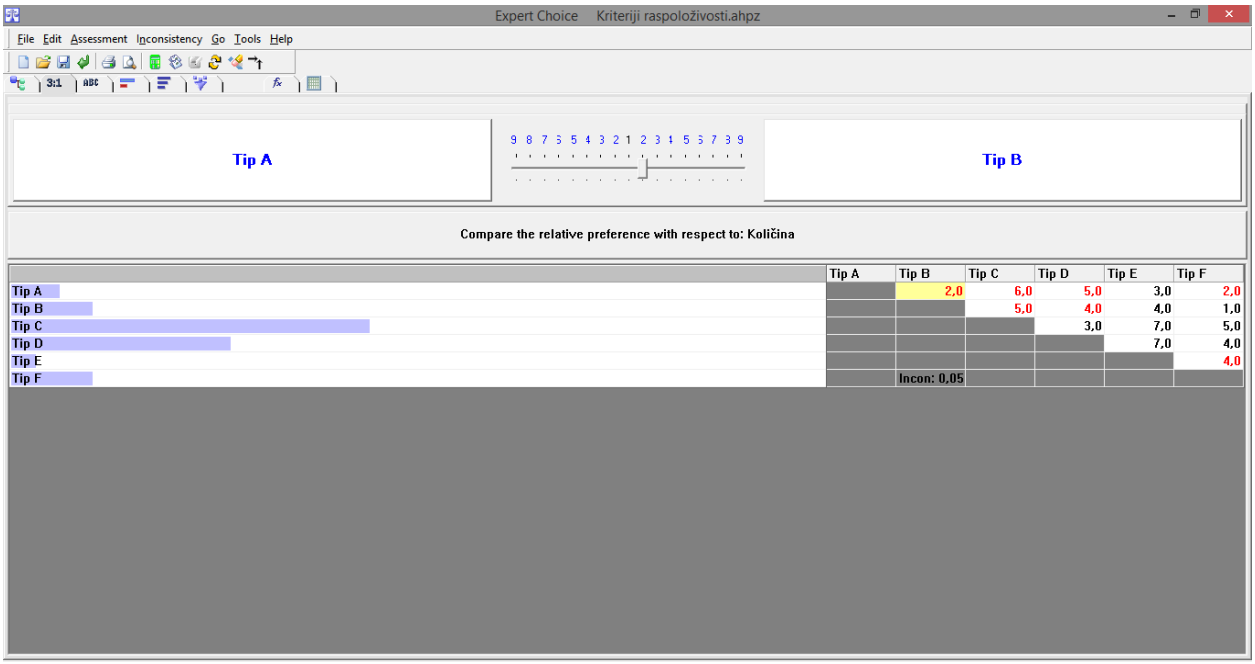
Na slici 5.10 vide se važnosti kriterija poredane po prioritetima koje su dobivene u programskom paketu Expert Choice.

Vidi se da najveću težinu ima mogućnost nabave pričuvnih dijelova, što je i ključno kod svih tipova elektroagregata. Prije ili kasnije nastaje potreba preventivnog ili korektivnog održavanja za što su nužni pričuvni dijelovi.



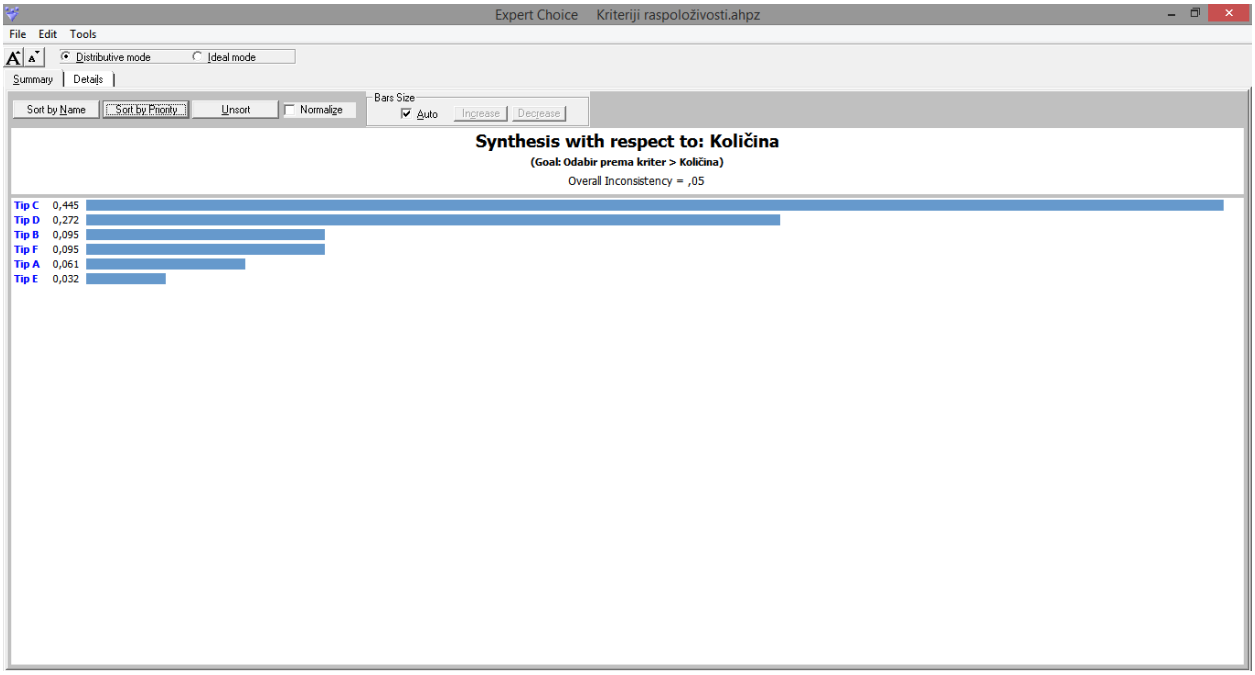
Slika 5.10. Izračunate važnosti kriterija iz procijenjenih omjera za odabir prema kriterijima raspoloživosti

Iz slike 5.11. se vidi usporedba različitih tipova elektroagregata prema prvom navedenom kriteriju, *Količina elektroagregata.* Iz tablice sa slike vidljivi su procijenjeni odnosi i konzistentnost.



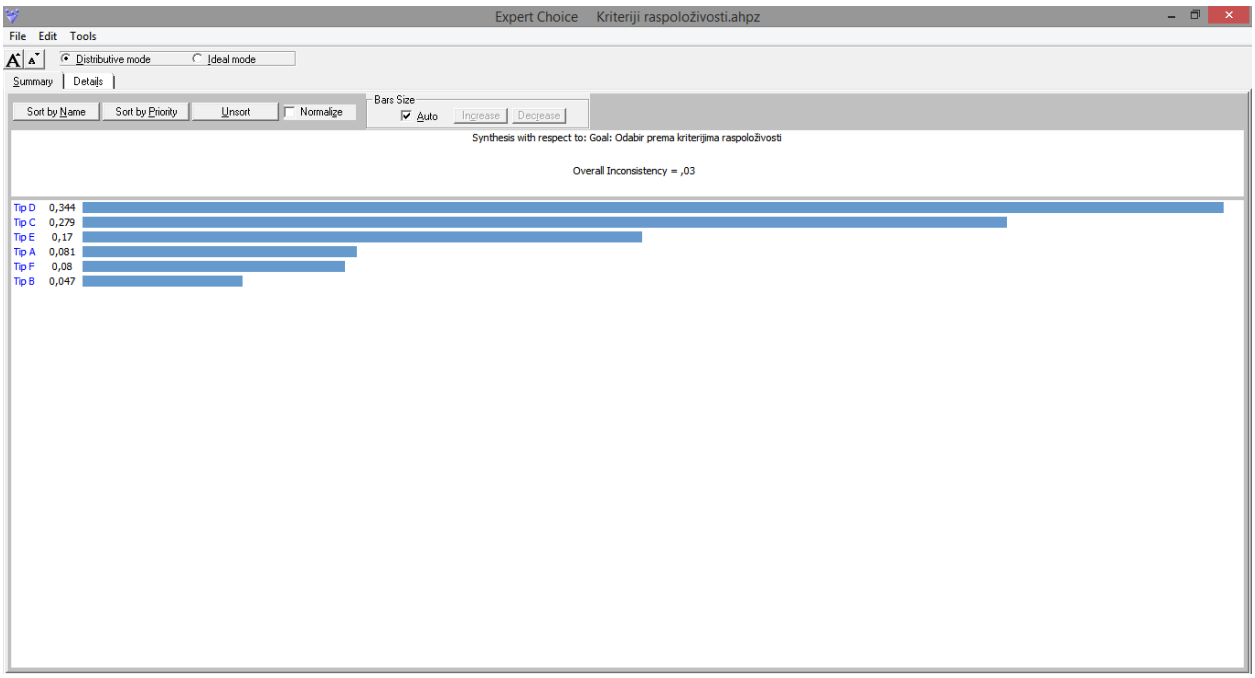
Slika 5.11. Usporedba različitih tipova elektroagregata prema kriteriju količine elektroagregata

Na slici 5.12. po redosljedu su prikazani najoptimalniji tipovi elektroagregata prema kriteriju *količina.* Vidi se da prema ovom kriteriju je najoptimalniji *Tip C*. Istom metodologijom provedena je usporedba elektroagregat prema ostalim kriterijima raspoloživosti.



Slika 5.12. Prioriteti najoptimalnijih tipova elektroagregata prema količini

Rezultati dobiveni provedbom cjelokupne analize Odabira elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti prikazani su na slici 5.13.



Slika 5.13. Rezultati odabira elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti

Iz prikazanih rezultata se vidi da je *Tip D* najoptimalniji prema kriterijima raspoloživosti. Slijede ga prema redosljedu *Tip C, Tip E, Tip A, Tip F* i na posljednjoj poziciji je *Tip B*.

Kao i kod prethodnog odabira, grafički prikaz svih pet vrsta provedbe osjetljivosti u slučaju odabira prema kriterijima raspoloživosti prikazan je u Prilogu D na slikama D35 do D39.

6. ZAKLJUČAK

Provedenim istraživanjem razrađene je problematika održavanja elektroagregata u složenim sustavima. Utvrđeno je da postoji velik broj različitih tipova elektroagregata što otežava upotrebu i održavanje.

Sredstva proizvedena prije Domovinskog rata zaprimala su se u sustav prema tada važećim Protokolima o kvaliteti proizvoda. Za vrijeme Domovinskog rata sredstva su se zaprimala od različitih isporučitelja, dio iz uvoza a dio iz domaće proizvodnje. Zbog žurnosti opskrbe sredstva nisu ispitivana prema određenim obrascima pa njihove mogućnosti nisu jednoznačno definirane.

Budući da se elektroagregati često koristi u međunarodnom okruženju, bitno je osim Protokola o kvaliteti proizvoda, koji se češće koriste u nacionalnom okruženju, elektroagregate svrstati i prema nekom poznatom međunarodnom standardu (npr. ISO 8528). Osim kriterija postavljenih u međunarodnom standardu pojavljuju se i dodatni zahtjevi za primjenu u različitim režimima rada.

Za određivanje svojstvenih pokazatelja elektroagregata, odabrana je i detaljno razrađena provedba ispitivanja. Prvo je odabrano i razrađeno ispitivanje elektroagregata prema Protokolu o kvaliteti proizvoda a nakon toga obrađeno je ispitivanje prema ISO 8528. Temeljem dobivenih rezultata za svaki tip ispitivanog elektroagregata može se odrediti da li zadovoljava ključne zahtjeve Propisa o kvaliteti proizvoda i točno ga svrstati u određenu klasu, G1 do G4 prema ISO 8528. Na taj način elektroagregati se jednoznačno definiraju što značajno pojednostavljuje primjenu u međunarodnom vojnom okruženju i olakšava sporazumijevanje s ostalim članicama saveza.

Osim zahtjeva definiranih Protokolom o kvaliteti proizvoda i ISO 8528, pojavljuju se i dodatni zahtjevi za primjenom elektroagregata u različitim režimima rada. Jedan od najčešćih dodatnih zahtjeva je mogućnost korištenja kerozinskog goriva F-34 za pogon dizel elektroagregata. Radi se o specifičnom zahtjevu koji u nekim slučajevima može imati negativan utjecaj na izlazne karakteristike elektroagregata. Kako bi se utvrdila mogućnost primjene određenih tipova elektroagregata u međunarodnim vojnim operacijama, provedeno je ispitivanje na elektroagregatu P-B40.R1. Provedenim ispitivanjem utvrđena je manja snaga i veća potrošnja goriva pogonskog motora pri uporabi kerozinskog goriva F-34. Zbog manje snage pogonskog motora moguće su veće oscilacije brzine vrtnje, odnosno veće oscilacije frekvencije napona pri udarnim opterećenjima i rasterećenjima generatora. U provedenom ispitivanju nije obuhvaćeno

snimanje dinamičkih promjena pri udarnim opterećenjima i rasterećenjima generatora. Za praćenje dinamičkih promjena provedene su simulacije u programskom paketu Matlab Simulink. Osim praćenja dinamičkih promjena, provedbom simulacija utvrđena je i mogućnost podešavanja parametara dizel motora kako bi se utjecalo na smanjenje nastale razlike izlaznih karakteristika generatora pri uporabi različitih vrsta goriva.

Kroz odabir i razradu ispitivanja opisana je i metodologija određivanja parametara za kategorizaciju elektroagregata.

Značajan doprinos u optimizaciji održavanja ima razvoj Expertnog sustava za detekciju kvara, koji naročito dolazi do izražaja kod složenih tehničkih sredstava, kao što su elektroagregati, gdje se velik dio vremena u procesu održavanja odnosi se na utvrđivanje tehničkog stanja, odnosno detekciju kvara. Kako bi se skratilo vrijeme utvrđivanja kvara razvijen je Ekspertni sustava za detekciju čija je zadaća na temelju lako uočljivih neispravnosti u sklopljenom stanju definirati mjesto teško detektirajućeg kvara.

Kako bi se pojednostavilo održavanje i upotreba elektroagregata nužno je smanjenje velikog broja različitih tipova. Za pravilan odabir služe prethodno provedena ispitivanja iz kojih je vidljivo koje kriterije pojedini tipovi elektroagregata zadovoljavaju.

Odabir elektroagregata je proveden višekriterijskom analizom prema ekonomskim i kriterijima raspoloživosti.

U odabir je bilo uključeno 6 različitih tipova elektroagregata. Utvrđeno je da je *Tip D* najoptimalniji prema jednim i drugim kriterijima. Isti model odabira može se primijeniti i na znatno veći broj tipova i sa više različitih kriterija.

Prikazani optimizacijski proces održavanja uz malu prilagodbu moguće je primijeniti i na druga tehnička sredstva koja se pojavljuju u složenim sustavima kao što su vojne organizacije.

LITERATURA

[1] Engineering design handbook - *Maintenance engineering handbook techniques*, Headquarters, US army materiel command, Alexandria, 1975.

[2] I. Čala, *Održavanje opreme*, 9. poglavlje knjige Proizvodno strojarstvo, Školska knjiga, Zagreb, 2002.

[3] Handbook of Aviation Fuel Properties, Coordinating Research Council, Society of Automotive Engineers, Pennsylvania, 1983.

[4] Đ. Šilić, V. Stojković, D. Mikulić, *Goriva i maziva,* Veleučilište Velika Gorica, Velika Gorica 2012.

[5] Z. Pešić, *Tehnologija održavanja motornih vozila*, Vojnoizdavački zavod, Redakcija „Vojna knjiga“, Beograd, 2009.

[6] P. Stanojević, *Uticaj tehničkih faktora na organizacionu strukturu sistema održavanja*, Doktorska disertacija, Beograd, 1997.

[7] T. Rebac, *Optimiranje modela preventivnog održavanja vozila i borbenih tehničkih sredstava*, Magistarski rad, Mostar, 2003.

[8] Združena logistika, Glavni stožer oružanih snaga Republike Hrvatske, Uprava za logistiku-J4, Zagreb 2015.

[9] D. Lisjak, *Strategije održavanja pptx*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2016.

[10] R. Keith Mobley, *Maintenance Engineering Handbook*, Seventh edition, McGraw-Hill, 2008.

[11] N. Majdandžić, *Strategije održavanja i informacijski sustavi održavanj*a, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1999.

[12] M. Jakopčić, Održavanje naoružanja, Zapovjedništvo Hrvatske kopnene vojske, Zagreb, 2006.

[13] V. Kondić, M. Horvat, F. Maroević, *Primjena dijagnostike kao osnove održavanja po stanju na primjeru motora osobnog automobila,* Tehnički glasnik 7, 1(2013).

[14] Propis o kvaliteti proizvoda (PKP), *Elektroagregati izmjenične i istosmjerne struje, snage do 1 MW – Opći tehnički uvjeti*, Savezni sekretarijat za narodnu obranu, Vojnoprivredni sektor, 1984.

[15] International Organization for Standardization, ISO 8528, Genève, 1993.

[16] NATO Logistics Handbook, NATO Headquarters Brussels, Third Edition, Brussels, 1997.

[17] Pravilnik o normizaciji u Ministarstvu obrane i Oružanim snagama Republike Hrvatske, Ministarstvo obrane, Narodne novine 139/2003.

[18] I. Mišković, Z. Jančec, *Informacije o gorivu NATO oznake F-34 s uputom za uporabu goriva F-34 u OSRH*, Zagreb, 2005.

[19] R. Spudić, K. Somek, V. Kovačević, *Single Fuel Concept for Croatian Army Ground Vehicles*, MORH, Zagreb, 2008.

[20] D. Mikulić, I. Mahalec, V. Koroman, E. Bazijanac, *Koncept jednog goriva za vojna vozila,* Zbornik radova V. međunarodni znanstveni i stručni skup "Motori i vozila 2002" / Stepanić, Josip (ur.), Zagreb: FSB, 2002.

[21] Upute za rukovanje i održavanje elektroagregata P-B40.R1, Končar-ERS, Rijeka, 1995.

[22] Sinkroni generatori beskontaktni, Upute za rukovanje i održavanje, Končar-ERS, Rijeka, 1993.

[23] Prevozni elektroagregat P-B40.R1, Izvještaj o ispitivanju elektroagregata, Končar-ERS, Rijeka, 1993.

[24] D. Barešić, Ž. Hederić, M. Barukčić, *Ispitivanje elektroagregata s pogonskim dizel motorom na uporabu modificiranog kerozinskog goriva* // Zbornik radova EIS 2013, 26. međunarodni simpozij "Elektroinženjerski simpozij" Dani Josipa Lončara / Neven Srb (ur.). Zagreb: Elektrotehničko društvo Zagreb, 2013.

[25] D. Barešić, Ž. Hederić, M. Hadžiselimović *Exploring the possibilities of adjusting gensets to NATO requirements,* Transactions of FAMENA, Zagreb, 2019.

[26] R. Cataluña, R. da Silva, *Effect of Cetane Number on Specific Fuel Consumption and Particulate Matter and Unburned Hydrocarbon Emissions from Diesel Engine*, Journal of Combustion, Volume 2012, 2012.

[27] https://www.deutzpartsdirect.com/documents/deutz-specs/deutz-912-agricultural-specs.pdf (dostupno 1. kolovoza 2018.)

[28] D. A. Rothamer, L. Murphy, *Systematic study of ignition delay for jet fuels and diesel fuel in a heavy-duty diesel engine,* Proceedings of the Combustion Institute, Volume 34, Issue 2, 2013.

[29] P. Schihl, L. Hoogterp-Decker, *On the Ignition Behavior of JP-8 in Military Relevant Diesel Engines,* SAE International Journal of Engines Volume 4, Issues 1, 2011.

[30] G. Labeckas, S. Slavinskas, *Combustion phenomenon, performance and emissions of a diesel engine with aviation turbine JP-8 fuel and rapeseed biodiesel blends,* Energy Conversion and Management Volume 105, 15 November 2015.

[31] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.

[32] K. Wadumesthrige, N. Johnson, M. Winston-Galant, Performance, *Durability and Stability of a Power Generator Fueled with ULSD, S-8, JP-8, and Biodiesel,* SAE International Journal of Engines, 2010.

[33] T. Katrašnik, V. Medica, F. Trenc, *Analysis of the dynamic response improvement of a turbocharged diesel engine driven alternating current generating set,* Energy Conversion and Management Volume 46, Issues 18–19, November 2005.

[34] V. Matijević, Z. Maljković, *Utjecaj regulacije brzine vrtnje dizel motora na dinamičke karakteristike sinhronog generatora*, Automatika, 31, 3-4, Zagreb, 1990.

[35] M. Mirošević, *Dinamika brodskih elektroagregata u autonomnom pogonu,* Master Thesis, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Zagreb, Croatia, 1999.

[36] R. Keith Mobley, Maintenance Engineering Handbook, 8rd ed., McGraw-Hill Education, United States, 2014.

[37] D. Barešić, Ž. Hederić, M. Hadžiselimović, *Modelling of an Expert System for Diagnosing the Operational Status of a Diesel Genset*, Tehnički vjesnik-Technical Gazette, Slavonski Brod, Croatia, 2017.

[38] F. Jović, Expert Systems in Process Control, Chapman & Hall, London, 1992.

[39] B. Carlin, A. Gelman, H. Stern, Bayesian Data Analysis, 3rd ed., Chapman and Hall, 2014.

[40] http://www.zemris.fer.hr/predmeti/is/nastava/Modeliranje_neizvjesnosti.pdf (Dostupno:20.02.2015.)

[41] S. L. Lauritzen, D. J. Spiegelhalter, *Local Computations with Probabilities on Graphical Structures and Their Application to Expert Systems*, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, (Methodological), vol. 50, (2), 1988.

[42] L.J. Mahon, Diesel generator handbook, Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 1992.

[43] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Wiley, USA, 2013.

[44] D. Kang, D. H. Koo, I. Vadan and G. P. Curiac, *Contactless Excitation System for Synchronous Generators*, ICREPQ 2005, International Conference on Renewable Energy and Power Quality, 2005, RE&PQJ, Vol. 1, No.3, March 2005, pp 280-284

[45] M. A. Awadallah, *Fuzzy-based on-line detection and prediction of switch faults in the brushless excitation system of synchronous generators,* Electric Power Components and Systems, vol. 38(12), Taylor and Francis Ltd, 2010.

[46] Ž. Hederić, D. Barešić, V. Ćorluka, *Optimization of maintenance of gensets using expert systems for fault diagnosis*, Journal of Energy Technology, vol. 10(1), University of Maribor, Faculty of Energy Technology, 2017.

[47] T. L. Saaty, L. G. Vargas, Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process, Springer US, 2001.

[48] N. Bhushan, K. Rai, Strategic Decision Making Applying the Analytic Hierarchy Process, Springer, 2004.

[49] D. Barković, Menadžersko odlučivanje, Ekonomski fakultet u Osijeku, Osijek, 2009.

[50] T. Hunjak, D. Jakovčević, *Višekriterijski modeli za rangiranje i uspoređivanje banaka,* Zbornik Ekonomskog fakulteta u Zagrebu, Vol. 1 No. 1, 2003.

[51] N. Begičević, *Višekriterijski model odlučivanja u strateškom planiranju uvođenja e-učenja,* Doktorska disertacaija, Fakultet organizacije i informatike, Varaždin, 2008.

[52] N. Kadoić, *Nova metoda za analizu složenih problema odlučivanja temeljena na analitičkom mrežnom procesu i analizi društvenih mreža,* Doktorski rad, Fakultet organizacije i informatike, Zagreb, 2018.

[53] M. Briš Alić, *Optimalizacija izbora projekta korištenja geotermalne energije metodama višekriterijalne analize*, Doktorska disertacija, Ekonomski fakultet u Osijeku, 2012.

[54] I. Aleksi, Ž. Hocenski, *Primjena Expert-Choice alata i AHP metode za odabir Virtex-5 FPGA čipa,* Elaborat, Elektrotehnički fakultet u Osijeku, Osijek 2009.

[55] D. Lisjak, *Primjena AHP-metode kao alata za optimalni izbor opreme,* Održavanje u sustavu gospodarenja fizičkom imovinom, Hrvatsko društvo održavatelja, 2011.

[56] F. T. S. Chan, H. K. Chan, *An AHP model for selection of suppliers in the fast changing fashion market,* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 51 (9–12), 2010.

[57] Mladen Begović, Održavanje tehničkih sustava, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2003.

[58] http://www.expertchoice.com

[59] A. Ishizaka, A. Labib, *Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and limitations,* ORInsite 22(4), December 2009.

[60] Radenko Wolf, Osnove električnih strojeva, Školska knjiga, Zagreb, 1991.

SAŽETAK

Kroz rad je prikazan proces optimizacije održavanja elektroagregata u složenim sustavima. U početnoj fazi istraživanja sagledane su metode održavanja vojne tehnike i proveden vizualni pregled na približno 25% elektroagregata koji se koriste u Oružanim snagama Republike Hrvatske. Pri tome je utvrđeno da postoji velik broj različitih tipova elektroagregata što otežava primjenu i održavanje. Zbog toga se predlaže smanjenje broja različitih tipova.

Da bi se proveo pravilan odabir elektroagregata definirana su ispitivanja kojima se određuju svojstveni pokazatelji. Temeljem dobivenih pokazatelja elektroagregati se kategoriziraju, odnosno svrstavaju u određene skupine prema ISO 8528.

Osim zahtjeva definiranih u Protokolima o kvaliteti proizvoda i ISO 8528 pojavljuju se i dodatni zahtjevi vezani uz mogućnost primjene sredstava u međunarodnim vojnim operacijama gdje se pojavljuju različiti režimi rada. Jedan od dodatnih zahtjeva je mogućnost primjene kerozinskog goriva F-34 za pogon dizel elektroagregata. Radi se o specifičnom zahtjevu koji u nekim slučajevima može imati negativan utjecaj na izlazne karakteristike elektroagregata. Kako bi se provjerio utjecaj kerozinskog goriva na izlazne karakteristike provedeno je ispitivanje na elektroagregatu P-B40.R1. Osim ispitivanja provedene su i simulacije u programskom paketu Matlab Simuklink iz kojih je vidljivo da se podešavanjem parametara elektroagregata može utjecati na smanjenje nastale razlike izlaznih karakteristika generatora pri uporabi različitih vrsta goriva.

Kod složenih tehničkih sredstava, kao što su elektroagregati, velik dio vremena u procesu održavanja odnosi se na utvrđivanje tehničkog stanja, odnosno detekciju kvara. Kako bi se skratilo vrijeme utvrđivanja kvara razvija se Ekspertni sustava za detekciju čija je zadaća na temelju lako uočljivih neispravnosti u sklopljenom stanju definirati mjesto teško detektirajućeg kvara i time dati značajan doprinos u optimizaciji održavanja. Rad ekspertnog sustava zasniva se na Bayesovoj metodi.

Rezultati provedenih mjerenja, simulacija i Ekspertnog sustava za detekciju kvara koriste se u postavljanju kriterija za odabir optimalnih tipova elektroagregata prema ekonomskim kriterijima i kriterijima raspoloživosti. Odabir se provodi AHP metodom uz primjenu programskog paketa Expert Choice.

Ključne riječi: elektroagregat, optimiranje održavanja, modeliranje, expertni sustav, svojstveni pokazatelji, kerozinsko gorivo F-34, kategorizacija, Bayesova metoda, AHP metoda

ABSTRACT

The paper presents the process of genset maintenance optimization in complex organizations. In the initial stages of research, military technology maintenance methods were reviewed, and a visual inspection was conducted on approximately 25 % of gensets used in the Military Forces of the Republic of Croatia. It was found that a large number of different types of gensets were in use making application and maintenance more difficult. It is therefore suggested to reduce the number of different types.

To select the genset correctly, tests have been defined for the purpose of establishing the specific genset indicators. Based on the established indicators, gensets are classified, that is, grouped according to ISO 8528.

In addition to the requirements defined in Product Quality Protocols and ISO 8528, there are additional requirements related to the possibility of using the devices in international military operations where different operating modes appear. One of the additional requirements is the possibility of using F-34 kerosene fuel for powering diesel gensets. This is a specific requirement which can have a negative impact on the genset's output characteristics. To verify the impact of kerosene fuel on the output characteristics, a test was conducted on the P-B40.R1 genset. In addition to the tests, simulations were carried out in the MatlabSimuklink software package showing that an adjustment of the genset's parameters can contribute to minimizing the resulting difference in the genset's output characteristics where different types of fuel are used.

In complex technical devices, such as gensets, a large portion of time in the maintenance process relates to the identification of the technical condition, that is, to detecting the defect. To minimize defect identification time, an expert detection system is being developed aiming to use the evident irregularities in assembled condition to define the location of a defect which is difficult to detect and thus contribute to maintenanceoptimization. The expert system workson the basis of the Bayes method.

The results of the measurements, simulations and the defect detection expert system are used to define the criteria for selecting the optimum genset types according to economic and availability criteria. The selection is carried out based on the AHP method with the application of the Expert Choice software package.

Title: Optimisation of gensets maintenance in complex systems

Key words: genset, maintenance optimization, modelling, expert system, specific indicators, F-34 kerosene fuel, classification, Bayes method, AHP method

ŽIVOTOPIS

Dejan Barešić,

Dejan Barešić rođen je 18. lipnja 1976. godine u Koprivnici.

Osnovnu školu završava u Sokolovcu 1991. godine i upisuje srednju Elektrotehničku školu u Varaždinu. Na Tehničko veleučilište u Zagrebu upisuje se nakon odsluženog vojnog roka 1999. godine. U siječnju 2003., na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu stječe zvanje inženjera elektrotehnike, smjer Automatizacija i procesno računarstvo. U rujnu iste godine zapošljava se u Hrvatskoj vojsci i vanredno se upisuje na Elektrotehnički fakultet u Osijeku koji završava 2006. godine i stječe zvanje diplomiranog inženjera elektrotehnike, smjer Elektroenergetika.

Nakon završene Temeljne časničke izobrazbe, 2004. godine dobiva prvi časnički čin i postavljenje u Remontnom zavodu na mjesto Zapovjednika voda za remont elektroenergetskih i pogonskih uređaja. U Remontnom zavodu ostaje do 2015. godine gdje je obnašao niz zapovjednih i voditeljskih dužnosti. Iz Remontnog zavoda odlazi s mjesta Načelnika odjela za remont specifičnih sredstava na mjesto Časnika za elektroenergetiku u Logističko operativno središte. Nakon toga, u siječnju 2016. godine dobiva mjesto Časnika za znanost i razvoj u Odjelu tehničkog razvoja i istraživanja na Hrvatskom vojnom učilištu „Dr. Franjo Tuđman“.

Za vrijeme rada u Remontnom zavodu upisuje poslijediplomski doktorski studij i daje značajan doprinos u održavanju i modifikaciji vojne tehnike, čime su postignute znatne uštede i podignut stupanj ispravnosti i raspoloživosti tehničkih sredstava. Za ostvarene rezultate dodijeljene su mu pohvale i nagrade, među kojima je i pohvala načelnika Glavnog stožera Oružanih snaga Republike Hrvatske. Pohađao je različite specijalističke edukacije za održavanje vojne tehnike te posjeduje niz certifikata.

Uz propisane dužnosti radnog mjesta izabran je u nastavno naslovno zvanje predavača te sudjeluje u nastavi na Sveučilišnom studijskom programu Vojnog inženjerstva.

Član je Elektrotehničkog društva u Zagrebu.

PRILOZI

Prilog A

KUNČAR - ERS Rijeka, Hrvatska	UVJERENJE O PRIMJENI PRAVILA ZAŠTITE NA RADU	Z30702.1

Provjera primjene osnovnih pravila zaštite pri radu obavljena je u skladu sa čl.7 Zakona o zaštiti na radu (NN RH br.59/96), čl.2/-7 Pravilnika o načinu provjere uređaja za rad i osobnih zaštitnih sredstava radi utvrđivanja ispravnosti glede zaštite na radu (NN RH br. 52/84), kao i na temelju ocjene i dokaza upisanih u zapisnik o ispitivanju izdaje se:

U V J E R E N J E

kojim se potvrđuje da je ispitan:

PREVOZNI ELEKTROAGREGAT

Osnovni podaci:

Tip: P-840.R1
Matični list / tvornički broj ....Z30702 /
Trajna snaga /ISO 8528/5/.....25kVA

Proizvođač:

"KUNČAR ELEKTRIČNI ROTACIJSKI STROJEVI" d.o.o. Rijeka,
51223 Škrljevo, Industrijska zona Kukuljanovo

Na temelju zapisnika o završnom ispitivanju utvrđuje se:

1. Zaštita od napona dodira provedena je izolacijom i odgovarajućom zaštitom svih dijelova pod naponom, a svi metalni dijelovi međusobno su galvanski vezani na čepove za zaštitno uzemljenje.
2. Svi rotirajući dijelovi su mehanički zaštićeni od slučajnog dodira.
3. Izmjerena razina buke kreće se do 67 dB(A)/7m.

Nakon izvršene provjere podataka unesenih u zapisnik, utvrđeno je da je proizvod ispravan u skladu sa pravilima zaštite na radu te se može upotrebljavati bez opasnosti po posluživelja.

Rijeka, 05. lyyo. za "KUNČAR-ERS"

KONČAR

Električni Rotacioni Strojevi

51000 RIJEKA
CROATIA
Industrijska zona Kukuljanovo

ISPITNI LIST

TVORNIČKO ISPITIVANJE

za generatorsku grupu tip: P-B4o.R1 -

kupac:

260396/07 ILEAH1.DOC

Proizv. nalog:

Ugovor No.:

Broj dijela: Z3o7o2	Pn: kVA	Standard: ISO8528/5	Klasa regulacije: G2
Tvornički broj: 261698	3x400/231 V	36,1 A	cosφ=o,8
	50 Hz	1500 min-1	Rad: Kontinuirani
Uvjeti okoline: Temperatura 27 °C	Barometarski tlak 996 kPa	Rel. vlažnost 60 %	

Podaci diesel motora:		Podaci generatora:	
Proizvođač: TORPEDO		Br. dij./Tvor. br.: Z1o135 - 233656 Br. regulatora napona : Zo9413	
Tip: T3L 912 KON/RV		Tip: SGB2oo SM-4	Klasa izolacije: H/H
Serijski br.: 132656		50 Hz	3x400/231 V
Na/Nu: 25u27 kW	1500 min-1	kVA 4o	cosφ=0,8
Podaci o kom. ormaru:	Tip: 2KPM-5oT/2	Broj dijela: Z3o7o4	Tvor. broj: 261692

P (%)	0	25		50		75		100		110
U (V)	4oo	399	399	399	399	398	398	398	398	398
I (A)	-	7,2	9,o	14,4	18,o	21,6	27,o	28,8	36,1	31,7
cosφ	-	1	0.8	1	0.8	1	0.8	1	0.8	1
f (Hz)	51,2	51,o	51,o	5o,7	5o,7	5o,4	5o,4	5o,o	5o,o	49,9
Ui.k (V)										
Ii.k (A)										

Izolacijski test induktorom 500 V		Spoj:
Generator: 1oo MΩ	Cent. Skl.: - MΩ	Grijač vode: - MΩ
Pritisak ulja: - 5,5 bar	Temperatura vode: - °C	Ispitni list diesel motora: NEMA

Automatika komandnog ormara:
- Tip: - KEYSTART
- Serijski broj: - 18267
- Napajanje automatike: -
- Parametar prisutnosti alternatora: -

Napomene:	Ispitao:	Odobrio:
NEMA	M. Mitrović	I. Vidaković dipl.ing.
	Vidio: R. Ižaković dipl.ing.	
	Rijeka, 22.05.96.	

R.br.	N a z i v	Br.dijela	Kom.
1.	Elektroagregat P-B40.RI	Z30702	1
	OPREMA		
2.	Utikač tip MPU 20, 380 V, 63 A, 3P+N+Z "TEP"	931847	1
3.	Utikač tip MPU 35, 380 V, 16 A, 3P+N+Z "TEP"	981665	1
4.	Utikač tip MPU 17, 220 V, 63 A, 2P+Z "TEP"	Z70141	3
5.	Sonda za uzemljenje	385103	1
6.	Kabel za uzemljenje	Z26226	1
7.	Lijevak za gorivo		1
8.	Odvijač 1x6x150 K.G5.213	920347	1
9.	Ključ dvostrani otvoreni 10x11 K.G5.020		1*
10.	Ključ dvostrani otvoreni 13x17 K.G5.020		1*
11.	Ključ dvostrani otvoreni 14x17 K.G5.020		1*
12.	Ključ dvostrani otvoreni 19x22 K.G5.020		1*
13.	Maske svjetlosne signalizacije		2?
14.	Ručna motalica	Z26230	1
15.	Prenosna svjetiljka 12 V/5 w, komplet	930934	1
16.	Uložak prečistača ulja 1173481 "TORPEDO"		1*
17.	Uložak prečistaca zraka 0113224 "TORPEDO"		1*
18.	Uložak prečistaca goriva 1160243 "TORPEDO"		1*
19.	Klinasti remen 9,5x1100 -101907 "TORPEDO"		1*
20.	Klinasti remen 9,5x1275 2231711 "TORPEDO"		1*
	DOKUMENTACIJA		
21.	Tehničko uputstvo za elektroagregat	Z30135	1
22.	Upute za generator	Z10156	1
23.	Upute za motor "TORPEDO"		1*
24.	Tehnički opis i upute uredaja za start i zaštitu Diesel motora SAM-704	Z29533	1
25.	Tehnički zahtjevi uredaja za nadzor izolacije RI-III	Z25532	1
26.	Strujna shema elektroagregata	Z30707	1
27.	Mjerna skica agregata	Z28113	1
28.	Dijagram promjene snage (uvjeti okoline)	Z28694	1
29.	Uvjerenje o provedenim mjerama zaštite	Z30702.1	1
30.	Ispitni list elektroagregata "KONČAR-ERS"		1
31.	Garantni list elektroagregata "KONČAR-ERS"		1
32.	Otpremni list	Z30708	1

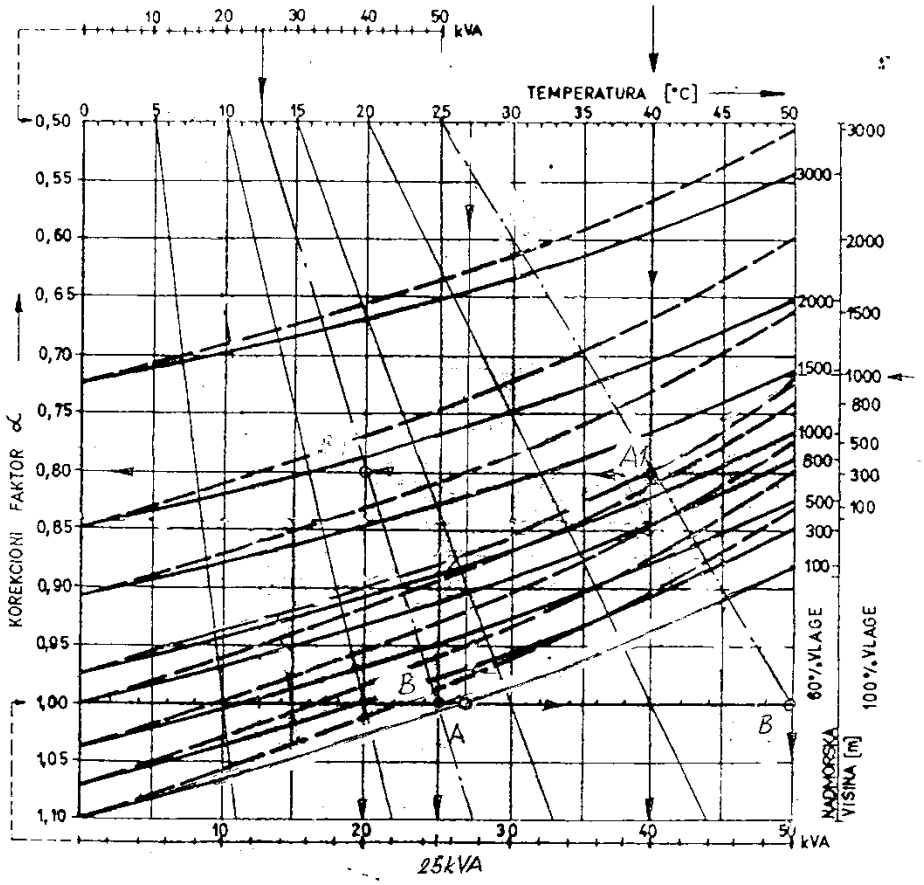
NAPOMENA:
* Dolazi uz motor prema TOI br. izv. 022 1826 "TORPEDO"
? Dolazi uz podvozak "VIŠEVICA"

03.96.	Prezime	Potpis	ELEKTROAGREGAT P-B40.RI		
Sastav.	Bauer G.		O T P R E M N I L I S T		
Odobrio	Ižaković		KONČAR–ERS	Z30708	List: 1/1

PROMJENA SNAGE U OVISNOSTI O UVJETIMA OKOLINE

Z28694

Stranica 1/1



PRIMJERI: Odrediti trajnu snagu kod slijedećih uvjeta okoline:
1. Temperatura 27°C, nadmorska visina 1oo m i 6o% relativne vlage
2. Temperatura 4o°C, nadmorska visina 1ooo m i 1oo% relativne vlage

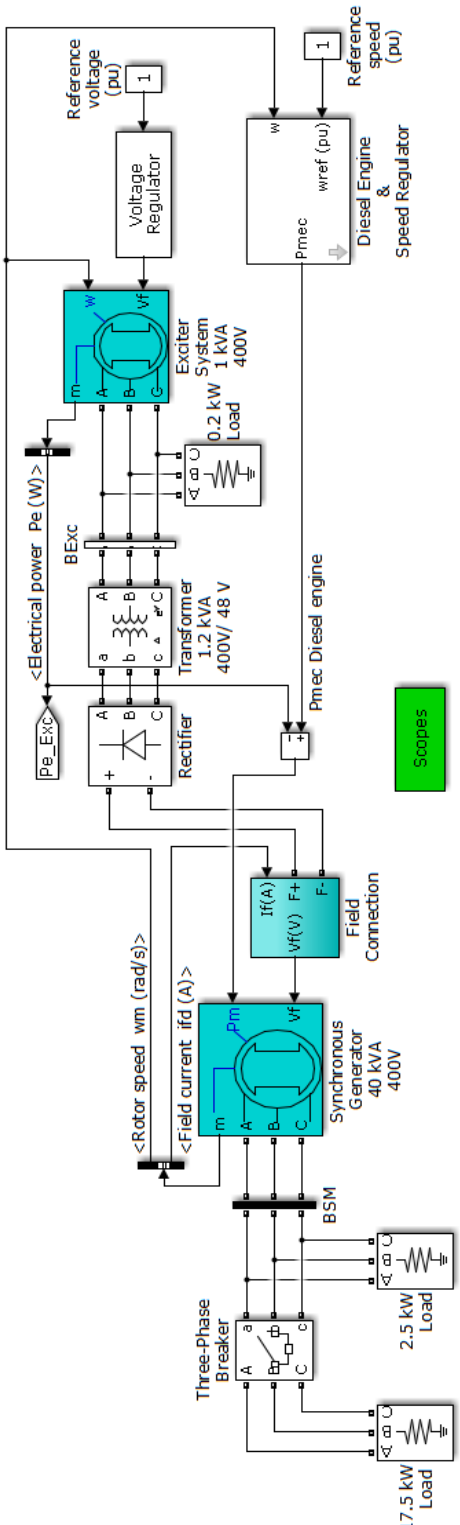
POSTUPAK:

1. Spustiti vertikalu sa skale temperature ↓ (27) na krivulju 1oo m (kod 6o% vlage) ◄— . Iz dobivene točke A povući horizontalu na skalu korekcionog faktora (očitanje α = 1,00). Iz sjecišta B pravca snage —·— sa horizontalnim pravcem faktora α spustiti vertikalu na skalu kVA (očitanje trajne snage ~ 25 kVA).
2. Spustiti vertikalu sa skale temperature ↓ (4o) na krivulju 1ooo m (kod 1oo% vlage) ◄— . Iz dobivene točke A1 povući horizontalu na skalu korekcionog faktora (očitanje α = o,8o). Iz sjecišta B1 pravca snage —·— sa horizontalnim pravcem faktora α spustiti vertikalu na skalu kVA (očitanje trajne snage ~ 2o kVA).
(u primjeru I: 25 x 1,o = 25 kVA) (u primjeru II: 25 x o,8 = 2o kVA).

This document remains the exclusive property of the KONČAR Company. Reproduction or any use not in conformity with the intended application is not permissible.

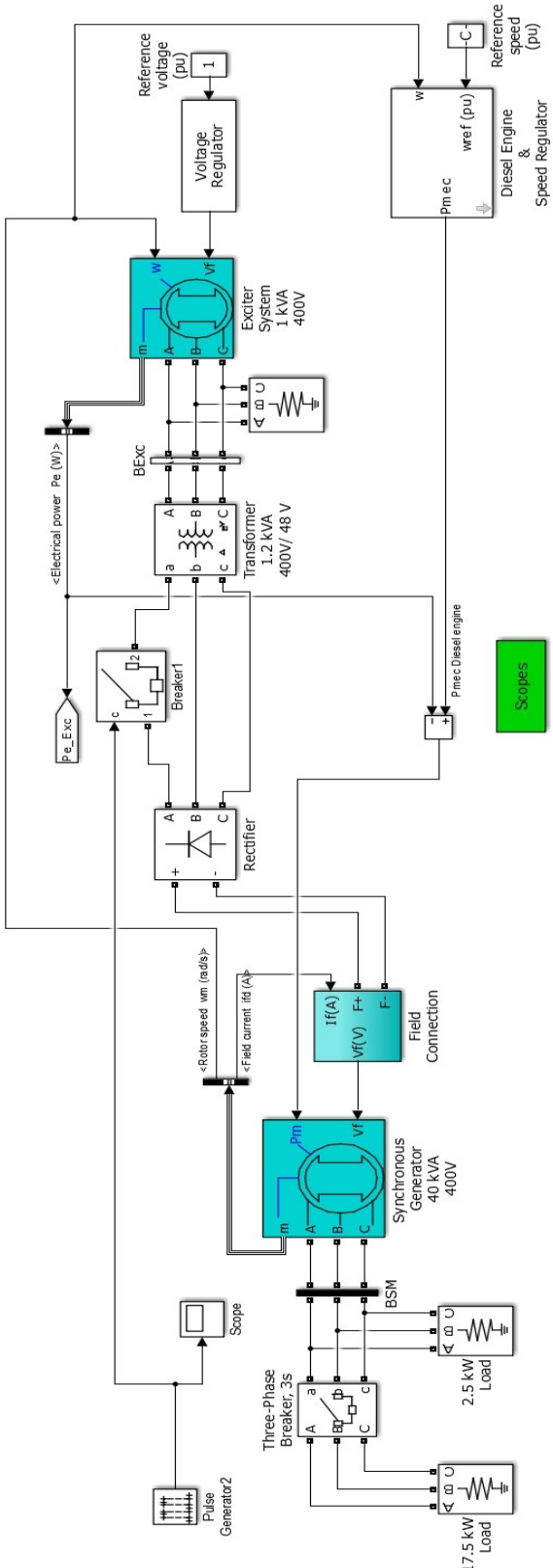
Ovaj dokument ostaje u isključivom vlasništvu "KONČAR-a". Preslikavanje i upotreba izvan namjene nisu dozvoljeni.

Prilog B



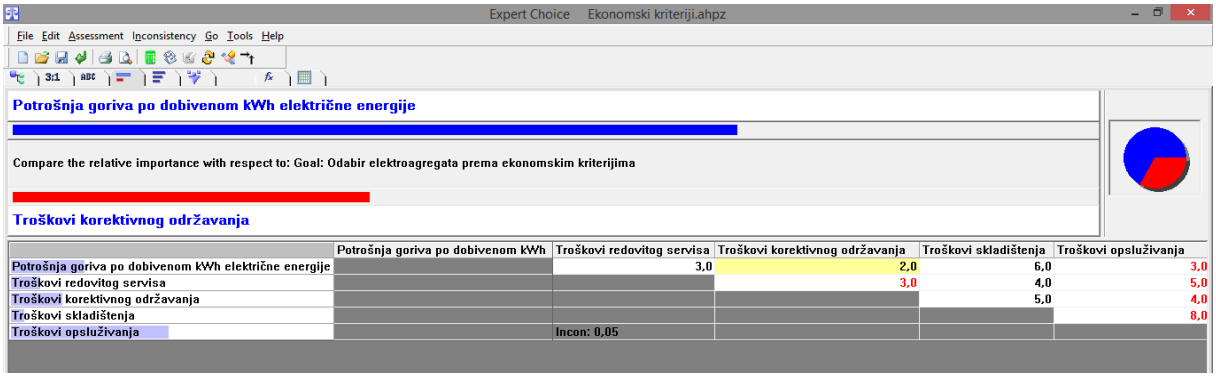
Slika B1. Simulacijski model u Matlab Simulinku za potrebe podešavanje parametara elektroagregata

Prilog C

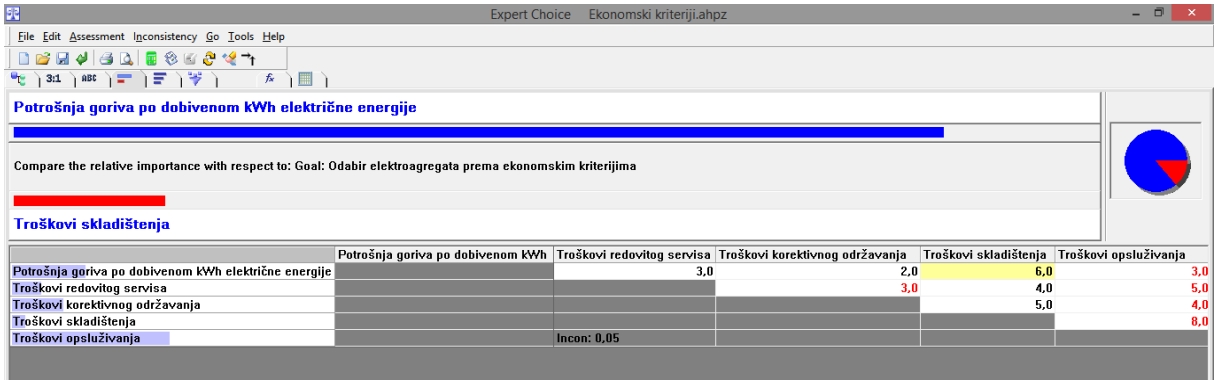


Slika C1. Osnovni model za simulaciju kvarova generatora

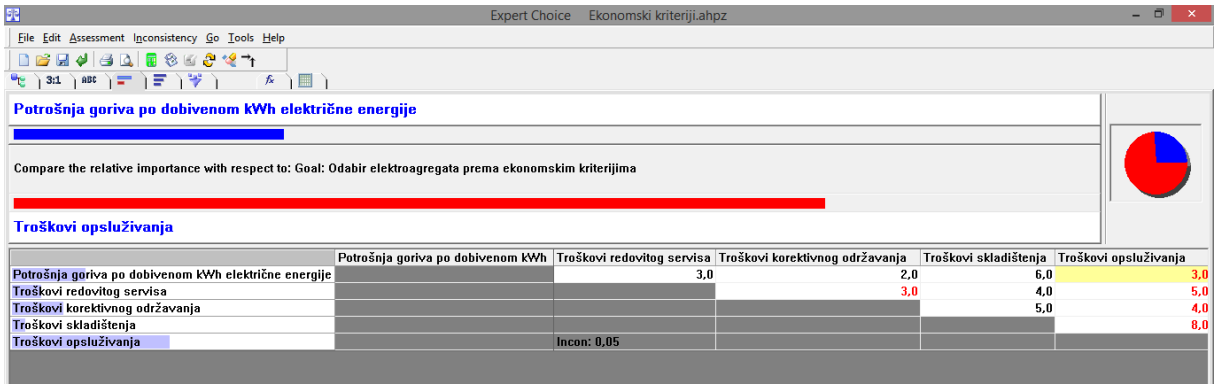
Prilog D



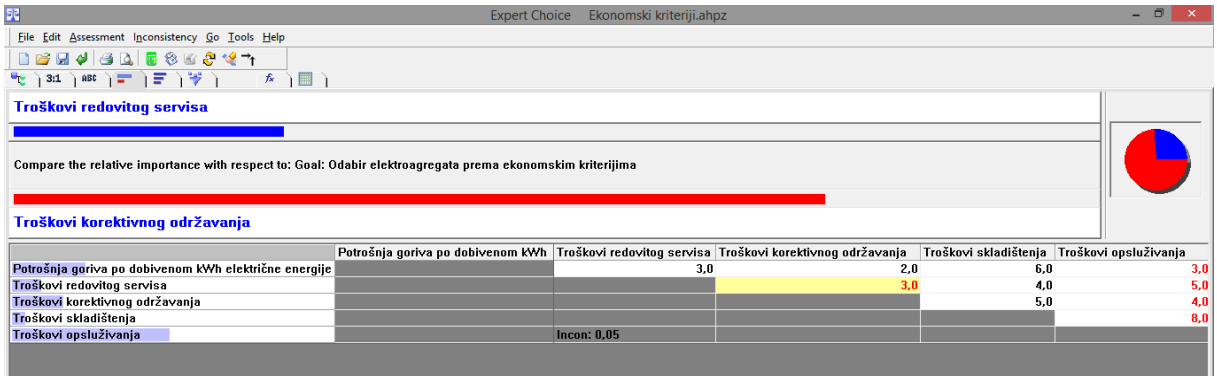
Slika D1. Uspoređivanje važnosti kriterija „Potrošnja goriva po dobivenom kWh električne energije“ i „Troškovi korektivnog održavanja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



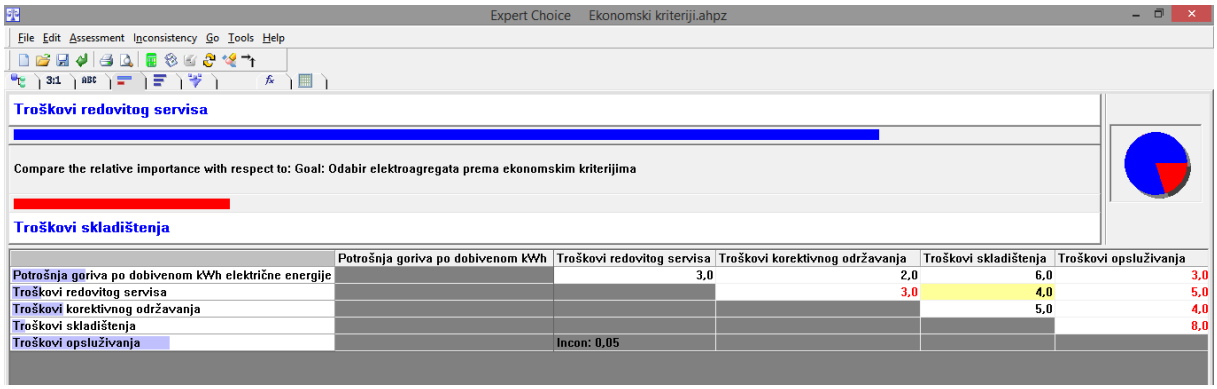
Slika D2. Uspoređivanje važnosti kriterija „Potrošnja goriva po dobivenom kWh električne energije“ i „Troškovi skladištenja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



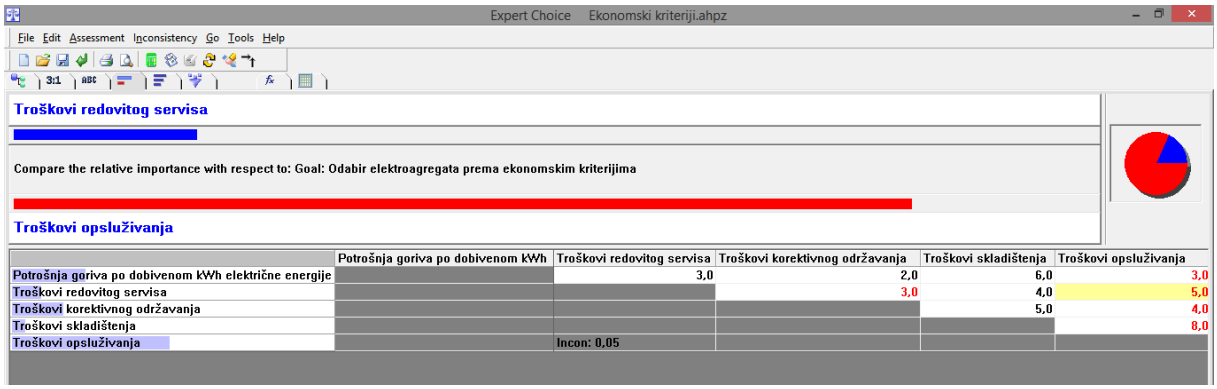
Slika D3. Uspoređivanje važnosti kriterija „Potrošnja goriva po dobivenom kWh električne energije“ i „Troškovi opsluživanja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



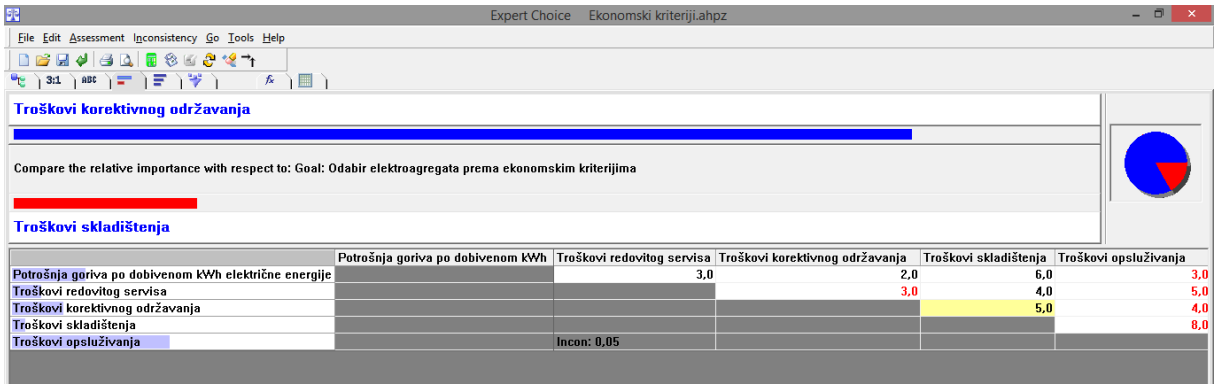
Slika D4. Uspoređivanje važnosti kriterija „Troškovi redovitog servisa“ i „Troškovi korektivnog održavanja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



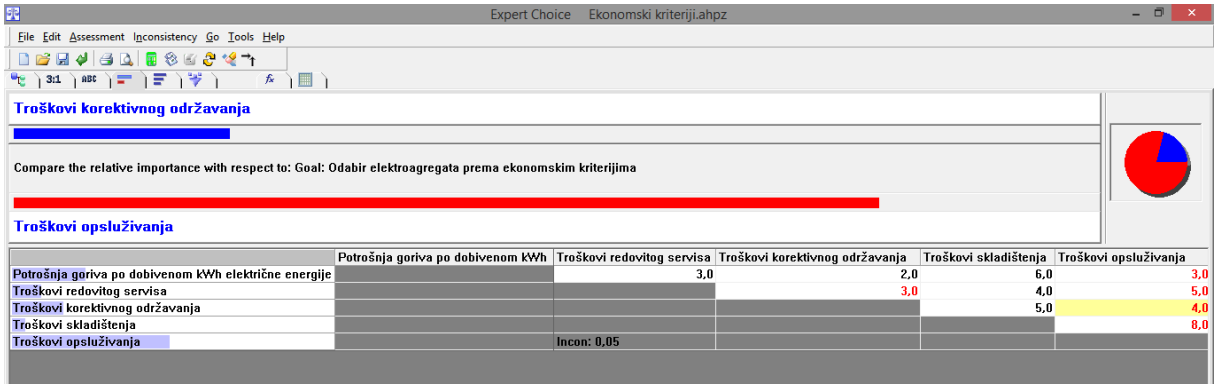
Slika D5. Uspoređivanje važnosti kriterija „Troškovi redovitog servisa“ i „Troškovi skladištenja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



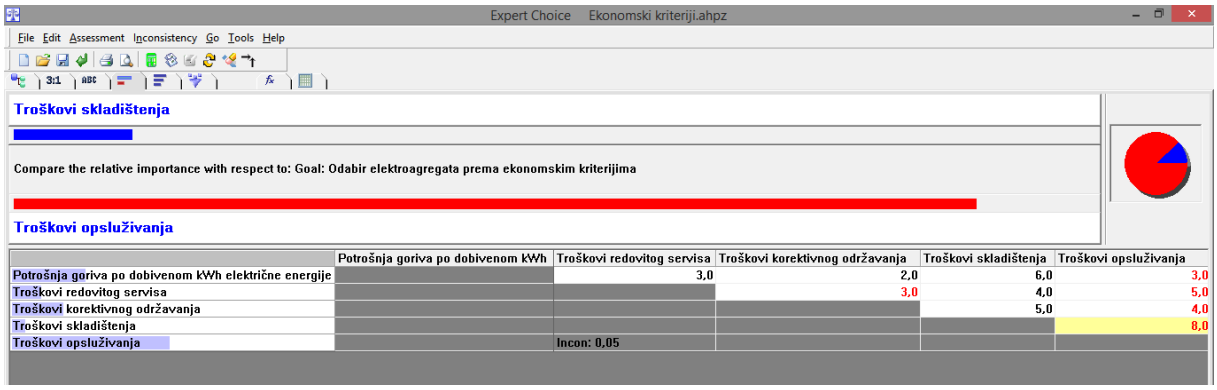
Slika D6. Uspoređivanje važnosti kriterija „Troškovi redovitog servisa“ i „Troškovi opsluživanja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



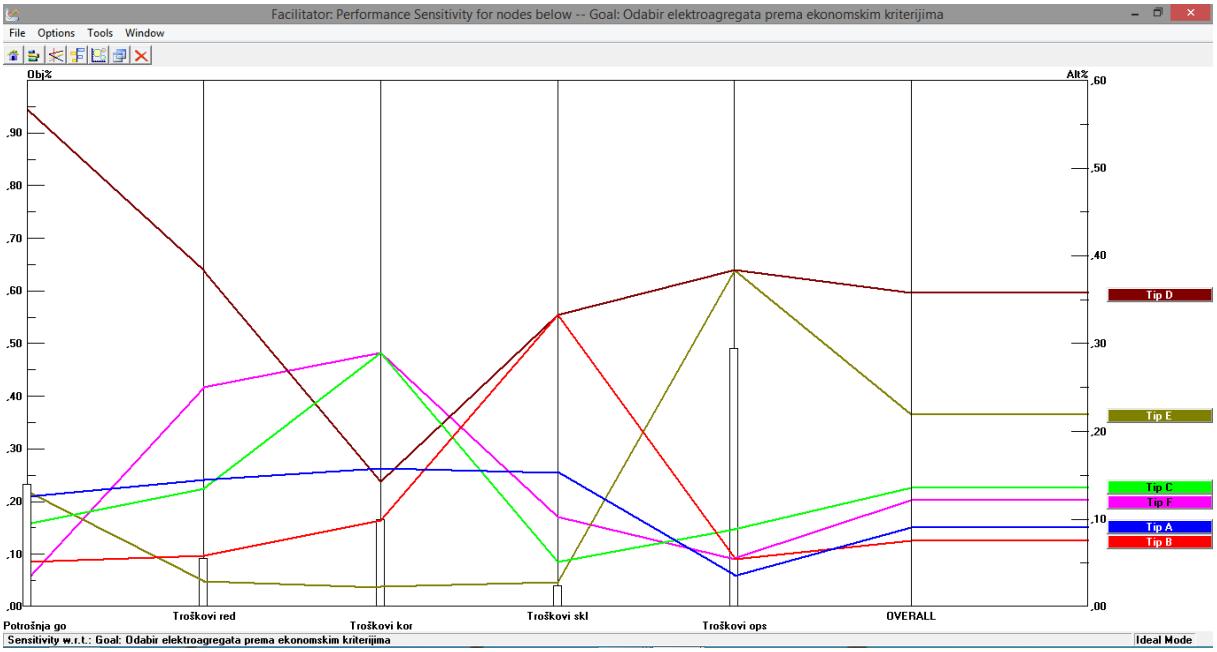
Slika D7. Uspoređivanje važnosti kriterija „Troškovi korektivnog održavanja“ i „Troškovi skladištenja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



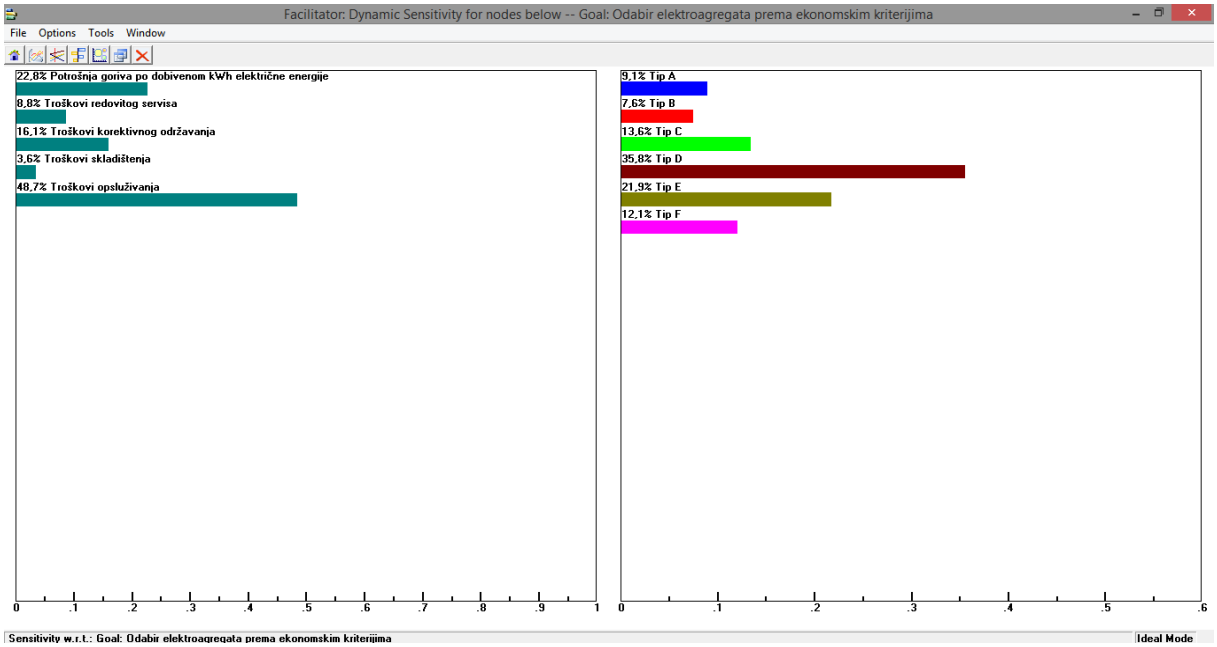
Slika D8. Uspoređivanje važnosti kriterija „Troškovi korektivnog održavanja“ i „Troškovi opsluživanja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



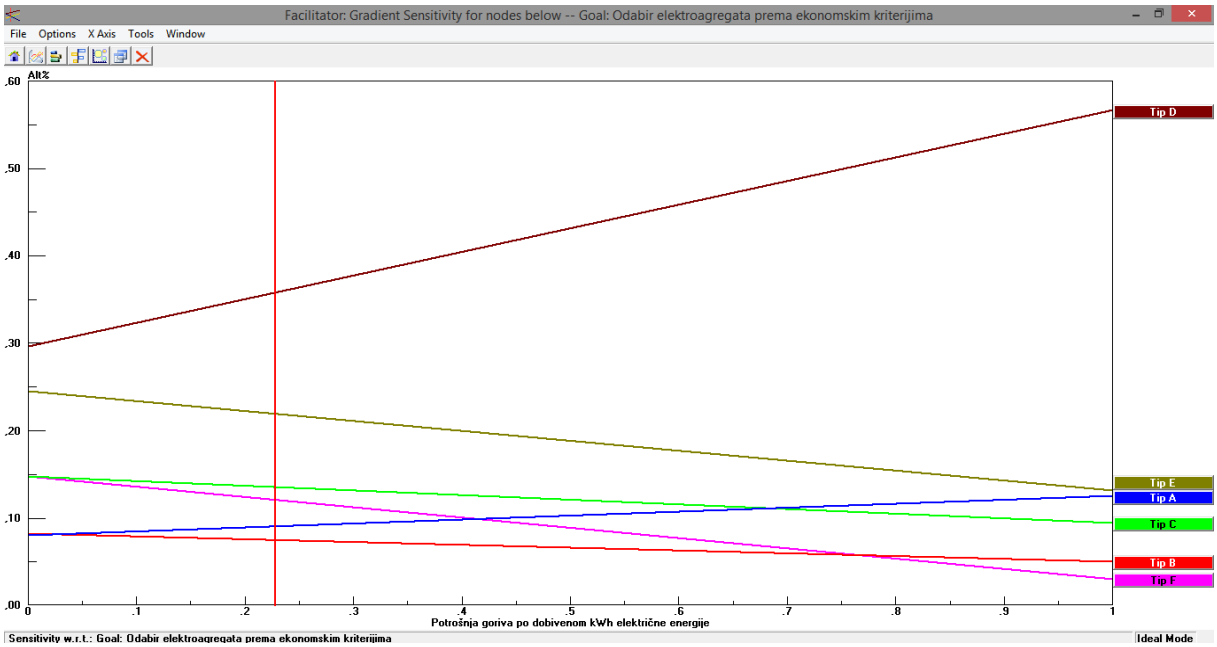
Slika D9. Uspoređivanje važnosti kriterija „Troškovi skladištenja“ i „Troškovi opsluživanja“ za potrebe odabira elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



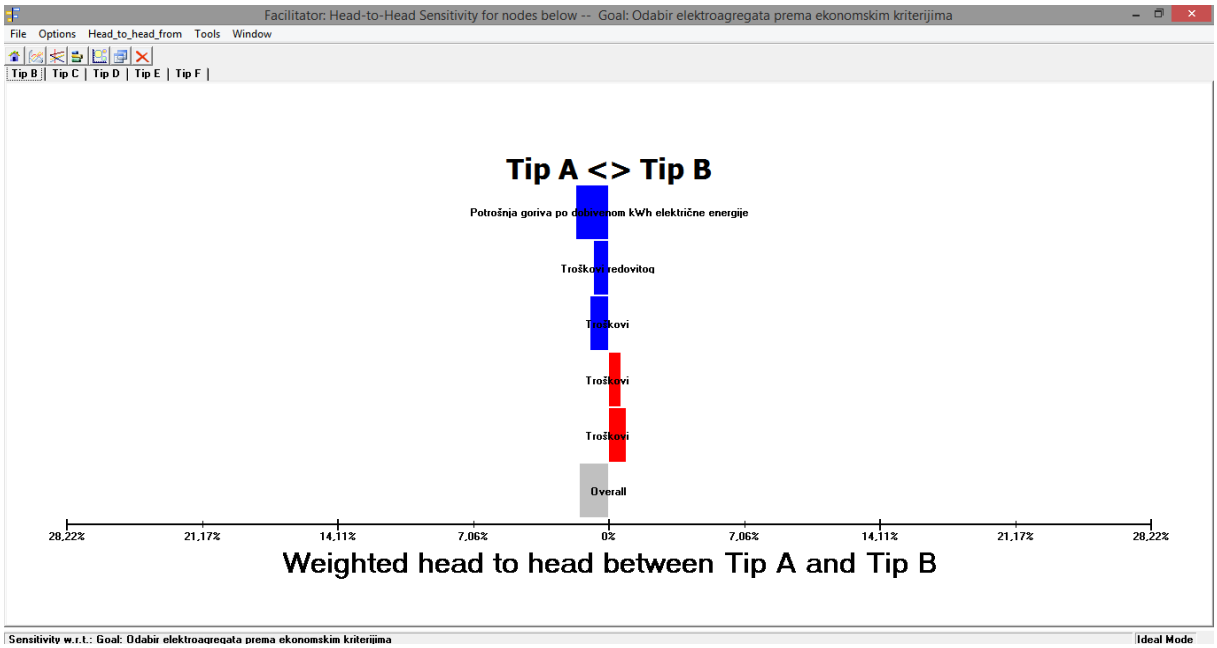
Slika D10. Analiza osjetljivosti Performance - Odabir elektroagregata prema ekonomskim kriterijima



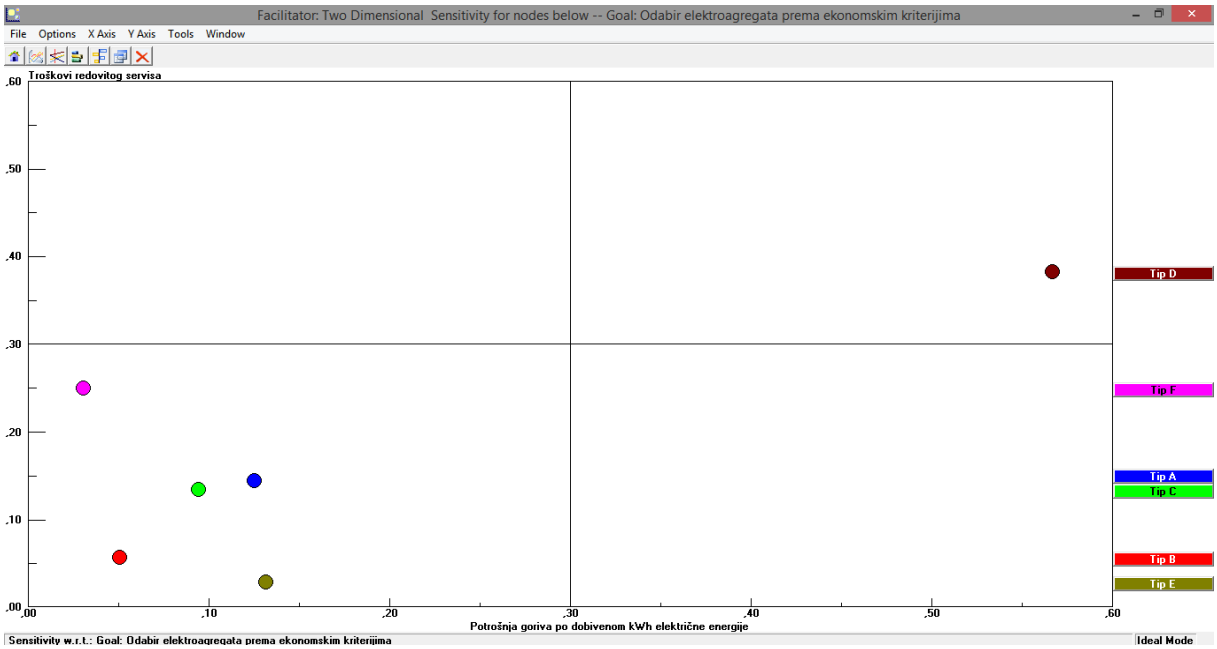
Slika D11. Dynamic prikaz utjecaj promjena težina kriterija na prioritet alternativa kod odabira prema ekonomskim kriterijima



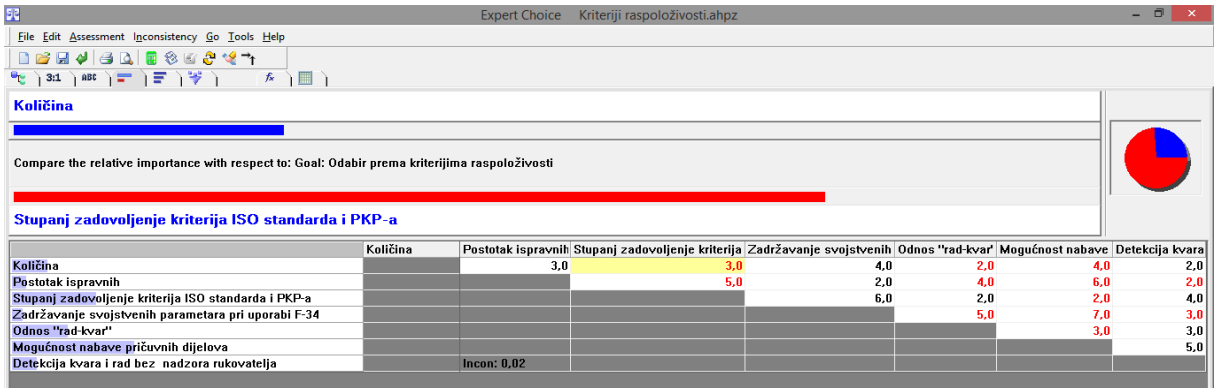
Slika D12. Gradient prikaz osjetljivosti alternativa na promjene težine kriterija Potrošnja goriva po dobivenom kWh električne energije kod odabira prema ekonomskim kriterijima



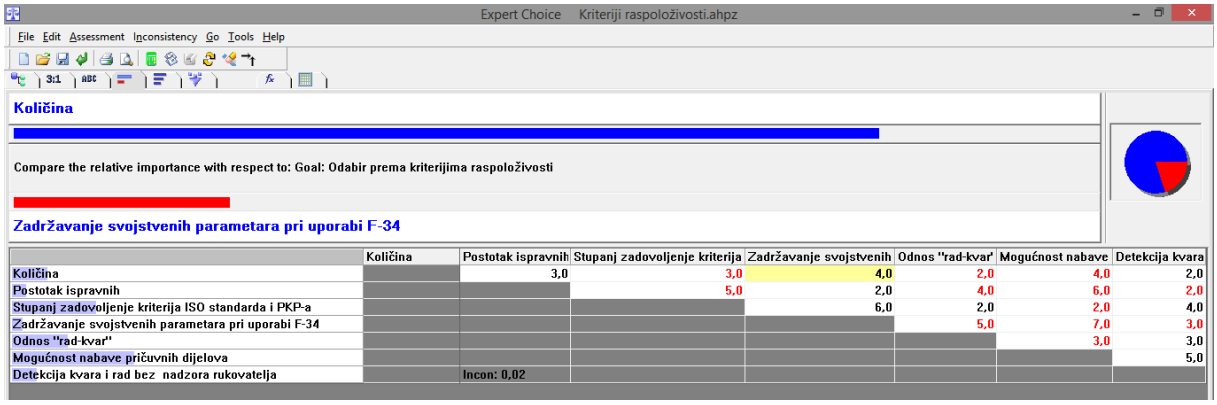
Slika D13. Head-to-Head prikaz alternativa Tip A i Tip B kod odabira prema ekonomskim kriterijima



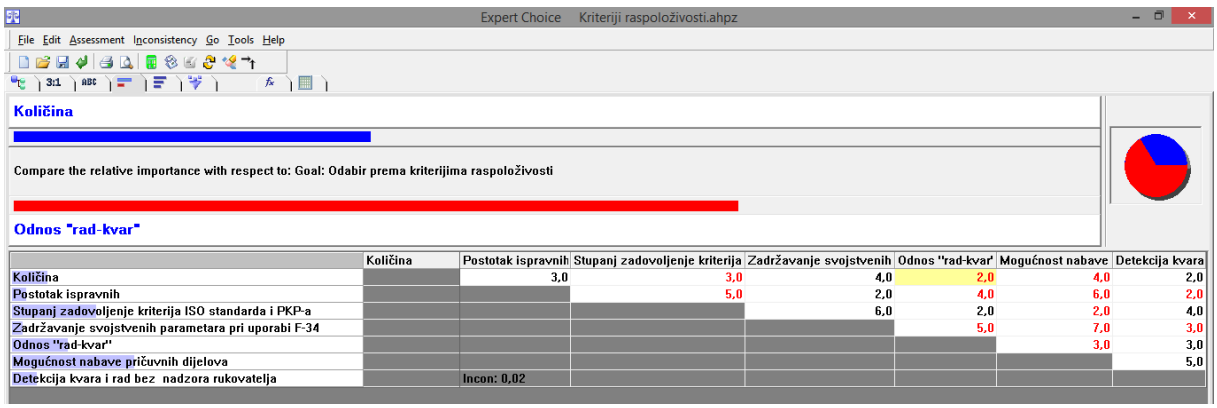
Slika D14. 2D prikaz osjetljivosti prioriteta alternativa pri usporedbi kriterija Potrošnja goriva po dobivenom kWh električne energije i Troškova redovitog održavanja kod odabira prema ekonomskim kriterijima



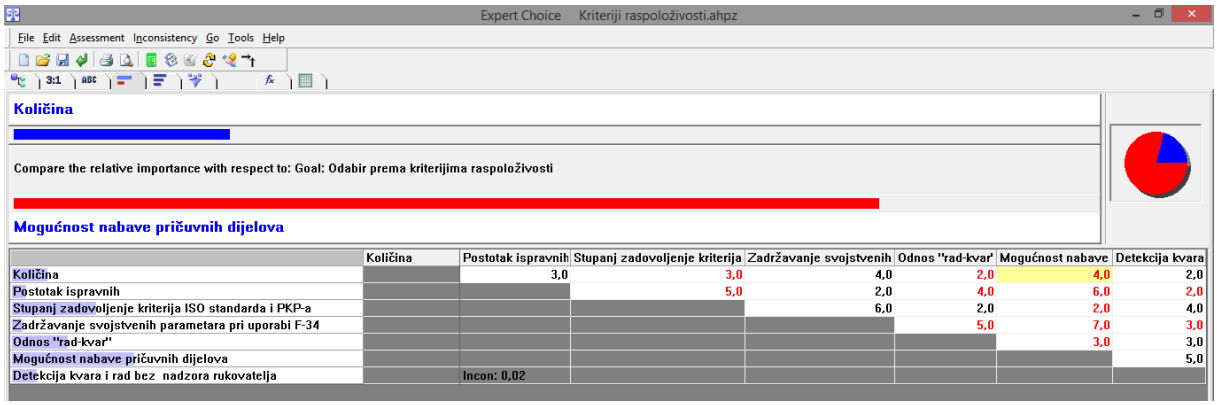
Slika D15. Uspoređivanje važnosti kriterija „Količina“ i „Stupanj zadovoljenja kriterija ISO standarda i PKP-a“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



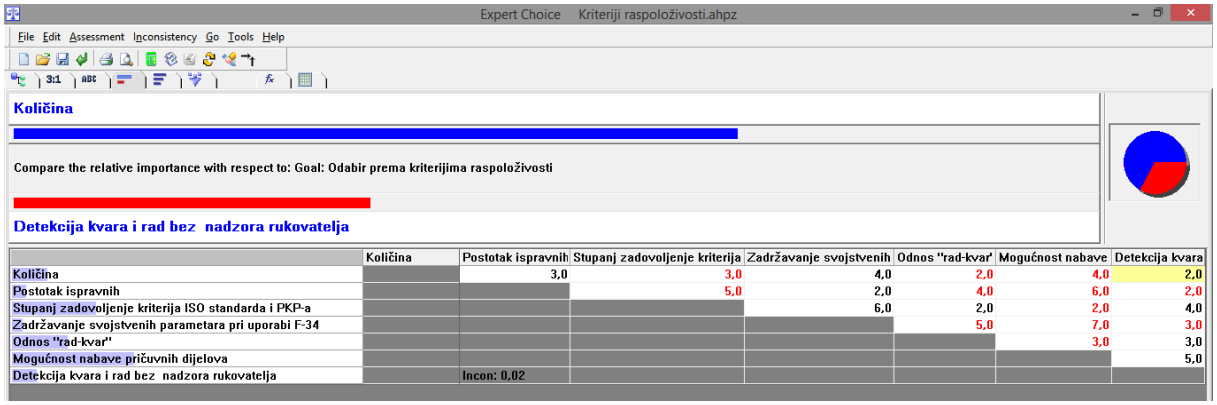
Slika D16. Uspoređivanje važnosti kriterija „Količina“ i „Zadržavanje svojstvenih parametara pri uporabi F-34“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



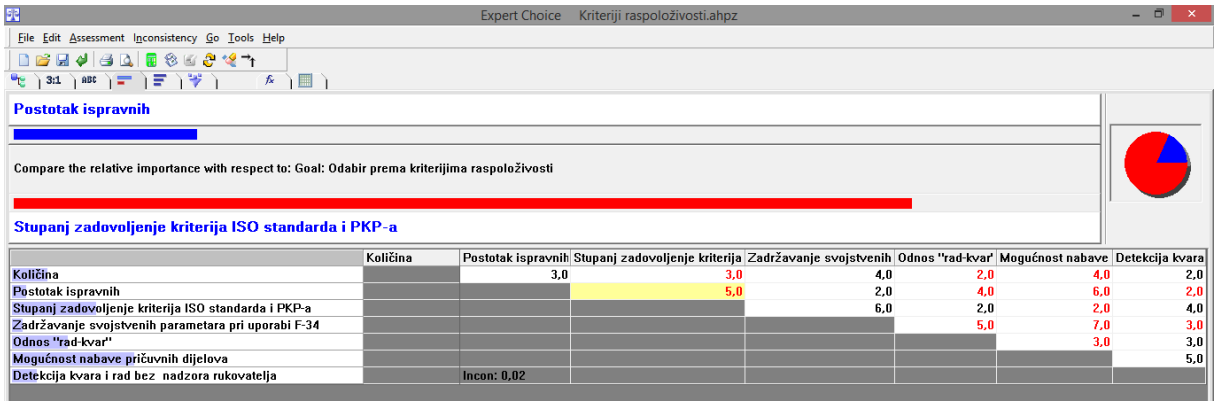
Slika D17. Uspoređivanje važnosti kriterija „Količina“ i „Odnos rad-kvar“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



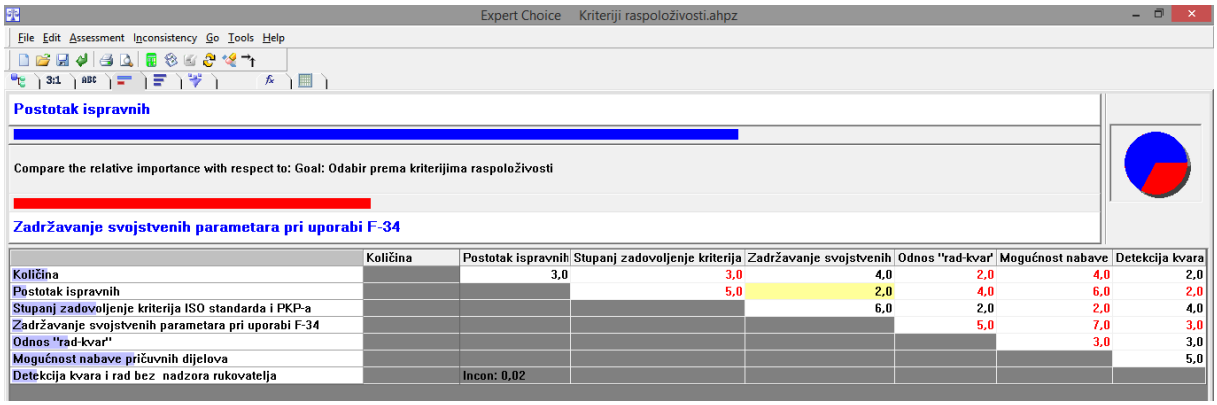
Slika D18. Uspoređivanje važnosti kriterija „Količina“ i „Mogućnost nabave pričuvnih dijelova“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



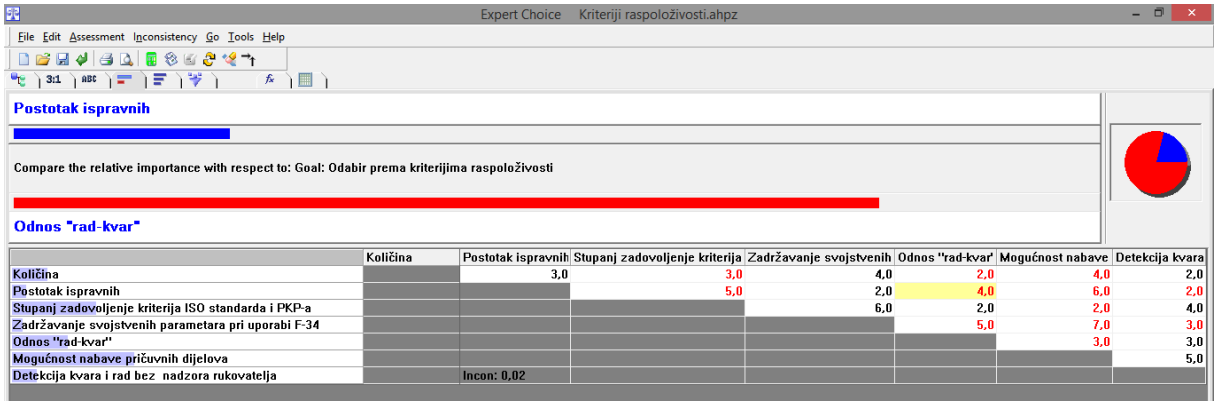
Slika D19. Uspoređivanje važnosti kriterija „Količina“ i „Detekcija kvara i rad bez nadzora rukovatelja“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



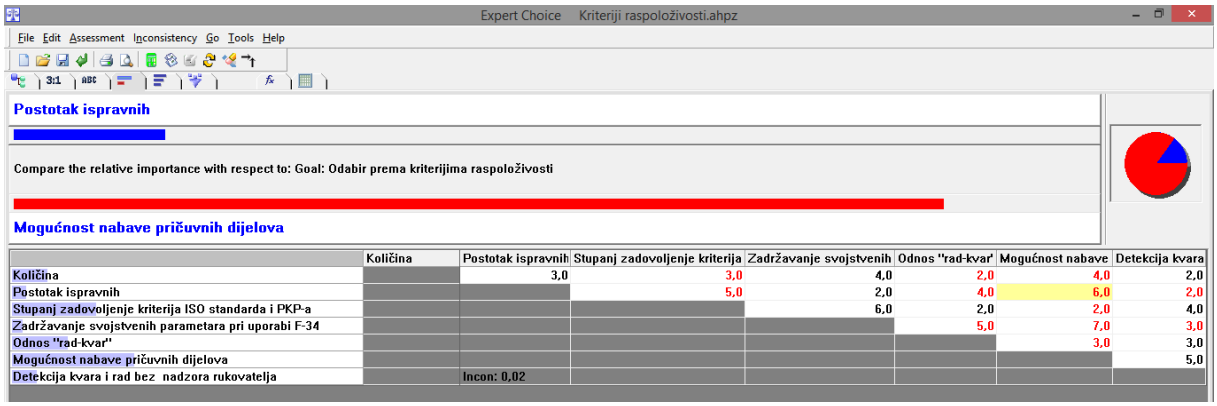
Slika D20. Uspoređivanje važnosti kriterija „Postotak ispravnih“ i „Stupanj zadovoljenja kriterija ISO i PKP-a“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



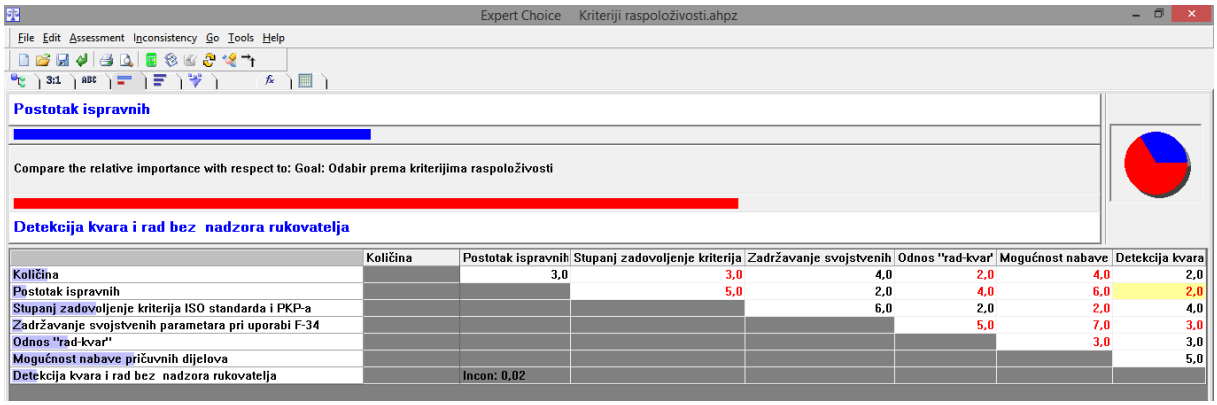
Slika D21. Uspoređivanje važnosti kriterija „Postotak ispravnih“ i „Zadržavanje svojstvenih parametara pri uporabi F-34“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



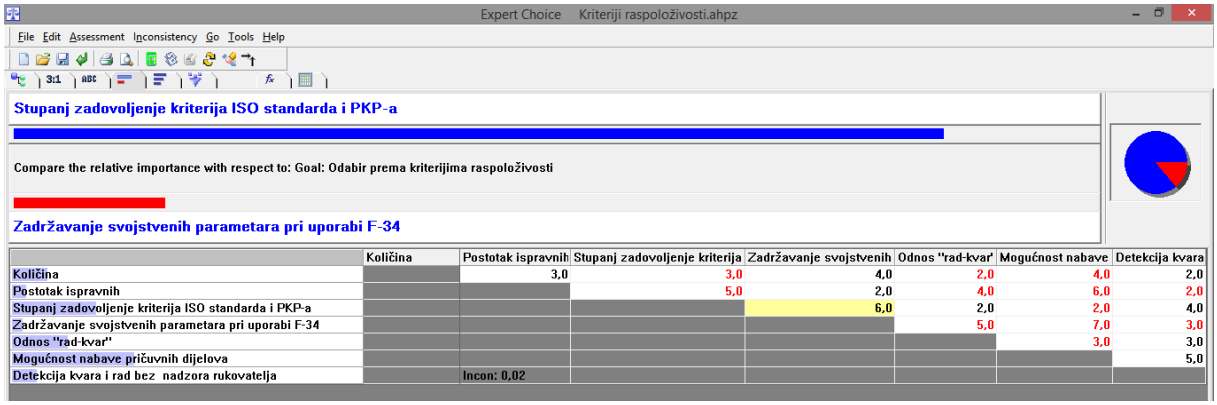
Slika D22. Uspoređivanje važnosti kriterija „Postotak ispravnih“ i „Odnos rad-kvar“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



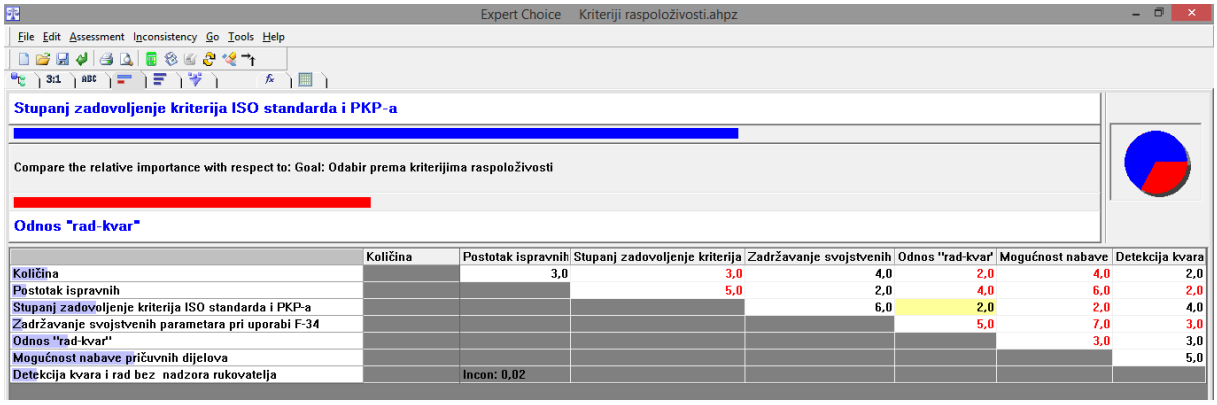
Slika D23. Uspoređivanje važnosti kriterija „Postotak ispravnih“ i „Mogućnost nabave pričuvnih dijelova“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



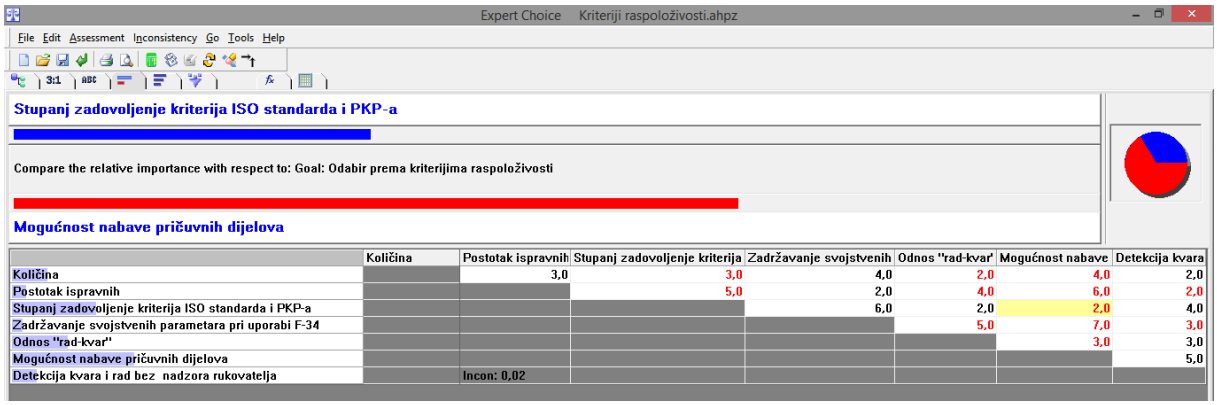
Slika D24. Uspoređivanje važnosti kriterija „Postotak ispravnih“ i „Detekcija kvara i rad bez nadzora rukovatelja“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



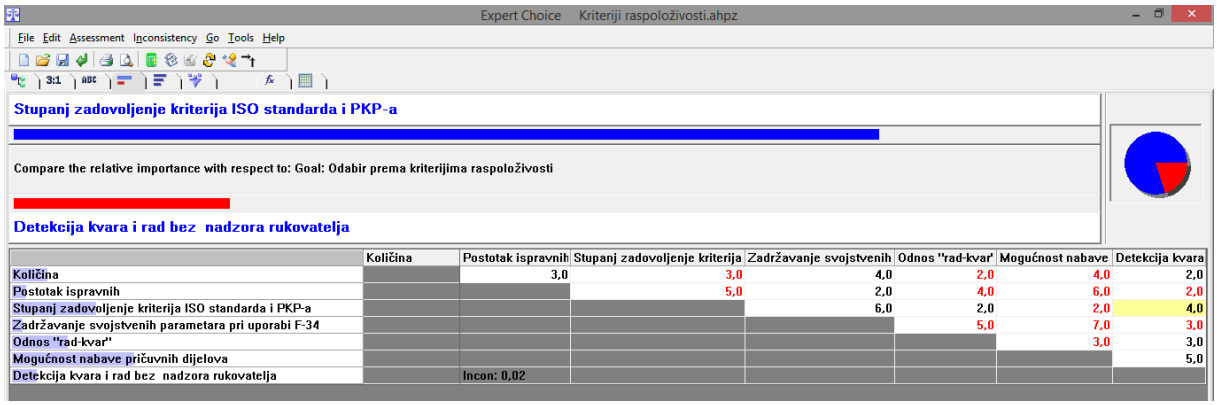
Slika D25. Uspoređivanje važnosti kriterija „Stupanj zadovoljenja kriterija ISO standarda i PKP-a“ i „Zadržavanje svojstvenih parametara pri uporabi F-34“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



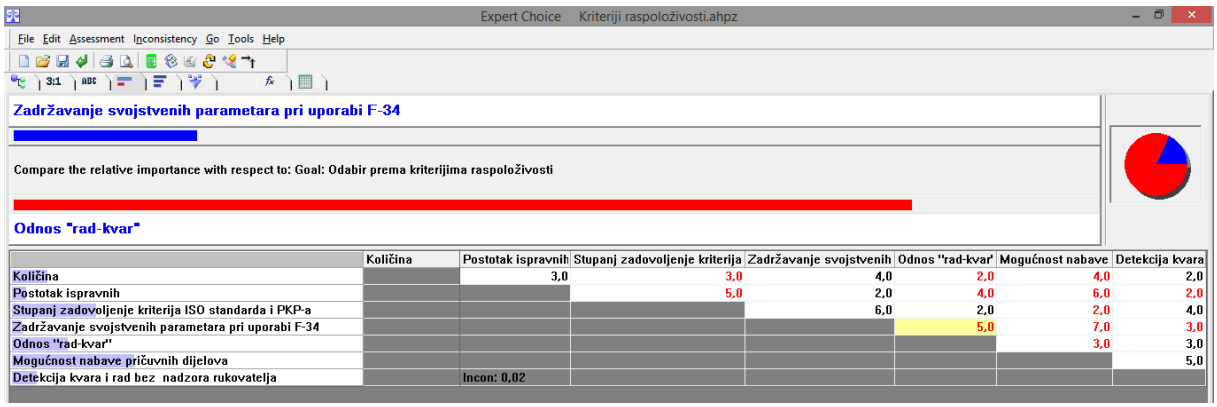
Slika D26. Uspoređivanje važnosti kriterija „Stupanj zadovoljenja kriterija ISO standarda i PKP-a“ i „Odnos rad-kvar“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



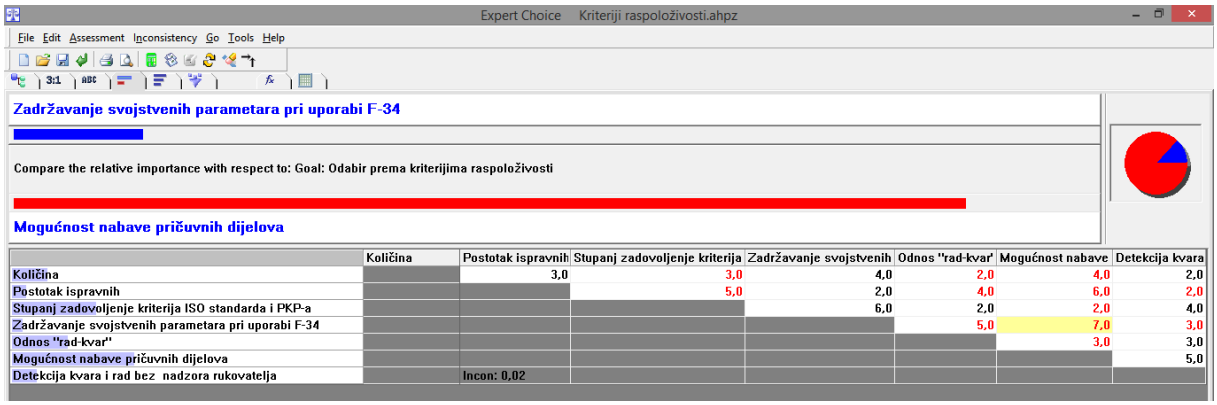
Slika D27. Uspoređivanje važnosti kriterija „Stupanj zadovoljenja kriterija ISO standarda i PKP-a“ i „Mogućnost nabave pričuvnih dijelova“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



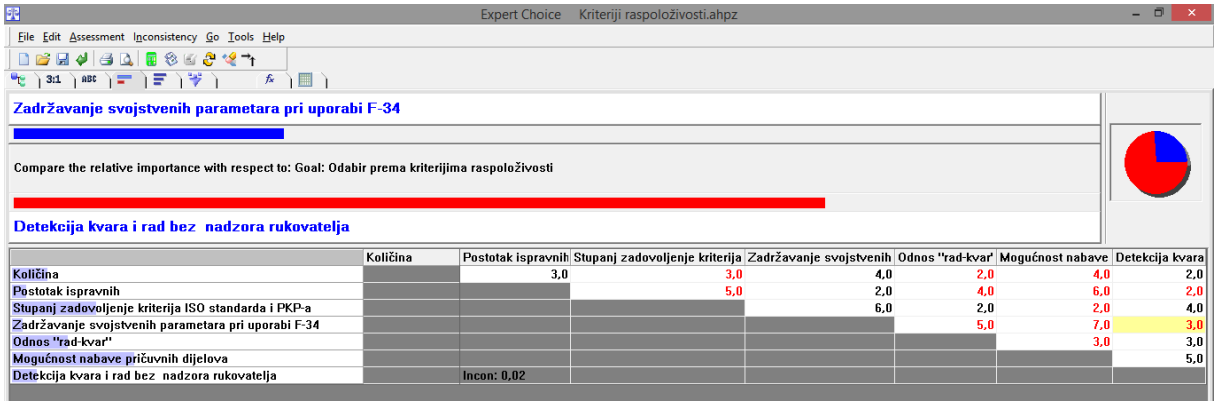
Slika D28. Uspoređivanje važnosti kriterija „Stupanj zadovoljenja kriterija ISO standarda i PKP-a“ i „Detekcija kvara i rad bez nadzora rukovatelj“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



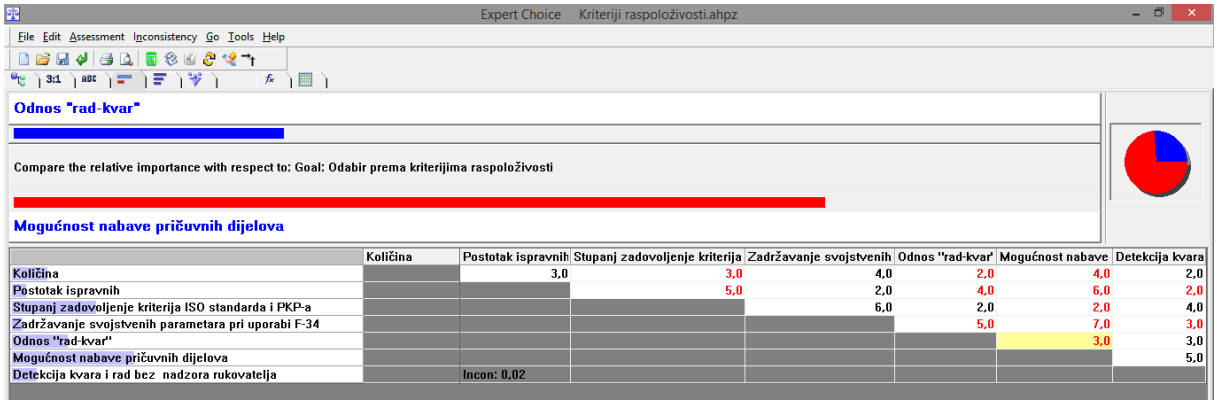
Slika D29. Uspoređivanje važnosti kriterija „Zadržavanje svojstvenih parametara pri uporabi F-34“ i „Odnos rad-kvar“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



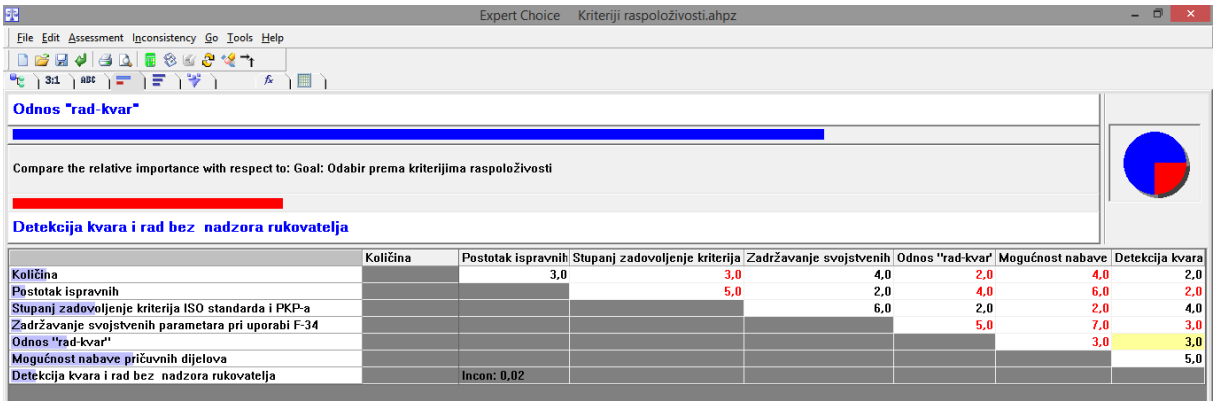
Slika D30. Uspoređivanje važnosti kriterija „Zadržavanje svojstvenih parametara pri uporabi F-34“ i „Mogućnost nabave pričuvnih dijelova“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



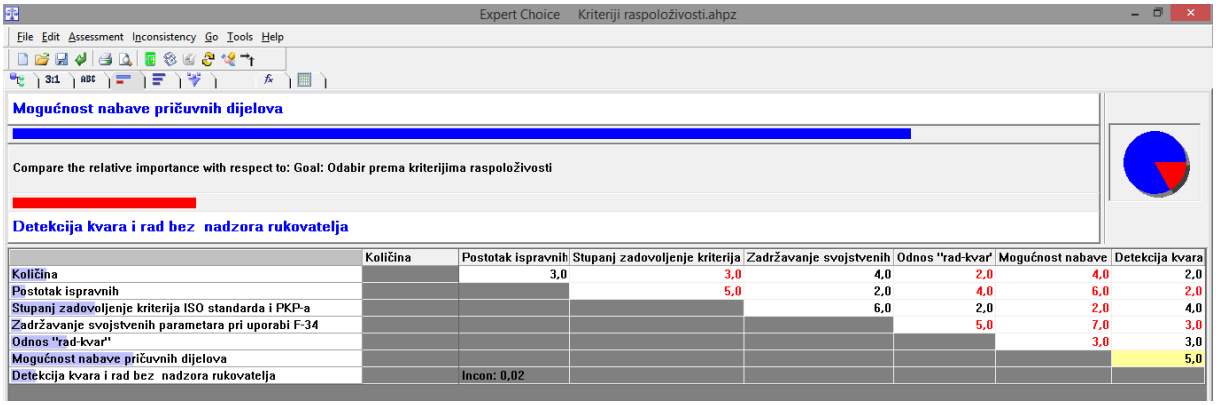
Slika D31. Uspoređivanje važnosti kriterija „Zadržavanje svojstvenih parametara pri uporabi F-34“ i „Detekcija kvara i rad bez nadzora rukovatelja“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



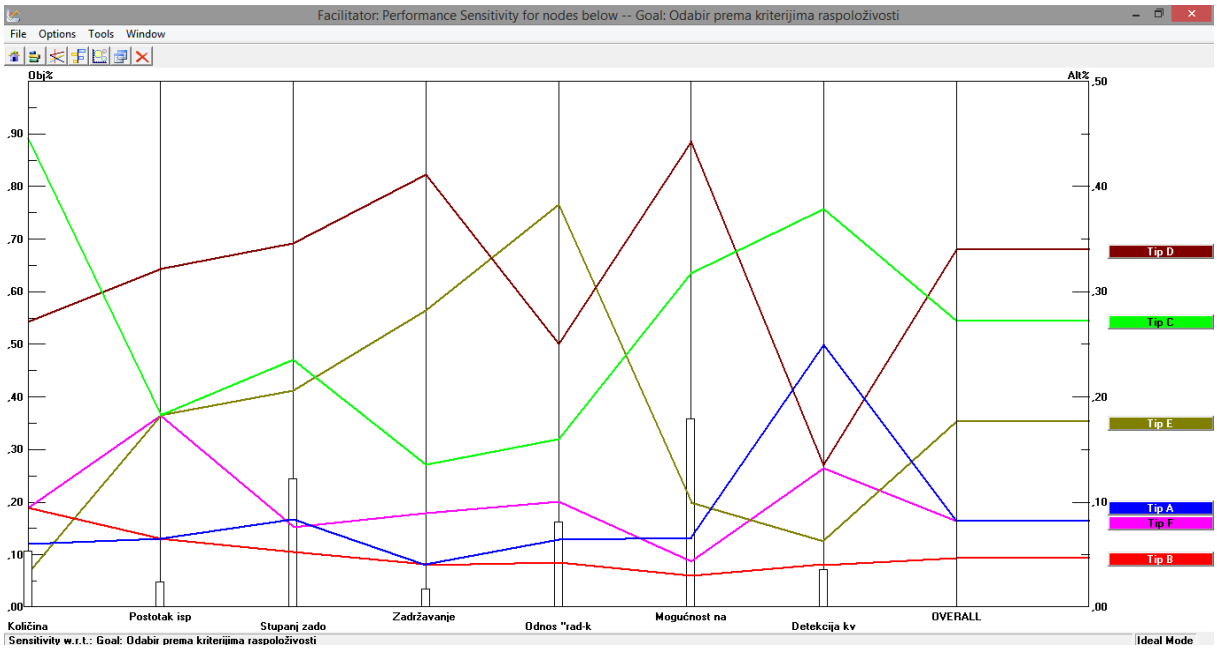
Slika D32. Uspoređivanje važnosti kriterija „Odnos rad-kvar“ i „Mogućnost nabave pričuvnih dijelova“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



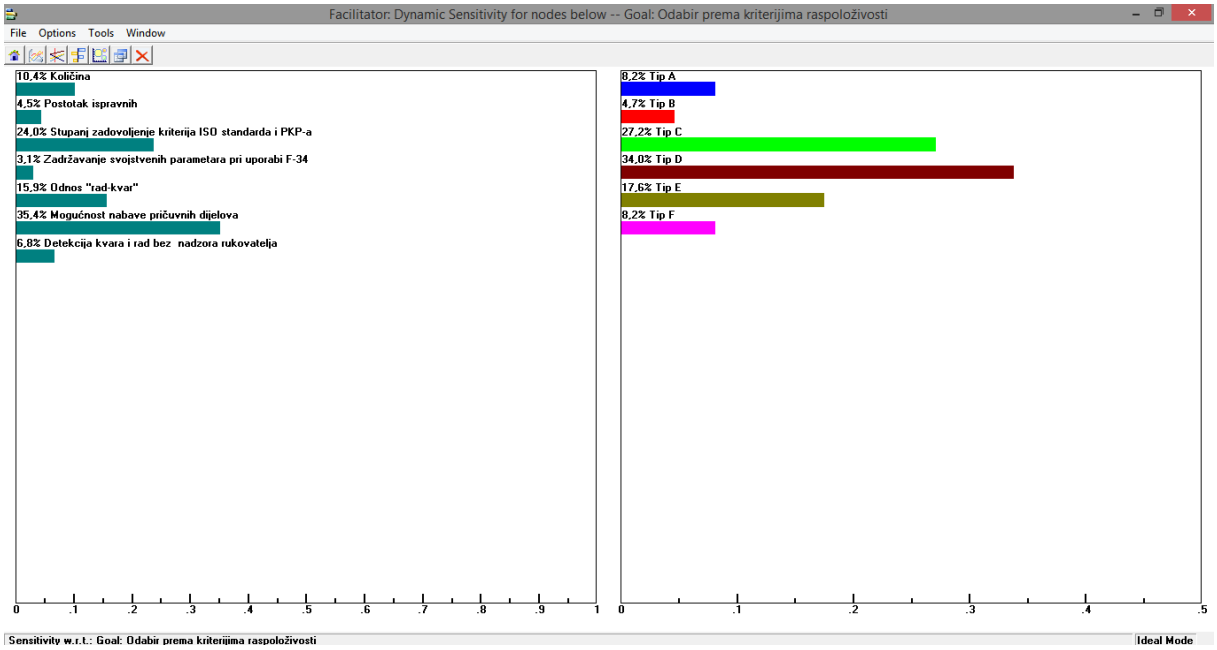
Slika D33. Uspoređivanje važnosti kriterija „Odnos rad-kvar“ i „Detekcija kvara i rad bez nadzora rukovatelja“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



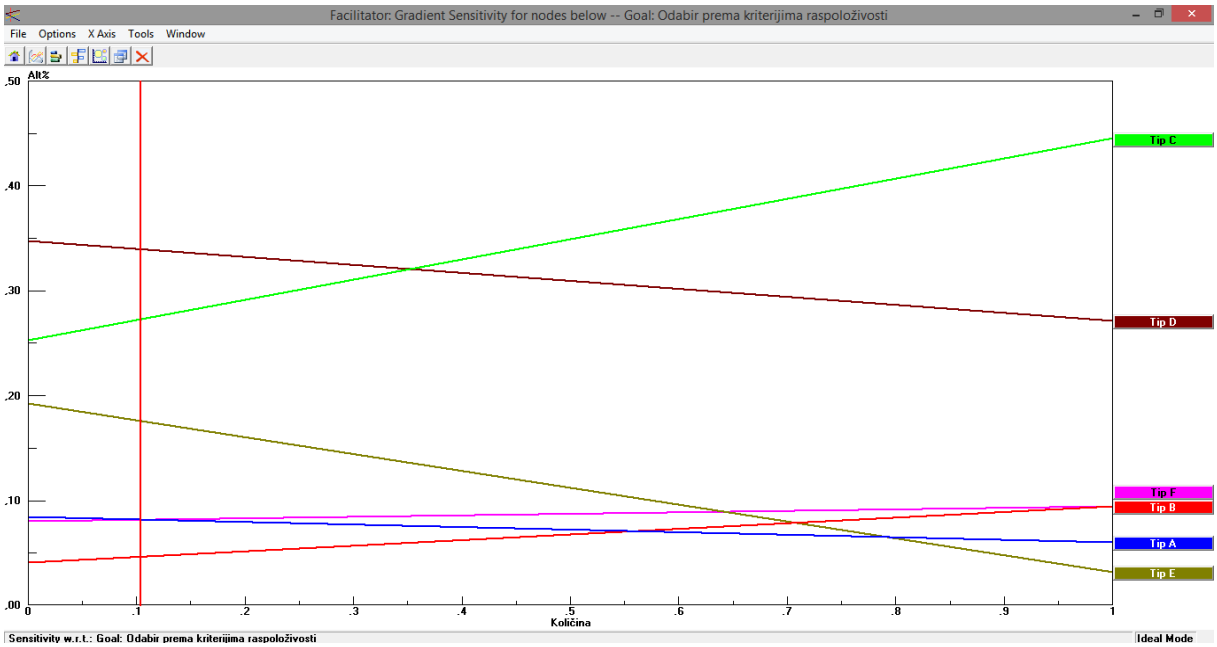
Slika D34. Uspoređivanje važnosti kriterija „Mogućnost nabave pričuvnih dijelova“ i „Detekcija kvara i rad bez nadzora rukovatelja“ za potrebe odabira prema kriterijima raspoloživosti



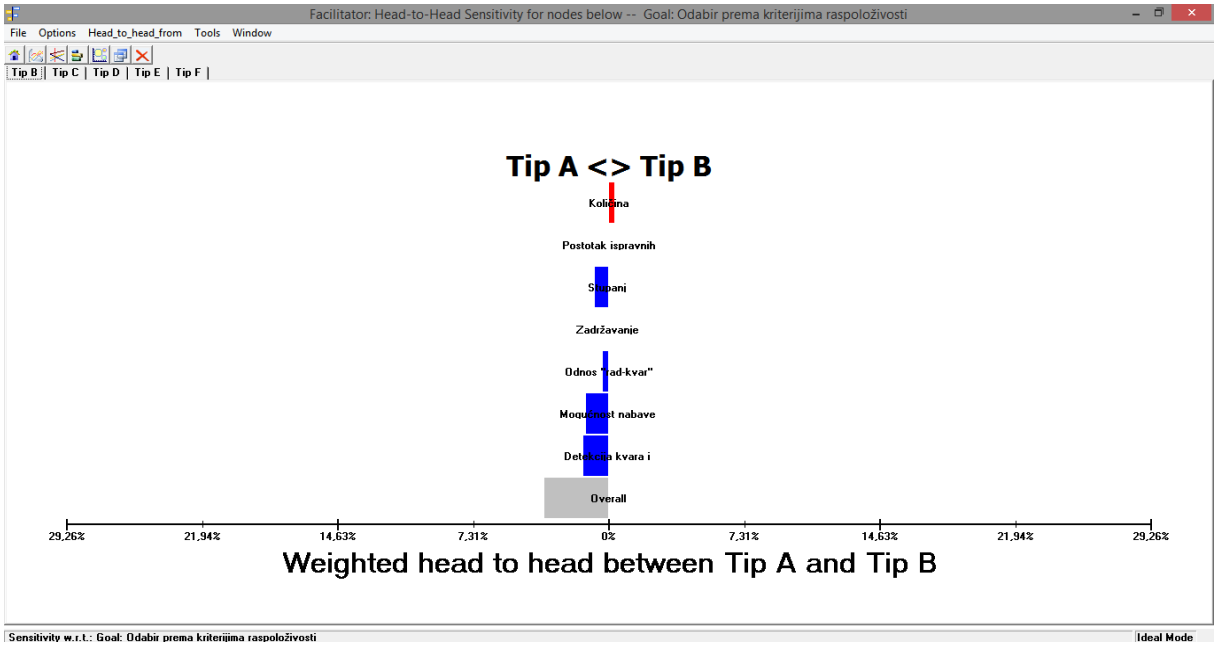
Slika D35. Analiza osjetljivosti Performance - Odabir elektroagregata prema kriterijima raspoloživosti



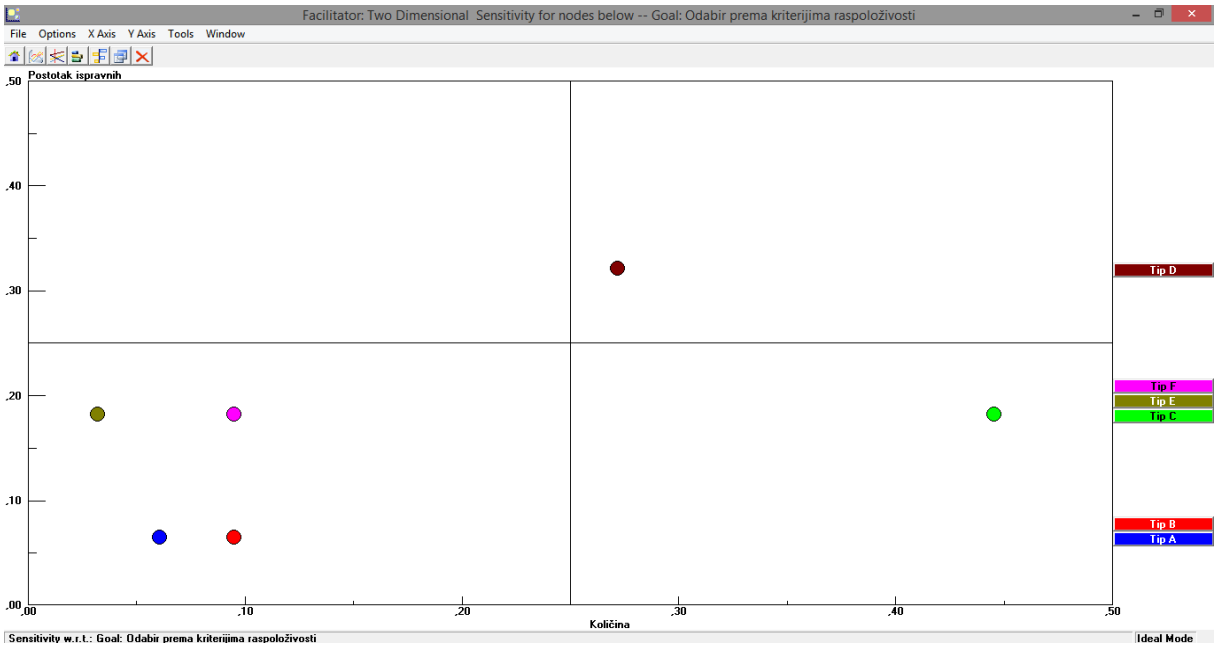
Slika D36. Dynamic prikaz utjecaj promjena težina kriterija na prioritet alternativa kod odabira prema kriterijima raspoloživosti



Slika D37. Gradient prikaz osjetljivosti alternativa na promjene težine kriterija Količina kod odabira prema kriterijima raspoloživosti



Slika D38. Head-to-Head prikaz alternativa Tip A i Tip B kod odabira prema kriterijima raspoloživosti



Slika D39. 2D prikaz osjetljivosti prioriteta alternativa pri usporedbi kriterija Količina i Postotak ispravnih kod odabira prema kriterijima raspoloživosti