

MODERNIZACIJA MOBILNIH ELEKTROAGREGATA

MODERNISATION OF MOBILE GENSETS

Dejan Barešić, Željko Hederić, Marinko Barukčić

Stručni članak

Sažetak: Mobilni elektroagregati namijenjeni su za napajanje potrošača električnom energijom u terenskim uvjetima. Neophodni su pri nastanku većih šteta i kvarova na infrastrukturi do kojih dolazi u slučaju elementarnih nepogoda i ratnih djelovanja. Stoga je značajna njihova pouzdanost i učinkovitost, kako u civilnim tako i vojnim strukturama. Provedbom modernizacije pojednostavljuje se uporaba i održavanje te proširuje mogućnost njihove primjene. To rezultira uštedom financijskih sredstava što predstavlja značajan iznos, naročito u vojnim sustavima gdje se pojavljuje velik broj elektroagregata. Sagledavanjem stanja utvrđeno je da se radi o sredstvima koja nisu opremljena učinkovitim sustavima za zaštitu i upravljanje. Za potrebe modernizacije provedena je detaljna analiza i snimanje karakteristika senzora za prikupljanje informacija, što je uz stvaranje baze znanja i obradu informacija težište ovoga rada. Informacije prikupljene sa senzora obrađuju se u sklopu za zaštitu i upravljanje koji na principu ekspertnog sustava, Bayesovom metodom određuje vjerojatnost pojave određenog stanja elektroagregata. Temeljem obrađenih informacija utječe se na rad zaštitno upravljačkih sklopova.

Ključne riječi: Bayesova metoda, elektroagregat, modernizacija, obrada informacija, senzor

Professional paper

Abstract: Mobile gensets are designed for supplying consumers of electric power in outdoor environments. They become necessary in case of some major damage or malfunction of the infrastructure that may occur in the event of natural disasters or military operations. For this reason, their reliability and efficiency is of critical importance, both for civilian and for military structures. By modernising them, we could simplify their use and maintenance and extend the scope of their application. That would result in reduced costs which are considerable, especially when it comes to military systems where a large number of mobile gensets is used. After having examined their condition, it was determined that the equipment in question does not contain effective protection and control systems. For the purpose of modernisation, a detailed analysis and screening of the characteristics of data collection sensors was carried out, which, along with the development of a knowledge base and data processing, is the focus of this paper. The data gathered from the sensors are processed in the protection and control system, which, through the application of the expert system principle, and the Bayesian method determines the likelihood of the appearance of a particular condition in mobile gensets. Based on the processed data, the operation of the protection and control circuits can be modified.

Key words: Bayesian method, mobile genset, modernisation, data processing, sensor

1. UVOD

Mobilni elektroagregati upotrebljavaju se za napajanje potrošača električnom energijom u terenskim uvjetima. Često se upotrebljavaju u Oružanim snagama za osiguranje električne energije na izdvojenim vojnim poligonima i ratom zahvaćenim područjima u međunarodnim vojnim operacijama.

Slijedom toga da o njihovoj ispravnosti ovisi velika količina opreme, koja za svoj rad koristi električnu energiju i služi za zaštitu ljudstva i materijalno tehničkih sredstava, velik se značaj pridaje održavanju i što bržem otklonu kvara ukoliko do njega dođe. Redovito se prate njihova stanja i predlažu mjere kako bi se povećala pouzdanost i raspoloživost te mogućnost primjene u različitim režimima rada.

Analizom podataka uočeno je da postoji veći broj starijih tipova elektroagregata koji nisu opremljeni učinkovitim sustavom za zaštitu i upravljanje, već rade pod stalnim nadzorom rukovatelja što u današnje vrijeme nije prihvatljivo. Dosadašnjim ispitivanjima utvrđeno je da se mogu prilagoditi zahtjevima koji se nameću u međunarodnim vojnim operacijama, kao što su mogućnost uporabe kerozinskog goriva F-34 za pogon dizel motora i rad na povišenoj frekvenciji (60 Hz) [1]. Za provedbu prilagodbe potrebni su zahvati na sustavu za dovod goriva uz stalno praćenje parametara rada kao što su brzina vrtnje, temperatura motora i generatora te tlak ulja u sustavu za podmazivanje pogonskog motora. Uz ovu prilagodbu razmatra se proširenje modernizacije sredstava kako bi se ostvarila mogućnost njihove uporabe bez nadzora rukovatelja i mogućnost samo dijagnosticanja kvarova što je naročito bitno u

međunarodnim vojnim operacijama gdje ne mogu uvijek biti visoko specijalizirani mehaničari s velikom količinom dijagnostičke opreme. Cilj je sve elektroagregate opremiti univerzalnim sklopom za zaštitu i upravljanje koji će prikupljati informacije sa senzora, obrađivati ih i upravljati elektroagregatom. Obrada informacija i donošenje odluke o stanju sredstva odvijat će se na principima ekspertnih sustava [2]. Bayesovim pravilom određivat će se vjerojatnost određenog stanja a potom utjecati na zaštitno upravljačke sklopove. Sklop za zaštitu i upravljanje (SZU) ima tri bitna svojstva:

- upravljanje za vrijeme rada
- zaštita i zaustavljanje u slučaju kvara
- ispis mogućih smetnji i kvarova.

Za učinkovitu provedbu modernizacije i pravilan rad sklopa za zaštitu i upravljanje, prvo i ključno je dobivanje valjane informacije o stanju procesa, a zatim ispravna obrada dobivene informacije. Stoga je bitna uloga senzora koji određenu veličinu iz procesa pretvaraju u električni signal a potom obrada informacije koja se temelji na „tablici znanja“. Zbog toga je u radu poseban naglasak na sensorima i stvaranju baze znanja.

2. SENZORI ZA PRAĆENJE STANJA RADA ELEKTROAGREGATA

Senzori imaju bitnu ulogu pri zaštiti i upravljanju elektroagregata. Kod starijih tipova uglavnom daju informaciju za pokazne instrumente kako bi rukovatelj mogao pratiti stanje sredstva, najčešće temperaturu, tlak ulja u sustavu za podmazivanje i brzinu vrtnje. Pri nešto novijim tipovima, osim za pokazne instrumente služe i za zaštitu elektroagregata. Na primjer, ako dođe do povećanja temperature ili pada tlaka ulja, signal sa senzora, preko releja djeluje na elektromagnetski ventil koji zaustavlja elektroagregat. Kod najnovijih elektroagregata signali se obrađuju u upravljačkim jedinicama i djeluju na izvršne elemente koji provode zaštitu i upravljanje.

Održavanjem većeg broja starijih tipova elektroagregata, utvrđeno je da su opremljeni raznovrsnim sensorima, odnosno sensorima koji za istu mjerenu veličinu daju različiti električni signal. Takvi, identični senzori u današnje vrijeme teško su dobavljivi, a signal zamjenskih često ne odgovara signalu potrebnom za ispravan rad pokaznih instrumenata. Zbog toga se pristupilo detaljnom ispitivanju karakteristika senzora i iznalaženju prihvatljivih rješenja i predlaganju modernizacije.

2.1. Senzori za mjerenje temperature

Važnu ulogu u praćenju stanja rada i zaštiti pogonskog dizel ili benzinskog motora imaju senzori za mjerenje temperature. Kod ovakvih motora bitno je održavanje radne temperature u određenim granicama, tj. da se u što kraćem vremenu postigne određena temperatura i da se konstantno održava uz što manja odstupanja.

Kod motora s vodenim hlađenjem mjeri se temperatura tekućine u sustavu za hlađenje a kod motora sa zračnim hlađenjem mjeri se temperatura na cilindru. Senzor ima ulogu da kontinuirano daje signal ovisan o temperaturi, kako bi se moglo pravovremeno djelovati na sustav za ubrizgavanje goriva, bez obzira da li je riječ o hladnom motoru kada se korigira ubrizgavanje ili je riječ o pregrijavanju motora kada se utječe na njegovo zaustavljanje.

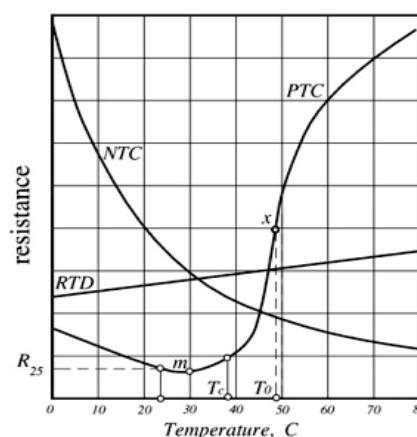
Danas se za mjerenje temperature tehničkih sustava uglavnom koriste otpornički osjetnici temperature i termistori, i to u većini slučajeva NTC termistori. NTC (Negative Temperature Coefficient), što znači da imaju negativan temperaturni koeficijent α , odnosno da im s porastom temperature otpor opada. NTC termistori sastoje se od sintetizirane mješavine metalnih oksida s mjernim područjem $-100...+400^{\circ}\text{C}$, a PTC (Positive Temperature Coefficient) termistori od feromagnetskih keramičkih materijala na bazi titana s mjernim područjem $-20...+200^{\circ}\text{C}$ [3]. Prednost termistora u odnosu na otporničke (RTD-Resistive Temperature Detector) pretvornike je što imaju za red veličine veći temperaturni koeficijent, a nedostatak im je nelinearna karakteristika, što se vidi na slici 1. Kao otpornički termometar najčešće se koristi platina (Pt100) zbog svoje izvanredne stabilnosti i približno linearne promjene otpora s temperaturom što se može prikazati pojednostavljenim izrazom:

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

$$R_0 = 100\Omega, \text{ pri } 0^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100^{\circ}\text{C} \cdot R_0} \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right] \quad (3)$$

Svi otpornički elementi imaju pozitivan temperaturni koeficijent.



Slika 1. Ovisnost o temperaturi PTC i NTC termistora u odnosu na RTD otpornički osjetnik temperature [4]

Kod NTC termistora nelinearna ovisnost $R(T)$ opisuje se različitim funkcijama a najčešće korištena je eksponencijalna aproksimacija [5]

$$R(T) = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (4)$$

gdje je

- B , konstanta ovisna o materijalu (izražava se u kelvinima, tipične vrijednosti su od 2000 do 5000K)
- T , temperatura u kelvinima

PTC termistori imaju vrlo strmu i izrazito nelinearnu karakteristiku $R(T)$. Najčešću primjenu imaju u zaštitnim krugovima, npr. za zaštitu elektromotora od pregrijavanja.

2.1.1. Snimanje promjene otpora pri promjeni temperature na različitim senzorima

Zbog problematike nabave u sustavu održavanja i prilagodbe senzora postojećim pokaznim instrumentima pristupilo se snimanju karakteristika postojećih senzora. Snimljene su karakteristike senzora s većeg broja različitih tipova elektroagregata. Pritom je utvrđeno da za istu mjerenu veličinu temperature uglavnom daju različite električne signale i da dominiraju senzori koji imaju negativan temperaturni koeficijent, odnosno da se koriste NTC senzori.

Snimanje je provedeno tako da je svaki senzor pojedinačno uronjen u rashladnu tekućinu koja je zagrijavana a pritom je mjereno otpor na senzoru i temperatura rashladne tekućine. Vrijeme zagrijavanja do 100°C je oko 20 minuta što približno simulira zagrijavanje dizel motora.

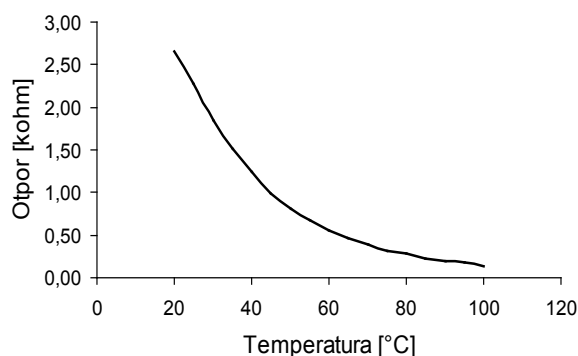
Za provedbu ispitivanja korištena su sljedeća sredstva:

- termometar TMDT 900 A sa sondom
- električna grijača ploča 1500 W
- metalna posuda 1,5 litra / Ø 120 mm
- rashladna tekućina Antifriz Al 40, specifikacija ASTM D 3306-00a TIP III INA N 22-112 TIP 2

Pri promjeni temperature za svakih 5 °C, očitana je vrijednost otpora na senzoru. Pritom su dobivene uglavnom različite vrijednosti za senzore različitih proizvođača. U tabeli 1 navedene su izmjerene vrijednosti otpora za određene temperature, a na slici 2 grafički je prikazana ovisnost otpora o promjeni temperature na senzoru „X“

Tabela 1. Mjerene vrijednosti otpora u ovisnosti o temperaturi senzora „X“

TEMPERATURA [°C]	OTPOR [kΩ]
20	2,660
30	1,850
40	1,250
50	0,810
60	0,550
70	0,390
80	0,280
90	0,200
100	0,134



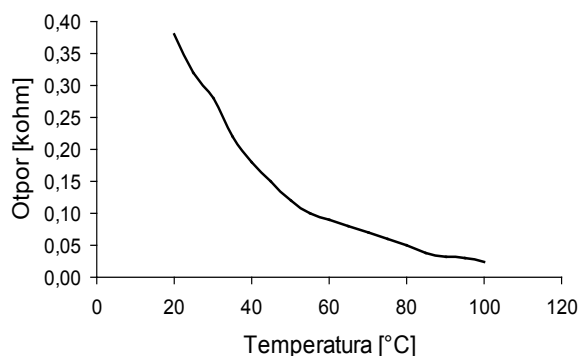
Slika 2. Ovisnost otpora o temperaturi senzora „X“

Kako bi se vidjela razlika koja se pojavljuje kod različitih tipova senzora u tabeli 2 navedene su očitane vrijednosti otpora pri različitim temperaturama na senzoru „Y“.

Tabela 2. Mjerene vrijednosti otpora u ovisnosti o temperaturi senzora „Y“

TEMPERATURA [°C]	OTPOR [kΩ]
20	0,380
30	0,280
40	0,180
50	0,120
60	0,090
70	0,070
80	0,050
90	0,032
100	0,024

Na senzoru „Y“ iznosi izmjerenih otpora znatno su manji od otpora izmjerenih na senzorima drugih proizvođača. Otpor ovoga senzora na sobnoj temperaturi je 380 Ω, a kod drugih senzora kreće se od 2500-7000 Ω. Na slici 3 grafički je prikazana ovisnost otpora o promjeni temperature. Krivulja nije glatka tako da se unosi pogreška u pokazni instrument na upravljačkoj ploči elektroagregata.



Slika 3. Ovisnost otpora o temperaturi senzora „Y“

2.1.2. Prijedlog ugradnje senzora temperature poznatih karakteristika

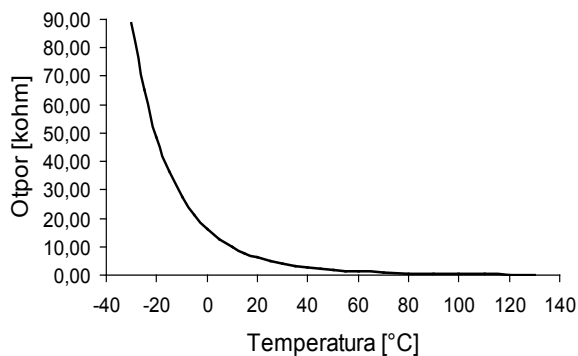
Budući da je cilj opremanje elektroagregata univerzalnim sustavom za zaštitu i upravljanje, predlaže se ugradnja senzora istog tipa na sve elektroagregate. Pritom bi se na svim tipovima elektroagregata za iste

iznose mjerenih veličina dobili isti električni signali, što je jedan od uvjeta da svi elektroagregati budu opremljeni jednakim sklopom za zaštitu i upravljanje. Stoga se predlaže ugradnja senzora poznatog proizvođača koji je lako dobavljiv i često se koristi u autoindustriji. Njegove karakteristike točno su poznate i dolaze uz tehničke upute, a prikazane su u tabeli 3.

Tabela 3. Vrijednosti iz kataloga poznatog proizvođača senzora

TEMPERATURA [°C]	OTPOR [kΩ]	DOPUŠTEN Odstupanje [Ω]
-30	88,50	± 5301
-20	48,54	± 2494
-10	27,67	± 1225
0	16,33	± 610,0
10	9,950	± 310,0
20	6,245	± 162,0
30	4,028	± 95,0
40	2,663	± 54,0
50	1,801	± 32,0
60	1,244	± 19,0
70	0,876	± 12,0
80	0,629	± 7,1
90	0,459	± 6,9
100	0,340	± 5,8
110	0,256	± 4,6
120	0,195	± 3,7
130	0,151	± 3,0

Iz slike 4 vidi se da je njegova krivulja promjene otpora glatka, što je bitno pri određivanju točne vrijednosti temperature i za daljnju obradu informacija.



Slika 4. Ovisnost otpora o temperaturi

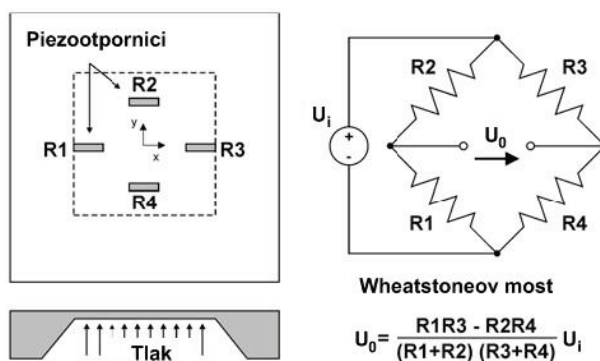
2.2. Senzori za mjerenje tlaka ulja

Kod dizel i benzinskih četverotaktnih motora potrebno je održavanje određenog tlaka ulja u sustavu za podmazivanje. Informaciju o visini tlaka daje senzor koji je postavljen na bloku motora. Ta informacija se prenosi do pokaznog instrumenta i sklopa za upravljanje koji zaustavlja motor ako dođe do pada tlaka. Ovisno o temperaturi ulja i brzini vrtnje motora tlak ulja se kreće u granicama od 1 do 5 bara.

Analizom je utvrđeno da se na elektroagregatima koriste različiti senzori za mjerenje tlaka, te da analogno kao prethodno navedeni senzori za mjerenje temperature,

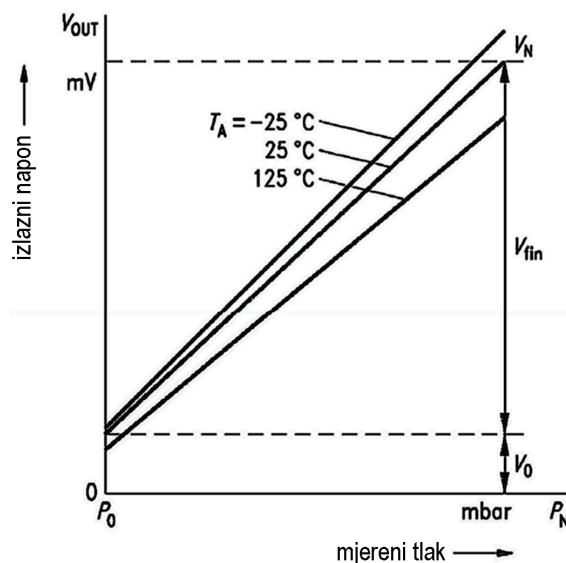
za istu mjerenu veličinu daju različiti električni signal. Da bi se mogla predložiti adekvatna zamjena, pristupilo se proučavanju literature i snimanju karakteristika senzora.

U promatranim elektroagregatima se za mjerenje tlaka koriste piezootpornički senzori, koji se izrađuju postupkom difundiranja tako da se na pločicu od silicija nanose metalni elementi koji sačinjavaju četiri otpornika. Djelovanjem tlaka na tako izvedenu piezootporničku pločicu dolazi do deformacije materijala, a time se mijenjaju i vrijednosti otpornika u površinskom sloju. Otpornici su povezani u Wheatstoneov most tako da se promjena otpora pretvara u naponski signal koji je razmjernan mjerenoj tlaku (slika 5). Pri tome vrijednosti izvedenih otpornika su u rasponu između 120 Ω i 5 kΩ, a promjene otpora nastale djelovanjem tlaka dosežu iznos od oko 0,05 Ω/mbar [3]. Mjerno područje im je između 0,1 i 1000 bara, uz temperature između -55 i 150°C, te točnost od ±0,1 bar.



Slika 5. Princip djelovanja piezootporničkog senzora tlaka

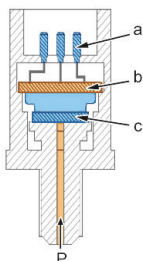
Silicijevi piezootpornički senzori imaju velik koeficijent pretvorbe (promjena otpora prouzročena tlakom), oko 120 puta veći od metalnih, što im je prednost, a glavni nedostatak im je temperaturna ovisnost što ima za posljedicu smanjenje osjetljivosti s porastom temperature što se vidi na slici 6.



Slika 6. Dijagram promjene izlaznog napona u ovisnosti o mjerenoj tlaku [6]

2.2.1. Prijedlog ugradnje senzora tlaka poznatih karakteristika

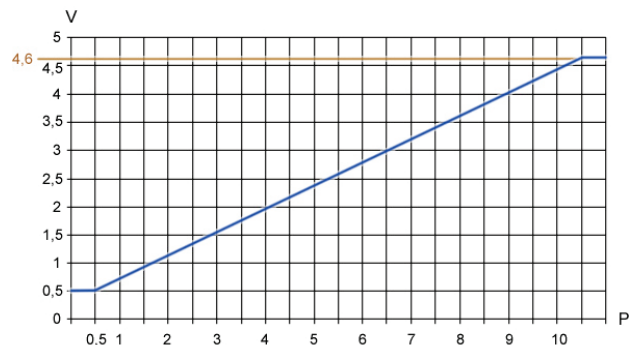
Kao što je navedeno i kod senzora temperature, cilj je na većinu sredstava ugraditi iste senzore, odnosno senzore istih karakteristika, kako bi se pojednostavilo praćenje i upravljanje pogonskim motorima. Prijedlog je ugradnja senzora tlaka ulja poznatog proizvođača čiji se presjek vidi na slici 7.



Slika 7. Presjek senzora tlaka ulja

Detekcijska ćelija "c" sadrži piezootpornike koji su na membrani koja je izložena tlaku ulja i spojeni su u Wheatstoneov most. Piezootpornici deformaciju membrane pretvaraju u variranje otpora, zatim u variranje napona od strane Wheatstonova mosta. Elektronički stupanj "b" pojačava signal koji proizvodi detekcijska ćelija na iskoristivu razinu i predaje ga na konektor "a".

Električna karakteristika senzora na slici 8 preuzeta je zajedno sa slikom 7 iz kataloga proizvođača.



Slika 8. Ovisnost napona o tlaku na senzoru

3. OBRADA PRIKUPLJENIH INFORMACIJA

Osim navedenih senzora, tijekom ispitivanja elektroagregati će se opremiti i drugim sensorima, kao što su senzori za mjerenje brzine vrtnje, senzori za detekciju vode u gorivu i sl.. Uz senzore, sredstva će se opremiti i preklopkama za vanjsko upravljanje kojima će se definirati dodatni režimi rada, npr. odabir frekvencije (50 Hz ili 60 Hz) i odabir vrste goriva (dizel gorivo ili kerozinsko gorivo). Sve informacije prikupljat će se u Sklopu za zaštitu i upravljanje (SZU), gdje će se obrađivati i donositi odluka o stanju sredstva. Temeljem donesene odluke preko izlaznih elemenata SZU provodit će se zaštita i upravljanje elektroagregata te ispis stanja na displayu.

Obrada informacija i donošenje pravilne odluke odvijat će se na principima ekspertnih sustava. Za pravilan rad sustava potrebna je točna informacija sa senzora i vjerodostojna „Baza znanja“. U bazi znanja koja je djelomično prikazana u tabeli 4 prvo su navedene najčešće neispravnosti, a zatim je hipotezama pridružena određena vjerojatnost. Podaci u tabeli 4 dobiveni su provedbom istraživanja i prikupljanjem podataka od ispitanika koji imaju višegodišnje iskustvo na održavanju elektroagregata. Prikazana tabela je samo isječak do sada sačinjene baze znanja, a koja će se u nastavku istraživanja proširivati, ovisno o opsegu provedbe modernizacije.

Tabela 4. Baza znanja s ulaznim vjerojatnostima

Hipoteza p(H)		pogonski dizel motor			električni generator	
		pokretanje je u redu	pokretanje nije u redu	pregrijava se u radu	pregrijava se u radu	
Kvar na pumpi visokog tlaka p(H ₁)=0,001	DA	0,8	0,2	0,2	-	
	NE	0,3	0,7	0,8	-	
Zaprljan filter goriva p(H ₂)=0,1	DA	0,3	0,7	-	-	
	NE	0,8	0,2	-	-	
Zrak u sustavu za dovod goriva p(H ₃)=0,02	DA	0,6	0,4	-	-	
	NE	0,4	0,6	-	-	
Prazan akumulator p(H ₄)=0,2	DA	0,7	0,3	-	-	
	NE	0,4	0,6	-	-	
Greška na elektro-pokretaču p(H ₅)=0,005	DA	0,9	0,1	-	-	
	NE	0,2	0,8	-	-	
Nedovoljna količina tekućine za hlađenje p(H ₆)=0,3	DA	-	-	0,99	-	
	NE	-	-	0,1	-	
Zaprljan hladnjak p(H ₇)=0,3	DA	-	-	0,8	-	
	NE	-	-	0,3	-	
Neispravna pumpa za vodu p(H ₈)=0,001	DA	-	-	0,95	-	
	NE	-	-	0,1	-	
Nedovoljna količina ulja u motoru p(H ₉)=0,05	DA	-	-	0,7	-	
	NE	-	-	0,3	-	
Preopterećen generator p(H ₁₀)=0,005	DA	-	-	0,5	0,95	
	NE	-	-	0,5	0,1	
Kratki spoj između faza generatora p(H ₁₁)=0,001	DA	-	-	-	0,99	
	NE	-	-	-	0	

Pojednostavljeni princip rada SZU može se prikazati na jednom jednostavnijem primjeru na sljedeći način:

1. senzor temperature signalizira povišenu temperaturu motora
2. iz tablice znanja po stupnju vjerojatnosti vidi se mogućnost nastanka sljedećih kvarova (nedovoljna količina tekućine za hlađenje, neispravna pumpa za vodu, zaprljan hladnjak, nedovoljna količina ulja u motoru, ...)

3. Bayesovom metodom izračunavaju se prave vrijednosti za određene činjenice
4. iz pravih vrijednosti izračunatih Bayesovom metodom određuje se i ispisuje stanje elektroagregata
5. sredstvo se zaustavlja ukoliko je kvar na popisu kvarova koji mogu prouzročiti nastanak većih oštećenja

Kao što je već navedeno, ovo je jednostavniji primjer, gdje je promatrana informacija s jednog senzora. Za preciznije određivanje kvara koristit će se informacije s više različitih senzora.

Primjena opisanih metoda trebala bi bitno pojednostaviti uporabu i održavanje elektroagregata, pri čemu će omogućiti rad bez stalnog nadzora rukovatelja i detektiranje kvarova bez eksterne dijagnostičke opreme i visoko specijaliziranih mehaničara. To je naročito bitno u međunarodnim vojnim operacijama, gdje se sredstva koriste u otežanim uvjetima rada.

3.1. Bayesova shema

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 $p(y|x)$.

$$p(y|x) = \frac{p(x \wedge y)}{p(x)} \quad (5)$$

Ako su dva događaja nezavisna tada vrijedi

$$p(x|y) = p(x) \quad (6)$$

$$p(y|x) = p(y) \quad (7)$$

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

$$p(x|y) = \frac{p(y \wedge x)}{p(y)} \quad (8)$$

$$Iz(7) \Rightarrow p(y \wedge x) = p(x|y)p(y) \quad (9)$$

Zbog komutativnosti

$$p(x \wedge y) = p(x|y)p(y) \quad (10)$$

Uvrštavanjem (10) u (5) dobiva se najjednostavniji oblik Bayesovog pravila.

$$p(y|x) = \frac{p(x|y)p(y)}{p(x)} \quad (11)$$

$$p(x) = p(x \wedge y) + p(x \wedge (\sim y)) = p((x \wedge y) \vee (x \wedge \sim y)) \quad (12)$$

Iz definicije vjerojatnosti

$$(x \wedge y) \cap (x \wedge \sim y) = \Phi \quad (13)$$

$$p(x) = p(x \wedge y) + p(x \wedge \sim y) \quad (14)$$

$$p(x \wedge y) = p(x|y)p(y) \quad (15)$$

$$p(x \wedge \sim y) = p(x|\sim y)p(\sim y) \quad (16)$$

$$p(x) = p(x|y)p(y) + p(x|\sim y)p(\sim y) \quad (17)$$

Raspisivanjem članova temeljem definicije uvjetne vjerojatnosti dobiva se Bayesovo pravilo [7]

$$p(y|x) = \frac{p(x|y)p(y)}{p(x|y)p(y) + p(x|\sim y)p(\sim y)} \quad (18)$$

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 (11):

- Y iz pravila označava jedan dokaz ili činjenicu (engl. evidence) $\rightarrow E$
- X iz pravila označava pretpostavku ili hipotezu (engl. hypothesis) $\rightarrow H$

$$p(H|E) = \frac{p(E|H)p(H)}{p(E)} \quad (19)$$

$$p(H|E) = \frac{p(E|H)p(H)}{p(E|H)p(H) + p(E|\sim H)p(\sim H)} \quad (20)$$

3.2. Izračun „Pravih vrijednosti“

Za donošenje odluke o nastalom kvaru uz određene činjenice proveden je izračun pravih vrijednosti kao što je razrađeno u [2], poglavlje 7. Pri tome je dobiven niz podataka potrebnih za točno određivanje kvara.

U nastavku je prikazan primjer izračuna s vrijednostima iz tabele 4 za jedan slučaj pregrijavanja motora

➤ Slučaj: neispravna pumpa za vodu

$$p(H_8) = p(\text{neispravna pumpa za vodu}) = 0,001$$

$$\overline{p(H_8)} = 0,999$$

$$p(E|H_8) = p(\text{motor se pregrijava} | \text{neispravna pumpa za vodu}) = 0,95$$

$$p(E | \bar{H}_8) = p(\text{motor se pregrijava} | \text{ispravna pumpa za vodu}) = 0,1$$

$$p(E) = p(\text{motor se pre.}) = p(E | H_8) \cdot p(H_8) + p(E | \bar{H}_8) \cdot p(\bar{H}_8) \\ = 0,95 \cdot 0,001 + 0,1 \cdot 0,999 \\ = 0,10085$$

$$p(H_8 | E) = p(\text{neispravna pumpa za vodu} | \text{ako je ocito da se motor pregrijava}) = \\ = \frac{p(E | H_8) \cdot p(H_8)}{p(E)} = \frac{0,95 \cdot 0,001}{0,10085} = 0,00942$$

$$p(H_8 | \bar{E}) = p(\text{neispravna pumpa za vodu} | \text{uz činjenicu da se motor ne pregrijava}) = \\ = \frac{p(\bar{E} | H_8) \cdot p(H_8)}{p(\bar{E})} = \frac{(1 - 0,95) \cdot 0,001}{1 - 0,10085} = 0,00006$$

Usporedbom $p(H_8 | E)$ i $p(H_8)$ zaključujemo:

- Činjenica da se motor pregrijava povećava vjerojatnost da je neispravna pumpa za vodu za približno 9,4 puta.

Istim postupkom izračunate su sve ostale prave vrijednosti za ulazne podatke iz tabele 4 i dobiveni iznosi prikazani u tabeli 5. Iz njih se može zaključiti da određene činjenice povećavaju ili smanjuju neku pretpostavku. Temeljem određenih činjenica i pravih vrijednosti u SZU provodi se analiza i definiraju nastali kvarovi, a potom poduzimaju radnje potrebne za zaštitu elektroagregata.

Tabela 5. Prikaz pravih vrijednosti

POGONSKI DIZEL MOTOR – POKRETANJE NIJE U REDU	Kvar na pumpi visokog tlaka	$p(H_1)=0,001$
		$p(H_1 E)=0,00266$
		Činjenica da se motor ne pokreće povećava vjerojatnost da je greška na pumpi visokog tlaka za približno 2,7 puta.
	Zaprlian filter goriva	$p(H_2)=0,1$
		$p(H_2 E)=0,04$
	Zrak u sustavu za dovod goriva	$p(H_3)=0,02$
		$p(H_3 E)=0,0297$
	Prazan akumulator	Činjenica da se motor ne pokreće povećava vjerojatnost da je zrak u sustavu za dovod goriva za približno 1,5 puta.
		$p(H_4)=0,2$
		$p(H_4 E)=0,30435$
	Greška na elektropokretaču	Činjenica da se motor ne pokreće povećava vjerojatnost da je prazan akumulator za približno 1,5 puta.
		$p(H_5)=0,005$
		$p(H_5 E)=0,02211$
	Činjenica da se motor ne pokreće povećava vjerojatnost da je greška na elektropokretaču za približno 4,4 puta.	

POGONSKI DIZEL MOTOR – PREGRIJAVA SE U RADU	Kvar na pumpi visokog tlaka	$p(H_1)=0,001$
		$p(H_1 E)=0,00025$
	Nedovoljna količina tekućine za hlađenje	Činjenica da se motor pregrijava povećava vjerojatnost da je kvar na pumpi visokog tlaka za 0,25 puta.
		$p(H_6)=0,3$
	Zaprlian hladnjak	$p(H_6 E)=0,80926$
		Činjenica da se motor pregrijava povećava vjerojatnost da je nedovoljna količina tekućine za hlađenje za približno 2,7 puta.
	Neispravna puma rashladnog sustava	$p(H_7)=0,3$
		$p(H_7 E)=0,53333$
	Nedovoljna količina ulja u motoru	Činjenica da se motor pregrijava povećava vjerojatnost da je zaprlian hladnjak za približno 1,8 puta.
		$p(H_8)=0,001$
Preopterećen generator	$p(H_8 E)=0,00942$	
	Činjenica da se motor pregrijava povećava vjerojatnost da je neispravna pumpa rashladnog sustava za približno 9,4 puta.	
Preopterećen generator	$p(H_9)=0,05$	
	$p(H_9 E)=0,10938$	
Preopterećen generator	Činjenica da se motor pregrijava povećava vjerojatnost da je nedovoljna količina ulja u motoru za približno 2,2 puta.	
	$p(H_{10})=0,005$	
Preopterećen generator	$p(H_{10} E)=0,005$	
	Činjenica da se motor pregrijava ne mijenja vjerojatnost da je preopterećen generator.	
Preopterećen generator	$p(H_{11})=0,005$	
	$p(H_{11} E)=0,04556$	
Kratki spoj između faza	Činjenica da se generator pregrijava povećava vjerojatnost da je preopterećen generator za približno 9 puta.	
	$p(H_{11})=0,001$	
Kratki spoj između faza	$p(H_{11} E)=1$	
	Činjenica da se generator pregrijava povećava vjerojatnost da je kratki spoj između faza za 1000 puta.	

4. ZAKLJUČAK

Provedbom modernizacije, uz povećanje pouzdanosti i produljenje životnog vijeka, pojednostavljuje se održavanje sredstava i omogućuje rad bez stalnog nadzora rukovatelja.

Zbog logističkih problema otežane nabave starijih tipova senzora, pristupilo se snimanju karakteristika postojećih i iznalaženju rješenja za ugradnju zamjenskih. Analizom na određenom broju elektroagregata utvrđeno je da su elektroagregati opremljeni različitim tipovima senzora koji za istu mjerenu veličinu daju različite električne signale, što predstavlja problem kod održavanja, pa je predložena ugradnja senzora istih tipova na sve elektroagregate. Na taj način, osigurali bi se „standardizirani“ oblici električnih signala koji bi se prikupljali u unificiranom sklopu za zaštitu i upravljanje, koji bi uz primarni zadatak zaštite i upravljanja imao i sekundarni zadatak utvrđivanja i prikaza nastalog kvara. Rad sklopa zasniva se na principima rada ekspertnih sustava. U tome bitnu ulogu ima tablica znanja koja je sačinjena provedbom istraživanja među djelatnicima koji

imaju dugogodišnje iskustvo na održavanju elektroagregata. Temeljem tablice znanja ne može se točno definirati vjerojatnost svih mogućih stanja, tako da je Baysovom shemom proveden izračun „pravih vrijednosti“ koje se koriste za daljnju analizu i definiranje stanja elektroagregata.

5. LITERATURA

- [1] Barešić, D.; Hederić, Ž.; Barukčić, M.: Ispitivanje elektroagregata s pogonskim dizel motorom na uporabu modificiranog kerozinskog goriva, 26. međunarodni simpozij, EIS, Šibenik, 2013.
- [2] Jović, F.: Expert Systems in Process Control, Chapman & Hall, London, 1992.
- [3] Valter, Z.: Procesna mjerenja, ETF Osijek, 2008.
- [4] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, Springer, New York, 2010.
- [5] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Mjerenje-Temperature_1.pdf (Dostupno:10.02.2015.)
- [6] http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Mjerenje_Tlaka.pdf (Dostupno:16.02.2015.)
- [7] http://www.zemris.fer.hr/predmeti/is/nastava/Modeliranje_neizvjesnosti.pdf (Dostupno:20.02.2015.)

Kontakt autora:

Dejan Barešić, dipl. ing.

Oružane snage Republike Hrvatske
098/539-258, dejan.baresic@kc.t-com.hr

izv.prof.dr.sc. Željko Hederić, dipl. ing.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Elektrotehnički fakultet Osijek
Kneza Trpimira 2B, 31000 Osijek
031/224-665, zeljko.hederic@etfos.hr

doc.dr.sc. Marinko Barukčić, dipl. ing.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Elektrotehnički fakultet Osijek
Kneza Trpimira 2B, 31000 Osijek
031/224-685, marinko.barukcic@etfos.hr