

PRIMJENA NDT METODA U ODRŽAVANJU PO STANJU TEHNIČKIH SUSTAVA

NDT METHODS APPLICATION IN PREDICTIVE MAINTENANCE OF TECHNICAL SYSTEMS

Branimir Preprotić¹, Marko Serdar²

¹Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, 10000 Zagreb, Hrvatska

²Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, 10000 Zagreb, Hrvatska, Student

SAŽETAK

U radu je dan povijesni razvoj i kratki pregled aktivnosti strategija i koncepata u održavanju. Opisane su prednosti nerazornih ispitnih metoda, kao dijela strategije održavanja po stanju. Definirani su kriteriji za isplativost održavanja po stanju. Poseban naglasak dan je na ultrazvučne metode i infracrvenu termografiju u održavanju elektrotehničke opreme sa primjerima provedenih mjerenja i rezultirajućih preporuka za daljnje aktivnosti održavanja.

Ključne riječi: Održavanje po stanju, nerazorne ispitne metode, ultrazvuk, infracrvena termografija

ABSTRACT

This paper gave a historical development and short overview of maintenance activities, policies and concepts. Advantages of non-destructive testing methods as a part of Condition Based Maintenance policy are described. Criteria for feasibility of Condition Based Maintenance strategies are defined. Special emphasis is putted on Ultrasound (Airborne) and Infrared Thermography in maintenance of electrical equipment, with examples or real life measurements and recommendation for further maintenance actions.

Keywords: Condition Based Maintenance, non-destructive testing methods, Ultrasound, Infrared thermography

1. UVOD

1. INTRODUCTION

Početak industrijske ere aktivnosti održavanja bile su u povojima, vrlo konfuzne i neorganizirane, postojalo je samo korektivno održavanje, odnosno popravak nakon pojave zastoja. Nisu postojali tehnički ni ekonomski principi koji bi usmjeravali aktivnosti održavanja. Razvojem industrijske proizvodnje raste i broj zastoja, što u konačnici dovodi do razvoja održavanja kao ključne podrške industrijske proizvodnje. Ključni doprinos uvođenju preventivnog održavanja dala je vojska SAD-a, jer su tijekom drugog svjetskog rata zaključili da je bolje preventivno obaviti zamjenu određenih dijelova koji su česti uzrok kvarova prije odlaska na bojište. Iako je zamjena kritičnih dijelova prije nastanka kvara značajno smanjila broj kvarova, predstavljala je znatan trošak. Postavilo se pitanje, kako točnije procijeniti kada bi se kvar mogao pojaviti? Korištenje subjektivnih pokazatelja uočljivih čovjeku, kao što su povećana buka, povišena temperatura, pojava značajnih vibracija ili pojava mirisa nije bilo dovoljno precizno, jer se događalo neposredno prije zastoja. Razvoj dijagnostičkih instrumenata omogućio je mjerenje vrijednosti buke, temperature ili vibracija. Međutim, izmjerena vrijednost nekog parametra još uvijek nije davala odgovor kada će se pojaviti zastoj. Da bi izmjereni podaci davali potrebno informaciju o tome kada možemo očekivati zastoj, potrebna su još dva podatka:

- 1.) Granična vrijednost pokazatelja (vrijednost kod koje možemo očekivati zastoj)
- 2.) Evidencija pokazatelja tijekom vremena

Usporedbom izmjerenih pokazatelja sa ranijim mjerenjima moguće je detektirati trend, te predvidjeti kada će biti dostignuta vrijednost pokazatelja kod koje možemo očekivati zastoj. Ta informacija nam omogućuje planiranje i otklanjanje uzroka prije nego dođe do zastoja. Na taj način nemamo neplanirane i skupe zastoje proizvodnje. Ovdje opisana strategija održavanja naziva se održavanje prema stanju.

2. ODRŽAVANJE PREMA STANJU

2. CONDITION BASED MAINTENANCE

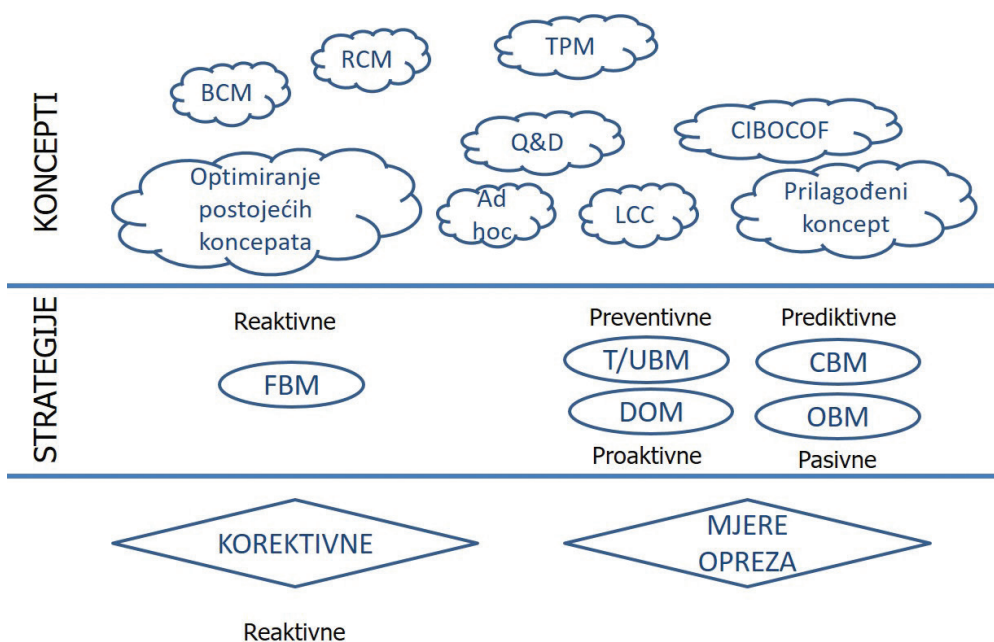
Prema [1], Održavanje prema stanju, (engl. Condition Based Maintenance – CBM), temelji se na poznavanju postojećeg stanja i uvjeta tehničkog sustava, te planiranja aktivnosti održavanja u cilju osiguranja funkcionalnosti i kontinuiteta rada tehničkog sustava na očekivanoj razini i sukladno njegovom stvarnom operativnom stanju. Ovaj pristup održavanju podrazumijeva mogućnost praćenja i analiziranja operativnih podataka koje treba koristiti za planiranje i izvršavanje odgovarajućih aktivnosti održavanja.

Sažetija definicija prema [2], navodi da je „Održavanje prema stanju provođenje preventivnog održavanja kada određeni sistemski parametar (stanje) prelazi unaprijed zadanu vrijednost“.

U literaturi se često koristi pojam „Prediktivno održavanje“ kao sinonim za „Održavanje prema stanju“, ali isto tako ponekad se navodi da je i OBM (Opportunity based maintenance) prediktivno održavanje. Jedna od kvalitetnijih sistematizacija aktivnosti, strategija i koncepata održavanja dana je u *Slika 1: Aktivnosti, strategije i koncepti u održavanju* [2]. Prednost ove sistematizacije u odnosu na druge autore koji aktivnosti, strategije i koncepte prikazuju isključivo prema vremenu nastanka, jest u tome će pojedina organizacija održavanja primjenjivati određene aktivnosti, strategije i koncepte istovremeno i to prilagođeno prema vrsti proizvodnje, pogonu ili čak vrsti ili kritičnosti pojedine proizvodne opreme.

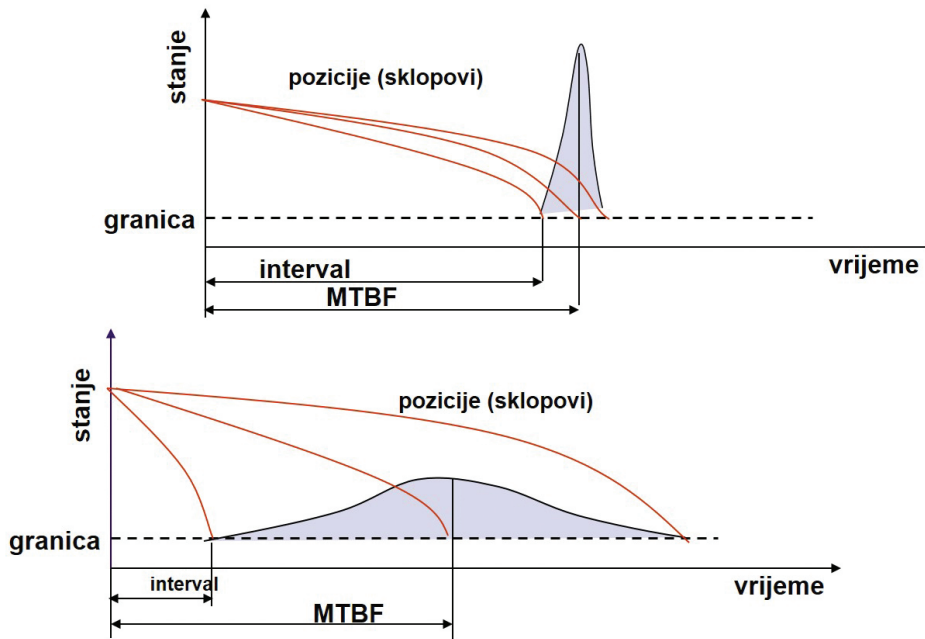
Uz nabrojane očigledne prednosti strategije Održavanja prema stanju, postavlja se pitanje zašto se još uvijek primjenjuju strategije preventivnog održavanja (T/UBM) i korektivnog održavanja (FBM-Failure based maintenance)?

Odgovor na ovo pitanje pokušati ćemo razjasniti kroz slika 2 i slika 3.



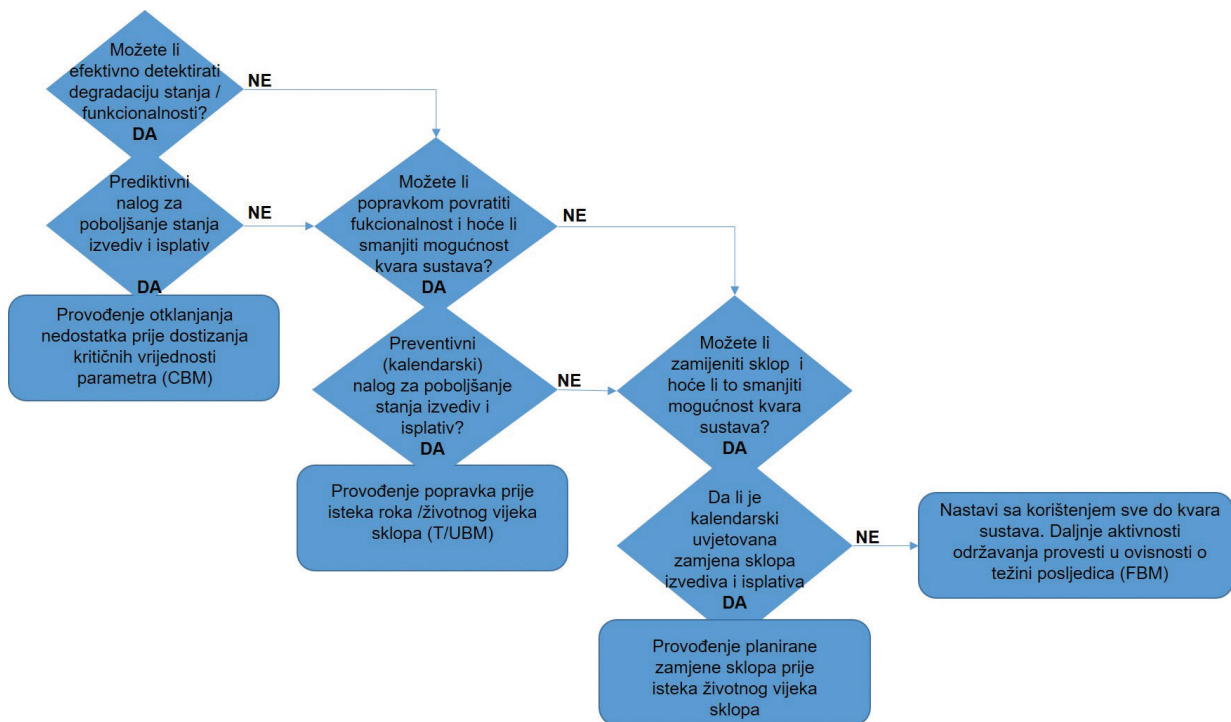
Slika 1 Aktivnosti, strategije i koncepti u održavanju [2]

Figure 1 Activities, Strategies and Maintenance Concepts [2]



Slika 2 Tehnički aspekt odabira strategije održavanja [3]

Figure 2 Technical aspect of Maintenance Strategy selection [3]



Slika 3 Odabir strategije održavanja primjenom RCM-a [4]

Figure 3 Selection of Maintenance strategy using RCM [4]

Kao što je vidljivo na Slika 2: Tehnički aspekt odabira strategije održavanja, prema gdje je srednje vrijeme između kvarova (MTBF-Mean Time Between Failure) pojedinih komponenata podjednako, pogodna je za primjenu strategije preventivnog održavanja i to T/UBM (Time /Use Base Maintenance-Održavanje prema vremenu / satima rada).

Razlog je taj što je moguće odrediti cikličke zahvate preventivnog održavanja kojima bi se spriječio zastoj. Tamo gdje je veliko rasipanje srednjih vremena između kvarova (MTBF), nije moguće odrediti cikličke zahvate preventivnog održavanja, pa je kod takve opreme nužna primjena strategije Održavanja prema stanju (CBM).

Detaljniji prikaz donošenja odluke o prikladnoj strategiji održavanja dan je na *Slika 3* gdje je prikazan *Odabir strategije održavanja primjenom RCM-a* (eng. Reliability Centered Maintenance-Održavanje vođeno pouzdanošću). Iz navedenoga moguće je zaključiti kako se strategija održavanja odabire na način da bude optimalna u zadanoj situaciji, te da je logično da ćemo na istoj opremi primjenjivati više strategija.

Ekonomski aspekt odabira strategije održavanja, navodi nas na odabir one strategije održavanja koja će generirati najmanji trošak. Ovdje je potrebno napomenuti da je ekonomski aspekt u ovisnosti o tehničkom, te da nisu u međusobnoj koliziji.

Intenzivnim razvojem ne razornih metoda ispitivanja, danas na raspolaganju imamo preko dvije stotine metoda [5]. Najčešće korištene metode su Ultrazvučno testiranje, Radiografija, Termografija, Penetrantske metode, Vrtložne struje.

3. ULTRAZVUČNO TESTIRANJE

3. ULTRASOUND TESTING

Postoje brojna područja primjene ultrazvučnih testiranja, a u ovom radu detaljnije će biti obrađeni otkrivanja kvarova na elektrosustavima. Ultrazvučna metoda ispitivanja bazira se na otkrivanju visokofrekvencijskih zvukova koji su produkt rada dijela opreme ili sustava pod opterećenjem. Promjene u temperaturama dijelova elektroopreme nemaju utjecaja na stvaranje zvukova visoke frekvencije, pa stoga niti ne stvaraju poremećaj u samom ispitivanju (ispitivanje je temperaturno neovisno). Zbog toga je primjenjivo na sustavima svih naponskih razina (visoki, srednji i niski napon). Idealno je za otkrivanje svih vrsta električkog pražnjenja kao što su Korona, Puzanje struje i Strujni luk (koja nisu vidljiva infra crvenom termografijom) kao i za kontrolu "otpuštenih" vibrirajućih dijelova opreme. Također je pogodno kod testiranja zatvorenih elektro sustava/opreme (transformatori, zatvoreni elektro ormari itd.) Ultrazvučno ispitivanje prednjači jer nije potrebno vršiti nikakvo otvaranje koje bi ugrozilo rad sustava ili radno okruženje i ljude.

3.1. DETEKCIJA KORONE

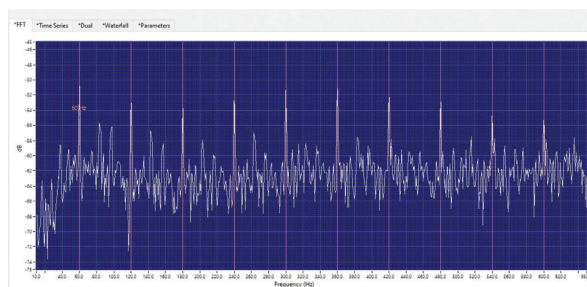
3.1. CORONA DETECTION

Prema definiciji Korona (eng. Corona) efekt je električko pražnjenje (parcijalno izbijanje) oko vodiča u uvjetima kada je okolna atmosfera dovoljno nabijena (razlika potencijala viša od 1.000 V) bez da pri tome nastaje "flashover" odnosno vršno izbijanje (prikazano na *Slika 4: Vizualna manifestacija korona efekta* [8]). Korona u svojoj prirodi "traži put do zemlje". Okolna vlaga uz koronu je izrazito bitna jer se zbog kombinacije plinova i vlage stvara već spomenuta dušična kiselina koja je izrazito razorna za vodič i izolatore vodiča.



Slika 4 Vizualna manifestacija korona efekta [8]

Figure 4 Visual manifestation of Corona Effect [8]



Slika 5 FFT graf kod korona efekta (vlastita arhiva)

Figure 5 Corona Effect FFT graph (own archive)

Osim što uzrokuje poprilične energetske gubitke kod izmjeničnog visokonaponskog prijenosa također razara površinu vodiča i dovodi do većeg problema koji se naziva puzanje struje (Tracking). Također korona se u uvjetima veće vlažnosti zraka manifestira kao jače parcijalno izbijanje iako ne mora biti nužno većeg intenziteta. Prilikom nastanka, korona je u početku gotovo je neprimjetna i sa vremenom postaje sve jača dok se na kraju ne manifestira kao tzv. destruktivna korona koja razara izolaciju vodiča.

Kao primjer u *Slika 5: FFT graf kod korona efekta*, dan je zapis raspodjele snimljenog signala u odnosu jačine signala [dB] i frekvencije [Hz] snimljen na niskonaponskom vodu 400 V, frekvencije mreže 60 Hz. S obzirom da se pikovi poklapaju na 60 Hz (frekvencija mreže) potvrđuju da se radi o električnom problemu.

3.2. DETEKCIJA PUZANJA STRUJE (ENG. TRACKING)

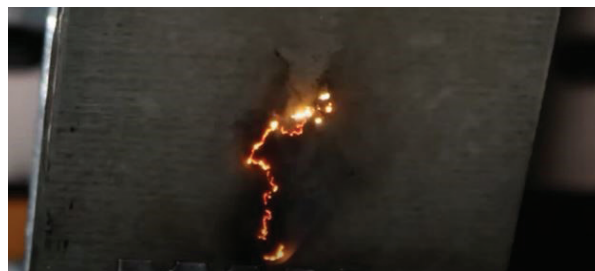
3.2. DETECTION OF TRACKING

Puzanje struje (Tracking) često se naziva i "dječji strujni luk" i putuje po nastalim oštećenjima izolacije. Pojavljuje se na površini izolacijskog materijala i za sobom ostavlja karbonizirani (spaljeni) trag (vizualni prikaz na *Slika 6: Vizualna manifestacija efekta puzanja struje* [6]). Od korone razlikuje se što počinje izrazito tiho, raste sa vremenom dok konačno ne nastane "flashover" odnosno vršno izbijanje, nakon čega cijeli proces kreće ispočetka. Za stvaranje ovog efekta uz oštećenje izolacije potrebni su i još neki elementi kao što su, prašina, nečistoće, vlaga po kojima struja putuje. U početku gotovo da i nema stvorene topline dok u momentu kada je problem uznapredovao pojavljuje se toplina. Puzanje struje (Tracking) ozbiljan je problem koji traži pažnju jer je kvar neizbježan. Primjer zapisa raspodjele snimljenog signala u odnosu jačine signala [dB] i frekvencije [Hz] snimljen na električnom vodu srednje naponske distributivne mreže dan je na *Slika 7: FFT graf kod puzanja struje*. Na FFT grafu vidljivo je da se u početku pikovi poklapaju na 60 Hz (frekvencija mreže) i potvrđuje elektro kvar, ali jasno je vidljivo da ne postoji ponovljivost u harmonicima.

3.3. DETEKCIJA STRUJNOG LUKA (ENG. ARCHING)

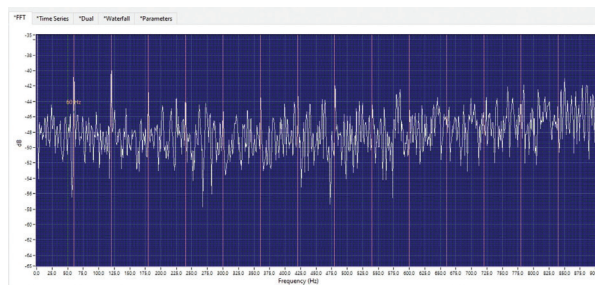
3.3. DETECTION OF ARCHING

Strujni luk najintenzivnija je manifestacija te vrste kvarova. Izrazito je snažan, devastirajući i opasan kako za život i zdravlje tako i za štetu na imovini (prikaz na *Slika 8: Vizualna manifestacija efekta strujnog luka*). Kod manifestacije uslijed kvara potrebno je odmah izvršiti isključenje sustava.



Slika 6 Vizualna manifestacija efekta puzanja struje [6]

Figure 6 Visual manifestation of tracking Effect [6]



Slika 7 FFT graf kod puzanja struje (vlastita arhiva)

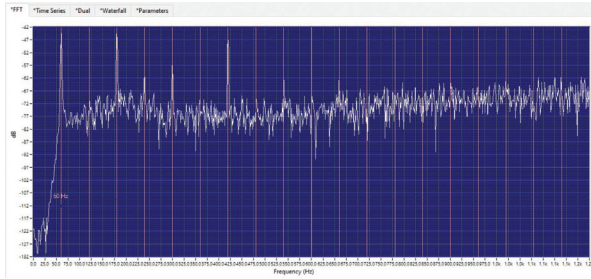
Figure 7 FFT graph od tracking effect (own archive)

Vidljivi su UV kamerama kao i golim okom kod energetski većih izbijanja. Na FFT grafu *Slika 9* vidljivo je da gotovo nema preklapanja pikova sa frekvencijom mreže, niti ne postoji nikakva uniformnost ponašanja signala niti bilo kakav uzorak ponašanja. U kombinaciji sa TWF grafom (raspodjela snimljenog signala u odnosu postotka skale (% scale) i vremena (ms) na *Slika 10*, gdje su vidljivi brzi, vremenski kratki signali sa naglim početkom i krajem jako izraženog signala i bez nekog događanja između dva izboja, možemo zaključiti da se radi o strujnom luku koji u svojoj naravi izbacuje veliku količinu energije u vrlo kratkom vremenskom intervalu, te nakon nekog vremena ponavlja taj proces ispočetka.



Slika 8 Vizualna manifestacija efekta strujnog luka [6]

Figure 8 Visual manifestation of Arching [6]



Slika 9 FFT graf kod pojave strujnog luka (vlastita arhiva)

Figure 9 FFT graph of Arching (own archive)

4. INFRACRVENA TERMOGRAFIJA

4. INFRARED THERMOGRAPHY

Prema [7], Infracrvena termografija je znanost prikupljanja i analize toplinskih podataka pomoću bez-kontaktnih uređaja koji stvaraju toplinsku sliku. Temelji se na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja s promatrane površine. Mjerenje se vrši pomoću bez-kontaktnih uređaja pod zajedničkim nazivom infra crvene kamere (IC). Infra crvena kamera s pomoću osjetnika (detektora) prima infracrveno zračenje i pretvara ga u električni signal koji se potom konvertira u vidljivi dio spektra ($0,4 \mu\text{m} - 0,7 \mu\text{m}$). U infracrvenoj kameri integrirana je: infracrvena optika, osjetnik infracrvenog zračenja, jedinica za pretvorbu električnog u videosignal, monitor i kartica za pohranu podataka. Kao rezultat termografskog mjerenja nastaje termogram. Termogram u kodu boja ili sivim tonovima daje sliku raspodjele prividne temperature na površini promatranog objekta.

Zato se za termogram kaže da je on zapis raspodjele infracrvenog zračenja koje dolazi sa površine promatranog objekta.

4.1. KONTROLA RAZVODNIH ORMARA

4.1. SWITCH CABINETS INSPECTION

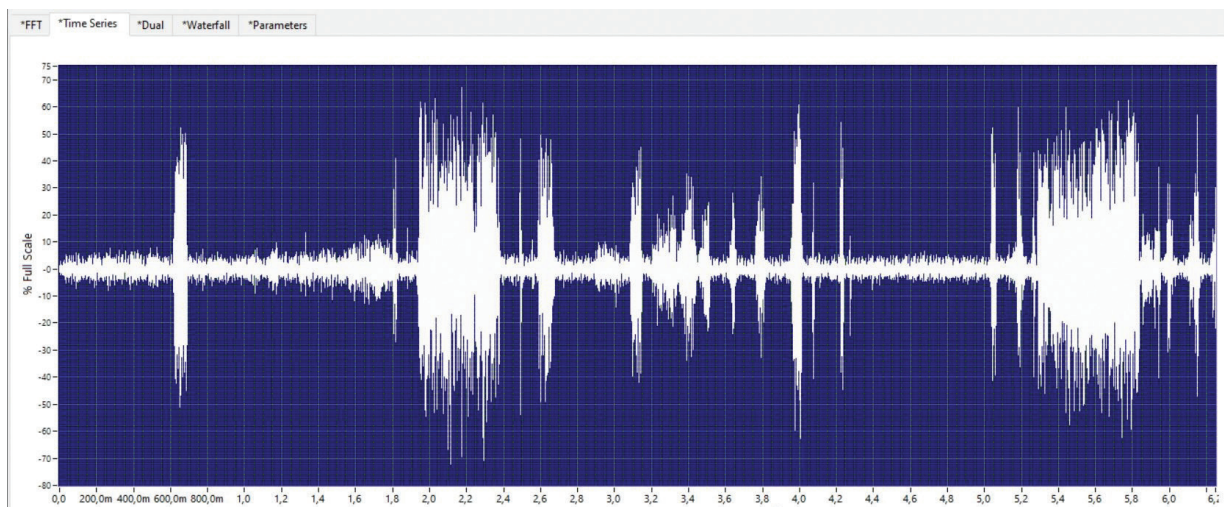
Kod kontrole razvodnih ormara (neovisno o naponskoj razini) obzirom da se ispitivanje provodi pod naponom prvo se provodi UZV ispitivanje. Razlog za to je što se kod UZV ispitivanja ne treba vršiti otvaranje vrata razvodnih ormara da bi se detektirali kvarovi što je izuzetan plus sa sigurnosnog stanovišta. Ukoliko nisu detektirani kvarovi UZV metodom (korona, putanje struje, strujni luk), može se pristupiti otvaranju razvodnih ormara i to isključivo u skladu sa protokolima i službe zaštite na radu korisnika postrojenja i izvršiti IC snimanje.

Na Sliku 11 prikazan je termogram razvodnog ormara.

Tablica 1. Parametri snimanja razvodnog ormara

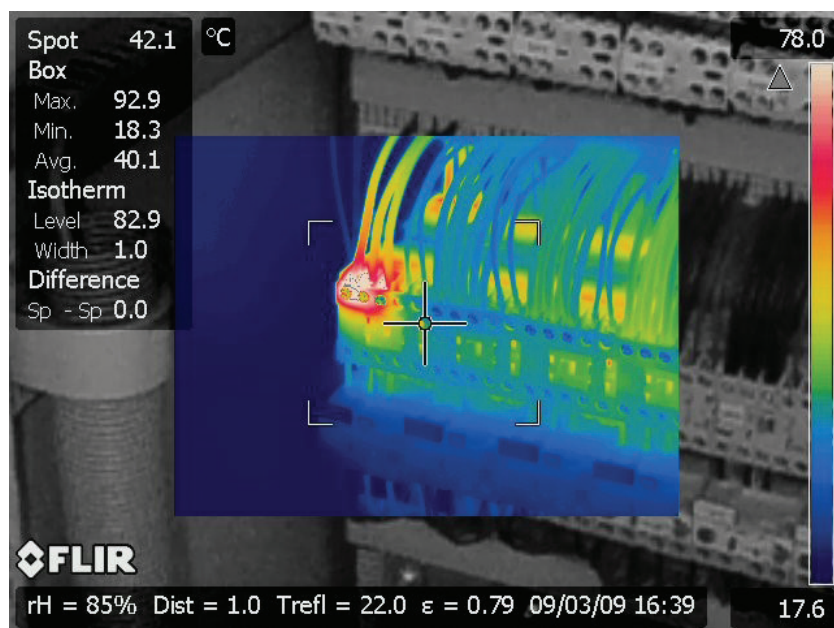
Table 1. Parameters Switch Cabinet thermal inspection

PARAMETRI SNIMANJA	
Temperatura okoline [°C]	23 °C
Temperatura refleksije [°C]	22 °C
Emisijski faktor	$\epsilon = 0,79$
Udaljenost od objekta snimanja [m]	$l = \sim 1 \text{ m}$



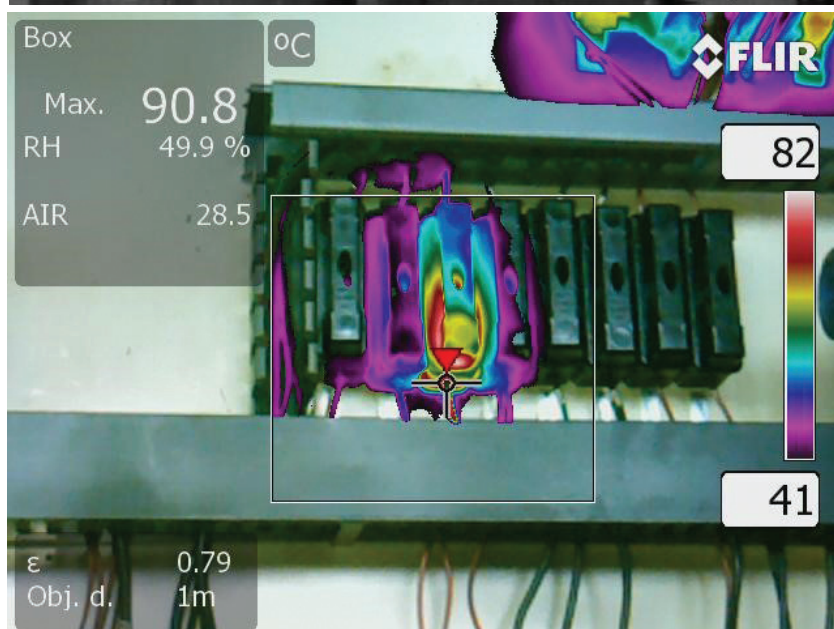
Slika 10 Raspodjela snimljenog signala u odnosu postotka skale (% scale) i vremena (ms) (vlastita arhiva)

Figure 10 Distribution of recorded signal in ration of scale percentage (%scale) and time (ms) (own archive)



Slika 11 Termogram razvodnog ormara (vlastita arhiva)

Figure 11 Switch Cabinet Thermal imaging (own archive)



Slika 12 Snimanje sklopnika u niskonaponskom razvodnom ormaru (vlastita arhiva)

Figure 12 Thermal Inspection of fusers in switch cabinet (own archive)

U primjeru prikazanom na Slika 11, snimanje je obavljeno prema parametrima prikazanim u Tablica 1, detektiran je kvar. Maksimalna temperatura kvara iznosila je oko 92°C dok je referentna temperatura ispravnog voda bila oko 18 °C. Obzirom na povećanje temperature $\Delta T > 60$ °C u odnosu na referentnu temperaturu anomalija je stavljena u kategoriju 4 (qtA) – sanacija ODMAH prema $\Delta T - VATH$ (low voltage) smjernicama. Kvar se očitovao kao probijena izolacija uslijed izboja i spaljenog dijela opreme. Kako je neispravan dio opreme i dalje bio pod naponom postajala je velika mogućnost havarije (požara).

Na slijedećem primjeru prikazanom na Slika 12, predmet snimanja su sklopnici u niskonaponskom razvodnom ormaru. Izvršeno je termografsko snimanje prema parametrima prikazanim u Tablica 2 pri čemu je uočena značajna temperaturna anomalija.

Tablica 2. Parametri snimanja sklopnika u niskonaponskom razvodnom ormaru

Table 2. Thermal inspection parameters of fusers in low voltage switch cabinet

PARAMETRI SNIMANJA	
Temperatura okoline [°C]	29 °C
Temperatura refleksije [°C]	27 °C
Emisijski faktor	$\epsilon = 0,79$
Udaljenost od objekta snimanja [m]	$l = \sim 1$ m

Maksimalna temperatura kvara iznosila je oko 90°C dok je referentna temperatura ispravnog voda bila oko 40 °C. Obzirom na povećanje temperature $\Delta T > 50$ °C u odnosu na referentnu temperaturu anomalija je stavljena u kategoriju 4 (qtA) – sanacija ODMAH prema ΔT - VATH (low voltage) smjernicama. Kvar se očitovao kao mehaničko oštećenje izolacije i žice (smanjen presjek žice) na donjemvodu kod spoja na sklopnik. Zbog smanjenja presjeka vodiča temperatura voda je znatno povišena i utječe na temperaturu sklopnika.

5. ZAKLJUČAK

5. CONCLUSION

Među brojnim strategijama održavanja koje imamo na raspolaganju i koje koristimo, vidljivo je da primjenom strategije održavanja prema stanju uz korištenje nerazornih metoda ispitivanja moguće je detektirati kvarove prije nastanka havarije i veće materijalne štete. Navedeni primjeri pokazali su kako primjena ultrazvučnih ispitnih metoda i infracrvene termografije na elektroenergetskim sustavima postaju ključne metode u održavanju po stanju tehničkih sustava.

6. REFERENCE

6. REFERENCES

- [1.] Skupina autora, Održavanje i gospodarenje imovinom, Zagreb: Hrvatsko društvo održavatelja, 2016.
- [2.] K. Kobbacy i D. Murthy, Complex System Maintenance Handbook, Springer, 2008.
- [3.] Skupina autora, Inženjerski priručnik, Zagreb: Školska knjiga, 2002.
- [4.] M. J.S., Physical Asset Management Handbook, Houston: Clarion Technical Publishers, 2002.
- [5.] R. Prakash, Non destructive Testing Techniques, Kent: New Age Science Limited, 2009.
- [6.] Youtube, »Electrical tracking, sample breakdown,« [Mrežno]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=bfWxHrN0w6Y>. [Pokušaj pristupa 5. 1. 2022].
- [7.] Infrared training center, Thermography Level I, Course Manual, Danderyd, 2009.
- [8.] Wikipedia, »Corona discharge,« [Mrežno]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge. [Pokušaj pristupa 5. 1. 2022].

AUTORI · AUTHORS

• Branimir Preprotić

Rođen je u Zagrebu, 18.06.1971. Živi u Jastrebarskom gdje je završio osnovnu školu. Srednju školu MIOC završava u Zagrebu, a nakon toga Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, na kojemu se zapošljava kao asistent. U Plivu prelazi 1998. godine gdje na raznim pozicijama do održavanja, strategije, investicija, te Facility Managementa radi i do danas, a trenutno je rukovoditelj Upravljanja nekretninama i uslugama. Paralelno uz rad u Plivi, 2006 god. završava magisterij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, a od 2007. godine vanjski je suradnik TVZ-a, trenutno u zvanju višeg predavača. Potpredsjednik je IFMA Hrvatska (ogranka svjetske organizacije Facility Managera).

Korespondencija · Correspondence

bpreprot1@tvz.hr

• Marko Serdar

Rođen je 06.06.1983 u Zagrebu gdje je završio osnovnu školu, a zatim i srednju Graditeljsku tehničku školu. Dodatnim školovanjima stiče međunarodne certifikate iz područja infra crvene termografije (lvl II ICT) i ultrazvuka (lvl I Airborne/Structureborne UZV) koje uz razne ispitne tehnologije kao što su Blower Door Test, akustična kamera itd. Zaposlen je u tvrtki Energonova d.o.o. gdje svakodnevno provodi ispitivanja u tehničkim poljima graditeljstva, strojarstva i elektrotehnike. Stručni studij elektrotehnike, smjer energetska elektrotehnika završava uz rad 2021. god. na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu.