

## ONLINE MONITORING STANJA ELEKTROOPREME U RAZVODNIM POSTROJENJIMA

### ELECTRICAL DISTRIBUTION ASSETS ONLINE CONDITION MONITORING

Denis ILIĆ, Schneider Electric, Serbia

Damir KOPČANSKI, Schneider Electric, Serbia

#### KRATAK SADRŽAJ

Savremena preduzeća za proizvodnju i distribuciju električne energije doživljavaju značajno unapređenje pouzdanosti i efikasnosti prelaskom na CBM (*Condition Based Maintenance*) i RBM (*Risk Based Maintenance*) modele održavanja. Ovi poboljšani modeli održavanja predstavljaju evoluciju tradicionalnih modela preventivnog i interventnog (korektivnog) održavanja, što je od velike koristi imajući u vidu činjenicu da svet svedoči sve većem razvoju i rastu električne mreže, rastuću složenost elektroenergetskih sistema, logističke izazove i nedostatak ekspertske kadra. To je omogućeno razvojem novih metoda testiranja i praćenja stanja sa jedne strane, kao i značajnim razvojem mogućnosti savremenih računarskih sistema i sistema skladištenja podataka, sa druge. Sa uvođenjem *Cloud* tehnologije i nedavnim trendovima IoT u energetici, tehnologije praćenja stanja opreme dostigle su značajne mogućnosti. U isto vreme, tokom poslednje decenije, 4. industrijska revolucija obeležena razvojem veštačke inteligencije (AI) i mašinskog učenja pruža novu opciju za tzv. preskriptivno održavanje predviđanjem mogućih kvarova i predviđanjem njihovog nastanka.

Analizom podataka u realnom vremenu direktno iz elektroenergetskog postrojenja 24/7, kreiranjem algoritama za kreiranje alarma, angažovanjem ekspertske znanja iz elektrotehnike i moćnom analitikom AI, stručnjaci za održavanje poseduju odličan alat koji im omogućava da razlikuju kritičnu opremu, kojoj su potrebne servisne aktivnosti odmah, kao i da poseduju ove informacije blagovremeno. Ovo im omogućava planiranje održavanja u najpovoljnijem mogućem trenutku, unapređujući pouzdanost, bezbednost i održivost celog procesa, osiguravajući pozitivan uticaj na OPEX i CAPEX. U ovom radu, pomenuti modeli održavanja će biti predstavljeni sa realnim primerima primene *Cloud computing*-a, AI i IoT u strategiji održavanja i nadzora stanja elektroenergetske opreme. Analizirani su primeri detekcije kvara i mogućnosti primene *Cloud monitoring* rešenja na srednjenaponskim razvodnim postrojenjima.

**Ključne reči:** Cloud, održavanje prema stanju, online monitoring, razvodna postrojenja, veštačka inteligencija

#### ABSTRACT

Modern power production and distribution facilities experience significant improvement in reliability and efficiency by shifting to the Condition Based Maintenance (CBM) and Risk Based Maintenance (RBM). These improved maintenance models represent evolution from traditional preventive and reactive maintenance models which is of great need facing the fact the world is experiencing increasing number of electrical assets, rising complexity of power systems, logistics challenges and reduced number of experts. It is enabled by new testing and monitoring methods development in one way, and more significant, development trends in computation possibilities and data storage. With introduction of Cloud computing and recent trends in IoT in the electrical engineering use, monitoring possibilities reached great levels. At the same time, during the last decade, 4th industrial revolution marked by development of artificial intelligence (AI) and machine learning provide a new option for so called prescriptive maintenance by predicting possible faults and predicting their occurrence.

By evaluating live data directly from the substation 24/7, creating algorithms for smart alarming, engaging electrical engineering expert knowledge and powerful AI analytics, maintenance experts are leveraged to distinguish critical assets needed immediate service activities, and to have this information in timely manner. This enables planning maintenance in the most appropriate time interval, improves reliability, security and sustainability of the customer's process, ensuring positive impact on OPEX and CAPEX. In this paper, mentioned maintenance models are explained with examples of direct application of mentioned recent Cloud computing, AI

and IoT trends in electrical engineering maintenance strategy. Real life examples of monitoring findings and possibilities of applied MV distribution Cloud monitoring solution are analyzed.

**Key Words:** AI, CBM, Cloud, online monitoring, substation

Denis Ilić, [denis.ilic@se.com](mailto:denis.ilic@se.com), +381-64-160-38-69

Damir Kopčanski, [damir.kopcanski@se.com](mailto:damir.kopcanski@se.com)

## 1. UVOD

Pred moderne sisteme proizvodnje, prenosa i distribucije električne energije postavljena su visoka očekivanja u pogledu pouzdanosti i bezbednosti snabdevanja potrošača električnom energijom. Ovo je veoma izraženo u poslednjih par decenija potpune zavisnosti savremenog društva od električne energije. Dalji razvoj gotovo svih grana privrede oslanja se na električnu energiju kao jedan od najrasprostranjenijih i najprimenljivijih oblika energije, [1÷3]. Pravovremeno i optimalno održavanje predstavlja jedan od glavnih preduslova za očuvanje pouzdanog i bezbednog funkcionisanja elektroenergetskog postrojenja. Različiti pristupi održavanju prilagođeni su određenoj opremi i istorijskom razvoju električnih uređaja u elektroenergetici. Međutim, za optimalan izbor održavanja savremenih elektrorazvodnih postrojenja i uređaja pokazalo se da je neophodno utvrditi stvarno stanje opreme koja je od značaja, kako bi se aktivnosti održavanja blagovremeno i adekvatno isplanirale. Jedan važan preduslov za implementaciju modernih modela održavanja elektroenergetske opreme je ispunjen razvojem modernih metoda ispitivanja i kontinualnog praćenja veličina od interesa u savremenim elektroenergetskim objektima (EEO), [4÷6]. Drugi preduslov je stečen dubokim uplivom digitalizacije modernih elektroenergetskih uređaja u razvodnim postrojenjima i razvojem potencijala savremenih računarskih sistema i komunikacionih kanala (*Industrial Internet of Things*, IIoT). Dalje, pored eksponencijalnog rasta kompjutacione moći računara, tzv. *Cloud* sistemi za skladištenje podataka su omogućili kontinualno praćenje i čuvanje podataka. Ove, do skoro nezamislive količine podataka su, opet, omogućile implementaciju veštačke inteligencije (*Artificial Intelligence*, AI) i mašinskog učenja (*Machine Learning*, ML) u domenu primene različitih modela za klasifikaciju, predikciju i regresiju različitih karakterističnih parametara, čime se vrši određeni stepen automatizacije obrade akviziranih podataka.

Sumiranjem svega navedenog moguće je kreirati svojevrsni alat za praćenja stanja elektroenergetskog postrojenja koji će omogućiti monitoring 24/7 uz automatizaciju algoritama za alarmiranje i centralizovanu podršku ekspertskog znanja, čime se obezbeđuje odlična podrška blagovremenom planiranju održavanja opreme prema njenom stvarnom stanju (*Condition Based Maintenance*, CBM) [7,8].

## 2. MODELI ODRŽAVANJA

Pod pojmom održavanja elektroenergetske opreme (postrojenja) podrazumeva se niz uzajamno povezanih izvršilaca, tehničkih sredstava i operacija koje su neophodne za održavanje i ponovno vraćanje u pogonsku spremnost svih elemenata tehničkih sistema u procesu eksploatacije. U literaturi se pod definicijom održavanja može naići i na uopštenije tumačenje; da održavanje predstavlja sprovođenje svih mera nužnih da bi jedna mašina, postrojenje ili ceo objekat funkcionisao na propisan način, razvijajući performanse u propisanim granicama, odnosno sa nominalnim zahtevanim učincima, bez otkaza, uz propisano obezbeđivanje životne okoline, a pod pretpostavkom obezbeđenosti svih neophodnih uslova i uz potrebnu podršku, [6,7].

Razvoj elektrifikacije, tržišta električne energije i dostupnih metoda ispitivanja i praćenja stanja uslovio je i evolutivni razvoj različitih pristupa pri definisanju modela održavanja elektroenergetske opreme (Slika 1).



Slika 1 - Prikaz evolucije strategija održavanja

Razvoj tržišta i kompleksnih postrojenja koji jako zavise od stabilnosti i pouzdanosti napajanja električnom energijom je nadalje pokazalo da finansijski troškovi iznenadnih zastoja i neisporučene električne energije mogu višestruko premašiti finansijska sredstva koja bi bila utrošena u adekvatno preventivno održavanje. Negativne finansijske posledice su utoliko veće ukoliko je proces koji se napaja električnom energijom kompleksniji.

U začetku razvoja i širenja elektroenergetskih postrojenja održavanje je podrazumevalo gotovo isključivo servisne i korektivne radnje na opremi nakon nastanka kvara, sa ciljem vraćanja u pogon, tzv. interventno održavanje. Kako se vremenom pokazalo da je tehno-ekonomski opravdano preduprediti iznenadne ispadne postrojenja, koncept održavanja je promenjen ka preventivnom održavanju elektroopreme u prethodno definisanim fiksnim vremenskim intervalima i sa prethodno definisanim skupom aktivnosti. Cilj je bio preduprediti mogućnost nastanka kvara, odnosno, maksimalno uvećati prosečno vreme između nastanka dva kvara (*MTBF – Mean Time Between Failures*).

Kako za veliki deo elektroenergetike ovakav pristup ubrzo postaje tehnički i ekonomski nepraktičan i neoptimizovan, imajući u vidu dijagnostički napredak metoda ispitivanja i monitoringa, planiranje održavanja prema stvarnom stanju opreme, CBM, počinje da pokazuje niz prednosti. Ovaj pristup je podrazumevao povremeno testiranje opreme i/ili kontinualno praćenje njenog stanja, te planiranje servisnih aktivnosti shodno ustanovljenim indikatorima. Na ovaj način su se mogli prilagoditi intervali kako testiranja tako i servisnih aktivnosti, čime se obezbeđuje dodatna ušteda, u pogledu mogućeg odlaganja preventivnih radnji, ali i u smanjenju ukupnog vremena kada je oprema nedostupna da vrši svoju osnovnu funkciju.

Daljim razvojem menadžmenta resursima (*Asset management*) koji kao specifična tehnička disciplina dobija na značaju u poslednjih 20-tak godina, u sve većem broju se vrši derivacija CBM uvođenjem faktora rizika koji prouzrokuje otkaz određenog uređaja. Ovim model održavanja doživljava još jedan evolutivni korak napred u pogledu optimizacije troškova održavanja i eksploatacije mašina i opreme tzv. postaje održavanje prema riziku (*RBM – Risk Based Maintenance*).

Ekspanzijom mogućnosti računarskih sistema i sistema za skladištenje podataka razvijaju se mogućnosti dublje analize podataka i implementacija matematičkih modela u formi tzv. AI i ML. Analizom istorijskih podataka o ponašanju određenih uređaja, nastoji se uraditi predikcija novih potencijalnih otkaza, te njihova prevencija – prediktivno održavanje.

Ukoliko su dostupni podaci izuzetno dobri te je moguće izvršiti „treniranje“ modela ML koji će ne samo vršiti predikciju potencijalnog otkaza uređaja, već ukazati i na detalje, način otklanjanja i upravljanja trenutnim stanjem, moguće je oformiti preskriptivni model održavanja postrojenja i opreme. Ovo je naročito postalo dostupno rastom svesti i primene ML, u poslednjih 20-tak godina.

Pri odabiru modela održavanja elektroenergetskog postrojenja, mnogo je uticajnih faktora:

- način funkcionisanja postrojenja,
- primenjena oprema,
- projekatovana redundansa,
- kompleksnost i stabilnost procesa koji se napaja električnim postrojenjem,
- dostupna ekspertska podrška
- geografska pozicija i makroambijentalni uslovi...

### 3. REALIZACIJA KONTINUALNOG MONITORINGA RAZVODNOG POSTROJENJA

Savremeni komunikacioni sistemi i akvizicioni uređaji pružaju izuzetno mnogo mogućnosti za prenos odabranih indikatora koji se mogu upotrebiti u svrhe dijagnostike stanja opreme, a potom i elektrodistributivnog postrojenja u celini. Sistemi za čuvanje podataka su evoluirali u tzv. Cloud sisteme koji pružaju gotovo neizmerne mogućnosti skladištenja. Bežični sistemi za prenos podataka na male ali i na veće udaljenosti su postali široko dostupni i

primenljivi u svakodnevnoj industrijskoj praksi. Na ovaj način uređaji mogu biti povezani, mogu komunicirati međusobno ali i sa udaljenim činiocima formirajući tzv. IIoT mreže. Uvođenjem ovih modernih digitalnih mogućnosti sistemi daljinskog nadzora i upravljanja elektroenergetskim uređajima su doživeli neviđene razmere. Prethodno rezervisani samo za izuzetno skupu opremu i postrojenja od velikog, nacionalnog značaja, monitoring sistemi su sada jeftino i pouzdano mogli biti implementirani u široki spektar srednjenaponskih i niskonaponskih elektroenergetskih postrojenja, gde postaje veoma opravdano modifikovati zastarele modalitete održavanja, s obzirom na uštede koje je moguće proizvesti.

Kontinualnim monitoringom velikog broja podataka moguće je odložiti prethodno definisane redovne servisne radnje i predložiti neophodne. Pored monitoringa samih uređaja od značaja, posredno je moguće pratiti kvalitet dostupne električne energije, otkriti potencijal za unapređenje načina funkcionisanja samog procesa u postrojenju i definisati neophodne korake za unapređenje (npr. kompenzaciju reaktivne električne energije, filtriranje harmonika).

Uobičajni elektrodistributivni sistemi srednjeg i niskog napona se isporučuju i ugrađuju u formi metalnih kućišta – ćelija, ispunjenih neophodnim rasklopnim, mernim i upravljačkim uređajima čime se obezbeđuje njihova funkcionalnost. Više povezanih funkcionalnih ćelija čine jedan „panel“. Ovi uređaji vrše napojnu, mernu i zaštitnu funkciju postrojenja čije se napajanje obezbeđuje. Primer jednog srednjenaponskog panela sa označenom ćelijom prikazan je na slici 2. Podaci koji se mogu prikupiti sa razvodnih panela podrazumevaju najčešće električne parametre dostupne na ugrađenim zaštitnim relejima i uređajima za praćenje potrošnje i protoka električne energije. Ovi uređaji prikupljaju i proračunavaju i po nekoliko desetina različitih podataka:

- trenutne vrednosti struja, snaga i napona, međufazno/ po fazi
- potrošenu energiju, aktivnu, reaktivnu po fazi i ukupno
- deblans efektivnih vrednosti struja i napona
- naponski i strujni harmonici
- faktor snage
- kumulativne prekidne struje kao indikator potrošenog životnog veka kontakata prekidača
- stanje baterije zaštitnog releja

Ovi podaci, pravilno obrađeni i analizirani, potpomognuti AI, mogu pružiti uvid u stanje vitalnih elemenata poput prekidača u postrojenju, ali i pomoći da se utvrdi kvalitet električne energije i uticaj postrojenja na njega.

Kako se ovi distributivni sistemi sastoje od značajnog broja spojeva, na terminalima prekidača, na primer, ili na spojevima dovodnih ili odvodnih kablova, od velikog je značaja imati uvid da li je neki od ovih spojeva oslabljen, što bi moglo dovesti do pojačanog zagrevanja pa i topljenja kontakata. Ovo se postiže praćenjem i poređenjem temperature kontakata sve tri faze. Značajna odstupanja koja ne mogu biti objašnjena drugim uticajima, mogu poslužiti kao indikator oslabljenog kontakta. Moderni senzori ovo omogućavaju krajnje jednostavno, s obzirom da mogu komunicirati bežično.



Slika 2 - Primer SN panela sa označenom SN ćelijom

Dodatno, od velike je koristi poznavati mikroambijentalne uslove, poput temperature i vlažnosti vazduha, koji u velikoj meri mogu uticati na „starenje“ opreme i prouzrokovati poteškoće u normalnom funkcionisanju.

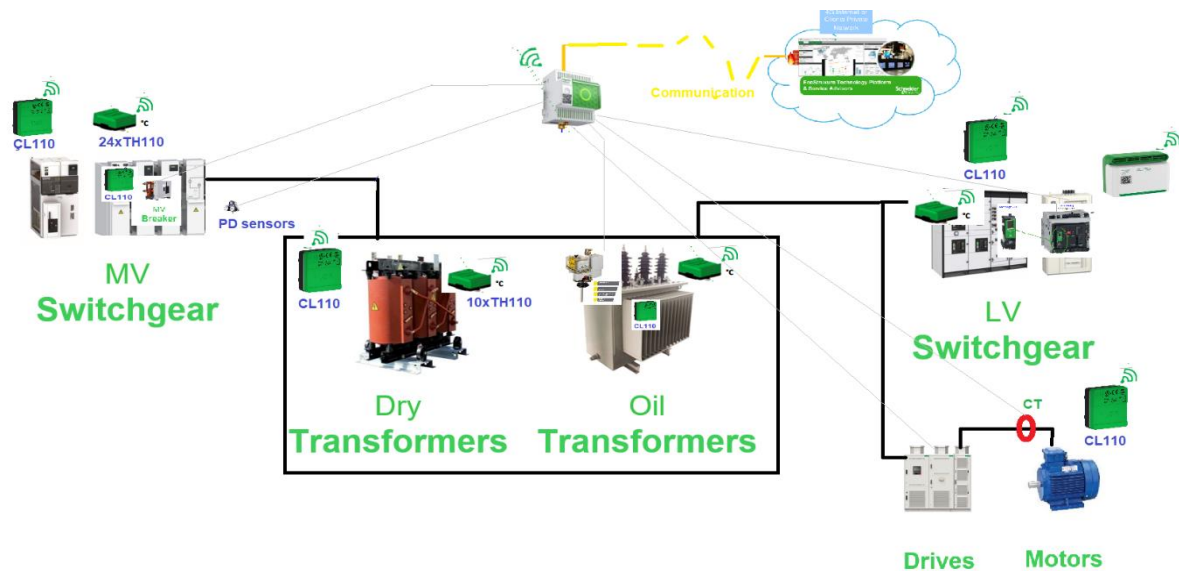
U sredjenaponskim postrojenjima značajno je posmatrati i pratiti aktivnosti parcijalnih pražnjenja, koja mogu biti prvi indikator degradacionih procesa u elektroizolacionom sistemu.

Ukoliko u postrojenju ili samom procesu postoje ugrađeni energetske transformatori ili elektromotorni pogoni, njihov kontinualni monitoring je od još većeg značaja, s obzirom da su ovi elementi uglavnom ključni za operativnost celog procesa koji se posmatra.

Na slici 3 prikazan je jednostavan primer mogućeg opremanja sistemom monitoringa jednog elektrodistributivnog postrojenja sa razvodima SN i NN, transformatorima, kao i jednim frekventnim kontrolerom brzine motora (VFD) i jednim elektromotornim pogonom direktno napajanim sa NN razvoda. Na ovoj slici, CL1110 su primeri baterijski napajanih senzora ambijentalnih uslova, temperature i vlažnosti vazduha. Senzori označeni sa TH110 predstavljaju indukcijom napajane kontaktne senzore temperature, upotrebene na svim kritičnim kontaktima i spojevima u svrhu nadgledanja olabavljenosti kontakata. Pored toga, moguće je u panele ugraditi i detektore gasova koji ukazuju na pregrevanje uobičajnih izolacionih materijala, koji su veoma korisni u unapređenju prevencije i zaštite od nastanka požara. U panelima se pored temperatura ambijenata i kontakata nadgledaju i električni parametri, struje, snage, harmonici, faktor snage itd. Takođe je moguće povezati i senzore parcijalnih pražnjenja koji u mrežama SN mogu prvi ukazati na degradacione procese u izolaciji. Monitoring uljnih i suvih transformatora je moguć nadgledanjem temperatura kontakata i namotaja, dok je kod uljnih moguće pratiti i parametre koji ukazuju na stepen ovlaženosti izolacionog ulja i degradacione procese unutar uljno-papirne izolacije. Takođe, nadgledaju se parcijalna pražnjenja.

Praćenjem svih dostupnih parametara, moguće je dijagnostikovati stanje panela VFD. Takođe, zdravlje elektromotornih pogona je moguće nadzirati praćenjem napojnih struja motora, te implementacijom modela ML

u frekventnom domenu kojima je unapređena osnovna metoda analize struja motora – Motor Current Signature Analysis (MCSA).



Slika 3 - Primer načina povezivanja jednog srednjenaponskog postrojenja

Uvođenjem gore pomenutih indikatora u savremene računarske sisteme, mogućnosti za prikaz, analizu i, možda najvažnije – ekstrakciju dodatnih računskih indikatora, gotovo su neograničene.

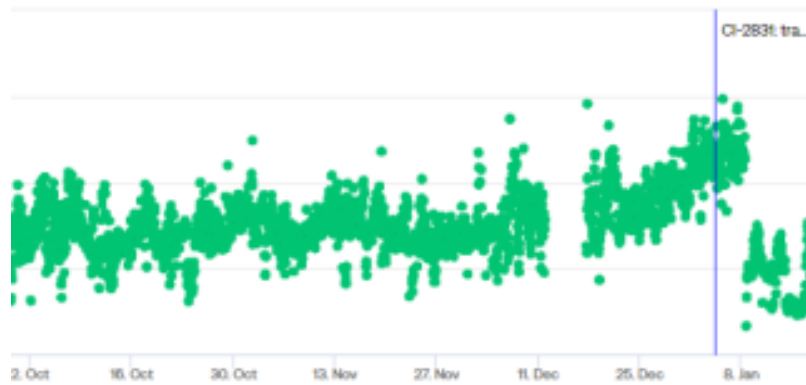
U savremenoj literaturi i praksi se pokazalo kao jako izazovno, ali veoma korisno, sintetizovanje svih parametara koji pokazuju stanje opreme u, za prikaz nešto jednostavniji, tzv. „indeks zdravlja“, jednu uglavnom numeričku vrednost koja opisuje prethodno stečeno znanje o stanju posmatrane opreme. Ove brojčane vrednosti mogu imati dodeljene opisne lingvističke pojmove (npr. dobro stanje, sumnjivo stanje, loše stanje) kako bi se na menadžment nivoima razmatranja lakše mogle planirati buduće servisne, izvršne aktivnosti. Proračunavanjem ovih indeksa zdravlja za celokupnu opremu u postrojenju, jednostavno se može izvršiti rangiranje opreme prema stanju i isplanirati najhitnije održavanje, ili odložiti servisne aktivnosti koje nisu neophodne. Na taj način, otvaraju se mogućnosti implementacije održavanja prema stanju – CBM. Na ovaj način, ostvaruju se minimalni OPEX i CAPEX, što dodatno povoljno utiče na tehno-ekonomsku održivost celog proizvodnog procesa.

#### 4. PRIMERI IZ PRAKSE

Navedene mogućnosti tehnologije IIoT uvode monitoring razvodnih postrojenja u potpuno nove spektre mogućnosti. U narednih nekoliko stvarnih primera iz prakse biće prikazana iskustva i dijagnostički potencijali prethodno obrazloženih monitoring sistema.

##### 4.1 Detekcija problema na ležaju

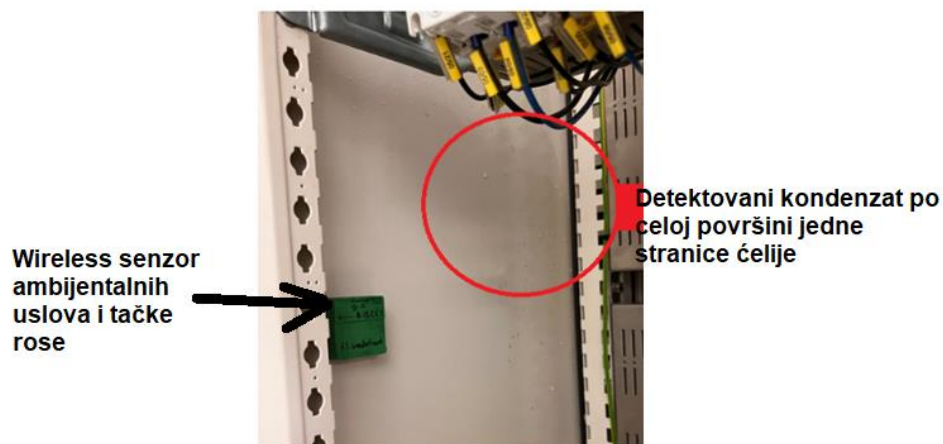
Praćenjem stanja elektromotornih pogona u jednom proizvodnom procesu, detektovane su promene u spektralnoj analizi strujnih signala koje ukazuju na uvećane vibracije, najverovatnije izvan motora, povezane sa izlaznom osovinom reduktora (Slika 4). Zaustavljanjem pogona, vizuelnom kontrolom potvrđeno je oštećenje ležaja, kao i potrošenost elemenata lančanog prenosa.



Slika 4 - Detekcija promene spektralne energije koja ukazuje na potencijalno uvećane vibracije

#### 4.2 Detekcija kondenzacije unutar niskonaponskog panela

Praćenjem stanja razvodnog postrojenja koji se sastoji od četiri ćelije sa četiri ugrađena prekidača, u nekoliko trenutaka uočeni su izuzetno visoki nivoi vlažnosti ambijentalnog vazduha unutar panela. Podešeni algoritmi za alarmiranje detektovali su mogućnost za stvaranje kondenzata koji bi mogao dovesti ne samo do ubrzanog starenja opreme, već i do eventualnog ispada celog postrojenja. Vizuelnom kontrolom ustanovljeno je obilno postojanje kondenzacionih kapljica unutar jedne ćelije panela u neposrednoj blizini prekidača (Slika 6). Brzom akcijom sprečeni su ispadi i potencijalno oštećenje opreme. Usvojene preporuke za unapređenje kontrole ambijenta ugradnjom dodatnih grejača i poboljšanim unutrašnjim ventilacijom uspešno su rešile ovaj problem.



Slika 5 - Detektovana kondenzacija unutar panela

#### 4.3 Detekcija neefikasnih sistema za kompenzaciju reaktivne energije

Praćenjem električnih parametara u okviru jednog niskonaponskog razvodnog postrojenja, eksperti su uočili da se ceo proces odvija pri prilično lošim vrednostima faktora snage, koji u apsolutnim vrednostima ne premašuje 80% (Slika 6). Ove vrednosti nisu u skladu sa ugovorenim vrednostima koje su obavezujuće za kupca od strane lokalnog distributera električne energije, te je klijent mogao biti izložen dodatnim finansijskim troškovima koji su ugovoreni klauzulom o potrošnji reaktivne energije.



Slika 6 - Zabeležene vrednosti faktora snage na četiri prekidača

## 5. ZAKLJUČAK

Digitalizacijom elektroenergetike nije omogućeno samo udobnije upravljanje, pouzdanija i brža zaštita i merenje. Posredno je omogućen i veliki napredak u pogledu dostupnih informacija o stanju opreme od interesa. Ovim su, dalje, stečeni određeni preduslovi za optimizaciju primenjenog modela održavanja, ne samo po pitanju uštede finansijskih sredstava, već i u pogledu delotvornosti. Naime, moderni sistemi za monitoring pružaju nepojmljivo više zabeleženih podataka nego što je to bio slučaj pre nekoliko decenija. Time je moguće bolje uočiti „slabe tačke“, predvideti, ali i detektovati potencijalna mesta nastanka kvara i kreirati preporuke za njihovo otklanjanje. Prikazani primer ukazuje koliko je tehnologija digitalizacije elektroenergetike uznapredovala, omogućivši kreiranje centralizovanih ekspertskih sistema za alarmiranje i praćenje stanja. Na ovaj način se osigurava sigurna 24-časovna podrška odgovornim licima u postrojenju, uz podršku ekspertskog znanja koje je u poslednjih nekoliko godina jako teško dostupno. Brojni slučajevi u kojima se ovaj pristup pokazao kao veoma uspešan u detekciji potencijalno akcidentnih situacija i uspešno ponudio rešenje za njihovo preveniranje, upotpunjuju sveopšti dojam gotovo neophodnosti ovakvih sistema monitoringa u savremenim elektrodistributivnim postrojenjima.

## LITERATURA

- [1] Liu Nian, Teng Fusheng, “The new intelligent monitoring method for operating states of large generator units”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings - Singapore 23-27 Jan. 2000, 223–227. doi:10.1109/pesw.2000.849959
- [2] J. Paul Guyer, „An Introduction to Electrical Substations Maintenance (Electric Power Generation and Distribution)“ Independently published (October 26, 2017), ISBN-13 : 978-1973153054
- [3] Substation Preventive Maintenance Manual, Prepared By International Resources Group
- [4] Zenios, Stavros & Ziembra, William, “Handbook of Asset and Liability Management Volume 2: Applications and Case Studies”, North-Holland, (2007), ISBN: 978-0-444-52802-5
- [5] Gill, Paul, “Electrical Power Equipment Maintenance and Testing”, CRC Press, (2016). DOI:10.1201/9781420017557.
- [6] Aelst, Jos. „A field proven vision on Asset Management in an industrial environment“, Conference: Asset Management Conference 2011, IET and IAM (2011), p.p. 1-5. DOI:10.1049/cp.2011.0560.
- [7] Mileta Žarković, „Monitoring i dijagnostika razvodnog postrojenja na bazi fazi modela stanja visokonaponske opreme“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2017.
- [8] Denis Ilić, „Dijagnostika stanja elektroizolacionih sistema sinhronih generatora zasnovana na veštačkoj inteligenciji“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2020.