

Specifičnosti održavanja električne opreme u nuklearnim elektranama

Štefica VLAHOVIĆ¹⁾, Igor KUZLE¹⁾ and Davor GRGIĆ¹⁾

1) University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

stefica.vlahovic@fer.hr
igor.kuzle@fer.hr
davor.grgic@fer.hr

Keywords

*Nuclear_Power_Plant_(NPP)
electrical_equipment_maintenance
refueling_outage
Resistance_Temperature_Detector_(RTD)
cables*

Ključne riječi

*nuklearne_elektrane
održavanje_električne_opreme
remont
temperaturno_ovisni_otporni_detektori_(RTD)
kabeli*

Type of paper

Abstract: Nuclear power plants (NPP) are baseload power plants with large power and long lifetime. For economic reasons, they have to work stable without tripping in the power system. Moreover, the appropriate operation of the nuclear power plant is also a safety imperative. All this is achieved using responsible approach in the design, installation, operation and maintenance of equipment and systems in the power plant. The equipment in the operation is being monitored, and the regular and preventive maintenance is carefully planned. In the case of electrical equipment, this is particularly applied to the isolation aging. Typically, nuclear power plants have a load factor between 90 and 95% along with the usual 18-month working cycle with included 30 days for refueling and maintenance. The detailed maintenance actions planning and periodic monitoring during NPP operation are some of the features for electrical equipment maintenance in NPP. This paper describes the special features for electrical equipment maintenance in nuclear power plants. The paper will also describe the monitoring of equipment aging (essential characteristic changes) in the case of resistance temperature detectors (RTD). They are an essential part of the process instrumentation whose signals are used for regulation and protection. During their lifetime, the time characteristic of the RTD changes, what consequently affects the accuracy of critical process temperature measurements. That can be significantly reduced with the regular calibration and on-time replacement of RTDs. For more complex electrical equipment (e.g. motors), an aging management program has been implemented. It monitors the aging effects to determine if the aging damages are within the permitted limits and when the replacement of individual parts is required. The paper will focus on cables due to their large number, distribution and difficult replacement.

Vrsta članka

Sažetak: Nuklearne elektrane su bazne elektrane velike snage i dugog životnog vijeka. Njihova uloga u sustavu traži stabilan rad bez ispada s mreže iz ekonomskih razloga. Neovisno od toga ispravan rad nuklearne elektrane je i sigurnosni imperativ. Sve se to postiže odgovornim pristupom u fazi projektiranja, instaliranja, pogona, te održavanja opreme i sustava u elektrani. Oprema se u pogonu nadzire, prati se njen status, te planira redovito i preventivno održavanje. U slučaju električne opreme se to posebno odnosi na starenje izolacijskog sustava. Nuklearne elektrane imaju obično i faktor opterećenja u području između 90 i 95%, uz u posljednje vrijeme, uobičajeni radni ciklus od 18 mjeseci s uključenih 30 dana za izmjenu goriva i održavanje. Detaljno planiranje akcija održavanja uz periodički nadzor za vrijeme pogona je jedna od karakteristika održavanja električne opreme u NE. U radu će se opisati specifičnosti održavanja električne opreme u nuklearnim elektranama. Također će se opisati nadzor starenja opreme (promjene bitnih karakteristika) na primjeru temperaturno ovisnih otpornih detektora (RTD). Oni su bitan dio procesne instrumentacije čiji se signali koriste i za regulaciju i za zaštitu. S vremenom se mijenja vremenska karakteristika RTD detektora što posljedično utječe na točnost mjerjenja kritičnih procesnih temperatura. Redovito baždarenje i pravovremena zamjena mogu bitno umanjiti taj problem. Za komplikiranju električnu opremu (npr. motore) implementiran je i program upravljanja životnim vijekom. On nadzire efekte starenja kako bi utvrdio jesu li oštećenja uzrokovana starenjem unutar predviđenih dopuštenih granica i kada je potrebna zamjena pojedinih dijelova. U radu će se staviti naglasak na kabele obzirom na njihov veliki broj, rasprostranjenost i tešku zamjenu.

1. Uvod

Trenutno u svijetu, prema podacima Međunarodne agencije za atomsku energiju, u pogonu je 450 nuklearnih reaktora ukupno instalirane snage 397 GW_e. Najveći broj reaktora je započeo s radom u 1970-tim i imao projektom predviđeni životni vijek 40 godina. Kako su se približavale kraju početno predviđenog životnog vijeka, a radile su dobro i konkurentno, javio se interes za prodljenjem njihovog vijeka. Razlozi su bili prvenstveno ekonomski jer su kapitalni troškovi za prodljenje životnog vijeka neusporedivo manji od bilo kojih drugih zamjenskih kapaciteta. Zato je bilo potrebno utvrditi mogu li starenju izložene sistemi, strukture i komponente ispuniti svoje funkcije i u slučaju prodljenja životnog vijeka.

Osim toga, ispravan rada sistema, struktura i komponenata je kod nuklearnih elektrana određen i sigurnosnim zahtjevima. Oprema važna za nuklearnu

sigurnost mora raditi u normalnim uvjetima, ali i u akcidentnim uvjetima uzrokovanim događajima predviđenim dizajnom. Sve to se postiže odgovornim pristupom u fazama projektiranja, pogona i održavanja. Nuklearne elektrane (NE) karakterizira, u današnje vrijeme, uobičajeni radni ciklus od 18 mjeseci s uključenih 30 dana prvenstveno za izmjenu goriva, ali i za održavanje. Zato sve akcije održavanja moraju biti detaljno isplanirane. U radu će se prvo u Poglavlju 2 opisati specifičnosti održavanja električne opreme u nuklearnim elektranama. Zatim će se u Poglavlju 3 opisati baždarenje temperaturno ovisnih otpornih detektora (RTD detektora, eng. Resistance Temperature Detector, RTD) koji su bitan dio procesne instrumentacije. Na kraju, će se u Poglavlju 4 opisati program upravljanja životnim vijekom električne opreme, te će se na primjeru kabela pokazati primjena tog programa.

Oznake/Symbols

	<u>Oznake/Symbols</u>	<u>Grčka slova/Greek letters</u>
R	- otpor, Ω - resistance	
T	- temperature, $^{\circ}\text{C}/\text{K}$ - temperature	α
C	- pred-eksponecnijalni faktor (odredena testom) - pre-exponential factor (determined by test)	δ
E_a	- aktivacijska energija, J - activation energy	τ
k	- Boltzmannova konstanta, J/K - Boltzman constant	
R	- vrijeme života, - lifetime	

2. Održavanje nuklearnih elektrana

Održavanje opreme u nuklearnim elektranama osim uobičajenim razlozima (pouzdan i ekonomičan rad) diktirano je i sigurnosnim razlozima i načinom pogona. Nuklearna elektrana ima sigurnosne sustave koji su projektirani po principa redundantnosti, diverziteta, fizičke i funkcionalne separacije. Dobar dio tih sustava je veći dio vremena neaktivan, ali moraju imati visok stupanj vjerojatnosti obavljanja funkcije u slučaju potrebe. To je u direktnoj suprotnosti sa sustavima koji su bitni za proizvodnju električne energije, koji rade dugi vremena (12, 15 ili 18 mjeseci) na punoj snazi bez mogućnosti održavanja u pogonu (dio ih je smješten u zaštitnoj zgradi gdje je u normalnom pogonu onemogućen pristup zbog visokih doza zračenja). Prisustvo zračenja je dodatni okolišni faktor koji utječe na starenje svih organskih materijala (posebno izolacije i maziva), a na duže staze i na oštećivanje kristalne strukture neorganskih materijala, pa je i to potrebno uzeti u obzir. Održavanje je tako organizirano da se uglavnom obavlja za vrijeme izmjene goriva, pri čemu je ukupno raspoloživo vrijeme obično ograničeno na 25 do 35 dana.

Iako se aktivnosti izmjene goriva i remonta uglavnom preklapaju postoji interval od 4 do 6 dana kada se, posebno u zaštitnoj zgradi, mogu odvijati samo aktivnosti izmjene goriva. Sve to zahtijeva da se akcije održavanja striktno i detaljno planiraju.

Takav tip planiranja je efikasno moguće izvesti samo uz korištenje posebnih računarskih programa razvijenih za planiranje remontnih aktivnosti. Oni uzimaju u obzir i činjenicu da dio sigurnosnih sustava uvek mora biti raspoloživ tako da se u isto vrijeme ne mogu održavati svi redundantni sustavi. Program na osnovi trenutne raspoloživosti opreme i stanja jezgre u svakom trenutku računa vjerojatnost oštećenja goriva, te su smanjenju te vjerojatnosti podređene sve remontne aktivnosti. Striktna primjena sustava radnog naloga se koristi kako bi se u svakom trenutku situacija u elektrani sinkronizirana s planom. Plan se uobičajeno prilagođava dva puta dnevno uz identificiranje aktivnosti koje su na kritičnom putu (određuju ukupno trajanje/produženje remonta).

Remontne aktivnosti osim redovitog održavanja (uglavnom bazirane na preporukama proizvođača opreme) uzimaju u obzir pogonsko iskustvo s opremom tijekom prošlog ciklusa, kao i povijest opreme od

trenutka ugradnje. Sva se uočena odstupanja analiziraju i koriste prilikom planiranja akcija održavanja. Pogonsko iskustvo je, u puno većoj mjeri nego za druga energetska postrojenja, predmet izmjene iskustva sa drugim nuklearnim elektranama, a preko zapisa isporučilaca opreme i sa svim drugim korisnicima slične opreme. Minimalni zahtjevi za organizaciju održavanja u nuklearnim elektranama određeni su regulatornim zahtjevima što obično nije slučaj u drugim energetskim postrojenjima.

U nastavku će biti prikazane vrste održavanja u NE koje su slične onima za bilo koje održavanje, kao i dva primjera održavanja opreme s nekim specifičnostima zbog važnosti opreme i dugog očekivanog životnog vijeka.

2.1. Vrste održavanja

U svakoj elektrani, pa tako i u nuklearnoj, pouzdanost opreme je od iznimnog značaja. Na pouzdanost opreme utječu dizajn, kvaliteta materijala i izrada, testiranja provedena tijekom proizvodnje, ali i aktivnosti održavanja. U nastavku su nabrojene vrste održavanja, te će svaka biti posebno opisana. Istovjetna podjela se može pronaći i u radu [8] koji predstavlja regulatorni dokument Kanadske nuklearne sigurnosne komisije (Canadian Nuclear Safety Commission - CNSC) s naglaskom na program održavanja u NE. Kako bi se implementirala efikasna strategija održavanja, potrebno je koristiti različite tehnike održavanja. **Error! Reference source not found.** prikazuje jedan primjer strategije održavanja u kojoj se primjenjuje optimizacijski proces kako bi se kontinuirano unaprjeđivao program održavanja.



Slika 1. Primjer jedne strategije održavanja

Figure 1. Relationship of maintenance concepts and activities

U radu [2] su također opisane tehnike održavanja u nuklearnim elektranama s time da je više stavljen naglasak kako efikasno upravljati održavanjem u NE. To uključuje organizaciju i upravljanje kako bi se osiguralo efektivno implementiranje i kontrola aktivnosti održavanja. Zatim je potrebno osigurati broj i kvalifikacije osoblja koje provodi održavanje tijekom pogona, ali i tijekom remonta kada je opseg posla puno veći i kada je potrebno nadgledati rad vanjskih izvođača radova. Potrebno je osigurati alate i opremu, te rezervne dijelove ukoliko je potrebno kako bi se efikasno izveo

posao. Dodatno, u postrojenju treba osigurati rad i za kontaminiranu i nekontaminiranu opremu. Tijekom cijelog procesa, potrebno je osigurati da se sve aktivnosti održavanja izvode tako da je izlaganje i osoblja i stanovništva radijaciji što je niže moguće (as low as reasonably achievable - ALARA).

2.1.1. Korektivno održavanje

Za svako uočeno odstupanje u procesu i na opremi, potrebno je unutar Korektivnog akcijskog programa NE (eng. Corrective Action Program - CAP) inicirati zahtjev za korektivnu akciju. CAP je softverska aplikacija za

evidentiranje problema i iniciranje korektivnih aktivnosti. Svi zaposleni su dužni upozoriti na uočene probleme pri svim stanjima elektrane, te na procesom i neprocesnom dijelu elektrane.

Unutar aplikacije CAP postoji nekoliko aplikacija od kojih je jedna iniciranje korektivne akcije. Ostale aplikacije su:

- Analize - svaki događaj otkaza opreme važne za elektranu analizira se uzrok, te predlaže akcije i mjeru da se sprijeći ponavljanje istog.
- Akcije - daju se određena zaduženja službama na osnovu utvrđenih činjenica iz analize (mogu biti akcije administrativnog ili tehničkog karaktera).
- Pokazatelji - ocjenjuje se učinkovitost elektrane, održavanja.

2.1.2. Proaktivno održavanje

Proaktivno održavanje je fokusirano na kontrolu, ublažavanje i eliminaciju korijena uzroka pogreške odnosno problema s opremom. Ono je uspostavljeno da se poboljša radni proces i kroz modificiranje opreme ili kroz naprednije metode praćenja rada potpuno uklone uzroci otkazivanja opreme, a time i buduće aktivnosti korektivnog održavanja.

Jedan primjer proaktivnog održavanja su zamjena svih ručnih ventila određenog modela ili tipa od istog proizvođača za koje postoje dokazi iz vlastite prakse ili prakse neke druge elektrane, da su loših karakteristika.

2.1.3. Preventivno održavanje

Preventivno održavanje je skup planiranih aktivnosti održavanja opreme koje se izvode unaprijed, tj. prije nego dođe do degradacije, a sa svrhom da se produži radni vijek komponente i osigura pouzdan rad. Preventivno održavanje mora se optimizirati na osnovu onoga što predlaže proizvođač opreme, te rezultata analize prethodnih održavanja na istoj opremi.

Lista opreme i učestalost izvođenja pojedinih aktivnosti utvrđuje se i uskladjuje na osnovi rezultata analize iz dokumenta EPRI Preventive Maintenance [3] pri čemu treba voditi računa o slijedećem:

- preporukama proizvođača opreme
- zakonima i standardima
- zahtjevima iz tehničkih specifikacija i zahtjevima upravnih organa
- inženjerskim analizama pokazatelja raspoloživosti opreme, radnih karakteristika, kvarova
- analizama isplativosti
- iskustvima drugih elektrana na istoj ili sličnoj opremi
- vlastitim iskustvima s opremom

2.1.4. Prediktivno održavanje

Prediktivno održavanje je kontinuirano praćenje, mjerjenje parametara i dijagnostika sa svrhom utvrđivanja stanja opreme, trendiranja i prognoziranja otkaza opreme. Prediktivno održavanje još se naziva i

održavanje na osnovu stanja opreme (eng. condition based maintenance). U to je uključeno praćenje i analiza direktnih (mjerjenje, praćenje i analiza vibracija, rezultati Eddy Current testiranja, i dr.) parametara te onih indirektnih (pokazatelji učinkovitosti, rezultati laboratorijskih testiranja).

Rezultati prediktivnog održavanja su u uskoj vezi s planiranjem preventivnog ili korektivnog održavanja. Ukoliko je rezultat analize degradacija nekih parametara, a da još nisu izvan dozvoljenih granica, može se predvidjeti koliko će još vremena kao takva moći obavljati svoju funkciju. Rezultat će biti preventivna zamjena tokom jedne od slijedećih planiranih aktivnosti na opremi. Ako je rezultat analize takav da je potrebno neki rezervni dio zamijeniti odmah, generira se korektivni radni nalog na osnovu kojeg se izvrše potrebni radovi.

Prediktivno održavanje gotovo redovito uključuje rotirajuće strojeve, te motorno i zračno pogonjene ventile. Oprema kao što su releji, električne komponente, tlačni transmiteri se ne uključuju u prediktivno održavanje zbog neprevidivih načina na koji otkaže njihova funkcija.

2.1.5. Nadzorna testiranja

Nadzorna testiranja (eng. Surveillance testing) su testiranja opreme i sistema važnih prvenstveno iz aspekta sigurnosti elektrane kako bi se dokazalo da će oprema izvršiti svoju funkciju ako elektrana dođe u stanje da je potrebno aktiviranje zaštitne funkcije. Zahtjevi za nadzornim testiranjem proizlaze iz nekoliko dokumenta:

- USAR (eng. Updated Safety Analysis Report)
- Tehničke specifikacije
- In-service tesriranja pumpi koji su u 1, 2, i 3 ASME sigurnosnom razredu (1 – primarni krug, 2 – komponente za sigurnu obustavu elektrane, 3 – turbina)
- Zahtjevi regulatornog tijela
- Zahtjevi stručnih službi NE

Nadzorna testiranja se provode periodički, a učestalost je najčešće propisana Tehničkim specifikacijama. Tehničke specifikacije su dokument koji propisuje ograničenja u radu komercijalnih NE kako bi osigurale sigurnost elektrane. Najčešće učestalosti nadzornih testova funkcionalnosti su tri mjeseca, no za neku opremu to je jedan mjesec, za neku šest mjeseci. Učestalost umjeravanja je gotovo redovito duljina gorivog ciklusa.

2.2. Regulatorni okvir održavanja električne opreme u nuklearnoj elektrani

Značaj održavanja za očuvanje i produženje životnog vijeka nuklearne elektrana i njen siguran pogon adresiran je u formi regulatornih zahtjeva koje su prvo istaknuli u Nuklearnoj regulatornoj komisiji (NRC) SAD, a kasnije su takav stav preuzeli i regulatori u drugim zemljama (NE Krško je preuzela pristup važeći u zemlji isporučitelja nuklearne tehnologije). Jedno od poglavљa američkog zakona koji regulira korištenje nuklearnih elektrana se eksplicitno odnosi na problem održavanja, poglavje 10

CFR 50.65 (Code of Federal Regulations). Kolokvijalno je označeno nazivom pravilo održavanja, "Maintenance Rule". Postoji direktna veza između efektivnog održavanja i sigurnosti budući da su broj tranzijenata u elektrani i funkcionalnost sigurnosnih sustava povezani s pogonom, raspoloživošću, te pouzdanošću opreme i sustava elektrane. Iako je pravilo o održavanju inicijalno zamišljeno za opremu bitnu za sigurnost u dobroj se mjeri primjenjuje na svu opremu u elektrani budući su otkazi obične opreme inicijalni događaji za nuklearne nesreće. U užem smislu nadzor efikasnosti održavanja u nuklearnim elektranama uključuje sve strukture, sisteme i komponenate (SSK) (eng. Structure, System and Component – SSC) koje su:

1. SSK bitne za nuklearnu sigurnost (safety related) – moraju funkcionirati tijekom i nakon graničnog projektnog kvara kako bi osigurale integritet primarnog kruga, gašenje reaktora ili mogućnost sprječavanja i ublažavanja posljedica nesreće
2. SSK koje nisu od važnosti za nuklearnu sigurnost (nonsafety related)– uključuju: (a) SSK koje mogu ublažiti posljedice nesreće ili tranzijenta ili se koriste u hitnim pogonskim procedurama (Emergency Operating Procedure - EOP), (b) SSK čiji kvar može spriječiti SSK bitne za sigurnost da izvrše svoju sigurnosnu funkciju, i (c) SSK čiji kvar može uzrokovati brzu obustavu reaktora ili aktiviranje sustava bitnih za sigurnost sistema

Direktiva [4] opisuje prihvatljiv postupak implementacije pravila održavanja (Maintenance Rule - MR) koji je grafički prikazan na **Error! Reference source not found.**. Postupak započinje procesom izbora SSK koje su relevantne za MR po kriteriju navedenom u 10 CFR 50.65.

Električni sustavi bitni za nuklearnu sigurnost podliježu posebnim pravilima klasifikacije, projektiranja, pogona i održavanja i označeni su pojmom električna oprema klase 1E. U dokumentu [5] je opisano održavanje 1E električnih sistema, koji se dijele na:

1. Klasa 1E izmjeničnog napajanja
2. Klasa 1E istosmjernog napajanja
3. Klasa 1E instrumentacijskog i kontrolnog sistema
4. Klasa 1E električnih prodora u zaštitnoj zgradi (Containment Electrical Penetration Assemblies)

Za svaku pojedinu opremu iz navedenih električnih sistema koja je klase 1E navode se zakoni i standardi koji se moraju poštivati pri instalaciji, inspekciji i testiranju opreme. Postojanje električne opreme klase 1E bitno

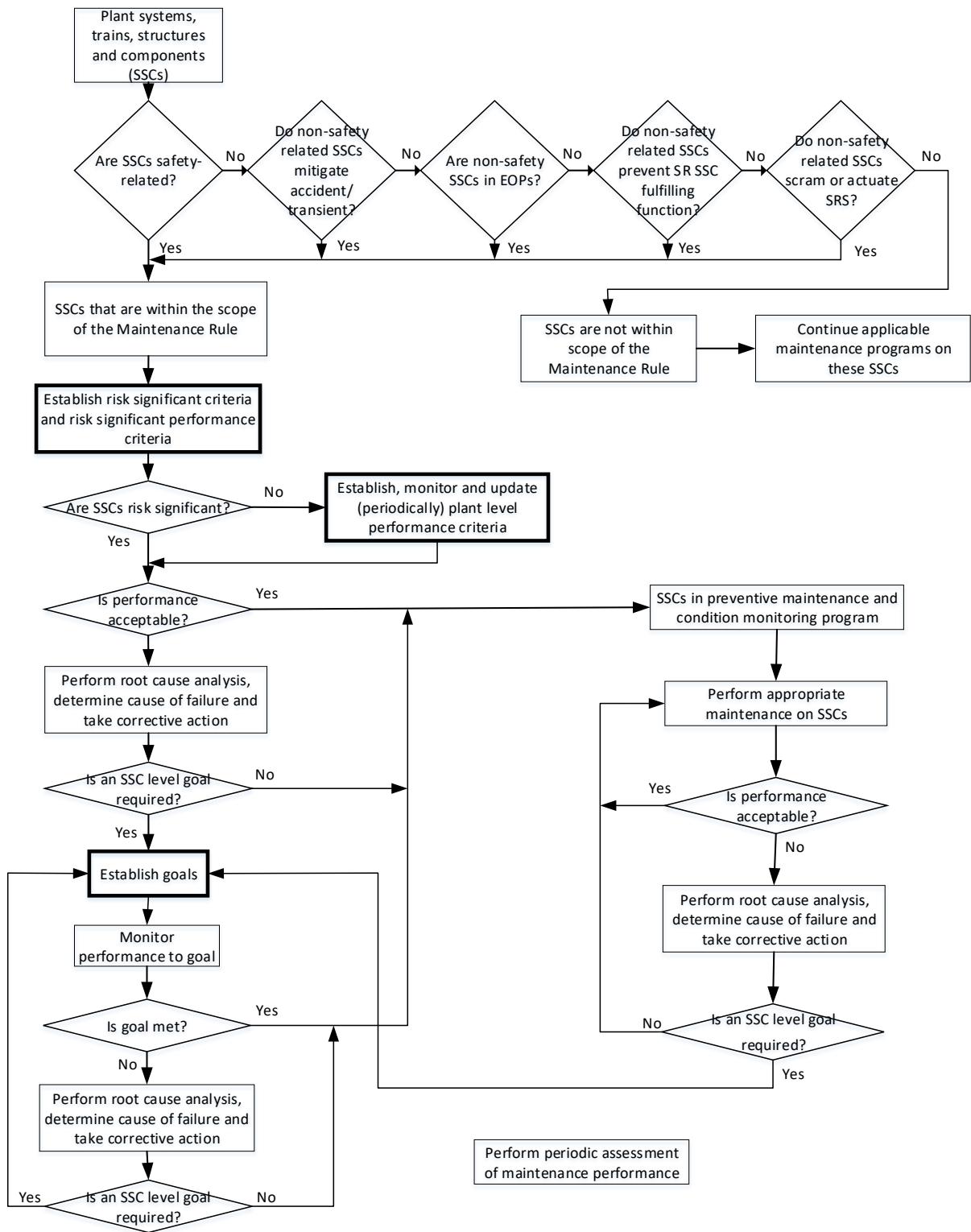
određuje organizaciju održavanja kako te tako i ostale električne opreme u NE.

2.3. Uloga dobre pogonske prakse i iskustvenih baza pri održavanju

Iako je pokušaj sistematiziranja i preporučivanja dobre pogonske prakse pri održavanju i korištenja iskustvenih baza podataka o stanju opreme prisutan u svim modernim pristupima održavanju, njegova je važnost posebno istaknuta u slučaju održavanja NE. Vlasnici nuklearnih elektrana povezani su u grupe koje izmjenjuju pogonska iskustva i dobre prakse pri održavanju, te informacije o iskustvu s pojedinom opremom. Postoji isto tako i veza s bazama informacija o opremi koju održavaju proizvođači opreme kvalificirane za NE (to je jedan od preduvjeta da budu kvalificirani dobavljači). Te su veze čak i izraženije od onih prisutnih u isto tako kritičnoj djelatnosti zrakoplovnog prometa.

Da bi bilo moguće stvoriti informacije koje su od interesa širem krugu korisnika potrebno je izgraditi sustavni pristup održavanja i praćenja komponenata u svakoj elektrani. Svaki kvar mora biti analiziran do definiranja pravog uzroka, (način pogona, način održavanja, greška u opremi). U njegovu analizu osim elektrane može biti u složenijim slučajevima uključen i isporučitelj opreme (slično kao u zrakoplovnoj industriji). Informacije moraju biti objektivizirane i prezentirane na način da su upotrebljive širem krugu korisnika. Na primjer da bi se sustavno nadzirali kvarovi električnih motora u elektrani pokušavaju se identificirati tipovi kvarova. Iz takve tipizacije može proizaći da su učestali kvarovi vezani za ležajeve, za stator, rotor ili ostale dijelove motora. Nakon toga se pokušavaju utvrditi razlozi za kvarove (npr. pregrijavanje, probor izolacije, mehanički kvar, električni kvar). U idućoj fazi se identificiraju mjerljivi uvjeti koji mogu biti indikacija problema (trajno preopterećenje, visoka temperatura okoline, velik sadržaj vlage, pojava vibracija, loše podmazivanje, loša ventilacija i hlađenje, mehanizmi starenja, ...). Za identificirane uvjete mogu se onda definirati relevantne preventivne mjere (kontinuirane, periodičke ili prediktivne).

Na bazi tih mjerljivih uvjeta definiraju se i stres faktori (npr. vrijeme pogona, broj startova, temperatura namota, čistoća, vlažnost, izolacijski otpor, indeks polarizacije, nivo vibracija, ...) koji su osnova za definiranje intervala nadzora ili održavanja da se spriječi kvar. Iako elektrane nisu obvezne izmjenjivati detalje o ukupnom pristupu održavanju, kao minimum je potrebno informirati o kvarovima na način da je nedvojbeno jasan uzrok i da su podaci iskoristivi drugima za samostalnu analizu i mogućnost korištenja informacije u svom sustavu planiranja održavanja.



Slika 2. Proces implementacije "Maintenance Rule" [5]

Figure 2. The process for implementing the "Maintenance Rule"

2.4. Uloga radnog naloga u aktivnostima održavanja

Institucija radnog naloga ima ključno mjesto u implementaciji pravila održavanja sve opreme u NE i u nadzoru veze između stvarnog stanja i plana održavanja. Svaka aktivnost održavanja u NE se izvodi isključivo preko radnog naloga. Radni nalog je dokument kojim se prate sve unaprijed definirane aktivnosti koje izvršava pojedinac ili grupa zaposlenika. Kako je opseg komponenti i aktivnosti u NE velik, radni nalog uvelike olakšava praćenje pojedinih aktivnosti i pritom osigurava sigurnost ljudi, sigurnost tehnološkog objekta, učinkovit rad elektrane. Svaki radni nalog ima svoj jedinstveni broj koji se softverski generira, te se osim broja na radni nalog upisuje prioritet rješavanja problema prema ozbiljnosti problema i važnosti opreme. Postoje tri vrste prioriteta i u skladu s time ovisi početak poslova održavanja:

1. Hitna intervencija – izdaje se hitni radni nalog i s poslom se započinje odmah.
2. 1. prioritet – s poslom se započinje odmah ili prvi slijedeći radni dan
3. Ostali prioriteti – određuje se vremenski rok do kada treba riješiti problem

Radni nalozi se dijele i ovisno o tome u kojem dijelu NE se izvode:

1. Procesni – izvode se za tehnološke procese i zato su važan za status elektrane. Zato s njima mora biti upoznata služba proizvodnje, odnosno operateri. Preventivni nalog mora biti izdan barem četiri tjedna unaprijed, odnosno prije datuma zamrzavanja plana remonta ako je nalog remontni.
2. Neprocesni – izvode se izvan tehnološkog procesa i uključuju održavanje rezervnih dijelova na skladištu, popravak, testiranje ili umjeravanje komponente koja je u procesu zamijenjena novom, i dr.

Ovisno o stanju elektrane u kojem se izvode aktivnosti, radne naloge dijelimo na:

1. On-line – izvode se pri normalnom radu elektrane
2. Remont – remont prvenstveno služi za izmjenu goriva, ali i za sve druge aktivnosti koje nije moguće izvesti dok elektrana radi
3. Prisilno zaustavljanje – može biti planirano (izvode se korektivne aktivnosti koje su prethodno planirane, ali je bilo potrebno zaustaviti reaktor da bi ih bilo moguće izvršiti) ili neplanirano (izvode se korektivne aktivnosti koje su dovele do zaustavljanja elektrane)

NE koriste različite programske pakete kako bi mogle planirati radne naloge. Oni omogućuju logično povezivanje aktivnosti, praćenje izvođenja planiranih projekta, planiranje upotrebe resursa, formiranje različitih izvješća i dr. Posebno su korisni za planiranje remontnih aktivnosti kojih je puno i koje su međusobno povezane, odnosno kada početak jedne aktivnosti ovisi o završetku druge aktivnosti. U slučaju da dođe do

pomicanja jedne aktivnosti, sve ostale aktivnosti se u odnosu na nju automatski preračunavaju.

Planiranje aktivnosti je važno i s aspekta optimalnog korištenja resursa, odnosno ljudi, materijala, opreme i strojeva. To je važno kako ne bi došlo do preklapanja aktivnosti gdje se traže isti ljudi, ista oprema ili rad na istom dijelu postrojenja gdje bi se onemogućio rad drugim ekipama.

Radni nalozi se koriste i da se komunicira informacija o posebnim uvjetima za provođenje akcija održavanja (temperatura, tlak, zračenje, rad pod naponom). U NE postoji i opasnost od ionizirajućeg zračenja te je potrebno posebnu pozornost posvetiti tome. S time u vezi, cijelu NE dijelimo na radiološko stalno nadzirano područje i područje u kojem se nadzor vrši povremeno. Radiološki nadzirano područje predstavljaju objekti u kojima se nalazi oprema koja je u doticaju s radioaktivnim materijalima (reaktorska zgrada, zgrada za istrošeno gorivo, pomoćna zgrada, objekt za dekontaminaciju, te prostori za prerađu i skladištenje radioaktivnog otpada). Osoblje koje radi u tom području mora se zaštiti od zračenja i kontaminacije, te istodobno spriječiti raznošenje radioaktivnog materijala izvan radiološki nadziranog područja. Dodatno, to znači uključivanje i službe radiološke zaštite prilikom planiranja posla u radiološko nadziranom području.

Tijekom rada u radiološki nadziranom području sve su aktivnosti prilagođene potrebi da se osigura najmanja moguća kontaminacija i izloženost direktnom zračenju (udaljenost od izvora, optimiranje trajanja akcije, ograničeno vrijeme boravka, štitovi i osobna zaštitna sredstva).

3. Testiranje temperaturno ovisnih otpornih detektorâ

Većina kritičnih procesnih temperaturu u NE se mjeri pomoću temperaturno ovisnih otpornih detektorâ (eng. Resistance Temperature Detector, RTD detektor) i termoparova. Temperatura primarne rashladne vode u toploj i hladnoj grani rashladne petlje i pojne vode u sekundarnim cjevovodima se mjeri pomoću RTD-a, a temperatura vode na izlazu iz reaktorske jezgre pomoću termoparova (Core-Exit Thermocouples CET). CET se većinom koriste samo za nadzor temperature tijekom uvjeta koji odstupaju od normalnih i njihova točnost i vrijeme odziva nisu od primarne važnosti. RTD detektori koriste se za regulaciju srednje temperature (snage) i zaštitu, te se od njih zahtjeva veća točnost i brzinu odziva. S vremenom detektori mogu promijeniti svoju karakteristiku što utječe na točnosti i brzinu odziva pa je potrebna provjera i eventualna rekalibracija. Takvu aktivnost isto možemo uvrstiti u održavanje u širem smislu. Detektor koji ne ispunjavana kriterije prihvatljivosti potrebno je zamijeniti. Primjer jednog RTD detektora koji mjeri temperaturu primarnog rashladnog sredstva je prikazan na Slika 3.



Slika 3. RTD detektor za mjerjenje temperature primarnog rashladnog sredstva

Figure 3. RTD detector for primary system temperature measurement

Temperaturni detektori se inicijalno umjeravaju u kupkama u kojima se održava stabilna temperatura koja se istovremeno mjeri preciznim digitalnim termometrom (referentna temperatura). Temperaturne detektore se ne može podešavati nego samo provjeriti karakteristika odnosno $T(^{\circ}\text{C})/\text{R}(\Omega)$ krivulja, te ukoliko se nalazi izvan granice točnosti, detektor se mora zamijeniti novim. U nuklearnim elektranama postoje RTD detektori koji su direktno uronjeni u fluid (u pomoćnom cjevovodu manjeg presjeka, problem je transportno kašnjenje zbog strujanja fluida) i tzv. thermowell detektori koji se ugrađuju u stjenku glavnog cjevovoda (problem je toplinska inercija). Vađenje i testiranje takvih detektora van mesta ugradnje je nemoguće ili ne daje odgovarajuće podatke (posebno vezano za vrijeme odziva). Uobičajeno je provjeravati točnost i brzinu odziva bar jednom tijekom ciklusa izgaranja (12 ili 18 mjeseci).

Provjera točnosti (unutar 0.3°C) mjerjenja RTD detektora i njihovo umjeravanje provodi se metodom kros-kalibracije (eng. Cross calibration) [6]. Nakon remontnih radova, primarni sistem se zagrijava, te se na tri različite stabilne temperature očitavaju otpori senzora. Otpori se pomoću polinoma (svaki pojedini senzor ima svoj polinom) pretvaraju u temperature. Temperature redundantnih senzora (mjere istu veličinu) se uspoređuju s prosječnom temperaturom svih zajedno, te se gleda je li odstupanje unutar dozvoljenih granica. Metoda, prikazana na Slika 4, se dakle sastoji od snimanja očitanja redundantnih senzora, njihovog usrednjavanja i izračuna devijacije pojedinog senzora od prosječne vrijednosti.

Svaki RTD detektor koji odstupa od prosjeka više od unaprijed definiranog kriterije (npr. 0.3°C) se isključuje iz prosjeka. RTD koji se isključuje se naziva outlier. On se može zamijeniti ili se može ponovo kalibrirati, odnosno razvija se nova kalibracijska tablica koristeći kros-kalibracijske podatke.

Kako bi se RTD otpor pretvorio u temperaturu koristi se najčešće Callendarova formula, koja za temperature iznad 0°C izgleda:

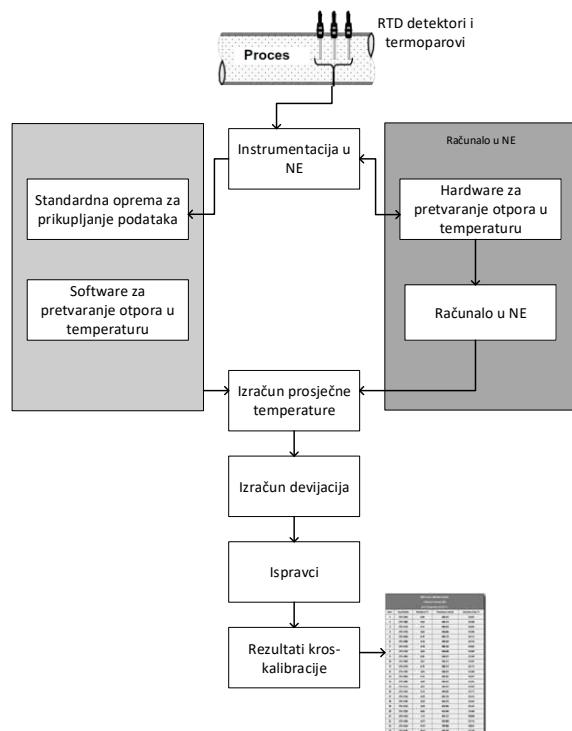
$$\frac{R(T)}{R(0)} = 1 + \alpha \left[T - \delta \left\{ \left(\frac{T}{100^{\circ}\text{C}} \right)^2 - \left(\frac{T}{100^{\circ}\text{C}} \right) \right\} \right]. \quad (1)$$

gdje je:

T - temperatura ($^{\circ}\text{C}$),
 $R(0)$ - otpor pri 0°C (Ω),
 α - kalibracijska konstanta ($\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$),
 δ - kalibracijska konstanta ($^{\circ}\text{C}$) i

$R(T)$ – otpor pri bilo kojoj temperaturi (Ω).

Članovi $R(0)$, α i δ se određuju za svaki pojedini RTD pri kalibriranju RTD u kupki konstantne temperature u laboratoriju.

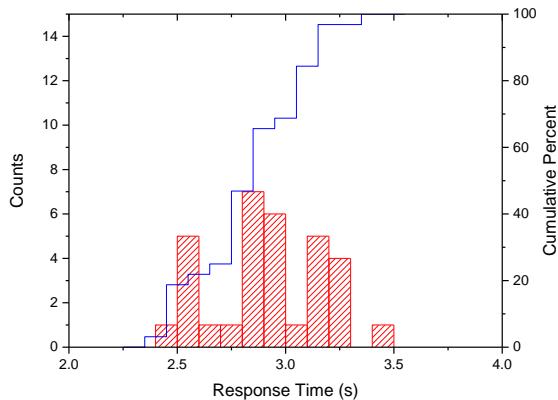


Slika 4. Tijek procedure kros-kalibracije

Figure 4. Flowchart of cross-calibration procedure

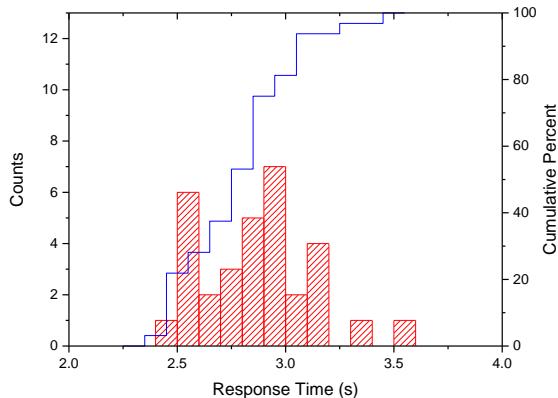
Vremena odziva RTD detektora se u novije vrijeme mjere LCSR (Loop Current Step Response) postupkom. Uobičajeni strujni signal iznosa 1 do 2 mA se zamjeni kratkotrajnim impulsom približno 40 puta većeg iznosa. Na taj način se aktivni dio detektora počne zagrijavati a izmjereni napon je pokazatelj promjene temperature. Obično mjerjenje traje do 40 s pri čemu se skupi do 2000 mjernih točaka. Vrijeme odziva je vrijeme kad mjereni signal dostigne 62.3% ukupne promjene izazvane zagrijavanjem strujnim impulsom. Da bi se uzeli u obzir promjenjivi uvjeti odvođenja topline (fluktuacija temperature procesnog fluida) obično se radi veći broj testova na istom detektoru (40 do 50). Vrijeme odziva je rezultat usrednjavanja. Općenito se smatra da povećanje vremena odziva nije rezultat sistemske degradacije nego je uzrok slučajna varijabla. Na Slika 5 i Slika 6 su prikazani histogrami rezultata mjerjenja vremena odziva

za 32 RTD detektora za dva intervala mjerenja provedena u NE Krško na punoj snazi.



Slika 5. Histogram prvog primjera (srednja vrijednost 2,87 s, standardna devijacija 0,26 s, minimalna vrijednost 2,4 s maksimalna vrijednost 3,4 s, broj mjerena 32, na 100% snage)

Figure 5. First example histogram (Mean value 2,87 s, standard deviation 0,26 s, min value 2,4 s max value 3,4 s, number of values 32, 100% power)



Slika 6. Histogram drugog primjera (srednja vrijednost 2,81 s, standardna devijacija 0,26 s, minimalna vrijednost 2,4 s maksimalna vrijednost 3,5 s, broj mjerena 32, na 100% snage)

Figure 6. Second example histogram (Mean value 2,81 s, standard deviation 0,26 s, min value 2,4 s max value 3,5 s, number of values 32, 100% power)

4. Program upravljanja životnim vijekom komponenata

Starenje komponenata je normalno adresirano u svakom postupku održavanja. U slučaju nuklearne elektrane u kojoj je životni vijek komponenata dug, njegov utjecaj može biti posebno izražen, te mu se posvećuje posebna pažnja i na nivou ukupnog planiranja održavanja i na nivou praćenja starenja komponenata i sustava.

Starenje je prema [7] degradacija struktura, sistema i komponenata (eng. Structure, System and Component – SSC) uzrokovana protekom vremena ili uzrokovana događajima i okolnostima, a može imati utjecaja na

njihovu funkciju. Vremensko starenje se događa kroz vrijeme kao rezultat normalnog rada, a uključuje lomljivost, gubitak elastičnosti, zamor materijala, koroziju, promjenu izolacijskog otpora i dr., dok se starenje uzrokovano okolnostima događa kao rezultat nenormalnih događaja ili uvjeta.

Prema Međunarodnoj agenciji za atomsku energiju [6][8], Program nadzora starenja (eng. Aging Management Program - AMP) su sve aktivnosti na sistemu iz područja održavanja, inženjeringu i operative sa svrhom da se degradacija uzrokovana starenjem održava unutar prihvatljivih granica. Ne uključuje normalno održavanje aktivnih komponenti da se zadovolji njihova pouzdanost, niti periodičke i preventivne zamjene komponenti čiji je radni vijek kraći od radnog vijeka sistema.

Program upravljanja životnim vijekom (eng. Life Cycle Management) je integracija nadzora starenja i ekonomskog planiranja sa svrhom da se optimizira rad postrojenja, održavanje i radni vijek. Cilj je da se održi prihvatljiv nivo radnih parametara i sigurnosti uz maksimalnu ekonomsku isplativost povrata investicije kroz radni vijek postrojenja.

Program nadzora starenja posebno je važan za nuklearne elektrane koje su dugovječna postrojenja projektirana za rad od 40 godina s mogućnošću prodljenja životnog vijeka za još 20 godina. Nadzor starenja komponenata i ocjena njihovog preostalog životnog vijeka posebno su važni u situaciji kad se traži produženje pogonske dozvole (životnog vijeka) elektrane.

Sveobuhvatna ocjena stanja postrojenja (eng. Integrated Plant Assessment) je ocjena koja dokazuje da će se kontrolirati utjecaj starenja na komponente kako bi se održale nepromijenjenim sve temeljne činjenice na osnovu kojih je pogonska dozvola (licenca) produljena. Iako se problematika odnosi na sve komponente u elektrani (posebno na električne), vrlo su često u fokusu interesa električni kabeli zbog svoje rasprostranjenosti, važnosti i vrlo često nemogućnosti zamjene.

4.1. Kabeli

Kabeli u NE (posebno njihova izolacija) moreju izdržati projektne parametre pri normalom radu, ali i u slučaju nesreće koja bi mogla uslijediti pri kraju njihovog životnog vijeka. Pod nesrećom se obično smatra pucanje nekog od cjevovoda s fluidom visoke temperature. Kabel se tada može naći u uvjetima visoke temperature, tlaka, relativne vlažnosti i radijacije. U takvim situacijama, elektrana ne smije ostati bez mogućnosti nadzora komponenti i parametra. Stoga su kabeli jako bitni jer se pomoću energetskih kabela napajaju komponente, preko upravljačkih ili kontrolnih kabela se upravlja komponentama, a putem instrumentacijskih kabela informacije dolaze od senzora i mjernih pretvornika.

Podjela kabela u NE:

1. Srednjenačni energetski kabeli – napajaju veće motore (reaktorskih i pumpi pojne vode, transformatora)

2. Niskonaponski energetski kabeli (< 1 kV) – napajaju niskonaponske motore, grijачe, male transformatore, rasvjetu, instrumentacijsku opremu i dr.
3. Signalni i upravljački kabeli – napajaju pomoćne komponente, kontrolne sklopke, releje, pogonske more ventila (MOV – Motor Operated Valve)
4. Instrumentacijski kabeli – za vrlo mala opterećenja (naponi < 1000 V, a najčešće 300 V), u njih se ubrajaju kabeli za prijenos analognih i digitalnih informacija od detektora (RTD, termoparovi, tlačni mjerni pretvornici, detektori nuklearne instrumentacije)
5. Telekomunikacijski kabeli - < 300 V
6. Uzemljivački kabeli

Starenje kabela je rezultat starenja električne izolacije, te je stoga od najvećeg značaja praćenje stanja osnovne izolacije. Plašt se ne smatra predmetom programa nadzora starenja, te predstavlja fizičku zaštitu osnovne izolacije. Njegovo stanje može poslužiti kao indikator stanja osnovne izolacije jer je obično napravljen od materijala koji ima nešto slabija svojstva od osnovne izolacije, pa su na njemu prije vidljivi utjecaji okoline. Izolacija i plašt su napravljeni na osnovi polimera s različitim dodacima kojima se poboljšavaju mehanička i električna svojstva, te otpornost na gorenje i požar. Najčešće korišteni izolacijski materijali su:

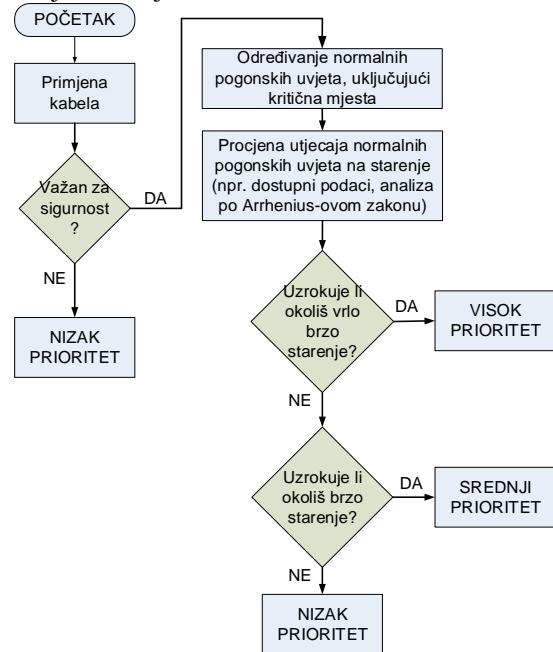
1. XLPE – Cross-linked polyethylene
2. EPR/EPDM – Ethylene Propylene Based Elastomers
3. Teflon i Tefzel – koristi se u sistemu za nadzor radijacije
4. PVC (polivinil klorid) – koristi se u starijim elektranama
5. Hypalon – najčešće za plašt
6. PEEK – Polyether ether ketone, u području visoke radijacije

U nuklearnoj elektrani je instalirano mnoštvo različitih kabela ukupne dužine preko 1000 km. Stoga je za program nadzora starenja potrebno kategorizirati kable prema važnosti, odnosno izdvojiti one koji imaju funkciju važnu za siguran rad elektrane. To su prvenstveno kabeli unutar reaktorske zgrade te kabeli u pomoćnoj zgradbi. Kabeli obuhvaćeni programom EQ (eng. Environmental Qualification) ne ulaze u AMP (eng. Aging Management Program), jer se očekuje da su projektirani za cijeli životni vijek elektrane, ali su predmet vizualne inspekcije.

Slika 7 prikazuje proces identifikacije i dodjeljivanje prioriteta kabelima po fazi. Lista kabela klase 1E kvalificiranih za uvjete okoline je definirana prema standardu IEEE Std. 323-1974 [9].

Starenje kabela je kemijski ili fizikalni proces na nivou molekule materijala koji uzrokuje promjene u električnim i mehaničkim svojstvima materijala koje se

ne mogu regenerirati, a manifestiraju se u povećanoj tvrdoći plašta i manjoj elastičnosti, te u lošijim izolacijskim svojstvima.



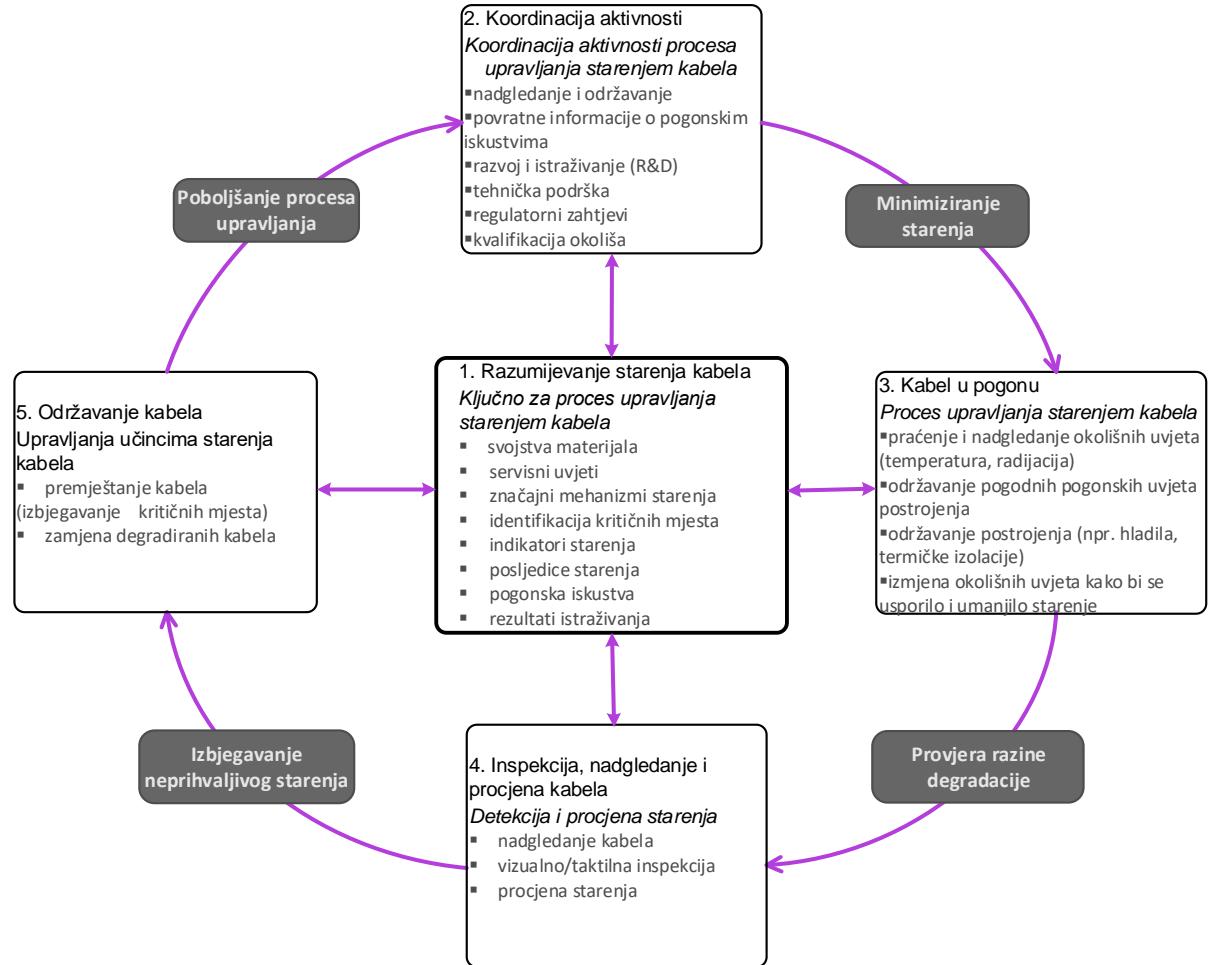
Slika 7. Identifikacija kabela važnih za sigurnost

Figure 7. Nuclear safety cable classification

Slika 8 prikazuje shemu programa upravljanja starenjem kabela.

Inicijalna kvalifikacija (type testing) koristi se za utvrđivanje uvjeta okoliša novog kabela prije instalacije. Osnovni cilj inicijalne kvalifikacije je dokaz da je kabel kvalificiran za određene uvjete (normalne i abnormalne) i definira granice primjene. Također definira kvalificiran životni vijek kabela.

Kabeli koji se koriste u nuklearnim elektranama u teškim uvjetima moraju biti kvalificirani za uvjete okoliša koji tamo prevladavaju ili se u određenim uvjetima mogu pojaviti. Kvalifikacija kabela za određene uvjete garantira da će kabel izdržati te uvjete kroz kvalificirani životni vijek. Kvalificirani životni vijek kabela je vremensko razdoblje u kojem, pod normalnim uvjetima za koje je projektiran, starenje ne utječe značajno na karakteristike i funkcioniranje kabela. Kvalificirani uvjeti su uvjeti u okolini i pogonu pod kojima kabel mora funkcionirati i koji ne utječu na njegov rad. Pogonsko iskustvo je pokazalo da je moguće postojanje kritičnih točaka (eng. hot spot) u prostoriji u kojima parametri okoline mogu biti izvan granica za koje je određen kvalificiran životni vijek. Takva situacija ne mora biti prisutna neposredno nakon ugradnje, nego se može javiti nakon nekog vremena zbog promjene pogonskih uvjeta ili konfiguracije sustava.



Slika 8. Shema programa upravljanja starenjem kabela

Figure 8. Aging Management Program for cables

4.2. Termičko starenje kabela

U NE je uvijek prisutno termičko starenje kabela. Da se provjeri životni vijek kabela provodi se ubrzano termičko starenje izlaganjem kabela znatno višim temperaturama od onih kojima je izložen u normalnom pogonu. Starenje kabela ovisno o temperaturi može biti opisano Arrhenius-ovim zakonom koji definira brzinu reakcije R:

$$R = Ce^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (2)$$

gdje je:

- C - konstanta (najčešće eksperimentalno određena),
- k - Boltzmanova konstanta,
- E_a - aktivacijska energija, i
- T - apsolutna temperatura.

Arrheniusova jednadžba se može također koristiti za proračun ostatka životnog vijeka kabela.

Bit će prikazan primjer izračuna ostatnog životnog vijeka kabela izloženog temperaturi većoj od projektne po metodologiji razvijenoj na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Zavod za visoki napon i energetiku, te je dio proračuna prikazan u radu [10]. Isti je postupak moguće

koristiti za određivanje ostatnog vremena života kabela ako se on nalazi u prostoriji za koju imamo kontinuirano mjerjenje temperature tijekom pogona. Korištenjem jednostavnog modela termičkog starenja baziranog na Arrhenius-ovoj jednadžbi htjelo se kvantificirati utjecaj temperaturnog odstupanja od projektnih uvjeta na projektni životni vijek kabela.

Srednje vrijeme do kvara je definirano kao:

$$MTTF = \tau = [A \cdot \exp(-E_a / kT)]^{-1} \quad (3)$$

Jednadžba se koristi kako bi se korelirala dva vremenska života od kojih je jedno eksperimentalno određeno za projektnе uvjete, a drugo se računa za temperaturu koja je različita od projektnе po formuli:

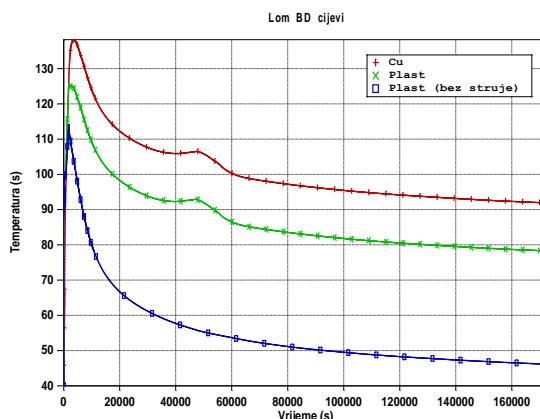
$$\frac{MTTF_1}{MTTF_2} = \frac{t_1}{t_2} = e^{\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]} \quad (4)$$

Bit je u tome da je izlaganje materijala s aktivacijskom energijom E_a temperaturi T_2 tijekom vremena t_2 proizvodi degradacijski efekt ekvivalentan izlaganju temperaturi T_1 tijekom vremena t_1 . Jednostavna aplikacija, nazvana Arrhenius, od korisnika traži

povijesne podatke o radnoj temperaturi, karakteristike izolacije kabela, projektirano vrijeme života i odgovarajuću temperaturu. Proračun se svodi na izračunavanje ekvivalentnog utjecaja (trajanje pogona) stvarne temperature i projektne temperature.

Ako je ekvivalentno vrijeme veće od stvarnog vremena (krivulja ovisnosti ekvivalentnog vremena o stvarnom je iznad pravca pod 45 °), to znači da su stvarni uvjeti gorji od projektnih i da je potrebno duže vrijeme izlaganja projektnoj temperaturi da se dobiju isti štetni efekti (preostalo vrijeme života se brže troši). Preostali životni vijek je razlika između originalnog projektnog vijeka i izračunatog ekvivalentnog vremena. Skraćenje životnog vijeka je dano kao razlika izračunatog ekvivalentnog vremena i stvarnog vremena provedenog u promatranih uvjetima. Ako je ekvivalentno vrijeme manje od stvarnog skraćenje životnog vijeka je negativno, što odgovara produženju životnog vijeka. Program računa i postotno skraćenje životnog vijeka koje se računa kao omjer razlike ekvivalentnog i stvarnog vremena i ekvivalentnog vremena.

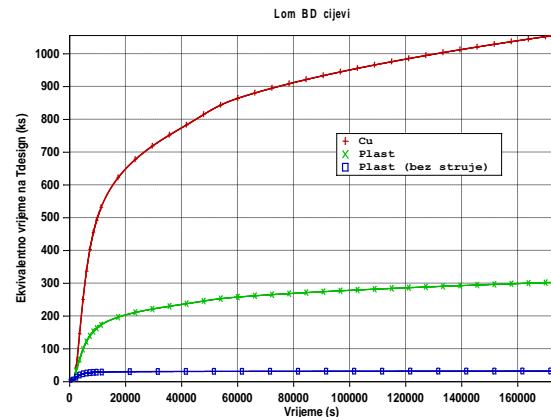
Mogućnost loma u nekom od fluidnih sistema je jedan od uobičajenih razloga izlaganja kabela povišenoj temperaturi i skraćenja njegovog životnog vijeka. Demonstrirana je procjena utjecaja zagrijavanja energetskog 6,3 kV kabela za vrijeme loma cijevi za ispuhivanje parogeneratora (blowdown BD cijevi) u međuzgradi. Korištenjem programa GOTHIC izračunata je temperatura zraka u međuzgradi, te temperatura strujno opterećenog kabela za vrijeme tranzijenta. Na Slika 9 su prikazana tri profila temperature izračunata programom GOTHIC. Maksimalna projektna temperatura nominalno opterećenog kabela bi trebala biti 90 °C. Profil označen s Cu predstavlja temperaturu bakra vodiča koji je nominalno strujno opterećen za vrijeme povećanja temperature zraka u sobi zbog loma cijevi. Druga dva profila su temperature površine plastičnog kabela za strujno opterećen i strujno ne-opterećen kabel. U prvom se slučaju kabel nalazi približno 50 ks (kilosekundi) na temperaturi višoj od one za koju je određen njegov životni vijek, a u drugom približno 10 ks.



Slika 9. Vremenski ovisne temperature kabela (3 slučaja)

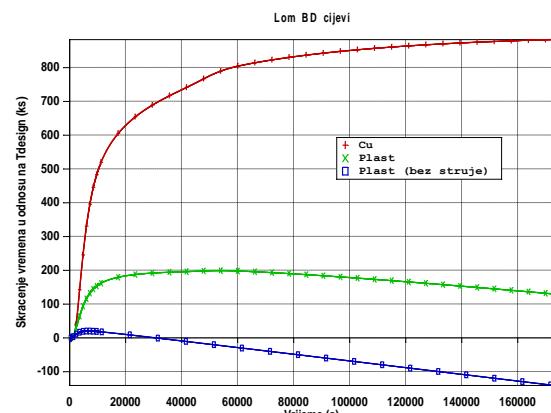
Figure 9. Cable's time dependent temperature (3 cases)

U skladu s prikazanim temperaturama izračunatim GOTHIC programom, dobiveni su rezultati korištenjem Arrhenius programa. Slika 10 prikazuje ekvivalentno vrijeme izlaganja za tri navedena profila. Odgovarajuća ekvivalentna vremena su veća od stvarnih u prva dva slučaja jer su izloženi temperaturi veći od projektnih, a manja u trećem što je bilo i očekivano kada se usporedi s Slika 9. Slika 11 prikazuje skraćenje životnog vijeka u odnosu na vrijeme života pri projektnoj temperaturi. Pozitivne vrijednosti odgovaraju skraćenju životnog vijeka i indikacija su kabela koji je više opterećen nego što je projektno predviđeno.



Slika 10. Ekvivalentno vrijeme izlaganja za tri profila

Figure 10. Equivalent time to exposure for different cases

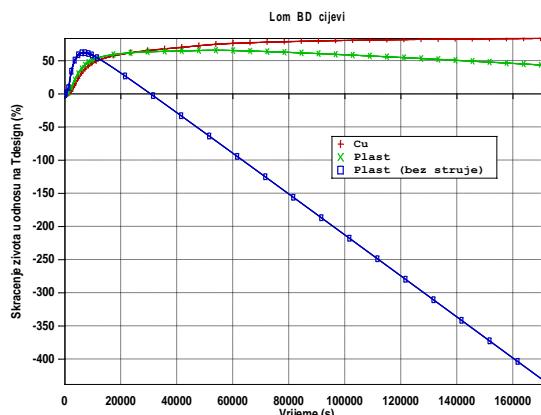


Slika 11. Skraćenje životnog vijeka za tri profila

Figure 11. Cable's lifetime change for different cases

U ovim slučajevima, postupak je primijenjen na relativno kratko izlaganje kabela privremeno nepovoljnim okolišnim uvjetima. Kada bi se definirala vremenska ovisnost temperature izolacije od trenutka stavljanja u pogon do sadašnjeg trenutka, opisanim postupkom bi se moglo izračunati odgovarajuće vrijeme provedeno na projektnoj temperaturi. Kada se to vrijeme odbije od ukupnog projektnog vijeka na projektnoj temperaturi, dobit će se vrijeme koje kabel još može provesti u projektnim uvjetima. U navedenim primjerima se raspolagalo samo dijelom povijesti kabela, pa se

sukladno tome moglo izračunati relativno skraćenje preostalog vijeka kabela. Problem je moguće bolje kvantificirati ako se izrazi postotno skraćenje u odnosu na vrijeme provedeno u projektnim uvjetima. Sukladno tome, Slika 12 prikazuje postotno skraćenje životnog vijeka kabela.



Slika 12. Postotno skraćenje životnog vijeka za tri profila

Figure 12. Relative cable's lifetime change for different case

5. Zaključak

Kvalitetno održavanje opreme u nuklearnoj elektrani je bitno za siguran, pouzdan i efikasan rad nuklearne elektrane. Održavanje je tako organizirano da se uglavnom obavlja za vrijeme izmjene goriva, te remontne aktivnosti osim redovitog održavanja uzimaju u obzir pogonsko iskustvo s opremom. Pogonsko iskustvo je predmet razmjene iskustva sa drugim nuklearnim elektranama, ali i sa svim drugim korisnicima slične opreme, što nije toliko prisutno u drugim energetskim postrojenjima. Još jedna razlika u odnosu na druga postrojenja je u tome što su minimalni uvjeti za organizaciju održavanja u nuklearnim elektranama određeni regulatornim zahtjevima. Jedna od razlika je i u tome što na starenje svih organskih materijala u nuklearnoj elektrani utječe i zračenje. Zračenje otežava i rad pogonskog osoblja na takvoj opremi. U radu su dodatno prikazana dva primjera održavanja opreme s nekim specifičnostima zbog važnosti opreme i dugog očekivanog životnog vijeka.

Kao prvi primjer navedeno je testiranje temperaturno ovisnih otpornih detektora, RTD detektora. S vremenom detektori mogu promijeniti svoju karakteristiku što utječe na točnost i brzinu odziva pa je potrebna provjera i eventualna rekalibracija. Detektor koji ne ispunjavana kriterije prihvatljivosti potrebno je zamijeniti novim. Provjera točnosti (unutar 0.3°C) mjerena RTD detektora i njihovo umjeravanje provodi se metodom krosskalibracije koja je opisana u radu. Dodano, opisano je i mjerjenje vremena odziva RTD detektora LSCR postupkom, te su prikazani histogrami rezultata mjerjenja vremena odziva za 32 RTD detektora provedena u nuklearnoj elektrani Krško.

S obzirom na visoku cijenu nuklearnog postrojenja, ekonomski je isplativije prodljiti životni vijek elektrane nego graditi novi objekt. To zahtijeva implementaciju programa nadzora stanja opreme i analize koje dokazuju da oprema nije degradirala u toj mjeri da su joj ugrožene normalne funkcije. U radu je stavljena fokus na električne kable koji su bitni zbog svoje rasprostranjenosti, važnosti i vrlo često nemogućnosti zamjene. Prvo je opisan program upravljanja starenjem kabela, a zatim je kvantificiran utjecaj termičkog starenja zbog izlaganja lokalno povišenoj temperaturi (lokalno može značiti u jednoj točki prostora duže vrijeme ili za cijeli kabel određeno vrijeme). Korišten je jednostavan model baziran na Arrhenius-ovoj jednadžbi, koji računa ekvivalentno vrijeme života kabela na stvarnoj temperaturi u odnosu na projektну temperaturu.

Zahvala

Rad autora sufinancirali su Hrvatska zaklada za znanost, Hrvatski operator prijenosnog sustava i HEP Proizvodnja kroz projekt WINDLIPS – WIND Energy Integration in Low Inertia Power System, ugovor broj. PAR-02-2017-03.

LITERATURA:

- [1] Canadian Nuclear Safety Commission, (2012), RD/GD-210, Maintenance Programs for Nuclear Power Plants, Canada
- [2] Thai-Canadian Nuclear Human Resources Development Training Program, (1997), Effective Techniques in Maintenance of Nuclear Power Plant
- [3] EPRI, (2009), Preventive Maintenance Basis Database, USA
- [4] Nuclear Energy Institute, NUMARC 93-01, (2011), Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants, USA
- [5] Mazzoni, O.S., (2018), Electrical Systems for Nuclear Power Plants, USA
- [6] Hashemian, H.M., (2006), Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants, Knoxville, USA
- [7] IEEE Std 1205™-2000, IEEE Guide for Assessing, Monitoring and Mitigating Aging Effects on Class 1E Equipment used in Nuclear Power Generating Stations
- [8] Aging Management for Nuclear Power Plants, (2009), Safety Guide No. NS-G-2.12, IAEA, Vienna, Austria
- [9] ANSI/IEEE Std 383-1974, IEEE Standard for Type Test of Class IE Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations,
- [10] Jakić, I., Debrecin, N., (2013), Aging Of Power Cables in Nuclear Power Plant due to Influence of Local Temperature Conditions, Journal of Energy Volume 62, pp. 33-44

