

Primjena katodne zaštite u industriji

Škuflić, Chiara

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:383864>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Odjel za Tehničke studije



CHIARA ŠKUFLIĆ

PRIMJENA KATODNE ZAŠTITE U INDUSTRIJI

Završni rad

Pula, srpanj, 2020. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Odjel za tehničke studije

CHIARA ŠKUFLIĆ

PRIMJENA KATODNE ZAŠTITE U INDUSTRIJI

Završni rad

JMBAG: 02330080989, izvanredna studentica

Studijski smjer: Preddiplomski stručni studij proizvodno strojarstvo

Predmet: Održavanje industrijskih postrojenja

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: 2.11. Strojarsvo

Znanstvena grana: 2.11.3. Proizvodno strojarstvo

Mentor: dr. sc. Jakov Batelić v. pred.

Komentor: dr. sc. Vedrana Špada

Pula, srpanj, 2020. godine

Dr. sc. Jakov Batelić, v. pred.

Dr. sc. Vedrana Špada



Odjel za tehničke studije

(Ime i prezime nastavnika)

Održavanje industrijskih postrojenja

(Predmet)

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

ODJEL ZA TEHNIČKE STUDIJE

ZADATAK TEME ZAVRŠNOGA RADA

Pristupniku Chiara Škuflić

MBS:02330080989

Studentu stručnog studija Odjela za tehničke studije, izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:

Primjena katodne zaštite u industriji

Sadržaj zadatka: Prikazati osnovne procese korozije, vrste korozije kao i metode zaštite. Detaljno objasniti katodnu zaštitu i principe rada na industrijskim postrojenjima a posebice termoelektranama. Navedenu teoriju primijeniti pri analizi kondenzatora TE „Plomin“.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Sveučilišta u Puli.

Redovni ili izvanredni, proizvodno strojarstvo

(izvanredni, proizvodno strojarstvo)

Datum: 24.03. 2020.g.

Potpis nastavnika

Potpis nastavnika



IZJAVA O KORIŠTENJU AUTORSKOG DJELA

Ja, CHIARA ŠKUFLIĆ dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj Završni rad pod nazivom PRIMJENA KATODNE ZAŠTITE U INDUSTRIJI

koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 10.07.2020.

Potpis

Chiara Škuflić



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani CHIARA ŠKUFLIĆ, kandidat za prvostupnika PROIZVODNOG STROJARSTVA ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

Chiara Škuflić

U Puli, 10.07.2020.

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Problem, predmet i objekt istraživanja	1
1.2. Hipoteza	2
1.3. Ciljevi rada	2
1.4. Struktura rada.....	3
2. Korozija i metode zaštite	4
2.1. Povijest korozije i zaštite od korozije	5
2.2. Osnovni kemijski procesi hrđanja	6
2.3. Vrste korozije.....	8
2.3.1. Galvanska korozija.....	9
2.3.2. Lom uslijed korozivnog naprežanja	11
2.3.3. Opća korozija	12
2.3.4. Lokalizirana korozija.....	13
2.3.5. Korozija uzrokovana lutajućim strujama	14
2.4. Vrste zaštite od korozije	16
2.4.1. Površinska obrada	16
2.4.2. Premazivanje	18
2.4.3. Galvanizacija	19
2.4.4. Katodna zaštita	20
3. Principi i primjeri djelovanja katodne zaštite	22
3.1. Pasivna katodna zaštita.....	24
3.2. Katodna zaštita narinutom strujom	27
4. Antikorozivna zaštita elektrana.....	30
5. Katodna zaštita kondenzatora na primjeru TE „Plomin“	35
6. Zaključak.....	41

Literatura	42
Popis slika	47
Prilog 1: Nacrt učvršćenja željeznih anoda.....	50
Prilog 2: Nacrt postavljanja i ispitivanja referentnih elektroda	51
Prilog 3: Shema kabliranja katodne zaštite	52

1. Uvod

Unutar ovoga rada obrađuje se problematika katodne zaštite. Katodna zaštita je u svojoj osnovi metoda korozivne zaštite kojom se omogućuje dulji eksploatacijski radni vijek stroja ili postrojenja uz pomoć „žrtvene“ anode ili uz pomoć narinute struje. Za razumijevanje katodne zaštite, potrebno je razumijevanje procesa korozije koji će biti prikazan i objašnjen unutar ovog rada. Nakon temeljitog objašnjenja korozije, bit će objašnjene i metode zaštite korozije pojedinačno. Poseban je značaj koji će biti dan općenito katodnoj zaštiti, ali i podvrstama zaštite. Uz navedeno, objasnit će se katodna zaštita na primjeru elektrana kao zadnje teoretsko gradivo koje je potrebno za razumijevanje praktičnog dijela ovoga rada. Praktični dio ovoga rada se temelji na objašnjenju katodne zaštite na kondenzatoru termoelektrane (TE) „Plomin“. Navedeni primjer će biti detaljno raščlanjen i objašnjen uz pomoć znanja koja su prenesena u prethodnim poglavljima. Iz navedenih objašnjenja, primjera i teoretskog okvira ovoga rada izvući će se zaključci koji će se detaljno prikazati u zaključku rada.

1.1. Problem, predmet i objekt istraživanja

Osnovni predmet i objekt istraživanja ovoga završnog rada sastoje se od primjene katodne zaštite općenito, utjecaje koje je potrebno uzeti u obzir prilikom modeliranja i planiranja sustava katodne zaštite kao i empirijski prikaz na kompleksnim sustavima i postrojenjima kao što je kondenzator TE „Plomin“ koji je uzet za primjer prilikom pisanja ovog rada. Katodna zaštita radi svoje relativne jednostavnosti primjene i dimenzioniranja je postala preferirani način zaštite od korozije u mnogim poljima strojarstva, tj. u svakoj primjeni gdje uvjeti to dopuštaju. Njezina ekonomičnost i visoka isplativost su ogroman faktor pri odabiru i planiranju. No uz sve njene prednosti, mora se uzeti u obzir kako je ona nedovoljna za kompletnu zaštitu. Vještim balansiranjem svih parametara prilikom faze planiranja pomoćnih sustava postrojenja moguće je odrediti njezinu optimalnu točku isplativosti i zaštite. Navedeni proces je sveprisutniji što su navedeni sustavi veći te je iz tog razloga objekt istraživanja ovoga rada sustav katodne zaštite na kondenzatoru TE „Plomin“.

1.2. Hipoteza

Osnovna hipoteza ovoga rada je da je korozija izuzetno štetna i nepoželjna pojava na strojarskim konstrukcijama, te da je zaštita od korozije, pažljivim planiranjem procesa i sustava zaštite, od presudnog značaja za kvalitetan rad strojara. Osim potvrđivanja hipoteze, ukratko će se objasniti i drugi sustavi korozivne zaštite i njihova podjela, kao što će se iznijeti sve prednosti i nedostaci katodne zaštite s obzirom na to da iz njih direktno proizlaze parametri potrebni za optimalan dizajn sustava korozivne zaštite.

1.3. Ciljevi rada

- Objasniti pojam korozije, njezine implikacije u kemiji, znanosti materijala kao i u strojarstvu ali i osnovne prateće pojave koroziji.
- Objasniti uzroke nastanka korozije i dati kratki uvod u tehnike minimiziranja.
- Prikazati podjelu sustava i tehnika kojima se sprječava korozija.
- Detaljno obraditi katodnu zaštitu kao antikorozivnu tehniku i analizirati način dimenzioniranja navedenog sustava.
- Prikazati (teoretski) katodna zaštita energetskih postrojenja.
- Prikazati i raščlaniti sustav katodne zaštite na primjeru TE "Plomin".

1.4. Struktura rada

Ovaj rad se sastoji od šest poglavlja:

- U prvom poglavlju “Uvod”, daje se kratki opis rada i njegove problematike, opisuju se objekti istraživanja. Prikazuje se hipoteza rada, objašnjavaju ciljevi rada i opisuje struktura rada.
- Drugo poglavlje pod nazivom “Korozija i metode zaštite” opisuje razvoj saznanja o koroziji kroz povijest, osnovne procese korozije te daje i kratko objašnjenje različitih vrsta protukorozivne zaštite.
- Treće poglavlje, “Katodna zaštita” opisuje vrste katodne zaštite, tehnike koje se koriste u katodnoj zaštiti u elektranama i prikazuje najbolje strojarske prakse u njima.
- Četvrto poglavlje pod nazivom “Antikorozivna zaštita elektrana” opisuje procese u elektranama, važne komponente i industrijsku praksu, kojim se metodama elektrane štite od korozije.
- Peto poglavlje pod nazivom “Katodna zaštita kondenzatora na primjeru TE “Plomin” detaljno prikazuje sustav katodne zaštite kakav se trenutno koristi u TE “Plomin” i na njegovoj analizi se primjenjuju sva znanja koja su prikazana u prethodnim poglavljima rada.
- Šesto poglavlje, “Zaključak” prikazuje zaključke koji su se izvukli prilikom pisanja rada vezano uz samu koroziju, ali i primjenu katodne zaštite.

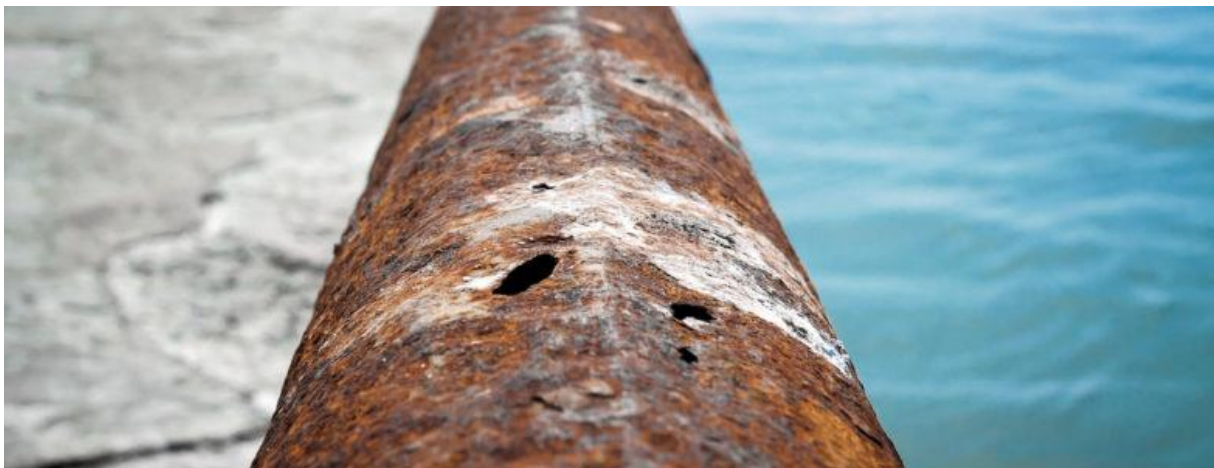
2. Korozija i metode zaštite

Korozija kao takva je neizostavna pojava na gotovo svim metalnim materijalima, odnosno konstrukcijama. Po definiciji korozija je „prirodni proces koji pretvara rafinirane metale u kemijski stabilne oblike poput oksida, hidroksida i sulfida“. Ona postupno uništava materijal kemijskim i elektrokemijskim reakcijama unutar njihovog radnog okruženja. Koliko je ona značajno dokazuje činjenica da korozijsko inženjerstvo predstavlja zasebnu granu znanosti o materijalima čiji je osnovni cilj kontroliranje i sprječavanje korozije.

Hrđanje, tj. stvaranje željeznih oksida je široko rasprostranjena pojava elektrokemijske korozije. Prolazeći kroz proces, osnovni materijal se uništava, elektrokemijski reagira, te se stvaraju oksidi i soli osnovnog metala. Moguće ju je prepoznati po izraženoj narančastoj boji koja se pojavljuje, primjer je vidljiv na slici 1.

Osim u metalima, korozija se pojavljuje i u drugim materijalima poput keramika i polimera, ali tamo se u pravilu ne koristi pojam korozija, već „degradacija“.

Osnovni proces korozije legura događa se zbog prisutnosti vlage u zraku. U takvim uvjetima, korozija se javlja u površinama koje su izložene zraku.



Slika 1 Primjer hrđanja cijevi. Izvor: <https://www.dynagard.info/wp-content/uploads/2018/10/corrosion-780x300.jpeg>

2.1. Povijest korozije i zaštite od korozije

Gledajući u prošlost, korozija je uvelike ograničavala razvoj strojarstva. U počecima ljudske kulture, najčešće su se koristili metali koji su se mogli pronaći prirodno u prirodi i nisu zahtijevali tehnološku obradu prije korištenja osim samog oblikovanja. Primjeri navedenih metala su zlato i bakar koji se mogu u prirodi naći dovoljno čistima da bi ih se odmah obradilo. Značajna promjena uslijedila je 1500. g. pr. Kr. kada su na području današnje Turske drevni narodi otkrili kovanje i načine za pročišćavanje željezne rude u iskoristivo željezo. Krenuvši od tada, pa sve do današnjih dana, korozija je postala neizostavan dio radnog vijeka svakog željeznog predmeta s čime su se ljudi vrlo brzo upoznali. Važno je uočiti kako povjesničari uočavaju da drevni željezni predmeti imaju značajno manju sklonost koroziji od današnjeg modernog čelika. Razlozi za to autori pripisuju većem udjelu ugljika u drevnom željezu, ali i značajno niže razine sumpora u zraku u drevnim vremenima (prije industrijske revolucije) koji negativno utječe na moderne čelike prilikom njihove primarne obrade. Značajno je uočiti kako je korozija kroz povijest vrlo malo proučavana, te se prva značajna otkrića u smjeru otkrivanja mehanizama korozije pojavljuju tek 1788. kada je Austin uočio kako voda u prisustvu željeza postaje lužnata. Svojedobno je to pripisao amonijaku, no kasnije je dokazano kako je to zbog natrij hidroksida. Navedeni spoj je bio rezultat katodne reakcije sa željezom. Sljedeće veliko otkriće je uslijedilo 1819. kada je Thenard postavio hipotezu da je korozija rezultat elektrokemijskih procesa. Navedena hipoteza se pokazala točnom te se na nju dodatno nadogradio s dodatnim teorijama i objašnjenjima za druge pojave koje nastaju unutar stvarne korozije kako bi se došlo do današnje teorije korozije.¹

Vezano uz ovaj rad, važno je spomenuti doprinos Humphry Davy-ja i Michael Faradaya u periodu 1820.-1825. koji su skupa otkrili i dokazali mehanizme katodne zaštite metala.²

Katodna zaštita je time postala alat strojara u borbi protiv korozije i dala je svoj doprinos boljem iskorištavanju materijala, njihovom duljem radnom vijeku i omogućila stvaranje većih i tehnički zahtjevnijih struktura. Dodatni doprinosi boljom eksploatacijom

¹ Ulick R., E. (1948.) "Historical Theories on Corrosion", Corrosion Doctors

² Rajendran, S. (2018). Corrosion-Yesterday, Today and Tomorrow. Oriental Journal of Physical Sciences, br. 3. str. 68.-74.

materijala su došli i indirektno, sa mogućnošću iskorištavanja materijala čija su ostala eksploatacijska svojstva odlična, no korozija je predstavljala barijeru ka njihovom rasprostranjenijem korištenju. Primjeri takvih materijala su čelici i druge legure željeza. Značajan je doprinos u tome bio u mogućnostima stvaranja većih industrijskih postrojenja s većim brojem strojeva koje je potrebno rjeđe mijenjati i održavati zbog korozije. Neposredno iz tih tehnoloških dostignuća, omogućeno je stvaranje većih i naprednijih postrojenja i sustava, a koji će u daljnjem pisanju ovoga rada biti osnovni pojam i objekt istraživanja, a kasnije i primjer u kojemu će se primijeniti sva znanja, procesi i principi koji su objašnjeni kroz teoretski okvir ovoga rada.

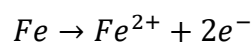
2.2. Osnovni kemijski procesi hrđanja

Korozija je, kao što je prethodno napomenuto elektrokemijski proces. Za primjer navedenog procesa kemijski će se objasniti najrasprostranjeniji oblik korozije: hrđanje željeza.

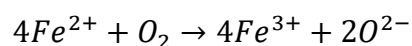
Željezo u dodiru s kisikom i vodom (bilo u tekućem obliku ili u obliku vodene pare kao što je vlaga u zraku) reagira elektrokemijski. Razlog za to se nalazi u njihovim elektronegativnim potencijalima. Željezo u elementarnom obliku ima negativan elektronegativni potencijal, značaj navedenog je u činjenici da željezo u čistom obliku ima sklonost otpuštanju elektrona i stvaranja kationa unutar svoje kristalne rešetke. S druge strane, kisik ima pozitivan elektronegativni potencijal te može prihvatiti elektrone unutar svoje strukture. Vodik unutar ovog primjera također posjeduje pozitivan elektronegativni potencijal, no unutar reakcija on je element koji ne ostaje trajno inkorporiran unutar strukture osnovnog materijala.

Izrazito bitno je napomenuti kako hrđanje nastaje i u neutralnim uvjetima, dok u slučaju lutajućih struja navedeni proces biva potpomognut strujama koje prolaze kroz osnovni materijal.

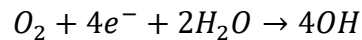
Željezo je reduktivni element on oksidira, tj. drugim riječima, prenosi elektrone drugom elementu koji oksidira.



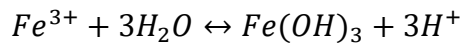
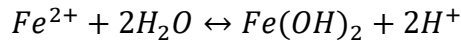
Dodatni poticaj hrđanju daje i sljedeća reakcija:



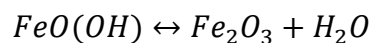
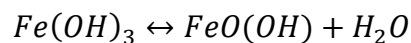
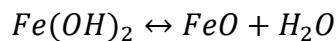
U ovom slučaju kisik je oksidativni element koji reducira reagirajući s vodom kako bi stvorio hidroksidnu bazu.



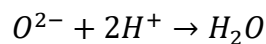
Hidroksidne baze potom reagiraju s kationima željeza koji su nastali u prethodnim koracima u dvije različite redoks reakcije kroz koje nastaju hidroksidi željeza.



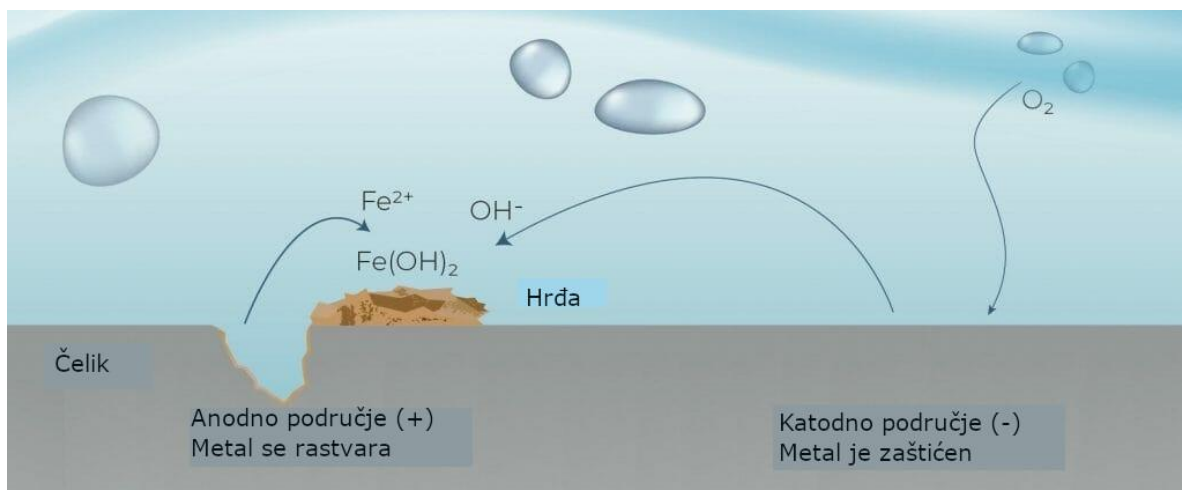
Nastankom većeg broja hidroksida željeza počinju sljedeće reakcije kojima se stvara hrđa:



Višak iona kisika i vodika nastalih u zbog prethodnim reakcijama reagira međusobno stvarajući vodu:



Navedena voda može ponovo pokrenuti reakciju uz prisustvo dovoljne količine kisika u zraku. Zanimljiva činjenica je kako ove dvije konkurentne reakcije stvaraju dva različita oksida željeza, a koji će oksid prevladati ovisi o koncentraciji kisika u okolišu s izraženom sklonošću stvaranja Fe_2O_3 pri višim koncentracijama kisika.³ Vizualni prikaz procesa hrđanja moguće je vidjeti na slici 2.



Slika 2 Pojednostavljeni dijagram procesa hrđanja. Izvor: Obrada autora prema <https://cathwell.com/app/uploads/2019/09/Corrosion-cell-1-e1568876193829-1024x422.jpg>

³ Perez, N., (2004.), *Electrochemistry and Corrosion Science*, Mayaguez: Springer

Navedene reakcije čine okosnicu hrđanja čistog željeza i željeza u legurama. Kemijske reakcije kojima dolazi do hrđanja su jednako tako osjetljive na više različitih čimbenika poput: postojanje razlike potencijala, temperaturu, ali i na primjese koje su dodane u legure. Značajno je uočiti kako postoji nehrđajući čelik koji u sebi sadrži primjese kroma i nikla, npr. čelici tipa 18/8 (18% mase Cr i 8% Ni). Navedeni čelik je korozijski postojan zato što navedeni elementi stvaraju monofazne feritne, austenitne ili martenzitne strukture na mikrorazini čime poboljšavaju opću elektronegativnost samih atoma željeza u mikrostrukturi vezivanjem za njih i time znatno otežavaju stvaranje kationa željeza.⁴

Iz prethodno navedenog, korozija željeza i njegovih legura ovisi o postojanju dva osnovna faktora bez kojih ona ne može nastati:

- Postojanje dovoljne razlike potencijala kako bi započeo proces korozije
- Direktni dodir između tvari koje sudjeluju u procesu korozije

Lako se može zaključiti kako se cjelovitim ili djelomičnim uklanjanjem jednog od čimbenika može zaustaviti ili usporiti korozija.

2.3. Vrste korozije

Prethodno potpoglavlje se bavilo kemijskim i električnim procesima kojima nastaje hrđanje kao korozija željeza. Postoje različite vrste korozije ovisno o tehnološkim zahvatima koji su potrebni da bi se one spriječile:

- Galvanska korozija
- Lom uslijed korozivnog naprezanja
- Opća korozija
- Lokalizirana korozija
- Korozija uzrokovana lutajućim strujama

Svaka od navedenih vrsta korozija se i dalje događa zbog istih principa zbog kojih se događa i hrđanje željeza no nisu sve iste i neke od njih imaju drugačije, ali

⁴ Schiroky, G., Dam, A, Okeremi, A. i Speed, C., "Pitting and crevice corrosion of offshore stainless steel tubing", (2013.)

ekvivalentne, elemente koji sudjeluju u procesu korodiranja.

2.3.1. Galvanska korozija

Galvanska korozija u literaturi se često naziva i korozijom različitih metala. Slično kao i u prethodnom opisanom procesu hrđanja željeza, nastaje uslijed razlike elektronegativnog potencijala između dva metala. U takvom fizičkom dodiru dvaju različitih metala dolazi do pojave pri kojoj se jedan materijal ponaša kao katoda, a drugi kao anoda unutar elektrolita (važna je napomenuti kako elektrolit ne mora biti tekućina koja obavija metale, već to može biti i vlaga u zraku). Anoda u takvom slučaju počinje ubrzano korodirati, dok je katoda zaštićena od korozije.⁵ Navedeni efekt nije uvijek neželjen, već se u određenim slučajevima, poput jednokratnih baterija taj efekt iskorištava kako bi se stvorio izvor struje. Galvanska korozija je učestala u svakodnevnom životu, te je moguće na slici 3 vidjeti primjer koji se može uočiti u svakodnevnom životu. Prilikom sprječavanja nastanka galvanske korozije, važan je pažljiv izbor materijala. Navedeno se postiže korištenjem tablica poput one na slici 4.



Slika 3 Česti primjer galvanske korozije koji se susreće u svakodnevnom životu. Izvor: <https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-dd1c9e2f7bbaf14ab142360f5cb6b03>

⁵ Smith, C., (2020.), "Galvanic Reaction: Incompatible Metals Responsible for Corrosion", Monarch Metal Fabrication

Anodni metali	Katodni metali																		
	Mg i legure	Znn i legure	Al i legure	Kadmij	Ugljični čelici	Lijevano željezo	Nehrđajuči čelici	Pb, Sn i legure	Nikal	Mjedi, Ni-Ag legure	Bakar	Bronce, Cu-Ni legure	Ni-Cu legure	Ni-Cr legure	Titanij	Srebro	Grafit	Zlato	Platina
Mg i legure																			
Znn i legure																			
Al i legure																			
Kadmij																			
Ugljični čelici																			
Lijevano željezo																			
Nehrđajuči čelici																			
Pb, Sn i legure																			
Nikal																			
Mjedi, Ni-Ag legure																			
Bakar																			
Bronce, Cu-Ni legure																			
Ni-Cu legure																			
Ni-Cr legure																			
Titanij																			
Srebro																			
Grafit																			
Zlato																			
Platina																			

Slika 4 Tablični prikaz čestih metala i mogućnosti pojave galvanske korozije. Crveno označava nastanak galvanske korozije po anodnom metalu ukoliko su u bliskom kontaktu. Izvor: Obrada autora prema https://www.monarchmetal.com/wp-content/uploads/Galvanic-Corrosion_2.png

2.3.2. Lom uslijed korozivnog naprezanja

Pod ekstremnim naprezanjem, na metalnom predmetu mogu nastati mikropukotine koje otvaraju mogućnost korozije upravo na tim malim porama koje su tada izložene oklišu. Navedeni mikroproces moguće je vidjeti na slici 5. Korozija uzrokovana naprezanjem zahtjeva dva preduvjeta kako bi nastala:⁶

- Objekt se mora nalaziti pod naprezanjem.
- Okoliš mora biti agresivan spram karakteristika navedenog materijala, primjerice ekstreman pH ili visoke temperature.

Pritom korozija nastaje sljedećim procesom:

1. Nastaje lokalizirana korozija koja stvara pore u osnovnom materijalu, tzv. pitting.
2. Pukotine nastaju na mjestu pora i šire se kroz osnovni materijal po granicama zrna.
3. Dolazi do pucanja ili loma osnovnog materijala.

Razlog zašto se ona broji kao posebna vrsta korozije je zbog visoke razine opasnosti i štete koju može prouzročiti. Ukoliko se ne sanira, neminovno dovodi do havarije.



Slika 5 Mikroskopska slika pucanja pod korozivnim naprezanjem. Izvor:
<https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/NACE/cedda8a4-c3c0-4583-b1b6-3b248e6eb1f2/UploadedImages/Resources/intergrainscc.jpg>

⁶ NACE International, n.d., "Stress Corrosion Cracking (SCC)"

2.3.3. Opća korozija

Opća korozija se u pravilu javlja u nagrizajućim medijima. Nagrizajuće okoline mogu biti kisele (imaju nizak pH) ili lužnate (visok pH). Važno je uočiti kako u općoj koroziji je cjelokupna površina materijala izložena njoj, te se ona uzima u obzir prilikom projektiranja posebnih sustava poput cijevi za prijenos nagrizajućih tvari. U pravilu se izražava u mm/godini, tj. mm debljine koju pojede korozija po godini eksploatacije. U takve svrhe postoje posebne tablice kojima se to može izračunati, a za većinu upotreba, vrijednosti manje od 100 mikrona godišnje se smatraju prihvatljivima.⁷

Primjeri takvih kemikalija nisu samo tekućine, već i plinovi, primjerice, sumporovodik koji u svom čistom plinovitom obliku ne oštećuje metal, no u dodiru s vlagom u zraku, stvara korozivne kapljice kojima utječe na osnovni materijal. Opća korozija se također pojavljuje kod elemenata koji su u bliskom doticaju sa površinskim vodenim tijelima. Primjer navedenog moguće je vidjeti na slici 6.



Slika 6 Primjer opće, jednolike korozije po cjelokupnoj površini. Izvor:
<https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/NACE/cedda8a4-c3c0-4583-b1b6-3b248e6eb1f2/UploadedImages/Resources/uniform2.jpg>

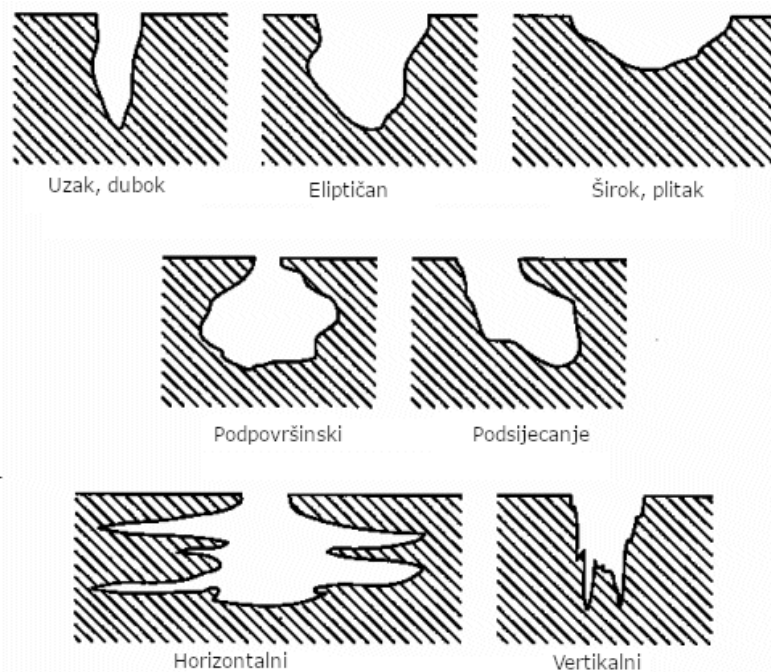
⁷ NACE International, n.d., "Uniform Corrosion"

2.3.4. Lokalizirana korozija

Lokalizirana korozija nastaje na više različitih načina, no njezino je osnovno obilježje da je lokalizirana na jednom dijelu predmeta. Veoma je usko povezana s pucanjem pod korozivnim naprezanjem te ukoliko se ne uoči na vrijeme može dovesti do navedenog stadija. Najčešće se javlja u obliku pittinga i pukotina osnovnog materijala (različite vrste pittinga, moguće je vidjeti na slici 7). Primjer pitting korozije poznat je kod nehrđajućih čelika kod kojih se i može izračunati otpornost na pitting uz pomoć empirijski dobivene PREN formule:

$$PREN = \%Cr + 3.3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N$$

PREN je dobar pokazatelj otpornosti na pitting nehrđajućeg čelika, no česta pojava je i lokalizirana korozija u obliku pukotine na tehnološkim površinama gdje osnovni predmet dodiruje drugi, primjerice mjestima gdje podlošci dodiruju osnovni materijal.⁸ Oba procesa imaju svoj osnovni mehanizam u činjenici da zbog vanjskih utjecaja (mehaničkih ili kemijskih) osnovni materijal gubi pasivizirani sloj oksida na površini i time unutarnji, na koroziju osjetljiv, materijal dolazi u dodir s korozivnim okolišem.



Slika 7 Poprečni presjeci različitih vrsta pitting korozije. Izvor: Obrada autora prema https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/pitting_shape.gif

⁸ Schiroky, G., Dam, A, Okeremi, A. i Speed, C., "Pitting and crevice corrosion of offshore stainless steel tubing", (2013.)

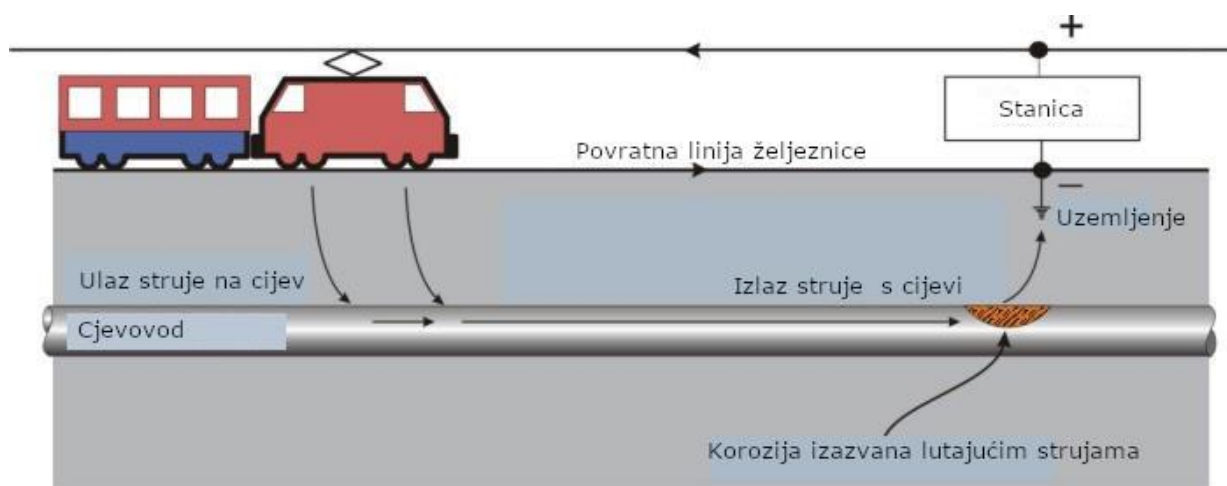
2.3.5. Korozija uzrokovana lutajućim strujama

Lutajuće struje i korozija zbog lutajućih struja predstavljaju malo drugačiji primjer procesa korozije nego obično hrđanje, no i dalje se sastoji od ekvivalentnih uzroka kojima se započinje proces korozije.

Lutajuće struje je skupni naziv za protok struje kroz zgrade, tlo ili opremu zbog električnih pražnjenja ili grešaka spajanja struje. Označavaju postojanje razlike napona između objekata koji uobičajeno ne bi trebali prenositi struju. One u pravilu nastaju radi nepravilnog postavljanja i/ili održavanja električnih sustava, no prisutne su gotovo uvijek u malim količinama u tlu jer se tlo često koristi kao sigurno sredstvo pražnjenja struje, tzv. uzemljenje. Prilikom takvog izboja struje u tlo, neovisno o tome je li on namjeran ili slučajan, struja putuje putem najmanjeg otpora, te se iz tog razloga metali u zemlji često nalaze na putanji lutajuće struje dok se vraća u krug kroz uzemljenje.⁹ Važna činjenica koju je potrebno uočiti je da se prilikom ulaska struje na metal, metal ponaša poput katode, te na tom mjestu je metal očuvan. Problemi uz koroziju nastaju na mjestu izlaska struje iz metala, na tom mjestu se metal ponaša poput anode, te trpi ubrzanu koroziju.¹⁰ Dijagram procesa vidljiv je na slici 8, a primjer lokalizirane korozivne štete lutajućih struja moguće je vidjeti na slici 9. Lutajuće izmjenične struje su poseban slučaj gdje korozija nastaje na oba mjesta zbog izmjenične prirode struje. Navedena korozija se iz tog razloga zove korozijom lutajućih struja. Na nju se mora računati prilikom svakog postavljanja metala u direktni dodir s tlom, a posebice prilikom postavljanja metala ispod zemlje ili u vodu. Ukoliko se pronađu znatnije lutajuće struje u zemlji (primjerice, ispod tramvajske linije) prilikom postavljanja metalnog objekta, obavezno se moraju poduzeti korektivne mjere kako bi se spriječila veća šteta, a poželjno je poduzeti mjere zaštite neovisno o rezultatima mjerenja. Značaj lutajućih struja je još veći u elektranama, trafostanicama i dalekovodima gdje su lutajuće struje gotovo svakodnevna i znatna nuspojava procesa proizvodnje i opskrbe struje.

⁹ Corrosion Doctors, n.d., "Stray Current Corrosion Cells",

¹⁰ CorrosionPedia, (2017.); "Stray Current"



Slika 8 Dijagram kruga lutajućih struja. Izvor: Obrada autora prema <https://corrosion-doctors.org/Corrosion-Factors-Cells/images/image059.jpg>



Slika 9 Primjer štete uzrokovan lutajućim strujama na cijevi. Izvor: <https://www.canadianconsultingengineer.com/wp-content/uploads/2017/05/corrosion.jpg>

2.4. Vrste zaštite od korozije

Razumjevši kemijski i električni aspekt korozije kao pojave, nije ni čudno da su se vremenom razvili različiti sustavi zaštite od korozije kako bi se spriječilo narušavanje strukturalnog integriteta i eksploatacijskih karakteristika strojeva i struktura u strojarstvu. Svaki od dalje navedenih sustava zaštite se temelji na prekidu i oduzimanjem jednog od faktora pomoću kojih nastaje korozija koji su opisani u prethodnom potpoglavlju.

2.4.1. Površinska obrada

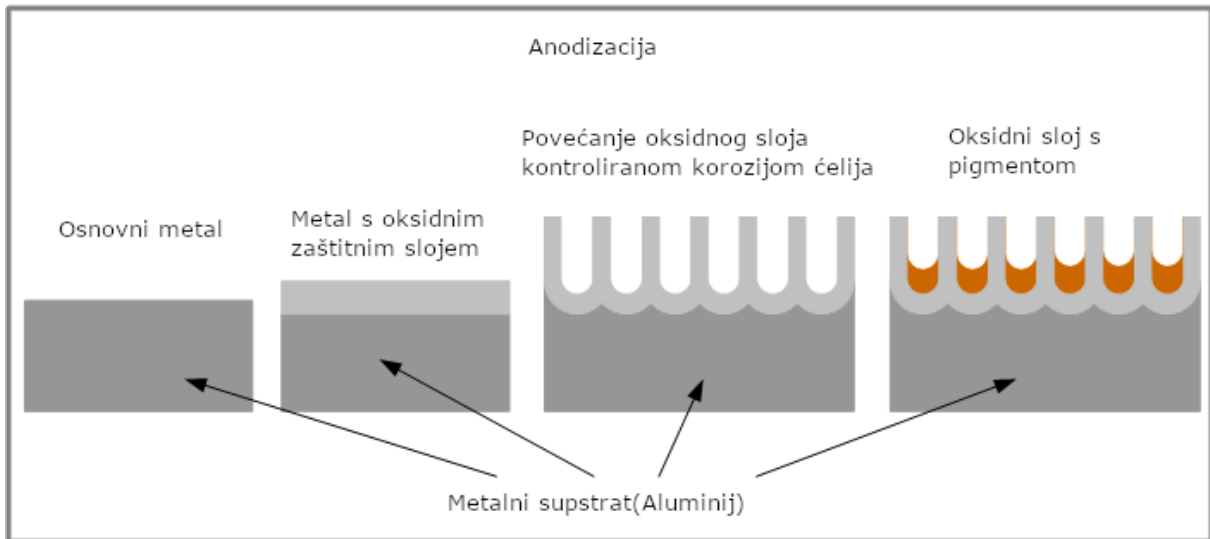
Površinska obrada materijala protiv korozije može imati više značenja, no u ovome kontekstu smatra se kako je površinska obrada materijala, obrada uz pomoć nekog sredstva kojim se stvara zaštitni sloj na površini materijala. Od velikog je značaja recimo anodizacija aluminijskih materijala, uz pomoć koje se povećava debljina zaštitnog sloja oksida na osnovnom materijalu i time se pasivizira cjelokupna površina.

Anodizacija je jedan od procesa površinske obrade kojim se štite od korozije metali koji su ekstremno osjetljivi na koroziju poput aluminijskih materijala. Prilikom anodizacije materijal prolazi kroz različite elektrokemijske kupke kako bi se stvorile nano pore na površini materijala. Navedene nano pore omogućuju da oksidni sloj koji postoji na većini metala postane znatno deblji i time štiti osjetljivi osnovni metal. Pucanjem zaštitnog sloja oksida, prirodno dolazi do pasivizacije slojem oksida na oštećenom dijelu. Materijali koji prolaze kroz navedeni proces su oni koji imaju veoma tvrde okside i prirodno stvaraju navedeni zaštitni sloj poput aluminijskih materijala. Dijagram procesa anodizacije vidljiv je na slici 10., nerijetko površina anodiranog aluminijskih materijala ima specifičan odsjaj kojeg je moguće vidjeti na slici 11.

Najčešći drugi procesi površinske obrade čelika su kromiranje ili nikliranje. Njima se sprječava doticaj osnovnog metala s vanjskim okolišem uz korištenje metala koji su manje reaktivni od čelika ili željeza.¹¹

Osnovna logika iza površinske obrade je sprječavanje direktnog dodira osnovnog metala s okolišem, samim time i preveniranje nastanka korozije koja bi mogla doseći dublje slojeve i ugroziti strukturalni integritet metala.

¹¹ Thomas industry, n.d., "Corrosion Resistant Coating for Various Types of Corrosion"



Slika 10 Dijagramski prikaz procesa anodiziranja aluminija na mikro razini. Izvor: Obrada autora prema <https://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=anodizing.png>



Slika 11 Primjer anodiziranog aluminija s prikazom mogućnosti bojanja površine. Izvor: https://www.myjerusalemstore.com/media/catalog/product/Assets/NewProductImages/product_page_image_large_no_frame/A/d/Adi-Sidler-Kinetic-Hanukkah-Menorah-SL-52_large_1.jpg

2.4.2. Premazivanje

Premazivanjem površine bojom, lakom ili nekom drugom vrstom električnog izolatora nastoji se spriječiti direktni kontakt osnovnog metala s okolišem i time spriječiti nastanak električnog potencijala zbog kojeg nastaje korozija. Posebice su efektivni materijali koji su svojim električnim svojstvima izolatori te ne propuštaju navedeni električni potencijal kroz svoju površinu. Često se koristi za velike strukture poput mostova i druge infrastrukture koja radi svoje veličine ne može proći kroz proces obrade površine, a postavljanje sustava katodne zaštite bi narušilo neku drugu funkciju.¹²

Premazivanje je iz tog razloga često dio redovnog održavanja velikih metalnih struktura i služi zaštitnu svrhu. Osim isključivo samog premazivanja, unutar težih uvjeta, poput na brodovima, koristi se u kombinaciji sa sustavima katodne zaštite kako bi se pospješila antikorozivna svojstva u negostoljubivim uvjetima za metal kao što je stalni i direktni kontakt s morskom vodom. Primjer premazivanja vidljiv je na slici 12.



Slika 12 Primjer radnika koji zaštićuje cjevovod posebnim premazom. Izvor:

[https://www.3m.com/wps/wcm/connect/c124a7c9-c6ad-4a11-9077-8f12b7b0b5b3/638375_410x205_Pipeline-Corrosion-ProtectionOGS.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-c124a7c9-c6ad-4a11-9077-](https://www.3m.com/wps/wcm/connect/c124a7c9-c6ad-4a11-9077-8f12b7b0b5b3/638375_410x205_Pipeline-Corrosion-ProtectionOGS.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-c124a7c9-c6ad-4a11-9077-8f12)

8f12

¹² Seal expert, (2017.), "Anti-corrosion Coating Types and their Applications"

2.4.3. Galvanizacija

Galvanizacijom, tj. presvlačenjem cinkom stvara se osnovni učinak presvlačenja osnovnog metala (najčešće željeza ili čelika) gdje je veoma ograničen dodir s vanjskim okolišem i samim time je spriječena korozija kroz fizičku odvojenost. Uz navedeni efekt, galvanizacija daje čeliku pasivnu anodu u obliku cinka. Cink u svojem elementarnom obliku ima nižu elektronegativnost od čelika, te iz tog razloga on korodira u doticaju s okolišem za razliku od čelika.¹³ Značajno je uočiti kako navedeni efekt vrijedi čak i ukoliko dođe do mehaničkog oštećenja sloja cinka na površini. Primjerice, ako je cink i dalje dovoljno blizu čelika da preuzme električni naboj, čelik se ponaša poput katode, a cink korodira neovisno o činjenici što su oba metala direktno izložena atmosferi. Danas je galvanizacija preferirana metoda zaštite konstrukcijskog čelika zbog svoje jednostavnosti, relativne ekonomičnosti i brzine koja je potrebna u građevinskoj industriji.¹⁴ Prikaz procesa galvanizacije i izgled površine galvaniziranih predmeta moguće je vidjeti na slikama 13 i 14.



Slika 13 Primjer procesa galvanizacije čelika. Izvor: https://www.batiactu.com/images/auto/620-465-c/20120620_161802_img0019.jpg

¹³ Kutz, M., (2018.), *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, Oxford: Elsevier, William Andrew- Applied Science Publishers

¹⁴ Kutz, M., (2018.), *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, Oxford: Elsevier, William Andrew- Applied Science Publishers



Slika 14 Prikaz teksture galvaniziranog metala. Izvor:<https://4.bp.blogspot.com/-XuqMcZXVJI8/VCqZu5hCPkI/AAAAAAAAAGJA/7T1ET7U0h6Y/s1600/Metal%2Bgalvanised%2Bsteel%2Bin%2Btexture%2B4770x3178.jpg>

2.4.4. Katodna zaštita

Katodna zaštita je proces zaštite čelika od korozije u kojemu se čelik ponaša poput katode elektrokemijskog kruga. Razlikuje se od galvanizacije zbog činjenice da katodna zaštita po definiciju iziskuje spoj kroz elektrolit i/ili kablom, a ne direktnim kontaktom. Lako je zaključiti iz prethodne definicije kako se ta zaštita može stvoriti na dva različita načina: kemijski ili uz pomoć struje. Sam odabir između ta dva načina opisuje razliku između pasivnih sustava katodne zaštite i sustava narinutom strujom. Danas je katodna zaštita široko rasprostranjen proces zaštite zbog svoje efikasnosti i relativno malog troška naspram troška nastalog zbog narušavanja trajanja eksploatacijskog vijeka opreme. Posebno široku upotrebu ima u cjevovodima i naftovodima, ali i u bližim primjerima kao što su svakodnevni bojleri tople vode gdje cinčane anode pasivno korodiraju umjesto grijača.¹⁵ Anode pasivne katodne zaštite armiranog betona moguće je vidjeti na slici 15.

¹⁵ Baeckmann, W., Schwenck, W. i Prinz W.,(1997.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*, Houston:Gulf Professional Publishing



Slika 15 Primjer pasivne katodne zaštite na armaturi armiranog betona. Izvor: https://www.vector-corrosion.com/uploads/content/fullsize/water_jet_power1.jpg

3. Principi i primjeri djelovanja katodne zaštite

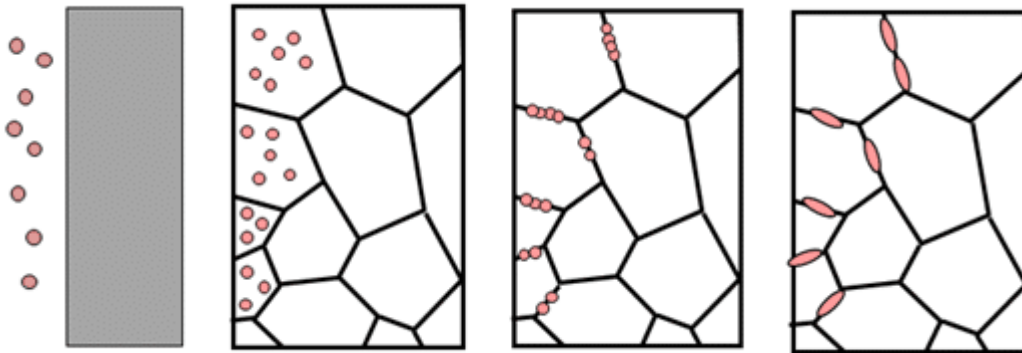
Katodna zaštita se kroz praksu pokazala kao sustav korozivne zaštite koji najbolje štiti osnovni materijal. Osnovni princip je da se na materijalu kojeg želimo zaštititi stvori zaštitni električni naboj čime ga se pretvara u katodu električnog kruga kojeg stvaramo. Navedeni električni krug je, kako je i prije napomenuto, moguće stvoriti na dva načina: uz pomoć narinute struje čime direktno spajamo objekt u zaštitni električni krug; te uz pomoć elektrokemijskih svojstva materijala određujemo drugi materijal koji se u neposrednoj blizini osnovnog materijala ponaša poput anode i time preuzima redoks reakcije korozije na sebe umjesto osnovnog objekta. Navedena anoda pritom postaje žrtveni materijal te se pri kraju njenog radnog vijeka odbacuje. Prethodno je napomenuto kako su principe katodne zaštite prvi otkrili Humphry Davy i njegov učenik Michael Faraday 1824. u Londonu. Navedeni efekt su iste godine primijenili na brodu HMS Samarang.¹⁶ Trup broda ispod razine vode bio je obložen bakrom, no navedeni trup bi veoma brzo korodirao i zahtijevao znatne troškove prilikom zamjene. U pokušaju sprječavanja navedenog, postavljene su željezne anode na strateške pozicije po cijelom trupu. Navedene željezne anode su služile kako bi prikupljale elektrokemijske potencijalne bakra i same korodirale zauzvrat štiteći bakrenu oplatu. Navedeni mehanizam se pokazao uspješnim, no iz drugih razloga nije došlo do šire upotrebe na drugim brodovima. Širu upotrebu je katodna zaštita našla tek 1930-ih godina kada su je počeli koristiti kao nisko budžetnu zaštitnu metodu za cjevovode plina. Danas je njihova najčešća upotreba u bojlerima tople vode gdje štite osjetljive elemente poput kotla i grijača od korozije. Koristi se na svim strukturama koje su uronjene u more, primjerice pristaništa i na priobalnim konstrukcijama.¹⁷ Važno je napomenuti kako se na konstrukcijama gdje postoji kretanje ljudi često preferira pasivna katodna zaštita čime se štiti ljude koji na navedenim konstrukcijama rade. Često se koristi na brodovima i cjevovodima, a posebice na cjevovodima koji prenose korozivne supstance koji se često koriste katodnom zaštitom narinutom strujom kako bi se spriječilo korodiranje unutarnje površine cjevovoda.

¹⁶ Rajendran, S. (2018). Corrosion-Yesterday, Today and Tomorrow. *Oriental Journal of Physical Sciences*, br. 3. str. 68.-74.

¹⁷ U.S. Army Corps of Engineers (2004.) Design: Electrical engineering cathodic protection

Uz navedene prednosti i primjere korištenja, postoje i nedostaci koje se mora uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja i planiranja sustava katodne zaštite:

- Korozija uzrokovana vodikom - proces je vidljiv na slici 16;
- Katodno odvajanje;
- Izolacija katode.



Slika 16 Prikaz procesa korozije uzrokovane vodikom. Izvor: <https://www.imetllc.com/wp-content/uploads/2016/09/Hydrogen-embrittlement.png>

Unutar kiselih okruženja ili u dodiru s morskom vodom, na sustavu katodne zaštite može doći do stvaranja vodika koji difundira do osnovnog materijala zbog lošeg pozicioniranja katodne zaštite. Prilikom difuzije vodika kroz čelik dolazi do tzv. vodikove krhkosti, posebne vrste korozije prouzrokovane na čeliku zbog prisustva elementarnog vodika.¹⁸ Vodikova krhkost pojavljuje se prilikom nepravilnog postavljanja katodne zaštite zbog koje može doći do znatne štete ili čak i havarije sustava. Nju se izbjegava pravilnim postavljanjem i dimenzioniranjem sustava katodne zaštite.

Katodno odvajanje je pojava koja se događa prilikom istovremenog korištenja premaza i katodne zaštite kao kombiniranog antikoroziivnog sustava. U slučaju katodne redukcije kisika difundiranog kroz premaz na osnovni metal, dolazi do mjehuranja ispod premaza i katodnog odvajanja zaštitnog premaza. Navedena pojava je uobičajena kod starenja zaštitnog premaza, no u prisustvu električnog naprezanja osnovnog materijala, kakvog prouzrokuje katodna zaštita, cjelokupan proces može se

¹⁸ Parker, M. i Peattie, E., (1988.), Pipeline Corrosion and Cathodic Protection Houston: Gulf Professional Publishing

znatno ubrzati u dovesti do ubrzanog propadanja zaštitnog premaza.¹⁹

Izolacija katode je mehanički problem koji se pojavljuje kod nepravilnog postavljanja katodne zaštite. Javlja se ako se prilikom postavljanja, postavi izolator poput PET folije, ukoliko se ne maknu zaštitne folije anode prilikom postavljanja, ili se jednostavno na poveznici katodne zaštite s konstrukcijom postavi izolator poput gumenih podloški čime se izolira katodnu zaštitu i negira protukorozivni efekt katodne zaštite.

Uzevši u obzir najčešće probleme katodne zaštite, jednostavnost i ekonomičnost postavljanja takvog sustava je neizmjerena te se ovisno o važnosti primjene koriste aktivni ili pasivni sustavi katodne zaštite.

3.1. Pasivna katodna zaštita

Pasivna katodna zaštita se u literaturi može pronaći i pod nazivom galvanska katodna zaštita. Njezin osnovni princip djelovanja se bazira na efektu galvanske korozije: Između dva različita metala u neposrednom dodiru preko elektrolita, jedan metal korodira, dok je drugi potpuno zaštićen od korozije dokle god je korodirajući metal u bliskom električnom kontaktu s njime. Dijagram osnovnog sustava pasivne katodne zaštite prikazan je na slici 17.

Razlog za nastanak navedene pojave je činjenica da različiti metali i slitine imaju različite elektrodne potencijale. Različiti elektrodni potencijal uz neposredni kontakt dva metala uz pomoć nekog elektrolita omogućuje prijenos naboja s jednog metala na drugi. Time metal s nižom elektronegativnošću postaje anoda, a drugi katoda. Postojanje elektrolita između metala je ključno za pravilno djelovanje katodne zaštite, te omogućuje prijenos iona metala koji reduciraju. U slučaju nedostatka iona metala koji lako reduciraju, unutar elektrolita koji sadrži vodu, reduciraju ioni vodika i kisika. Na obje elektrode nastaju elektrokemijske reakcije kojima se stvara razlika električnog potencijala. Navedena razlika električnog potencijala uništava anodni metal koji se pritom topi u elektrolitu, a katodni metal je zbog električnih potencijala odbijen od reagiranja s elektrolitom i na njemu se stvara efekt zaštite tj. inhibicije od korozije nauštrb ubrzane korozije anodnog metala. Drugim riječima, anodni metal u dodiru s

¹⁹ Thomas industry, n.d., "Corrosion Resistant Coating for Various Types of Corrosion"

katodnim metalom tvori galvanski članak te se podvrgava ubrzanoj koroziji kako bi se zaštitio katodni metal.²⁰

Česti materijali od kojih se prave žrtvene anode su cink, aluminij i magnezij. Odabir materijala ovisi o materijalu strukture koju pokušavamo zaštititi.²¹ Cilj pasivnih sustava katodne zaštite nije konstantna polarizacija strukture i samim time potpuna zaštita strukture, već je cilj uz pomoć žrtvene anode pasivizirati moguće proboje korozije na osnovnoj strukturi i uspostavljanje kemijski ravnotežnog stanja u kojemu već postoji zaštitni sloj na osnovnom materijalu i obnova zaštitnog sloja uz pomoć elektrokemijskog potencijala. Navedeni zaštitni slojevi mogu biti posebni antikorozivni premazi ili prirodni oksidi koji nastaju na pojedinim metalima ili legurama.

Prednosti pasivnih sustava katodne zaštite su:

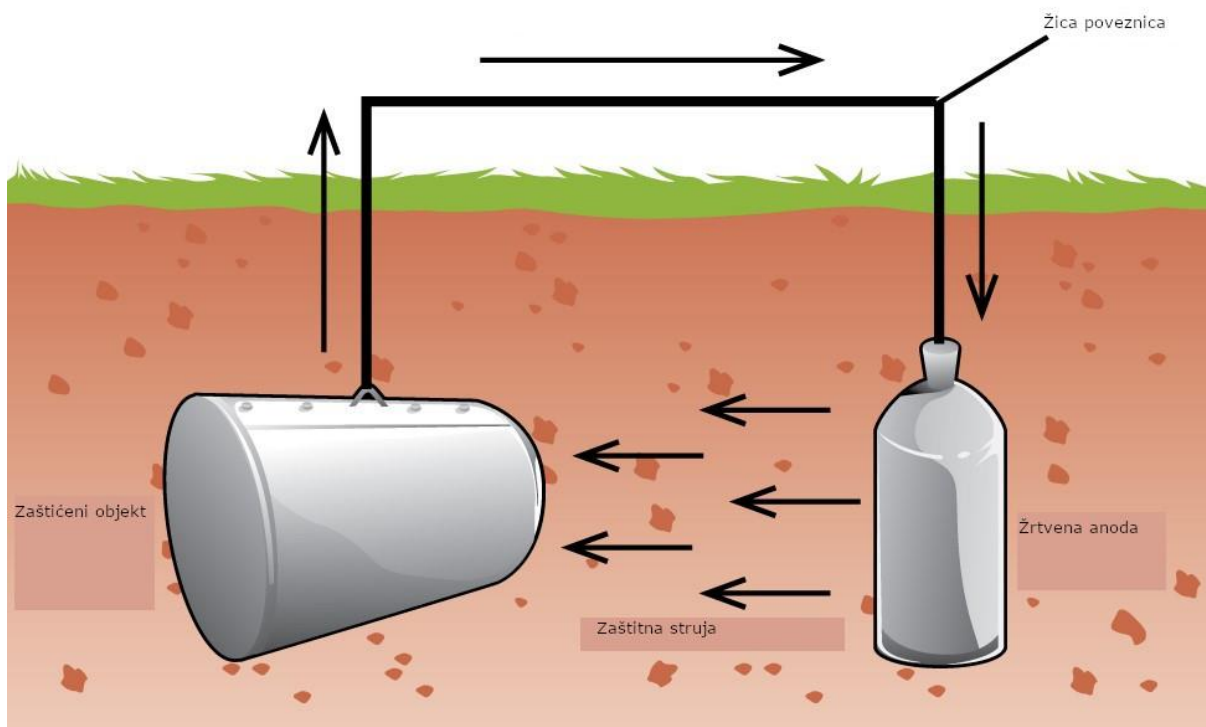
- Ne zahtijevaju konstantno praćenje parametara.
- Ne zahtijevaju konstantan izvor energije.
- Jednostavno postavljanje.
- Ne zahtijevaju održavanje osim periodičke zamjene.
- Relativno nizak trošak sustava s obzirom na ukupni radni vijek.

Glavni nedostatak pasivnih sustava je u činjenici što se često moraju kombinirati sa zaštitnim premazima ili iziskuje da se koristi materijal koji prirodno stvara zaštitni sloj od korozije, primjerice aluminij.²² Pasivni sustavi svoju primjenu nalaze u cjevovodima i pri zaštiti trupova električnih brodova. Prikaz pasivne katodne zaštite trupa broda moguće je vidjeti na slici 18.

²⁰ Gamry Instruments, n.d., "Getting Started with Electrochemical Corrosion Measurement"

²¹ MarinerDesk, (2018.), "Cathodic Protection: ICCP, MGPS and Sacrificial Anodes"

²² Clark, J., "Electronegativity", (2020.)



Slika 17 Dijagramski prikaz sustava pasivne katodne zaštite. Izvor: Obrada autora prema https://cnx.org/resources/3e29d27f736f3026912fbf06dc50ded3995916d4/CNX_Chem_17_06_Protect.jpg



Slika 18 Primjer sustava pasivne katodne zaštite na brodu. Vidljive su brojeve žrtvene anode na trupu broda. Izvor: <https://korrosionsgruppen.se/wp-content/uploads/2019/11/Hull-Anodes.jpg>

3.2. Katodna zaštita narinutom strujom

Druga vrsta katodne zaštite koju se često može susresti u praksi su sustavi s narinutom strujom. Prethodno je napomenuto kako se sustavi katodne zaštite temelje na principu stvaranja elektrokemijske razlike potencijala čime osnovna struktura postaje katoda u elektrokemijskom krugu. Lako je ekstrapolirati činjenicu kako se stvaranjem strujnog kruga na navedenoj strukturi ona može dovesti u stanje razlike potencijala. Jednako kao i u pasivnoj katodnoj zaštiti, osnovna struktura mora postati katoda strujnog kruga. Navedeni strujni krug mora prolaziti kroz određeni elektrolit poput vode ili tla. Postavi li se struktura u direktan dodir s elektrolitom s jedne strane, a s druge se postavlja anoda. Osnovna struktura se potom povezuje s jednim krajem izvora istosmjernog napona, dok se drugi kraj izvora povezuje na anodu i time se stvara strujni krug između strukture i anode. Navedena struktura se pritom ponaša poput katode strujnog kruga i time je zaštićena od korozije nauštrb anode koja ubrzano korodira jednako kao i u sustavima pasivne katodne zaštite, no nešto manjom brzinom.²³

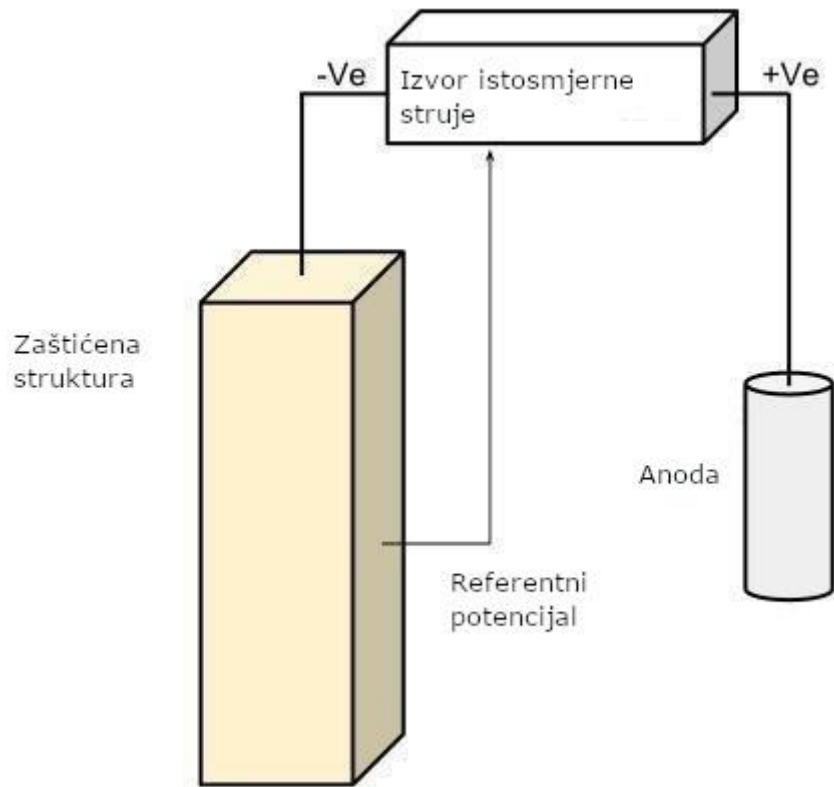
Njezina primjena se nalazi u sustavima gdje postoji potreba za temeljitom zaštitom protiv korozije, drugim riječima na krucijalnim sustavima gdje je kritično da uopće ne dolazi do korozije koriste se sustavi katodne zaštite narinutom strujom jer pružaju trajnu i automatsku zaštitu. Moderni sustavi zaštite narinutom strujom su dapače utoliko kompleksniji što u pravilu posjeduju dodatnu, referentnu elektrodu koja je direktno spojena na regulator napona. Navedena elektroda služi u svrhu regulacije napona ovisno o vanjskim čimbenicima. Time se smanjuje napon u vremenima kada ne postoji potreba za višim stupnjem zaštite, dok se u uvjetima pojačane korozije napon povećava kako bi se povećao stupanj zaštite. Dodatno se postiže smanjenje korištenja energije sustava i istovremeno produljuje radni vijek sustava.²⁴ Dijagram osnovnog sustava katodne zaštite narinutom strujom vidljiv je na slici 19.

Aktivni sustavi katodne zaštite se često koriste na brodovima i drugim strukturama koje se djelomično ili potpuno nalaze pod vodom. Prednost im je što mogu reagirati na promjene okoline i time osiguravaju zaštitu u gotovo svim uvjetima kojima su navedene strukture izložene. Glavni nedostatak je činjenica što iziskuju veće troškove pri

²³ CorrosionPedia, (2017.); "Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)",

²⁴ Riggs Larsen, K., (2020.), "Designing an ICCP System for the Hull of an Arctic Ice-Breaking Vessel", Materials Performance

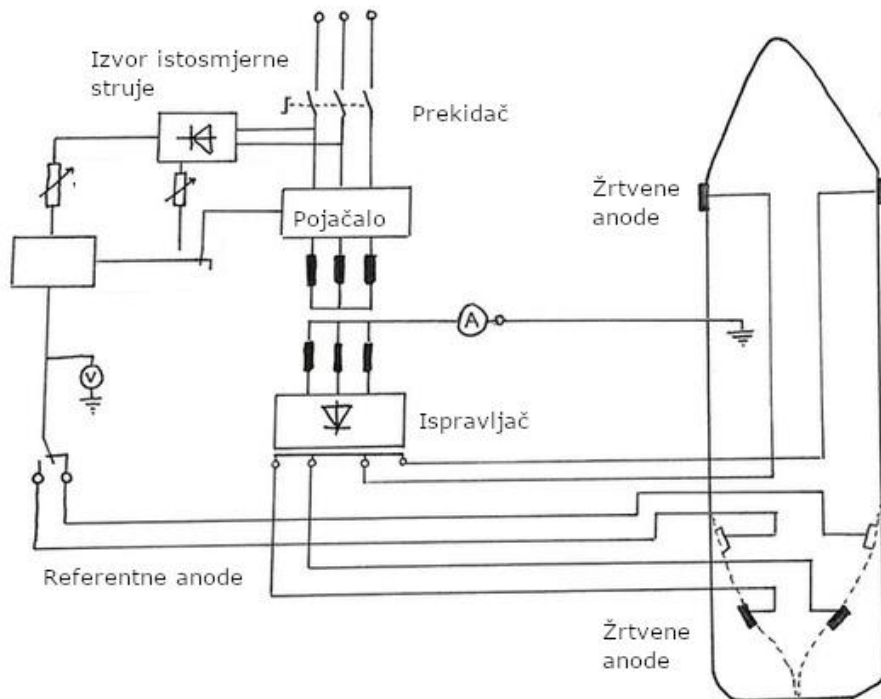
postavljanju od sustava pasivne zaštite, no na kritičnim strukturama na kojima je krucijalno da uopće ne dođe do korozije preferirani su način zaštite zbog totalne zaštite koju pružaju. Primjer navedenog su cjevovodi i trupovi većih brodova, a zaštitu narinutom strujom trupa i cjevovoda moguće je vidjeti na slici 20 tj., na slici 21.



Slika 19 Dijagram sustava katodne zaštite narinutom strujom. Vidljive su poveznice različitih dijelova. Izvor:

Obrada autora prema

https://www.researchgate.net/profile/Kiran_Raj7/publication/269300883/figure/fig2/AS:392071807553541@1470488611345/Typical-Impressed-Current-Cathodic-P



Slika 20 Shema sustava katodne zaštite narinutom strujom za trup broda. Izvor: Obrada autora prema <https://www.marinerdesk.com/wp-content/uploads/2018/03/step0003.jpg>



Slika 21 Vidljivi cjevovodi sa sustavom katodne zaštite. Izvor: <https://5.imimg.com/data5/ST/JO/ID/SELLER-7533635/cathodic-protection-system-for-pipelines-500x500.jp>

4. Antikorozivna zaštita elektrana

Elektrane se po svojoj prirodi dijele s obzirom na izvor energije. Termoelektrane se temelje na izvlačenju topline iz kružnog procesa. Ovisno o vrsti goriva, TE na ugljen se temelje na Clasius-Rankineovom procesu. Nasuprot njima, TE na plin se temelje na kombiniranom procesu gdje se plin provlači kroz Jouel-ov proces te se potom izlazna temperatura plina iskorištava kroz Rankineov proces kako bi se izvukao koristan rad i samim time električna energija. Lako se zaključuje kako je Rankineov proces osnova razumijevanja principa funkcioniranja termoelektrana. Primjer Rankineovog procesa u TE na ugljen poput „Plomin“-a se sastoji od sljedećih koraka:

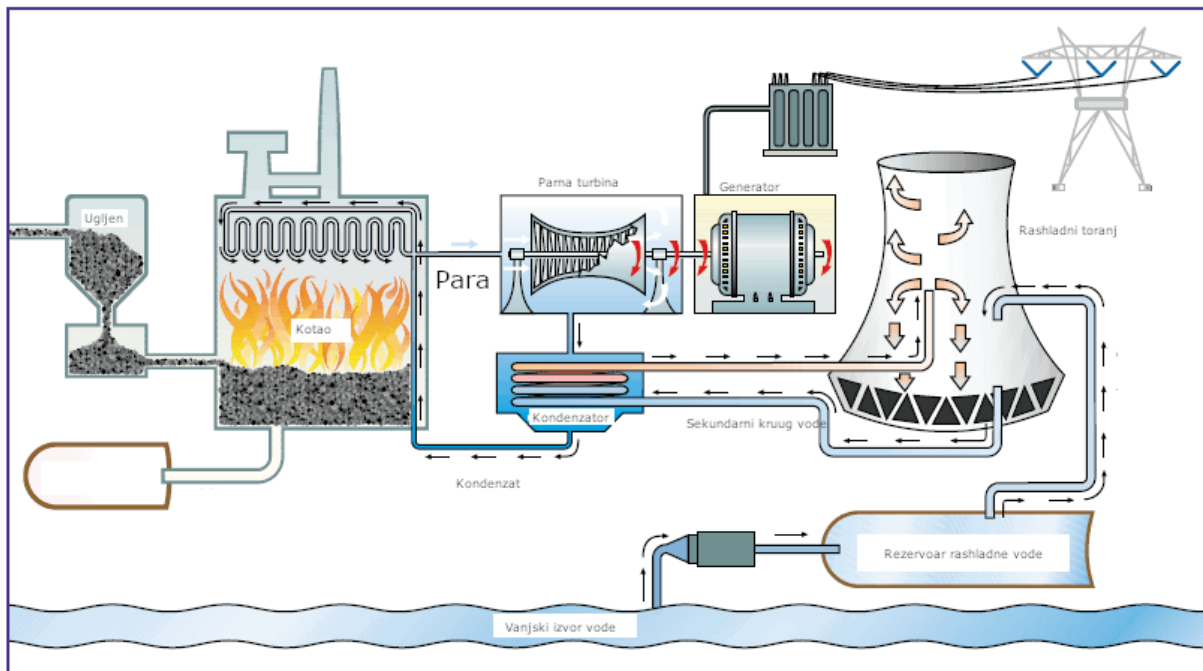
1. U kotlu se voda zagrijava do stanja suhozasićene pare.
2. Para potom prolazi do parne turbine gdje ekspandira u dodiru sa lopaticama turbine i vrši koristan rad.
3. Ekspandirana vodena para se potom provlači kroz kondenzator gdje se hladi i kondenzira uz pomoć hladne vode, iz sekundarnog kruga tj. okoliša, kojoj predaje preostalu toplinu.
4. Kondenzat se pumpa natrag u kotao gdje ponovo započinje kružni proces.

Voda je izrazito dobar medij za pokretanje parnih turbina zbog velike količine latentne topline potrebne za isparavanje čime se postiže bolji prijenos energije na turbine.²⁵

Dodatna uloga vode u elektranama je u krugu morske vode. Krug morske vode se u pravilu sastoji od vodene pumpe koja pumpa vodu iz okoliša u rashladni toranj, te potom u sekundarni, otvoreni krug kondenzatora. Hladna voda iz okoliša pritom prima zaostalu toplinu vode u primarnom kružnom procesu i pomaže kondenzirati vodu u primarnom, krugu. Potom topla voda iz otvorenog, sekundarnog kruga prolazi natrag u rashladni toranj, gdje se hladi s vodom koja tek ulazi u rashladni toranj, prije povratka u okoliš. Zbog navedenog sekundarnog kruga, termoelektrane i nuklearne elektrane se grade u blizini vodenih površina. Primjeri za to su rijeka Sava za NE „Krško“ ili Jadransko more za TE „Plomin“, no važno je uočiti kako TE „Plomin“ ne posjeduje rashladni toranj već je sustav koji je direktno povezan s morem. Voda se koristi u sekundarnom krugu zbog izrazito visokog toplinskog kapaciteta: $4200 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

²⁵ Nuclear Power, n.d., "Water as a Reactor Coolant"

Osnovni dijagram rada termoelektrane moguće je vidjeti na slici 22.



Slika 22 Pojednostavljeni dijagram radnih komponenti termoelektrane na ugljen. Izvor: Obrada autora prema https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/styles/full_width/public/thumbnails/image/wss-wuse-thermoelectric-diagram.gif

Očito je iz navedenog kako su svi navedeni sustavi u obliku značajno velikih struktura koje su pod stalnim termalnim naprezanjima. Navedena termalna naprezanja često negativno utječu na većinu materijala, te se iz tog razloga za strukture termoelektrana nerijetko koriste metali zbog odličnih strukturalnih svojstva pri prolongiranom termičkom naprezanju. Neovisno o navedenim svojstvima, metali pri termalnim naprezanjima trpe ubranu koroziju te je iz tog razloga kritično zaštititi ih.

Kako bi se poboljšala ekonomska isplativost koja je uvijek jedna od pokretačkih sila na velikim projektima, potrebno je uočiti komponente koje su osjetljive na korozije te koje je ekonomski isplativo zaštititi: plaševi kondenzatora, izmjenjivači topline, cijevi koje dovode i odvođe vodu unutar primarnog i sekundarnog kruga elektrane, vodene pumpe i rashladne cijevi unutar sekundarnog kruga. Dodatni se naglasak postavlja na antikorozivnu zaštitu svih komponenti sekundarnog kruga ako se u njemu koristi morska voda kao rashladni medij zbog svoje više razine korozivnog potencijala naspram slatke vode u rijekama. Mora se napomenuti kako ni riječna voda nije idealna u pogledu njezinog korozivnog potencijala zbog raznih onečišćenja koja povećavaju

njezin korozivni potencijal.²⁶

Unutar sekundarnog kruga gotovo sve komponente posjeduju hibridni sustav zaštite od korozije kako bi se stvorila trajnija i dugotrajnija zaštita. Uz katodnu zaštitu, na dijelovima gdje postoje uvjeti i time se ne narušava funkcionalnost sustava koriste se i antikorozivni premazi.

Trostrukom antikoroziivnu zaštitu (premazom, pasivnom katodnom zaštitom i narinutom strujom) često posjeduju pumpe sekundarnog kruga zbog činjenice da su u direktnom dodiru s korozivnim medijem i u pravilu su konstantnom radu kako bi osigurale dovoljan tok hladne vode u elektranu.²⁷

Plastevi vodenih komora kondenzatora su također komponenta koja je na direktnom udaru korozije. Zbog činjenice da voda u sekundarnom krugu kondenzatora prolazi prvo kroz rashladni toranj u procesu hlađenja otpadne vode, voda koja ulazi u rashladni krug kondenzatora je bogata kisikom, čime se uz povišene termalne uvjete pogoduje bržem nastanku korozije. Sekundarni krug je u pravilu takve izvedbe da se nalazi u direktnom dodiru s plaštom kondenzatora čime je plašt direktno izložen korozivnim utjecajima. Kako bi se navedeno spriječilo, poželjno je na plaštu kondenzatora osigurati žrtvene anode i narinutu struju. Dodatno, obavezno je plašt kondenzatora premazati s unutarnje strane antikoroziivnim premazom kako bi se dodatno zaštitio i smanjili troškovi sustava aktivne katodne zaštite.²⁸ Dijagram parnog kondenzatora sa pripadajućim elementima vidljiv je na slici 23.

Važno je spomenuti kako je industrijska praksa katodne zaštite plašta kondenzatora različita ovisno radi li se o sekundarnim sustavima slatke ili morske vode. Pri slatkoj vodi, plaštevi imaju zaštitni premaz, no sustavi katodne zaštite koji se koriste su u pravilu pasivni pomoću magnezijjskih ili cinčanih anoda (primjer magnezijjskih anoda vidljiv je na slici 24.). U slučaju morske vode, za pasivnu zaštitu se koriste specijalizirane Aluminij-Cink-Indij anode, no preporuka je da se umjesto njih koriste sustavi s narinutom strujom.²⁹ Razlog za korištenje sustava s narinutom strujom je u činjenici što plaštevi kondenzatora namijenjenih za morsku vodu koriste titanij ili

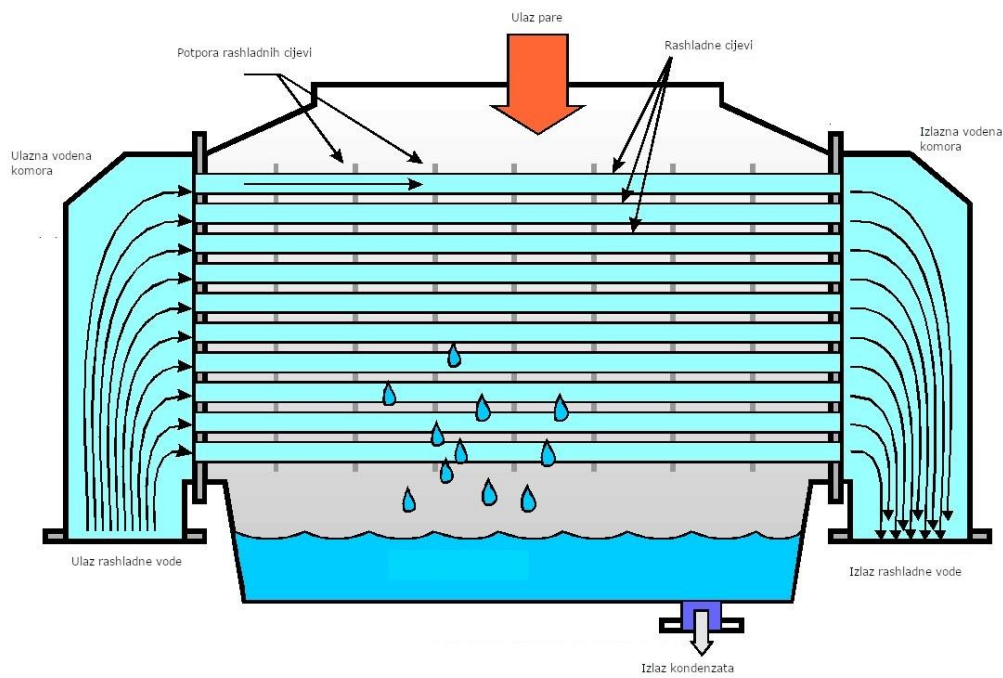
²⁶ Mallikharjuna, T. i Rao, S. (2020). Steam condensation by heat pipes. *Journal of Physics: Conference Series*

²⁷ Ashwini, S., (2016.), Applications of Cathodic Protection Systems for Power Plant Components

²⁸ loc. cit.

²⁹ loc. cit.

titanijem presvučene čelične ploče. Titanij omogućuje bolju zaštitu navedenih površina, no pri zaštitnim potencijalima nižim od 1.5V titanij je osjetljiv na hidriranje čime se može stvoriti značajna šteta na konstrukciji.



Slika 23 Dijagram strukture parnog kondenzatora. Vidljivi su različiti dijelovi kondenzatora i procesi koji se u njemu odvijaju. Izvor: Obrada autora prema https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/7/78/Power_plant_surface_condenser.jpg



Slika 24 Primjer magnezijских žrtvenih anoda kakve se često koriste pri katodnoj zaštiti vodenih komora kondenzatora. Izvor: Ashwini, K. (2016.) "Applications of Cathodic Protection Systems for Power Plant Components"

Zaštitu od korozije je također potrebno implementirati na cjevovodima kojima se prenosi voda. Antikorozivni premaz je standardni tretman, dok se ovisno o duljini koriste ili sustavi pasivne zaštite ili sustavi kombinirane katodne zaštite. Cjevovodi kojima se donosi voda u kondenzatore imaju kritičnu zadaću, jer ukoliko dođe do značajnijeg kvara ili puknuća, dolazi do zastoja rada elektrane, jer ne postoji način za nastavak sigurnog rada ako se ne može odvesti višak topline u okoliš.

Pomoćni cjevovodi kao i pomoćni sustavi za hlađenje i transport vode imaju manji prioritet za siguran nastavak rada elektrane. U takvim uvjetima ekonomski se idealnim smatra manji stupanj zaštite. Pod manjim stupnjem zaštite se navedenim komponentama smatraju antikorozivni premazi poput epoksidnih smjesa ili pvc premaza.³⁰ Uz antikorozivni premaz, koristi se i pasivna katodna zaštita, u pravilu se za njih koriste različiti sustavi ovisno o vrsti vode jednako kao i u slučaju plašta kondenzatora.

Cjevovodi unutar rashladnog tornja su poseban slučaj. Zbog konstantnog isparavanja se nalaze u veoma korozivnim uvjetima. Navedeno posebno vrijedi za rashladne tornjeve u sustavima morske vode koji su konstantno izloženi veoma reaktivnim kloridnim ionima koji uništavaju zaštitni sloj čelika unutar samog armiranog betona.³¹ Iz tog razloga rashladni tornjevi se zaštićuju sustavima pasivne katodne zaštite ali i narinutom strujom tamo gdje je to moguće kako bi se osigurala gotovo apsolutna zaštita od korozije na vitalnim strukturama elektrane. Primjer ormarića katodne zaštite za strukture rashladnog tornja, vidljiv je na slici 25.



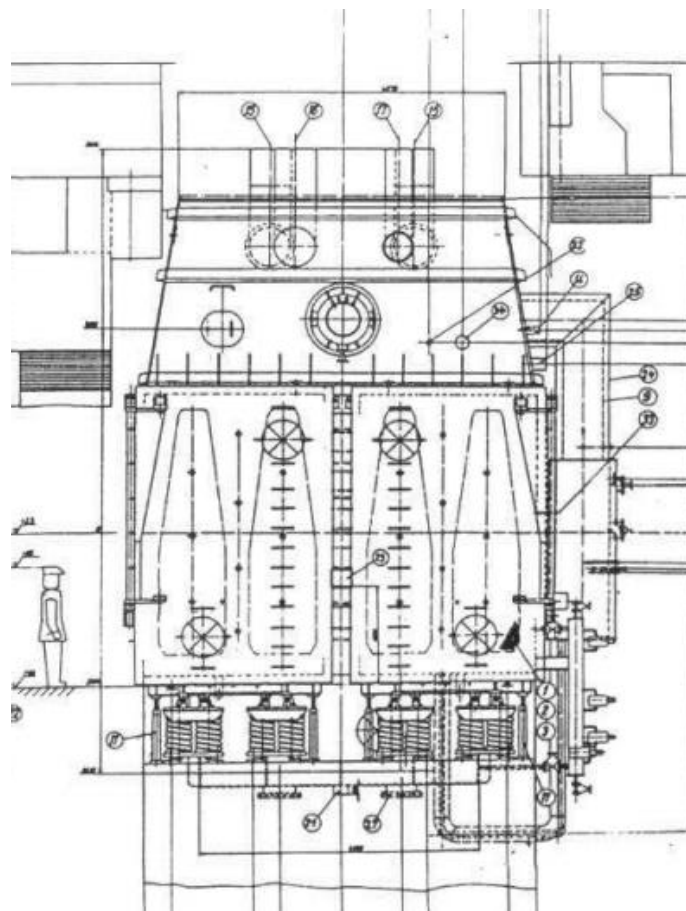
Slika 25 Primjer ormarića katodne zaštite na rashladnom tornju. Unutar njega se nalazi žrtvena anoda. Izvor: <https://www.structural.net/wp-content/uploads/2018/10/iccp-system-2.png>

³⁰ Piping Technology & Products Inc., n.d., "Corrosion protection"

³¹ Ashwini, S., (2016.), Applications of Cathodic Protection Systems for Power Plant Components

5. Katodna zaštita kondenzatora na primjeru TE „Plomin“

Kondenzator na TE „Plomin“ koristi se kako bi se kondenzirala vodena para primarnog kruga elektrane u tekuće stanje. Kako bi se osigurala rashladna moć kondenzatora, kroz sekundarni krug, tj. cijevi unutar kondenzatora i vodne komore teče morska voda. Morska voda se time ponaša poput elektrolita s visokom električnom vodljivošću, te spaja različite dijelove kondenzatora u električne krugove čime pogoduje stvaranju korozije na dijelovima koji su u direktnom kontaktu s morskom vodom. Dijelovi kondenzatora koji su direktno izloženi koroziji su pritom vodene komore i bakrene cijevi. Prikaz prednje strane kondenzatora nalazi se na slici 26. Dodatni nacrti anoda i shema sustava katodne zaštite kondenzatora nalaze se u prilogima 1-3.



Slika 26 Nacrt kondenzatora Izvor: Tehnički opis površinskog kondenzatora TE "Plomin"

Unutrašnjost bakrenih cijevi se radi svoje nedostupnosti štiti indirektno putem anoda

koje su postavljene u vodenim komorama. Vodene komore se nasuprot tome štite hibridnim sustavom – premazom površine i katodnom zaštitom narinutom strujom. Vodene komore izrađene su od DIN-RST37-2 čelika, navedeni čelik je nelegirani konstrukcijski čelik osjetljiv na koroziju. Površine vodenih komora su s unutarnje strane zaštićene zaštitnim gumenim premazom kako bi se smanjila korozija, ali i troškovi održavanja sustava katodne zaštite, tj. drugim riječima, kako bi se smanjila potrošnja struje i potrošnih materijala kojeg čine anode. Zaštitu narinutom strujom sustav postiže uz pomoć čak 62 željezne anode koje su postavljene na načiub da ulazne komore imaju po 16 feritnih anoda, dok svaka izlazna komora posjeduje preostalih 15 anoda. Uzevši u obzir da postoje dvije ulazne i dvije izlazne komore, to sveukupno i čini 62 anode u cijelom sustavu. Sve navedene anode imaju dimenzije $\varnothing 240 \times 70 \text{ mm}$. Drugim riječima, kružnog su presjeka 240 mm i debljine 70 mm kako bi se povećala površina djelovanja, na slici 28. moguće je vidjeti potrošene, korodirane anode. Navedene anode se nalaze na zatiku koji ih povezuje s nosačem. U sredini nosača se nalazi vijak koji omogućava zatezanje anode za prirubnicu uz pomoć matica. Na vanjskom kraju vijka nalazi se mjesto za priključenje kabla s regulacijskim sklopom. Cjelokupni sklop nosača se potom nalazi u okrugloj poliesterskoj (zbog električne izolacije) zaštitnoj košari i skupa sa njom se nalazi u cijevi koja oblikovana u plaštu kondenzatora kako bi se smanjio utjecaj erozije morske vode na cjelokupni sklop anode. Na kraju cijevi prema okolišu se nalazi prirubnica koja je pričvršćena na navedenu cijev, te se na nju spaja vijak nosač anode. Između prirubnice i plašta se nalazi kružna brtva vanjskog promjera 328 mm, i unutarnjeg 274 mm kako bi osigurala hermetički spoj između prirubnice i plašta. Dodatno se brtve postavljaju oko rupe vijka nosača na prirubnici kako bi se i tamo osigurao hermetički spoj i spriječio proboj morske vode u vanjski okoliš, ali i u prostor između vijka i nosača anode. Anoda dodatno na samom vijku ima brtvu kako bi se električno izolirala od nosača. Električni spoj anode s ostatkom sustava vidljiv je na slici 27.



Slika 27 Prikaz prirubnice na kojoj se nalazi katodna zaštita. Moguće je vidjeti električni spoj prema ostatku sustava. Izvor: Autorska slika



Slika 28 Slika potrošenih željeznih anoda nakon korištenja. Izvor: Autorska slika

Odabir željeznih anoda u komorama ima sekundarnu ulogu. Općenito kada je sustav katodne zaštite aktivan i spojen na napon, otpuštaju se ioni s anode u elektrolit. Na ovome primjeru to označava otpuštanje Fe^{2+} kationa koji svojim prisustvom u morskoj vodi pasiviziraju bakrene cijevi i sprječavaju korodiranje bakra s unutarnje strane. Time su i bakrene cijevi indirektno zaštićene istim sustavom kojim se štite vodene komore te nema potrebe za posebnim sustavom zaštite. Značaj navedenog je ogroman zbog činjenice da se bakrene cijevi ne mogu zaštititi konvencionalnim premazima (postoje specijalizirani premazi koji uz zaštitu od korozije stvaraju gubitke prijenosa topline). Razlog je u tome što je osnovna funkcija kondenzatora izmjena topline između primarnog kruga vode u elektrani i sekundarnog kruga čime se kondenzira vodena para iz primarnog kruga. Bakar u elementarnom obliku je odličan vodič topline, no postavljanjem bilo kakvog antikorozivnog premaza, narušava se toplinska vodljivost i time negira primarna svrha kondenzatora.

Moguće je zaključiti kako je sustav katodne zaštite narinutom strujom u izvedbi sa željeznim anodama idealan za dani kondenzator. Dodatna razmatranja prilikom postavlja navedenog sustava se sastoje u smanjenju troška struje za navedeni sustav. Kako bi se tome izašlo u susret, sustav je automatiziran uz pomoć regulacijskog sklopa. Regulacijski sklop dobiva regulatorni signal s osam referentnih elektroda postavljenih na vodenim komorama – po dvije na svakoj komori kako bi se u svakom trenutku dobio precizan podatak trenutne korozivnosti vode koja se nalazi u pojedinim komorama. Referentne elektrode su napravljene od srebra ili srebrnog klorida te su one manje od zaštitnih elektroda i njihova jedina svrha je prikupljanje informacije o trenutnoj električnoj vodljivosti vodiča i prijenos tih informacija regulacijskom sklopu.

Cilj regulacijskog sklopa je održavanje konstantnog potencijala unutar kondenzatora uz minimiziranje utroška električne energije koja je potrebna za njegov rad. Važno je napomenuti kako je izvedba upravljačke jedinice takva da se katodna zaštita može isključivati ili uključivati modularno, tj. pojedinačno za svaku pojedinu ulaznu ili izlaznu komoru. Navedena funkcionalnost je od izrazite koristi pri redovitom održavanju jer se time omogućuje lakše pronalaženje grešaka i redundancija sustava, jer nije potrebno, pri održavanju ili pregledu manjeg dijela sustava, gasiti cjelokupni sustav.

Važno je za napomenuti kako regulacijski sustav posjeduje čak 75 ulazno-izlaznih točaka prema drugim elementima čime se može prikazati njegova kompleksnost:

- Kabel od izvora napajanja.

- Kabel prema signalizacijskom ormariću.
- 8 kablova s referentnih elektroda.
- 3 kablova prema kondenzatoru.
- 62 kabla prema zaštitnim anodama koji se spajaju u 4 kruga, od kojih je svaki krug zasebno narinut za svaku vodenu komoru. Prikaz prednje strane kondenzatora sa pripadajućim krugovima katodne zaštite, vidljiv je na slici 29.



Slika 29 Prikaz prednje strane kondenzatora, tj. prednje strane dviju ulaznih vodenih komora. Vidljivo je kako svaka posjeduje 15 anoda. Izvor: Autorska slika

Neovisno o znatnom broju poveznica, sustav je osmišljen za veoma precizno namještanje potencijala u koracima od 10 mV na rasponu od 0 do 9,99 V. Navedenu preciznost i relativnu jednostavnost spajanja samog sustava s ostalim elementima mu omogućuje izrazito dug radni vijek, o čemu svjedoče njegove tehničke karakteristike, za navedeni sustav se u prosjeku očekuje preko 100 000 sati rada prije kvara. Kako bi se osigurao navedeni radni vijek, potrebno je redovito održavati cjelokupni sustav s obzirom da pojedine komponente imaju znatno kraći vijek trajanja od ostatka sustava. Posebice se to odnosi na željezne anode koje imaju predviđen radni vijek od gotovo 4

godine. Navedeni radni vijek anoda je nominalan te ovisi o uvjetima rada i drugim faktorima održavanja sustava.

Održavanje navedenog sustava je moguće podijeliti na više ciklusa:

- mjesečno održavanje;
- šestomjesečna kontrola.

Prilikom mjesečne kontrole važno je kontrolirati je li cjelokupni sustav pod naponom, provjeru ispravljača i upisati tehničke karakteristike ispravljača na dan očitavanja. Sljedeći korak mjesečne kontrole se sastoji od provjere razlike potencijala između referentni elektroda i metalne konstrukcije. Pozitivan pol multimetra se postavlja na stezaljke referentnih elektroda (RE1 do RE8), dok se negativan pol postavi na stezaljku označenu M (metal). Pojedinačno se provjerava svaku od navedenih referentnih elektroda naspram metala te se mora utvrditi razliku napona od +500 mV za sve elektrode. Ukoliko potencijal odstupa manje od 10% naspram postavljene vrijednosti, povećava se izlazna struja dok se izmjereni potencijal ne digne iznad 500 mV. U slučaju većeg odstupanja, ne postojanja napona, potrebno je postaviti dijagnozu i ukloniti kvar. Navedenu dijagnostiku i otklanjanje kvara u pravilu rade odgovorne osobe izvođača radova vezanih uz postavljanje sustava katodne zaštite. Periodičku kontrolu jednako tako izvode specijalisti za katodnu zaštitu te pritom provjeravaju sve izlazne parametre kao i sam rad sekundarnih uređaja sustava.

6. Zaključak

Unutar ovoga rada opisani su osnovni pojmovi vezani uz katodnu zaštitu. Pri početku rada je detaljno opisana povijest korozije, pregled stanja znanja i postojećih istraživanja u smjeru zaštite od korozije. Detaljno je kemijski opisan proces hrđanja željeza i čelika kao najzastupljeniji primjer korozije u svakodnevnom životu. Opisane su različite vrste korozije, kao veoma bitne pojave prilikom razmatranja i planiranja struktura te su objašnjene preventivne mjere kojima se nastoji smanjiti njihov utjecaj. Ukratko su opisane sve vrste antikorozivne zaštite, no posebno su istaknuti principi i mehanizmi katodne zaštite. Prilikom opisivanja katodne zaštite, detaljno su objašnjene prateće pojave kao i osnovni način djelovanja za sve vrste katodne zaštite. Opisani su primjeri upotrebe katodne zaštite, uvjeti u kojima se u pravilu koriste, kao i prednosti i nedostaci pojedinih metoda katodne zaštite naspram ostalih. Poseban značaj je dan vrstama korozivne zaštite elektrana i ukratko su opisani procesi i tehnike zaštite pojedinih dijelova koji su zajednički svim termalnim elektranama. Sintezu svih prethodnih saznanja i objašnjenja procesa i mehanizma predstavlja opis katodne zaštite na kondenzatoru turbine na primjeru TE „Plomin“. Primjer je raščlanjen na svoje sastavne komponente i objašnjena je funkcionalnost svih pojedinih dijelova sustava kako bi se osigurala optimalna zaštita uz minimalne troškove. Minimiziranje troškova je misao vodilja zbog koje se i koristi zaštita od korozije. Smatra se da je sprječavanjem korozije moguće produljiti radni vijek pojedinih elemenata kako bi se produljio vijek eksploatacije sustava. Vijek eksploatacije sustava je naročito važan u elektranama gdje se njegovo produljenje odražava na krajnju cijenu proizvodnje struje koja potom odlazi krajnjim potrošačima. Moguće je zaključiti kako je korozivna zaštita djelomično i indirektno zaslužna za dulji vijek termoelektrane i samim time bolju ekonomsku isplativost.

Glavni zaključak koji se izvlači iz cjelokupnog rada je kako je korozija izuzetno štetna i nepoželjna pojava koja može zahvatiti strojarske konstrukcije, te da je zaštita od korozije, pažljivim planiranjem procesa i sustava zaštite, od presudnog značaja za kvalitetan rad strojara kojima je posao planiranje i izvedba većih konstrukcija i krucijalnih sustava.

Literatura

A) Članci:

- (1948.) Galvanic corrosion.. What it is – and how to fight it. *Motorboating, The Yachtsmen's Magazine*,, str. 50., Dostupno na:
https://books.google.hr/books?id=RvM1AQAAMAAJ&pg=PA50&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (Pristupljeno: 17. svibnja 2020.).
- Ashwini, S., (2016.), Applications of Cathodic Protection Systems for Power Plant Components
- Mallikharjuna, T. i Rao, S. (2020). Steam condensation by heat pipes. *Journal of Physics: Conference Series*. Dostupno na:
https://www.researchgate.net/publication/339771747_Steam_condensation_by_heat_pipes (Pristupljeno: 25. svibnja 2020.).
- Rajendran, S. (2018). Corrosion-Yesterday, Today and Tomorrow. *Oriental Journal of Physical Sciences*, br. 3. str. 68.-74., Dostupno na:
https://www.researchgate.net/publication/331835724_Corrosion-Yesterday_Today_and_Tomorrow (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- Shipley, R., Darwin D. i Locke C. (1997.) Stray Current Corrosion due to utility cathodic protection
- U.S. Army Corps of Engineers (2004.) Design: Electrical engineering cathodic protection

B) Knjige:

- Baeckmann, W., Schwenck, W. i Prinz W.,(1997.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*, Houston:Gulf Professional Publishing, Dostupno na:
https://books.google.hr/books?id=6X1ogIzqa8oC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Pristupljeno: 25. svibnja 2020.).
- Kutz, M., (2018.), *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, Oxford: Elsevier, William Andrew- Applied Science Publishers; Dostupno na:
<https://books.google.hr/books?id=A->

NgDwAAQBAJ&pg=PA519&lpg=PA519&dq=peabody+electrode+potential&source=bl&ots=DXKNrgs8Je&sig=ACfU3U2930HF5TtKQOtz4Q5Nx_H5OjGyA&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiMzpuH7MjpAhUZGsAKHd9DnoQ6AEwCXoECAoQAQ#v=onepage&q=peabody%20electrode%20potential&f=false

(Pristupljeno: 16. svibnja 2020.).

- Parker, M. i Peattie, E., (1988.), *Pipeline Corrosion and Cathodic Protection* Houston: Gulf Professional Publishing
- Perez, N., (2004.), *Electrochemistry and Corrosion Science*, Mayaguez: Springer, Dostupno na:
[https://books.google.hr/books?id=resQDQAAQBAJ&pg=PA271&lpg=PA271&dq=the+reference+electrode+\(RE\)+using+a+voltmeter+V,+and+the+curren&source=bl&ots=fY2TzzPFWB&sig=ACfU3U02sCDKPxfoswm8ialVweGU51RKZ&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiPts_xptDpAhUZAxAIHRhqCAcQ6AEwAHoECUQAQ#v=onepage&q=the%20reference%20electrode%20\(RE\)%20using%20a%20voltmeter%20V%2C%20and%20the%20curren&f=false](https://books.google.hr/books?id=resQDQAAQBAJ&pg=PA271&lpg=PA271&dq=the+reference+electrode+(RE)+using+a+voltmeter+V,+and+the+curren&source=bl&ots=fY2TzzPFWB&sig=ACfU3U02sCDKPxfoswm8ialVweGU51RKZ&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiPts_xptDpAhUZAxAIHRhqCAcQ6AEwAHoECUQAQ#v=onepage&q=the%20reference%20electrode%20(RE)%20using%20a%20voltmeter%20V%2C%20and%20the%20curren&f=false) (Pristupljeno: 14. svibnja 2020.).
- Stansbury, E. i Buchanan, R., (2000.), *Fundamentals of Electrochemical Corrosion*, S.A.D.:The Materials Information Society, Dostupno na:
https://books.google.hr/books?id=baHwfLpWpP8C&pg=PA174&redir_esc=y (Pristupljeno: 17. svibnja 2020.).

C) Web:

- Cathwell, n.d., "What is corrosion?", Dostupno na: <https://cathwell.com/what-is-corrosion/> (Pristupljeno: 25. svibnja 2020.).
- Clark, J., "Electronegativity", (2020.) Dostupno na:
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_y\)/Physical_Properties_of_Matter/Atomic_and_Molecular_Properties/Electron_egativity](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_y)/Physical_Properties_of_Matter/Atomic_and_Molecular_Properties/Electron_egativity) (Pristupljeno: 19. svibnja 2020.).
- Corrosion Doctors, n.d., "Stray Current Corrosion Cells", Dostupno na:
<https://corrosion-doctors.org/Corrosion-Factors-Cells/corrosion-cells-stray.htm> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).

- CorrosionPedia, (2017.),“Cathodic Disbondment”, Dostupno na: <https://www.corrosionpedia.com/definition/228/cathodic-disbondment> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- CorrosionPedia, (2017.);“Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)”, Dostupno na: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1237/impressed-current-cathodic-protection-iccp> (Pristupljeno: 23. svibnja 2020.).
- CorrosionPedia, (2017.);“Stray Current”, Dostupno na: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1032/stray-current> (Pristupljeno: 21. svibnja 2020.).
- Gamry Instruments, n.d., “Getting Started with Electrochemical Corrosion Measurement”, Dostupno na: <https://www.gamry.com/application-notes/corrosion-coatings/basics-of-electrochemical-corrosion-measurements/> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- Hyperphysics, (2011.),“Electrolytic Cells”, Dostupno na: <https://web.archive.org/web/20110604135153/http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/Chemical/electrolyt.html> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- MarinerDesk, (2018.), “Cathodic Protection: ICCP, MGPS and Sacrificial Anodes”, Dostupno na: <https://www.marinerdesk.com/cathodic-protection-iccp-mgps-sacrificial-anodes/> (Pristupljeno: 23. svibnja 2020.).
- Masteel UK Ltd, (2016.), “Weathering Steel: A Guide to Corten and the A/B Equivalents, Origins & Standards”, AZO Materials, Dostupno na: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12974> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- Matcor, n.d., “Cathodic Protection”, Dostupno na: <https://www.matcor.com/resources/cathodic-protection-systems/> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- NACE International, n.d.,“Stress Corrosion Cracking (SCC)”, Dostupno na: <https://www.nace.org/resources/general-resources/corrosion-basics/group-3/stress-corrosion-cracking> (Pristupljeno: 21. svibnja 2020.).
- NACE International, n.d.,“Uniform Corrosion”, Dostupno na: <https://www.nace.org/resources/general-resources/corrosion-basics/group-1/uniform-corrosion> (Pristupljeno: 25. svibnja 2020.).

- Nuclear Power, n.d., “Water as a Reactor Coolant”, Dostupno na: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/materials-nuclear-engineering/properties-of-water/water-as-a-reactor-coolant/> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- Overbey, D.,(2018.), “Beware of Galvanic Action (It’s a Thing)”, Building Enclosure, Dostupno na: <https://www.buildingenclosureonline.com/blogs/14-the-be-blog/post/87725-beware-of-galvanic-action-its-a-thing> (Pristupljeno: 21. svibnja 2020.).
- Piping Technology & Products Inc., n.d., “Corrosion protection”, Dostupno na: <https://pipingtech.com/resources/technical-bulletins/corrosion-protection/> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- Riggs Larsen, K., (2020.), “Designing an ICCP System for the Hull of an Arctic Ice-Breaking Vessel”, Materials Performance, Dostupno na: <http://www.materialsperformance.com/articles/cathodic-protection/2015/03/designing-an-iccp-system-for-the-hull-of-an-arctic-ice-breaking-vessel> (Pristupljeno: 17. svibnja 2020.).
- Schiroky, G., Dam, A, Okeremi, A. i Speed, C., “Pitting and crevice corrosion of offshore stainless steel tubing”, (2013.), Dostupno na: <https://www.offshoremag.com/business-briefs/equipment-engineering/article/16761447/pitting-and-crevice-corrosion-of-offshore-stainless-steel-tubing> (Pristupljeno: 23. svibnja 2020.).
- Seal expert, (2017.), “Anti-corrosion Coating Types and their Applications”, Dostupno na: <https://www.sealxpert.com/anti-corrosion-coating-types-and-their-applications> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- Smith, C., (2020.), “Galvanic Reaction: Incompatible Metals Responsible for Corrosion”, Monarch Metal Fabrication, Dostupno na: <https://www.monarchmetal.com/blog/galvanic-corrosion-common-questions-answered/> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- Thomas industry, n.d., “Corrosion Resistant Coating for Various Types of Corrosion”, Dostupno na: <https://www.thomasnet.com/articles/chemicals/corrosion-resistant-coatings/> (Pristupljeno: 17. svibnja 2020.).

- Total Materia, (2008.), "Corrosion of Aluminum and Its Alloys: Forms of Corrosion", Dostupno na: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=187> (Pristupljeno: 23. svibnja 2020.).
- U.S. Chrome, n.d., "Design recommendations for hard chrome plating", Dostupno na: <https://www.uschrome.com/design-recommendations-for-hard-chrome-plating/> (Pristupljeno: 15. svibnja 2020.).
- Ulick R., E. (1948.) "Historical Theories on Corrosion", Corrosion Doctors, Dostupno na: <https://www.corrosion-doctors.org/Corrosion-History/Theories.htm> (Pristupljeno: 25. svibnja 2020.).
- WebCorr Corrosion Consulting Services, n.d., "Different Types of Corrosion", Dostupno na: https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/stray%20current%20corrosion.htm (Pristupljeno: 16. svibnja 2020.).

D) Tehnička dokumentacija:

- TE „Plomin“ Katodna zaštita kondenzatora turbine 210 MW Plomin 2
- TE „Plomin“ Površinski kondenzator

Popis slika

Slika 1 Primjer hrđanja cijevi.	4
Slika 2 Pojednostavljeni dijagram procesa hrđanja.....	7
Slika 3 Česti primjer galvanske korozije koji se sureće u svakodnevnom životu.	9
Slika 4 Tablični prikaz čestih metala i mogućnosti pojave galvanske korozije. Crveno označava nastanak galvanske korozije po anodnom metalu ukoliko su u bliskom kontaktu.	10
Slika 5 Mikroskopska slika pucanja pod korozivnim naprezanjem.	11
Slika 6 Primjer opće, jednolike korozije po cjelokupnoj površini.....	12
Slika 7 Poprečni presjeci različitih vrsta pitting korozije.	13
Slika 8 Dijagram kruga lutajućih struja.....	15
Slika 9 Primjer štete uzrokovan lutajućim strujama na cijevi.	15
Slika 10 Dijagramski prikaz procesa anodiziranja aluminija na mikro razini.	17
Slika 11 Primjer anodiziranog aluminija s prikazom mogućnosti bojanja površine. ...	17
Slika 12 Primjer radnika koji zaštićuje cjevovod posebnim premazom.....	18
Slika 13 Primjer procesa galvanizacije čelika	19
Slika 14 Prikaz teksture galvaniziranog metala.....	20
Slika 15 Primjer pasivne katodne zaštite na armaturi armiranog betona.....	21
Slika 16 Prikaz procesa korozije uzrokovane vodikom.	23
Slika 17 Dijagramski prikaz sustava pasivne katodne zaštite.	26
Slika 18 Primjer sustava pasivne katodne zaštite na brodu. Vidljive su brojne žrtvene anode na trupu broda.	26
Slika 19 Dijagram sustava katodne zaštite narinutom strujom. Vidljive su poveznice različitih dijelova.	28
Slika 20 Shema sustava katodne zaštite narinutom strujom za trup broda.	29
Slika 21 Vidljivi cjevovodi sa sustavom katodne zaštite.	29
Slika 22 Pojednostavljeni dijagram radnih komponenti termoelektrane na ugljen. ...	31
Slika 23 Dijagram strukture parnog kondenzatora. Vidljivi su različiti dijelovi kondenzatora i procesi koji se u njemu odvijaju.....	33
Slika 24 Primjer magnezijских žrtvenih anoda kakve se često koriste pri katodnoj zaštiti vodenih komora kondenzatora.	33
Slika 25 Primjer ormarića katodne zaštite na rashladnom tornju. Unutar njega se nalazi žrtvena anoda.	34

Slika 26 Nacrt kondenzatora	35
Slika 27 Prikaz prirubnice na kojoj se nalazi katodna zaštita. Moguće je vidjeti električni spoj prema ostatku sustava.....	37
Slika 28 Slika potrošenih željeznih anoda nakon korištenja.....	37
Slika 29 Prikaz prednje strane kondenzatora, tj. prednje strane dviju ulaznih vodenih komora. Vidljivo je kako svaka posjeduje 15 anoda.....	39

Sažetak

U ovome radu prikazuje se korozija i metode zaštite koje strojari imaju na raspolaganju prilikom planiranja strojarskih instalacija i kompleksnih strojarskih sustava. Objašnjava se korozija, njezini osnovni teoretski procesi i načini zaštite koje se mogu primijeniti. Naglasak je na katodnoj zaštiti i njezinoj primjeni u industrijskim postrojenjima, a posebice termoelektranama. Objašnjavaju se prednosti i nedostaci pojedinih vrsta katodne zaštite na primjeru kondenzatora TE „Plomin“ i detaljno se prikazuju sustavi kojima se navedena antikorozivna zaštita i ostvaruje. Za kraj, prikazuju se zaključci koji su proizašli iz ove tematike i iz primjera na kojemu je teorija primijenjena.

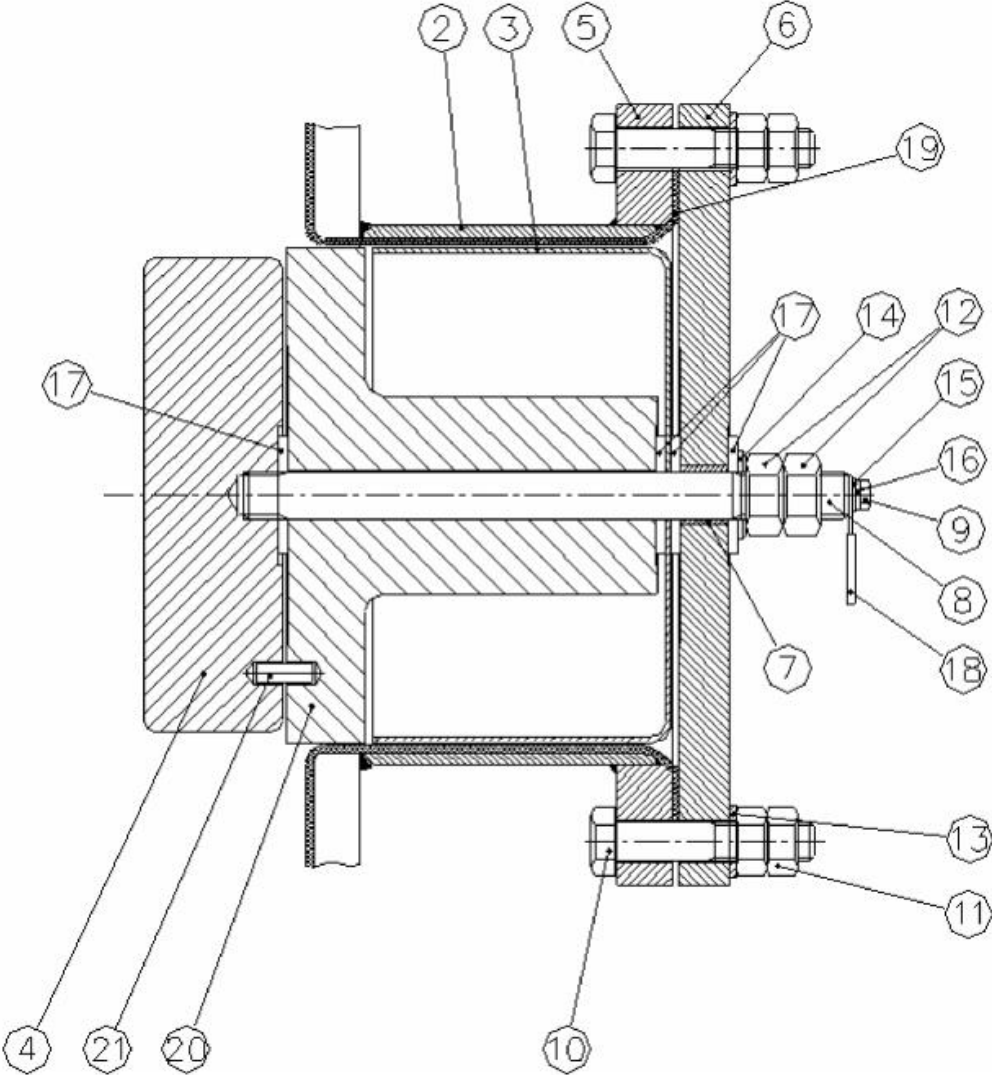
Ključne riječi: korozija, korozivna zaštita, termoelektrana, katodna zaštita.

Abstract

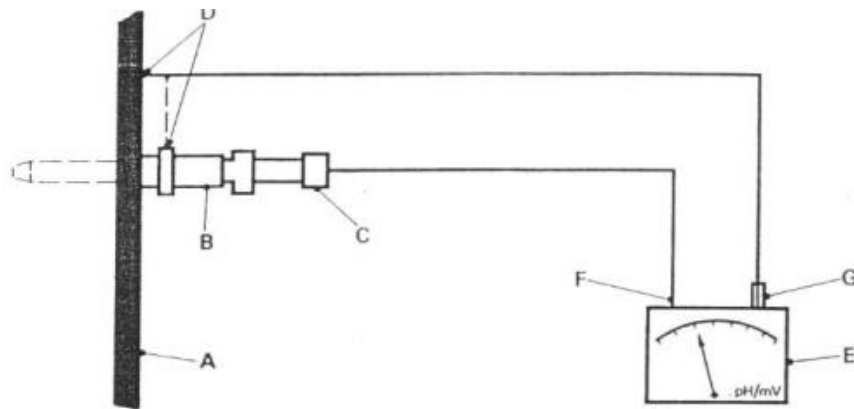
This paper gives a summary of corrosion and the ways that mechanical engineers can mitigate and apply as protection during the design, planning and constructing stages of complex mechanical systems and plants. Corrosion is explained in detail, it's fundamental theoretical processes and the ways we can protect against it. The emphasis of this paper is on cathodic protection and the ways it can be implemented in industrial plants, especially in thermal power plants. The system for cathodic protection is explained on the example of the condenser inside the thermal power plant „Plomin“. At the end, conclusions are given on the whole theoretical framework and on the example that has been analysed.

Key words: Corrosion, corrosion protection, thermal power plant, cathodic protection.

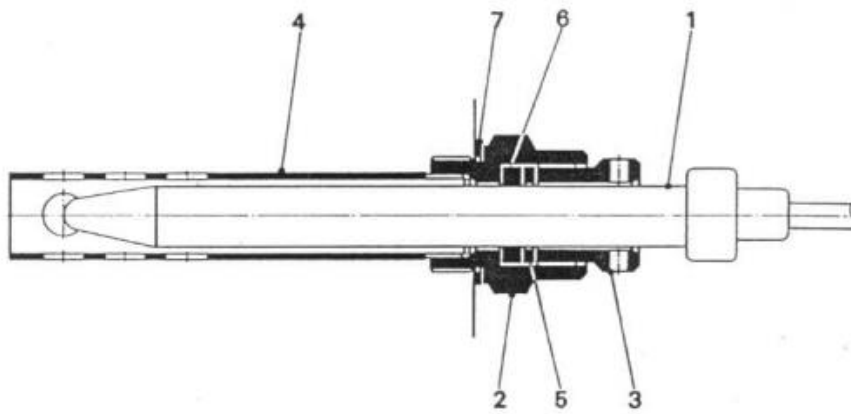
Prilog 1: Nacrt učvrščenja željeznih anoda



Prilog 2: Nacrt postavljanja i ispitivanja referentnih elektroda

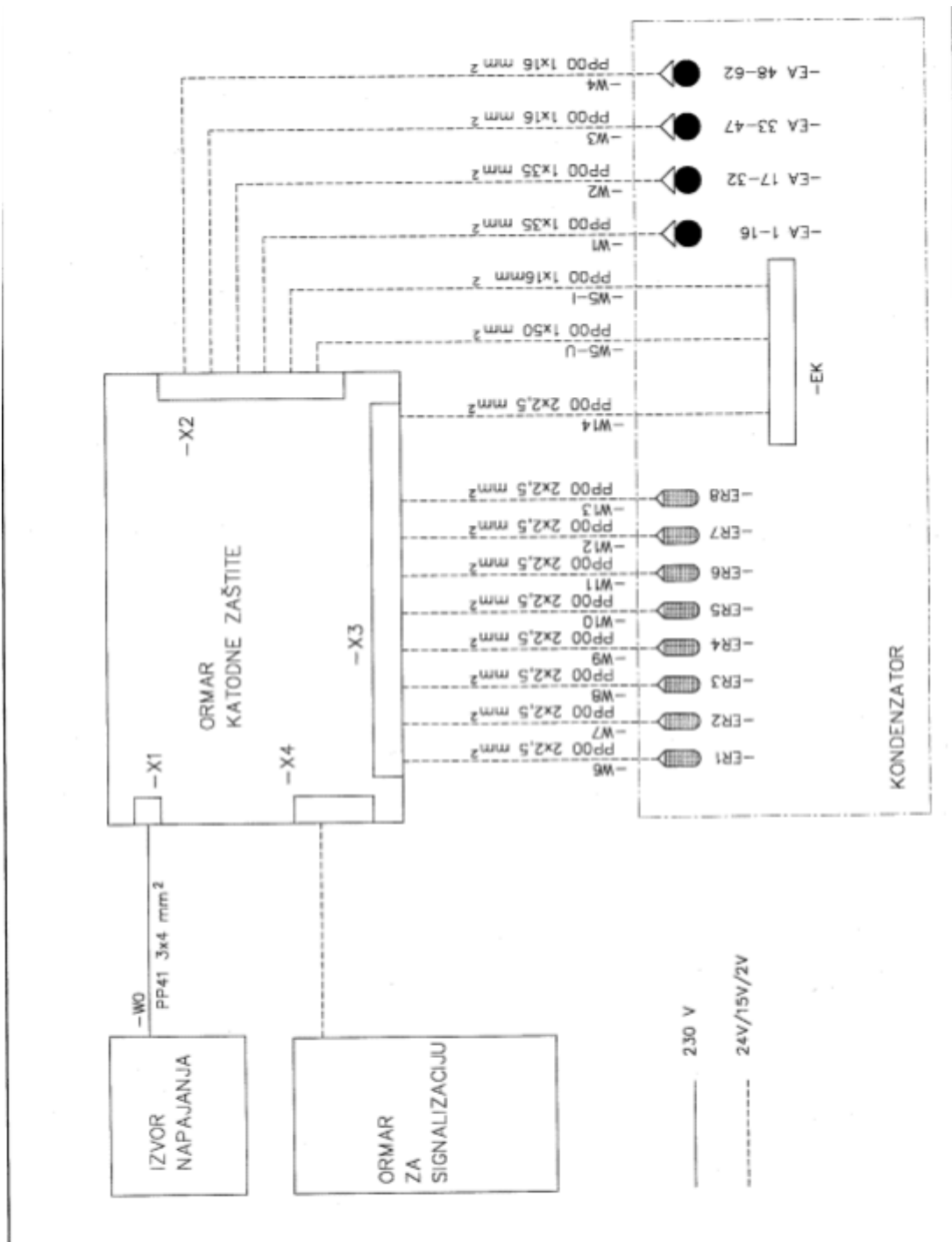


Sl. 1



Sl. 2

Prilog 3: Shema kabliranja katodne zaštite



KZ-PROJEKT d.o.o. Zagreb Projektiranje i izvođenje katodne zaštite 10000 Zagreb, Vladimira Nazora 3		sadržaj HEMA KABLIRANJA	
izradio BERISLAV PAPIĆ el.teh.		crtež <i>[Signature]</i>	datum 06.2001.
projektant DARKO STIPETIĆ dipl.inq.stroj.			