

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET – BEOGRAD

*Zoran M. NIKOLIĆ*

**METOD ZA ODREĐIVANJE EFIKASNOSTI  
SISTEMA AKTIVNE KATODNE ZAŠTITE  
PLOVNIH OBJEKATA OD KOROZIJE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Beograd, 1995

University of Belgrade  
Faculty of Mechanical Engineering – Belgrade

*Zoran M. NIKOLIĆ*

**THE METHOD FOR DETERMINING THE  
EFFICIENCY OF THE IMPRESSED CURRENT  
SYSTEM OF CATHODIC PROTECTION OF THE  
VESSELS FROM THE CORROSION**

DOCTORAL DISSERTATION

Belgrade, 1995

PA 15554

ANALIZA IZ OBLASTI INŽENJERSTVA  
MATEMATIKA I  
1995

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET - BEOGRAD

Zoran M. NIKOLIĆ

METOD ZA ODREĐIVANJE EFIKASNOSTI SISTEMA AKTIVNE  
KATODNE ZAŠTITE PLOVNIH OBJEKATA OD KOROZIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Beograd, jun 1995

PROJEKT ZA ODRŽIVANJE SPONKOSNI SISTEMA AKTIVNI  
KADROVI, DOKTORI PUNIH IZOBILJE IZ FIZIKE

Mentor:

Prof.dr. Branislav BILEN  
Mašinski fakultet - Beograd

članovi komisije:

Prof.dr. Božidar ANIČIN  
Mašinski fakultet - Beograd

Prof.dr. Petar MILJANIĆ - Akademik  
Mašinski fakultet - Beograd

Prof.dr. Nedeljko KRSTAJIĆ  
Tehnološko-metalurški fakultet - Beograd





## METOD ZA ODREĐIVANJE EFIKASNOSTI SISTEMA AKTIVNE KATODNE ZAŠTITE FLOVNIH OBJEKATA OD KOROZIJE

### APSTRAKT:

Korozija podvodnog dela trupa broda je jedan od izuzetno važnih problema u brodogradnji. Pored osnovnog načina zaštite dobijenog organskim premazima, postoji tendencija primene aktivne katodne zaštite pomoću spoljašnjeg izvora jednosmerne struje. Time se obezbeđuje znatno veći stepen zaštite čelika od korozije.

U radu su navedeni faktori koji utiču na koroziju kao i njihovo međusobno dejstvo. Predstavljena je električne shema dvojnog električnog sloja i polarizacionih krivih, pri koroziji metala u morskoj i rečnoj vodi. Izvršeno je matematičko modelovanje anode, čelika koji se štiti, kao i sredine u kojoj se obavlja korozija.

Prikazani su rezultati merenja oštećenja na brodu usled korozije a koji je proveo preko 20 godina u eksploataciji. Dati su osnovni podaci o sistemu aktivne katodne zaštite.

Data su analitička rešenja nekih dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih rešenja za idealizovane slučajeve. Prikazan je numerički metod za rešavanje eliptičkih parcijalnih diferencijalnih jednačina koji se koristi za računanje potencijalnog polja oko trupa broda, kao i numerički dobijeni rezultati raspodele potencijala na trupu broda sa jednom, ili obe elektrode.

Navedeni su rezultati merenja zaštitnog potencijala na brodu dizalici koji se nalazi u bazenu brodogradilišta "Beograd". Prikazani su rezultati merenja prirodnog potencijala korozije, brzine porasta kao i pada zaštitnog potencijala. Na kraju je data mreža mernih tačaka sa izmerenim potencijalom trupa broda u ustaljenom stanju. Izvršeno je poređenje numeričkih i



analitičkih rešenja sa eksperimentalno dobijenim podacima.

Istaknut je praktičan značaj primene rezultata istraživanja datih u ovoj disertaciji. Posebno treba istaći činjenicu da je eksperiment izveden na realnom objektu i da su pri tome rešeni gotovo svi praktični problemi prilikom ugradnje i primene ovog sistema zaštite od korozije. Treba istaći anode i okoloanodne ekrane, referentne elektrode, ispravljače za ovu namenu, kablovske prolaze i drugo. Na osnovu ovog rada stvorena je podloga da se ovaj sistem može ugrađivati na realnim objektima i praktično koristiti.

**KLJUČNE REČI:** Katodna zaštita, faktori korozije, sistem aktivne katodne zaštite, zaštita u rečnoj vodi, zaštita u morskoj vodi, merenje potencijala broda, raspodela potencijala, numerički proračun, kriterijum zaštite.

THE METHOD FOR DETERMINING THE EFFICIENCY OF THE IMPRESSED  
CURRENT SYSTEM OF CATHODIC PROTECTION OF  
THE VESSELS FROM THE CORROSION

ABSTRACT:

The corrosion of the underwater part of the ship hull is one of the very important problems in shipbuilding. Beside the elementary way of protection, made by the organic paint, there is a tendency of applying the impressed current system (active cathodic protection) with help of exterior source of the direct current. There is a way to achieve the higher degree of protecting the steel from the corrosion.

The factors that have an influence to the corrosion and their mutual action are presented in this paper. It is also presented an electric scheme of double electric layer an polar curve, by corrosion of the metal in sea and river water. It is made the mathematic model of the anode, the protecting steel and of the water.

This paper includes also, the results of measuring the damages on the ship, which is more than 20 years in exploitation, caused by the corrosion. There are also given the elementary data about the impressed current system of cathodic protection.

The analytical solutions of some two dimensional or three dimensional solutions for ideal cases are also presented. It is shown the numerical method for elliptical partial differential equations, which serves for calculating the potential field around the ship hull. The numerically received results of the potential distribution on the ship hull with one or both electrodes is also given.

There are quoted also the results of measuring the protecting potential on

the ship, located in the Shipyard "Beograd". The results of measuring the natural potential of the corrosion, the changing of the protecting potential are presented. It is shown the screen of the measuring potential of the ship hull in steady condition. The numerical and analytical solutions with experimentally received data are compared.

It is emphasized the practical importance of the use of researching results, that are presented in this dissertation. The experiment is done on the real object and that way, almost all practical problems about the application of this system are solved.. There are anodes, dielectric shield, reference electrode, rectifier for this use, cable coffer dam, etc. This paper shows that, based on the facts that are presented, this system could be built-in on the real objects and it could be practically used.

KEY WORDS: Cathodic protection, factors of corrosion, impressed current system, river water protection, sea water protection, measuring the potential of the ship, potential distribution, numerically calculation, criteria for protection.

## **PREDGOVOR:**

Ova teza prizašla je iz višegodišnjeg rada na problemima zaštite brodova od korozije obrađivanih u okviru Instituta tehničkih nauka srpske akademije nauka i umetnosti u Beogradu, a pod naučnim nadzorom i rukovodstvom prof.dr. Branislava Bilena. Za dugogodišnju sveobuhvatnu pomoć koju mi je pružio u celom naučnom i stručnom razvoju na polju brodogradnje, izražavam mu iskrenu zahvalnost.

Dopisnom članu Srpske akademije nauka i umetnosti prof. Panteliji Nikoliću dugujem zahvalnost za korisnim savetima kod pregleda ovog rada u završnoj fazi.

Profesoru Zlatku Petroviću, izražavam duboku zahvalnost za veliku pomoć koju mi je pružio u delu numeričkog računanja potencijalnog polja oko trupa broda.

Prijatna mi je dužnost da zahvalim profesoru Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu Nedeljku Krstajiću, za korisne sugestije koje su mi mnogo pomogle kod sagledavanja problema razmatranih ovom doktorskom disertacijom, i na pomoći u završnoj fazi izrade ove teze.

Profesoru Centra za multidisciplinarne studije u Beogradu, Vladimiru Joviću zahvaljujem na pomoći u razumevanju problema kao i na korisnim savetima datim u toku pisanja ove doktorske disertacije.

Saradnicima Instituta tehničkih nauka dugujem zahvalnost radi tehničke pomoći oko obrade ovog rada.

Rad na projektu "Razvoj novih metoda proračuna broda" finansiranom od Ministarstva za nauku i tehnologiju, omogućio je dobijanje rezultata koji su izneti u okviru ove doktorske disertacije. Zahvaljujući delimičnoj finansijskoj pomoći izvršena je i završna obrada ove disertacije pa

Ministarstvu ovim putem izražavam veliku duboku zahvalnost.

Za izuzetnu pomoć kod merenja potencijala trupa broda dizalice koji se nalazi u bazenu brodogradilišta Beograd, a u pogledu ekipe ronioca koji su obavili ova merenja, veliku zahvalnost izražavam Mornaričko tehničkoj upravi Vojske Jugoslavije i generalu Novici Đorđeviću.

Posebno poštovanje i zahvalnost za izradu ove doktorske disertacije izražavam ovim putem akademiku Petru Miljaniću. Njemu pripada duboka zahvalnost za moju orijentaciju ka ovoj vrsti posla kao i za celokupnu podršku za moju posvećenost nauci od završetka fakulteteta do danas.

Posebna zahvalnost za izradu ove disertacije pripada mojim najbližim, Nikolićima, za neprekidan podsticaj i podršku u svakom pogledu tokom svih ovih godina.

1.01. Uvod	10
1.02. Metodološki pristup	15
1.03. Osnovni pojmovi	20
1.04. Osnovni pojmovi	25
1.05. Osnovni pojmovi	30
1.06. Osnovni pojmovi	35
1.07. Osnovni pojmovi	40
1.08. Osnovni pojmovi	45
1.09. Osnovni pojmovi	50
1.10. Osnovni pojmovi	55

2.01. Osnovni pojmovi	60
2.02. Osnovni pojmovi	65
2.03. Osnovni pojmovi	70
2.04. Osnovni pojmovi	75
2.05. Osnovni pojmovi	80
2.06. Osnovni pojmovi	85
2.07. Osnovni pojmovi	90
2.08. Osnovni pojmovi	95
2.09. Osnovni pojmovi	100
2.10. Osnovni pojmovi	105
2.11. Osnovni pojmovi	110

3.01. Osnovni pojmovi	115
-----------------------	-----



## SADRŽAJ

*Spisak slika*

*Spisak tabela*

<b>01.</b>	<b>UVOD</b>	<b>01</b>
1.01.	Osnovi elektrohemijske korozije i zaštite	02
1.02.	Faktori koji utiču na koroziju	04
1.03.	pH vrednost	04
1.04.	Električna provodnost	06
1.05.	Oksidacioni agensi	07
1.06.	Zaštitni filmovi	08
1.07.	Temperatura	08
1.08.	Brzina kretanja	08
1.09.	Hetrogenost metala	09
1.10.	Ostali faktori	10
<b>02.</b>	<b>MEHANIZAM KONTAKTNE KOROZIJE I OSOBENOSTI ZAŠTITE U REČNOJ I MORSKOJ VODI</b>	<b>11</b>
2.01.	Uvod	11
2.02.	Kontaktna korozija	12
2.03.	Mehanizam kontaktne korozije	14
2.04.	Polarizacione krive	17
2.05.	Postavka zadatka proračuna kontaktne korozije	20
2.06.	Električna shema dvojnog električnog sloja	22
2.07.	Granični uslovi	23
2.08.	Linearna aproksimacija polarizacionih krivih	25
2.09.	Pasivna zaštita metalne površine	28
2.10.	Višeelektrodni sistemi	29
2.11.	Normalizovane jednačine	34
<b>03.</b>	<b>PROBLEM RASPODELE POTENCIJALA I GUSTINE STRUJE</b>	<b>37</b>
3.01.	Postupak za određivanje komponenata sistema	37

3.02.	Matematičko modelovanje	38
3.03.	Numeričko rešavanje Laplasove jednačine	40
3.04.	Elektrohemijski potencijali metala	41
3.05.	Polarizacija anoda	42
3.06.	Polarizacija čelika kao katode	43
3.07.	Modeli za formiranje opne	44
3.08.	Specifični površinski otpor	47
<b>04.</b>	<b>OSNOVNA PRAVILA AKTIVNE KATODNE ZAŠTITE</b>	<b>49</b>
4.01.	Višegodišnji rezultati nagrizanje trupa broda usled korozije	49
4.02.	Stanice katodne zaštite ( Uređaji za napajanje )	52
4.03.	Stanice katodne zaštite malih snaga	52
4.04.	Stanice katodne zaštite srednjih snaga	54
4.05.	Stanice katodne zaštite velikih snaga	55
4.06.	Talasnost izlaznog napona iz ispravljača	55
4.07.	Potrošnja anoda	57
4.08.	Kompjuterski program za analizu strategije održavanja propelera i trupa	58
4.09.	Značaj sistema katodne zaštite	59
<b>05.</b>	<b>DVODIMENZIONALNI I TRODIMENZIONALNI PROBLEMI KOJI SE MOGU ANALITIČKI REŠITI</b>	<b>62</b>
5.01.	Elektrohemijski model AKZ sistema	62
5.02.	Raspodela potencijala između tanke žice zanemarljive debljine i tačke koja stvara to naelektrisanje	64
5.03.	Sferična anoda udaljena od ravne ploče	65
5.04.	Poluloptasta anoda na ravnoj ploči	66
5.05.	Pravougaona ravna elektroda (pločasta elektroda)	67
5.06.	Vertikalna elektroda u obliku štapa	68
5.07.	Horizontalna elektroda u obliku štapa	69
5.08.	Britanski standardi	70
5.09.	Ruski proračuni	72
<b>06.</b>	<b>NUMERIČKI REZULTATI</b>	<b>78</b>
6.01.	Uvod	78
6.02.	Rešavanje dvodimenzionalnih polja	79
6.03.	Računanje trodimenzionalnog Laplasovog polja	82
6.04.	Nepravilna oblast	83



6.05.	Granični uslovi	86
6.06.	Iterativni metod za Laplasovu jednačinu	87
6.06.	Program za računar	88
6.07.	Raspodela potencijala sa jednom uključenom elektrodom	94
6.08.	Raspodela potencijala sa obe uključene elektrode	97
<b>07.</b>	<b>EKSPERIMENT NA REALNOM SISTEMU ZAŠTIĆENOM OD KOROZIJE</b>	<b>99</b>
7.01.	Osnovni podaci relevantni za realizaciju aktivne katodne zaštite	99
7.02.	Merna elektroda i oprema	102
7.03.	Postavljanje anoda ispod broda	104
7.04.	Merenje prirodnog potencijala korozije	105
7.05.	Merenje brzine porasta potencijala	106
7.06.	Merenje brzine opadanja potencijala	107
7.07.	Merenje potencijala trupa broda u ustaljenom stanju	109
<b>08.</b>	<b>RAZMATRANJE REZULTATA</b>	
8.01.	Prirodni potencijal korozije brodskog trupa	112
8.02.	Brzina uspostavljanja zaštitnog potencijala	114
8.03.	Potencijal trupa broda u ustaljenom stanju	117
8.04.	Zaštitna gustine struje	118
8.05.	Analitička rešenja	122
8.06.	Dvajtova formula	123
8.07.	Elektroda u obliku diska	123
8.08.	Elektroda kao ploča	125
8.09.	Ruski proračuni	126
8.10.	Raspodela potencijala računata ruskim proračunom	127
8.11.	Raspodela potencijala dobijena numerički	128
8.12.	Upoređenje metoda za raspodelu potencijala	128
8.13.	Potrebna snaga za aktivnu zaštitu	130
8.14.	Uporedni podaci o zaštitama u rečnoj i morskoj vodi	131
8.15.	Efikasnost zaštite od korozije	132
<b>09.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b>	<b>134</b>
<b>10.</b>	<b>LITERATURA</b>	<b>137</b>

## SPISAK SLIKA

Slika broj		Strana broj
01.01.	Princip korozije metala u vodi	02
01.02.	Uticaj pH na brzinu korozije gvožđa u vodenim rastvorima	05
01.03.	Dijagram pH - potencijal za gvožđe. Prikazane su oblasti korozije, pasivizacije i imuniteta	06
01.04.	Uticaj brzine na koroziju cevi u vodi koja sadrži kiseonik	09
02.01.	Uopštena shema podvodnog kontakta različitih metala na unutrašnjem i spoljnom delu plovnog objekta	13
02.02.	Tipični primeri korozivnih oštećenja gvožđa pri njegovom kontaktu sa bakrom u lošoj provodnoj sredini a) i dobro provodnoj sredini b)	15
02.03.	Tipične polarizacione krive pri koroziji metala u morskoj vodi	17
02.04.	Ekvivalentna shema dvojnog sloja na granici metala sa elektrolitom	22
02.05.	Shema grafičkog određavanja maksimalne katodne gustine struje pri dodiru raznorodnih metala	24
02.06.	Parcijalno -linearna aproksimacija katodne polarizacione krive	26
02.07.	Polarna aproksimacija anodne i katodne polarizacione krive	27
02.08.	Vizelektrodni sistem	30
03.01.	Polarizaciona kriva anode od Ti - Pt	42
03.02.	Polarizacione krive za opnaste površine (opne formirane pri 1 A/m a = 70h b = 140h c = 210h d = 280h	45

04.01.	Generalni plan remorkera	50
04.02.	Stanice katodne zaštite male snage a) Otpornička regulacija b) Naponski i strujni regulatori c) Čoperski regulatori	53
04.03.	Stanice katodne zaštite srednjih snaga a) Monofazni grecov spoj b) Jednofazni polutalasni ispravljač c) Visokofrekventni AC/DC pretvarač	54
04.04.	Stanice katodne zaštite velikih snaga a) Trofazna zvezda b) Trofazni grecov spoj	55
04.05.	Prosečna hrapavost trupa broda a) i potrebna cena vozarine b) u funkciji vremena između dokovanja za nosač rasutog tereta	59
05.01.	Elektrohemijski model sistema aktivne katodne zaštite	61
05.02.	Žica zanemarljive debljine i tačka koja stvara to naelektrisanje	64
05.03.	Ploča naelektrisana sferičnom anodom	65
05.04.	Ploča naelektrisana poluloptastom anodom	66
05.05.	Vertikalno postavljena elektroda	68
05.06.	Horizontalna elektroda u obliku štapa	70
05.07.	Vrednost koeficijenta $k(D)$ zbog proračuna raspodele potencijala pri elektrohemijskoj zaštiti brodova	73
05.08.	Korekcionni koeficijenti za proračun potencijala protektora	76
05.09.	Zavisnost broja anoda od odnosa $L / a_2$	77
06.01.	Dvodimenzionalna mreža tačaka sa jednakim razmacima	80
06.02.	Dvodimenzionalna raspodela potencijala	82
06.03.	Funkcija aproksimirana parabolom sa nejednako razmaknutim tačkama	84
06.04.	Granični uslovi na četvrtini posmatranog domena	87
06.05.	Raspodela prenapetosti (mV) po trupu broda sa priključenom krmenom elektrodom na stanicu katodne zaštite i sa izlaznom strujom od $70 \text{ mA/m}^2$	95
06.06.	Raspodela prenapetosti (mV) po trupu broda sa priključenom pramčanom elektrodom na stanicu katodne zaštite i sa izlaznom strujom od $70 \text{ mA/m}^2$	96
06.07.	Raspodela prenapetosti (mV) po trupu broda sa obe priključene elektrode na stanicu katodne zaštite i sa izlaznim strujama iz svake elektrode od $70 \text{ mA/m}^2$	98

07.01.	Generalni plan broda dizalice	100
07.02.	Merna elektroda sa nastavkom za merenje potencijala ispod trupa broda	102
07.03.	Radna elektroda i okoloanodni ekran	104
07.04.	Položaj anoda u odnosu na trup broda	105
07.05.	Merne tačke na trupu broda	109

08.01.	Elektromotorne sile u kolu merenja potencijala trupa broda	112
08.02.	Brzina uspostavljanja zaštitnog potencijala za izlazni napon iz SKZ od 8,6 V.	113
08.03.	Brzina uspostavljanja zaštitnog potencijala za izlazni napon iz SKZ od 17 V.	114
08.04.	Ekvivalentna električna shema aktivne katodne zaštite	115
08.05.	Raspodela potencijala ispod trupa broda	119

## SPISAK TABELA

Tabela broj	Strana broj
01.01. Elektroprovodnost morske vode ( $10^{-3} * S m^{-1}$ ) u funkciji saliniteta i temperature	07
02.01. Elektrohemijski ekvivalentni nekih metala značajnih za brodogradnju	15
02.02. Izrazi za koeficijente a u drugim koordinatnim sistemima	22
02.03. Dozvoljene maksimalne katodne gustine struje za nekoliko pari metala u morskoj vodi	25
03.01. Standardni elektrohemijski potencijali na 25 <sup>o</sup> C	41
03.02. Orientacione vrednosti specifične površine otpora premaza ( $Oh m^2$ )	47
04.01. Debljina limova oplata broda	50
04.02. Debljine limova na sapnici	51
04.03. Debljine limova u bunarima	51
04.04. Karakteristike diodnih ispravljača	56
04.05. Potrošnja platiniziranih titanskih anoda u morskoj vodi saliniteta 3,5 % i temperature 20 <sup>o</sup> C	57
04.06. Dozvoljeno procentualno smanjenje debljine čelika kod sistema sa kontrolisanom korozijom	60
05.01. Odnosi prenapetosti i gustina struja na oplati trupa	63
07.01. Neki podaci za vodu reke Save a koji utiču na koroziju	101
07.02. Prirodni potencijal korozije trupa broda	106
07.03. Brzina porasta potencijala sa normalnim izlaznim naponom	106
07.04. Brzina porasta potencijala sa normalnim naponom	107

07.05.	Brzina porasta potencijala sa povišenim naponom	107
07.06.	Brzina opadanja potencijala trupa broda sa isključenom jednom elektrodom	108
07.07.	Brzina opadanja potencijala sa isključenim elektrodama	108
07.08.	Merenje potencijala trupa broda	110
08.01.	Gustine struje ispod trupa broda	120
08.02.	Raspodela potencijala sa elektrodama u obliku diska	124
08.03.	Raspodela potencijala sa elektrodama u obliku ploče	125
08.04.	Raspodela potencijala ruskom metodom	127
08.05.	Poređenje raspodele potencijala	129



## 01. UVOD

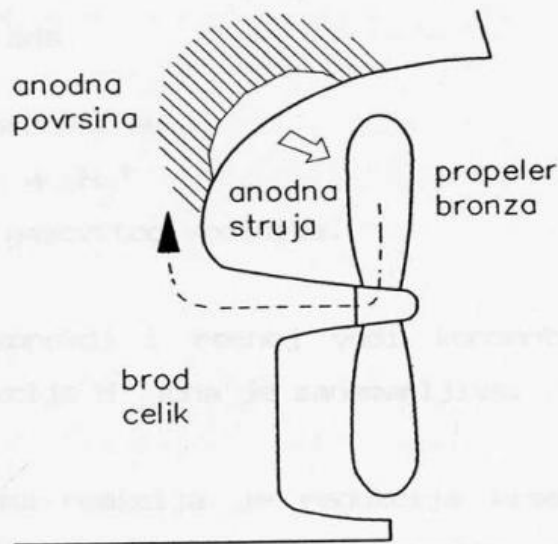
Sama reč korozija označava razaranje metala i legura pod dejstvom elektrohemijske reakcije sa okolinom. Korozija je verovatno najveći prirodni neprijatelj tehnike koji se pojavljuje spontano i to svuda u prirodi. Mnogi uređaji i naprave imaju u velikoj meri vek trajanja smanjen zbog efekata korozije koji se tokom vremena javljaju. Mada se korozija bavi proučavanjem razaranja metala, nemetala i organskih materija, u ovom radu ograničićemo se na razaranje metala pod elektrohemijskim delovanjem vodene sredine.

Da bi se javila korozija, uvek mora postojati tri činioca. Materijal izložen koroziji zove se objekat korozije. Sredina u kojoj se korozija odigrava naziva se koroziona sredina. Najzad, u toj sredini nalaze se neka hemijska supstanca koja direktno učestvuje u koroziji i tu supstancu nazivamo agens korozije.

Korozija se može javiti u mnogim oblicima. Kada se govori o vrstama korozije, klasifikacije i podele pravimo na bazi razlikovanja raznih vrsta učestvovanja tih učesnika. U vezi sa objektom korozije, govori se o koroziji metala, betona, drveta, a kada se govori o stanju u procesu korozije na tom objektu, govorimo o raznim vrstama korozionih oštećenja, pa govorimo o ravnomernoj ili neravnomernoj koroziji. Korozivne procese možemo da podelimo i po korozionim sredinama, pa razlikujemo atmosfersku koroziju, tj. koroziju konstrukcionih materijala u atmosferi, podzemnu koroziju ili koroziju pod uticajem vode. Zavisno od agensa korozije u prirodnim uslovima, može biti kiseonik ako se govori o kiseoničkoj koroziji, odnosno vodonični joni ako korozija teče uz izdvajanje vodonika i ako se govori o vodoničnoj koroziji.

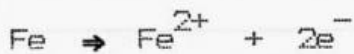
## 1.01. OSNOVI ELEKTROHEMIJSKE KOROZIJE I ZAŠTITE

Kao što je pomenuto, korozija je spontano razaranje materijala pri uzajamnom delovanju tog materijala sa okolinom. U brodogradnji je izuzetno prisutan, a neželjan proces koji se naročito javlja između dve vrste metala zbog postojanja različitih galvanskih spregova tih metala u kontaktu sa vodom.

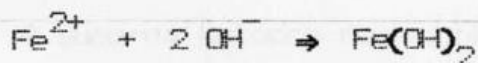


Slika 01.01. Princip korozije metala u vodi

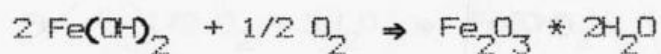
Primarni anodni proces koji se dešava na čeličnoj oplati trupa je anodno rastvaranje ili jonizacija gvožđa, uz izdvajanje elektrona.



Sekundarni proces na anodi je reakcija jona gvožđa i hidroksilnih jona iz vode:



Hidroksid dvovalentnog gvožđa se dalje oksidiše kiseonikom rastvorenim u vodi do hidratisanog oksida trovalentnog gvožđa:



što predstavlja smeđu rđu.

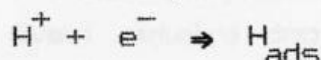
Konačan produkt anodnog rastvaranja gvožđa je nerastvorni hidroksidni oksid



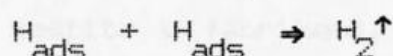
trovalentnog gvožđa koji se taloži na površini metala koji podleže koroziji. Elektroni se kreću kroz gvožđe od anodnog dela ( dela sa negativnijim potencijalom ) ka katodnom delu. S obzirom da sa anode odlaze elektroni, to će se oko čelika formirati sloj sa elektronima, tako da će potencijal čelika trupa u odnosu na referentnu tačku u beskonačnosti biti negativan.

Na katodnom delu se odigravaju sledeći procesi:

Primarni proces je redukcija jona vodonika



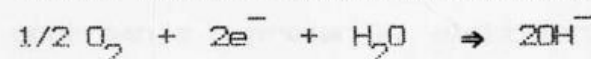
a sekundarni procesi su



tj. stvaranje gasovitog vodonika.

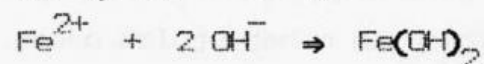
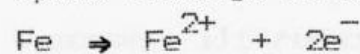
Pošto je u morskoj i rečnoj vodi koncentracija jona  $\text{H}^+$  mala, katodna reakcija redukcije  $\text{H}^+$  jona je zanemarljiva.

Osnovna katodna reakcija je redukcija kiseonika. Morska voda sadrži visoku koncentraciju rastvorenog kiseonika, pa je sledeća reakcija

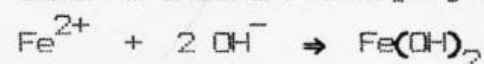


dominantna reakcija na katodi lokalnog galvanskog elementa.

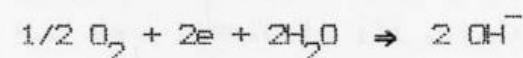
Opšta reakcija korozije može se predstaviti jednačinom:



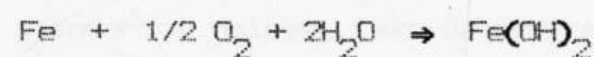
Sumarna anodna reakcija je:



A sumarna katodna reakcija je:



Tako da je ukupna sumarna reakcija:



Osnovni vid zaštite od korozije je zaštita premazima bojom. Savremeni vid zaštite koristi katodnu zaštitu čelika, protektorsku (žrtvujuću) ili aktivnu

katodnu zaštitu.

Aktivna katodna zaštita sastoji se od anoda koje su uronjene u vodu i na koje se priključuje jednosmeran napon što uzrokuje proticanju struje ka čeliku, snižavanje njegovog potencijala a time i zaštitu od korozije.

### 1.02. FAKTORI KOJI UTIČU NA KOROZIJU

Svaki metalni deo mora biti zaštićen pasivnom zaštitom, znači premazima ili izolacionim slojevima potrebne debljine. Ova zaštita je u nekom pogledu defektna i podložna promenama u funkciji vremena. Bilo u procesu stvaranja zaštite u fabrikama, u periodu gradnje broda u brodogradilištu ili usled starenja tog pasivnog izolacionog sloja kada se na njemu javljaju prskotine, pore ili opne.

Postoji dve grupe faktora koji utiču na brzinu korozije čelika u vodi. To su unutrašnji koji zavise od materijala koji korozira (objekta korozije), i spoljni koji zavise od vode i atmosfere (korozione sredine). Unutrašnji faktori su: elektrodni potencijal metala u vodi, heterogenost materijala, unutrašnja naprezanja, električna otpornost metala. Spoljašnji faktori su: prvenstveno pH vrednost, električna provodnost vode, oksidacioni agensi, a zatim i razni eksploatacioni faktori kao što su: zaštitni filmovi, temperatura, brzina kretanja i heterogenost u vodi.

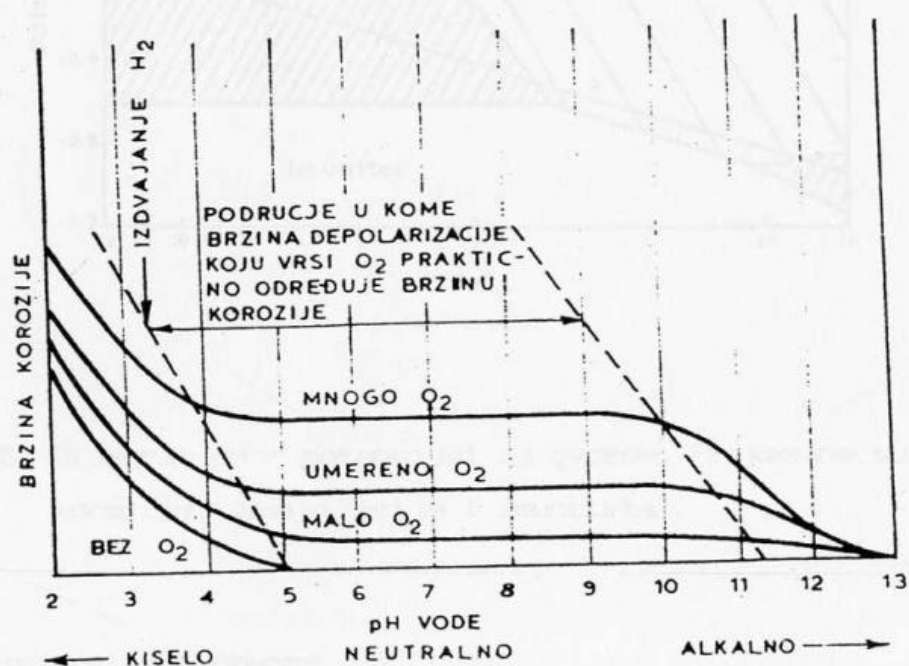
U morskoj ili rečnoj vodi se praktično nalazi uvek više ovih faktora koji često deluju jedan na drugi u smislu povećanja ukupne brzine korozije. Stoga je izuzetno važno da se prouči svaki faktor kao i njihovo međusobno dejstvo.

### 1.03. pH VREDNOST

Kao mera kiselosti ili alkalnosti rastvora uvodi se pojam pH vrednosti, tako da je pH eksponent negativnog logaritma koncentracije vodonikovih jona. Čista voda ima koncentraciju vodonikovih jona jednaku  $10^{-7}$  mola/dm<sup>3</sup> za standardne uslove, tako da ima pH vrednost 7.

Vodeni tokovi mogu imati različite vrednosti pH vrednosti, a u funkciji toga da li je voda u manjoj ili većoj meri kisela, neutralna ili alkalna.

U pretežno kiseloj sredini pri koroziji dolazi do izdvajanja vodonika koji u velikoj meri sprečava stvaranje zaštitnih filmova od produkata korozije. U neutralnoj vodi gvožđe je slabo otporno na koroziju samo u prisustvu velike koncentracije kiseonika. No ako ne dolazi do velike izmene kiseonika stvaraju se zaštitni filmovi koji u velikoj meri mogu smanjiti dalje napredovanje korozije. Pretežno alkalna voda ima slabo koroziono dejstvo na gvožđe zbog stvaranja zaštitnih filmova od produkata korozije. Koncentracija rastvorenog kiseonika ima znatno manje dejstvo na brzinu korozije nego u neutralnim rastvorima. Ovo dejstvo opada naglo iznad pH vrednosti između devet i deset.



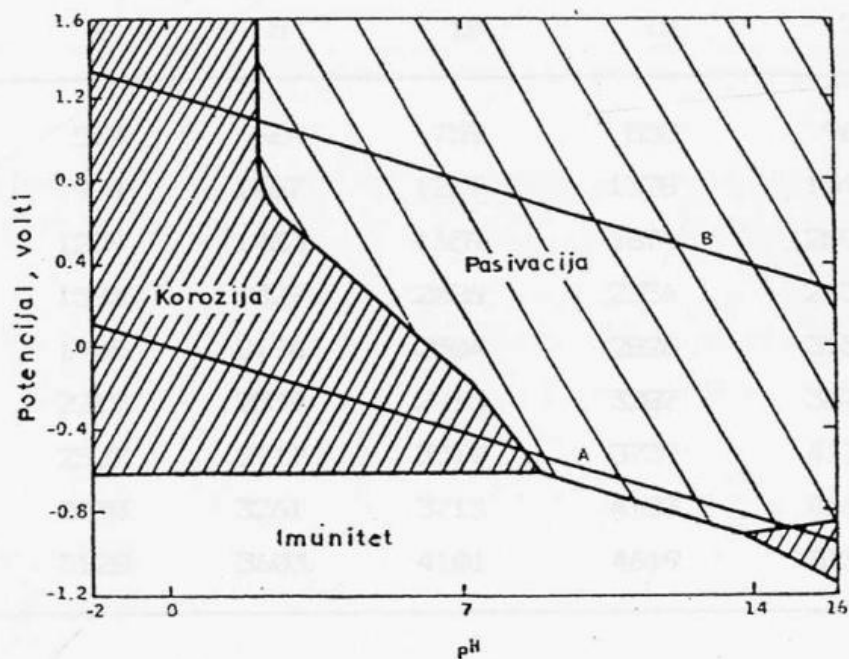
Slika 01.02. Uticaj pH na brzinu korozije gvožđa u vodenim rastvorima

S obzirom da vodonikovi joni učestvuju u mnogim korozionim reakcijama, logično je da su kiseli rastvori korozivniji od alkalnih rastvora. Kod običnog čelika ili gvožđa približna granica između brze i umerenije korozije nalazi se oko vrednosti pH 4,5 (slika 01.02).

Uticaj pH vrednosti na prirodu korozionih reakcija može se prikazati pomoću potencijal - pH <sup>[40]</sup> dijagrama (slika 01.03.).

Na otvorenom moru povećana koncentracija jakih bazičnih jona utiče tako na pH vrednost da je čini pomalo alkalnom (pH ima vrednosti u intervalu 7,3 -

8,6 ).Osobine i karakteristike rečne i jezerske vode menjaju se u znatno širem dijapazonu vrednosti u funkciji zemljišta, pritoka, otpadnih voda i dr. tako da pH ima vrednosti u opsegu 6 - 9.



Slika 01.03. Dijagram pH - potencijal za gvožđe. Prikazane su oblasti korozije, pasivizacije i imuniteta

#### 1.04. ELEKTRIČNA PROVDNOST

Voda na otvorenom moru sadrži oko 3,4 težinskih % soli i usled toga ona je odličan elektrolit tako da može da izazove veliku galvansku koroziju. U tabeli 01.01 prikazani su podaci o elektroprovodnosti morske vode u funkciji saliniteta i temperature <sup>[27]</sup> kao glavnih faktora. Podaci su prosečni i to za otvorena mora, a za zatvorena se malo razlikuju.

Električna provodnost rečne i jezerske vode varira u znatno širim granicama od električne provodnosti morske vode što je uslovljeno nizom promenljivih faktora i u principu je za dva reda veličine niža od električne provodnosti morske vode. Elektroprovodnost beogradskih reka stalno se meri <sup>[20]</sup> i postoje višegodišnji podaci. U temperaturnom opsegu 1 - 30°C a i u funkciji promene drugih parametara može se menjati u granicama  $30 - 40 * 10^{-3} (S m^{-1})$ .

Tabela 01.01. Elektroprovodnost morske vode ( $10^{-3} * S m^{-1}$ ) u funkciji saliniteta i temperature

Salinitet	Temperatura (°C)					
	0	5	10	15	20	25
6	574	664	759	858	961	1067
10	924	1067	1219	1378	1542	1712
14	1259	1453	1659	1874	2097	2326
18	1585	1829	2086	2356	2635	2921
22	1905	2196	2504	2826	3159	3501
26	2219	2559	2913	3287	3672	4068
30	2527	2912	3317	3739	4175	4624
34	2830	3261	3713	4183	4669	5168
38	3128	3603	4101	4619	5152	5703

#### 1.05. OKSIDACIONI AGENSI

S obzirom da je oksidacija povećanje valencije nekog elementa, logično je da prisustvo bilo kojeg oksidacionog agensa jača tendenciju metala da korodira ili se pretvara u jedinjenje koje ima pozitivnu valenciju. Najčešći oksidacioni agens je kiseonik.

Oksidacioni agensi mogu nekad i da usporavaju koroziju. Do toga može doći ako se elektrohemijski potencijal metala pomeri ka pozitivnijim vrednostima i ako dođe do pasivnosti. Površina metala prekriva se tada zaštitnim oksidima ili adsorbovanim kiseonikom. Ova osobina je manje izražena kod metala kao što je čelik i gvožđe.

Kako je koncentracija kiseonika najveća uz ili odmah ispod površine nivoa vode, normalno da je tu i korozija čelika najveća. Obavljena ispitivanja pokazala su da je najveća korozija na delu broda neposredno ispod vodene linije. [∞]





## 1.06. ZAŠTITNI FILMOVI

Kada korozija počne da deluje, njeno napredovanje često je određeno prirodom stvorenih korozivnih produkata. Pošto do korozivne reakcije dolazi na površini, filmovi od nerastvorljivih produkata korozije mogu da imaju veliki značaj za dalje napredovanje korozije.

Zaštitni filmovi mogu biti veoma tanki i često upravo oni pružaju bolju zaštitu od debelih. Debeli zaštitni filmovi su vidljivi slojevi nerastvornih produkata korozije koji mogu biti nepropusni za vodu ali i sasvim propusni tako da se korozija razvija i dalje, mada nešto smanjenim intenzitetom.

Pored filmova koji potiču od metala, postoje i filmovi od masti i ulja koji mogu zaštititi metal od neposrednog dodira sa korozivnim supstancama.

## 1.07. TEMPERATURA

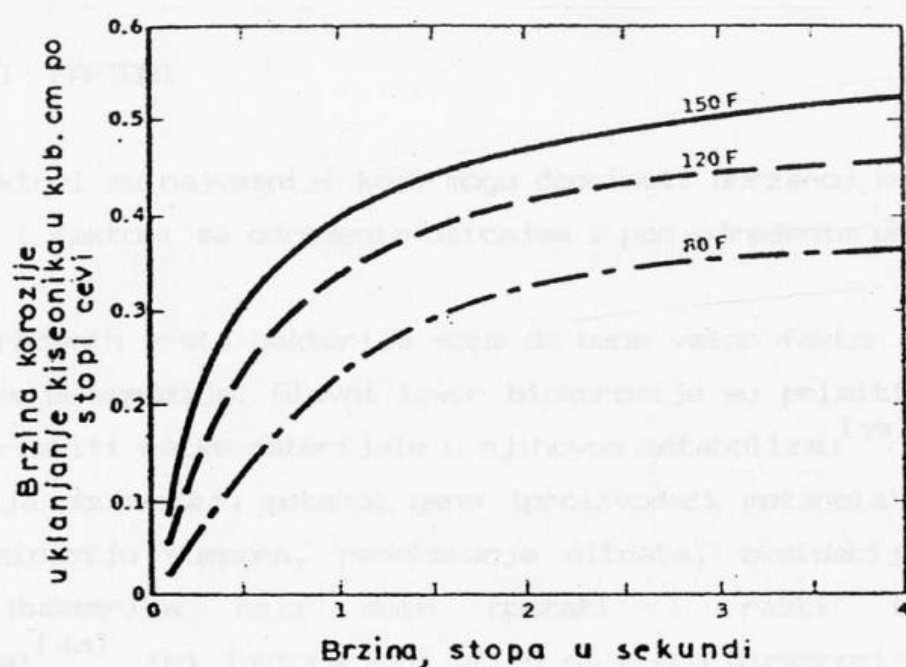
Temperatura je izuzetno važan faktor koji utiče na brzinu korozije metala [40].

Sa povećanjem temperature povećava se brzina difuzije kiseonika ali se istovremeno smanjuje rastvorljivost kiseonika u vodi. Mada pri visokim temperaturama (ispod tačke ključanja) dolazi do smanjenja korozije, pri malom povećanju temperature dolazi do povećanja korozije. Povećanje temperature utiče na disocijaciju vode a što ima za posledicu smanjenje pH vrednosti. Ovo se odražava kao pojačana aktivnost vodonikovih jona u povećanju brzine korozije. Povećanje temperature nešto utiče i na povećanje rastvorljivosti zaštitnih filmova ili predmeta korozije. Sa povećanjem temperature raste električna provodnost elektrolita (korozivne sredine) kao i do povećanja brzine jonizacije metala.

## 1.08. BRZINA KRETANJA

Povećanjem brzine kretanja korozivne sredine povećava se brzina kojom se agensi korozije dovode na površinu metala a odstranjuju produkti korozije koji bi se akumulirali i smanjivali koroziju. Na slici 01.04. prikazana je zavisnost brzine korozije cevi od brzine proticanja vode koja sadrži

kiseonik.



Slika 01.04. Uticaj brzine na koroziju cevi u vodi koja sadrži kiseonik

Najizraženije dejstvo nastaje pri velikim brzinama proticanja vode kada ono izazove lokalni napad. Pri turbulenciji dolazi do stvaranja diferencijalno aeracijskih elemenata i metalno-jonskih elemenata. Pored toga, pri velikoj brzini erozija uklanja sve zaštitne filmove. Površine koje ostaju bez zaštitnih filmova izložene su bržoj koroziji a osim toga ponašaju se kao anode u odnosu na susedne površine koje su pokrivene filmovima.

Interesantno je da promena brzine proticanja vode može imati uticaj na galvansko ponašanje kada se metali spoje u parove. To može biti uzrok povećane korozije uz propelersku osovinu kada ona ima rotaciju a istovremeno kada je brzina broda u odnosu na vodu znatna.

#### 1.09. HETEROGENOST METALA

Heterogenost metala utiče na stvaranje korozije na određenim delovima metala kao i na stvaranje površina bez korozije. To može biti dosta važno jer je tačkasta ili piting korozija često veći problem nego opšta korozija. Jedna od karakteristika korozije je njena tendencija da se lokalizuje. Postoje mnogi primeri heterogenosti korozivnih sredina (diferencijalno-aeracijskih elemenata, metalno jonskih elementima itd.), u razlici usled temperature, brzine tečnosti itd. Galvanski parovi izazivaju lokalni napad. Odvojene faze

vidljive u mikrostrukturi mnogih legura su drugi tipični primeri.

#### 1.10. OSTALI FAKTORI

Nabrojani faktori su najvažniji koji mogu doprineti ubrzanoj koroziji. Pored toga postoje i faktori sa određenim uticajem i pod određenim uslovima.

Prisustvo određenih vrsta bakterija može da bude važan faktor koji utiče na brzinu stvaranja korozije. Glavni izvor biokorozije su primitivne bakterije koje mogu koristiti retke materijale u njihovom metabolizmu<sup>[73]</sup>. Neki tipovi ovih bakterija obuhvataju metanol gene (proizvođači metanola), redukovanje sulfata, oksidaciju sumpora, redukovanje nitrata, oksidaciju mangana, i termofile (bakterija koja može opstati i rasti i na višim temperaturama)<sup>[46]</sup>. Ovi faktori koji utiču na mikro biokoroziju, u krajnjem slučaju utiču na obrastanje biljkama ili školjkama što daje nov intenzivan podstrek koroziji.

Pri višim frekvencijama zvuka i većim jačinama povećava se brzina korozije verovatno zbog lakšeg formiranja vodonikovih mehurića.

Utvrđeno je da sunčeva i ultraljubičasta svetlost mogu da povećaju brzinu korozije u vodenim rastvorima, kao i da se može stvoriti potencijalna razlika između elektroda od istog materijala a od kojih je jedna osvetljena a druga nije.



## 02. MEHANIZAM KONTAKTNE KOROZIJE I OSOBENOSTI ZAŠTITE U REČNOJ I MORSKOJ VODI

Najrasprostranjeniji vid elektrohemijske korozije je kontaktna korozija koja još prema tumačenju Ogista De La Riva<sup>[48]</sup> nastaje usled stvaranja lokalnih galvanskih spregova na metalima. Potencijalna razlika između dva metala koji se malaze u vodenoj sredini i u međusobnom kontaktu, dovodi do intenzivne korozije metala sa negativnijim potencijalom. Na taj način moguće je mehanizam kontaktne korozije objasniti pomoću obrazovanih galvanskih spregova na samoj strukturi materijala.

### 2.01. UVOD

Metali se sastoje od atoma koji su poređani u određenom geometrijskom obliku gradeći takozvanu kristalnu rešetku. Ova rešetka sastoji se od neutralnih atoma, jonizovanih atoma (pozitivnih jona) i valentnih elektrona. U rešetki metala ovi elektroni se slobodno kreću. Ova veza zove se metalna.

Atom natrijuma Na na spoljnoj ljusci ima jedan elektron a atom hlora Cl sedam. Postoji prirodna težnja atoma da obrazuju spoljašnju stabilnu ljusku. Kada se ovi atomi nadju u blizini, atom hlora prima jedan elektron, gradi stabilnu spoljašnju ljusku ili vrši redukciju. Atom natrijuma daje jedan elektron postajući pozitivan jon. Joni se međusobno privlače elektrostatičkim silama. Ova veza zove se jonska.

Po Arenijusovoj teoriji elektrolitičke disocijacije, u vodi se molekuli kiselina, baza i soli razlažu na jone. Logično je da se razlaganje vrši u obrnutom smeru od stvaranja atoma. Postoji prirodna težnja metala da iz metalne veze pređe u jonsku. U vodenim rastvorima se pozitivni joni metala



vezuju za negativne jone iz morske vode uz oslobodjenje energije hidratacije.

Pri prelazu jonizovanih ( pozitivnih ) atoma u rastvor, u metalu ostaje višak elektrona tako da je metal u celini posmatrano negativno naelektrisan. Istovremeno dajući negativne jone, rastvor postaje u celini pozitivno naelektrisan. Između negativno naelektrisanog metala i pozitivno naelektrisanog sloja u rastvoru javljaju se elektrostatičke sile tj. postoji elektrostatičko privlačenje.

## 2.02. KONTAKTNA KOROZIJA

Kontaktna korozija proističe iz dodira metala različitih elektrohemijskih potencijala koji se posmatraju u agresivnoj sredini. Osnovne osobine kontaktne korozije, u poređenju sa drugim vidovima elektrohemijske korozije metala, su oštra ili vidna razlika metalnih površina u anodnoj i katodnoj zoni pri čemu je značajna dužina tih zona i jako izražena zavisnost brzine korozionih razaranja (rastvaranja) od rastojanja posmatranog dela do granice različitih metala.

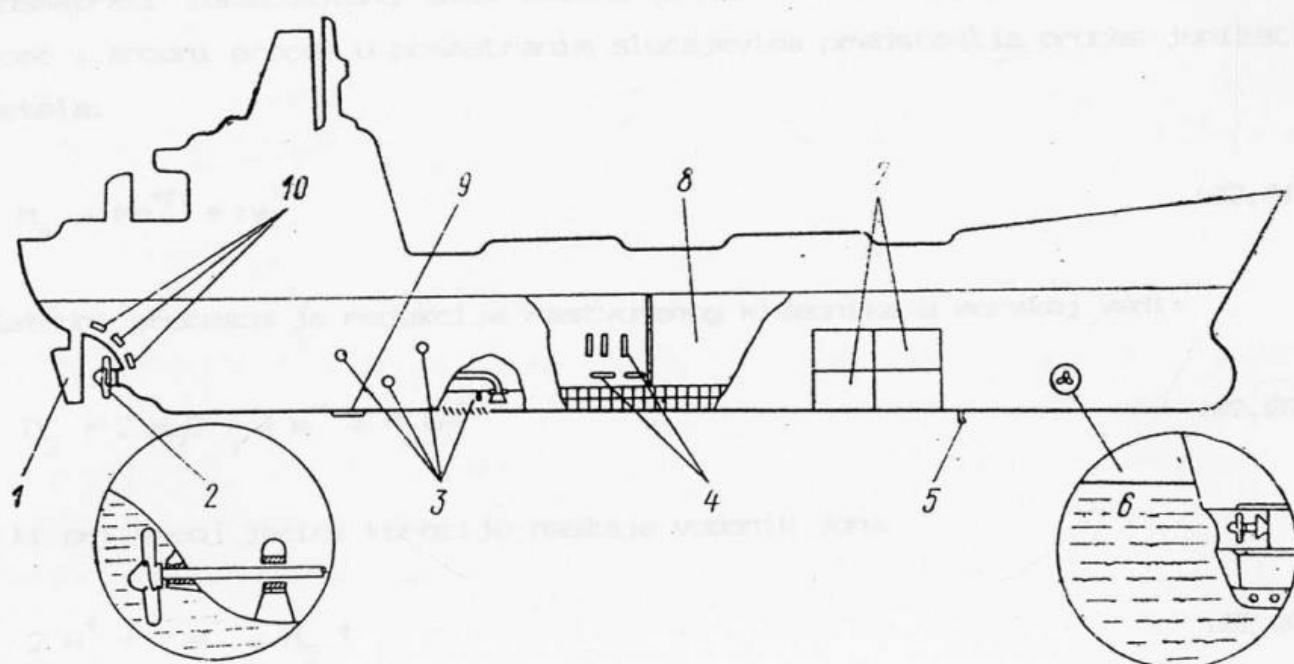
Intenzitet kontaktne korozije u različitim sredinama je različit. U morskoj sredini korozija se izuzetno jako ispoljava i ubrzava razaranja različitih metalnih delova. To se objašnjava sledećim uzrocima:

1. Proces korozije u moru teže, kako je poznato, pri malom omskom otporu jer je električna provodnost morske vode dosta visoka. Na brzinu korozije utiče rastojanja korozionog sistema sastavljenog ili napravljenog od različitih metala. Korozija ili razaranja jednog od metala iz galvanskog sprega intenzivnije u poređenju sa njegovom prirodnom korozijom.

Ako se posmatra brzina korozije ugljeničnog čelika u funkciji vremena u morskoj vodi a u kontaktu sa čelikom koji ne rđa ili niklovanim ferolegurama, može se primetiti da se povećava 3 - 4 puta, a brzina korozije sa bakrom je 2 - 3 puta veća. Analogno je posmatrana ista zavisnost za brodograđevni čelik pri njegovom kontakti sa drugim čelicima [27]. U posebnim slučajevima brzina kontaktne korozije u morskim uslovima je tako velika da je to osnovni uzrok prevremenog trošenja metalnih konstrukcija.

2. Različite konstrukcije i plovni objekti koji se koriste ili eksploatišu u

morskoj sedini, po pravilu sadrže više metala koji poseduju izrazitu razliku stacionarnih potencijala a što sa druge strane uveličava odgovarajući broj izvora kontaktne korozije. Na slici 02.01. predstavljena je uopštena shema podvodnog kontakta različitih metala na unutrašnjem i spoljnom delu plovnog objekta. Iz sheme se vidi da je osnovni izvor kontaktne korozije deo koji pripada krmu broda, mesta gde se nalaze različiti duboki usisi, delovi koji su obično ispunjeni iz obojenih ferolegura, zone dodira obloženih raznovrsnih delova a takođe i drugi različiti metali.



Slika 02.01. Uopštena shema podvodnog kontakta različitih metala na unutrašnjem i spoljnom delu plovnog objekta 1. konstruktivni element upravljanja (kormilo) 2. pogonski propeler 3. duboki usis 4. protektori za zaštitu tankova 5. cev za merenje brzine broda 6. pramčani propeler 7. spajanje limova na trupu 8. elementi konstrukcije balastnih i teretnih tankova 9. dubinomer 10. protektori

Zapaženi uzroci ukazuju na neophodnost obrade specijalnih sredstava zaštite plovećih objekata od kontaktne korozije. Većina od tih sredstava mora biti predviđena još u fazi projektovanja plovećeg objekta koji bi u sebi uključivale kako tehnološke tako i projektantske uslove.

Istovremeno, dobro rešenje zadatka projektovanja sredstava zaštite od

kontaktne korozije, zahteva sa jedne strane jasan pojam o mehanizmu kontaktne korozije metala a takođe i o samom elektrohemijjskom procesu.

### 2.03. MEHANIZAM KONTAKTNE KOROZIJE

Kao što je i utvrđeno, na površini metala koji je potopljen u elektrolit, može paralelno da protiče nekoliko anodnih i katodnih struja. U prvom približenju može se pretpostaviti da su struje nezavisne jedne od druge. Istovremeno, pri dodiru raznih metala na određenim površinama, može se posmatrati lokalizovano samo anodni proces a na drugim samo katodni. Pri tome, anodni proces u posmatranim slučajevima predstavlja proces jonizacije metala.



Katodni procesom je redukcija rastvorenog kiseonika u morskoj vodi:



ili pri većoj jačini korozije nastaje vodonik jona



Detaljnija analiza izloženog procesa data je u literaturi [02],[49]idруго. Zbog toga ostaćemo samo na tim osobinama, koje su neophodne za postavku i rešenje zadataka u daljim posmatranjima.

Anodni proces, opisan jednačinom (02.01), predstavlja upravo proces korozije metala. Korozivni gubitak po jedinici površine metala povezan je sa gustinom električne struje koja je prisutna na toj površini. To daje mogućnost da se ustanovi odgovarajuća međuzavisnost za praktična koroziona masovna ispitivanja ili dubinski pokazatelji korozije i gustine anodnog procesa. Tako da dubina lokalnih korozionih rastvaranja metala  $\Pi$  u jedinici vremena u posmatranim slučajevima može biti iskazana na način

$$\Pi = \Pi_e j_a \quad (02.04)$$

gde je  $j_a$  - gustina anodne struje,  $\Pi_e$  - elektrohemijjski ekvivalenat za neke metale koji se koriste u morskoj vodi dati su u tabeli 02.01.

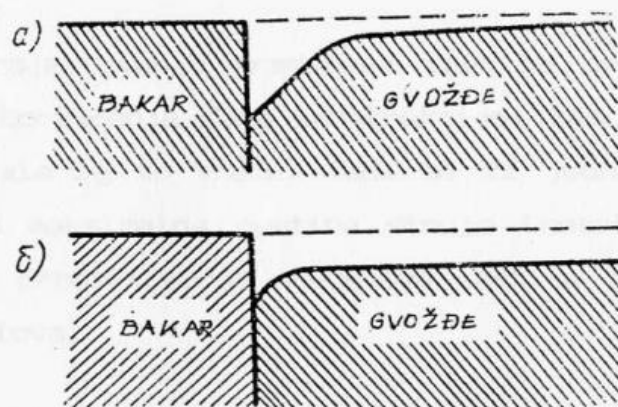


Iz jednačine (Ø2.Ø4) sledi da se dubina lokalnih korozionih oštećenja menja po površini metala po istoj zakonitosti kao i gustina anodne struje. Prema tome, izložene zakonitosti raspodele gustine struje dozvoljavaju da se utvrde i zakonitosti rasporeda brzine kontaktne korozije.

Tabela 2.Ø1. Elektrohemijski ekvivalentni nekih metala značajnih za brodogradnju

metal	aluminijum	čelik	bakar	cink	kadmijum	mesing
mm/A god	1,Ø6	1,14	1,17	1,47	2,Ø8	2,27

Gustina anodne struje uvek dostiže svoju najveću vrednost neposredno na granici dodira metala i pri udaljivanju od nje smanjuju se brže ili manje pri ostalim podjednakim uslovima u funkciji elektroprovodljivosti korozivne sredine i brzine reakcije na površini metala. U saglasnosti sa jednačinom (Ø2.Ø4), teži se opštim zakonitostima koje treba ispuniti i za raspodelu korozionih narušavanja po površini anode što se potvrđuje svim navedenim eksperimentalnim vremenskim ispitivanjima.



Slika Ø2.Ø2. Tipični primeri korozionih oštećenja gvožđa pri njegovom kontaktu sa bakrom u lošoj provodnoj sredini a) i dobro provodnoj sredini b)

Iz izloženih slika sledi da dubina korozionih oštećenja površine gvožđa pri kontaktnoj koroziji dostiže najveću vrednost neposredno uz granicu sa

bakrom, a pri udaljenju od te granice se smanjuje.

Tako se opšti karakter rasporeda korozionih razaranja opaža i za bilo koje druge kontakte različitih metala. To dozvoljava da se naprave dva praktična a važna zaključka.

1. Dugotrajnost eksploatacije konstrukcije ili plovnog objekta koji su pod dejstvom kontaktne korozije, određuju se pre svega lokalnim brzinama korozije u zoni neposredne dodirne granice raznovrsnih metala.

Ako je naprimer zadatak izračunavanje maksimalno dopuštene, po uslovima eksploatacije, dubinske koroziona oštećenja  $h_{dorr}$  bilo koje projektovane konstrukcije, može se odrediti u saglasnosti sa jednačinom

$$t_{dorr} = \frac{h_{dorr}}{\Pi \cdot j_{max}} \quad (02.05)$$

gde je  $j_{max}$  maksimalna gustina struje kontaktne korozije.

Isto tako, zadato neophodno vreme eksploatacije (na primer proračunskim vremenom između perioda remonta broda), a raspoložuci veličinom  $j_{max}$ , moguće je odrediti dubinu korozionog razaranja projektujuće konstrukcije za dat period.

Obično se pri projektovanju sredstava zaštite od korozije pojavljuje i predviđeno vreme korišćenja date konstrukcije, kao i dozvoljeno maksimalno razaranje materijala za to vreme. Tada se iz jednačine (02.05) može naći krajnje dopuštenu maksimalnu gustinu struje kontaktne korozije. Jedan od osnovnih zadataka projektovanja sredstava zaštite od kontaktne korozije je ispunjenje tog uslova.

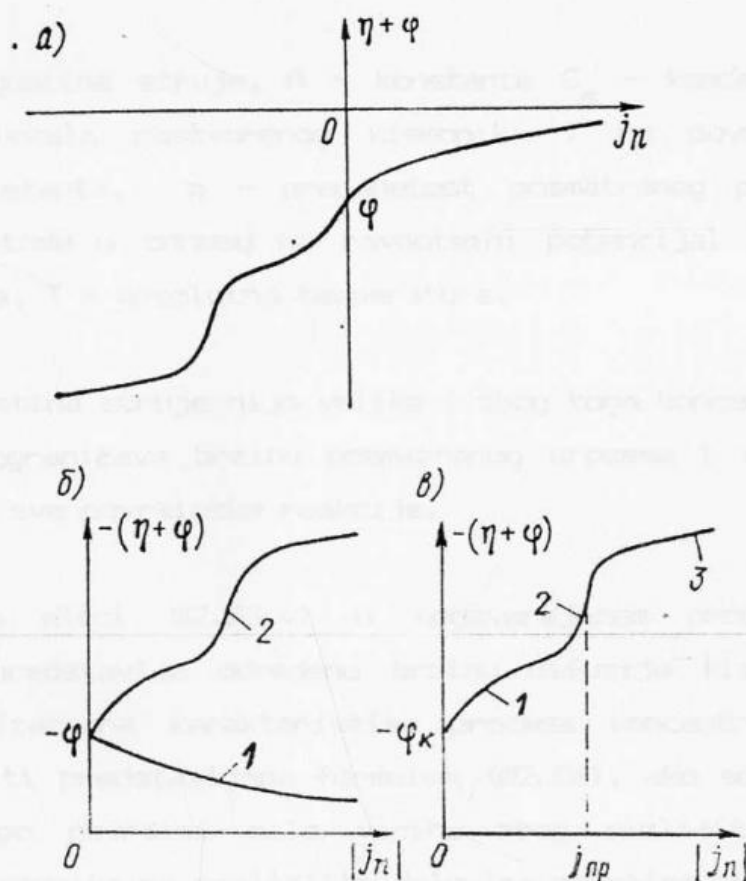
2. Primena procene kontaktne korozije po srednjoj vrednosti, podjednake za sve anodne površine, (znači gustine anodne struje) dovodi do značajnog smanjenja maksimalne dubine korozionih površina. Greška je u takvim proračunima pri ostalim podjednakim uslovima viša što je niža provodljivost korozione sredine. Prema izloženom, projektovanje metalnim konstrukcija i zaštita za određeno vreme eksploataciju radi se prema određenoj gustini korozione struje.

Na taj način, pri projektovanju sredstava zaštite od korozije morskih konstrukcija i plovnih objekata neophodno je istaći da li se radi o realnom rasporedu toka kontaktne korozije po metalnim površinama i potrebno je uzimati u obzir lokalnu brzinu korozionog razaranja metala. S tim u vezi, izneti su osnovni elektrohemijski faktori koji određuju lokalnu brzinu korozije.

Morska korozija, kao i svaki elektrohemijski proces kontroliše najbolje brzina korozije i prelaz iz svog osnovnog stanja. Zbog toga se kao rezultat pri izučavanju kinetike elektrohemijske korozije metala pojavljuje polarizaciona karakteristika kao osnovna karakteristika procesa polarizacije.

#### 2.04. POLARIZACIONE KRIVE

Posmatrajući na slici 02.03 tipične polarizacione krive, moguće je utvrditi nekoliko opštih zakonitosti elektrohemijskih procesa kod korozije metala u



Slika 02.03. Tipične polarizacione krive pri koroziji metala u morskoj vodi

morskim uslovima. Upoređujući veličine anodne i katodne polarizacije pri jednoj gustini struje i upoređujući predstavljene krive, moguće je zaključiti da je proces korozije u morskoj vodi u većini slučajeva sa izrazito izraženom katodnom polarizacijom ( $\eta_k \gg \eta_a$ ), pri čemu je po pravilu forma katodne polarizacione krive znatno složenija nego anodne. Ovo se objašnjava time da anodnu krivu karakteriše u osnovi jedan proces (reakcija 1), a katodna polarizaciona kriva odražava postojanje više elektrohemijskih procesa (iskazana jednačinama (02.02) i (02.03)). S tim u vezi, kriva katodne polarizacije metala u morskoj sredini može biti podeljena na tri tipična dela.

U delu 1 na slici 02.03.v u odgovarajućem procesu elektrohemijske polarizacije a pri uspostavljanju rastvorenog kiseonika, polarizaciona karakteristika toga procesa nastaje iz opštih teorija [13],[26] i može biti predstavljeno na sledeći način:

$$j_k = 2 A C_s \operatorname{sh} \left[ \frac{F \eta}{2 R T} \right] \quad (02.06)$$

gde je

$j_k$  - katodna gustina struje,  $A$  - konstanta  $C_s$  - koncentracija reagujućih čestica ( molekula rastvorenog kiseonika ) na površini gvožđa,  $F$  - faradejeva konstanta,  $\eta$  - prenapetost posmatranog procesa ( pomeranje potencijala katode u odnosu na ravnotežni potencijal ),  $R$  - univerzalna gasna konstanta,  $T$  - apsolutna temperatura.

Na tom delu gustina struje nije velika i zbog toga koncentracija rastvorenog kiseonika ne ograničava brzinu posmatranog procesa i može biti uzeta kao stacionarna za sve površinske reakcije.

Drugi deo na slici (02.03.v) u odgovarajućem procesu koncentracione polarizacije predstavlja određenu brzinu difuzije kiseonika na površini katode. Polarizaciona karakteristika procesa koncentracione polarizacije takođe može biti predstavljena formulom (02.06), ako se u njoj promenljiva veličina  $C_s$  po površini malo varira zbog različitih uslova difuzije rastvorenog kiseonika na različitim delovima površine. Može se zaključiti da je polarizaciona karakteristika procesa koncentracione polarizacije na različitim delovima katodne površine različita i da zavisi kako od



konfiguracije te površine tako i od spoljnih uslova.

Istovremeno su na različitim delovima površine za polarizacione karakteristike sadržane neke opšte zakonitosti. Osnovna od njih sastoji se u tome što pri koncentracionoj polarizaciji gustina struje ne može da prekorači nekoliko krajnjih veličina za datu tačku zvanu gustina krajnje difuzione gustine struje  $j_{\pi r}$ . Veličina  $j_{\pi r}$  takođe zavisi od uslova površine (obavljena ispitivanja u funkciji vremena pokazuju da je proporcionalna kvadratnom korenu iz brzine toka).

Deo 3 na slici (02.03.v) predstavlja oblast velike prenapetosti koja u neposrednoj blizini kontakta metala dostižu velike razlike stacionarnih potencijala. Na tom delu posmatrani katodni proces određuje vodonična reakcija i to se razlikuje od reakcije (02.02).

Polarizaciona karakteristika hemijske polarizacije pri uspostavljanju jona vodonika može se takođe u opštem slučaju predstaviti formulom (02.06). Pri maloj prenapetosti može se usvojiti aproksimacija

$$\operatorname{sh} \left[ \frac{F \eta}{2 R T} \right] = - \frac{1}{2} \exp \left[ \frac{F \eta}{2 R T} \right]$$

tako da formula (02.06) prelazi u poznatu formulu Tafela

$$j_n = - A C_s \exp \left[ \frac{F \eta}{2 R T} \right] \quad (02.07)$$

Proučavanje tipičnih polarizacionih krivih u nekoliko slučajeva razlikuje se od polarizacionih krivih, koje karakterišu kinetiku procesa u realnim uslovima. To se objašnjava uticajem različitih čestica na površini metala, kao i mnogih drugih faktora. Elektrohemijske karakteristike nekih metala koji se koriste u brodogradnji naznačeni su u tabeli 02.03 a eksperimentalno dobijene polarizacione krive prikazani na slici 02.03.

Polarizacione krive dozvoljavaju da se utvrde samo odnosi između potencijala i gustine struje na površini metala i to samo veličine koje neposredno karakterišu lokalnu brzinu korozije metala. Zbog toga za projektovanje sredstava zaštite od kontaktne korozije poznavanje jednih polarizacionih krivih nije dovoljno - oni se pojavljuju samo kao neophodni

rezultati pri nalaženju raspodele potencijala i gustini struje po korozionoj površini. Na ovaj način, rešenje takvih zadataka traži ispunjenje specijalnih metoda proračuna, modelovanja i eksperimentalnih provera pri čemu kod projektovanja trebaju biti ispunjena samo prva dva od naznačenih metoda. U nastavku će se proučiti metodi pri rešenju praktičnih zadataka kontaktne korozije kod brodova.

## 2.05. POSTAVKA ZADATKA PRORAČUNA KONTAKTNE KOROZIJE

Osnovni zadatak proračuna kontaktne korozije svodi se na proračun intenziteta i raspodele gustine struje na korozione površine, koji su proizašli pri kontaktu metala. U uzajamnom odnosu (02.04), taj zadatak svodi se na proračun raspodele korozione struje po anodnoj površini. U većini slučajeva gustina struje po površini metala ne može da bude neposredno određena. Za ovaj proračun neophodno je prethodno naći raspored potencijala u korozionoj sredini i zatim se koristiti Ohmovim zakonom u diferencijalnom obliku.

$$j_n = -\sigma \left[ -\frac{d\phi}{dn} \right]_s \quad (02.08)$$

pri čemu je  $\sigma$  elektroprovodnost korozione sredine,  $n$  - normala na površinu metala  $s$ . Zbog toga će se proučiti postavka zadatka za proračun potencijala pri kontaktnoj koroziji metala u vodenoj sredini.

Suština zadatka nalazi se u pronalaženju potencijala u proizvoljnoj sredini korozione sredine sa poznatim geometrijskim i elektrohemijskim parametrima metala. Kada se izračuna potencijal kao funkcija koordinata, moguće je odrediti gustinu struje po formuli (02.08). Iz toga sledi nalaženje opšteg izraza za  $d\phi/dn$ , a zatim postavljanje koordinata u posmatranoj tački. Ako je na površini metala data relacija između potencijala i gustine struje (slika 02.03), gornji izraz može biti nađen neposredno iz tog odnosa.

Proračun potencijala u korozionoj sredini javlja se kao jedan od posebnih zadataka teorije raspodele potencijala [66], [75] i svodi se na rešavanje diferencijalne jednačine Laplasa sa određenim uslovima datim na granici posmatrane oblasti [10], [59], [62] (granični uslovi).

Jednačina Laplasa opisuje raspored potencijala (u tom smislu i korozionog) u ma kojoj tački sredine koja ne sadrži električni izvor i pojavljuje se kao jedna od osnovnih jednačina teorije raspodele potencijala. Pri postojanju izvora zadatak se svodi na rešavanje diferencijalne jednačine Poasona [17].

Konkretan način i izgled jednačine Laplasa zavisi od izabranog sistema koordinata. U jednostavnom slučaju, u pravougaonom (dekartovom) sistemu koordinata ono se izražava kao jednakost zbira potencijala po svim tim koordinatama.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (02.09)$$

Izbor za proračun jednog ili drugog koordinatnog sistema određuje se formom posmatrane oblasti. Radi konformnog proračuna teži se podudarnosti granica sa koordinatnim površinama bilo kojih ortogonalnih sistema koordinata. Zbog toga se pri rešavanju posmatranih jednačina u daljim zadacima koriste ne samo pravougaoni nego i drugi sistemi ortogonalnih koordinata (cilindrični, elipsasti, sferni i dr.) Označene izabrane ortogonalne koordinate u tački  $x_1$ ,  $x_2$ , i  $x_3$  u Laplasovoj jednačini mogu da se iskažu u sledećem opštem obliku:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \frac{L_1 L_2 L_3}{L_1} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \frac{L_1 L_2 L_3}{L_2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[ \frac{L_1 L_2 L_3}{L_3} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right] = 0 \quad (02.10)$$

gde su  $L_i$  koeficijenti

$$L_i = \left[ \frac{\partial x}{\partial x_i} \right]^2 + \left[ \frac{\partial y}{\partial x_i} \right]^2 + \left[ \frac{\partial z}{\partial x_i} \right]^2$$

pri čemu su za  $i = 1, 2, 3$  odgovarajuće dekartove koordinate za  $x, y$  i  $z$  osu.

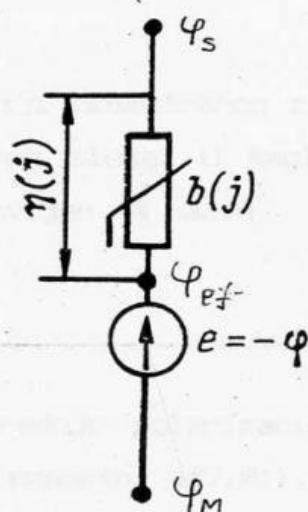
Izrazi za koeficijente  $L_i$ , koji se nalaze u jednačini (02.10), za neke sisteme koordinata prikazani su u tabeli 02.02.

Tabela 02.02. Izrazi za koeficijente a u drugim koordinatnim sistemima

Koordinatni sistem	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
Pravougaoni	$x$	$y$	$z$	1	1	1
Cilindrični	$\rho$	$\psi$	$z$	1	$\rho$	1
Sferni	$\rho$	$\psi$	$\theta$	1	$\rho \sin \theta$	$\rho$

## 2.06. ELEKTRIČNA SHEMA DVOJNOG ELEKTRIČNOG SLOJA

Jednačina Laplase, kao i svaka druga diferencijalna jednačina ima bezbroj rešenja. Za dobijanje jedinstvenog rešenja iz mnoštva mogućih, koje izražava potencijal kontaktne korozije, neophodno je zadovoljiti pomenute granične uslove koji se pri datoj formi površine metala određuju karakteristikama elektrohemijskog dvojnog sloja na granici metala sa morskom vodom. Pri razmatranju elektrohemijskog dvosloja na granici faze metal rastvor, joni se razelektrišu na površini metala ali se ne sjedinjuju sa strukturom dvojnog električnog sloja. Usled tog postojanog dvojnog sloja skok potencijala između metala i korozione sredine može se predstaviti kao zbir stacionarnog potencijala odgovarajućeg elektrodnog procesa i određene prenapetosti. To dozvoljava da u posmatranom kolu ekvivalentnu šemu elektrohemijskog dvojnog sloja prikazemo na način iskazanim na slici 02.04.



Slika 02.04. Ekvivalentna shema dvojnog sloja na granici metala sa elektrolitom

gde je  $e = -\varphi$  standardni elektrodni potencijal,  $\eta(j)$  - elektroдна



prenapetost ili pad napona na otporu  $b(j)$  u principu nelinearnom  $\varphi_m$  - unutrašnji potencijal dvojnog sloja (potencijal metala)  $\varphi_s$  - spoljni potencijal koji je smešten u korozivnoj sredini oblaganja (u daljem će se veličina  $\varphi_s$  zvati granični potencijal)  $\varphi_{eff}$  - efektivni potencijal dat izrazom

$$\varphi_{eff} = \varphi_m - \varphi$$

Ukoliko se može smatrati da je stacionarni elektrodni potencijal stalan za dati metal i elektrolit, a da je elektroprovodljivost metala mnogo veća od elektroprovodljivosti korozivne sredine, tako da se veličine  $\varphi_m$  i  $\varphi_{eff}$  javljaju kao konstante na površini datog metala, tada veličina  $\varphi_s$  zavisi od lokalne gustine struje a prema tome i od položaja tačke na posmatranoj površini.

Treba imati u vidu da je značenje katodne i anodne gustine struje u opštem slučaju različito i zbog toga se grafičko sjedinjavanje na jednom grafikonu anodne i katodne polarizacione krive praktično smatra nepogodnim. Zajedno sa tim se približnim proračunom korozivnih parova i višeelektrodnih sistema često ispoljava sjedinjenje na jednom grafikonu takozvanih krivih polarnih polarizacija. Osnovna metoda dijagrama Evansa objašnjena je u literaturi i kratko je objašnjena u prvom delu.

## 2.07. GRANIČNI USLOVI

Obično je pri formulaciji posmatranog zadatka granična površina smeštena u spoljašnjem delu dvojnog sloja. U saglasnosti sa slikom 02.04. granični uslov može biti predstavljen na način

$$\varphi_m - \varphi_s = \varphi + \eta(j_n) \quad (02.11)$$

gde funkciju  $\eta(j_n)$  određuje polarizaciona karakteristika elektrohemijским procesom prikazanim u jednačini (02.01).

Prema tome, u opštem slučaju granični uslovi (02.11) su kao i funkcija  $\eta(j_n)$  nelinearni.

U praksi se granični uslovi (02.11) izražavaju obično u nekoliko drugih

oblika

$$\left[ \varphi - b_y \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_s = \varphi_m - \varphi \quad (02.12)$$

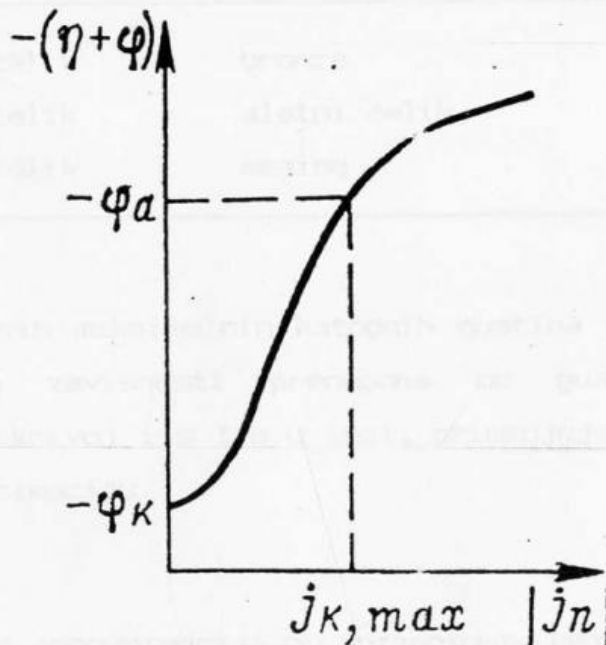
gde je  $b = | \eta / j_n | > 0$  deo polarizacije metala, koji se može predstaviti (slika 02.04) kao otpor ustaljenog nelinearnog dvojnog sloja.

Teškoće nastaju kada se u razmatranje i proračun uzimaju nelinearni granični uslovi. Zbog toga u inženjerskim proračunima pojavljuje se neophodnost uprošćavanja naznačenih graničnih uslova preko uvođenja aproksimativnih graničnih uslova.

Pri proračunu potencijala kontaktne korozije metala u morskoj vodi pojednostavljenja su obično povezana sa anuliranjem anodne polarizacije  $\eta / j_n \approx 0$  i sa linearizacijom katodnih polarizacionih krivih.

Naznačene okolnosti smatraju po pravilu nebojene anodne površine ekvipotencijalnim ( $b = 0$ ), a time se definišu i granični uslovi

$$\varphi_s = \varphi_m - \varphi \quad (02.13)$$



Slika 02.05. Shema grafičkog određivanja maksimalne katodne gustine struje pri dodiru raznorodnih metala



Ovo su granični uslovi prvog reda. Linearizacija katodne polarizacione krive zasniva se na pretpostavljenom mogućem radnom intervalu gustine struje na katodi.

Pri neposrednom kontaktu raznovrsnih metala maksimalno dozvoljene katodne gustine struje mogu biti određene neposredno iz graničnih uslova ili grafičkom metodom pomoću katodne polarizacione krive i poznatog stacionarnog potencijala anoda koji se meri kada je anoda nepolarizovana. Iz neprekidnih promena  $\varphi_s$  graničnog potencijala metala, maksimalna katodna gustina struje nalazi se grafički (sa graničnim uslovima (02.11) i (02.13) kao apscisa preseka katodne polarizacione krive i horizontalne prave sa ordinatom jednakom stacionarnom potencijalu anoda, slika 02.05.

Na taj način, dobijene se maksimalne katodne gustine struje za nekoliko tipičnih dodira raznovrsnih metala u morskoj vodi [26] i naznačeni su u tabeli 02.03.

Tabela 02.03. Dozvoljene maksimalne katodne gustine struje za neke parove metala u morskoj vodi

Anoda	Katoda	Maksimalna gustina struje
brodograđevni čelik	bronz	$0,10 - 0,50 \text{ mA/m}^2$
brodograđevni čelik	alatni čelik	$0,20 - 0,35 \text{ mA/m}^2$
brodograđevni čelik	mesing	$0,50 - 0,90 \text{ mA/m}^2$

Na osnovu ovakvih maksimalnih katodnih gustina struja dozvoljava se izrada pravih linija zavisnosti prenapona od gustine struje na katodnoj polarizacionoj krivoj i s tim u vezi, primenjuje za linerizacioni metod ili linearnu aproksimaciju.

## 2.08. LINEARNA APROKSIMACIJA POLARIZACIONIH KRIVIH

Posebna aproksimacija primenjuje se u slučajevima, kada se interval menjanja gustine struje na katodi nalazi u delovima bilo kog iz delova polarizacione krive, dovoljno sličnoj linearnoj. U delovima pri maloj gustini struje ( $j$

$\approx j_0$ ) slika 02.06, deo polarizacije b može se smatrati postojanom veličinom i granični uslovi 02.12 prelaze u takozvane granične uslove trećeg reda. Sa tim uslovima naziva se raspored potencijala drugog reda ( za razliku od prvog reda kod prenapona polarizacije metala ).

Ako interval gustine struje leži u predelima bilo kog drugog iz takvih delova, na primer  $j_1 < |j| < j_2$  (deo AB na slici 02.06) moguće je sledećim približnim izrazom prikazati ovu zavisnost

$$\eta \approx \eta' + \alpha j_n \quad (02.14)$$

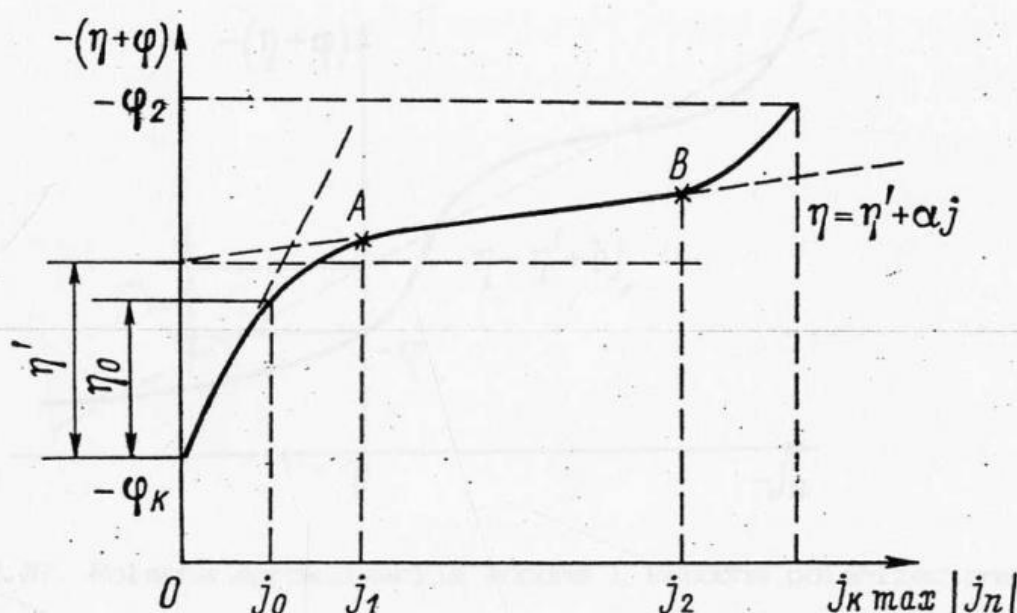
gde je  $\alpha$  - srednja vrednost izvoda  $\partial u / \partial j_n$  na posmatranom delu, a koji se može predstaviti kao dinamičko suprotstavljajnje nelinearnim otporom na slici 02.04.

Stavljanjem (02.14) u (02.11) i uzimajući u obzir (02.12) ponovo se dolazi do graničnih uslova trećeg reda

$$\left[ \varphi - \alpha \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{\text{B}} = \varphi_m - \varphi' \quad (02.15)$$

gde je

$$\varphi' = \varphi - \eta'$$



Slika 02.06. Parcijalno -linearna aproksimacija katodne polarizacione krive

Na taj način, pri linearizaciji bilo koga dela katodne polarizacione krive, granični uslovi (02.11) mogu biti dovedeni do graničnih uslova trećeg reda. Pri tome se veličina srednje vrednosti izvoda  $\partial u / \partial j_n$  na posmatranom delu proširuje na celo područje sa istom vrednošću  $\alpha$  kao na tom delu, pri čemu se i stacionarni elektrodni potencijal  $\varphi$  umanjuje za veličinu  $\eta'$ .

Polarna linearna aproksimacija polarizacione krive primenjuje se u slučajevima kada se pretpostavljeni opseg gustine struje  $[j_{\min}, j_{\max}]$ , ne uklapa u bilo koji karakteristični deo na krivoj. Pri tome je zavisnost  $\eta(j)$  zamenjena linearnom (slika 02.07), na celom intervalu  $[j_{\min}, j_{\max}]$  što dovodi do graničnih uslova

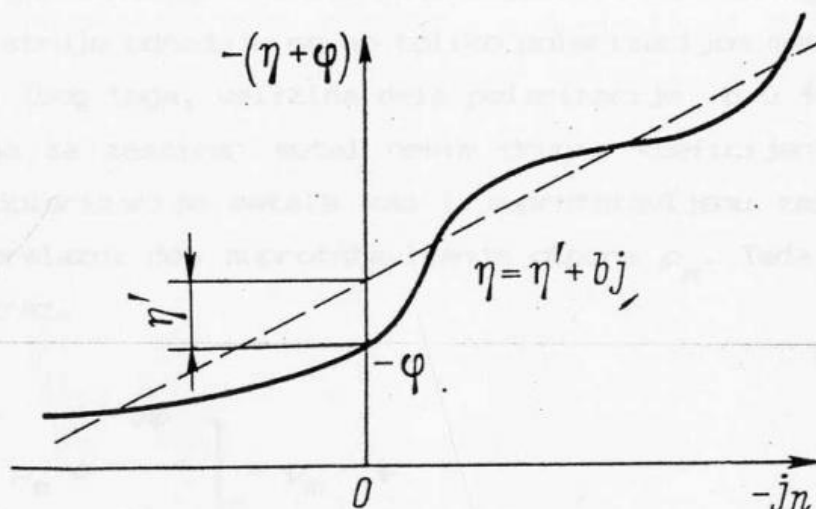
$$\left[ \varphi - \bar{b} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_S = \varphi_m - \varphi \quad (02.16)$$

gde je  $\bar{b}$  određena srednja polarizacija.

Veličinu  $\bar{b}$  moguće je odabirati različitim načinima, na primer:

$$\bar{b} = \frac{\eta_{\max} + \eta_{\min}}{j_{\max} + j_{\min}} \quad (02.17)$$

gde  $\eta_{\min}$  i  $\eta_{\max}$  označavaju prenapetosti na granicama intervala različite gustine struje.



Slika 02.07. Polarna aproksimacija anodne i katodne polarizacione krive

Može se zapaziti još jedna sposobnost linearne aproksimacije polarizacionih

krivih, koje se mogu primeniti u slučajevima kada je smer struje na posmatranoj elektrodi nezavisan od vremena. Sadrži se u tome što se polarna aproksimacija primenjuje na polarizacionoj krivoj predstavljenoj na slici 02.03.a. Pri tom je moguće dobiti približne granične uslove trećega reda, za odgovarajuće kako katodno tako i anodno ponašanje elektroda.

$$\left[ \varphi - b \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_S = \varphi_m - \varphi' \quad (02.18)$$

gde je  $\varphi' = \varphi - \eta'$

Takva aproksimacija je najgrublja i primenjuje se u osnovi samo za to da bi se izvršila raspodela struje pri približnom proračunu višeelektrodnog sistema (slika 02.08). Posle toga moguće je iskoristiti postupke tačnijih načina linijske aproksimacije polarizacionih krivih.

## 2.09. PASIVNA ZAŠTITA METALNE POKRŠINE

Izloženi granični uslovi pripadaju slučajevima kada metalne površine nemaju nikakvu zaštitu.

Istovremeno većina morskih gradnji u prvom redu morskih brodova se po pravilu zaštićuje zaštitnim slojem boje ili drugom zaštitnom oblogom. U tim slučajevima zavisnost skoka potencijala između oblaganja dvojnog sloja od gustine struje određuje se ne toliko polarizacijom metala, nego preko otpora zaštite. Zbog toga, veličina dela polarizacije  $b$  u formuli 02.12 mora biti zamenjena za zaštićen metal nekim drugim koeficijentom uzimajući u obzir uticaj polarizacije metala kao i suprotstavljenu zaštitu, koja se obično naziva prelazni deo suprotstavljavanja otpora  $\rho_\pi$ . Tada granični uslovi 02.12 imaju izraz.

$$\left[ \varphi - \rho_\pi \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_S = \varphi_m - \psi \quad (02.19)$$

Veličina  $\rho_\pi$  može se odrediti iz polarizacionih krivih zaštićenog metala. Linearizacije ovih polarizacionih krivih znatno je bolja nego za nezaštićene metale.

Ako se deo sa otporom zaštite znatno povećava po veličini u odnosu na polarizaciju metala, polarizaciona kriva dobija pravac prave linije pod uglom koji sa horizontalnom osom određuje veličinu  $\rho_{\pi}$ . Pri beskonačno velikom otporu zaštite, polarizaciona kriva sjedinjuje se sa ordinatom i uslov dat jednačinom (02.19) može biti zamenjen uslovom

$$\left[ \begin{array}{c} \frac{\partial u}{\partial n} \\ \frac{\partial u}{\partial n} \end{array} \right] = 0 \quad (02.20)$$

Danas se na brodovima sve više primenjuju mnogobrojne lakirane boje ili stakloplastične zaštite, čija je specifična otpornost jako velika ( $10^5 \text{ } \Omega \text{ m}^2$ ) i više, što praktično može da se smatra beskonačno velikom vrednošću na bilo kom izolacionom delu zapljusnute ili okvašene površine broda.

Izložene osobine graničnih uslova dozvoljavaju prelazak ka opštoj formulaciji graničnih zadataka pri proračunu potencijala kod kontaktne korozije metala u morskoj vodi.

## 2.10. VIŠEELEKTRODNI SISTEMI

Neka na podvodnom delu broda (slika 02.11) postoji u opštem slučaju  $N$  elektroda (konstruktivnih i izradjenih od raznovrsnih metala). Od toga  $M$  elektroda bez površinske zaštite, a  $Q$  elektroda sa zadanom zaštitom. Osim toga, na povodnom delu je razmešteno  $T$  delova, koji imaju elektroizolacione zaštite, ili su ispunjene iz izolacionih materijala

Pri obračunu takvog sistema moguća su dva uslova:

1. Elektrode imaju kontakt na metalu — kratkospojene su na unutrašnjoj strani sistema (slika 02.08.b).
2. Elektrode se spajaju i medju sobom po unutrašnjoj strani kroz postojani omski otpor, na primer, na čvoru električnog spajanja, prilagodjenih za smanjenje kontaktne korozije (slika 02.08.c).

Smatrajući da je medju elektrodama dobar kontakt na metalu, može se pisati

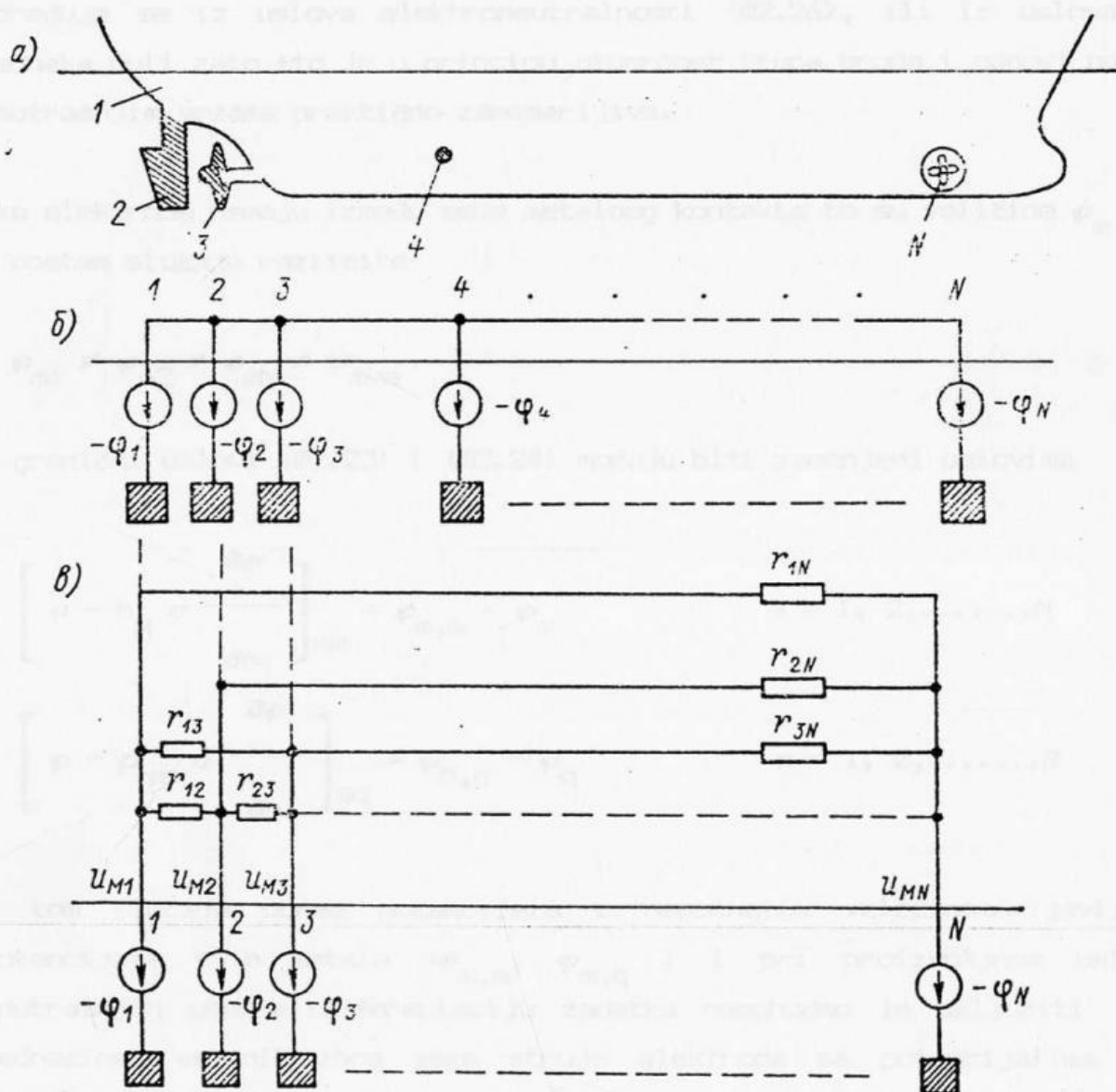


$$\varphi_{m1} = \varphi_{m2} = \varphi_{mN} = \varphi_{mve} \quad (02.21)$$

gde je  $\varphi_{mve}$  - potencijal višeelektrodnog sistema, kratkospojen po unutrašnjoj strani. U tom slučaju granični zadatak za proračun potencijala može biti iskazan sledećom formulom - jednačinom.

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (02.22)$$

$$\left[ \varphi - b_m \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{sm} = \varphi_{mve} - \psi_m \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (02.23)$$



Slika 02.08. Višeelektrodni sistem



$$\left[ \varphi - \rho_{\pi q} \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{sq} = \varphi_{mve} - \psi_q \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (02.24)$$

$$\left[ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{st} = 0 \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (02.25)$$

$$\int_s \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds = 0 \quad s = s_1 + s_2 + \dots + s_{M+Q} \quad (02.26)$$

U datom zadatku nepoznate su funkcija  $u$  i veličina  $\varphi_{mve}$ . Druga veličina određuje se iz uslova elektroneutralnosti (02.26), ili iz uslova da je jednaka nuli zato što je u principu otpornost trupa broda i padovi napona na unutrašnjim vezama praktično zanemarljiva.

Ako elektrode nemaju između sebe metalnog kontakta to su veličine  $\varphi_m$  za njih u opštem slučaju različite

$$\varphi_{m1} \neq \varphi_{m2} \neq \varphi_{mN} \neq \varphi_{mve}$$

i granični uslovi (02.23) i (02.24) moraju biti zamenjeni uslovima

$$\left[ \varphi - b_m \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{sm} = \varphi_{m,m} - \varphi_m \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (02.27)$$

$$\left[ \varphi - \rho_{\pi q} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{sq} = \varphi_{M,q} - \varphi_q \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (02.28)$$

U tom slučaju pored potencijala  $u$  nepoznatim veličinama javljaju se potencijali svih metala ( $\varphi_{m,m}$ ,  $\varphi_{m,q}$ ) i pri proizvoljnom uključanju unutrašnjih otpora u formulaciju zadatka neophodno je uključiti  $M + N$  jednačine, vezanih zbog veze struje elektroda sa potencijalima metala. (slika 02.03b)

$$\sigma \int_{s_1} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds = \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{r_{1,2}} + \dots + \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m,M+Q}}{r_{1,M+Q}}$$

$$\sigma \int_{s_2} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds = \frac{\varphi_{m2} - \varphi_{m1}}{r_{2,1}} + \dots + \frac{\varphi_{m2} - \varphi_{m,M+Q}}{r_{2,M+Q}}$$

..... (02.29)

$$\gamma \int_{s_{M+Q}} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds = \frac{\varphi_{m,M+Q} - \varphi_{m1}}{r_{M+Q,1}} + \dots + \frac{\varphi_{m,M+Q} - \varphi_{m,M+Q-1}}{r_{M+Q,M+Q-1}}$$

Gde su  $r_{mn}$  - delovi otpora između  $m - n$  i  $n - m$  elektroda. Ovi otpori javljaju se kao veličine recipročne električnim provodljivostima, koje se na ovaj način određuju po analogiji sa delovima zapremine (kapaciteta) a koji se ispoljavaju pri proračunu elektrostatičkih sistema [57].

Ako je  $r_{mn} = r_{nm}$ , to iz (02.29) sledi i uslov elektroneutralnosti (02.26).

Uvođenjem graničnih uslova (02.27) i (02.28) nužno je uvesti i parametre stacionarnog elektrodnog potencijala  $\varphi_m, \varphi_q$ .

Istovremeno veličine stacionarnih elektrodnih potencijala mogu da predstavljaju još nekih manjih poremećaja koja zavise od izbora elektroda poređenja. Zbog toga jednačine zadatka (02.22) - (02.29) treba da se izmene tako, da bi bilo moguće u parametrima iskazati još poznate veličine - postavljanjem stacionarnim elektrodnim potencijalima. Sa tim ciljem preinačuju se granični uslovi sa desne strane (02.27) i (02.28) na sledeći način:

$$\varphi_{m,m} - \varphi_m = \varphi'_{M,m} - \Lambda \varphi_{m,1}$$

$$\varphi_{m,q} - \varphi_q = \varphi'_{M,q} - \Lambda \varphi_{q,1}$$

pri čemu je:

$$\varphi'_{M,m} = \varphi_{m,m} - \varphi_1$$

$$\varphi'_{m,q} = \varphi_{m,q} - \varphi_1$$

$$\Delta\varphi_{m,1} = \varphi_m - \varphi_1$$

$$\Delta\varphi_{q,1} = \varphi_q - \varphi_1$$

Novo značenje potencijala metala  $\varphi'_m$  takođe zadovoljavaju jednačinu (02.29)

Kao početna ili osnovna, može biti izabrana bilo koja elektroda sa kojom se žele dobiti podaci.

Na taj način, zadatak nalaženja rasporeda potencijala mnogoelektrodnog korozionog sistema može biti završen sa formulama na sledeći način:

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

$$\left[ \varphi - b_m \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{sm} = \varphi_{m,m} - \Delta\varphi_{m,1} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (02.30)$$

$$\left[ \varphi - \rho_{\pi q} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{sq} = \varphi_{M,q} - \Delta\varphi_q \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (02.31)$$

U formiranju zadatka mora se pre svega uzeti jednačina (02.29). Znatno se uprošćuje i menja dovođenje opšteg formiranja zadatka u nekoliko posebnih slučajeva. Označena su dva karakteristična slučaja.

1) Pri posmatranju korozionog para, jedna od elektroda koja se javlja na oblozi trupa broda u postavci zadatka može biti uprošćena na način realnog uzajamnog odnosa razmera dodirnih površina. Obično je taj uzajamni odnos takav da se površina trupa može sa velikom tačnošću smatrati beskonačnom površinom. Pri tome, pad potencijala metala na površini obloge  $S_2$  može biti određen neposredno iz uslova beskonačnosti

$$u_s \rightarrow \infty, \quad i \quad \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{s, \rho \rightarrow \infty} \rightarrow 0$$

kako se vidi iz jednačine (02.12) naznačena je jednakost  $\varphi_{m2} = \varphi_2$ . Na taj način u datom slučaju izdvaja se neophodnost ispunjenje uslova elektroneutralnosti (02.26).

2) Pri odračunu sistema katodne zaštite za nekoliko elektrodnih parametara ne pojavljuju se razlike stacionarnih potencijala u zbirnom toku. U tom slučaju granični uslovi zadatka vidno se menjaju u skladu sa sledećom jednačinom:

$$\left[ \varphi - b_m \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{s_m} = c_m \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (02.32)$$

$$\left[ \varphi - \rho_{\pi q} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{s_q} = c_q \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (02.33)$$

gde su  $c_m$  i  $c_q$  - konstante određene iz jednačine

$$-\gamma \int_{s_m} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds = i_m \quad (02.34)$$

$$-\gamma \int_{s_q} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds = i_q$$

i jednačine (02.29) koje se isključuju iz formulacije zadatka i umesto njih ispunjava se uslov elektroneutralnosti.

$$\sum_{m=1}^M i_m + \sum_{q=1}^Q i_q = 0 \quad (02.34.a)$$

## 2.11. NORMALIZOVANE JEDNAČINE

Sve izloženo je veće za iznos standardnog korozionog potencijala i može biti formulisano u takozvanom bezdimenzionalnom vidu. Pri tom se ukazuje kao mogućnost dobijanja boljih opštih i povoljnijih bezdimenzionalnih, normalizovanih izraza pravilnih ne toliko za bilo koji korozioni sistem, kao i za opštost posmatranja tog sistema.

Normalizovanim korozionim potencijalom nazvaće se veličina:

$$U = \frac{u}{\Delta \varphi_0}$$

gde je  $u$  - polarizacioni potencijal a  $\Delta \varphi_0$  - nominalni potencijal izabran obično podjednakim razlikama stacionarnih potencijala bilo koja dva metala uzetih u posmatranom sistemu.

Korišćenje u proračunu beskonačnog potencijala dozvoljava da se dobije opšta formula, tačnije pri uzimanju bilo kojih vrednosti  $\Delta \varphi_{mn} = \varphi_m - \varphi_n$ . Takođe se smatra da je dužina bilo kojih karakterističnih razmera sistema  $l_0$  moguće ispuniti pri obračunu beskonačnih koordinata u delovima beskonačnih dekartovih koordinata

$$X = \frac{x_0}{l_0} \quad Y = \frac{y_0}{l_0} \quad Z = \frac{z_0}{l_0}$$

Korišćenje neograničenih koordinata dozvoljava da se dobije pri obračunu opštih formula pravilo za bilo koji sistem date konfiguracije, pri tom se određene koordinate nalaze putem množenja broja sa vrednošću  $l_0$ .

Pri istovremenom ispunjenju beskonačnih potencijala i beskonačnih koordinata u formuli (02.22) i (02.26), zamenjujemo ih sa određenim vrednostima na beskonačne a u formuli (02.23) i (02.24) koeficijenti  $b_m \sigma$  i  $\rho_{\pi q} \sigma$  moraju biti zamenjeni sa  $b_m \sigma / l_0$  i  $\rho_{\pi q} \sigma / l_0$  respektivno. Ako se obeleže ti beskonačni parametri preko  $k$ , to se granični delovi (02.12) i (02.19) odgovarajuće i (02.23) (02.27) i (02.28) mogu predstaviti na beskonačan način jednim opštim uslovom.

$$\left[ \varphi - k \frac{\partial \varphi}{\partial N} \right]_S = \varphi_{eff} \quad (35)$$

Na desnoj strani značenje parametra  $k$  zavisi od postavke konkretnog zadatka. Posebna uopštavanja takvih beskonačnih uslova data su i daljim delovima ove teze.



Kako je pokazano u tački 5, veličina  $k$  se pojavljuje kao kriterijum sličnosti i zato igra važnu ulogu u teoriji proračuna i prilagođavanja raspodele potencijala kao i toka kontaktne korozije. Ta veličina može da služi približnoj meri odnosa polarizacionog i omskog otpora elektroda.

### 3. PROBLEMI RASPODELE POTENCIJALA I GUSTINE STRUJE

U proračunu sistema katodne zaštite treba da poznajemo broj i raspored anoda, radi stvaranja ravne struje po stranicama sistema kojim se zaštićuje. Izlazi od toga da treba da se odredi raspored anoda i struje kroz njih i njihov odnos prema površini zaštićene površine.

Broj anoda je zapravo vrlo jednostavno odrediti ako se zna površina zaštićene površine i ako se zna struja koja treba da protiče kroz svaku anodu u datom sistemu zaštite.

#### 3.1.1. POSTUPAK ZA ODREĐIVANJE DIMENZIJA SISTEMA

Prilikom proračuna sistema zaštite treba da se uzima u obzir sledeće podatke:

1. Dimenzije površine zaštićene površine
2. Tipi anoda i njihov raspored po površini
3. Odnos između struje, površine, tipa i rasporeda anoda
4. Dimenzije tipa i vrsta odobrenog sistema
5. Dimenzije i raspored zaštićene površine
6. Izjava o tome kako se treba odvijati proračun sistema

Prilikom proračuna sistema zaštite treba da se uzima u obzir sledeće podatke:

Izjava o tome kako se treba odvijati proračun sistema

### 3. PROBLEM RASPODELE POTENCIJALA I GUSTINE STRUJE

Iz proračuna sistema katodne zaštite treba da proizađe broj i raspored anoda radi stvaranje anodne struje oko šticeenog objekta kojim ce se održavati razlika potencijala između trupa broda i elektrolita u odredjenim definisanim granicama.

Zbog toga je izuzetno važno pravilno izabrati broj i veličinu anoda i okolnoanodnih ekrana tako da potencijal svih tačaka bude u tolerantnim granicama.

#### 3.01. POSTUPAK ZA ODREĐIVANJE KOMPONENATA SISTEMA

Praktičan proračunski postupak za sistem aktivne katodne zaštite površine trupa broda [02],[06] je sledeći:

1. Određivanje maksimalne potrebne struje
2. Izbor stanice katodne zaštite i upravljanje
3. Određivanje broja, veličine, tipa i smeštaja anoda
4. Određivanje tipa i vrste okolnoanodnog ekrana
5. Određivanje lokacije referentne ćelije
6. Izmene plana projekta radi usklađivanja sa brodskim sistemom

Optimalni kontrolisani potencijal koji može da znatno umanja galvanske efekte nalazi se u opsegu  $-450\text{ mV}$  do  $-850\text{ mV}$  prema Ag/AgCl referentnoj elektrodi. Ova vrednost može se menjati s obzirom na iskustvo i stanje drugih metala na spoljnoj površini.

Izabrana stanica katodne zaštite mora biti u mogućnosti da i u

najnepovoljnijem slučaju pouzdano napaja elektrode i ima minimalnu signalizaciju.

Smeštaj anoda može biti kritičan u sistemu aktivne katodne zaštite. U principu se anode trebaju postaviti u blizini različitih metala da bi umanjila efekte njihove povećane galvanske korozije. Da bi se raspodela zaštitnih struja ujednačila, potrebno je elektrode što više udaljiti od šticećenog čelika ili postaviti veći broj elektroda. Kod brzih brodova anode moraju biti upuštene u trup broda a često se događa da nema dovoljno prostora za okolnoanodne ekrane.

Okolnoanodni ekran je takođe kritičan jer mora da obezbedi minimalnu razdaljinu da pri maksimalnoj anodnoj struji potencijal trupa ni u jednoj tački ne pređe maksimalnu dozvoljenu vrednost.

Referentne elektrode se koriste da obezbede normalan rad aktivne katodne zaštite. U principu se postavljaju dve referentne elektrode da bi se obezbedila kontrola minimalnog i maksimalnog potencijala i promena anodne struje u skladu sa tim.

Postavljanje elektroda mora biti u skladu sa opremom na trupu. Moraju se napraviti koferdami (međuprostori), radi vodonepropusnosti. Kablovi moraju imati najmanju moguću dužinu i ne treba ih voditi pored instrumenata osetljivih na magnetno polje.

U takvim uslovima postoji odredjen opseg vrednosti potencijala u kome projektovanje mogućim uopšte ali koji u isto vreme stvara teškoće oko toga koji će postupak voditi tome. Potencijal datih fiksnih elektroda u svim tačkama bez sumnje je stalan u funkciji vremena. Veća dopuštena fleksibilnost u potencijalnom opsegu dopušta korišćenje manjeg broja fiksnih anoda, ali stvarne promene potencijala teško je proračunati tokom procesa izrade. Prema tome, postupak katodne zaštite može se lakše ili teže proveriti; procedurom delimične izrade, analizom ili pomoću iskustva u upotrebi ili mnogo jeftinije matematičkom tehnikom.

### 3.02. MATEMATIČKO MODELOVANJE

U skladu sa matematičkom analizom fizičkog sistema, nužno je da se svi

fizički podsistemi razumeju dovoljno dobro da se mogu opisati matematičkim relacijama i obuhvatiti svi parametri koji tu postoje. Ako je rezultat matematičkih jednačina takav da postoji jedinstveno rešenje, pronadjen je model za opisivanje sistema. Njegova tačnost zavisi od stepena tačnosti kojom su podsistemi modelovani, bilo zbog nekompletnosti fizičkog razumevanja i opisivanja pojava ili zbog netačnosti pripadnih empirijskih podataka. Deo zasluga postojećeg modela za ceo sistem je da oseća neispravnosti u modelovanom sistemu koja se može ispitati. Netačnosti modelovanja podsistema može biti dodata netačnost i u specifikaciji podsistema. Primer ove netačnosti kod sistema korozione zaštite bila bi na primer značajnije oštećenje boje i premaza.

Projektovanje sistema katodne zaštite podrazumeva da su poznati podaci o:

- a) geometriji broda koga treba zaštititi, oblik anoda i veličinu okoloanodnih ekrana.
- b) karakteristike sredine kroz koju struja protiče tj morsku ili rečnu vodu
- c) električne karakteristike anode prikazane u polarizacionim krivama
- d) električne karakteristike materijala koji treba katodno da se štite, dodatno komplikovane razvojem korozivne opne.

Smatra se da je s obzirom na opravdan stepen pouzdanosti, masa sredine uniformno homogeni provodnik. U skladu sa daljim postupkom, ovo je nužna pretpostavka. Dugotrajno menjanje u sastavu i temperaturi može biti uzeto u razmatranje, ali je vrlo teško uključiti lokalne nehomogenosti. Usvajajući ove pretpostavke, i sam postupak postaje jasan; u homogenoj provodnoj sredini električni potencijal zadovoljava Laplasovu jednačinu,

$$\Delta^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (03.01)$$

a u rastvoru će se potencijal rasprostirati po celoj zapremini pod uslovima koji osiguravaju postojanje jediničnog rešenja. Ovi uslovi snabdeveni su dodatnim pretpostavkama b) i c). U svakom trenutku je električna prenapetost opisana pomoću polarizacionih krivih, mada to može biti otežano za svaku tačku na površini, zbog formiranja korozivnih opni. U vezi sa potencijalom  $\varphi$ , u rastvoru će biti ispunjeni sledeći uslovi:

- a)  $\varphi$  zadovoljava jednačinu 03.01
- b) svuda na granici površine metala i provodne sredine postoji relacija

oblika

$$\eta = f(j) = f^* \left[ \begin{array}{c} \frac{\partial \eta}{\partial n} \\ \hline \hline \\ \hline \hline \\ \frac{\partial \eta}{\partial n} \end{array} \right] \quad (03.02)$$

c) mada je ceo sistem otvoren do beskonačnosti, struja protiče između konačnih površina

Ovi uslovi su dovoljni da zadovolje jedinično rešenje za potencijal, a numeričke tehnike koje postoje su sposobne da nadju ovo rešenje. Medjutim, postoje i određene poteškoće koje će biti iznete.

### 3.03. NUMERIČKO REŠENJE LAPLASOVE JEDNAČINE

Problem rešenja Laplasove jednačine zalazi u nekoliko polja od interesa: elektrostatička i magnetna polja, u strukturnu analizu, u problem strujanja fluida. Postupak koji će biti opisan i razvijen u ovom radu usvaja i određene osobine i specifičnosti korozivne zaštite.

Osnovna osobina je priroda konturnih uslova što je u opštem obliku dato jednačinom 03.02. Ovo se mora porediti sa standardnim uslovima za koje je ili  $\eta$  ili  $\frac{\partial \eta}{\partial n}$  specifikovano preko cele konture. Ovo značajno komplikuje proces. Druga važna osobina je trodimenzionalna priroda površine strukture. Mada postoje programi razvijeni samo za dvodimenzionalne strukture i polja, potrebno je napraviti program koji bi mogao računati raspodelu potencijala u trodimenzionalnom, znači realnom polju.

Oдавде proizilazi da će to biti složen postupak, i da je dovoljna aproksimacija deo po deo elementa nasuprot analize cele strukture koja se radi. Potreba smanjenja broja tačaka u kojima se računa potencijal čini atraktivnim metode koje koriste vrednosti samo na konturi, kao što je metoda konačnih elemenata [17],[54]. Ova metoda je interesantna i što se konturni uslovi mogu varirati sa vremenom pri čemu oblik ostaje isti. Možda je interesantnija i više korišćena metoda konačnih razlika [19],[56] koja će u daljem radu biti primenjena.

Metoda konačnih razlika je numerička metoda koja se primenjuje za aproksimativno rešavanje fizičkih problema čiji su matematički modeli kao i



granični uslovi opisani. Postupak rešavanja jednosmernih polja metodom konačnih razlika sastoji se od nekoliko delova:

- izbor odgovarajućeg sistema mreže
- pretvaranje osnovne diferencijalne jednačine i određenih konturnih uslova u skup jednačina konačnih razlika pomoću aproksimacije Tajlorovim redom
- rešavanje skupa jednačina konačnih razlika koje daju tražene veličine

### 3.04. ELEKTROHEMIJSKI POTENCIJALI METALA

Elektrolitička ćelija sastoji se od anode i katode. Svaka od ovih delova naziva se polućelija. Poznato je da se na metalu stvara određeni potencijal u odnosu na rastvor u koji je potopljen. Ova mala potencijalna razlika između potencijala metala i neke jako daleke tačke u elektrolitu se ne može izmeriti u apsolutnoj vrednosti. Može se meriti samo potencijalna razlika između te i druge elektrode. Ako merna elektroda ima stalne vrednosti zove se referentna i često se elektrohemijski potencijali daju u odnosu na normalnu vodoničnu elektrodu.

Standardni elektrohemijski potencijali nekih metala koji se najčešće koriste u brodogradnji <sup>[04],[49]</sup>, a u morskoj vodi su:

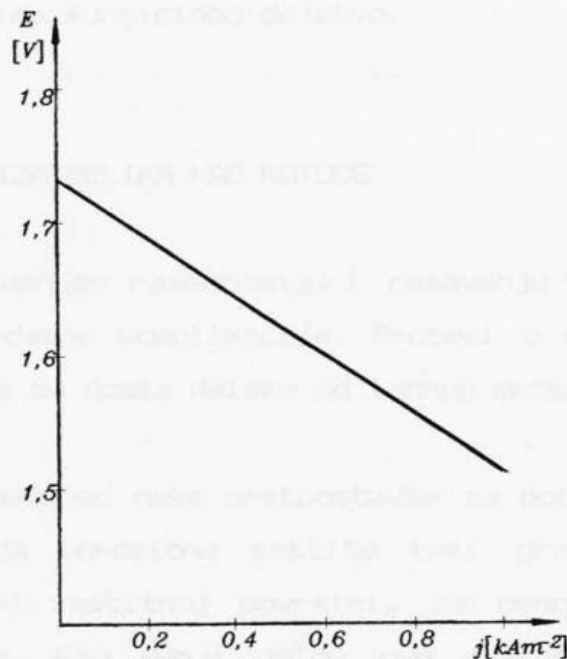
Tabela 03.01. Standardni elektrohemijski potencijali na 25°C

Elektrodna reakcija	Elektrohemijski potencijal vs. normalna vodonična elektroda ( V )
$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e$	- 2,363
$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e$	- 1,663
$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e$	- 0,763
$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$	- 0,440
$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e$	+ 0,337
$Pt \rightarrow Pt^{2+} + 2e$	+ 1,188

Katodna zaštita gvožđa može se uraditi bilo kojim protektorom koji ima negativniji potencijal, ili sa narinutom strujom. Da bi čelik bio katodno zaštićen <sup>[06],[16],[64] i [67]</sup> potrebna je pomeriti mu potencijal za 200 do 600 mV u negativnu stranu.

### 3.05. POLARIZACIJA ANODA

Fiksno postavljene elektrode mogu se uzeti kao površine konstantnog potencijala, nezavisno od stvarne gustine struje. Ovo u izvesnom smislu uprošćuje postupak, i u principu je tačno.



Slika 03.01. Polarizaciona kriva anode od titana sa aktivnom prevlakom od platine

Mada postoji dosta vrsta metala i prevlaka koji se mogu upotrebiti kao anode, samo neke imaju značajne prednosti u pogledu sledećih osobina:

1. Mala koroziona potrošnja nezavisna od uslova prirode okoline u kojima se primenjuje ili produkata reakcije formiranih anodnom strujom.
2. Mala anodna polarizacija
3. Dobra električna provodnost i mala prelazna otpornost
4. Visoka pouzdanost
5. Zadovoljavajuće mehaničke osobine na vibracije, abraziju i eroziju
6. Niska cena

Za uslove eksploatacije u vodi najpogodnije rešenje je anoda sa titanskom osnovom, u morskoj vodi presvučenoj sa rutenijum oksidom  $RuO_2^{[os],[90]}$ , a u rečnoj vodi sa prevlakom od platine Pt. Interesantno je napomenuti da se i

jedne i druge razvijaju i proučavaju na Tehnološko-metalurškome fakultetu u Beogradu [37],[38] i [39].

Polarizacione krive Ti - anode sa aktivnom prevlakom [47],[51] prikazane su na slici 03.01. Čak i pri vrlo visokim strujama anode poseduju malu polarizaciju. Mada se na anodama sa prevlakama od platine vrši veće izdvajanje kiseonika pa se time stvaraju dodatni uslovi za koroziju, kod prevlaka sa RuO to je izbegnuto jer se sa većim iskorištenjem stvara hipohlorit koji ima fungicidno dejstvo.

### 3.06. POLARIZACIJA ČELIKA KAO KATODE

Postupci u dosadašnjem razmatranju i rešavanju su konceptualno prosti, čak ako se izuzmu dodatne komplikacije. Procesi u samom čeliku kao katode kod korozione zaštite su dosta daleko od tačnog matematičkog modelovanja.

Svi proračuni kreću od neke pretpostavke za potencijal pri čemu postojanje projektnih metoda korozione zaštite teži pretpostavljenoj vrednosti za gustinu struje u zaštitnoj površini, na osnovu iskustva, a u vezi sa uslovima sredine. Kao manji uslov ove pretpostavke, ide se ka proceni potrebne struje sa anode kao i otpornosti koju mora da ima elektroprovodna sredina, a koja daje pretpostavku anodnog oblika i veličine. Kao sofisticiraniji nivo pretpostavke, gustine struje na katodi vodi ka graničnom rešenju Laplasove jednačine za  $\phi$  i tako daje procenu potencijala preko cele površine, koji može da se poredi sa potrebnim vrednosti za zaštitu. Ove aproksimacije ne mogu doneti rešenje stvarnog problema, a u stvarnosti gustina struje je određena potencijalom sa kojim nije uvek u jednoznačnoj vezi.

Polarizacione krive moraju da se primene kao konturni uslovi i onda se mogu naći uzajamne odgovarajuće vrednosti za gustinu struje i potencijal. Ali takvi nelinearni konturni uslovi nisu veći problem. Mnogo veća važnost u uslovima Severnog i nekih drugih mora je formiranje krečnjačke opne [41] stvorene dejstvom sistema korozione zaštite. Ove krečnjačke opne uzrokuju da se polarizacione krive menjaju sa vremenom i utiču na promene u svakoj tački na čeliku kao katodi. Dodajući nelinearne polarizacione krive potrebno je poznavati efekte na polarizacionoj krivoj opne napravljenoj zbog proticanja struje.

### 3.07. MODELI ZA FORMIRANJE OPNE

U problemu definisanja konturnih uslova, efekat formiranja opne predstavlja verovatno najsloženiji problem <sup>[02]</sup>. U slučaju jasno definisane površine metala i elektrolita, polarizaciona kriva može se odrediti eksperimentalno, jedini parametri su potencijal i gustina struje a odnosi između njih specifikuje dejstvo sa spoljnom provodnim sredinom. Da li je ova relacija data analitički ili tabelarno, manje je važno.

Razmatrajući razvoj sistema korozione zaštite, početno čist čelik kao katoda može se karakterisati pomoću polarizacionih krivih primenjenih u svakoj tački površine čelika. Metoda izneta napred je u principu dovoljno dobro da bi se odredio potencijal i gustina struje na celoj površini. Debljina i gustina opne koja se formira na površini metala zavisi od lokalne gustine struje. Posle izvesnog vremena, polarizaciona kriva na određenom mestu odgovara samo datim uslovima. Ako su ove krive poznate, može se praviti nov raspored struja, u principu različit od početne gustine. Tamo će se sada i dalje formirati opne i nove gustine struje a vršiće se dalja modifikacija polarizacionih krivih. Jasno je da će svaka tačka na površini, vremenski posmatrano imati različitu struju, a svaka tačka imati sopstvenu polarizacionu krivu koja nije direktno u vezi sa susednim tačkama. Empirijsko određivanje polarizacionih krivih sada nije odgovarajuće, od kada površina koja se meri zavisi od nepoznate protekle gustine proticanja struje. Nužno je napraviti model efekata opne sa električnim osobinama površine a u funkciji njegovog razvoja sa protokom struje.

Takav odgovarajući model može se testirati samo eksperimentalno proveravajući tačnost za predpostavljenu, određenu, specifikovanu proteklu struju, npr. stalnu struju, ili eksponencijalno opadajuću struju, ili intermitentnu struju.

Jasno je da se stvaranjem opne vezuju odeljene površinske strujne putanje i da se povećava otpornost proticanju struje. Kada se jednom napravi inicijalni pokrivač površine, dodatne opne povećavaju otpornost približno u funkciji gustine struje.

Matematički uvodimo poseban pad napona na elektrodi u obliku  $J \rho(t)$  sa



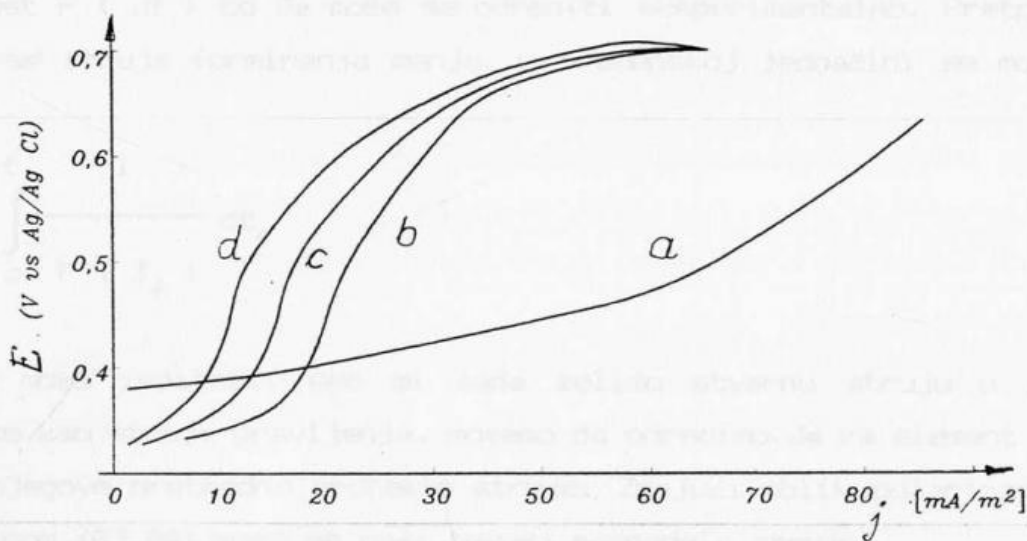
pretpostavkom da odnos povećanja  $\rho$  zavisi samo od struje, dajući

$$\frac{d\rho}{dt} = F(j) \quad (03.03)$$

Tako se, dajući početnu pretpostavku  $J$  po površini, može naći razvoj  $\rho$ .

Korisno je brzo proveriti takvu pretpostavku na sledeći način: pri stalnoj jednosmernoj, uniformnoj struji potencijal površine raste proporcionalno u vremenu; ako se ovo proveriti eksperimentalno i pokaže kao tačno,  $F(j)$  se može naći iz eksperimenta pri različitoj gustini struje; tako da se onda provere mogu napraviti na efektu specifičnog razvoja struja - vreme.

Ako se opna tretira kao porozna sredina, možemo izračunati iz poroznosti električni otpor kao i transport jona i promene u elektrohemiji pri očišćenom čeliku. Posle toga je nužno pravljenje pretpostavke oko debljine i poroznosti posebnog prekrivača formiranog pri određenoj gustini struje u skladu sa namerom da numerničke metode mogu da izračunaju dalji razvoj u funkciji vremena.



Slika 03.02. Polarizacione krive za opnaste površine ( opne formirane pri  $1A/m$  a = 70h b = 140h c = 210h d = 280h )

Pravljenje modela na različit način je moguće ako se eksperimentalni podaci mogu racionalizovati. Rad Grigireva [21] može se uzeti kao primer ovog procesa. Grigorev je predstavio polarizacione krive za površine sa opnama



formirane pod dejstvom " uspostavljene struje " tokom različitog perioda. Tipična familija krivih prikazana je na slici.

Mada su nominalno sve krive različite, razni radovi kao i matematičke metododonose interesantnu činjenicu da ako se svaka kriva normalizuje u strujnoj promenljivoj, pri čemu se tačka nesavitljivosti stavlja u jedinicu, onda su sve rezultujuće krive stvarno identične. Ovo potvrđuje da se sve ove krive, u funkciji različitih perioda pravljenja i različitim strujama pravljenja, mogu opisati pomoću jednačine oblika

$$\eta = f \left[ \frac{J}{J_s} \right] \quad (03.04)$$

gde je  $J_s$  određeno pomoću procesa formiranja. Da bismo koristili ovo smanjivanje, mora postojati mogućnost izračunavanja  $J_s$  iz prethodne zavisnosti struja - vreme. Matematički aparat pokazuje da je  $J_s$  inverzno proporcionalno vremenu stvaranja, mada sam proizvod  $J_s t_f$  zavisi od struje formiranja.

$$J_s t_f = F ( J_f ) \quad (03.05)$$

Zavisnost  $F ( J_f )$  od  $J_s$  može se odrediti eksperimentalno. Pretpostavlja se da ako se struja formiranja menja, u vremenskoj jednačini se može zameniti pomoću

$$\frac{1}{J_s} = \int_0^t \frac{1}{F ( J_f )} dt_f \quad (03.06)$$

Ovo se može ispitati. Ako mi sada želimo stvarnu struju u nekoj tački površine kao struje pravljenja, možemo da odredimo  $J_s$  za element površine na način njegove prethodno protekle struje. Znajući oblik polarizacione krive, jednačinom (03.04) može se naći tekuća raspodela struje.

Osnovni zadatak proračuna ili modelovanja svodi se na proračun raspodele korozionog toka po katodnoj površini.

$$j_n = - \sigma \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_s$$

Proračun se radi proveravajući raspodelu potencijala u korozionoj sredini a

zatim primenjujući Ohmov zakon u diferencijalnom obliku

### 3.08. SPECIFIČNI POVRŠINSKI OTPOR

Elektrohemijska zaštita se primenjuje kao kombinovana sa organskim premazima, čiji sastav u znatnoj meri utiče na raspodelu potencijala po površini koja se zaštićuje. Zahvaljujući svom otporu premaz izaziva odstupanje potencijala obojene površine, pa je potrebno usled toga posmatrati specifični površinski otpor  $\rho_p$ . Površinski otpor premaza naglo se smanjuje posle porinuća broda u vodu, a zatim lagano opada tokom vremena. U početku se brzo vodom pune krupne pore, a zatim se postepeno puni ceo mikropilarni sistem premaza. Dalje smanjivanje omskog otpora premaza dešava se na račun njegovih mehaničkih deformacija i pod delovanjem korozivnih procesa koji se dešavaju ispod sloja premaza. Specifični otpor premaza određuje se kao odnos tangensa ugla nagiba polarizacije karakteristike obojene površine prema apscisi gde se nanosi gustina struje.

Rezultati merenja otpora lako bojjenih premaza podvodne površine trupa [27] koji nisu opremljeni elektrohemijskom zaštitom i koji su ofarbani etanolskim farbama pokazali su da polarizacione karakteristike imaju linearan karakter nezavistan od stanja premaza a srednja vrednost prema trupu specifičnog površinskog otpora bitno zavisi od dužine eksploatacije broda.

Tabela 3.02. Orijentacione vrednosti specifičnog površinskog otpora premaza (  $\Omega m^2$  )

1 mesec posle farbanja	50,0 - 100,0
2 mesec posle farbanja	25,0 - 30,0
6 mesec posle farbanja	5,0 - 6,0
1 godina posle farbanja	2,5 - 3,0
2 godine posle farbanja	1,5 - 2,0
više od 3 - 4 godine	0,5 - 1,0

Analogna merenja na brodovima sa elektrohemijskom zaštitom pokazala su da je u početnom periodu eksploatacije posle farbanja, otpor premaza vrlo blizu vrednosti dobijenim na brodovima bez elektrohemijske zaštite. Posle 1,5 do 2 godine eksploatacije, vrednost otpora premaza stabilizuje se na vrednosti

bliskoj 5 om  $m^2$  i kod dalje eksploatacije do 4 - 5 godina praktično se ne menja.

Navedeni podaci odnose se na brod koji stoji. Mnogobrojna istraživanja pokazuju da za vreme plovidbe broda, struja katodne polarizacije potrebna za održavanje istog potencijala ofarbanog trupa za 20 - 80 % prevazilazi struju u sidrištu.

Kod zaštite nebojenih želičnih konstrukcija u morskoj vodi, specifični površinski otpor iznosi deseti deo oma po  $m^2$ , ili za red niže nego proračunska vrednost specifičnog otpora premaza za obojene površine. Ovo ukazuje na činjenicu da zaštita ovakvih površina zahteva veći broj anoda ili veću snagu uređaja katodne zaštite tako da je u mnogim slučajevima ovakva zaštita neekonomična. Zato se danas najracionalnijim smatra spoj bojenja i elektrohemijske zaštite.

## 04. OSNOVNA PRAVILA AKTIVNE KATODNE ZAŠTITE

Eksperimentalna ispitivanja pokazala su da je najekonomičniji vid zaštite trupa broda od korozije kombinovan sistem zaštite premazima i aktivnom katodnom zaštitom. Ispitivanja u svetu <sup>[29]</sup>, pokazala su da srednje povećanje hrapavosti trupa uzrokovano korozijom od oko  $150\mu\text{m}$ , utiče na potrebno povećanje snage broda za oko 10%.

U ovom delu prikazani su rezultati merenja korozije broda koji je proveo preko 20 godina u radu na moru, pravila na koja treba obratiti pažnju pri postavljanju komponenata aktivne katodne zaštite i značaj toga izražen od strane osiguravajućih društava.

### 4.01. VIŠEGODIŠNJI REZULTATI NAGRIZANJA TRUPA BRODA ZBOG KOROZIJE

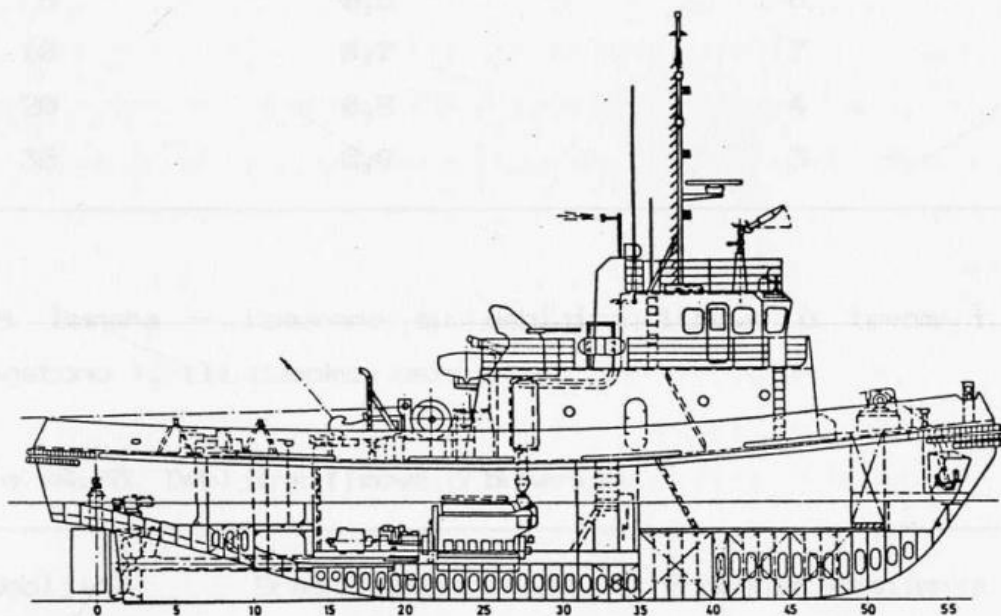
Radi kontrole i eksploatacionih podataka o nagrivanju trupa broda zbog korozije, izvršeno je snimanje debljine limova oplata broda napravljenog od čelika. Brod je proveo u radu po Ornom moru 23 godine. Snimanje je obavljeno ultrazvukom, a mestimično je kontrolisano probijanjem rupa na limovima i merenjem debljine limova. Brod je svake druge godine bio izvlačen na dok, pri čemu mu je i zaštita bila obnavljanja. Po Lojdu je normalno dokovanje svake godine. Nikako ne bi trebalo da pređe više od 36 mesece između dva dokovanja. Po registru SSSR <sup>[50]</sup> potrebno je otići na navoz u periodu eksploatacije do 2 godine. A ako se ide na dok posle 2 godine, potreban je specijalan nadzor i merenje debljine čelika. Inspekcija dolazi na brod svake godine radi pregleda.

Kod nas, tehnički nadzor radi utvrđivanja sposobnost brodova za plovidbu na unutrašnjim vodama utvrđuje Jugoslovenski registar brodova <sup>[33]</sup>. Redovni

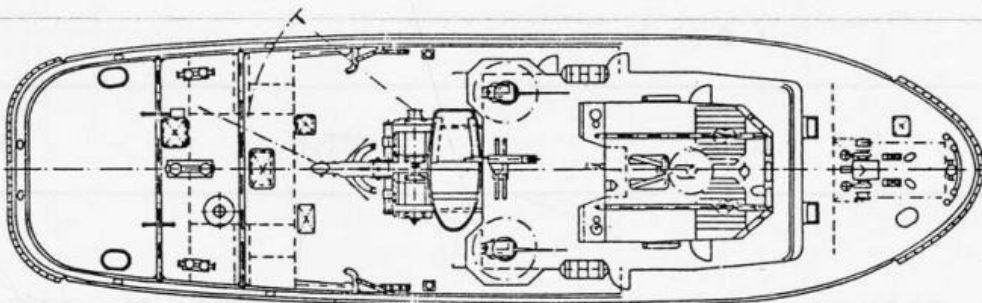
pregled trupa brodova sa sopstvenim pogonom radi se svakih 6 godina a brodova čiji je trup izgrađen od aluminijuma ili plastičnih masa svake 3 godine. Kontrolni pregled brodova starosti preko 24 godine radi se svake godine, a starosti do 24 godine svake 2 godine.

Tabela 04.01. Debljina limova oplata broda

Debljina ugrađenog lima ( mm )	Srednje smanjenje debljine limova zbog korozije ( mm )	Procenat smanjenja debljine limova zbog korozije ( % )	Napomena
6,5	0,65	10	limovi na granici vode i vazd.
8	0,46	5,8	limovi uz kobilicu
9	0,76	8,5	limovi ispod krme
11	0,77	7	limovi na pramcu



MAIN DECK  
GLAVNA PALUBA



Slika 04.01. Generalni plan remorkera



U tabelama 04.01, 04.02. i 04.03. date su srednje vrednosti smanjenja debljine limova u milimetrima i procentima a posebno za sapnicu. Merenja su izvršena na 231 mestu ultrazvukom. Kontrola snimanja debljine limova izvršena je probijanjem rupa na limovima i to na 5 mesta i merenjem debljine lima pomoću preciznog digitalnog pomičnog merila. Srednje vrednosti [52] sračunate su na osnovu neposrednog merenja jednake tačnosti.

Podaci o limovima na sapnici dati su u tabeli 04.02.

Tabela 04.02. Debljine limova na sapnici

Debljina ugrađenog lima ( mm )	Srednje smanjenje debljine limova zbog korozije ( mm )	Procenat smanjenja debljine limova zbog korozije ( % )
8	0,5	6
10	0,7	7
20	0,8	4
30	0,9	3

Limovi bunara - izmerene su debljine limova u levom i desnom bunaru ( kingstonu ), ili dubokom usisu.

Tabela 04.03. Debljine limova u bunarima

Debljina ugrađenog lima	Srednje smanjenje debljine limova zbog korozije ( mm )	Procenat smanjenja debljine limova zbog korozije ( % )
10	0,75	7,5

Interesantno je napomenuti da je od korozije najviše stradao krov kormilarnice koji je bio blago savijen i sa vertikalnim bočnim ivicama na kraju. Za vreme oluja, na krovu se skupljala morska voda, koja nije mogla

dobro da otiče, voda je isparavala a taložio se natrijum hlorid. S obzirom da je morski vazduh dosta vlažan, velika koncentracija jona praktično je razorila krov kormilarnice koji je toliko oslabio da je postao praktično porozan tako da se praktično mogao mestimično razoriti na malo jači pritisak prsta.

#### 4.02. STANICE KATODNE ZAŠTITE (UREĐAJI ZA NAPAJANJE)

Problem efikasnosti svodi se i na kvalitetan izbor stanica katodne zaštite s obzirom na njegov kvalitet izrade i trajnost. To prvenstveno znači da stanica katodne zaštite mora biti marinizirana ili urađena u skladu sa propisima JR - a, a zatim da talasnost izlaznog napona i struje bude što je moguće manja.

Električni uređaji moraju biti proračunati na trajan i siguran rad u sledećim uslovima: za temperaturu unutrašnjih brodskih prostora uzima se temperatura  $+ 45^{\circ}\text{C}$ , a trajan rad se računa sa vlažnošću  $75 \pm 3\%$  pri temperaturi  $+ 45^{\circ}\text{C}$ . Sva elektrooprema mora trajno i pouzdano da radi pri dugotrajnom bočnom nagibu od  $15^{\circ}$  i uzdučnom nagibu broda od  $10^{\circ}$ . Pored toga, ovi uređaji moraju raditi sigurno i biti mehanički izdržljivi pri vibracijama frekvencije 5 - 36 Hz sa određenim amplitudama i ubrzanjima. Stanice katodne zaštite moraju raditi ispravno kod kratkotrajnih odstupanja (manjih od 1,5 s) od nazivnih veličina napona  $+15\% - 30\%$  i frekvencije  $+10\% - 10\%$  a kod dugotrajnih za napon  $+6\% - 10\%$  i za frekvenciju  $\pm 5\%$ .

Prema konkretnoj primeni na brodovima unutrašnje plovidbe ili na manjim ili većim morskim brodovima, može se izvršiti podela stanica katodnih zaštita prema izlaznoj snazi.

#### 4.03. STANICA KATODNE ZAŠTITE MALIH SNAGA

Radi primene na brodovima unutrašnje plovidbe a s obzirom na veličinu plovnih objekata i otpornosti rečne vode, ne očekuju se više vrednosti izlaznih napona od 15 V kao ni struja većih od 5 A. Korisna snaga ispravljača iznosi do 75 W.

Radi napajanja sistema aktivne katodne zaštite kod malih čamaca u rečnoj i

morskoj vodi moguće je prema potrebnoj snazi koristiti i sunčanu energiju [92] i biti potpuno nezavisan od spoljnih izvora energije.

Ispravljači ove snage mogu se napajati iz jednosmerne mreže standardnog brodskog napona 24 V ili naizmenične 220 V, 50 Hz. Regulaciju izlaznog napona iz stanica katodne zaštite moguće je uraditi na nekoliko načina:

- Otpornička regulacija

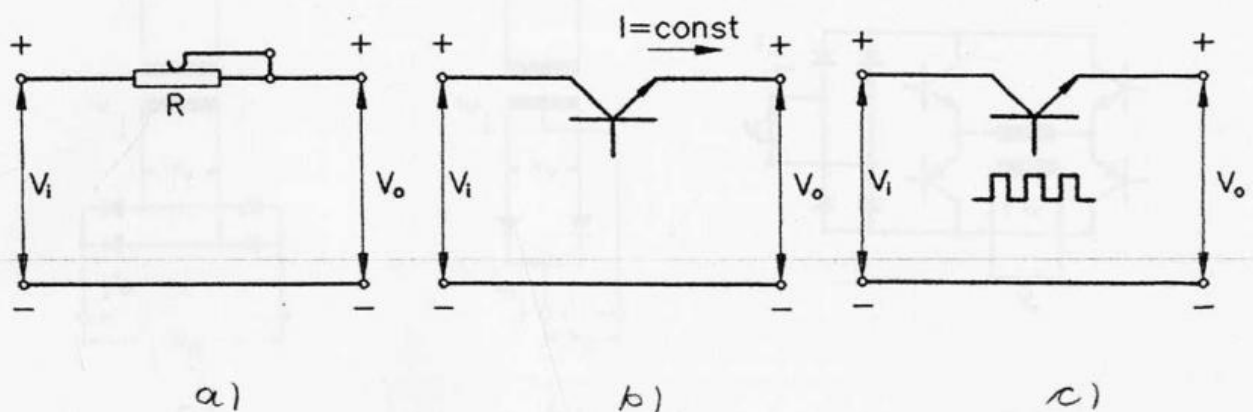
Je energetska rasipna ali investiciono jeftina metoda. Talasnost izlaznog napona je minimalna, ali struja zaštite zavisi od napona izvora koji se može menjati u granicama  $24\text{ V} \pm 15\%$ . Regulacija izlaznog napona je ručna što je nepovoljno za automatske sisteme kojima se danas teži.

- Naponski i strujni regulatori

Je takođe rasipna, jeftina metoda kod koje zaštitna struja ne zavisi od napona izvora. Talasnost izlaznog napona je minimalna. Moguće je izvesti automatsko podešavanje izlazne struje.

- čoperski regulatori

Predstavljaju savremena, ekonomična rešenja, ali sa velikom talasnošću koja se može lako popraviti, posebno za male snage. Pogodni su za automatske regulatore jer imaju mogućnost održavanja stalne struje, napona ili regulisanja ovih veličina tako da bi se održao stalan zaštitni potencijal štice objekta.



Slika 04.02. Stanice katodne zaštite male snage a) Otpornička regulacija b) Naponski i strujni regulatori c) čoperski regulatori

#### 4.04. STANICE KATODNE ZAŠTITE SREDNJIH SNAGA

U principu predviđene su za napone do 10 V i za struje do 50 A, tj za snage do 500 W. Napajaju se iz monofazne mreže 220 V ili 3 \* 380 V, 50 Hz. Moguća rešenja su:

- Monofazni Grečov spoj

Ovo je jeftino, prosto, i pouzdano rešenje. Postoji velika talasnost izlaznog napona koja se može smanjiti. Regulacija izlaznog napona može biti ručna pomoću autotransformatora ili automatska sa tiristorima na primarnoj ili sekundarnoj strani.

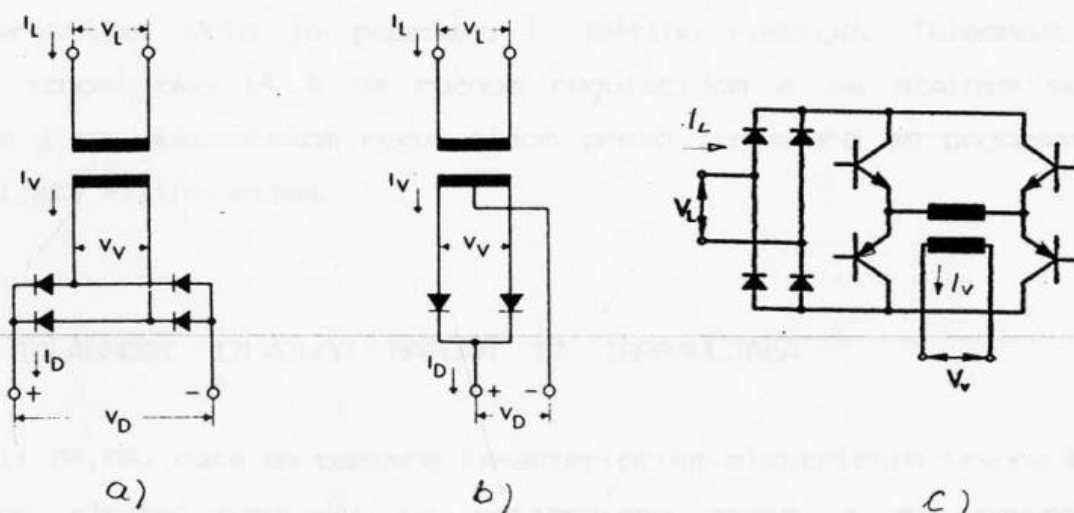
- Ispravljač sa srednjim izvodom

Jeftino, prosto i pouzdano rešenje sličnih izlaznih karakteristika kao i prethodno. Nužno je filtriranje izlaznog napona sa kondenzatorima ili induktivnostima radi poboljšanje izlazne talasnosti.

- Visokofrekventni AC / DC pretvarači

Sadrže ispravljač ulaznog napona i pretvaranje u promenljiv izlazni napon u funkciji referentnog napona. Mada je ovo rešenje predviđeno isključivo za automatski rad, još u potpunosti nije razvijeno za primenu u brodogradnji.

Ostala rešenja su kao kod stanica katodne zaštite velikih snaga.



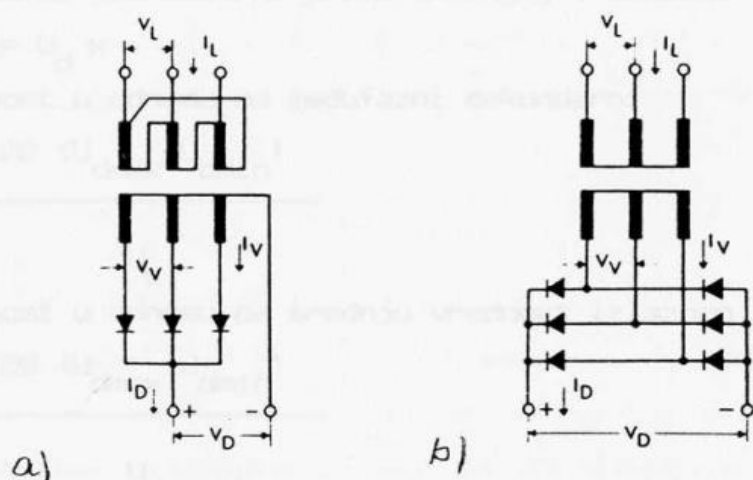
Slika 04.03. Stanice katodne zaštite srednjih snaga a) Monofazni grečov spoj b) Jednofazni polutalasni ispravljač c) Visokofrekventni AC/DC pretvarač

#### 4.05. STANICE KATODNE ZAŠTITE VELIKIH SNAGA

Definisale bi se za napone do 20 V i za struje preko 50 A, tj za snage iznad 1.000 W. Ispravljači za ove snage napajali bi se iz mreže 3 x 380 V i moguća rešenja su sledeća:

- Trofazna zvezda

Pouzdana rešenje, manje jeftino. Talasnost izlaznog napona sa ručnom regulacijom (preko autotransformatora) iznosi oko 60 % a sa automatskom regulacijom i sa tiristorima je nešto viša tako da se mora filtrirati.



Slika 04.04. Stanice katodne zaštite velikih snaga a) Trofazna zvezda  
b) Trofazni grečov spoj

- Trofazni Grečov spoj

Ovo rešenje, upoređeno sa ostalima i to sa diodama ima najbolje prirodne karakteristike. Vrlo je pouzdano i jeftino rešenje. Talasnost izlaznog napona iznosi oko 14 % sa ručnom regulacijom a sa stalnim sekundarnim naponom i sa automatskom regulacijom preko tiristora se pogoršava i mora popravljati filtriranjem.

#### 4.06. TALASNOST IZLAZNOG NAPONA IZ ISPRAVLJAČA

U tabeli 04.04. date su osnovne karakteristike električnih izvora koji se sa primarne strane napajaju sa naizmenične mreže a na sekundaru daju jednosmerni napon bez filtriranja.

Osnovni parametri u tabeli označeni brojevima 1 - 8 definisani su pre toga. Sve vrednosti primenjene su na omsko opterećenje. Pretpostavlja se da su



gubici u ispravljaču i u transformatoru zanemarljivi.

1. Jednosmerni u praznom hodu

$$U_d = U_s \times$$

2. Minimalni jednosmerni prema sekundarnom međufaznom

$$U_{dmin} = U_s \times$$

3. Minimalni jednosmerni prema srednjoj vrednosti izlaznog

$$U_{dmin} = U_d \times$$

4. Maksimalni jednosmerni prema međufaznom sekundarnom

$$U_{dmax} = U_s \times$$

5. Maksimalni jednosmerni prema srednjoj vrednosti izlaznog

$$U_{dmax} = U_d \times$$

6. Talasnost u odnosu na međufazni sekundarni

$$w = \frac{100 (U_{dmax} - U_{dmin})}{U_s}$$

7. Talasnost u odnosu na srednju vrednost izlaznog

$$w = \frac{100 (U_{dmax} - U_{dmin})}{U_d}$$

8. Talasnost u odnosu na maksimalni izlazni

$$w = \frac{100 (U_{dmax} - U_{dmin})}{U_{dmax}}$$

Tabela 04.04. Karakteristike diodnih ispravljača

Redni broj	Jednofazni polutalasni	Monofazni grecov spoj	Trofazna zvezda	Trofazni grecov spoj
1.	0,45	0,90	0,675	1,35
2.	0,00	0,00	0,408	1,225
3.	0,00	0,00	0,604	0,907
4.	1,41	1,41	0,816	1,410
5.	3,14	1,57	1,21	1,047
6.	141	141	40,8	18,5
7.	314	157	60,4	14
8.	100	100	50	13,6

Za obavljenja ispitivanja na brodu dizalici u bazenu brodogradilišta "Beograd" korišten je ispravljač velike snage na primaru napojen sa naizmjenične mreže 3 x 380 V a na sekundaru je moguća ručna promena izlaznog napona od 0 - 20 V. Ispravljač je dimenzionisan za stalnu struju do 50 A. S obzirom da na sekundaru ima trofazni Grečov spoj dioda talasnost izlaznog napona iznosi 14 %.

#### 4.07. POTROŠNJA ANODA

Kvalitet izvedene aktivne katodne zaštite ogleda se po vrstama upotrebljenih anoda. U morskoj vodi to su elektrode od titana sa prevlakama od rutenijum oksida sa debljinama koje i u najtežim uslovima eksploatacije obezbeđuju ispravan rad od 5 godina. U rečnoj vodi to su anode od titana sa prevlakama od platine.

Uticaj talasnosti struje na iznos anodne korozije može biti jako veliki. Primena polutalasnih napona normalne mrežne frekvencije 50 Hz ili kvadratnih talasnih oblika uslovljava visoke iznose korozione potrošnje. Zbog toga se ne preporučuje veća talasnost struje od 5 %, a ukoliko postoji, nužno je ubacivanje određenih induktivnosti u kolo.

Tabela 04.05. Potrošnja platiniziranih titanskih anoda u morskoj vodi saliniteta 3,5 % i temperature 20°C

Gustina struje $A m^{-2}$	Iznos korozije	
	$\mu g m^{-2} h^{-1}$	$\mu g A^{-1} h^{-1}$
150	0,20	1,33
300	0,32	1,07
500	0,30	0,60
700	0,26	0,37
800	0,28	0,35
1.000	1,05	1,05
2.000	2,00	1,00

Laboratorijska i eksperimentalna ispitivanja [45], [49] pokazala su da

korozija anoda od titana sa prevlakama od platine zavisi od struje, saliniteta morske vode i temperature. U tabeli 04.05. dati su neki podaci o potrošnji platiniziranih titanskih elektroda u morskoj vodi.

Kako se u standardnom izvođenju sistema aktivne katodne zaštite kablovi vode i povezuju sa anodama u trupu broda, potrebno je da budu standardni energetski, brodske izvedbe tip MGCG. Presek treba da je u skladu sa maksimalnom strujom koja može proći kroz anodu i sa dozvoljenim padom napona u strujnim kolima.

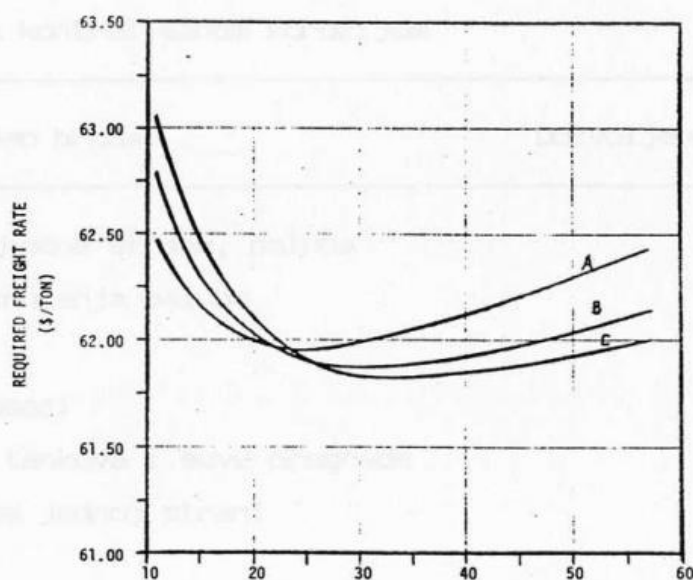
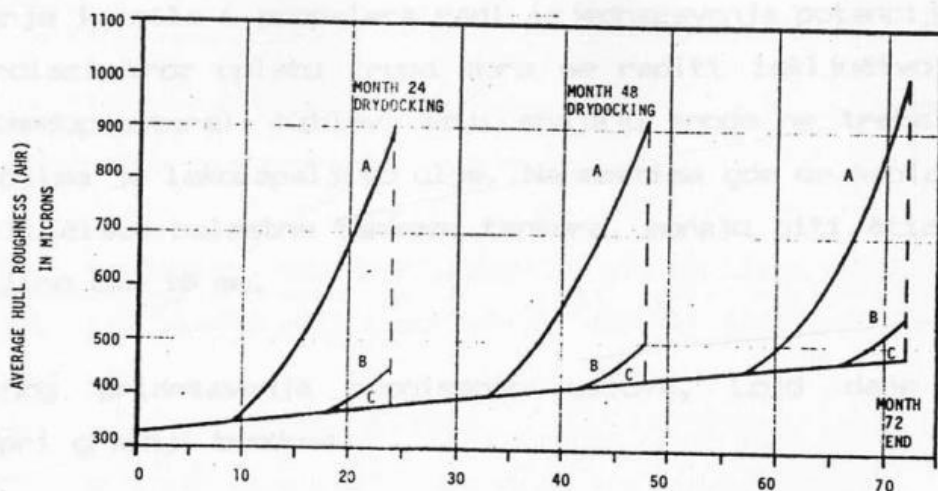
Na mestima gde provodnik sa strujom prolazi kroz oplatu broda, a radi sprečavanja eventualnog ulaska vode u brod, neophodno je napraviti mali koferdam (meduprostor). Normalno da nije poželjno ugrađivati ovaj koferdam u balastne tankove kao i u kaljužni prostor.

#### 4.08. KOMPJUTERSKI SISTEM ZA ANALIZU STRATEGIJE ODRŽAVANJA PROPELERA I TRUPA

Radi dugoročne strategije održavanja podvodnog dela broda, u proučene su praktične vrednosti oštećenja koja prouzrokuju podvodna korozija i obrastanje trupa i propelera i napravljen je odgovarajući program sa ekonomskom analizom.

SPAN<sup>[36]</sup> je mikrokompjuterski program napravljen tako da obezbedi tehno-ekonomsku analizu rada broda, ukoliko su poznati podaci o nameni broda, pogonski uređaj i karakteristike propelera, program održavanja propelera i trupa planiran za brod, projektovan profil trgovačkih putovanja, kao i specifična cena i struktura prihoda. Kombinujući rigoroznu tehničku analizu faktora kojom se povezuju brodske osobine sa krutom finansijskom analizom, SPAN omogućuje operatoru broda da direktno procenjuje dugoročni uticaj promenljivog sistema sa premazima na trupu strategiju čišćenja propelera. Kao rezultat, mogu se donositi odluke s obzirom na program održavanja trupa i propelera na osnovu direktnog poređenja ekonomske dobiti.

Da bi se prikazale mogućnosti SPAN - a, analizirana su tri broda, nosač suvog rasutog tereta 36.000 DWT, tanker od 40.000 DWT i kontejnerski brod od 1.700 TEU kapaciteta. Korištena su tri tipa zaštitnih premaza: konvencionalni, dugotrajni i samopolirajući ili ablativni. Svi premazi su



Slika 04.05. Prosečna hrapavost trupa broda a) i potrebna cena vozarine b) u funkciji vremena između dokovanja za nosač rasutog tereta

napravljeni za dve namene, zaštitu od korozije i obrastanja. Zaštita od korozije obezbeđena je antikorozionim premazima dok je zaštita od obrastanja obezbeđena takođe odgovarajućim premazima. Na slici 04.05. prikazani su neki rezultati za nosač rasutog tereta.

#### 4.10. ZNAČAJ SISTEMA KATODNE ZAŠTITE

Značaj aktivne katodne zaštite toliko je velik da ga i najveća klasifikaciona društva kao Lloyd <sup>[45]</sup> ugrađuju u propise.

Da bi se primenio sistem aktivne katodne zaštite moraju se doneti na overu

planovi smeštaja anoda, referentnih elektroda, sheme njihovog povezivanja kao i spajanje kormila i propelera radi izjednačavanja potencijala. Prostor gde kabl prolazi kroz oplatnu trup mora se raditi isključivo preko malog koferdama (međuprostora). Kablovi koji spajaju anode ne treba voditi kroz tankove u kojima je lakozapaljivo ulje. Na mestima gde se kablovi vode kroz koferdame ili čiste balastne tankove tankera, moraju biti štice čeličnim cevima debljine oko 10 mm.

Kod striktnog pridržavanja propisanih uslova, Lojd daje i određene beneficije pri gradnji brodova.

Tabela 04.06. Dozvoljeno procentualno smanjenje debljine čelika kod sistema sa kontrolisanom korozijom

Deo broda	Dozvoljeno smanjenje debljine
Kobilica, dno i bočne strane, paluba	
Dno i uzdučna ukrućenja palube	5 procenata
Dno i palubni nosači	
Ivične površine tankova i suve pregrade zaštićene samo na jednoj strani	5 procenata
Strukturni delovi tanka minimalne debljine sem uljnih kargo tankova i suvih tankova zaštićenih sa obe strane	1 mm ili 10 procenata manja vrednost
Uzdužne strane, ukrućenja pregrada ( unutar zaštićenog prostora), i svi drugi strukturni delovi potpuno unutar prostora, ili koji formiraju granicu između dva zaštićena prostora, osim kao što je navedeno napred	10 procenata

Pri ovome je važno uzeti u obzir sledeće:

1. Modul srednjeg preseka trupa i dozvoljeni procenat smanjenja za uzdužna ojačanja moraju se odrediti pre smanjenja za primenjenu kontrolisanu koroziju. Međutim, koristeći dozvoljeno smanjenje, u nekom slučaju može se dobiti da



je minimalna debljina srednjeg preseka manja od 95 % dobijenih proračunom.

2. Smanjenje debljine premaza brodskog trupa nije preporučljivo zbog priključenja pogodne spoljne katodne zaštite.

3. Dozvoljeno smanjenje debljine uzdužnih delova koji doprinose ojačanju nosača trupa, biće dozvoljeno samo ako su delovi zaštićeni u punoj dužini tovarnog prostora.

4. Nije dato smanjenje za premaze u suvom tovarnom prostoru.

U principu je došlo rešenje za opterećenje potražnje u inženjerskoj praksi prilikom analitičkih rešenja, ali je samo za određeni broj prostih slučajeva moguće u literaturi pronaći približna ili ta rešenja.

Raspodela naponskih stanja u ovom proračunu slučajevima predstavlja idealizovane slučajeve, koji mogu u nekim slučajevima dovesti do nepoželjnog povećanja napona, što može dovesti do oštećenja ili čak do propadanja delova. Stoga je potrebno biti oprezan prilikom primene ovakvih rešenja.

Za dva pojednostavljena i idealizovana slučaja određivanja napona struje i potencijala koristeći se jednačinom za elastične polje vremenski promenljivih struja [17].

#### 5.01. ELEKTRODINAMIČKI MODEL RAZ SISTEMA

Postoje tri vrste sistema, to su: statički, dinamički i elastični. Statički sistem je sistem u kome se ne uzima u obzir vremenski promenljivi tok struje i potencijala. Dinamički sistem je sistem u kome se uzima u obzir vremenski promenljivi tok struje i potencijala. Elastični sistem je sistem u kome se uzima u obzir vremenski promenljivi tok struje i potencijala, kao i deformacije sistema. U ovom radu se razmatra elastični sistem, koji je najkompleksniji i najteže rešiv. U ovom radu se razmatra elastični sistem, koji je najkompleksniji i najteže rešiv. U ovom radu se razmatra elastični sistem, koji je najkompleksniji i najteže rešiv.

Nakon toga se može napisati jednačina [17]:

$$\Delta u = \text{div}(\text{grad} u) + f(x, y, z, t) \quad (5.1)$$



## 05. DVODIMENZIONALNI I TRODIMENZIONALNI PROBLEMI KOJI SE MOGU ANALITIČKI REŠITI

U principu je dosta teško za opšte slučajeve potrebne u inženjerskoj praksi pronaći analitička rešenja, ali je samo za određen broj prostijih slučajeva moguće u literaturi pronaći približna ili empirijska rešenja.

Raspodela naelektrisanja u ovako uprošćenim slučajevima predstavlja idealizovane slučajeve, koji mogu u nekim slučajevima doprineti boljem sagledavanju problema elektrohemijske zaštite od korozije ili boljem sagledavanju nekih drugih elektrohemijskih postupaka.

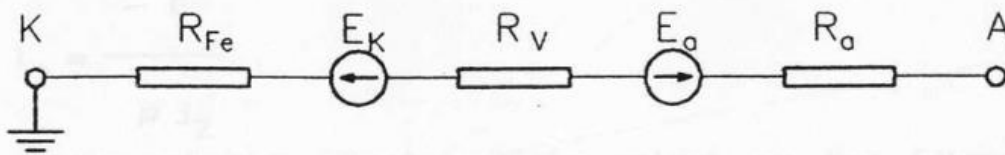
Za ove pojednostavljene i idealizovane slučajeve određivanja raspodela struja i potencijala korišćene su jednačine iz oblasti električnih polja vremenski konstantnih struja [57].

### 5.01. ELEKTROHEMIJSKI MODEL AKZ SISTEMA

Pošto je voda elektrolit, između anode i čelika javljaju se elektrohemijske pojave, prvenstveno pad napona i proizvodnja mehurića. Smatra se da proizvodnja gasa postoji samo u tankom omotaču oko broda koja je za ceo red manja od hidrodinamičkog graničnog sloja, a za uslove u rečnoj vodi može se zanemariti. Elektrolitički pad napona javlja se zbog termodinamičkih potencijala anode i katode  $E_{th}^a$   $E_{th}^k$ , prenapetosti anode i katode  $\eta_a$  i  $\eta_k$  kao i pada napona u vodi  $RI$  [11],[61]. Napon izvora mora da podmiri i padove napona u samom izvoru kao i u provodnicima.

Napon izvora može se napisati u obliku

$$\Delta U = E_{th}^a + \eta_a + RI + \eta_k + E_{th}^k \quad (05.01)$$



Slika 05.01. Elektrohemijski model sistema aktivne katodne zaštite

Elektrodne polarizacije na katodi i anodi zavise od gustine struje, ali njihov red veličine iznosi  $\eta_a \geq 1,5$  V, a  $\eta_k \leq 0,5$  V. Termodinamički potencijali anode i katode dati su kao normalni elektrohemijski potencijali, i u principu su poznati. Glavnina napona iz stanice katodne zaštite ili ispravljača pojavljuje se kao pad napona u vodi.

Radi praktične raspodele potencijala i gustine struje ispod trupa broda, potrebno je imati nekoliko osnovnih podataka:

1. potrebno je znati maksimalno dozvoljenu prenapetost štice metalna uz okolnoanodni ekran  $\eta_1$  ili  $\eta_{max}$  i minimalnu potrebnu prenapetost metalna najudaljenije tačke od elektrode  $\eta_2$  ili  $\eta_{min}$
2. pored toga poznato je i rastojanje do najudaljenije tačke na štice površini od elektrode.
3. sa krivih polarizacije štice metalna, na osnovu prenapetosti metalna moguće je odrediti gustinu struje  $j_1$
4. iz Tafelove jednačine moguće je naći i odnos maksimalne i minimalne gustine struje

Tabela 05.01. Odnosi prenapetosti i gustina struja na oplati trupa

$\eta_{max} / \eta_{min}$	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6
$j_2 / j_1$	7,4	12,2	20,1	33,1	54,6	90,0	148,4	403,4

5. elektromotornu silu ili pad napona u vodi, moguće je naći na osnovu jednačine

$$E_V = \rho l_1 j_1 \quad (05.02)$$

6. pošto je poznata udaljenost maksimalne tačke od elektrode  $l_1$ , potrebno je pronaći dimenzije okoloanodnog ekrana  $l_2$

$$l_2 = \frac{E}{\rho j_2} \quad (05.03)$$

7. ukupna potrebna struja zaštite nalazi se kao integral po površini traženih gustina struja

8. anodna polarizacija nalazi se kao funkcija gustina struje na anodi

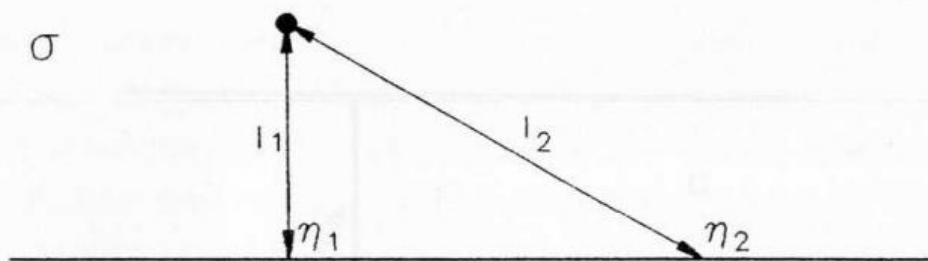
9. na osnovu Kirhofovog zakona lako se nalazi i potreban napon izvora

$$U_{iz} = \eta_a + E_v + \eta_k$$

Kadkad se, sa zadovoljavajućom tačnošću, u praksi može koristiti ovaj uprošćeni algoritam.

#### 5.02. RASPODELA POTENCIJALA IZMEĐU TANKE ŽICE ZANEMARLJIVE DEBLJINE I TAČKE KOJA STVARA TO NAELEKTRISANJE

Na slici 05.02. shematski je prikazana tačka koja stvara naelektrisanje i žica zanemarljive debljine.



Slika 05.02. Žica zanemarljive debljine i tačka koja stvara to naelektrisanje

Na osnovu poznate maksimalne prenapetosti moguće je sa krive polarizacije odrediti maksimalnu gustinu struje  $j_1$ . Jedna dosta gruba aproksimacija je da je rastojanje  $l_1$  veličina koja određuje otpornost između anode i posmatrane tačke 1 na katodi.

Kako duž cele žice važi Tafelova zavisnost

$$j_2 = j_1 \exp \left( \eta_2 / \eta_1 \right) \quad (05.04)$$

i poznajući vrednost minimalnog zadatog potencijala  $\eta_2$  u tački 2, može se dobiti jednačina

$$l_2 = \frac{\eta_2 - \eta_1 + \rho j_1 l_2}{\rho j_1 \exp(\eta_2 / \eta_1)} \quad (05.05)$$

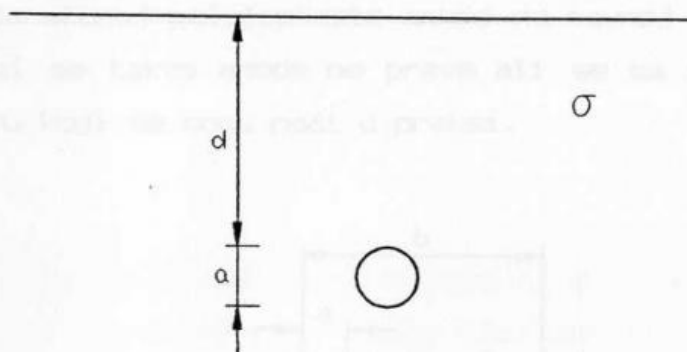
Potreban napon izvora ili pad napona između anode i katode se u ovom slučaju može naći na osnovu Kirhofovog pravila:

$$E = \eta_a + \rho l_1 j_1 - \eta_1$$

Ukupan napon stanice katodne zaštite dobija se povećanjem ovog napona za određene gubitke u provodnicima do anode i na spojevima u kolu i praktično se može povećati za 10%.

### 5.03. SFERIČNA ANODA UDALJENA OD RAVNE PLOČE

Jedan od najprostijih slučajeva pogodan za razmatranje, a koji istovremeno predstavlja osnov za uprošćenje drugih slučajeva, je sferična anoda na ravnoj ploči prikazana na slici 05.03. Specifična provodnost sredine iznosi  $\sigma$ .



Slika 05.03. Ploča naelektrisana sferičnom anodom

Ako se pretpostavi da je anoda sferična poluprečnika  $a$  i na dovoljno velikoj udaljenosti od ravne ploče  $d$ , zbog simetrije će strujnice biti radijalne, tako da se na nekoj razdaljini od centra anode može naći gustina struje:



$$J = \frac{I}{4 \pi r^2} \quad (05.06)$$

Razlika potencijala između anode i proizvoljne tačke dovoljno daleko da se efekat provodne ploče može zanemariti iznosi:

$$\varphi_a - \varphi_\infty = \frac{I}{4 \pi \sigma} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I}{4 \pi \sigma a}$$

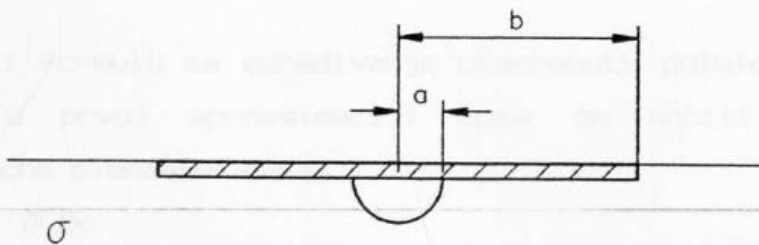
Otpornost anode lako se može naći kao odnos ove razlike potencijala i struje anode:

$$R = \frac{\varphi_a - \varphi_\infty}{I} = \frac{1}{4 \pi \sigma a} \quad (05.07)$$

Ova jednačina može doprineti brzom sagledavanju otpornosti elektroda naročito od loptastih ili valjkastih ovezanih elektroda.

#### 5.04. POLULOPTASTA ANODA NA RAVNOJ PLOČI

Jedan od najjednostavnijih i najrasprostranjenijih slučajeva, pogodan za razmatranje, je slučaj poluloptaste anode na ravnoj ploči prikazan na slici 05.04. U praksi se takve anode ne prave ali se sa ovim mogu aproksimirati drugi slučajevu koji se mogu naći u praksi.



Slika 05.04. Ploča naelektrisana poluloptastom anodom

Ako se pretpostavi da je anoda poluloptasta poluprečnika **a**, i dovoljno velikog okoloanodnog ekrana **b**, zbog simetrije će strujnice vektora gustine struje biti radijalne, tako da se može naći gustina struje na sličan način

kao kod sferične anode:

$$J = \frac{I}{2 \pi r^2}$$

Otpornost anode se lako može naći koristeći se istim postupkom kao kod sferične anode. Može se uzeti u obzir da je površina anode ekvipotencijalna a da je poluprečnik anode znatno manji od poluprečnika okoloanodnog ekrana ( $a \ll b$ )

$$R = \frac{\varphi_a - \varphi_\infty}{I} = \frac{1}{2 \pi \sigma a} \quad (05.08)$$

U prvoj aproksimaciji, može se poluloptasta anode aproksimirati kružnim diskom odgovarajućeg poluprečnika  $r$ , tako da se napred izveden obrazac može iskoristiti i za taj slučaj.

#### 5.05. PRAVOUGAONA RAVNA ELEKTRODA ( PLOČASTA ELEKTRODA )

Čest, realan slučaj je pravougaona elektroda sa pravougaonim okoloanodnim ekranom na ravnoj metalnoj površini broda. Ako su strane elektrode  $L$  i  $B$ , sa određenom tačnošću može se površina ove ploče svesti na površinu kruga sa ekvivalentnim poluprečnikom  $a$ .

$$a = \frac{\sqrt{L B}}{\sqrt{\pi}}$$

Koristeći formulu za određivanje otpornosti poluloptaste anode ili kružnog diska, u prvoj aproksimaciji može se dobiti ekvivalentna otpornost pravougaone pločaste anode.

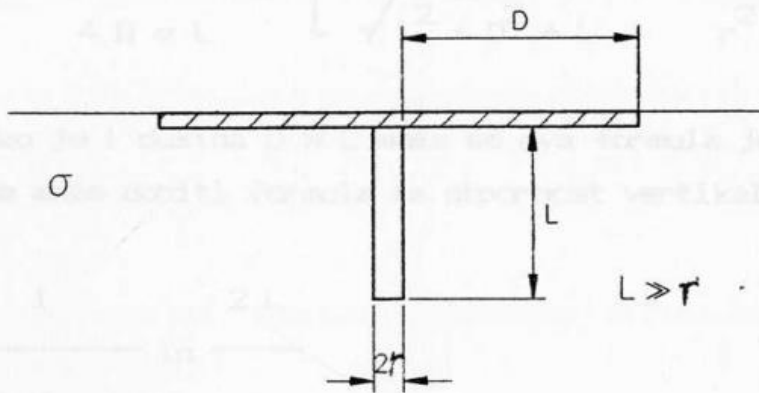
$$R = \frac{0,56}{2 * \sigma \sqrt{L B}} \quad (05.09)$$

U daljim razmatranjima se ova formula može često naći kao približna za izračunavanje otpornosti anode, pod pretpostavkom da je ivica okoloanodnog ekrana na dovoljno velikoj distanci od elektrode. Proizvod ukupne struje izvora i ove vrednosti otpora elektrode daje pad napona u vodi.

### 5.06. VERTIKALNA ELEKTRODA U OBLIKU ŠTAPA

Mogući način izvođenja jednostavnijih sistema aktivne katodne zaštite je u vidu metalne šipke vertikalno postavljene u elektrolitu ( slika 05.05.). Po teoremi likova, ovo je ekvivalentno elektrodi u vidu štapa dvostruke dužine u homogenoj provodnoj sredini, sa strujom jačine  $2I$ . Važno je napomenuti, da je uzeta pretpostavka pri izvođenju formule, da je dužina štapa znatno veća od poluprečnika šipke,  $L \gg r$ .

Potencijalna razlika između elektrode i trupa broda ( metalne površine ) iznosi:



Slika 05.05. Vertikalno postavljena elektroda

Potencijal bilo koje tačke  $x$  na površini broda mora se naći prema jednačini:

$$\varphi = \frac{I}{4 \pi \sigma L} \ln \frac{\sqrt{L^2 + (r + D)^2} + L}{\sqrt{L^2 + (r + D)^2} - L}$$

Za tačku uz ivicu elektrode (  $D = 0$  ), može se dobiti:

$$\varphi_1 = \frac{I}{2 \pi \sigma L} \ln \frac{2L}{r}$$

Za najbližu tačku na trupu broda:

$$\varphi_2 = \frac{I}{4 \pi \sigma L} \ln \frac{\sqrt{L^2 + (r+D)^2} + L}{\sqrt{L^2 + (r+D)^2} - L}$$

Tako da je:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{I}{4 \pi \sigma L} \ln \left\{ \frac{\sqrt{L^2 + (r+D)^2} - L}{\sqrt{L^2 + (r+D)^2} + L} * \frac{4 L^2}{r^2} \right\}$$

ukoliko je  $D \gg d$  formula se može nešto uprostiti

$$\varphi_1 - \varphi_2 \approx \frac{I}{4 \pi \sigma L} \ln \left\{ \frac{\sqrt{L^2 + D^2} - L}{\sqrt{L^2 + D^2} + L} * \frac{4 L^2}{r^2} \right\}$$

A ukoliko je i dužina  $D \gg L$  može se ova formula još više uprostiti i na taj način se može dobiti formula za otpornost vertikalno postavljene elektrode:

$$R_{ve} = \frac{1}{2 \pi \sigma L} \ln \frac{2 L}{r} \quad (05.10)$$

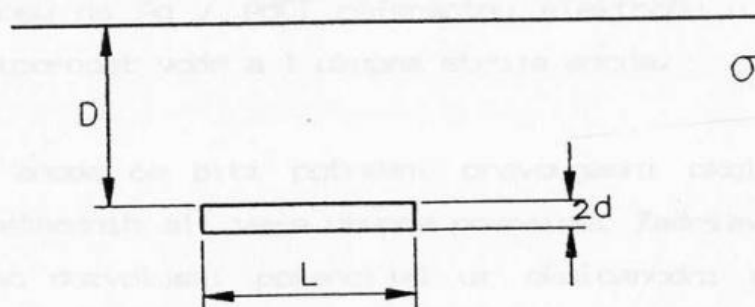
I ova formula se često može naći u literaturi za brzo ali približno izračunavanje otpornosti elektrode i nalaženje potrebnog napona izvora.

## 5.07. HORIZONTALNA ELEKTRODA U OBLIKU ŠTAPA

Mogući način izvođenja jednostavnijih sistema zaštite je u vidu metalne šipke horizontalno postavljene uz trup broda ( slika 05.06. ). Po teoremi likova, uticaj neprovodne sredine iznad trupa broda može se zameniti likom uzemljivača.

Otpornost horizontalno postavljene štapaste elektrode i okolnog prostora može se naći pomoću formule:

$$R_{he} \approx \frac{1}{8 \pi \sigma L} \ln \left\{ \frac{4 L^2}{r^2} * \frac{\sqrt{L^2 + 4 D^2} + L}{\sqrt{L^2 + 4 D^2} - L} \right\} \quad (05.10)$$



Slika 05.06. Horizontalna elektroda u obliku štapa

ukoliko je  $D \gg L$  formula se može nešto uprostiti

$$R_{he} = \frac{1}{4 \pi \sigma L} \ln \frac{2 L}{d} \quad (05.11)$$

i može se svesti na otpornost stapastog vertikalnog uzemljivača dužine  $2 L$  u neograničenoj sredini.

Ove formule dosta se koriste naročito u praktičnijom i potrebnim za inženjersku praksu.

## 5.08. BRITANSKI STANDARDI

Britanski standard za korozivnu zaštitu CP 1021 dao je preporuke [06], za oblik i veličinu okoloanodnih ekrana. Ove karakteristike se u principu mogu odrediti pomoću maksimalne struje koju daju anode.

Potpuno je logično da anode u obliku okruglog diska treba da imaju i okrugle okoloanodne ekrane. Dimenzije okoloanodnih ekrana moraju biti dovoljne da zadovolje uslov da je potencijal na ivici okoloanodnog ekrana i metala u dozvoljanim granicama da ne bi došlo do razaranja boja na trupu broda. Potencijal  $\phi$  na razdaljini  $r$  od centra anode u obliku diska može se izračunati približno iz formule:



$$\varphi = \varphi_0 - \frac{\rho I}{2 \pi r} \quad (05.12)$$

gde je  $\varphi_0$  najniži dozvoljeni potencijal trupa broda koji se štiti (normalno 0,8 V u odnosu na Ag / AgCl referentnu elektrodu u morskoj vodi),  $\rho$  je specifična otpornost vode a I ukupna struja anode.

Za izdužene anode će biti potrebni pravougaoni okoloanodni ekrani manje širine od prethodnih ali veće ukupne površine. Zadržavajući isti kriterijum za maksimalno dozvoljeni potencijal uz okoloanodni ekran može se dobiti približna formula za ovaj potencijal na distanci r od anode dužine L:

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{\rho I}{\pi r} \left\{ \ln \frac{2r}{L} - 1 \right\} \quad (05.13)$$

Anodna otpornost se računa pomoću empirijske formule<sup>[15]</sup> dobijene iz modifikovane Dvajtove formule:

$$R_a = \frac{\rho}{2 \pi r} \left\{ \ln \frac{4L}{r} - 1 \right\} \quad (05.14)$$

gde je  $\rho$  specifična otpornost elektrolita, a L i r su dužina i radijus anode.

Britanski standard 7361<sup>[07]</sup> od 1991 godine daje oblik i veličinu okoloanodnog ekrana koje su u principu određeni oblicina anoda, maksimalnom izlaznom strujom i otpornošću vode.

Radijus okoloanodnog ekrana za elektrodu u obliku diska dat je formulom:

$$M = \frac{\rho I}{2 \pi (\varphi_0 - \varphi)} \quad (05.15)$$

Ekvipotencijalne linije oko šipkaste anode su približne elipse i ovo je teoretski oblik okoloanodnog ekrana. Normalno se okoloanodni ekrani prave kao pravougaonici. To zahteva produženje distance b na onu stranu anode, a takođe slične razdaljine i za krajeva šipke, gde je b jednako manjoj poluosi relevantne elipse. b se može izračunati iz formule:

$$b = \frac{L \alpha^{-1/2}}{\alpha - 1}$$

pri čemu je L dužina šipke a  $\alpha = \exp \left\{ 2 \pi L \frac{\varphi_0 - \varphi}{\rho I} \right\}$

Glavna osa elipse  $L_0$  data je pomoću jednačine

$$l_0 = \frac{L * \alpha^{-1}}{\alpha - 1}$$

U ovom razmatranju moguće je napraviti određene greške zbog uprošćavanja fizičkog modela ali je u nekim slučajevima ovo zadovoljavajuća brza i tačna metoda.

#### 5.09. RUSKI PRORAČUNI

Ruski autori [04],[16]i[49] su ispitivali sopstvene sisteme aktivne katodne zaštite "Luga 1" i "Luga 2" pod stalnim naponom 12 V. Prvi sistem predviđen je za brodove nosivosti preko 10.000 t a drugi za brodove nosivosti ispod te tonaže. Na osnovu ovih ispitivanja, dali su manje praktične, ali tačnije formule kojima se može proračunati raspodela potencijala pri elektrohemijskoj zaštiti trupova plovnih objekata.

Za stacionarne anode sa okoloanodnim ekranom iznosi: (05.16)

$$\Delta \varphi (r) = \frac{I k_1 (2 \sqrt{r / \rho \gamma}) [1 + K(D) r]}{\pi \gamma \sqrt{2 d r} \left[ k_1 (\sqrt{2 d / \rho \gamma}) + \sqrt{d / 2 \rho \gamma} k_0 (\sqrt{2 d / \rho \gamma}) \right]}$$

Za stacionarne, ovesane protektore ili protektorske grupe: (05.17)

$$\Delta \varphi (r) = \frac{I (1 + K(D) r)}{2 \pi \gamma r} \left\{ 1 - \frac{\pi r}{2 \rho \gamma} \left[ E_0 \left( \frac{r}{\rho \gamma} \right) - N_0 \left( \frac{r}{\rho \gamma} \right) \right] \right\}$$

$r > 1 / 2$

Za sistem privešanih anoda ili protektora: (05.19)

$$\Delta \varphi (r) = \frac{I \rho (1 + K(D) r)}{2 \pi} \int_0^{\infty} \frac{\rho \exp(-h p)}{\rho \gamma p + 1} J_0(p r) dp$$

Gde je:

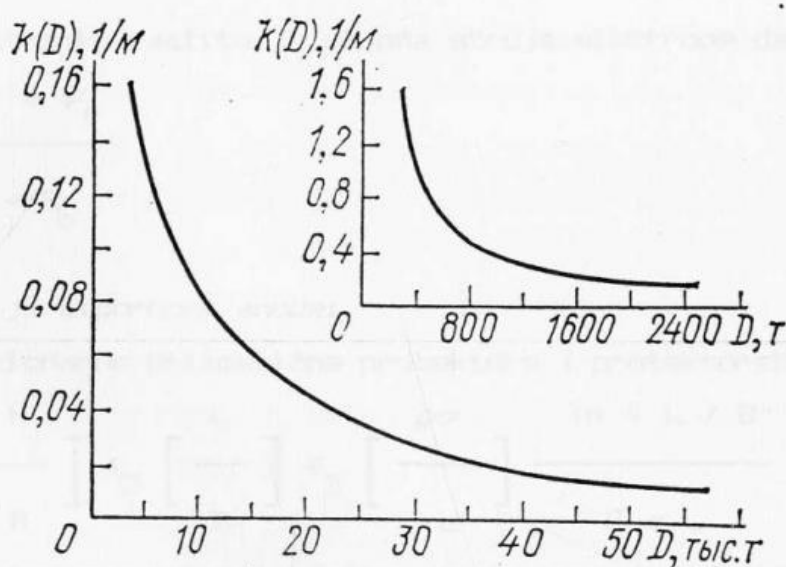
$\Delta \varphi (r)$  - pomeranje potencijala trupa broda od stacionarne vrednosti,  $r$  - rastojanje od centra anode (protektora) do najbliže tačke na trupu broda,

$I$  - struja anode (protektora),  $k_0(\sqrt{2 d / \rho \sigma})$ ,  $k_1(\sqrt{r / \rho \sigma})$ ,

$k_1(\sqrt{2 d / \rho \sigma})$ , Beselove funkcije odgovarajućeg reda za prikazani argument,  $\rho$  - specifična površinska otpornost premazom obojene površine broda,  $\sigma$  - specifična električna provodnost vode,  $d$  - prečnik okoloanodnog ekrana,  $l$  - dužina protektora ili protektorske grupe,  $h$  - dubina zavešene anode (protektora) ispod kobilice broda,  $J_0(p r)$  - Beselove funkcije nultog reda,  $\varphi_0(r/\rho\sigma)$  i  $N_0(r/\rho\sigma)$  - odgovarajuće funkcije nultog reda Lomel - Vebera i Nojmana,  $p$  - integracioni parametar.

$K(D)$  - koeficijent srazmere podvodne površine brodskog trupa i njegovog deplasmana  $D$  (slika 05.07.), može se izračunati na osnovu formule:

$$K(D) = \frac{12 D}{(D - 2000)^{1,56}} \quad (05.19)$$



Slika 05.07. Vrednost koeficijenta srazmere  $K(D)$  podvodne površine brodskog trupa u funkciji deplasmana broda

Istovremeno se daju i formule proračuna struje anoda i protektora.

Za anode je:

$$I = \frac{0,95 U - (\varphi_a - \varphi_k)}{R} \quad (05.20)$$

Pri čemu je otpornost anode:

- za stacionarne anode sa trakastom anodom:

$$R = \ln \frac{4 l}{b} / (\pi \sigma l) \quad (05.21)$$

U ova formulae kriskane su sljedeće oznake:

- za za stacionarne anode u obliku diska

$$R = 1 / (\pi \sigma l) \quad (05.22)$$

što odgovara izvedenom obrascu za otpornost anode u obliku diska.

- za obešene cilindrične anode

$$R = \ln \frac{2 l}{d} / (2 \pi \sigma l) \quad (05.23)$$

i ova formula je u skladu sa izvedenim obrascem za vertikalnu elektrodu u obliku štapa.

Za protektorsku zaštitu je ukupna struja elektrode data istom formulom:

$$I = \frac{E - \Delta \varphi_a}{R + R_b}$$

Pri čemu je otpornost anode:

- za stacionarne prizmatične protektore ( protektorske grupe )

$$R = f_1 \left[ \frac{H}{B} \right] f_2 \left[ \frac{L}{B} \right] f_3 \left[ \frac{\rho \sigma}{L} \right] \frac{\ln 4 L / B}{\pi \sigma L} \quad (05.24)$$

- za stacionarne polucilindrične protektore ( protektorske grupe )

$$R = f_2 \left[ \frac{L}{d} \right] f_3 \left[ \frac{\rho \sigma}{L} \right] \frac{\ln 2 L / d}{\pi \sigma L} \quad (05.25)$$

- za obežene cilindrične protektore

$$R = \frac{\ln 2 L / d}{2 \pi \sigma L} \quad (05.26)$$

Vek trajanja protektora može se odrediti pomoću poznate formule koja uzima u obzir masu protektora i teoretski kapacitet protektora.

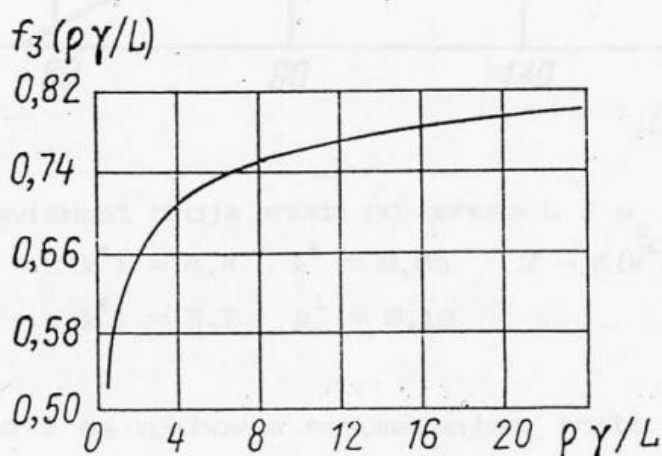
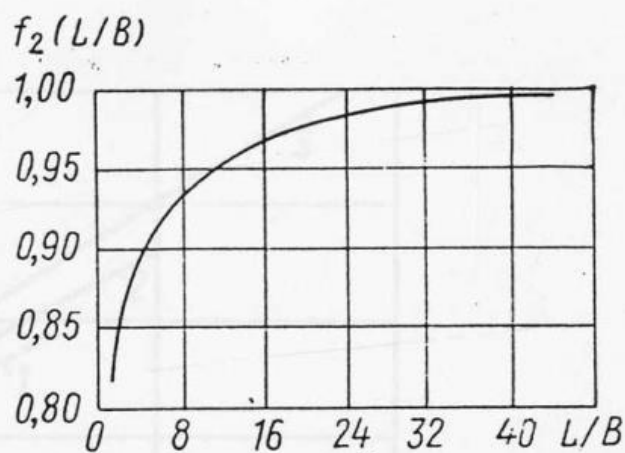
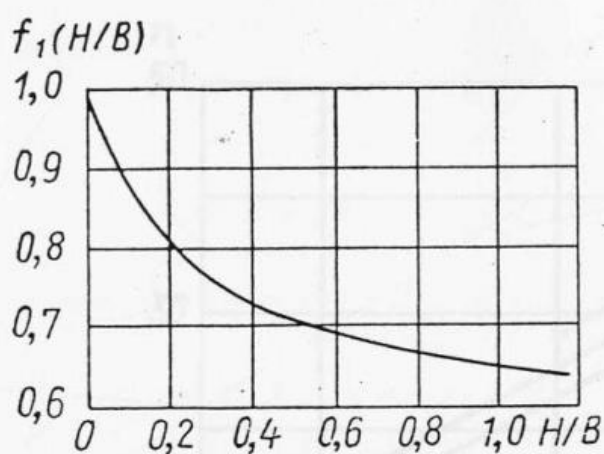
$$T = \frac{0,8 G A h}{8,760 I} \quad (05.27)$$

U ovim formulama korištene su sledeće oznake:

$I$  - anodna struja ( struja protektora ),  $U$  - izlazni napon izvora koji stvara katodnu zaštitu ( stanice katodne zaštite ),  $0,95$  - koeficijent koji uzima u obzir pad napona na unutrašnjim delovima anodne zaštite (kablovi, žantovi, kontakti ),  $\varphi_a - \varphi_k$  - razlika potencijala anode i trupa sistema od kojeg se sastoji sistem, za platinizirane anode  $2,5 V$ , za ferosilicijumske anode  $2,7 V$ ,  $R$  - otpornost anode ( protektora ) i vode (elektrolita),  $l, b$  - dužina i širina poluprečnika anoda,  $r$  - radijus anode u obliku diska,  $\sigma$  - specifična elektroprovodnost morske vode,  $d$  - dijametar poprečnog preseka obežene cilindrične anode (protektora) i polucilindričnog stacionarnog protektora,  $E$  - elektromotorna sila para protektor brod, takođe razlika radnog potencijala protektora i stacionarnog potencijala broda,  $\Delta\varphi_z$  - minimalni zaštitni potencijal trupa broda,  $R_D$  - faktor suprotstavljanja za više protektora u nizu ( za protektore na bliskom rastojanju  $R_D = 0$  ),  $L$  - dužina protektora ( protektorska grupa ),  $B, H$  - širina i dužina prizmatičnog protektora  $\rho$  - specifična površinska otpornost ofarbane površine broda,  $f_1(H/B), f_2(L/B), f_3(\rho\sigma/L)$  - korekcionni koeficijenti prikazani na slici 05.08,  $T$  - vek trajanja protektora,  $0,8$  - koeficijent za zamenu protektora pri iznosu na  $80\%$ ,  $G$  - masa protektora ( protektorske grupe ),  $A$  - teoretska mogućnost odavanja kapaciteta protektorske legure,  $h$  - koeficijent korisnog dejstva protektorske legure.

Broj potrebnih anoda <sup>[27]</sup> za velike preokokeanske brodove, a u slučaju anoda u obliku diska, može se naći po formuli





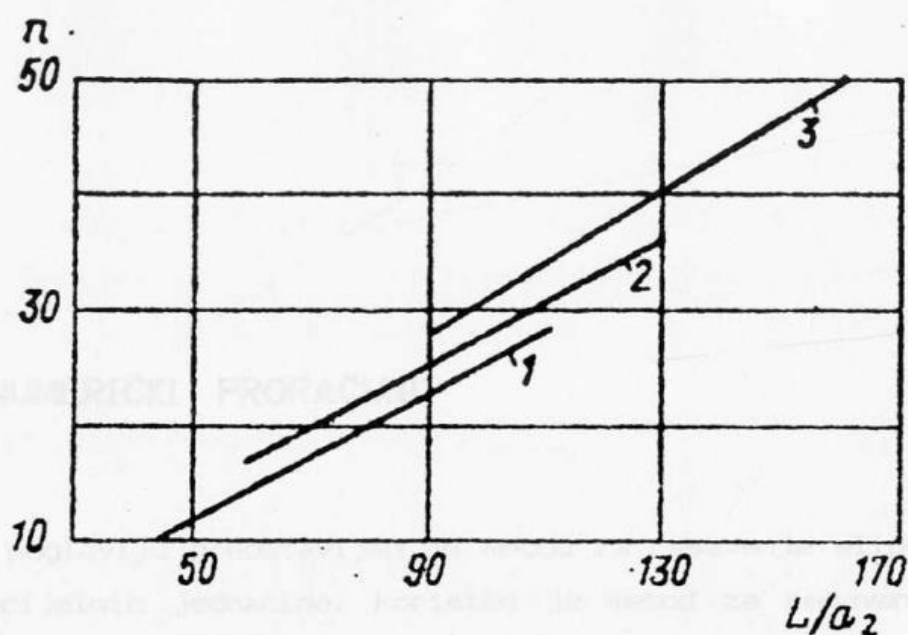
Slika 05.08. Korekcionni koeficijenti za proračun potencijala protektora

$$n = \frac{\pi^2 * L * 0,65 * \sqrt{B^2 - 2 a_2^2}}{4 \sqrt{2} * a_2 * K(k^1) * \sqrt{B^2 - 4 a_2^2}} \quad (05.29)$$

Fri čemu su  $L$  i  $B$  dužina i širina broda,  $a_1$  radijus anode,  $a_2$  radijus skrana i  $K(k_1)$  polarni eliptički integral sa modulom  $k^1 = a_1/a_2$ .

Na osnovu ispitivanja sistema "Luga" 1 i 2, a da bi se olakšao izbor broja anoda, napravljeni su dijagrami (slika 05.09.) za grafičko određivanje broja potrebnih anoda u funkciji odnosa dužine broda i poluprečnika okolnoanodnog ekrana.

Mada su ruski naučnici uložili veći napor da bi se odredila tačnija raspodela potencijala i gustina struje oko žtićenog objekta, ipak su dobijene formule kojima se znatno teže izračunavaju tražene vrednosti. Poseban problem je što su čak i iste literaturni podaci pri preštampavanju pogrešno napisani tako



Slika 05.09. Zavisnost broja anoda od odnosa  $L / a_2$

1 -  $K(k^1) = 4,4$     $k^1 = 0,05$    2 -  $K(k^1) = 4,1$     $k^1 = 0,066$   
 3 -  $K(k^1) = 3,7$     $k^1 = 0,10$

da ima problema i sa njihovim razumevanjem, pošto nisu data izvođenja tih formula. često su korišćeni i empirijski dobijeni faktori određeni samo prilikom ispitivanja sistema "Luga" tako da nisu primereni drugim, opštijim sistemima.

## 06. NUMERIČKI PRORAČUNI

U ovom poglavlju predstavljen je metod za rešavanje eliptičkih parcijalnih diferencijalnih jednačina. Korišten je metod za rešavanje ovih jednačina pomoću konačnih razlika. Metoda je jako pogodna za rešavanje i vrlo složenih polja pomoću računara [8],[66].

Metod konačnih elemenata deli kompleksni domen u proste podregione kao što su tetraedri i piramide i uključuje metod konačnih razlika na ovim prostim delovima. Veličina  $A$  koja ima jednu ili više vredosti u svakoj tački  $x, y, i z$  u oblasti  $R$  prostora zove se funkcija tačke a region i kome se to dešava zove se polje. Ako  $A$  ima samo jednu vrednost u svakoj tački, to je jednovrednosno ili uniformno polje. Ako se  $A$  menja u vremenu, polje je promenljivo a ako ne, zove se ustaljeno. Površina  $S$  koja ograničava region  $R$  je granična tog polja, na kojoj  $A$  mora da zadovoljava određene posebne relacije ili granične uslove. Domen u principu označava prostor  $R - S$ .

U ovom poglavlju opisaće se samo ustaljeno stanje kada raspodela potencijala ne zavisi od vremena.

### 6.01. UVOD

Parcijalne diferencijalne jednačine opisuju homogenu sredinu što znači da su promenljive u parcijalnoj jednačini funkcije tačke. Laplasova parcijalna diferencijalna jednačina je najpoznatiji predstavnik eliptičkih parcijalnih diferencijalnih jednačina.

U Dekartovom, pravouglom, koordinatnom sistemu ova jednačina glasi:

$$\frac{\partial \varphi^2}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi^2}{\partial y^2} + \frac{\partial \varphi^2}{\partial z^2} = 0 \quad (06.01)$$

Pošto ova jednačina izračunava opšte fizičke zakone, ima beskonačno rešenja. Do posebnih se dolazi dopunskim uslovima koji se nazivaju granični i početni uslovi. Kako nas nije zanimao proces uspostavljanja potencijala u vremenskom domenu, nisu razmatrani ni početni uslovi, već samo granični.

Graničnih uslova ima tri vrste:

$$\varphi = u \quad \text{Dirihleov uslov} \quad (06.02)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = u \quad \text{Nojmanov uslov} \quad (06.03)$$

$$f_1 \varphi + f_2 \frac{\partial \varphi}{\partial n} = u \quad \text{Mešoviti uslov} \quad (06.04)$$

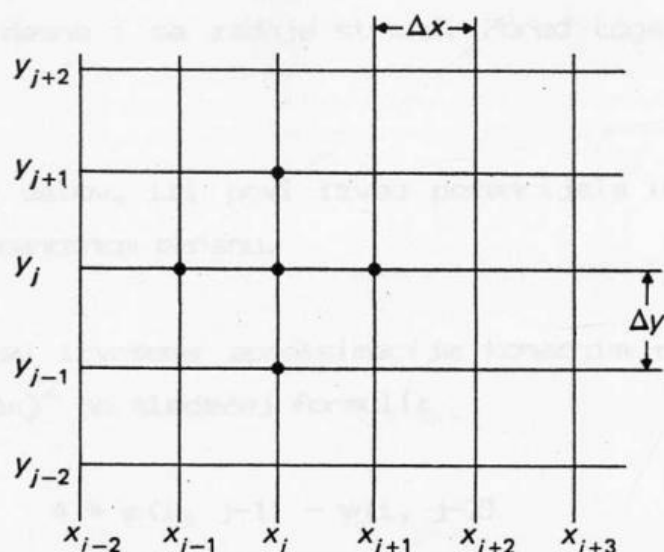
Postoji više načina da se parcijalna diferencijalna jednačina aproksimira konačnim razlikama. Ovde je korišteno razvijanje pomoću Tajlorovog reda.

Postupak za rešavanje svih parcijalnih jednačina je zamenom izvoda pomoću konačnih razlika, pretvarajući diferencijalne jednačine u obične algebarske jednačine. Tada se mogu pisati jednačine razlika koje odgovaraju svakoj tački čvora mreže koja deli oblast interesa u kome su vrednosti funkcije nepoznate. Rešavajući istovremeno ove jednačine dobijamo vrednosti za funkcije u svakom čvoru kome pripadaju stvarne vrednosti. Počecemo sa dvodimenzionalnim slučajem.

## 6.02. REŠAVANJE DVOODIMENZIONALNIH POLJA

Neka je  $h = \Delta x$  jedinično rastojanje u mreži i to u x smeru. Posle će se pretpostaviti da je ovo jedinično rastojanje isto i za y osu. Pretpostavimo da funkcija  $f(x)$  ima neprekidan četvrti izvod. Razvijajući funkciju pomoću Tejlorovog reda, moguće je dobiti

$$\frac{f_{n+1} - 2f_n + f_{n-1}}{h^2} = f_n'' + O(h^2) \quad (06.05)$$



Slika 06.01. Dvodimenzionalna mreža tačaka sa jednakim razmacima

Za rešenje Laplasove jednačine u pravouglim Dekartovim koordinatama delimo region sa jednakim linijama paralelnim x i y osi. Ako posmatramo oblast oko tačke  $(x_i, y_i)$  i ako želimo da aproksimiramo Laplasovu jednačinu

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (06.06)$$

potrebno je uzeti pet tačaka da bi se dobila aproksimacija Laplasove jednačine, i to tačke iznad, ispod, levo i desno od centralne tačke  $(x_i, y_i)$ . Konvencija je da se odnos predstavlja grafički, gde se linearna kombinacija  $\varphi$  predstavlja simbolično.

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{h^2} \begin{Bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -4 & 1 \\ 1 & 1 \end{Bmatrix} \varphi_{i,j} = 0 \quad (06.07)$$

Predstavljanje Laplasovog operatora pomoću grafičkog operatora predstavlja linearnu kombinaciju  $\varphi$  pomoću pet vrednosti, i to je osnovna ideja za rad u rešenju elipričke parcijalne diferencijalne jednačine. Aproksimacija ima grešku reda  $O(h^2)$ . Ovo je formula zvezde sa pet tačaka.

Granični uslovi se zadaju pod sledećim uslovima:



Površina elektrode je ekvipotencijalna i stalna u funkciji vremena. Na njoj je ispunjen Dirihleov granični uslov. Potencijal je nula na dnu proračunske oblasti, sa desne i sa zadnje strane. Pored toga i na površini vode izvan ivice broda.

Fon Nojmanov uslov, ili prvi izvod potencijala u pravnu normale jednak je nuli na okoloanodnom ekranu.

U prostoru su izvršene aproksimacije konačnim razlikama šablonom unapred tačnosti  $O(\Delta x)^2$  po sledećej formuli:

$$\varphi(i, y)_x = \frac{4 * \varphi(i, j-1) - \psi(i, j-2)}{3} \quad (06.08)$$

Sistem jednačina može se rešiti direktno ili iterativnim putem. Iterativne metode su proste za primenu i jednostavne za programiranje. Pretpostavi se neka raspodela vrednosti, a zatim se na osnovu ove raspodele potraži rešenje. Nađeno rešenje  $\varphi$  je sledeća pretpostavka. Postupak se ponavlja onoliko puta dok se ne zadovolji neki unapred zadat kriterijum tačnosti.

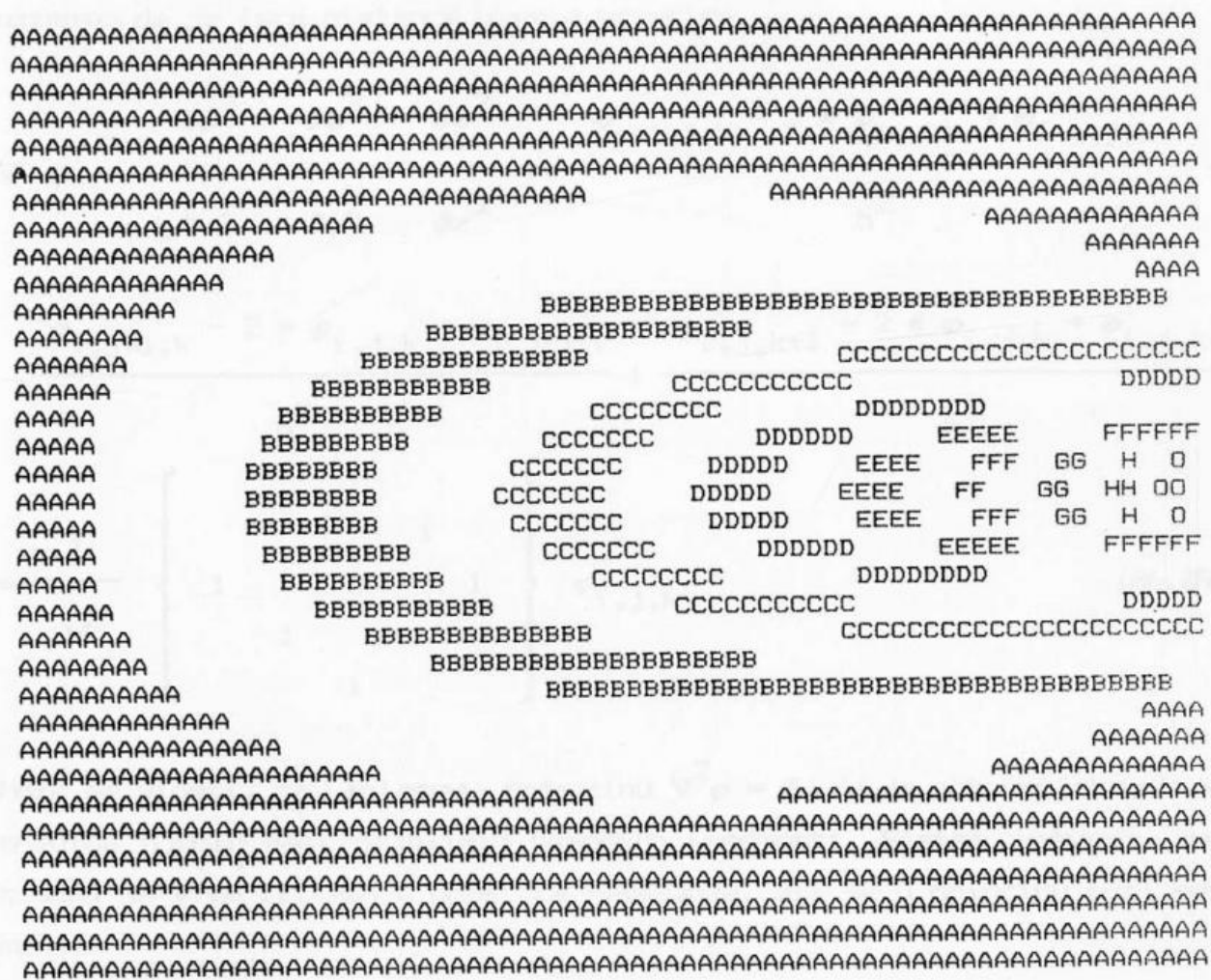
Iterativne tehnike se mogu podeliti u dve grupe. Prvu čine metode kod kojih nepoznata u jednom trenutku ima vrednost u jednoj tački. Drugu čine metode koje u sebi uključuju više od jedne tačke, najčešće tri, tako da se kao rezultat dobija trodijagonalni sistem jednačina. Takvi metodi su implicitni po nekim linijama te se zovu linijski iterativni metodi.

Korišćen je Gaus-Sajdelov metod za liniju. Ovaj metod je za probleme koje karakteriše promena funkcija  $u$ , u jednom pravcu veoma praktičan jer daje rešenja sa manjim brojem iteracija. Radi ubrzanja procesa konvergencije, uveden je parametar zvan koeficijent relaksacije

$$1 \leq \omega \leq 2$$

Program se sastoji iz nekoliko potprograma. Potprogram za unos podataka, zadavanje graničnih uslova, iteracioni potprogram i potprogram za prikaz rezultata.

Na slici 06. 02. prikazani su grafički rezultati raspodele potencijala za dvodimenzionalan slučaj dobijen ovim programom.



Slika 06.02. Dvodimenzionalna raspodela potencijala

U ovom primeru uzeti su sledeći podaci: Broj proračunskih tačaka na trupu broda iznosi  $N \times 1 = 10$ , na okoloanodnom ekranu  $N \times 2 = 5$  i na anodi  $N \times 3 = 2$ . Po dubini broj tačaka iznosi  $N_y = 10$ . Proračunski korak iznosi  $H = 1$ . Kumulativna greška po tačkama iznosi  $G_{\text{Max}} = 0,001$  a koeficijent relaksacije  $\omega = 1,8$ . Na osnovu ovih podataka, napravljena je mreža  $33 \times 10$  tačaka posle 55 iteracija i prikazan je dobijeni grafik.

Mada je ovo relativno mali program, omogućava sagledavanje potencijala u prostim primerima i uhodavanje radi većeg, trodimenzionalnog programa koji će biti detaljnije objašnjen i dat u celosti.

### 6.03. RAČUNANJE TRODIMENZIONALNOG LAPLASOVOG POLJA

Napišimo približne jednačine konačnih razlika u tri dimenzije šablonom

unapred. Koriste se tri dimenzije da označe prostornu poziciju tačkaka a uzimamo da je ista distanca u svim pravcima

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi &= \frac{\partial \varphi^2}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi^2}{\partial y^2} + \frac{\partial \varphi^2}{\partial z^2} = \frac{\varphi_{i+1,j,k} - 2 * \varphi_{i,j,k} + \varphi_{i-1,j,k}}{h^2} + \\ &\frac{\varphi_{i,j+1,k} - 2 * \varphi_{i,j,k} + \varphi_{i,j-1,k}}{h^2} + \frac{\varphi_{i,j,k+1} - 2 * \varphi_{i,j,k} + \varphi_{i,j,k-1}}{h^2} \\ &= \frac{1}{h^2} \left\{ \begin{array}{ccc} & & 1 \\ & & \\ 1 & & 1 \\ & -6 & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{array} \right\} \varphi_{i,j,k} \quad (06.09) \end{aligned}$$

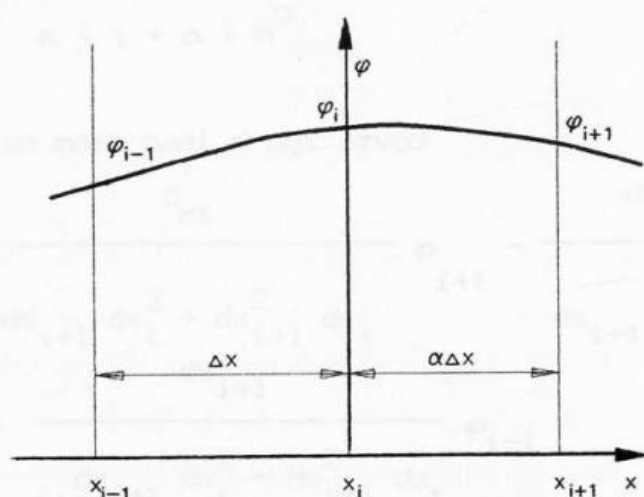
Može se videti, za Laplasovu jednačinu  $\nabla^2 \varphi = 0$ , da je potencijal aritmetička sredina njenih šest najbližih susednih vrednosti. Sistem jednačina za ovaj slučaj je više ili manje prost za rešavanje, ali se u principu ovaj metod ne menja.

U trodimenzionalnim problemima, lako je odrediti potreban memorijski prostor potreban za rešavanje jednačine, čak i kod velikih kompjuterskih sistema. Pošto je poznat podatak o broju tačkaka na svakoj strani, lako se izračunava zapremina domena pod razmatranjem. Virtuelni memorijski sistemi mogu prihvatiti veći broj podataka, ali će zato znatno opasti brzina rada.

#### 06.04. NEPRAVILNA OBLAST

Kada granica oblasti nije takva da mreža koja se može nacrtati ima granicu koja se podudara sa čvorovima mreže, moramo postupiti različito u tačkama blizu granice. Pored toga imamo i dodatni problem tačnosti samo na jednoj površini. Praktično nas interesuje samo podvodna površina trupa broda a zato je poželjan veći stepen tačnosti uz tu površinu i nešto niži stepen tačnosti u ostalom delu domena. Ovo je potrebno raditi da bi se u memoriskim prostor ubacilo što više podataka koji nas interesuju.

Jedan od postupaka za aproksimiranje izvoda funkcije je formiranje jednačina



Slika 06.03. Funkcija aproksimirana parabolom sa nejednako razmaknutim tačkama

konačnih razlika pomoću polinoma [56]. Funkciju se aproksimira polinomom drugog reda (parabolom) sa nejednako razmaknutim tačkama. Korišten je centralni šablon. Lako se mogu naći prvi i drugi izvod:

$$\begin{aligned} \varphi &= A x^2 + B x + C \\ \varphi_x &= 2 A x + B \\ \varphi_{xx} &= 2 A \end{aligned} \tag{06.10}$$

Ako se izabere koordinatni početak u tački  $x_i$ , slika 6.03, mogu se dobiti vrednosti potencijala u tačkama  $x_{i+1}$ ,  $x_i$  i  $x_{i-1}$  sa nepoznatim koeficijentima  $A$ ,  $B$  i  $C$ .

$$\begin{aligned} \varphi_i &= C \\ \varphi_{i+1} &= A (\alpha h)^2 + B (\alpha h) + C \\ \varphi_{i-1} &= A (h)^2 - B (h) + C \end{aligned} \tag{06.11}$$

Rešavajući jednačine po nepoznatim koeficijentima, može se dobiti:

$$\begin{aligned} C &= \varphi_i \\ B &= \frac{\varphi_{i+1} + (\alpha^2 - 1) \varphi_i - \alpha^2 \varphi_{i-1}}{\alpha h (1 + \alpha)} \end{aligned} \tag{06.12}$$

$$A = \frac{\varphi_{i+1} - (1 + \alpha) \varphi_i + \alpha \varphi_{i-1}}{\alpha (1 + \alpha) h^2}$$

U tački  $x_i$  se može naći drugi izvod

$$\begin{aligned} \varphi_{xxi} = & 2 \frac{d_{xi}}{dx_{i+1} dx_i^2 + dx_{i+1}^2 dx_i} \varphi_{i+1} - \frac{dx_i + dx_{i+1}}{dx_{i+1} dx_i^2 + dx_{i+1}^2 dx_i} \varphi_i + \\ & + \frac{dx_{i+1}}{dx_{i+1} dx_i^2 + dx_{i+1}^2 dx_i} \varphi_{i-1} \end{aligned} \quad (6.13)$$

Drugi izvodi u tački  $x_i$  i po svim koordinatama iznose:

$$\begin{aligned} \varphi_{xxi} &= A_{xi} \varphi_{i+1} + B_{xi} \varphi_i + C_{xi} \varphi_{i-1} \\ \varphi_{yyi} &= A_{yi} \varphi_{j+1} + B_{yi} \varphi_j + C_{yi} \varphi_{j-1} \\ \varphi_{zzi} &= A_{zi} \varphi_{k+1} + B_{zi} \varphi_k + C_{zi} \varphi_{k-1} \end{aligned} \quad (6.14)$$

Kako je u Laplasovoj jednačini suma parcijalnih izvoda drugog reda po koordinatama jednaka nuli, dobija se:

$$\begin{aligned} A_{xi} \varphi_{i+1,j,k} + B_{xi} \varphi_{i,j,k} + C_{xi} \varphi_{i-1,j,k} + \\ A_{yi} \varphi_{i,y+1,z} + B_{yi} \varphi_{i,j,k} + C_{yi} \varphi_{i,j-1,k} + \\ A_{zi} \varphi_{i,j,k+1} + B_{zi} \varphi_{i,j,k} + C_{zi} \varphi_{i,j,k-1} = 0 \end{aligned} \quad (6.15)$$

Odatle se lako može naći vrednost potencijala u tački  $\varphi_{i,j,k}$

$$\varphi_{i,j,k} = \frac{-1}{B_{xi} + B_{yi} + B_{zi}} \left[ A_{xi} \varphi_{i+1,j,k} + C_{xi} \varphi_{i-1,j,k} + A_{yi} \varphi_{i,j+1,k} + C_{yi} \varphi_{i,j-1,k} + A_{zi} \varphi_{i,j,k+1} + C_{zi} \varphi_{i,j,k-1} \right]$$

Na ovaj način moguće je pronaći potencijal u svim tačkama prostora. Ostalo je da se zadaju granični uslovi i izvrše određena uprošćenja.



## 06.05. GRANIČNI USLOVI

Da bi se uprostito sistem za račun, ceo domen od interesa podeljen je na četiri dela. Centar koordinatnog sistema postavljen je u centar elektrode a ostavljene su mogućnosti za menjanje dimenzija elektrode, okoloanodnog ekrana, dimenzija broda i prostora u okolini broda.

Dirihleov uslov  $\varphi = u$  ili  $\varphi = 0$  se uvodi u program tako što se u određenim tačkama jednostavno zadaje. Na površini elektrode potencijal je stalan. Istovremeno se pretpostavlja, i to za određen broj iteracija, da je potencijal na oplati trupa broda stalan. Kada se uspostavi određena raspodela gustina struje, ukida se ovaj uslov.

Nojmanov granični uslov ispunjen je na oplati trupa broda i to sa svake strane elektrode.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$$

Može se aproksimirati centralnim šablonom, drugim redom tačnosti  $O(\Delta x)^2$  po formuli

$$\varphi_{xi} = \frac{dx_{i+1}^2 * \varphi_{i+1,j,k} + (dx_i^2 - dx_{i+1}^2) * \varphi_{i,j,k} - dx_{i+1}^2 * \varphi_{i-1,j,k}}{dx_{i+1} dx_i^2 + dx_{i+1}^2 dx_i} \quad (06.16)$$

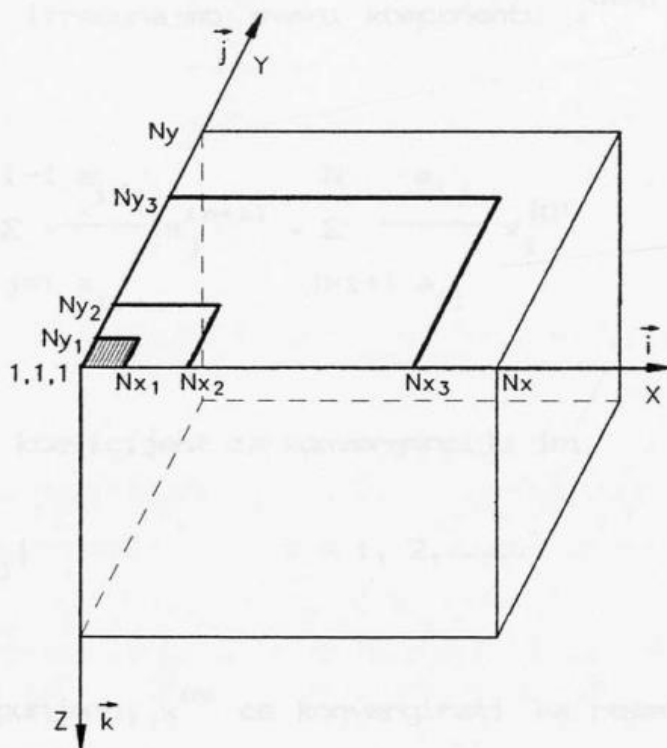
Na početku domena od interesa, za bočnu levu stranu ( $x = 1$ ) izvršena je aproksimacija konačnim razlikama šablonom unapred. Razlog je potpuno jasan da se ne bi izlazilo iz polja u kome se posmatra raspodela potencijala. Aproksimacija ima grešku reda  $O(\Delta x)^2$ .

$$\varphi_{1,j,k} = \frac{(dx_i + dx_{i+1})^2 \varphi_{2,j,k} - \varphi_{3,j,k}}{dx_i (dx_i + 2)} \quad (06.17)$$

Na odgovarajući način izvršena je aproksimacija i za ravni  $y = 1$  i  $z = 1$ .

Neki put je interesantan slučaj i rada sa šablonom unazad, ali to u ovom programu nije korišćeno tako da se ni obrazac nije izvodio.

Na slici 06.04. aksonometrijski su prikazane površine na kojima su zadati granični uslovi.



Slika 06.04. Granični uslovi na četvrtini posmatranog domena

Po z - osi koja je granična linija ispunjen je uslov da je suma drugih izvoda po svim koordinatama jednaka nuli. Kako su razmaci sa obe strane jednaki, moguće je koristiti centralni šablon.

$$\varphi_{i,j,k} = \frac{1}{1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 - B_{zi}} \left[ \frac{1}{1/\Delta x^2} \varphi_{i+1,j,k} + \frac{1}{1/\Delta y^2} \varphi_{i,j+1,k} + A_{zi} \varphi_{i,j,k+1} + C_{zi} \varphi_{i,j,k-1} \right] \quad (06.18)$$

Normalno da se i potencijali po z - osi računaju po iterativnom postupku koji će biti dalje objašnjen.

### 6.06. ITERATIVNI METOD ZA LAPLASOVU JEDNAČINU

Jedna od iterativnih metoda za rešavanje Laplasovih, i drugih jednačina je Gaus-Saidelova metoda. Osnov je u sledećem.

Da bi se rešio sistem od N linearnih jednačina, potrebno je aranžirati

redove tako da dijagonalni elementi imaju članove što je moguće veće u odnosu na veličinu drugih koeficijenata u istom redu. Napišimo ponovo napisani sistem sa  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$ . Počnimo sa početnom aproksimacijom za rešenje vektora  $\mathbf{x}^{(1)}$ , i izračunajmo svaku komponentu  $x_i^{(n+1)}$  za  $i = 1, 2, \dots, N$ , pomoću formule

$$x_i^{(n+1)} = \frac{b_i}{a_{ii}} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{a_{ij}}{a_{ii}} x_j^{(n+1)} - \sum_{j=i+1}^N \frac{a_{ij}}{a_{ii}} x_j^{(n)} \quad (6.19)$$

$n = 1, 2, \dots$

Zadovoljavajući koeficijent za konvergenciju je:

$$|a_{ii}| > \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N |a_{ij}| \quad i = 1, 2, \dots$$

Kada je ovo ispunjeno,  $\mathbf{x}^{(n)}$  će konvergirati ka rešenju bez obzira koji se početni vektor koristi.

Iterativna formula po Gaus Sajdelovoj metodi glasi:

$$\varphi_i = (1 - \omega) \varphi_{i,j,k}^m - \frac{\omega}{B_{xi} + B_{yi} + B_{zi}} \left[ A_{xi} \varphi_{i+1,j,k} + C_{xi} \varphi_{i-1,j,k} + A_{yi} \varphi_{i,y+1,z} + C_{yi} \varphi_{i,j-1,k} + A_{zi} \varphi_{i,j,k+1} + C_{zi} \varphi_{i,j,k-1} \right]$$

Relakcioni metod Soutvela će se koristiti za bržu konvergenciju iterativne metode. Radi značajnijeg ubrzanja konvergencije koristi se relaksacioni parametar  $\omega$ . Metod koji ovu jednačinu u standardnom i ponovljivom redu zove se sukcesivna nad relaksacija SOR (successive over-relaxation). Maksimalna brzina iteracije određena je za neku optimalnu vrednost  $\omega$ . Ova optimalna vrednost uvek leži između  $1,0$  i  $2,0$ .

## 6.07. PROGRAM ZA RAČUNAR

Program za računare PC dat u celosti i pisan je specijalno za računanje potencijala oko broda a u osnovi služi za rešavanje Laplasovog polja.

Program AA.FOR formira i povezuje ostale podprograme.

Prvi je potprogram CITAJ u kome se zadaju koordinatne tačke i koordinatna mreža iz ulazne datoteke AA.ULZ sa podacima.

Potprogram IZRDXDYDZ računa potrebne korake mreže po pravcima koordinata x, y i z. Sitniji korak i finija mreža prave se u okolini anoda sa ekranima, da bi se potom proračunski koraci povećavali. Ovim se postiže veća tačnost u domenu koji nas više interesuje.

Potprogram GRUFIX zadaje i definiše nepromenljive granične uslove. U principu su to granični uslovi sa Dirihleovim graničnim uslovom. Centar koordinatnog sistema postavljen je u centar elektrode. Razmatra se samo četvrtina broda radi simetrije a da bi se na tom delu povećala tačnost. Smatra se da je površina elektrode ekvipotencijalna i da ima unapred zadatu stalnu vrednost. Potencijal na spoljnoj površini koja ograničava region ima vrednost potencijala nula kao i na površini vode van ivica broda.

Potprogram GRUVAR definiše promenljive granične uslove. S obzirom da je otpornost okolnoanodnog ekrana izuzetno visoka, može se na celoj ovoj površini postaviti Nojmanov granični uslov. Prvi izvod jednak je nuli i na graničnim površinama sa drugim delovima domena od interesa, tj. za ravni  $x = 0$  i  $y = 0$ . Po oplati broda se određeni početni broj iteracija ( koji se zadaje u ulaznom fajlu AA.ULZ ) pretpostavlja da je potencijal nula. Posle dobijanja određene raspodele struje i potencijala izračunava se prenapetost po površini trupa broda na osnovu aproksimacije polarne polarizacione katodne krive. Koeficijenti se prethodno izračunaju iz poznatih podataka o vodenoj sredini, maksimalno dozvoljenoj prenapetosti na trupu broda uz okolnoanodni ekran, i poznatim podacima o geometriji broda.

Potprogram LAPLAS računa potencijale u celom domenu od interesa aproksimirajući funkciju parabolom sa nejednako razmaknutim tačkama. Koristi se centralni šablon i iterativni metod po Gaus - Sajdelovoj metodi. Radi smanjenja broja iteracija i vremena potrebnog za dostizanje zadate tačnosti korišten je relaksacioni parametar definisan ulaznim potprogramom. U okviru ovog potprograma izračunava se raspodela potencijala po z - osi na kojoj je ispunjen uslov da je prvi izvod jednak nuli.

Potprogram PISI formira datoteku AA.REZ i ubacuje i svrstava u njoj podatke o katodnim polarizacijama i koordinatama date tačke u celom regionu.

PROGRAM ZA IZRACUNAVANJE TRODIMENZIONALNOG POTENCIJALNOG POLJA

```

parameter      (NFI=15000, Na = 40, errMax=0.01)
real          fi(NFI)
real          dx(Na), dy(Na), dz(Na), x(Na), y(Na), z(Na)
common /FiZona/ fi
                                ! Procitaj koordinatne tacke
Call Citaj(x,Nx,y,Ny,z,Nz,omega,Nx1,Nx2,Nx3,Ny1,Ny2,Ny3,fi,
                                ITPOC,ITMAX)
                                ! Izracunaj korake proracunske mreze
Call Izrdxdydz(x, dx, Nx, y, dy, Ny, z, dz, Nz)
                                ! Zadaj pocetne vrednosti promenljivim
iter = 0
Err = 10*errMax
Call GruFix(fi, fi, dx,dy,dz, Nx,Ny,Nz, Nx1,Nx2,Nx3, Ny1,Ny2,Ny3)
                                ! Zadaj fiksne granicne uslove
do while(iter.lt.ITMAX .and. Err.gt.errMax .or. iter.lt.ITPOC)
  iter = iter + 1
  if(iter .gt. ITPOC) then
    Call GruVar(fi,dx,dy,dz,Nx,Ny,Nz,Nx1,Nx2,Nx3,Ny1,Ny2,Ny3)
                                ! Zadaj promenljive granicne uslove
  else
    Call GruFix
      (fi, fi, dx,dy,dz, Nx,Ny,Nz, Nx1,Nx2,Nx3, Ny1,Ny2,Ny3)
  end if
  Call Laplas(fi, dx, dy, dz, Nx, Ny, Nz, Err, omega)
                                ! Izracunaj raspodelu potencijala
  print '(1x,I5,G16.4)', iter, Err
end do
Call Pisi(fi, Nx, Ny, Nz)
                                ! Napisi rezultate
stop 'aa - K r a j'
end
*
*****
subroutine      GruVar
  (fi, dx,dy,dz, Nx,Ny,Nz, Nx1,Nx2,Nx3, Ny1,Ny2,Ny3)
real fi(Nx,Ny,Nz), dx(*), dy(*), dz(*), jmax
parameter      (sigma = 35.e-3)
                                ! dFi/dn = 0;   x=1 (leva ravan) - (1)
alf = dx(3)/dx(2)
c1 = (1+alf)**2
c2 = alf*(2+alf)
do k = 2, Nz-1
  do j = 2, Ny-1
    fi(1,j,k) = ( c1*fi(2,j,k) - fi(3,j,k) )/c2
  end do
end do
                                ! dFi/dn = 0;   y=1 (prednja ravan) - (2)
alf = dy(3)/dy(2)
c1 = (1+alf)**2
c2 = alf*(2+alf)
do k = 2, Nz-1
  do i = 2, Nx-1
    fi(i,1,k) = ( c1*fi(i,2,k) - fi(i,3,k) )/c2
  end do
end do
                                ! Okoloanodni ekran dFi/dn = 0 - (7)
alf = dz(3)/dz(2)
c1 = (1+alf)**2
c2 = alf*(2+alf)
do i = Nx1+1, Nx2
  do j = 1, Ny2
    fi(i,j,1) = ( c1*fi(i,j,2) - fi(i,j,3) )/c2
  end do
end do

```



```

        end do
    end do
do j = Ny1+1, Ny2
    do i = 1, Nx1
        fi(i,j,1) = ( c1*fi(i,j,2) - fi(i,j,3) )/c2
    end do
end do
                                ! Dplata broda - (8)
jmax = sigma*gradijent(fi, dx, dy, dz, Nx, Ny, Nz, Nx2+1,1)
if(jmax .lt. 0.0) stop 'jmax < 0'
b = 0.28/log(jmax)
do i = Nx2+1, Nx3
    do j = 1, Ny3
        rj = sigma*gradijent(fi, dx, dy, dz, Nx,Ny,Nz, i,j)
        if(rj .lt. 0.0) stop 'rj<0 -- 1'
        fi(i,j,1) = b*log(rj)
    end do
end do
do i = 1, Nx2
    do j = Ny2+1, Ny3
        rj = sigma*gradijent(fi, dx, dy, dz, Nx,Ny,Nz, i,j)
        if(rj .lt. 0.0) stop 'rj<0 -- 2'
        fi(i,j,1) = b*log(rj)
    end do
end do
return
end
*
*****
subroutine GruFix
.   (fic, fi, dx,dy,dz, Nx,Ny,Nz, Nx1,Nx2,Nx3, Ny1,Ny2,Ny3)
real fi(Nx,Ny,Nz), dx(*), dy(*), dz(*)
                                ! Zadaje granicni uslov, brod je na
                                ! k=1, razmatra se cetvrtina broda
                                ! GrU na elektrodi - (6)

do i = 1, Nx1
    do j = 1, Ny1
        fi(i,j,1) = fic
    end do
end do

                                ! GrU na povrshini vode oko broda - (9)
do i = Nx3+1, Nx
    do j = 1, Ny
        fi(i,j,1) = 0.0
    end do
end do
do i = 1, Nx3
    do j = Ny3+1, Ny
        fi(i,j,1) = 0.0
    end do
end do

                                ! Dno proracunske oblasti - (3)
do i = 1, Nx
    do j = 1, Ny
        fi(i,j,Nz) = 0.0
    end do
end do

                                ! Desna strana - (4)
do j = 1, Ny
    do k = 1, Nz
        fi(Nx,j,k) = 0.0
    end do
end do

                                ! Zadnja strana - (5)
do i = 1, Nx

```

```

do k = 1, Nz
  fi(i,Ny,k) = 0.0
end do
end do
! Oplata broda - stalan potencijal - (8)
do i = Nx2+1, Nx3
  do j = 1, Ny3
    fi(i,j,1) = 0.0
  end do
end do
do i = 1, Nx2
  do j = Ny2+1, Ny3
    fi(i,j,1) = 0.0
  end do
end do
return
end
*
*****
subroutine Pisi(fi, Nx, Ny, Nz)
real fi(Nx,Ny,Nz)
open(unit=1,file='AA.REZ',form='formatted',status='unknown')
do k = 1, Nz
  write(1,1002) k
  write(1,1001) (fi(i,1,k), i=1,Nx)
end do
close(unit=1)
return
1001 format(5x,10F7.3)
1002 format(1x,'k =',I3)
end
*
*****
function gradijent(fi, dx, dy, dz, Nx, Ny, Nz, i, j)
real fi(Nx,Ny,Nz), dx(*), dy(*), dz(*)
alf = dz(3)/dz(2)
if(i.eq.1) then
  gx = 0.0
else
  gx = (dx(i)**2*(fi(i+1,j,1)-fi(i,j,1))+dx(i+1)**2*
    (fi(i,j,1)-fi(i-1,j,1)))/(dx(i)*dx(i+1)*(dx(i)+dx(i+1)))
end if
if(j.eq.1) then
  gy = 0.0
else
  gy = (dy(j)**2*(fi(i,j+1,1)-fi(i,j,1))+dy(j+1)**2*
    (fi(i,j,1)-fi(i,j-1,1)))/(dy(j)*dy(j+1)*(dy(j)+dy(j+1)))
end if
gz = (-fi(i,j,3)+(1+alf)**2*fi(i,j,2)-alf*(alf+2)*fi(i,j,1))
    / (alf*(1+alf)*dz(2))
gradijent = sqrt(gx**2 + gy**2 + gz**2)
return
end
*
*****
subroutine Citaj(x, Nx, y, Ny, z, Nz, omega, Nx1,Nx2,Nx3,
Ny1,Ny2,Ny3, fic, ITPOC,ITMAX)
real x(*), y(*), z(*)
character file*25
print 1001 ! Ucitaj ime datoteke sa podacima
read '(A)', file
! Ucitaj koordinate mreze iz datoteke
open(unit=1,file=file,form='formatted',status='old')
read(1,*) Nx, Ny, Nz, omega, fic, ITPOC, ITMAX
read(1,*) Nx1,Nx2,Nx3, Ny1, Ny2, Ny3
read(1,*) (x(i), i=1, Nx)

```

```

read(1,*) (y(j), j=1, Ny)
read(1,*) (z(k), k=1, Nz)
close(unit = 1)
return
*
* I/O - Formati
*
1001 format(/1x,'Ime datoteke sa ulaznim podacima: ', $)
end
*
*****
subroutine Izrdxdydz(x, dx, Nx, y, dy, Ny, z, dz, Nz)
real x(*),dx(*), y(*),dy(*), z(*),dz(*)
! Korak mreze po x-pravcu
do i = 2, Nx
dx(i) = x(i) - x(i-1)
end do
! Korak mreze po y-pravcu
do j = 2, Ny
dy(j) = y(j) - y(j-1)
end do
! Korak mreze po z-pravcu
do k = 2, Nz
dz(k) = z(k) - z(k-1)
end do
return
end
*
*****
subroutine Laplas(fi, dx, dy, dz, Nx, Ny, Nz, Err, omega)
real fi(Nx,Ny,Nz), dx(*), dy(*), dz(*), jmo
jmo = 1.-omega
o = omega
Err = 0.0
do i = 2, Nx-1
DxDx = dx(i) * dx(i+1) * (dx(i) + dx(i+1))
Ax = dx(i)/DxDx
Bx = -(dx(i+1)+dx(i))/DxDx
Cx = dx(i+1)/DxDx
do j = 2, Ny-1
DyDy = dy(j) * dy(j+1) * (dy(j) + dy(j+1))
Ay = dy(j)/DyDy
By = -(dy(j+1)+dy(j))/DyDy
Cy = dy(j+1)/DyDy
do k = 2, Nz-1
DzDz = dz(k) * dz(k+1) * (dz(k) + dz(k+1))
Az = dz(k)/DzDz
Bz = -(dz(k+1)+dz(k))/DzDz
Cz = dz(k+1)/DzDz
F = jmo*fi(i,j,k) - o/(Bx+By+Bz)*
(
Ax*fi(i+1,j,k) + Cx*fi(i-1,j,k) +
Ay*fi(i,j+1,k) + Cy*fi(i,j-1,k) +
Az*fi(i,j,k+1) + Cz*fi(i,j,k-1)
)
Err = Err + (F - fi(i,j,k))**2
fi(i,j,k) = F
end do
end do
end do
! Po z-osi
dxx = 1./dx(2)**2
dyy = 1./dy(2)**2
do k = 2, Nz-1
DzDz = dz(k) * dz(k+1) * (dz(k) + dz(k+1))
Az = dz(k)/DzDz
Bz = -(dz(k+1)+dz(k))/DzDz
Cz = dz(k+1)/DzDz

```

```

                                ! Racunanje greske
C = o/(dxx + dyy - Bz)
F = jmo*fi(1,1,k) + C*( fi(2,1,k)*dxx + fi(1,2,k)*dyy +
                        Az*fi(1,1,k+1) + Cz*fi(1,1,k-1) )
Err = Err + (F - fi(1,1,k))*2
fi(1,1,k) = F
end do
return
end
* *****

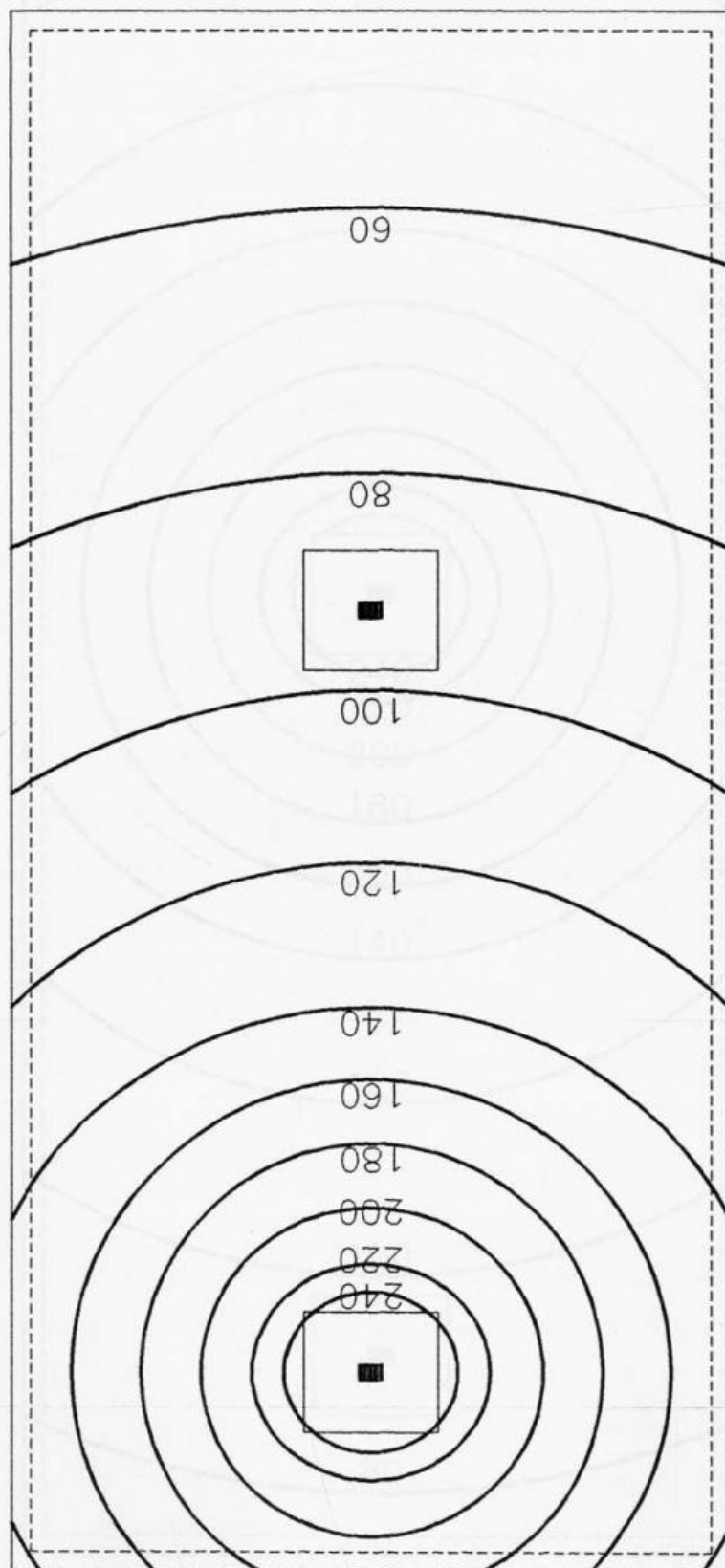
```

## 6.06. RASPODELA POTENCIJALA SA JEDNOM UKLJUČENOM ELEKTRODOM

Numeričke metode daju mogućnost simulacije i nalaženja potrebnih podataka koji se nisu mogli eksperimentalno izmeriti. Pri razmatranju su uzete stvarne dimenzije okvašene površine trupa broda. Centar pramčane elektrode nalazi se na 14,5 m od pramca. Centar krmene elektrode nalazi se udaljen od centra pramčane elektrode 19 m ili 4,5 m od krme broda. Pošto je gaz broda 0,5 m, to je predstavljen isprekidanim linijama po rubu broda. Elektrode se nalaze na 0,8 m ispod trupa broda. Zbog toga su povećane dimenzije okoloanodnog ekrana po svim stranama za ovu vrednost.

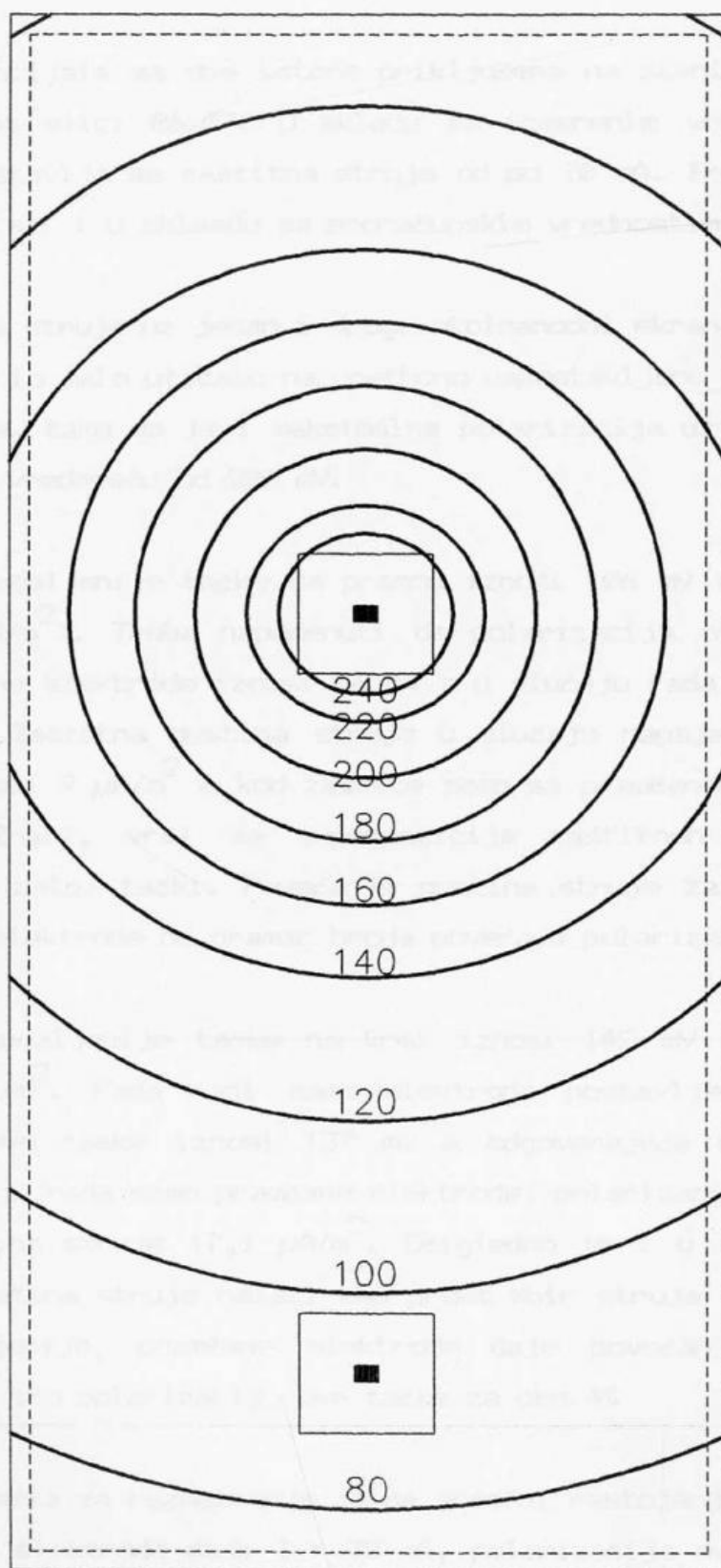
Na slici 06.05. prikazana je u preseku odmah ispod površine broda raspodela potencijala. Razmatran je slučaj kada je samo krmena elektroda priključena na stanicu katodne zaštite. Vrednost izlazne struje iz krmene elektrode iznosi 70 mA. U tom slučaju maksimalna vrednost polarizacije brodskog čelika i to uz okoloanodni ekran iznosi 280 μV. Maksimalna gustina struje koja odgovara ovoj maksimalnoj polarizaciji iznosi 4,95 mA/m<sup>2</sup>. Najniža vrednost polarizacije na krmi iznosi 137 mV. Ovome odgovara gustina zaštitne struje 0,1 mA/m<sup>2</sup>. Tačka sa najnižom polarizacijom je istovremeno i najudaljenija tačka od ove elektrode i nalazi se na pramcu i ima polarizaciju 46 mV. Gustina zaštitne struje u ovoj tački iznosi svega oko 9 μA/m<sup>2</sup>.

Na slici 06.06. prikazana je raspodela potencijala ispod trupa razmatrana pod istim uslovima kao i u prethodnom slučaju samo što se zaštita vrši pramčanom elektrodom, takođe sa strujom od 70 mA. Razumljivo je da je zbog toga maksimalna polarizacija iznosi uz okoloanodni ekran 280 mV čemu odgovara i maksimalna gustina struje od 4,95 mA/m<sup>2</sup>. Na pramčanom piku ili najudaljenijoj tački pramca polarizacija iznosi 98 mV čemu odgovara gustina struje 36,5 μA/m<sup>2</sup>. Najniža prenapetost nalazi se na krmenom delu i iznosi 70 mA. Ovome odgovara zaštitna gustina struje od 17,1 μA/m<sup>2</sup>.



Slika 06.05. Raspodela prenapetosti (mV) po trupu broda sa priključenom krmenom elektrodom na stanicu katodne zaštite i sa izlaznom strujom od  $70 \text{ mA/m}^2$





2. PRAMCANA ELEKTRODA

1. KRMENA ELEKTRODA

Slika 06.06. Raspodela prenapetosti (mV) po trupu broda sa priključenom pramčanom elektrodom na stanicu katodne zaštite i sa izlaznom strujom od  $70 \text{ mA/m}^2$

## 6.09. RASPODELA POTENCIJALA SA OBE UKLJUČENE ELEKTRODE

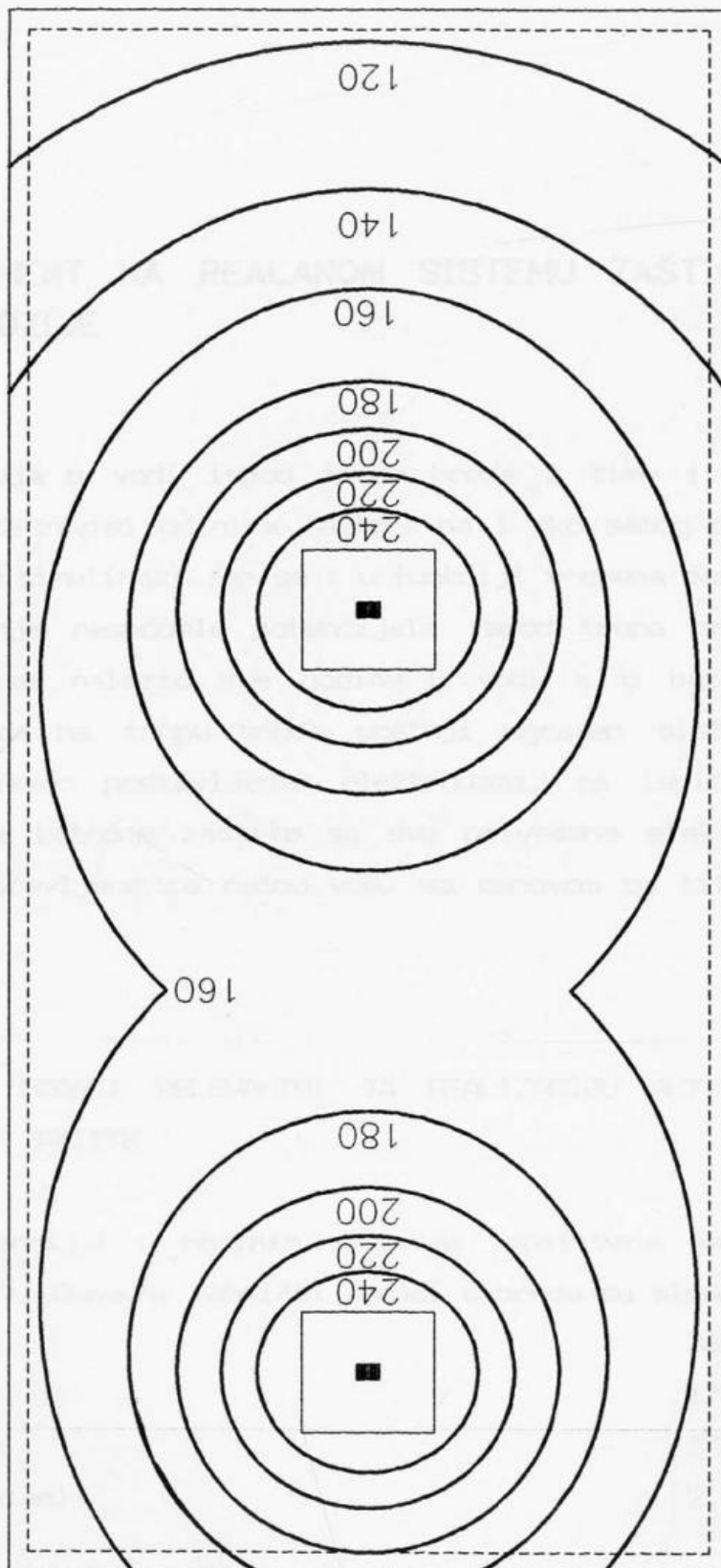
Raspodela potencijala sa obe katode priključene na stanicu katodne zaštite prikazana je na slici 06.07. U skladu sa izmerenim vrednostima kroz obe elektrode uspostavlja se zaštitna struja od po 70 mA. Pri tome je napon na obe elektrode isti i u skladu sa proračunskim vrednostima iznosi 6,3 V.

Mada se gustina struje uz jedan i drugi okoloanodni ekran povećala za oko 30  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ , to je vrlo malo uticalo na prethodno uspostavljenu gustinu struje samo jedne elektrode, tako da je i maksimalna polarizacija uz okoloanodne ekrane ostala ista sa vrednošću od 280 mV.

Potencijal najudaljenije tačke na pramcu iznosi 106 mV (a zaštitna gustina struje 45,5  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ ). Treba napomenuti da polarizacija ove tačke u slučaju rada samo krmene elektrode iznosi 46 mV a u slučaju rada pramčane elektrode iznosi 98 mV. Zaštitna gustina struje u slučaju napajanja samo sa krmenom elektrodom iznosi 9  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  a kod zaštite samo sa pramčanom elektrodom iznosi 36,5  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . Znači, vrši se superpozicija zaštitnih struja ali ne i polarizacija u datoj tački. Povećanje gustine struje za oko 25% koliki je uticaj krmene elektrode na pramac broda povećava polarizaciju za oko 8%.

Potencijal najudaljenije tačke na krmi iznosi 142 mV a zaštitna gustina struje 120  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . Kada radi samo elektroda postavljena na krmi broda, polarizacija ove tačke iznosi 137 mV a odgovarajuća gustina struje 100  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . U slučaju rada samo pramčane elektrode, polarizacija ove tačke iznosi 70 mV a gustina struje 17,1  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . Očigledno je i u ovom slučaju da se rezultujuća gustina struje nalazi kao prost zbir struja kroz obe elektrode. Doprinos udaljenije, pramčane elektrode daje povećanje oko 17% ukupne gustine struje što polarizaciju ove tačke za oko 4%.

Interesantna tačka za razmatranje je na sredini rastojanja između elektroda. Kada bilo koja elektroda daje  $I = 70$  mA, polarizacija ove tačke iznosi 142 mV a gustina struje 120  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . Kada se priključi i druga elektroda, dajući istu struju, zaštitna gustina struje poveća duplo ili za 100%, ali se polarizacija povećava na vrednost od 168 mV ili za 18 %.



Slika 06.07. Raspodela prenapetosti (mV) po trupu broda sa obe priključene elektrode na stanicu katodne zaštite i sa izlaznim strujama iz svake elektrode od  $70 \text{ mA/m}^2$

## 07. EKSPERIMENT NA REALANOM SISTEMU ZAŠTIĆENOM OD KOROZIJE

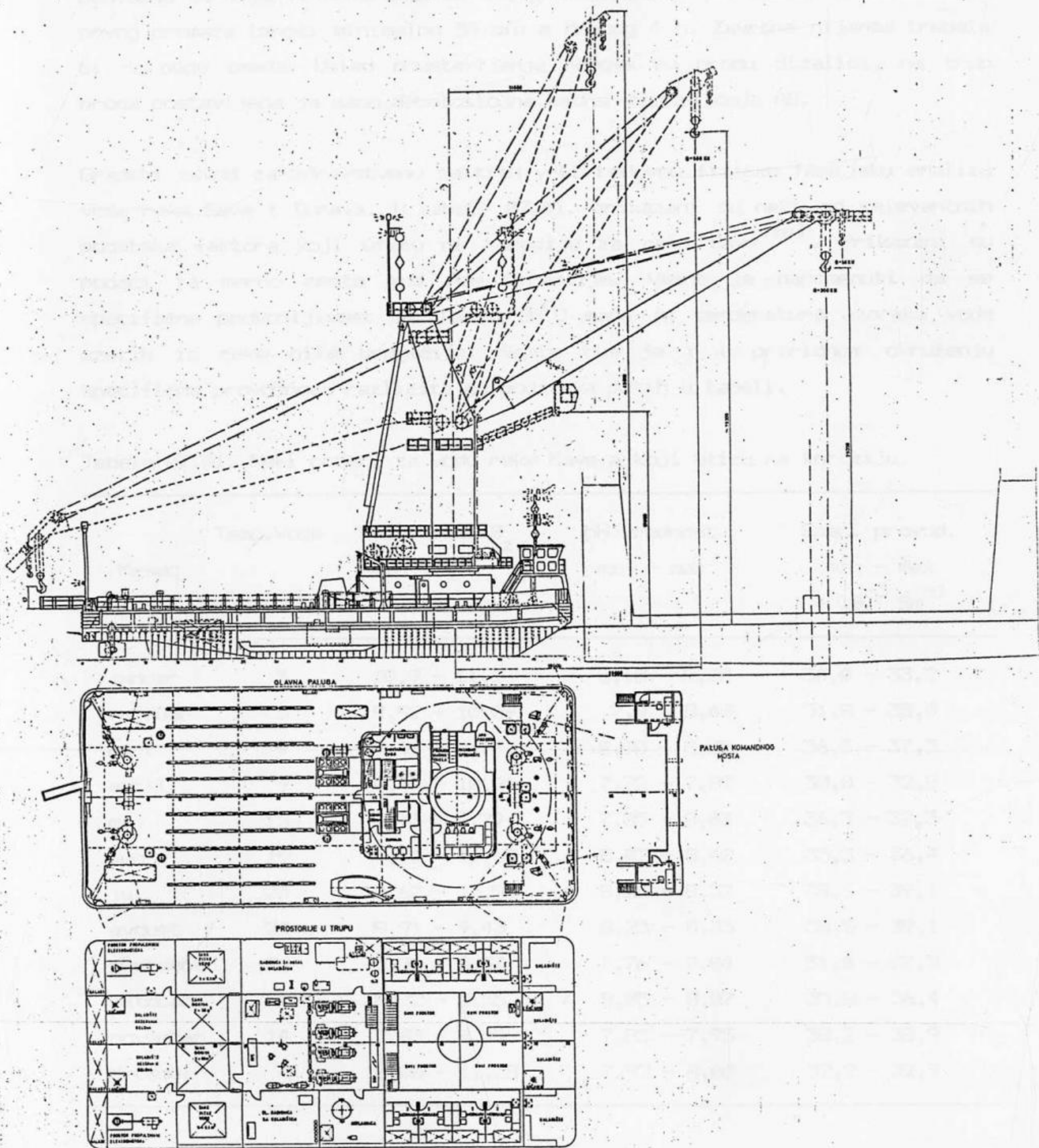
Raspodela struja u vodi ispod trupa broda a time i prenapona na trupu plovnog objekta zavisi od niza faktora na i oko samog plovnog objekta koje je dosta teško simulirati jer se i u funkciji vremena dosta menjaju. Zato je izvršeno merenje raspodele potencijala ispod trupa broda jednog plovnog objekta koji se nalazio dve godine u vodi a u bazenu brodogradilišta "Beograd". Mada na trupu broda postoji ugrađen sistem aktivne katodne zaštite sa fiksno postavljenim elektrodama, za ispitivanje je korišten sistem aktivne katodne zaštite sa dve privežane elektrode. Elektrode su specijalno napravljene za rečnu vodu sa osnovom od titana i prevlakom od platine.

### 7.01. OSNOVNI PODACI RELEVANTNI ZA REALIZACIJU AKTIVNE KATODNE ZAŠTITE

Raspodela potencijal u realnim uslovima ispitivana je na brodu dizalici ( slika 07.01 ). Osnovni tehnički podaci o brodu su sledeći:

- Dužina	38 m
- širna	17 m
- Bočna visina	3,2 m
- Gaz (maksimalan)	2,2 m

Brod dizalica ima ravan trup sa blagim prelazom ka krmi i propeleru. Nalazi se preko 2 godine u bazenu brodogradilišta Beograd zaštićen samo premazom. Podvodni deo trupa dizalice ima površinu oko  $840 \text{ m}^2$  i štiti se katran epeoksi bojom AB debeloslojnom u skladu sa standardom SNO 3926 i to sa tri premaza  $80 \mu\text{m}$  svaki.



Slika 07.01. Generalni plan broda dizalice



U skladu sa standardom SNO 3927 na trup dizalice potom bi se nanosila podvodna otrovna vinilna boja sa dva premaza po  $50 \mu\text{m}$  svaki. Vreme sušenja prvog premaza iznosi minimalno 30 min a drugog 4 h. Završna nijansa trebala bi da bude smeđa. Usled obustavljanja radova na brodu dizalici, na trup broda postavljena je samo debeloslojna katran-epoksi boja AB.

Gradski zavod za zdravstvenu zaštitu vrši redovnu fizičko hemijsku analizu vode reka Save i Dunava. U tabeli 07.01. prikazani su neki od relevantnih podataka faktora koji utiču na koroziju za reku Savu [20]. Prikazani su podaci za merno mesto kod Ade Ciganlije. Važno je napomenuti da se specifična provodljivost merila na  $20^{\circ}\text{C}$  mada je temperatura uzoraka vode uzetih iz reke bila drugačija. Samim tim je i u prirodnom okruženju specifična provodnost različita od podataka datih u tabeli.

Tabela 07.01. Neki podaci za vodu reke Save a koji utiču na koroziju

Mesec	Temp.vode $^{\circ}\text{C}$	Rastvoreni $\text{O}_2$ min - max mg/l	pH vrednost min - max -	Spec. provod. min - max $\cdot 10^{-3} \text{Sm}^{-1}$
januar	3	10,9 - 11,2	8,10 - 8,20	30,0 - 33,2
februar	5	9,92 - 10,09	7,9 - 8,40	31,8 - 35,0
mart	9	9,41 - 9,77	8,00 - 8,05	36,5 - 37,3
april	9	9,48 - 10,21	7,72 - 7,89	30,0 - 32,8
maj	15	7,70 - 8,79	7,85 - 8,03	36,3 - 37,3
jun	19	9,15 - 10,60	8,02 - 8,40	35,3 - 36,4
jul	23	9,62 - 11,50	8,25 - 8,32	38,6 - 39,1
avgust	24	8,91 - 9,43	8,23 - 8,35	38,5 - 39,1
septembar	20	5,39 - 5,57	7,76 - 7,84	31,0 - 32,3
oktobar	20	8,32 - 8,55	8,05 - 8,07	35,8 - 36,4
novembar	14	7,83 - 8,09	7,85 - 7,95	38,2 - 38,9
decembar	4	10,08 - 11,28	7,92 - 8,00	32,2 - 32,9

Na osnovu vešegodišnje uzetih uzoraka, može se uzeti da:

- Elektrolitička provodljivost  $\sigma$  reke Save na  $20^{\circ}\text{C}$  iznosi  $35 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ , mada se tokom godine može kretati u granicama  $30 - 39,1 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ ,

- pH vrednost iznosi 8,25 mada se tokom godine može kretati u granicama 7,72 do 8,40
- Temperatura rečne vode bila je tokom izvođenja eksperimenta oko 20°C, mada se tokom godine može kretati u rasponu 2 - 24,8 °C.
- Količina rastvorenog kiseonika iznosi 7,5 mg/l mada se tokom godine može kretati u granicama 5,39 mg/l do 11,28 mg/l.

Elektrodni procesi su iznosi:



## 7.02. MERNI ELEKTRODA I OPREMA

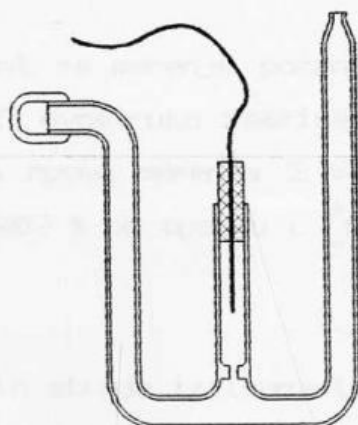
Izmeriti potencijal srebro-srebrohloridne elektrode u rastvoru hlorida

Kako je korozija u osnovi elektrohemijski proces, razvijeni su metodi za merenje promena električnih parametara sistema. Prvenstveno se misli na merenje zaštitnog potencijala kao i električnih parametara stanice katodne zaštite.

Primer tip je merenje potencijala ispod trupa broda, a drugi merenje

### 1. Merna elektrode

Kao merna ili referentna elektroda korištena je srebro-srebrohloridna elektroda. Sastoji se od srebrne žice (ili žice od nekog drugog plemenitog metala presvučenog srebrom), koja je na površini elektrolitički ili delovanjem hlora pretvorena delimično u srebro-hlorid i zaronjena u rastvor hlorida. Koristi se u rastvorima ili rastopima hlorida i to u slučajevima kada je potrebno izvršiti merenje bez kontakta elektrolita, s obzirom da se ova elektroda može uroniti direktno u rastvor ili rastop hlorida koji se ispituje. Potencijal srebro-srebrohloridne elektrode u odnosu na standardnu vodoničnu elektrodu a na 25°C iznosi:



Slika 07.02. Merna elektroda sa nastavkom za merenje potencijala ispod trupa

$$E = 0,22234 - \frac{RT}{F} \ln a_{\text{Cl}^-}$$

sa temperaturnim koeficijentom od oko  $-0,6 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

Elektrodna reakcija iznosi:



Izmereni potencijal srebrno-srebrohlorid elektrode u zasićenom jednomolarnom rastvoru kalijum nitrata (  $1\text{M KNO}_3$  ) iznosi  $-199 \text{ mV}$  na temperaturi  $20^\circ\text{C}$  u odnosu na standardnu vodoničnu elektrodu.

Poseban problem bio je merenje potencijala ispod trupa broda, a što znači iznad glave ronioca. Za tu svrhu konstruisan je specijalan dodatak slika 07.02. u kome se nalazio jednomolarni rastvor kalijum hlorida tako da su ispitivanje uspešno obavljena.

Povezivanje merne elektrode sa mernim instrumentima obavljeno je brodskim kablom tip MGCG. Kako kroz ovaj kabl prolazi struja reda  $\mu\text{A}$  presek kabla određen je isključivo mehaničkim karakteristikama provodnika, najmanjeg mogućeg preseka koji se primenjuje u brodogradnji od  $1,5 \text{ mm}^2$ .

Kod fiksno postavljenih referentnih elektroda, potrebno je prostor gde provodnik koji prenosi potencijal prolazi kroz trup broda zaštititi malim koferdanom (međuprostorom).

## 2. Merni potencijal za električna merenja

Kao merni instrument za merenje potencijala referentnih elektroda korišćen je Filipsov PM 2527 dvostruko zaštićen laboratorijski digitalni multimeter vrhunske klase. Za opseg merenja  $2 \text{ V}$ , rezolucija iznosi  $0,01 \text{ mV}$ . Tačnost merenja iznosi  $\pm 0,002\%$  po opsegu i  $\pm 0,002\%$  za čitanje. Ulazna otpornost iznosi  $10 \text{ MOhm}$ .

## 3. Merenje izlaznih struja iz ispravljača

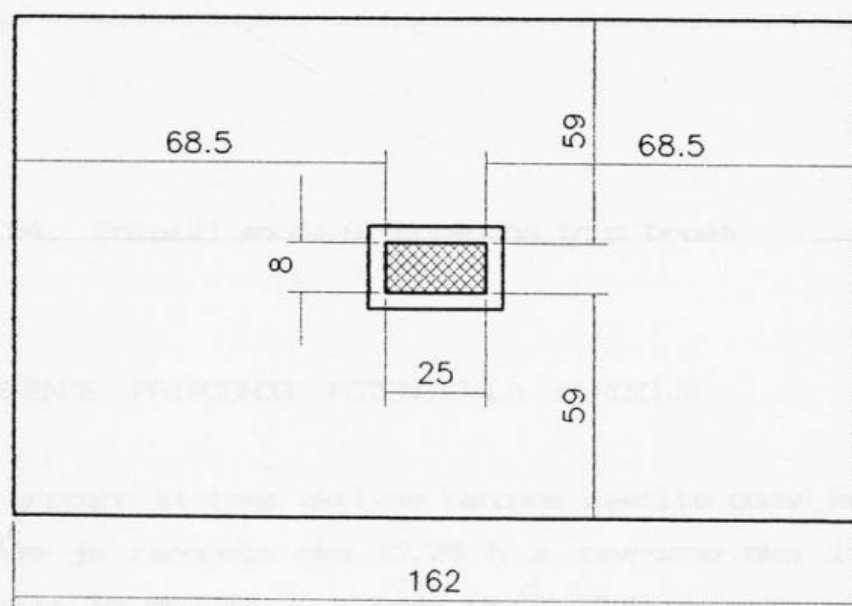
Izlazne struje iz ispravljača merene su pomoću dva identična laboratorijska instrumenta sa kretnim kalemom. Klasa tačnosti instrumenata iznosi  $0,5$ . Korišteni su merni opsezi  $60 \text{ mA}$  i  $120 \text{ mA}$ .

#### 4. Merenje izlaznog napona iz ispravljača

Merenje izlaznog napona iz ispravljača obavljeno je laboratorijskim instrumentom sa kretnim kalemom. Klasa tačnosti instrumenta iznosi 0,5. Korišteni su merni opsezi 12 V i 30 V.

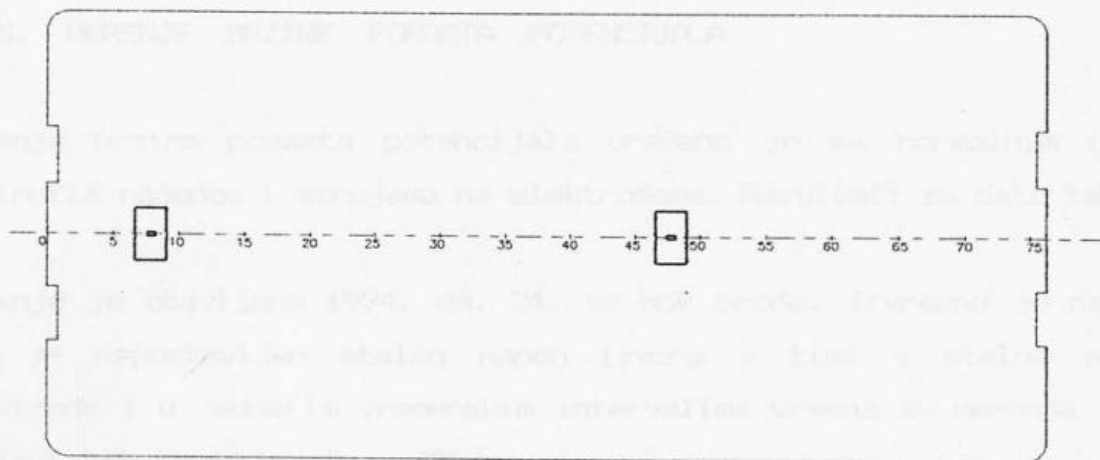
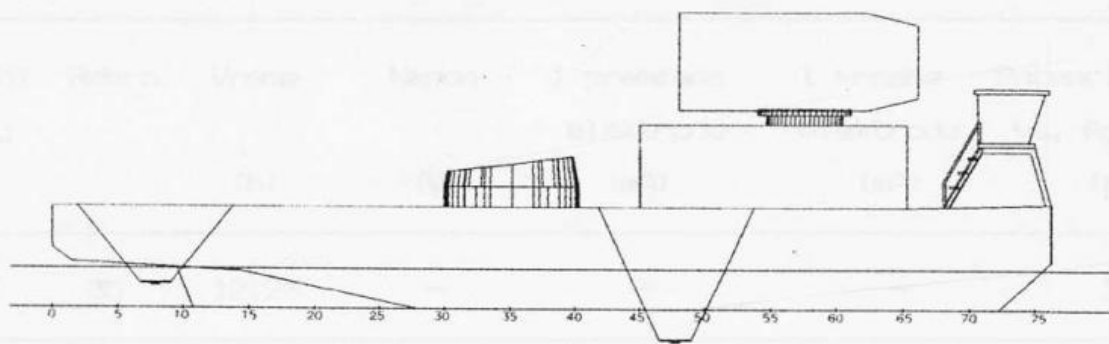
#### 7.03. POSTAVLJANJE ANODA ISPOD BRODA

Ispod trupa broda dizalice, postavljene su dve identične radne elektrode. Obe su postavljene na sredini broda (ispod kobilice). Krmena je postavljena ispod osmog rebra a pramčana ispod 47 rebra. Elektrode su napravljene od titana se presvlakom od platine debljine 1  $\mu\text{m}$ . Dimenzije elektrode su 250 x 85 mm. Elektrode se pričvršćene na sredinu ploče od polimetakrilata (slika 07.03.) dimenzija 162 x 126 mm koja je imala ulogu okoloanodnog ekrana. Pomoću 4 užeta pričvršćene su ove ploče ispod broda i fiksirana na oko 80 cm ispod trupa broda.



Slika 07.03. Radna elektroda i okoloanodni ekran

Mada je za ovu namenu anoda provizorno spojena brodskim kablom tip MGCG sa pozitivnim izvodom stanice katodne zaštite, u principu je ovo povezivanje kao i sam prolaz kroz trup broda podložno proveru i verifikaciji od strane klasifikacionog društva.



Slika 07.04. Položaj anoda u odnosu na trup broda

#### 7.04. MERENJE PRIRODNOG POTENCIJALA KOROZIJE

Fužtanje u pogon sistema aktivne katodne zaštite obavljeno je 1994. 06. 22. Ispitivanje je započeto oko 12.20 h a završeno oko 15.00 h. Temperatura vazduha bila je oko 24 °C a vode 18 °C. Dubina vode ispred pramčanog dela iznosila je 8,2 m a iza krmenog dela 5,6 m.

Merenje prirodnog potencijala korozije brodskog želika obavljeno je na taj način što su na 35 rebro sa leve strane broda na boku postavljene merne elektrode i izmereni potencijali. Merenja su više puta ponavljana a rezultat je zabeležen u tabeli 07.02. Potencijal je meren pomoću elektrode koja se nalazila na oko 5 mm pored trupa broda. Korištena je elektroda od srebro - srebrohlorida.



Tabela 07.02. Prirodni potencijal korozije trupa broda

Redni broj	Rebro	Vreme (h)	Napon (V)	I pramčane elektrode (mA)	I krmene elektrode (mA)	Potencijal $\varphi_1$ vs. Ag/AgCl (mV)
1	35	12.20	-	-	-	247

## 7.05. MERENJE BRZINE PORASTA POTENCIJALA

Merenje brzine porasta potencijala urađeno je sa normalnim i povišenim narinutim naponom i strujama na elektrodama. Rezultati su dati tabelarno.

Merenje je obavljeno 1994. 06. 24. uz bok broda. Izvršeno je na taj način što je uspostavljen stalan napon izvora a time i stalna struja kroz elektrode i u jednakim vremenskim intervalima vršena su merenja potencijala uz levi bok trupa broda na 35 rebro.

Tabela 07.03. Brzina porasta potencijala sa normalnim izlaznim naponom

Redni broj	Rebro	Vreme (h)	Napon (V)	I pramčane elektrode (mA)	I krmene elektrode (mA)	Potencijal $\varphi_1$ vs. Ag/AgCl (mV)
1	35	11.30	8.63	65,5	69	240
2	35	11.35	8.63	65,5	69	375
3	35	11.40	8.63	65,5	69	386
4	35	11.50	8.63	65,5	69	380
5	35	12.05	8.63	65,5	69	348
6	35	12.20	8.63	65,5	69	408
7	35	12.35				

Ogled merenja brzine porasta potencijala obavljen je dva puta. Da bi se još jednom izvršila provera brzine porasta potencijala, izvršeno je merenje uz levi bok broda 1994. 07. 08. Ogledanje je izvršeno na taj način što je

uspostavljen stalan napon izvora a time i stalna struja kroz elektrode i u jednakim vremenskim intervalima vršena su merenja potencijala uz levi bok trupa broda na 35 rebro. Temperatura vode iznosila je 21 °C, a temperatura vazduha 25 °C.

Tabela 07.04. Brzina porasta potencijala sa normalnim naponom

Redni broj	Rebro	Vreme (h)	Napon (V)	I pramčane elektrode (mA)	I krmene elektrode (mA)	Potencijal $\phi_1$ vs. Ag/AgCl (mV)
1	35	09.40	8.75	75	74	244
2	35	09.41	8.75	75	74	366
3	35	09.42	8.75	75	74	380
4	35	09.43	8.75	75	74	385
5	35	09.44	8.75	75	74	385
6	35	09.45	8.75	75	74	390
7	35	09.46	8.75	75	74	388
8	35	09.47	8.75	75	74	391
9	35	09.48	8.75	75	74	389
10	35	09.49	8.75	75	74	391
11	35	09.50	8.75	75	74	389
12	35	09.51	8.75	75	74	392

Tabela 07.05. Brzina porasta potencijala sa povišenim naponom

Redni broj	Rebro	Vreme (h)	Napon (V)	I pramčane elektrode (mA)	I krmene elektrode (mA)	Potencijal $\phi_1$ vs. Ag/AgCl (mV)
1	35	12.30	18.1	160	168	247
2	35	12.35	18.1	160	168	708
3	35	12.45	18.1	168	172	739
4	35	13.00	18.2	168	172	745
5	35	13.15	18.3	168	173	747
6	35	13.30	18.4	168	173	746

Izvršeno je i merenje brzine porasta potencijala trupa sa povišenim izlaznim naponom i strujama iz ispravljača. Ispitivanje je izvršeno na taj način što je uspostavljena stalna struja i u jednakim vremenskim intervalima vršena su merenja potencijala uz trup broda na 35 rebro.

Kako su uspostavljeni potencijali na delu trupa dosta udaljenom od elektroda dostigli ovako visoke potencijale, ispitivanje je moralo da se obustavi.

Tabela 07.06. Brzina opadanja potencijala trupa broda sa isključenom jednom elektrodom

Redni broj	Rebro	Vreme (h)	Napon (V)	I pramčane elektrode (mA)	I krmene elektrode (mA)	Potencijal $\varphi_1$ vs. Ag/AgCl (mV)
1	35	10.01	8.75	0	74	390
2	35	10.02	8.75	0	74	355
3	35	10.03	8.75	0	74	358
4	35	10.04	8.75	0	74	360
5	35	10.05	8.75	0	74	360
6	35	10.06	8.75	0	74	358

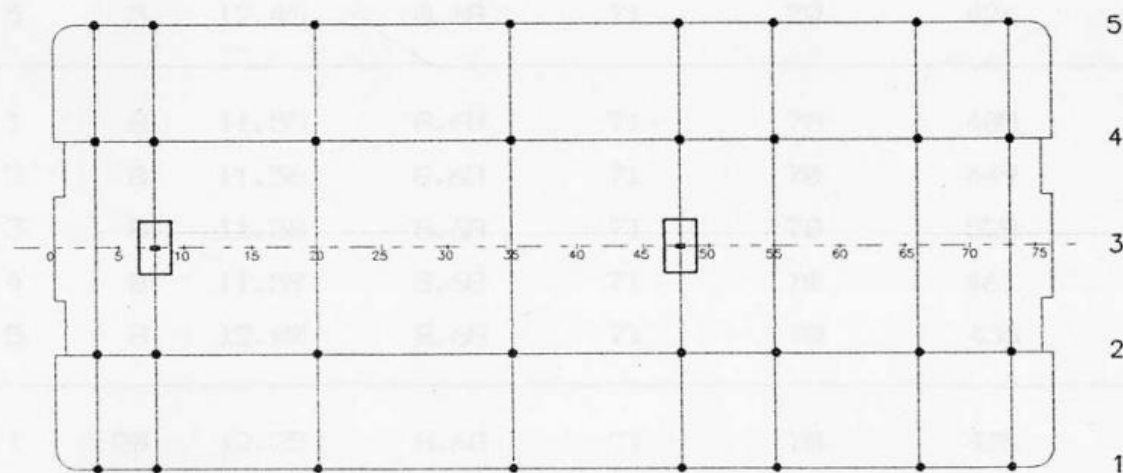
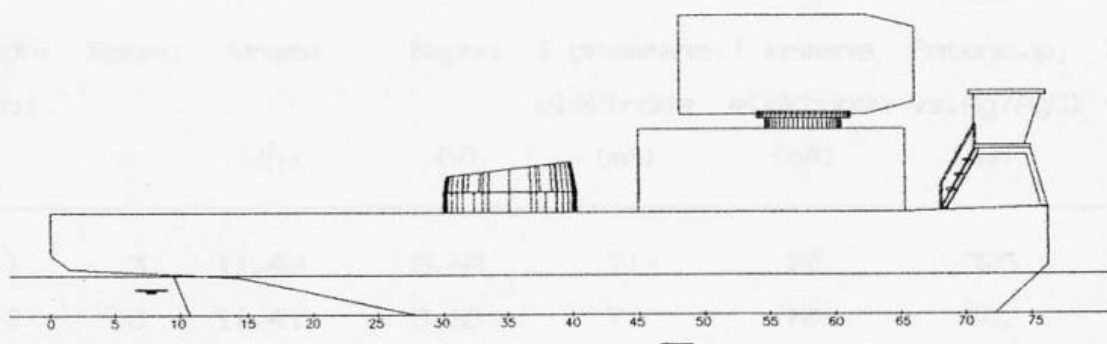
Tabela 07.07. Brzina opadanja potencijala sa isključenim elektrodama

Redni broj	Rebro	Vreme (h)	Napon (V)	I pramčane elektrode (mA)	I krmene elektrode (mA)	Potencijal $\varphi_1$ vs. Ag/AgCl (mV)
1	35	10.10	8.75	0	0	356
2	35	10.11	8.75	0	0	328
3	35	10.12	8.75	0	0	324
4	35	10.13	8.75	0	0	326
5	35	10.14	8.75	0	0	328
6	35	10.15	8.75	0	0	

## 7.06. MERENJE BRZINE OPADANJA POTENCIJALA

Brzina opadanja zaštitnog potencijala obavljena je na dva načina. Isključeno je napajanje pramčane elektrode i posmatrana je promena potencijala uz 35 rebro. Rezultati su dati u tabeli 07.06.

Posle toga je isključena i druga elektroda. Rezultati su takođe dati tabelarno.



Slika 07.05. Merne tačke na trupu broda

## 7.07. MERENJE POTENCIJALA TRUPA BRODA U USTALJENOM STANJU

Ovo merenje obavljeno je 1994. 06. 29 pošto su elektrode 5 dana bile priključene na stalan napon iz stanice katodne zaštite. Na osnovu prethodnih ispitivanja, smatra se da je promena potencijala trupa broda završena i da je nastupilo ustaljeno stanje sa konstantnom polarizacijom ili

prenaponom brodskog čelika. Ispitivanje je obavljeno u reci čija je temperatura bila 20 °C a temperatura vazduha iznosila je 33 °C. Elektrode su se nalazile na rastojanju od oko 80 cm ispod trupa broda.

Ispitivanje je obavljeno po određenoj mreži i to tako što je fiksirano jedno rebro i po njemu su izvršena 5 merenja i to od desne strane broda na levu. Mreža po kojoj je izvršeno merenje potencijala prikazana je na slici 07.05. a rezultati meranja su prikazani tabelarno.

Tabela 07.06. Merenje potencijala trupa broda

Redni broj	Rebro	Vreme (h)	Napon (V)	I pramčane elektrode (mA)	I krmene elektrode (mA)	Potenc. $\varphi_1$ vs. Ag/AgCl (mV)	Potenc. $\varphi_2$ vs. Ag/AgCl (mV)
1	3	11.40	8.68	71	70	385	315
2	3	11.41	8.68	71	70	402	315
3	3	11.42	8.68	71	70	410	293
4	3	11.43	8.68	71	70	418	346
5	3	12.45	8.68	71	70	426	309
1	8	11.55	8.68	71	70	408	155
2	8	11.56	8.68	71	70	449	128
3	8	11.58	8.68	71	70	528	167
4	8	11.59	8.68	71	70	461	138
5	8	12.00	8.68	71	70	436	129
1	20	12.25	8.68	71	70	406	119
2	20	12.26	8.68	71	70	412	103
3	20	12.27	8.68	71	70	420	114
4	20	12.28	8.68	71	70	428	128
5	20	12.29	8.68	71	70	435	129
1	35	12.37	8.7	72	70	375	97
2	35	12.38	8.7	72	70	384	99
3	35	12.39	8.7	72	70	393	110
4	35	12.40	8.7	72	70	395	110
5	35	12.41	8.7	72	70	405	116



1	46	12.50	8.72	72	70	407	113
2	46	12.51	8.72	72	70	428	118
3	46	12.52	8.72	72	70	504	318
4	46	12.53	8.72	72	70	465	208
5	46	12.54	8.72	72	70	445	185
<hr/>							
1	55	12.50	8.72	71	70	385	140
2	55	12.51	8.72	71	70	395	135
3	55	12.52	8.72	71	70	415	122
4	55	12.53	8.72	71	70	410	150
5	55	12.54	8.72	71	70	413	158
<hr/>							
1	66	12.56	8.72	72	70	363	88
2	66	12.57	8.72	72	70	371	94
3	66	12.58	8.72	72	70	374	108
4	66	12.59	8.72	72	70	370	105
5	66	13.00	8.72	72	70	360	98
<hr/>							
1	73	13.10	8.70	71	69	340	88
2	73	13.11	8.70	71	69	345	93
3	73	13.12	8.70	71	69	350	100
4	73	13.13	8.70	71	69	340	85
5	73	13.14	8.70	71	69	330	64

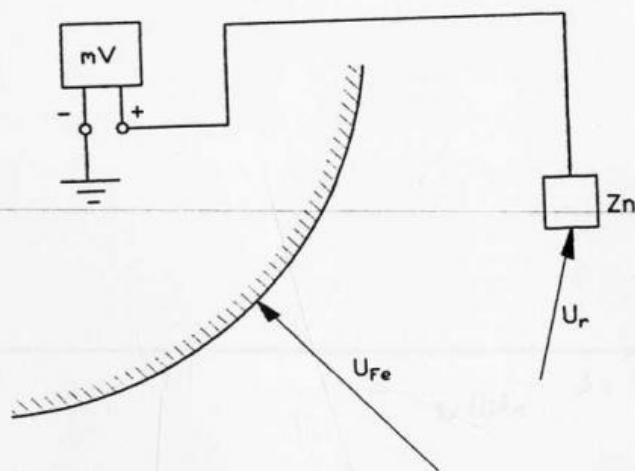
Potencijal je meren pomoću dve elektrode od od kojih se jedna nalazila na oko 5 mm a druga na 500 mm ispod trupa broda. Korištene su elektrode od srebro - srebrohlorida sa posebnim nastavkom radi merenja potencijala iznad prve merne elektrode. Rastojanje je bilo normalno u odnosu na trup broda.

## 08. RAZMATRANJE REZULTATA

Rezultati su razmatrani u dva pravca. Prvo su sagledani praktično izmerni podaci dobiveni ispitivanjem razvoja korozije na jednom plovnom objektu, da bismo ih uporedili sa rezultatima dobijenim pomoću numeričkih metoda kao i sa praktično korištenim analitičkim formulama. Na kraju su razmotreni praktični rezultati dobijeni merenjem zaštitnog potencijala ispod trupa broda.

### 8.01. PRIRODNI POTENCIJAL KOROZIJE BRODSKOG TRUPA

Na slici 08.01 predstavljeno je jedno standardno kolo za merenje potencijala broskog trupa. Važno je napomenuti da su svi potencijali izmereni u odnosu na referentnu tačku koja se nalazi u beskonačnosti. Zato će smerovi elektromotornih sila za trup broda kao i za referentnu elektrodu biti kao na slici. Visokoomski milivoltmetar minus krajem spojen je na trup broda, a pozitivnim, za referentnu elektrodu.



Slika 08.01. Elektromotorne sile u kolu merenja potencijala trupa broda

Prema II Kirhofovom pravilu za zatvorene konture važi jednačina:

$$\Sigma e = 0$$

Primenjeno za slučaj prikazan na slici:

$$U_i - U_r + U_{Fe} = 0$$

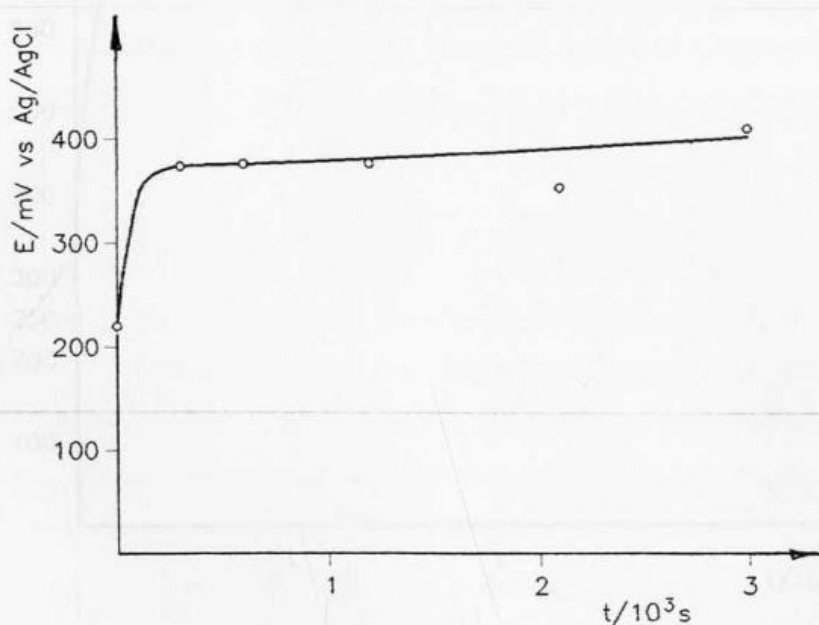
Potencijali su dati u odnosu na standardnu vodoničnu elektrodu, ali to u ovom razmatranju nije bitno, već samo činjenica da su obe polarizacije date u odnosu na istu referentnu elektrodu. Po zatvorenoj naponskoj konturi, jedanput se ovaj napon nalazi sa pozitivnom a drugi put sa negativnim znakom tako da se potire.

Pretpostavljeno je da su svi padovi napona u kolu zanemarljivi s obzirom da visoku omsku vrednost instrumenata i male otpore provodnika koji spajaju instrument i referentnu elektrodu. Zanemarljivi su i otpori tih kontakata svih spojeva u kolu.

Poznat je, u laboratoriji izmeren potencijal referentne elektrode u odnosu na standardnu vodonikovu elektrodu.

$$U_r(\text{Ag/AgCl}) = -199 \text{ mV}$$

Na instrumentu je (tabela 07.02) izmeren potencijal referentne elektrode od 247 mV.



Slika 08.02. Brzina uspostavljanja zaštitnog potencijala za izlazni napon iz SKZ od 8,6 V.

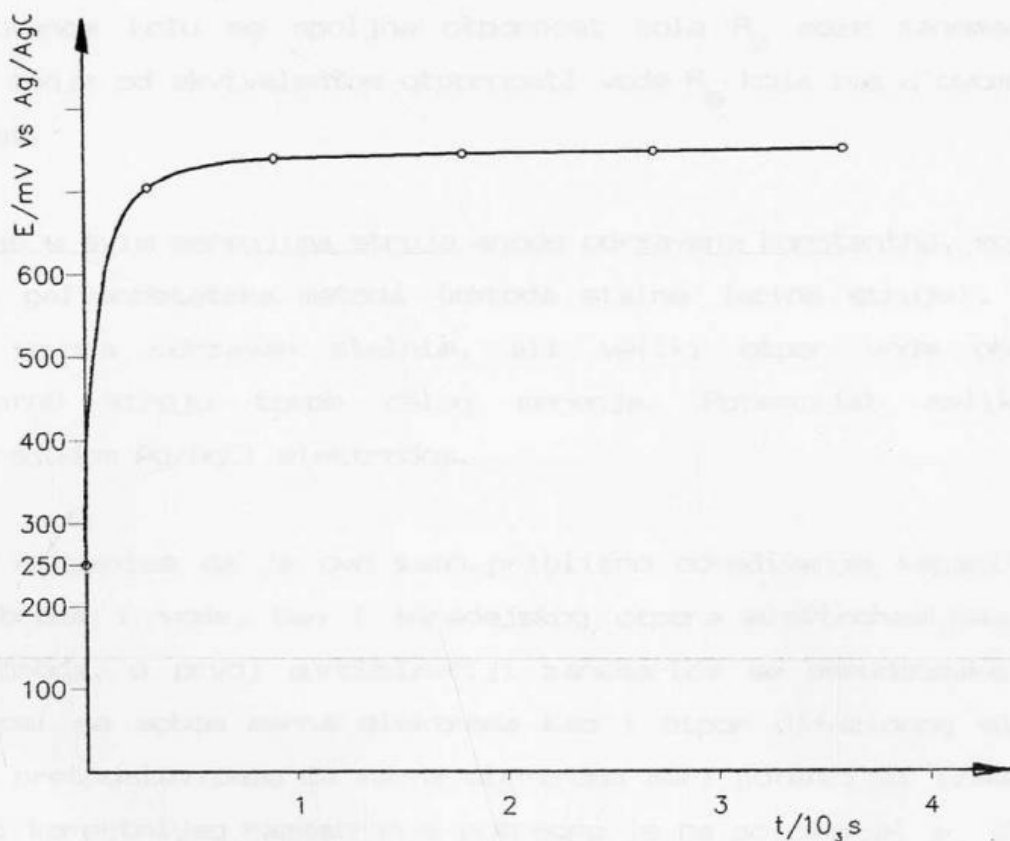
Prirodni potencijal korozije čelika brodskog trupa, ili standardni elektrohemijski potencijal u odnosu na standardnu vodikovu elektrodu iznosi

$$U_{Fe} = U_r - U_i = -199 - 247 = - 446 \text{ mV}$$

Ovaj potencijal pokazuje da je zaštita osnovnim premazom nedovoljna i da je to nivo potencijala čelika na kome se prirodno odvija proces korozije.

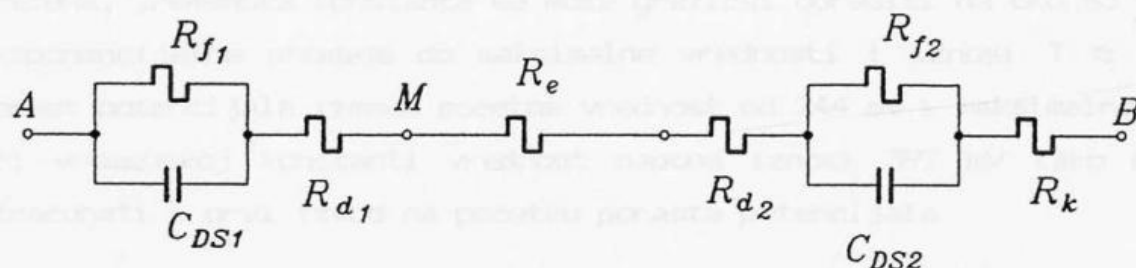
### 8.02. BRZINA USPOSTAVLJANJA ZAŠTITNOG POTENCIJALA

Proverena je dva puta i to na 35 rebru, sa smanjenim i povišenim zaštitnim naponom iz stanice katodne zaštite. Rezultati su dati u tabelama 07.04 i 07.05. Na slikama 08.02 i 08.03 prikazani su ovi potencijali u odnosi na Ag/AgCl elektrodu.



Slika 08.03. Brzina uspostavljanja zaštitnog potencijala za izlazni napon iz SKZ od 17 V.

Kada se trup broda priključi na stalan napon izvora jednosmerne struje, prenapetost ili polarizacija čelika se menja praktično po eksponencijalnom zakonu. Ekvivalentni električni analog kola može se prikazati slikom 08.04.



Slika 08.04. Ekvivalentna električna shema aktivne katodne zaštite

U ovoj ekvivalentnoj shemi,  $R_{f1}$  i  $R_{f2}$  su odgovarajući Faradejski otpori trupa broda i anode,  $C_{DS1}$  i  $C_{DS2}$  kapacitivnosti ovih dvosloja, a  $R_{d1}$  i  $R_{d2}$  ekvivalentni otpori difuzionih slojeva uz trup i anodu.  $R_e$  je ekvivalentna otpornost vode a  $R_k$  je spoljašnji otpor u kolu (provodnika i kontakata). U realizovanom kolu se spoljna otpornost kola  $R_k$  može zanemariti, jer je znatno manje od ekvivalentne otpornosti vode  $R_e$  koja ima u ovom kolu najveću vrednost.

Pošto je u svim merenjima struja anode održavana konstantna, može se reći da je ovo galvanostatska metoda (metoda stalne jačine struje). Praktično je napon izvora održavan stalnim, ali veliki otpor vode obezbeđivao je konstantnu struju tokom celog merenja. Potencijal čelika meren je odgovarajućom Ag/AgCl elektrodom.

Svesni činjenice da je ovo samo približno određivanje kapaciteta dvosloja trupa broda i vode, kao i faradejskog otpora elektrohemijske reakcije na trupu broda, u prvoj aproksimaciji zanemariće se pseudoomska polarizacija koju nosi sa sobom merena elektroda kao i otpor difuzionog sloja uz trup. Znači, pretpostavićemo da merena elektroda meri potencijal između tačaka A i M. Radi korektnijeg razmatranja potrebno je na potencijal  $\varphi_1$  dat u tabelama 07.05. do 07.07. dodati potencijal merne elektrode Ag/AgCl, tako da su ovi potencijali u odnosu na SVE pozitivniji za 199 mV.

Kapacitet elektrohemijskog dvosloja može se odrediti preko relacije



$$C_{DS} = \frac{I}{\left| \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t \rightarrow 0}}$$

Kako je ovo eksponencijalna zavisnost porasta potencijala u funkciji vremena, vremenska konstanta se može grafički odrediti na oko 63 % vrednosti eksponencijalne promene do maksimalne vrednosti i iznosi  $T \approx (140)$  s za porast potencijala između početne vrednosti od 244 mV i maksimalne od 392 mV. Pri vremenskoj konstanti vrednost napona iznosi 392 mV tako da se može izračunati i prvi izvod na početku porasta potencijala

$$\left| \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t \rightarrow 0} = 0,148 / 140 = 0,001057 \text{ V/s}$$

Kapacitet elektrohemijuskog dvosloja iznosi

$$C_{DS} = \frac{I}{\left| \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t \rightarrow 0}} = \frac{(75 + 74) * 10^{-3}}{1,057 * 10^{-3}} = 141 \text{ F}$$

Kapacitet elektrohemijuskog dvosloja po jedinici površine iznosi:

$$\frac{C_{DS}}{S_{Fe}} = \frac{141}{840} = 0,164 \text{ F m}^{-2}$$

Tako da se može dati algebarski izraz za porast potencijala u odnosu na SVE.

$$\varphi = \varphi_{Fe} + \eta \left[ 1 - \exp(-t/T) \right] = 0,443 + 0,148 * \left[ 1 - \exp(-t/140) \right]$$

Postupak se može proveriti i za povišeni napon. Vremenska konstanta se može grafički naći i iznosi  $T \approx (300)$  s za porast potencijala između početne vrednosti od 247 mV i maksimalne od 747 mV. Pri vremenskoj konstanti vrednost napona iznosi 328 mV tako da se može izračunati i prvi izvod na početku porasta potencijala

$$\left| \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t \rightarrow 0} = 0,562 / 300 = 0,001873 \text{ V/s}$$

Kapacitet elektrohemijuskog dvosloja iznosi

$$C_{DS} = \frac{I}{\left| \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t \rightarrow 0}} = \frac{(168 + 172) * 10^{-3}}{1,873 * 10^{-3}} = 181,5 \text{ F}$$

Kapacitet elektrohemijskog dvosloja po jedinici površine iznosi:

$$\frac{C_{DS}}{S_{Fe}} = \frac{181,5}{840} = 0,216 \text{ F m}^{-2}$$

Tako da se može dati algebarski izraz za porast potencijala

$$\varphi = \varphi_{Fe} + \eta \left[ 1 - \exp(-t/T) \right] = 0,446 + 0,315 * \left[ 1 - \exp(-t/300) \right]$$

Faradejski otpor elektrohemijskog dvosloja može se naći iz odnosa prenapetosti i ukupne struje po uspostavljanju ustaljenog stanja.. U prvom slučaju, za zaštitni napon od 8,6 V iznosi:

$$R_{f1} = \frac{\varphi_{Fe} - \varphi_m}{I} = \frac{\eta}{I} = \frac{0,392}{0,149} = 2,63 \text{ Oma}$$

A za povišeni napon iznosi:

$$R_{f2} = \frac{\varphi_{Fe} - \varphi_m}{I} = \frac{\eta}{I} = \frac{0,562}{0,34} = 1,65 \text{ Oma}$$

I iz ovog oglada potvrđena je nelinearna zavisnost promene otpornosti elektrohemijskog dvosloja u funkciji gustine struje. Ova otpornost je manja pri višoj gustini struje i obrnuto.

### 8.03. POTENCIJAL TRUPA BRODA U USTALJENOM STANJU

Polje raspodele potencijala ispod trupa broda snimljeno je u ustaljenom stanju posle 5 dana od trenutka stavljanja stanice katodne zaštite pod napon. Rezultati merenja potencijala iz tabele 07.06. prikazani su u odnosu na Ag/AgCl elektrodu na slici 08.04.

Tačka sa najvišim potencijalom na trupu broda je na 8 rebru uz okoanodni ekran i iznosi 528 mV prema Ag/AgCl elektrodi. Kako je prirodni potencijal trupa broda, prethodno izmeren i iznosi 247 mV u odnosu na istu mernu elektrodu, lako se može izračunati maksimalna prenapetost od 281 mV.

Najudaljenija tačka od elektroda i sa najnižim izmerenim potencijalom je na desnoj strani pramca broda, na 73 rebru i iznosi 340 mV. Minimalna prenapetost čeličnog lima na trupu broda iznosi 93 mV.

Dobijene ekvipotencijalne linije pokazuju dosta veliku nesimetriju raspodele potencijala na levoj strani u odnosu na desnu stranu broda. Ovo se lako može objasniti činjenicom da je brod radi raznih montažnih i zavarivačkih radova bio spojen sa uzemljenjem na kopnu. Kako su svi metalni delovi na opremnoj obali spojeni sa uzemljenjem, to se deo struje iz stanice katodne zaštite prenosio i na ove čelične šipove. To je uticalo da na levoj strani imamo drugačiju raspodelu potencijala nego na desnoj strani broda.

#### 8.04. ZAŠTITNA GUSTINA STRUJE

Merenje gustine struje dosta je teško uraditi naročito u uslovima koji vladaju ispod broda. Zato je izvršen pokušaj metodom pomoću dve referentne elektrode koje su se nalazile na određenoj distanci  $l$ . Napravljen je ram od elektroizolacionog materijal na kome su bile pričvršćene dve merne elektrode od Ag/AgCl.

Smatrajući da postoji rast potencijala najvećim delom po normalni, pronađen je gradijent potencijala u skladu sa jednačinom:

$$\text{grad } \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l}$$

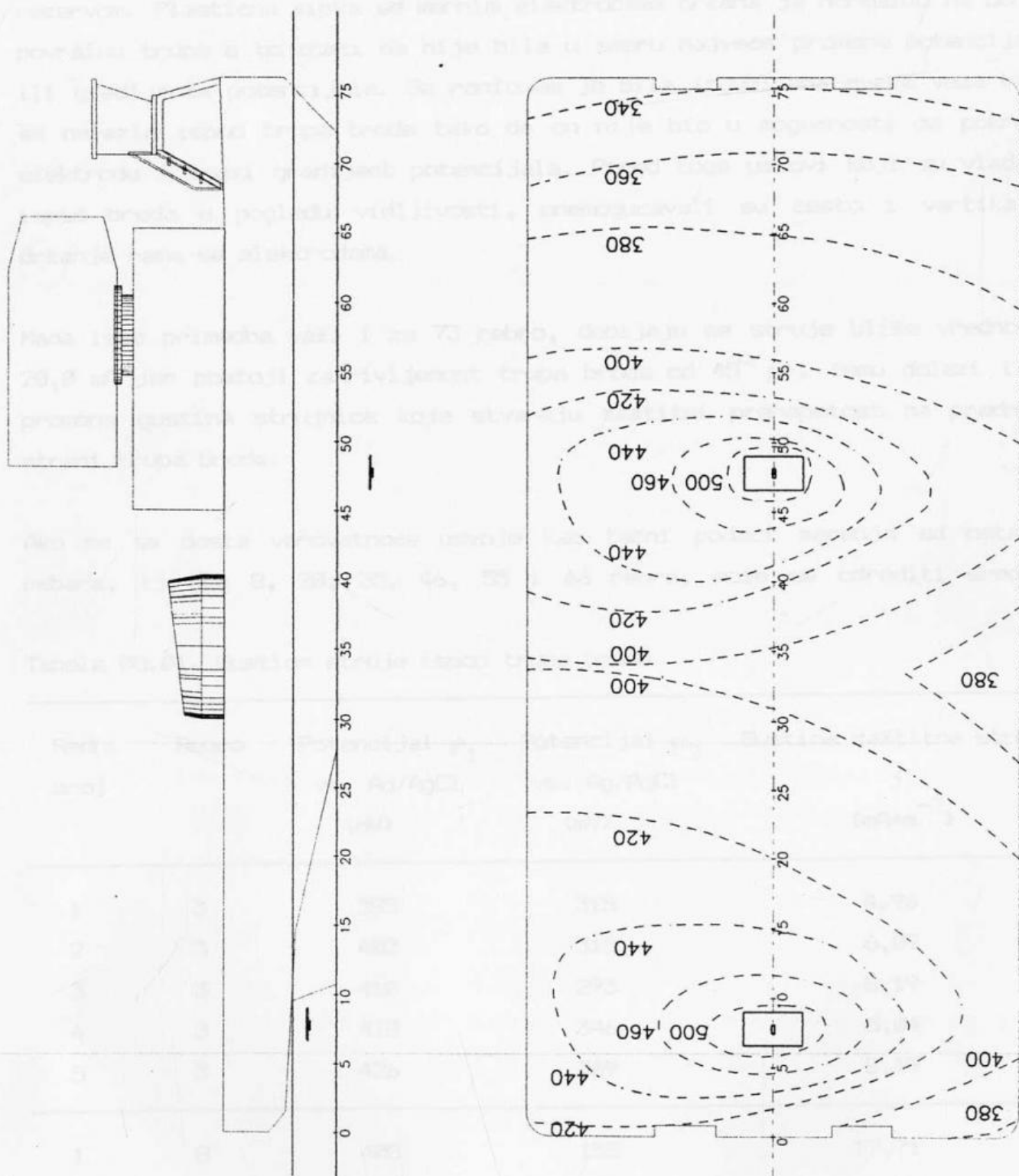
Kako je jačina polja

$$E = - \text{grad } \varphi$$

može se naći gustina struje:

$$J = \sigma E = - \sigma \text{ grad } \varphi = - \sigma \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} = \sigma \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l}$$

U ovoj približnoj jednačini uzete su u obzir vrednosti izmerene specifične električne provodnosti rečne vode  $\sigma = 35 * 10^{-3} \text{ (Sm}^{-1}\text{)}$  a dužina između mernih elektroda iznosila je  $l = 0,5 \text{ m}$ . Za potencijale  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  uzeti su podaci iz tabele 07.09. Na osnovu ovih podataka napravljena je tabela 08.01. sa izračunatim gustinama struje.



Slika 08.05. Raspodela potencijala ispod trupa broda

Cela pretpostavka o indirektnoj metodi merenja potencijala zasniva se na činjenici da je rast potencijala u smeru normale na trup broda što ne mora da bude uvek tačno.

Vidljivo je iz tabele da se podaci na trećem rebro mogu uzeti sa određenom rezervom. Plastična žipka se mernim elektrodama držana je normalno na donju površinu trupa a to znači da nije bila u smeru najveće promene potencijala ili gradijenta potencijala. Sa roniocem je bila izgubljena svaka veza kada se nalazio ispod trupa broda tako da on nije bio u mogućnosti da pokreće elektrodu i traži gradijent potencijala. Pored toga uslovi koji su vladali ispod broda u pogledu vidljivosti, onemogućavali su često i vertikalno držanje rama sa elektrodama.

Mada ista primedba važi i za 73 rebro, dobijaju se struje bliže vrednosti 20,0 mA jer postoji zakrivljenost trupa broda od 45° pri čemu dolazi i do promena gustina strujnica koje stvaraju zaštitni prenapetost na prednjoj strani trupa broda.

Ako se sa dosta verovatnoće usvoje kao tačni podaci merenja sa ostalih rebara, tj. sa 8, 20, 35, 46, 55 i 66 rebra, može se odrediti srednja

Tabela 08.01. Gustine struje ispod trupa broda

Redni broj	Rebro	Potencijal $\varphi_1$ vs. Ag/AgCl (mV)	Potencijal $\varphi_2$ vs. Ag/AgCl (mV)	Gustina zaštitne struje $j$ (mA*m <sup>-2</sup> )
1	3	385	315	4,90
2	3	402	315	6,09
3	3	410	293	8,19
4	3	418	346	5,04
5	3	426	309	8,19
1	8	408	155	17,71
2	8	449	128	22,47
3	8	528	167	25,27
4	8	461	138	22,61
5	8	436	129	21,49



1	20	406	119	20,09
2	20	412	103	21,63
3	20	420	114	21,42
4	20	428	128	21,00
5	20	435	129	21,42
<hr/>				
1	35	375	97	19,46
2	35	384	99	19,95
3	35	393	110	19,81
4	35	395	110	19,95
5	35	405	116	20,23
<hr/>				
1	46	407	113	20,58
2	46	428	118	21,70
3	46	504	318	13,02
4	46	465	208	17,99
5	46	445	185	18,20
<hr/>				
1	55	385	140	17,15
2	55	395	135	18,20
3	55	415	122	20,51
4	55	410	150	18,20
5	55	413	158	17,85
<hr/>				
1	66	363	88	19,25
2	66	371	94	19,39
3	66	374	108	18,62
4	66	370	105	18,55
5	66	360	98	18,34
<hr/>				
1	73	340	88	17,64
2	73	345	93	17,64
3	73	350	100	17,50
4	73	340	85	17,85
5	73	330	64	18,62

zaštitna gustina struje od oko  $19,0 \text{ mA m}^{-2}$ . A ako se uzme u obzir da su

izostavljeni podaci sa krajnjih tačaka gde su i gustine struje najniže, može se za celi brod ipak očekivati i nešto niža vrednost presečne zaštitne gustine struje.

Podatak o prosečnoj gustini struje po površini broda se može praktično dobiti i deljenjem ukupne struje koja je izlazila iz stanice katodne zaštite sa podvodnim delom trupa broda, naime ako se podeli ukupna struja koja ide na obe elektrode (70 i 72 mA) sa podvodnom površinom trupa broda od 840 m<sup>2</sup> dobiće se prosečna zaštitna gustina struje u iznosu od:

$$j = \frac{(I_1 + I_2)}{S} = \frac{(70 + 72) * 10^{-3}}{840} = 169 \mu\text{A m}^{-2}$$

Može se zaključiti da srednja gustina zaštitne struje za brodski čelik zaštićen samo jednim premazom katran epoksi bojom AB debeloslonim u rečnoj vodi iznosi ispod 200  $\mu\text{A/m}^2$ . Pri ovome maksimalna prenapetost uz okolnoodni ekran iznosi 281 mV a minimalna na najudaljenijoj tački od elektrode samo 93 mV. Napon izvora iznosi 8,7 V a ukupna zaštitna struja 0,142 A.

#### 8.05. ANALITIČKA REŠENJA

Za dosadašnji rad na polju aktivne katodne zaštite karakterističan je manje tačan a više inženjerski pristup. Korišteni su sa određenom tačnošću, poznate zakonitosti o raspodeli jednosmernih polja vremenski konstantnih struja. Takvi postupci opravdani su i propisima kalsifikacionih društava koja su ih usvojila.

Razmatrani su analitičke formule ugrađene u Lojdove propise i Ruske tačnije ali manje praktične proračune.

S obzirom na napravljen trodimenzionalni program i na izvršena merenja u rečnoj vodi, upoređena su ova rešenja i date su tabelarno vrednosti. Posebna pogodnost je upoređivanje empirijskih i numeričkih proračuna sa praktično izmerenim vrednostima u rečnoj i morskoj vodi.

U ovim upoređivanjima su razmatrana:

- raspodela potencijala po trupu broda

- otpornost između anode i trupa broda
- potreban broj anoda
- dimenzije okoloanodnog ekrana

### 8.06. DVAJTOVA FORMULA

Ako se iskoristi modifikovana Dvajtova formula (05.14) za računanje otpora između elektrode u obliku ploče i trupa broda, može se dobiti:

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left[ \ln \frac{4 L}{r} - 1 \right] = \frac{10^3}{35 * 2 \pi * 0,25} \left[ \ln \frac{4 * 0,25}{0,04} - 1 \right]$$

$$R = 40,35 \text{ Oma}$$

Potreban napon izvora dobija se iz izraza:

$$U = \eta_k + R_a I + \eta_a = 0,56 + 40,35 * 0,070 + 1,7 = 5,085 \text{ V}$$

Može se primetiti da Dvajtova formula daje nešto nižu vrednost otpora elektrode u rečnoj vodi u odnosu na izmerenu vrednost. Samim tim je i potreban napon izvora nešto niži ( 3,15 V ili 37 % ) od izmerenog.

Britanski standardi napravljeni su uglavnom za dva tipa elektroda: u obliku diska i pravougaone u obliku ploče ili šipke.

### 8.07. ELEKTRODA U OBLIKU DISKA

Sa određenom tačnošću se pločasta elektroda sa ravnomerno udaljenim okoloanodnim ekranom može predstaviti kao elektroda u obliku diska iste površine kao pravougaonik (05.09). U drugom približenju se za elektrode u obliku diska mogu koristiti formule izvedene za poluloptastu elektrodu.

Proveriće se potencijal na oplati trupa broda, i to po kobilici, jer za to postoje izmereni podaci. Potencijal po trupu broda ostvaren pomoću dve anode može se naći prostim sabiranjem prenapetosti na trupu koje stvaraju obe elektrode. Udeo prenapetosti svake anode srazmeran je njenoj udaljenosti od posmatrane tačke i struje kroja prolazi kroz datu anodu. Ove prenapetosti treba sabrati sa standardnim potencijalom korozije da bi se dobio ukupan potencijal brodskog čelika.

Zato se može pisati (05.08) da je potencijal bilo koje tačke na oplati trupa

$$\varphi = \varphi_0 + \eta_1 + \eta_2 = 0,247 + \frac{\rho I_1}{2 \pi r_1} + \frac{\rho I_2}{2 \pi r_2}$$

Numerički rezultati se mogu predstaviti i tabelarno:

Tabela 08.02. Raspodela potencijal sa elektrodama u obliku diska

Rebro	3	5	10	20	30	40	45	50	60	73
$r_1$ (m)	2,6	1,7	1,28	6	11	16	18,5	21	26	32,5
$\eta_1$ (mV)	122	187	248	53	29	20	17	15	12	10
$r_2$ (m)	22	21	18,5	13,5	8,5	3,6	1,28	1,7	6,5	13
$\eta_2$ (mV)	15	16	18	24	38	91	256	193	50	25
$\eta$ (mV)	137	203	266	77	67	111	273	218	62	35
$\varphi$ (mV) vs. Ag/AgCl	384	450	513	324	314	358	520	455	310	282

Radius okoloanodnog ekrana može se naći iz približne jednačine (05.15).

$$N = \frac{I}{2 \pi \sigma (\varphi - \varphi_0)} = \frac{0,070}{2 \pi 0,035 (-0,247 + 0,520)} = 1,166 \text{ m}$$

Za struju je uzeta ukupna struje anode, a razlika potencijala je između najvišeg potencijala uz okoloanodni ekran i standardnog potencijala korozije čelika u vodi.

Ako se dozvoljava maksimalna polarizacija od 550 mV, može se postaviti okoloanodni ekran nešto manjih dimenzija:

$$N = \frac{I}{2 \pi \sigma (\varphi - \varphi_0)} = \frac{0,070}{2 \pi 0,035 (-0,247 + 0,797)} = 0,578 \text{ m}$$

Znači, da maksimalna polarizacija čelika i to uz okoloanodni ekran ne pređe 550 mV, potrebno je da dimenzije okoloanodnog ekrana budu tolike da minimalna razdaljina između anode i trupa broda ne bude manja od 0,578 m.

### 8.08. ELEKTRODA KAO PLOČA

Pravougaone elektrode daju malo drugačiji raspored potencijala u skladu sa jednačinom (05.13):

$$\varphi = \varphi_0 + \eta_1 + \eta_2 = 0,247 + \frac{\rho I_1}{2 \pi r_1} \left[ \ln \frac{2 r_1}{L} - 1 \right] + \frac{\rho I_2}{2 \pi r_2} \left[ \ln \frac{2 r_2}{L} - 1 \right]$$

Ovi rezultati mogu se predstaviti i tabelarno

Tabela 08.03. Raspodela potencijala sa elektrodama u obliku ploče

Rebro	3	5	10	20	30	40	45	50	60	73
$r_1$ (m)	2,6	1,7	1,28	6	11	16	18,5	21	26	32,5
$\eta_1$ (mV)	249	301	330	152	101	78	69	62	53	45
$r_2$ (m)	22	21	18,5	13,5	8,5	3,6	1,28	1,7	6,5	13
$\eta_2$ (mV)	62	65	71	89	124	215	339	310	149	92
$\eta$ (mV)	311	366	401	241	225	293	408	472	202	137
$\varphi$ (mV) vs. Ag/AgCl	558	613	648	488	472	540	655	719	449	384

Otpornost elektrode može se naći iz formule



$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left[ \ln \frac{2L}{B} - 1 \right] = 30,3 \text{ Oma}$$

Potreban napon izvora dobija se iz izraza:

$$U = \eta_k + R_a I - \eta_a = 0,56 + 30,3 * 0,070 + 1,7 = 4,4 \text{ V}$$

Ovo je dosta niska vrednost otpornosti anode a time je i izračunat napon izvora nešto niži nego što je izmeren.

### 8.09. RUSKI PRORAČUNI

Za anode u obliku ploče se otpornost može izračunati na osnovu formule (05.23).

$$R = \frac{1}{2 \pi \sigma L} \ln \frac{2L}{R} = \frac{1}{2 \pi * 0,035 * 0,25} \ln \frac{2 * 0,25}{0,04} = 45,95 \text{ Oma}$$

Potreban napon izvora dobija se kao kod britanskih propisa iz izraza:

$$U = \frac{\eta_k + R_a I - \eta_a}{0,95} = \frac{0,56 + 45,95 * 0,070 + 1,7}{0,95} = 5,77 \text{ V}$$

I ovaj postupak daje nešto nižu vrednost otpora elektrode u rečnoj vodi u odnosu na izmerenu vrednost. Samim tim je i potreban napon izvora nešto niži ( 2,93 V ili 33,7 % ) od izmerenog.

Druga formula (05.09) je preko ekvivalentnog prečnika.

$$R = \frac{1}{4 * \sigma * 0,56 \sqrt{L B}} = \frac{1}{4 * 0,035 * 0,56 * \sqrt{0,25 * 0,08}} = 90,2 \text{ Oma}$$

Potreban napon izvora iznosi:

$$U = \eta_k + R_a I - \eta_a = 0,56 + 90,2 * 0,070 + 1,7 = 8,574 \text{ V}$$

Postupak preko ekvivalentnog prečnika diska se za sada pokazao kao najbolji za izračunavanje otpora anode. Potreban napon izvora je neznatno niži ( 0,13 V ili svega 1,5 % ) od eksperimentalno izmerenog.

### 8.10. RASPODELA POTENCIJALA RAČUNATA RUSKIM PRORAČUNOM

Na osnovu ispitivanja sopstvenih sistema aktivne katodne zaštite moguće je u literaturi naći formulu (05.16) za proračun pada potencijala ili za raspodelu potencijala po trupu broda. U formulu su ubačene Beselove funkcije nultog i prvog reda koje su dosta teške za računanje. Argumenti ovih funkcija opterećeni su teško odredljivim parametrima tako da ovi koeficijenti dosta mogu da variraju. Poseban problem je mogućnost divergencije ovih koeficijenata, tako da je za njihovo računanje potrebno dosta veštine.

Koeficijent srazmere podvodne površine brodskog trupa i njegovog deplasmana  $D = 1.000$  tona može se izračunati na osnovu jednačine (05.19) i iznosi  $K(D) = 0,355$ .

Posle usvajanja određenih parametara i računanja potrebnih korektivnih koeficijenata moguće je sračunati raspodelu potencijala već jednom navedenom formulom. Rezultati su dati tabelarno. Razmatrani su realne dimenzije broda dizalice radi upoređenja sa izmerenim veličinama.

Tabela 08.04. Raspodela potencijala ruskom metodom

Rebro	3	5	10	20	30	40	45	50	60	73
$r_1$ (m)	2,6	1,7	1,28	6	11	16	18,5	21	26	32,5
$\eta_1$ (mV)	141	180	217	99	85	80	78	77	75	74
$r_2$ (m)	22	21	18,5	13,5	8,5	3,6	1,28	1,7	6,5	13
$\eta_2$ (mV)	77	77	78	82	90	121	217	180	97	82
$\eta$ (mV)	218	257	295	182	175	201	295	257	172	156
$\phi$ (mV) vs. Ag/AgCl	464	504	542	428	422	448	542	504	419	403

Moguće je primetiti da je manji rast prenapetosti želika u ovom slučaju nego

u prethodnim. Radi upoređivanja sa drugim proračunatim i izmerenim veličinama u tabeli je u zadnjem redu prikazan potencijal u odnosu na srebro-srebrohloridnu elektrodu.

#### 8.11. RASPODELA POTENCIJALA DOBIJENA NUMERIČKI

Razmatrajući rezultate numeričkih proračuna, može se primetiti da maksimalna polarizacija u slučaju obe priključene elektrode iznosi 280 mV a minimalna 106 mV. Razlika iznosi 174 mV (62%) na distanci od svega 15 m što je dosta brz pad katodne polarizacije. Obavljena ispitivanja na brodu u morskoj vodi [27],[37] pokazala su da se promena prenapetosti u morskoj vodi obavlja sporije i da je raspodela potencijala na trupu broda ujednačenija.

Maksimalna gustina struje iznosi  $4,95 \text{ mA/m}^2$  a minimalna  $45,5 \text{ } \mu\text{A/m}^2$ , što znači da je minimalna gustina struje preko sto puta manja od maksimalne.

Ovi rezultati pokazuju da je moguće i sa samo jednom elektrodom, koja bi praktično bila postavljena ispod sredine broda, štiti trup broda od korozije. Ako bi elektroda bila takođe privežana na oko 0,8 m ispod trupa broda, javljala bi se maksimalna polarizacija čelika uz okoloanodni ekran od 280 mV a minimalna oko 85 mV. Izlazna struja iz elektrode bila bi nešto viša od 70 mA. Podešavajući viši izlazni napon iz stanice katodne zaštite, a time povećavajući i izlaznu struju iz elektrode bilo bi moguće povećati maksimalnu polarizaciju čelika do 600 mV čime bi se minimalna polarizacija povećala znatno iznad 100 mV što je minimalan tolerantna polarizacija radi uspešne zaštite.

#### 8.12. UPOREĐENJE METODA ZA RASPODELU POTENCIJALA

Izvršen je proračuna raspodele potencijala po trupu broda na nekoliko načina obrađenih u literaturi. Pored toga postoje i izmereni podaci. Upoređiće se

- raspodela potencijala za elektrode u obliku diska
- raspodela potencijala za elektrode u obliku ploče
- raspodela potencijala ruskom metodom
- raspodela potencijala dobijena numerički
- izmerena raspodela potencijala

Pri ovom upoređivanju, poređiće se samo vrednosti potencijala po kobilici pri čemu će se kao referentna ili reporna raspodela uzeti poslednja ili izmerena vrednost potencijala. Da bi se ovi potencijali mogli uporediti, svi su svedeni na referentnu elektrodu od srebro-srebrohlorida.

Tabela 08.05. Poređenje raspodela potencijala

Rebro	3	5	10	20	30	40	45	50	60	73
$\varphi_1$ (mV)	384	450	513	324	314	358	520	455	310	282
$\Delta\varphi_1$ (mV)	+36	+10	-33	+96	+88	+62	-10	+5	+80	+58
$\varphi_2$ (mV)	558	613	648	488	472	540	655	719	449	384
$\Delta\varphi_2$ (mV)	-138	-153	-168	-68	-70	-100	-145	-259	-109	-44
$\varphi_3$ (mV)	464	504	542	428	422	448	542	504	419	403
$\Delta\varphi_3$ (mV)	-49	-44	-62	-8	-20	-28	-32	-44	-29	-63
$\varphi_{\text{num}}$ (mV)	445	490	440	435	415	435	510	450	419	368
$\Delta\varphi_{\text{num}}$ (mV)	-25	-30	-40	-15	-13	-15	0	+10	-29	-28
$\varphi_{\text{mer}}$ (mV)	420	460	480	420	402	420	510	460	390	340

Uporedni podaci po jednom proizvoljno odabranom preseku po kobilici broda su prikazani u tabeli 08.05.

Najveća odstupanja od merene raspodele potencijala ima izračunata raspodela za elektrode u obliku ploče ( nižu vrednost potencijala i do - 259 mV ) a najmanja odstupanja od mernih podataka imaju podaci dobijeni numerički ( maksimalno odstupanje - 40 mV ).

Raspodela potencijala za elektrode u obliku diska dosta je kvalitetna i može se dobro i brzo primeniti u rečnoj vodi. Karakteristično je da su manja odstupanja bliže anodama a da se prave veće greške sa povećanjem ovog odstojanja.

Raspodela potencijala za elektrode u obliku ploče pravi najveća odstupanja i



to u negativnom smeru. Karakteristično je da uz elektrode postoji veće odstupanje a dalje od elektroda se ta razlika smanjuje.

Raspodela potencijala ruskom metodom je takođe dosta kvalitetna metoda kada se uigraju parametri. Verovatno je najteža i najzametnija za rad. Interesantno je da se dobijaju potencijali nešto niži od izmerenih pri čemu postoje veća odstupanja što je veće udaljenje od elektroda.

Raspodela potencijala dobijena numerički zahteva nešto veću opremu i pripremu, ali zato daje rezultate koji su u najvećem skladu sa izmerenom raspodelom potencijala.

### 8.13. POTREBNA SNAGA ZA AKTIVNU ZAŠTITU

Interesantan je podatak o potrebnoj snazi potrebnoj da bi se održalo prenapetost na trupu broda u granicama 93 do 281 mV. Istovremeno je to važan podatak i radi određivanja izlazne snage stanice katodne zaštite.

Kako je izlazni napon iz ispravljača 8,72 V a struja pramčane anode 72 mA i krmene anode 70 mA, snaga izvora iznosi

$$P = U * ( i_1 + i_2 ) = 8,72 * ( 72 + 70 ) * 10^{-3} = 1,24 \text{ W}$$

Prosečna potrebna snaga po jedinici površine može se dobiti ako se ova snaga podeli ukupnom podvodnom površinom trupa, i iznosi oko  $1,48 \text{ mW m}^{-2}$ .

Kako je ovo nešto niža polarizacija od potrebne, u odnosu na preporuke u literaturi i u standardima, poslužićemo se određenim preračunavanjem. Da bi odredili potrebnu približnu snagu i za druge uslove rada poslužićemo se podatkom da je potencijal merne tačke 5 na 35 rebro iznosio oko 400 mV prema mernoj elektrodi Ag/AgCl tako da je prenapetost u toj tački 153 mV.

Interesantno je uporediti podatke i za povišeni napon izvora os 18,3 V. Pri ovom naponu je potencijal merne tačke 5 ( uz levu bočnu stranu trupa ) na 35 rebro iznosio 746 mV i pri tom je prenapetost te tačke iznosila

$$\eta = 746 - 247 = 499 \text{ mV}$$

Na osnovu Tafelove jednačine moguće je približno izračunati prenapon trupa broda uz okoloanodni ekran za te uslove. Uz okoloanodni ekran bi tačka sa



najnižim potencijalom u odnosu na srebro-srebrohloridnu elektrodu imala vrednost oko  $-872$  mV, što znači da bi maksimalna polarizacija čelika bila  $625$  mV.

Ukupna izlazna struja iz stanice katodne zaštite lako se može izračunati da iznosi  $0,340$  A. Pošto napon stanice katodne zaštite iznosi  $18,3$  V, izlazna snaga stanice katodne zaštite iznosi:

$$P = U * i = 18,3 * 0,340 = 6,22 \text{ W}$$

Može se navesti zaključak da se za vodene tokove i jezera potrebne jako male snage izvora. Ovo je naročito važno radi određivanja dimenzija anoda i okoloanodnih ekrana kao i izbora snaga stanice katodne zaštite ( ispravljača ili DC/DC pretvarača ).

#### 8.14. UPOREDNI PODACI O ZAŠTITAMA U REČNOJ I MORSKOJ VODI

Ukoliko se ovi podaci uporede sa nekim merenjima izvršenim u morskoj vodi mogu se dobiti zanimljive relacije.

Stacionarna vrednost zaštitnog potencijala uspostavljena je sa 6 ispravljača. Elektrode su bile zavešane sa spoljne strane trupa broda a raspodela potencijala dovedena je na nivo srednje katodne polarizacije čelika od oko  $380$  mV. Izlazne električne karakteristike bile su ujednačene, tako da je izlazni napon svakog bio  $4$  V a izlazna struja  $5$  A. Na ovaj način, zaštita trupa broda ukupne podvodne površine oko  $1.500$  m<sup>2</sup> izvršena je sa ukupnom strujom od  $30$  A ili ukupnom snagom od  $120$  W.

Prosečna gustina struje po jedinici površine podvodnog trupa broda iznosi  $20$  mA m<sup>-2</sup> a potrebna snaga po jedinici površine  $80$  mW m<sup>-2</sup>.

Ukoliko se uporede podaci dobijeni merenjem pri zaštiti broda u morskoj i rečnoj vodi, mogu se doneti neki zaključci.

1. Električna provodljivost morske vode iznosi oko  $4$  Sm<sup>-1</sup> a rečne vode  $35 * 10^{-3}$  Sm<sup>-1</sup>, što znači da je za oko 2 reda ( 100 puta ) manja od električne provodljivosti morske vode.

2. Izlazni napon iz stanice katodne zaštite u morskoj vodi iznosi oko  $4$  V a

u rečnoj vodi oko 12 V ( radi dobijanja istih prenapetosti na čeliku ), što znači da je u rečnoj vodi potreban nešto viši napon iz stanice katodne zaštite.

3. Potrebna prosečna gustina struje po jedinici površine u morskoj vodi iznosi  $20 \text{ mA m}^{-2}$  a u rečnoj vodi oko  $0,3 \text{ mA m}^{-2}$  što iznosi oko 2 reda manje nego u morskoj vodi.

4. Potrebna snaga radi zaštite jedinice površine brodskog čelika iznosi u morskoj vodi  $80 \text{ mW m}^{-2}$  a u rečnoj vodi svega oko  $3 \text{ mW m}^{-2}$ .

Ovi podaci su dobijeni merenjem i odslikavaju realno stanje u našim uslovima. Podaci ukazuju na činjenicu da je za morske uslove, pri znatno boljoj provodnosti korozivne sredine potrebna stanica katodne zaštite sa nižim naponom, ali sa znatno većim izlaznim strujama a time i snagama. U rečnoj vodi je lošija elektroprovodnost sredine u kojoj se obavlja korozija tako da su potrebni nešto viši izlazni naponi iz stanica katodne zaštite ali su zato izlazne struje znatno niže, a time i potrebne snage.

U morskoj vodi postiže se uniformnija raspodela potencijala po trupu sa manjom talasnošću između maksimalne i minimalne vrednosti.

## 8.15. EFIKASNOST ZAŠTITE METALA OD KOROZIJE

Osnovni metod za sprečavanje ili amanjivanje korozije metala je racionalno projektovanje sistema kontrolisane korozije. Trajnost i pouzdanost sistema zahtevaju da komponente sistema, njihova montaža, povezivanje i puštanje u pogon budu napravljeni u skladu sa propisima klasifikacionih društava za morske ili unutrašnje vode.

Efikasna elektrohemijska zaštita može se obezbediti samo pri pravilnom izboru parametara potrebnim za njen rad. Osnovni kriterijumu elektrohemijske zaštite su prenapetost štice metalna i gustina struje katodne polarizacije. Mogućnost merenja ovih parametara i njihovog menjanja tokom eksploatacije znatna je prednost u odnosu na pasivnu zaštitu čija se efikasnost može odrediti tek posle izvlačenja broda na dok.

Maksimalni kriterijum elektrohemijske zaštite može se dobiti na osnovu

maksimalne prenapetosti metala kod koje još ne dolazi do razvijanja vodonika koji diže boju i prodire u metal. Zbog ovog razloga, prenapetost najbliže tačke na metalnoj površini trupa od anode ne bi trebala da pređe vrednost od 600 mV u odnosu na vodoničnu elektrodu.

Ova dva uslova daju i granice potrebne prenapetosti za elektrohemijsku zaštitu trupova brodova napravljenih od brodskog čelika. U odnosu na Ag/AgCl mernu elektrodu optimalni opseg prenapona tačaka na trupu broda trebao bi da bude u granicama - 450 do - 850 mV.

Kvalitet zaštite ogleda se u manjim varijacijama ili u užem opsegu promene talasnosti potencijala. Ovo se može dobiti postavljanjem manjeg broja anoda ali sa većim okoloanodnim ekranima ili pomoću većeg broja anoda sa manjim strujama i okoloanodnim ekranima.

Pri tome treba imati u vidu da prema merenjima [25],[99] i [34] prosečna vrednost zaštitne gustine struje u morskoj vodi iznosi oko  $20 \text{ mA m}^{-2}$  a napona oko 4 V da bi u rečnoj vodi prosečne gustine struje iznosile oko  $0,3 \text{ mA m}^{-2}$  a potrebni naponi iznad 10 V.

Radi opšte primene anoda od titana sa prevlakama od platine u korozionoj zaštiti može se usvojiti koroziona potrošnja  $2 \mu\text{g A}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Prevlaka debljine  $2,5 \mu\text{m}$  može biti dovoljna za gustinu struje  $0,5 \text{ kA m}^{-2}$  u morskoj vodi za period od 5 godina.

Referentne elektrode takođe moraju u potpunosti da ispune uslove za pouzdan i precizan rad tokom rada elektroda.

Stanice katodne zaštite moraju biti pouzdane i sa određenom ručnom ili automatskom regulacijom izlaznog napona. Poželjno je da poseduju minimalnu signalizaciju kao i zaštitu od uslova koji se mogu pojaviti kod eksploatacije broda. Pored toga, radi normalnog veka trajanja elektroda talasnost izlaznog napona treba smanjiti na najmanju meru, u granicama ispod 10 % u odnosu na jednosmernu komponentu.

## 09. ZAKLJUČAK

Istraživanja opisana ovom doktorskom disertacijom vođena su u pravcu procene uloge parametara aktivne katodne zaštite a radi ocene efikasnosti zaštite trupa broda od korozije u morskoj i rečnoj vodi.

Pri tom su razmatrana:

1. Analitička uprošćena i praktična rešenja
2. Numerički dvodimenzionalni i trodimenzionalni modeli sistema aktivne zaštite
3. Raspodela potencijala oko trupa brode u rečnoj vodi
4. Rezultati dobijeni analitičkim, numeričkim i eksperimentalnim metodima i postupcima

Kod sistema aktivne zaštite od korozije razmotreni su osnovni parametri koji utiču na elektrohemijsku koroziju. Objasnjen je mehanizam kontaktne korozije u morskoj i rečnoj vodi. Ukazano je na problem raspodele potencijala i gustine struje u vodi.

Sledeći korak bio je razvoj i verifikacija dvodimenzionalnog i trodimenzionalnog modea. U ovom delu teze razmatrano je sledeće:

- Analizirana su analitička rešenja korišćena u literaturi za pojednostavljene slučajeve i delimično ugrađena u pravila klasifikacionih društava.
- Domen od interesa proširen je tako da pokriva ne samo unutrašnji deo od intesa već i okolinu. Na ovaj način povećana je preciznost u raspodeli polja i dobijeni su kvalitetniji rezultati.
- Ceo domen podeljen je u nekoliko zona a za svaku su korišćeni određeni fizički modeli s obzirom na granične uslove. Korišćeni su literaturni podaci sa određenim potrebnim koeficijentima i parametrima.



U skladu sa razvojem i verifikacijom trodimenzionalnog numeričkog modela sposobnog da simulira uticaj sistema aktivne katodne zaštite u rečnoj i morskoj vodi, bilo je nužno od početka opisati proces korozije i sistem aktivne katodne zaštite. Ovaj deo rada imao je velikog značaja za završni deo teze zbog toga jer su:

- opisani svi parametri koji učestvuju u procesu korozije. Uvedena su izvesna aproksimativna približenja da bi se bolje razumele i opisale pojave koje se dešavaju u vodi i na čeliku koji se štiti od korozije.

Na kraju je razmatran realan model i izmereni parametri u stvarnim uslovima u rečnoj vodi.

- Prikazani su praktični rezultati dobijeni merenjem čelične oplata trupa broda koji se nalazio preko 20 godina u eksploataciji u morskoj vodi i za to vreme je bio kvalitetno održavan

- Izmeren je prirodni potencijal korozije brodskog čelika u rečnoj vodi zaštićenog samo osnovnim premazom. Ovaj potencijal ima vrednost - 446 mV vs. SVE što znači da je ovaj brod praktično bez zaštite izložen koroziji vode.

- Izmerena je brzina uspostavljanja zaštitnog potencijala sa normalnim i povišenim naponom izvora. Pokazano je da je za to potrebno znatno manje vremena nego u morskoj vodi i da je vremenska konstanta ovog procesa znatno manja nego za morsku vodu.

- Napravljena je mreža tačaka po kojoj su izvršena merenja potencijala po celom trupu broda sa normalnim zaštitnim naponom. Potencijali na trupu broda na mestima najbliži okoloanodnim ekranima imali su katodnu polarizaciju oko 281 mV da bi najudaljenije tačke imale polarizaciju samo 93 mV.

- Pokušaj merenja struje pomoću dve merne elektrode nije urodio plodom jer su elektrode bile na dosta velikom rastojanju i što nije bilo moguće zbog uslova merenja odrediti gradijent promene potencijala ili smer najveće promene potencijala

- Ukazan je značaj urađene zaštite broda, činjenicama da velika osiguravajuća društva dopuštaju smanjenja ugrađene debljine limova do 5 % za brodove koji imaju kvalitetno ugrađene sisteme aktivne katodne zaštite

Na kraju se može nekoliko stvari zaključiti:

- Efikasnost sistema aktivne i pasivne zaštite može simulirati pravilno odabranim parametrima sistema korozije i kvalitetno postavljenim graničnim uslovima.

- Prikazano je da je stvaran trodimenzionalan model sposoban da dobro simulira raspodelu potencijala ispod plovnog objekta koji se štiti



- Obavljena merenja daju praktične rezultate zaštite trupa broda od korozije u rečnoj vodi
- Numeričko razmatranje ukazuje a eksperimentalno izmereni rezultati u rečnoj vodi ukazuju na značajno malu potrebnu energiju za zaštitu čeličnog broda u rečnoj vodi od korozije, u iznosu 3 W.
- Rezultati merenja pokazuju veliki sklad sa numeričkim rezultatima

Generalno posmatrano, rezultati izneti u ovoj doktorskoj disertaciji daju doprinos proučavanju osnovnih procesa i postupaka koji se dešavaju u sistemu aktivne katodne zaštite trupa broda od korozije posebno u rečnoj vodi.

81. Azami R., Rami Y., Application of a Saturated Silver-Silver Chloride Reference Electrode to Hydrodynamic Voltammetry, Journal of the Electrochemical Society, vol. 131, No. 4, July 1984, USA
82. Forsyth W., Bacon L.J.L., Cathodic Protection Theory and Practice, John Wiley and Sons Limited, Ellis Horwood Ltd, England, 1980
83. Ranzani A., Fatta B., Cathodic protection in natural seawater, Atti della Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 1980
84. Bilikov N.A., Lyubimov G.S., Puzova L.M., Elektrokhimicheskaia zaštita staličnogo korpusa ot korozii, Sankhromizdat, Leningrad, 1971
85. Brand J.W., Increased - current anodic corrosion, vol II, ed. L.L. Shorr, NACE - Butterworths, London, 1976
86. British Standard Institution, Code of Practice for Cathodic Protection, BS 5958, 1974
87. British standards, Cathodic Protection, 1st ed., BS 5958-1, 1974
88. Pitt D., Digital Simulation in Electrochemistry, Springer-Verlag, New York, 1981.
89. Program Data Manual, Zbirnik o programima i opremi računara "Din", Beograd, 1982
90. Colmano A., Ranzani A., Calculation of current density distribution on

## 10. LITERATURA

01. Aogaki R., Fueki K., Application of a Magneto-hydrodynamic Generator-Detector Electrode to Hydrodynamic Voltammetry, Journal of the Electrochemical Society, vol. 131, No. 6, June 1984, USA
02. Ashworth V., Booker C.J.L., Cathodic Protection: Theory and Practice, John Wiley and Sons Limited, Ellis Horwood Ltd, England, 1986
03. Bazzoni B., Faita G., Cathodic protection in natural environments, Journee d'electrochimie, Florence, 1985
04. Bibikov N.N, Lyublinskii E.A, Povarova L.V., Elektrokhemicheskaya zashhita morskikh sudov ot korrozii, Sudostroenie, Leningrad, 1971
05. Brandt J.W., Impressed - current anodes corrosion, vol II (ed. L.L. Shreir ), Newnes - Butterworths, London, 1976
06. British Standard Institution, Code of Practice for Cathodic Protection, CP 1021, 1973
07. British standards, Cathodic Protection, ( formerly CP 1021 ), 1991
08. Britz D., Digital Simulation in Electrochemistry, Springer-Verlag, New York 1981.
09. Brodogradilište Beograd, Zapisnik o pregledu uredaja i opreme remorkera "Titan", Beograd, 1993.
10. Colombo A., Rocchini G., Calculation of current density distribution for

a correct application of cathodic protection, 6 th International Congress on Marine corrosion and fouling, 501-516, Athenes, Greece, 1984

11. Chernomorskii A.I., Elektrodni potencijali i elektrokhemicheskie reakcii, Fan, Taskent 1975.

12. Davies D.H, Sasaki K., Advances in Well Casing Cathodic Protection Evaluation, Materials Performance 28 ( 8 ) 17 - 24, 1989

13. Despić A.R., Dražić D.M., Tatić-Janjić O., Osnovi elektrohemije, Naučna knjiga, Beograd, 1970.

14. Douglas M.C., Encyclopedia of instrumentation and control, Mc Graw Hill Book, Company, New York, 1971

15. Dwight H.B., Calculation of Resistance to Ground, Electrical Engineering, 12, 1319, 1936.

16. Evdokimov O.V., Effektivnosti katodnoi zashitii na sudah morskoga flota, Prochnosti korpusa i sashita sudov ot korrozii, 1985. 85 - 89.

17. Forrest A., Fu W., John W, Bicicchi R.T., Validation of finite element technique for modeling cathodic protection system, Corrosion 80, Chicago, 1980

18. General Electric Semiconductor Product Department, General Electric SCR Manual ( Fifth Edition ), Syracuse, New York, 1972

19. Gerald C., Wheatley P., Applied Numerical Analysis, Addison - Wesley Publishing Company, 1985

20. Gradski zavod za zaštitu zdravlja, Kontrola kvaliteta vode Save i Dunava na teritoriji Beograda u toku 1993, Beograd, 1994

21. Grigorev V.P., J. Appl. Chem., USSR, 34 (1) 169 (1965)

22. Gummow R.A., Cathodic protection criteria - a critical review of NACE standard RP - 01 - 69, Corrosion 86, NACE, Huston, 1986

23. Hartlay R.A., Hull Roughness Antifouling Coatings and Ship Performance, Shipboard Energy Conservation Symposium, 219 - 241, New York, 1980
24. Hack H.P., Design guidelines for impressed - current cathodic protection system on surface - effect ships Naval Ship Research and Development Center Annapolis, 1975
25. Hellenic registrar of shipping, Rules and regulations for the classifications and construction of steel ships, Piraeus, 1994
26. Iosselb YU.R., Klenov G.E. Pavlovskii R.A., Raschet i modelirovanie kontaktnoi korrozii sudovbih konstrukcii, Sudostroenie, Leningrad, 1979
27. Yakovlevich I.B., Vasilbevich E.I., Aleksandrovna V.K., Lbvovich V.K., Korroziya i zashtita morskikh sudov, Sudostroenie, Leningrad, 1973,
28. Institut tehničkih nauka SANU, Izveštaj o puštanju u rad i početnim merenjima aktivne katodne zaštite plovnog objekta VPBR - 31, Interni izveštaj, Beograd, 1989
29. Institut tehničkih nauka SANU, Dodatni izveštaj o ispitivanju Hlorogen sistema aktivne katodne zaštite na plovnom objektu VPBR - 31, Interni izveštaj, Beograd, 1989
30. Jović V., Krstajić N., Jović B., Zaštita objekata od korozije u morskoj vodi, Plovni putevi brodogradnja i brodarstvo, br 32/33, Beograd, 1990
31. Jones D. A., Analysis of cathodic protection criteria, Corrosion 72, St. Louis, P. 93, 1 - 4, 1972
32. Jones J.W., The use of solar power for impressed current cathodic protection, Corrosion prevention and control, August 1985
33. Jugoslovenski registar brodova, Pravila o pregledu postojećih brodova unutrašnje plovidbe, Split, 1976
34. Klinov I.A., Korroziya konstrukcionnih materialov vmashinostroenii i metodi zashtiti, Mashgiz, Moskva 1960,



35. Koichi Y., Genzou Y., Yoshiaki S., Masa-aki M., Development of Electrodes and Bus Bar for MHD Thruster, Proceedings of the International Symposium of MHD 91, 3.3.1 - 3.3.7, Japan, 1991
36. Krešić M., Ship performanse analysis system ( SPAN ), Society of Naval Architects and Marine Engineers, papers 68, Decembar 1985, New York.
37. Krstajić N., Bilen B., Jović V., Jovičić M., Nikolić Z., Aktivna katodna zaštita plovnih objekata u morskoj vodi primenom hlorigen sistema, Zbornik radova IX simpozijuma Teorija i praksa brodogradnje, Knjiga 3, 471 - 479, Dubrovnik, 1990.
38. Krstajić N., Jović V.D., Bilen B., Nikolić Z., An Attempt for Providing Simultaneous Cathodic Protection and Anti-Fouling of Ships in Sea Water, International Shipbuilding Progress, vol.39, number 419, 279-285, Netherlands, 1992
39. Krstajić N., Jović V., Bilen B., Nikolić Z., Zaštita brodova od korozije i obrastanja u morskoj vodi primenom katodne zaštite, Zaštita materijala, vol 35, broj I, 12-14, 1994.
40. Laque F.L., Copson H.R, Otpornost metala i legura na koroziju, Naučna knjiga, Beograd, 1975
41. Lee Rupert U., A hydrodynamical, morphological and chemical study of calcareous deposits, Corrosion 86, Houston 1986
42. Leicher - Preka A., Raspodjela gustoće struje na podmorskim metalnim konstrukcijama - kriterij antikorozijske zaštite, Zbornik VI simpozijuma teorija i praksa brodogradnje, Beograd 1984, sveska 2, 5.186 - 5.194
43. Lioblinskogo E.A., Pirogova V.D., Korroziya i zashita sudov - Spravochnik, Sudostroenie, Leningrad, 1987,
44. Littauer E.L., The Cathodic Protection of Buoys and Offshore Structures, Marine Technology Society Symposium, Washington (1964 ), 218 - 232
45. Lloyd's Registar, Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 3, London, 1989, Ch 2.5.1.2.



46. Melton T., Bodnar J., Molekular Biology of Marine Microorganisms: Biotechnological Approaches to Naval Problems, Naval Research Reviews, vol XL, 1988, 24 - 39.
47. Mikhailova L.A., Bashkatov V.A., Yakimenko L.M., Experimental Investigation of Platinum-Titanium Electrodes for Magnetohydrodynamical Channel Running on Sea Water, Proceedings of the International Symposium of MHDS 91, 11.1.1 - 11.1.7, Japan, 1991
48. Milenković M., Mladenović S., Vučković I., Korozija i zaštita, Tehnička knjiga, Beograd, 1966
49. Mladenović S., Korozija i tehnologija zaštite materijala, Skripta tehnološko metalurškog fakulteta, Beograd, 1973
50. Mollan R., Andersen T.R., Design of cathodic protection systems, Corrosion 86, NACE, Houston, 1986
51. Muroya M.A., Anode for Superconducting MHDS - Materials and efficiency - Proceedings of the International Symposium of MHDS 91, 11.2.1. - 11.2.8, Japan, 1991
52. Nenadović M., Matematička obrada podataka dobijenih merenjem, Odeljenje tehničkih nauka SANU, knjiga 29, Beograd, 1988
53. Niku S.M., Brebbia G.A., Adey R.A., BEASY - CP. A CAD system for mathematical modelling of galvanic corrosion and cathodic protection problems, International conference CADMO 86, ( 49 - 50 ), Washington, 1986
54. Norkie D., Vries G., The Finite Element Method, Academic Press Inc., New York, 1973
55. Petrick M., Thomas A., Genens L., Libera J., Nietert R., Boullard J., Pierson E., Hill D., Picologlou B., Ohisson O., Kasprzyk T., Berry G., Magnetohydrodynamic Sea Water Propulsion, Proceedings of the International Symposium of MHDS 91, 5.2.1 - 5.2.17, Japan, 1991
56. Petrović Z., Stupar S., Projektovanje računarom - metod konačnih

razlika, Mašinski fakultet, Beograd, 1992

57. Popović B., Elektromagnetika, Građevinska knjiga, Beograd, 1980

58. Rocchini G., Colombo A., A computerized system for cathodic protection, Corrosion 86, NACE, Houston, 1986

59. Ruski registar, Pravila klasifikaciji i postroiki morskih sudov, Tom 1, Sankt Peterburg, 1990

60. Schwabe K., Problems of corrosion research with electrochemical methods, J. Electroanal. Chem., 100 ( 1979 ) 927 - 937

61. Scully J.C., The Fundamentals of Corrosion, Pergamon Press,

62. Semenova N.I., Rasčet i modelirovanie katodnoi zashitbi metallicheskih elementov gidrotehničkih sooruzhenii, Trudi koordinac sovesh po gidrotehn. ( 100 ), 80 - 85, 1975.

63. Slavić M., Babić R., Radeka R., Korozija i katodna zaštita brodograđevnih čelika, Zbornik V simpozijuma teorija i praksa brodogradnje, Split 1982, svezak 1, 2.250 - 2.256

64. Shreir I.I. Hayfield P.C.S., Impressed current anodes Cathodic Protection, (ed. V. Ashworth, C.J.L. Booker), Ellis Horwood Limited, Chichester, 1986

65. Strommen R., Keim W., Finnegan J., Mehdizadeh P., Advances in offshore cathodic protection modeling using the boundary element method, Materials Performance, 26 ( 2 ) 23 - 28 ( 1987 )

66. Strommen R., Rodland A., Computerized Numerical Techniques Applied in Design of Offshore Cathodic Protection System, Material Performance 20 (4), 15 ( 1981 )

67. Standard ratne mornarice, Efikasnost katodne zaštite na podvodnim površinama brodskog trupa - metoda merenja, SNO 2925, 1969.

68. Standard ratne mornarice, Merna katoda, SNO 2952, 1969

69. Standard ratne mornarice, Viseće anode od cinka, SNO 2934, 1969.
70. Thirkettle J.D., Advances in cathodic protection measurement and monitoring, Corrosion 80, Houston, 1980
71. Thibault J.P., Alemany A., Pilaud A., Some aspects of seawater MHD Thrusters, Proceedings of the International Symposium of MHD 91, 5.4.1 - 5.4.8, Japan, 1991
72. Tutundžić F.S., Elektrohemija, eksperimentalni osnovi i metode merenja, Beograd, 1940
73. Walch M., Mitchell R., Biological Aspects of Corrosion of Offshore Structures, Naval Research Reviews, vol 36, 1984, 13 - 19.
74. Westinghouse Semiconductor Division, Introduction to Solid State power Electronics, Youngwood, Pennsylvania, 1977
75. Wyld H.W., Mathematical methods for physics, W. A. Benjamin, Inc. 1976



Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Зоран Николић

број индекса теза је одбрањена 1995. године

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**Метод за одређивање ефикасности система активне катодне заштите пловних објеката од корозије**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 31. 10. 2013.



---



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### **Метод за одређивање ефикасности система активне катодне заштите пловних објеката од корозије**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 31. 10. 2013.

