

ISPITIVANJE ZAŠTITE OD UDARA GROMA U DINAMIČKIM UVJETIMA NA JEDRILICI

Seser, Tomislav

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:633047>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

TOMISLAV SESER

ZAVRŠNI RAD

**ISPITIVANJE ZAŠTITE OD UDARA GROMA U
DINAMIČKIM UVJETIMA NA JEDRILICI**

Split, listopad 2019.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

Predmet: Telekomunikacije u elektroenergetskom sustavu

ZAVRŠNI RAD

Kandidat: TOMISLAV SESER

Naslov rada: Ispitivanje zaštite od udara groma u dinamičkim uvjetima
na jedrilici

Mentor: dr.sc. Slobodanka Jelena Cvjetković, prof. v. š.

Split, listopad 2019.

SADRŽAJ

SAŽETAK	1
SUMMARY	1
1. UVOD	2
2. VREMENSKI UVJETI POJAVNOSTI MUNJE	3
2.1. Vrste munje	6
2.2. Udar groma	10
3. REGULATORNI ZAHTJEVI	14
3.1. Regulatorni zahtjevi klasifikacijskog društva DNV GL	14
3.2. Regulatorni zahtjevi klasifikacijskog društva Lloyd	15
3.3. Regulatorni zahtjevi klasifikacijskog društva Bureau Veritas	15
3.4. Regulatorni zahtjevi Hrvatskog registra brodova	15
3.5. Međunarodna konvencija o sigurnosti života na moru	17
4. PROJEKTIRANJE GROMOBRANSKOG SUSTAVA	18
4.1. Klasični postupak projektiranja gromobranskog sustava u brodogradnji	19
4.2. Projektiranje gromobranske zaštite metodom kotrljajuće kugle	21
5. PROJEKTIRANJE GROMOBRANSKOG SUSTAVA U DINAMIČKIM UVJETIMA NA JEDRILICI	25
5.1. Matematički model ispitivanja zaštite od udara groma na jedrilici	26
5.2. Kritični parametri kod promatrane jedrilice	28
6. ZAKLJUČAK	32
LITERATURA	33
POPIS SLIKA	34
POPIS TABLICA	35
PRILOG Softver za modeliranje gromobranske zaštite na brodu	34

SAŽETAK

Munja je vidljivo, prirodno električno pražnjenje na koje uglavnom otpadaju pražnjenja između oblaka, te između oblaka i Zemljine površine. Grom je električno pražnjenje na zemlji odnosno udar munje u zemlju ili predmet na zemlji.

U ovom radu iznijeti će se razmatranja i ispitivanja dostatnosti sustava zaštite na plovilu (jedrilici) u stvarnim uvjetima plovidbe. Dokazati će se razlike promatranja dosadašnjih statičkih i ispitivanih dinamičkih uvjeta.

Ključne riječi: udar groma, munja, dinamički uvjeti, matematički model, plovilo

SUMMARY

TESTING OF LIGHTNING PROTECTION UNDER DYNAMIC CONDITIONS ON A SAILBOAT

Lightning is a visible, natural electrical discharge that is mainly caused by discharges between clouds and between clouds and the Earth's surface. Thunder is an electrical discharge on the ground, that is, a lightning strike into the ground or an object on the ground.

This paper will outline the considerations and tests of the adequacy of the vessel's (sailboat) protection system in actual navigation conditions. Differences in the observation of the static and tested dynamic conditions will be proved.

Keywords: lightning strike, thunderstruck, dynamic conditions, mathematical model, vessel

1. UVOD

Munja je električna iskra velikih dimenzija koja se stvara unutar grmljavinskog oblaka, kumulonimbusa, odnosno između dvaju oblaka ili između oblaka i tla, a nastaje naglim izbijanjem električnog naboja. To se izbijanje naboja očituje svjetlosno - munjom, te zvučno - gromom.

U drugom poglavlju opisati će se pojavnost opasnosti od udara groma na moru. Ako se za oluje nađete na moru prilično ste sigurni ako brod ima i metalni trup. Ako ste za kormilom ne dodirujete metalne dijelove, sjedite ili stojte na drvenoj podlozi koja ne vodi struju. Na drvenom brodu ili brodu izrađenom od stakloplastike s metalnim jarbolom električna energija nakon udara groma nema se kamo isprazniti, te može doći do znatne štete na jarbolu i ostaloj opremi.

Propisi sustava zaštite od udara groma prema Registrima iznijeti će se u trećem poglavlju.

U četvrtom poglavlju prezentirati će se klasični način projektiranja i implementacije sustava zaštite od udara groma primjenom matematičkog modela u programskom paketu MATLAB. Također, iznijeti će se nedostatnost zaštite prema proračunu u skladu sa stvarnim uvjetima plovidbe.

U zadnjem poglavlju razmatrati će se rezultati proračuna.

2. VREMENSKI UVJETI POJAVNOSTI MUNJE

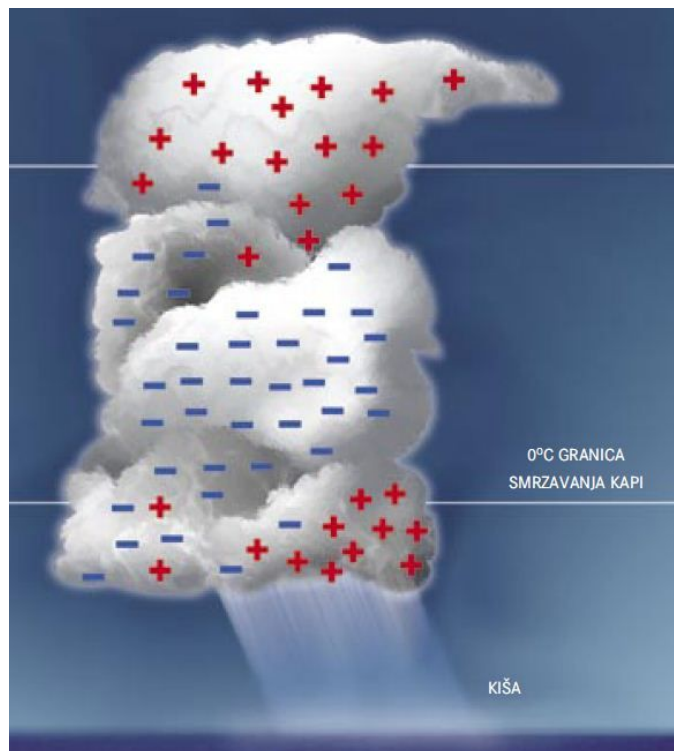
U svakom trenutku na Zemlji se odvija cca 2000 oluja s grmljavinom, a oko 100 puta u sekundi grom udara u tlo. Kao što u suhoj prostoriji iskra elektrona preskoči preko vunene deke koja pucketa, ogromna iskra (grom) može spojiti olujni oblak i tlo. Slično tihom pucketanju koje se čuje kad ikrenja, grmljavina potrese zemlju.

Iz dna oblaka pojavljuje se iskrenje nejasnog sjaja – predvodnik (*stepped leader*), koji u djeliću sekunde po izlomljenoj liniji stiže do tla stvarajući kroz zrak ionizirajući kanal širine približno 2 cm. Jakost struje iznosi cca 200 ampera. Kad se približi zemlji na oko 20 metara s tla joj u susret kreće iskra. Iskre se spajaju, struja kreće u suprotnom smjeru, uz kanal prema oblaku, te struja iznosi preko 10000 ampera. Zatim se još jedna predvodnica s treskom, spusti niz kanal, a onda još jedna iskra sjevne natrag prema oblaku. Temperatura u zračnom kanalu naglo poraste na 30000°C. Ovo višestruko sijevanje u intervalu kraćem od jedne sekunde vidi se kao jedna munja.

U kanalu se vrući zrak brzo širi. Zrak se širi brzinom većom od brzine zvuka od munje na sve strane stvarajući udarne valove. U neposrednoj blizini munje valovi se uspore do približno 340 m/s (brzina širenja zvuka u zraku). Kad ti valovi stignu do nas čuje se prasak ili grmljavina, koja dolazi iz glavnog kanala groma. Povratni udar groma proizvodi najjači zvuk, jer je struja u njemu najjača i najviše zagrijava zrak. Pucketanje koje se ponekad čuje dolazi od grana groma koje se odvajaju od glavnog stabla groma.

Munja je električna iskra velikih dimenzija koja se stvara unutar grmljavinskog oblaka, kumulonimbusa, odnosno između dvaju oblaka ili između oblaka i tla, a nastaje naglim izbijanjem električnog naboja. Taj se izboj naboja očituje svjetlosno - munjom, te zvučno - gromom. Zrak nije vodič, te se negativni naboj iz oblaka može početi kretati zrakom prema tlu tek kad jakost električnog polja u blizini oblaka premaši probojnu čvrstoću zraka. Ako je zrak suh, njegova je probojna vrijednost 30.000 volta po centimetru, ali ako je vlažan ili u njemu ima čestica prašine, ona može pasti do 5000 volta po centimetru. Kad razlika između jakosti električnih polja između dijelova istog oblaka, dvaju različita oblaka ili između oblaka i tla prijeđe vrijednost probojne čvrstoće zraka, dolazi do pražnjenja električnog naboja.

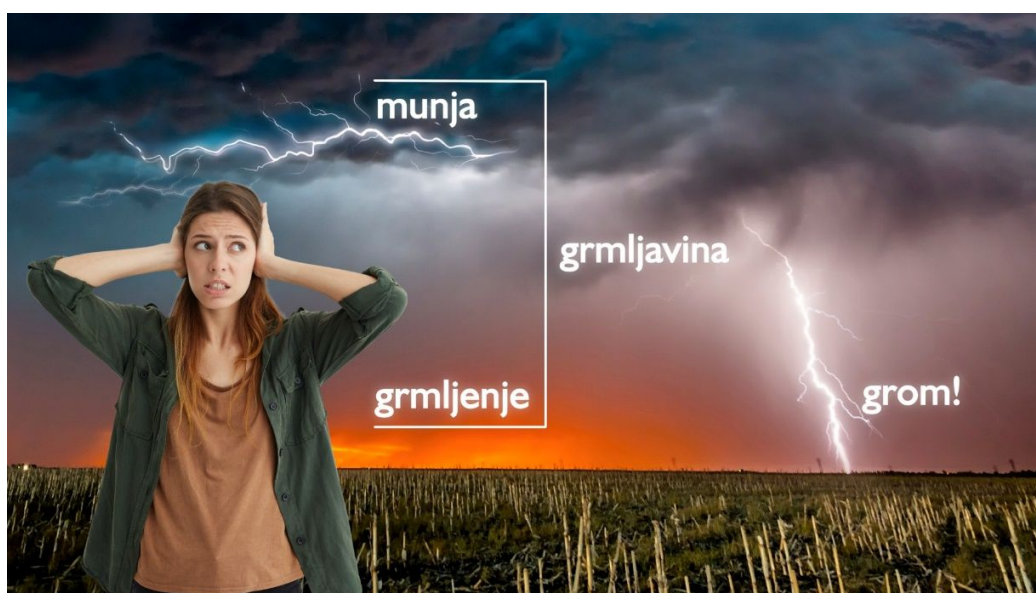
U kanalu u kojem teče struja izbijanja vlada visoka temperatura i visoki tlak pod kojim se nalazi vodljiva plazma. Kad struja prestane teći, tlak plazme se oslobađa i širi kružno prema van, stvarajući tlačni val. Taj se tlačni val giba - najveći je tlak u samoj blizini kanala, a zatim se naglo smanjuje. Grmljavina je akustična manifestacija tog tlaka. Ako se nalazimo u blizini munje, zvuk koji čujemo je snažan i jasan prasak, a što smo od nje udaljeniji, on počinje više sličiti na muklu tutnjavu. Budući da je brzina svjetlosti vrlo velika, 300.000 km/s, munju vidimo gotovo u istom trenutku kad nastane, ali zvuk se širi znatno sporije - brzinom od oko 330 m/s. Stoga je udaljenost od mjesta nastanka munje jednostavno izračunati: pomnožimo li broj sekunda koje su prošle otkad smo je ugledali s brzinom zvuka u zraku, dobit ćemo udaljenost od munje u metrima. Ako smo od munje udaljeni više od desetak kilometara, predaleko smo da bismo čuli grom. Postoje mnoge teorije o tome kako nastaju ogromne količine električnog naboja dovoljne da dođe do udara munje. Dokazano je da su vrhovi olujnih oblaka pozitivno nabijeni, dok su im sredina i posebno donji dijelovi negativnog naboja (slika 2.1.).



Slika 2.1. Raspored električnog naboja unutar olujnog oblaka [14]

Meteorologinja Dunja Mazzocco Drvar osvrnuvši se na nazivlja olujnih procesa u atmosferi napisala je točne definicije pojmova – munja, grmljenje, grmljavina i grom (slika 2.2.).

„Jedna od najčešćih jezičnih zabluda u meteorologiji vezana je uz nazive pojava koje zajedno čine grmljavinske oluje. U medijima često čitamo da je nešto, a na žalost i nekoga, udario grom, a meni se tada javljaju pratitelji, čitatelji i gledatelji koji smatraju da je to pogrešno jer je, kažu, grom zvučni efekt koji imamo za vrijeme trajanje oluje. To je mišljenje netočno, a ono što je napisano je točno! Naime, svjetlost koja nastaje električnim pražnjenjem u zraku, u oblacima ili između oblaka i zemlje naziva se munja, to je neprijeporno. Međutim, zvuk koji tada čujemo, a nastaje zbog naglog širenja zračnog kanala kako bi struja prošla kroz njega, naziva se grmljenje. Munju i grmljenje zajedno zovemo grmljavinom i to je ono što najčešće prognoziramo. Grom je električno pražnjenje na zemlji odnosno udar munje u zemlju ili predmet na zemlji. To je ono što ne volimo i ne želimo prognozirati, ali ipak želimo da znate točan naziv ove nemile pojave“ – pojasnila nam je meteorologinja za tportal.



GRMLJAVINA - vidi se munja i čuje grmljavina. **MUNJA, SIJEVANJE** - vidi se iskra, ali ne čuje buka. **GROM** - zvuk i bljesak su istovremeni (udar je vrlo blizu). **GRMLJENJE** - čuje se buka, ali ne vidi iskra. **KUGLASTA MUNJA** - užareni, električno nabijeni prostor plina, svijetli u mraku, može ući u kuću kroz zatvoreni prozor, ispariti kantu vode i slično.

Slika 2.2. Slikovno pojašnjenje pojmova – munja, grmljenje, grmljavina i grom [13]

Nitko ne voli grmljavinu, posebice kada smo na otvorenom. Ipak, kao djecu učili su nas da možemo sami izračunati koliko smo daleko od grmljavine. Evo podsjetnika:

1. Promatrajte nebo kako bi se uočila munja.
2. Kada se uoči munja, kreće se brojiti u sebi. Onog trenutka kada se čuje grmljavina prestaje brojanje.
3. Zvuk "pređe" jedan kilometar za tri sekunde. Dakle, ako se želi znati udaljenost od groma potrebno je broj koji se dobio brojanjem podijeliti s tri. Npr., ako se od trenutka pojave munje do trenutka kada se čula grmljavina izbroji 18 sekundi – udaljeni smo 6 kilometara od grmljavine ($18:3=6$).
4. Međutim, može se i preciznije izračunati, to jest odrediti koliko smo metara udaljeni od groma te taj broj pomnožiti s 340 (zvuk za jednu sekundu pređe oko 340 metara). Npr., ako se izbroje 3 sekunde i pomnožiti se s 340 i dobije se koliko je metara udaljenost od groma - 1.020 metara.

2.1. Vrste munja

Munja je vidljivo, prirodno električno pražnjenje na koje uglavnom otpadaju pražnjenja između oblaka, te između oblaka i Zemljine površine. Izgledaju poput ogromnih iskri čija je prividna debljina puno veća nego što stvarno jest. Jakost struje prosječne munje je oko 30 kA, pri čemu se prenese energija od oko 500 MJ. Razlikujemo više vrsta munja.

Munja od oblaka do tla (slika 2.3.) je oblik munje koji nastaje pražnjenjem naboja iz kumulonimbusa prema tlu.

Lančane munje kreću se od oblaka do tla i prikazuju se u isprekidanom nizu kratkih i blještavih odlomaka, te traju duže od uobičajenih vrsta munja.

Trakaste munje se pojavljuju u slučaju kada puše jaki bočni vjetar i imaju više povratnih udara.

Skraćene (*staccato*) munje su munje od oblaka do tla s kratkotrajnim i vrlo jakim bljeskom.

Viličaste munje su vrsta munje od oblaka do tla koje se izraženo granaju.

Munja od tla do oblaka je munja kod koje se negativno nabijeni ioni s tla dižu i susreću s pozitivno nabijenim ionima iz kumulonimbusa. Zatim se povratni udar vraća prema tlu.



Slika 2.3. Munje nad Marjanom [Foto klub Split, Željana Vinčić]

Munja od oblaka do oblaka može biti između dva različita oblaka ili unutar istog oblaka, između dijelova s različitim potencijalom. Inače se najčešće munja javlja unutar istog oblaka, između gornjeg i donjeg dijela oblaka.

Toplinske munje su munje koje se pojavljuju jako daleko tako da se vidi bljesak, a zvuk se ne čuje jer se na putu do promatrača rasprši. U našim se krajevima ponekad kaže da “sijeva od vrućine” kad se u ljetnim noćima vide daleki bljeskovi munja bez oluja u neposrednoj blizini.

Suhe munje su munje koje se javljaju bez oborina.

Raketne munje se kreću vodoravno s donjeg dijela oblaka i vidljivo je njihovo napredovanje.

Visokonaponske ili pozitivne munje nastaju u gornjem dijelu kumulonimbusa, putuju do nekoliko kilometara vodoravno te skreću do tla. Čine manje od 5% svih munja. Zbog veličine prijeđenog puta sadrže 6 do 10 puta više naboja te je njihov napon znatno veći, a obično traju i oko 10 puta duže. Zbog svoje velike snage, visokonaponske munje su opasne posebno za avione jer ne postoji dostatna zaštita.

Kuglasta munja je svjetleća sfera koja se ponekad javlja za vrijeme oluje (slika 2.4.). Najčešće je crvena, ali se pojavljuje i u drugim bojama: žutoj, zelenoj, bijeloj i plavoj. Veličine su joj različite, a prosječan promjer oko 25 centimetara. Sporo se kreću usporedno s tlom. Mogu zastati i promijeniti smjer kretanja, a traju i do 5 sekundi. I pored brojnih nastojanja, samo neke vrste kuglastih munja su djelomično stvorene u laboratorijskim uvjetima. Među njima su slabo svjetleće kugle, nastale poslije udara obične munje u neke materijale. Nikola Tesla nekoliko puta spominje sličnu pojavu, izazvanu udarom iskre ili strujnice u drveni predmet. Najnovija istraživanja i proračuni pokazuju da je trajanje jedne kuglaste munje nemoguće objasniti energijom koju ona može sadržavati u trenutku nastanka, već da se za njeno održavanje mora dovesti vanjska energija. Pretpostavlja se da se ova energija dobiva od prirodno stvorenog elektromagnetskog polja. U početku malo područje ioniziranog plina, stvoreno prethodnom munjom ili nekom drugom električnom pojavom za vrijeme oluje, povećava se na račun energije vanjskog elektromagnetskog polja. Promjer plazme sfere određuje frekvencija vanjskog polja, te tako dolazi do rezonance. [14]



Slika 2.4. Kuglasta munja [RTL HR]

Teslina hipoteza o nastanku i održavanju kuglastih munja sadrži neke pretpostavke koje nalazimo i u najnovijim teorijama, ali nosi i obilježja doba u kojem je nastala. Tako, na primjer, po Tesli i Kapici, prvobitna energija jezgre vatrene kugle nije dovoljna za održavanje kuglaste munje, već je za to potrebno dovođenje vanjske energije.

One crpe energiju iz drugih munja, koje prolaze kroz prostor jezgre vatrene kugle, a koncentraciju energije objašnjava otpornošću jezgre, odnosno većim kapacitetom razrijeđenog plina u jezgri da apsorbira energiju od ostalog zraka kroz koji prolazi pražnjenje. U prirodi je manja vjerojatnost prolaska više munja kroz jezgru kuglaste munje, pa je logičnija Kapičina teorija o djelovanju drugih munja preko elektromagnetskog polja i stojećih valova koje one stvaraju. U Teslinim eksperimentima moguće je da češće dolazi do “prelaska” više kasnijih munja preko jezgre kuglaste munje.

Posebno su zanimljiva Teslina zapažanja i komentari o nastanku “vatrenih kugli”, pojavi koja je zanimala ljude od davnina. Neki podaci o kuglastim munjama nađeni su i na etruščanskim spomenicima, u radovima Aristotela, Lukrecija i drugih. Kuglaste munje, ili “vatrene kugle” kako ih Tesla naziva, nastaju za vrijeme nevremena i smatraju se jednom vrstom električnog pražnjenja. Pojava je u prirodi vrlo rijetka, ali je ipak sakupljeno dosta podataka na osnovu kojih je izgrađeno nekoliko teorija nastanka ovih munja. Po nekim hipotezama, kuglasta munja je optička iluzija (ovako je mislio i Tesla do trenutka kada je sam proizveo “vatrene kugle”); po drugima, to je trag meteora. Prije Aragoove analize dvadesetak poznatih pojava kuglastih munja 1838. godine nije bilo znanstvenih analiza u pravom smislu riječi. Po objavljivanju Aragoovog djela, kuglaste munje su ušle u krug znanstvenih problema, i ostale do danas djelomična zagonetka.

Grmljavinski oblaci (kumulonimbusi), osim uobičajenih svjetlosno-zvučnih efekata, mogu proizvoditi i pojedine fantastične svjetlosne efekte koje zapravo nisu ni munje, a ni gromovi. Neke od tih pojava, prevedene na naš jezik, imaju vrlo čudna i neobična imena, vatrenci i vilenjaci. Bez obzira koliko su te pojave čudne po samom nazivu, još su više čudne i zanimljive po svojoj manifestaciji i procesu nastanka. Ove svjetlosne pojave, koje se mogu susresti kod snažno razvijenih grmljavinskih oblaka, teško je zapaziti, zabilježiti ili snimiti. Razlog tome je njihova pojava koja izuzetno kratko traje i može se dokumentirati samo osjetljivim fotoaparatima.

Vatrenjak (*sprite*) nastaje na visini od oko 70 km (u mezosferi) kao kratkotrajna svjetlosna pojava u obliku vatrene plamenova usmjerenih prema dolje. Vilenjaci (*elves*) nastaju kao svjetlosna pojava crvene boje prstenastog oblika na visini od 90 – 100 km i koja se, dok traje, može širiti do promjera i od nekoliko stotina kilometara.

Najnovija istraživanja ukazuju na to da ova zračenja iz kumulonimbusa često pogađaju putničke avione koji se nađu iznad olujnog oblaka, te da je to zračenje nekoliko puta jače od prosječnog rendgenskog pregleda.

Naziv okamenjena munja može se povezati s ponekad razgranatim i nepravilnim oblikom fulgurita, koji odaje oblik puta ionizirane staze kojom je električna struja prodrla u tlo. Okamenjena tvorevina je uvijek iznutra šuplja. Promjer unutarnje cijevi može biti od jednog do nekoliko centimetara širine. Fulguriti mogu biti poluprozirni, bijeli (rijetko), svijetlosmeđi, zelenkasti i crni, što ovisi o kemijskom sastavu otopljene materije u koju je udario grom. Posljedica su toplotnog djelovanja udara groma u pjeskovito tlo. Najčešće se mogu naći nakon udara groma u pješčanom tlu ili pustinjском pijesku koji sadrži dosta čestica kvarca (SiO_2). Kameni komadi u koje je grom udario prekriveni su glatkom smečkasto-zelenom glazurom.

2.2. Udar groma

Udar munje može biti izravan ili posredan. Izravan udar (slika 2.5.) uzrokuje u tijelu napon reda veličine 100 kV, uslijed čega s površine ljudskog tijela nastaje preskok u obliku električnog luka, preko kojeg teče najveći dio električne struje nastale udarom groma, dok kroz tijelo prolazi struja vrijednosti nekoliko ampera.



Slika 2.5. Izravan udar groma [vecernji.ba]

Rijetki prežive izravan udar groma. Električni tok koji teče po površini ili kroz tijelo uzrokuje poremećaje u radu srca, prestanak rada srca, prestanak disanja uzrokovan paralizom mišića i/ili poremećajem centra za disanje, gubitak svijesti, privremenu paralizu, konvulzije i/ili nemogućnost prisjećanja na događaje koji su prethodili udaru groma, komu, površinske opekotine različitih oblika (obično nalik paprati), a na mjestima na kojima se znoj ili kapljice kiše naglo pretvaraju u paru ili ispod metalnih predmeta (dugmad, nakit) moguća je i karbonizacija tijela. Može uzrokovati i prsnuće prsnog koša i trbuha, prijelome kostiju, ozljede oka i uha te različite psihičke i neurološke poremećaje.

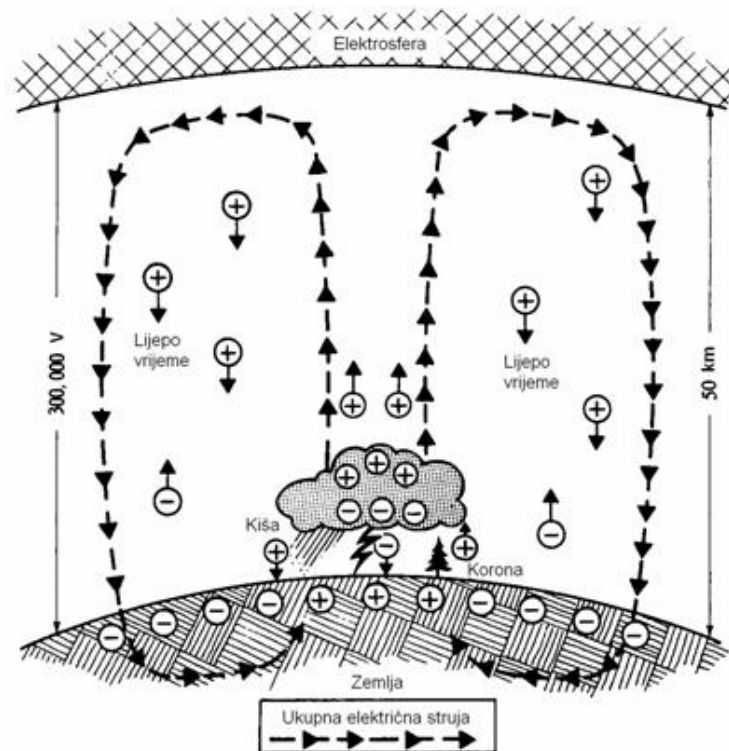
Posredni udar groma događa se kada čovjek nije pogođen ukupnom strujom groma, nego samo jednim njezinim dijelom. Opasno je ako se nalazimo u krugu od 100 metara od mjesta udara groma.

Opasnosti udara groma moguće je izbjeći usvajanjem određenih pravila ponašanja:

- Prije odlaska na izlete u prirodi potrebno se informirati o vremenskim prilikama.
- Olujno vrijeme u planinama najčešće je u ljetnim mjesecima, poslijepodne i navečer.
- Ako prijeti oluja potrebno je potražiti čvrsto sklonište.
- Izbjegava se stajanje kraj prozora, otvorenih vrata, kamina, metalnih stupova i metalnih predmeta (slavine, utičnice i električni prekidači).
- Korisno je pravilo 30+30: kada se munja uoči, broji se 30 sekundi prije nego što se čuje grom, te se traži sklonište. Najmanje 30 minuta od posljednje viđene munje i groma ne smije se izlaziti iz skloništa.
- Velike špilje i udoline dobra su zaštita.
- Mobitele ili radio uređaje ne koristiti.
- Ne smije se stajati u velikim grupama.
- Izbjegavaju se izložene točke, osamljena stabla i rub šume.
- Ne smije se nositi metalne predmete (sajle, ljestve, klinove).
- Izbjegava se prostor blizu strujnih vodova, stupova žičara i dalekovoda.
- Munja može biti i 15 km ispred oluje, ide horizontalno te može udariti iz vedrog neba.
- Na kraju oluje munje su jednako opasne kao na početku.
- Treba se udaljiti od stijena, grebena i vrhova.
- Šator nije zaštita.

- Ako si na otvorenom, čučni i pogni se naprijed stavljajući ruke oko koljena (tzv. embrio položaj), nemoj ležati ispruženo na zemlji.
- Ako se osjeti pucketanje i podizanje kose ili se uoči plava aureola oko objekata, radi se o električnoj aktivnosti u našoj blizini i područje treba napustiti što prije ili treba čučniti na stopala, spustiti glavu i rukama ne dodirivati zemlju. Osnovna je logika smanjiti visinu i što manjom površinom tijela dodirivati tlo. Rukama pokrij uši kako bi spriječio ozljede bubnjića.

Zanimljivo je da se 92% ozljeda od udara groma događa između svibnja i rujna, a 80% posto između 10 i 19 sati. Nadalje, cipele obložene plastikom ili plastične gume ne pružaju nikakvu zaštitu od udara. Više od 50% smrtnih slučajeva događa se nakon što nevjernice prođe. Globalno elektrostatsko polje Zemlje prikazano je na slici 2.6.



Slika 2.6. Shema globalnog elektrostatskog polja i strujnog kruga u atmosferi [6]

Ako se za oluje nađete na moru prilično ste sigurni ako brod ima i metalni trup, jer će nas brod zaštititi od električnog udara na principu Faradayevog kaveza (slika 2.7.). Ako ste za kormilom ne dodirujete metalne dijelove, sjedite ili stojte na drvenoj podlozi koja ne vodi struju.

Na drvenom brodu ili brodu izrađenom od stakloplastike s metalnim jarbolom električna energija nakon udara groma nema se kamo isprazniti, te može doći do znatne štete na jarbolu i ostaloj opremi. Preporuča se da se svi metalni dijelovi opreme okupe na jednom mjestu i metalnim lancima ih se poveže s morem te se oko broda razvije sidreni lanac. Obavezno se isključe svi električni uređaji i trošila na brodu.



Slika 2.7. Udar groma na moru

3. REGULATORNI ZAHTJEVI

Kod projektiranja broda slijede se propisi i pravila odabranog klasifikacijskog društva, tzv. pravila klase. Neki od klasifikacijskih društava su Det Norske Veritas (DNV), Germanischer Lloyd (GL), Bureau Veritas, Lloyd, Hrvatski registar brodova i drugi.

Regulatorni zahtjevi obuhvaćaju sustave za zaštitu od udara groma u brodogradnji koji nisu dostatni kada je riječ o sustavu zaštite od udara groma [10].

3.1. Regulatorni zahtjevi klasifikacijskog društva DNV GL grupa

Klasifikacijska i certifikacijska društva Det Norske Veritas (DNV) i Germanischer Lloyd (GL) postigla su dogovor o ujedinjenju. Nova DNV GL grupa stvorena je 12. rujna 2013. Rezultat je dugogodišnjih odnosa, razgovora i dijaloga o suradnji i spajanju. Promjene u strukturi vlasništva te strateška povezivanja dvije kompanije i njihovih vodstava otvorile su nove mogućnosti, te je spajanje konačno završilo uspješno. Danas je DNV GL dobro pozicioniran kao globalni igrač u pomorskom i energetsom sektoru, sektoru nafte i plina, kao i u prehrambenom i zdravstvenom sektoru, spreman za nove izazove, uspostavljajući ravnotežu između poslovnih potreba i potreba društva.

Propisuje se da sva plovila s jarbolima ili vrhovima jarbola napravljenim od nevodljivog materijala moraju biti opremljena gromobranskim sustavom. Uz to, gromobranski vodič (odvodnik) mora biti postavljen na sve nemetalne jarbole i konstrukcije na plovilu s nemetalnim trupom.

Primarni vodiči predviđeni za odvod struje pražnjenja groma moraju biti bakreni s presjekom od najmanje 70 mm² ili ekvivalentni aluminijski vodič. Vodič se mora pričvrstiti na bakreni šiljak minimalnog promjera 12 mm na visinu od minimalno 300 mm iznad najviše točke jarbola. Vodič mora imati završetak odnosno spoj na bakrenu ploču minimalne površine od 0,25 m² pričvršćene na trup plovila i tako smještene da je uronjena u svim uvjetima ljuljanja broda.

Plovila s metalnim trupom moraju biti opremljen gromobraskim provodnikom na svim nemetalnim jarbolima i metalnim konstrukcijama. Vodič treba biti minimalnog presjeka od 70 mm² ili ekvivalentni aluminijski vodič te biti spojen metalnim trupom u neposrednoj blizini.

3.2. Regulatorni zahtjevi klasifikacijskog društva Lloyd

Sustav za zaštitu od udara groma Lloyd propisuje da za smanjenje rizika od oštećenja broda i električne instalacije uslijed udara groma, brodovi koji imaju nemetalne jarbole ili vrhove jarbola moraju biti opremljeni gromobraskim vodičima u skladu s primjenjivim zahtjevima IEC 60092-401, ili alternativnim i relevantnim Nacionalnim Standardima države pod čijom je zastavom brod konstruiran.

3.3. Regulatorni zahtjevi klasifikacijskog društva Bureau Veritas

Sustav za zaštitu od udara groma Bureau Veritas propisuje obvezu ugradnje gromobraskog sustava na brodovima s drvenim trupom ili kompozitnom konstrukcijom s drvenim jarbolima, na brodovima s drvenim trupom ili kompozitnom konstrukcijom sa čeličnim jarbolima, te na brodovima sa čeličnim trupom s drvenim jarbolima. Za ostale tipove brodova ugradnja gromobraskog sustava nije obvezna.

Kod postavljanja gromobraskih vodiča isti se postavljaju na sve drvene jarbole ili vrhove jarbola. U brodovima napravljenim od nevodljivih materijala, gromobraski vodiči moraju se spojiti na bakrenu ploču pričvršćenu na trup plovila ispod vodene linije. Gromobraski dijelovi izloženi rizicima mehaničkih oštećenja moraju biti odgovarajuće zaštićeni ili u krutom spoju (spoj varenjem, priteznim vijcima i maticama i sl.).

3.4. Regulatorni zahtjevi Hrvatskog registra brodova

Sustav za zaštitu od udara groma u Hrvatskom registru brodova propisuje obaveznu gromobrasku zaštitu za sve brodove koji sadrže opremu kojoj je takva zaštita potrebna. Brodovi na kojima udar groma može izazvati požar ili eksploziju trebaju biti dodatno opremljeni gromobraskim provodnicima kako bi se spriječilo iskrenje.

Oprema gromobranskog sustava sastoji se od metalnih hvataljki, odvodnog vodiča i ploče za uzemljenje.

Metalni jarboli ili druge visoke vertikalne metalne konstrukcije ne moraju imati poseban gromobranski vodič ako su na drugi način pouzdano električno povezani metalnim trupom ili uzemljenjem. Gromobranski dijelovi izloženi rizicima mehaničkih oštećenja moraju biti odgovarajuće zaštićeni ili u krutom spoju.

Na metalnim brodovima, okomite konstrukcije broda kao što su metalni jarboli, lukovi za nadgradnju, nadgradnje itd. mogu se koristiti kao gromobrani ako je predviđeno pouzdano električno povezivanje tih konstrukcija s metalnim trupom. Dodatni uzemljivači postavljaju se samo u slučaju ako takve konstrukcije ne osiguravaju pouzdanu zaštitu od munje. Ako je električni uređaj postavljen na vrhu metalnog jarbola, mora se osigurati učinkovito uzemljenje. Učinkovito uzemljen uzemljivač mora biti postavljen na vrhu svakog jarbola ili pomičnog produžetka jarbola izrađenog od nevodljivog materijala. Uzemljivač mora biti metalna hvataljka promjera najmanje 12 mm. Hvataljka mora biti izrađena od bakra, bakrene legure ili čelika zaštićena od korozije. Za aluminijske jarbole koriste se aluminijske šipke. Metalna hvataljka mora se protezati najmanje 300 mm iznad vrha jarbola ili bilo kojeg uređaja koji je postavljen na vrhu jarbola.

Odvodnik munje mora biti izrađen od šipke, trake ili užeta površinskog presjeka ne manjeg od 70 mm² za bakar ili legure bakra, odnosno s poprečnim presjekom od najmanje 100 mm² za čelik s antikorozivnom zaštitom. Odvodni vodiči moraju se pružati dužim dijelom vanjske strane jarbola ili nadgradnje s minimalnim brojem zavoja što je moguće većeg radijusa savijanja. Odvodni vodiči ne smiju prolaziti kroz prostore ili zone s opasnošću od eksplozije. Na brodovima s nemetalnim trupom odvodni vodič se postavlja odvojeno po cijeloj njegovoj dužini, uključujući vezu s uzemljenjem, pri čemu je u potpunosti odvojen od pogonskih i zaštitnih krugova uzemljenja.

Za uzemljenje u kompozitnim brodovima se može upotrijebiti metalni pramac ili druge metalne konstrukcije uronjene u vodu pod bilo kakvim navigacijskim uvjetima. Na brodu se moraju predvidjeti mjere za spajanje metalnog trupa ili uzemljenja broda na mrežu kopnene obale kada je brod u pristaništu.

Spojevi u sustavu za zaštitu od djelovanja munje, a posebno spojevi između uzemljivača, odvodnika i uzemljenja moraju biti vareni ili pričvršćeni vijcima. Kontaktna površina između uzemljivača i odvodnika, te uzemljenja ne smije biti manja od 1000 mm². Stezaljke i vijci moraju biti izrađeni od bakra, bakrenih legura ili čelika s antikorozivnom zaštitom.

Gromobranska zaštita se primjenjuje na izolirane metalne konstrukcije, prijenosne priključke, cijevi, metalni oklop kablova i vodiča koji moraju biti povezani sa uzemljenjem za zaštitu od groma prije ulaska u opasne prostore. Svi cjevovodi za naftne derivate kao i drugi cjevovodi povezani s opasnim prostorima i položeni na otvorene palube ili u prostore bez elektromagnetske zaštite moraju biti uzemljeni na trup broda s razmacima od najviše 10 m. Cjevovodi koji nisu povezani s opasnim prostorima, ali su položeni na otvorenim palubama na kojima može doći do eksplozivnih plinova, uzemljuju se na trup broda u razmacima od najviše 30 m. Metalni dijelovi u blizini odvodnih vodiča uzemljuju se ako nisu pričvršćeni na uzemljene konstrukcije ili imaju drugi metalni priključak na trup broda. Uređaji ili metalni dijelovi koji se nalaze na udaljenosti do 200 mm od odvodnika moraju biti povezani s odvodnikom kako bi se spriječilo iskrenje. Svi sastavni dijelovi sustava za zaštitu od djelovanja munje moraju biti dostupni za otkrivanje eventualnih mehaničkih oštećenja.

3.5. Međunarodna konvencija o sigurnosti života na moru

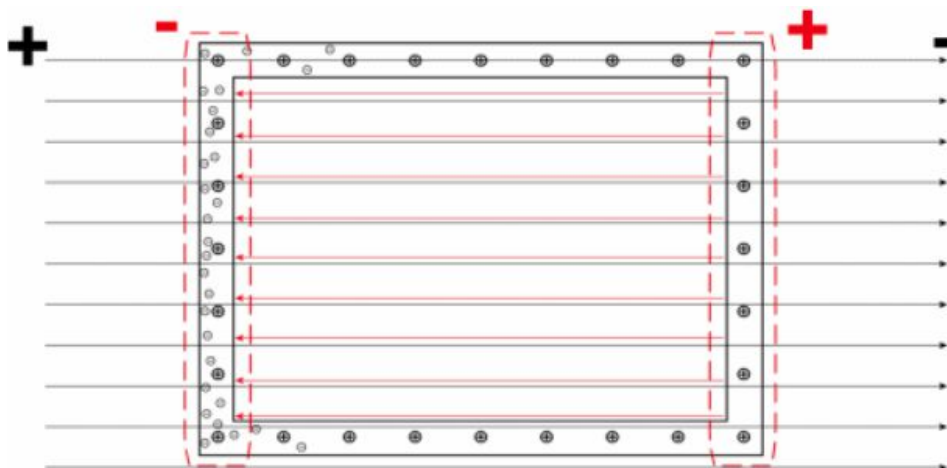
Konvencija (*Safety of Life at Sea*, SOLAS) u svojim slijedećim oblicima općenito se smatra najvažnijom od svih međunarodnih ugovora koji se tiču sigurnosti trgovačkih brodova. Konvencija koja je na snazi danas se naziva i SOLAS iz 1974. s izmjenama i dopunama.

Glavni cilj Konvencije SOLAS je utvrditi minimalne standarde za izgradnju, opremu i rad brodova, kompatibilne s njihovom sigurnošću. Države zastave odgovorne su za osiguravanje da brodovi pod njihovom zastavom udovoljavaju njezinim zahtjevima, a niz potvrda propisan je Konvencijom kao dokaz da je to učinjeno. Odredbe o kontroli također dopuštaju vladama ugovornicama inspekciju brodova drugih država ugovornica ako postoje jasni razlozi za vjerovanje da brod i njegova oprema u suštini ne ispunjavaju zahtjeve Konvencije - ovaj postupak poznat je pod nazivom država lučke kontrole. Zahtjevi koji se odnose na strojeve i električne instalacije dizajnirani su tako da osiguravaju da se usluge koje su neophodne za sigurnost broda, putnika i posade održavaju u različitim hitnim uvjetima.

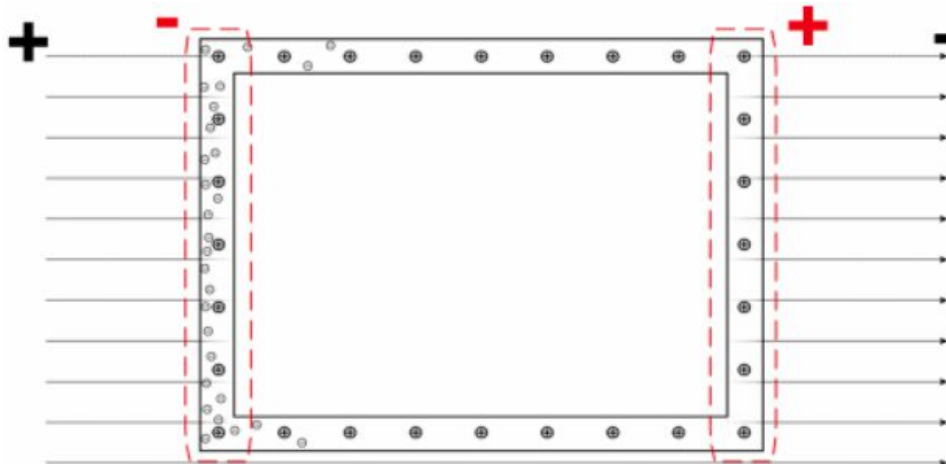
4. PROJEKTIRANJE GROMOBRANSKOG SUSTAVA

Zaštita koju pruža sustav za zaštitu od djelovanja munje se temelji na Faradayevom kavezu. Faradayev kavez je metalna konstrukcija oko štice objekta. Metalna konstrukcija može biti u obliku metalne mreže ili metalnog oklopa. Princip Faradayevog kaveza se koristi u zaštiti stambenih i drugih objekata od udara munje, za zaštitu u laboratorijima i industriji.

Pojavom naboja na metalnoj konstrukciji (kavezu), prema Coulombovom zakonu, isti se rasporede na jednaku međusobnu udaljenost uslijed odbijanja istoimenih naboja. Ukoliko je smjer polja u okolini metalne konstrukcije od lijeve prema desnoj strani, odnosno neka je lijevo pozitivan naboj a desno negativan, na metalnoj konstrukciji će se naboji rasporediti tako da će lijevo biti uglavnom negativan naboj a desno pozitivan. Takva raspodjela naboja uzrokuje električno polje suprotno električnom polju okoline, te na taj način neutralizira utjecaj polja okoline unutar štice objekta. Formiranje električnog polja suprotnog naboja vanjskom polju je prikazano na slici 4.1, a resultantno električno polje, odnosno raspodjela naboja na metalnoj konstrukciji uslijed djelovanja vanjskog električnog polja prikazana je na slici 4.2.



Slika 4.1. Formiranje električnog polja uslijed raspodjele naboja na metalnoj konstrukciji



Slika 4.2. Rezultantna raspodjela naboja na metalnoj konstrukciji unutar električnog polja

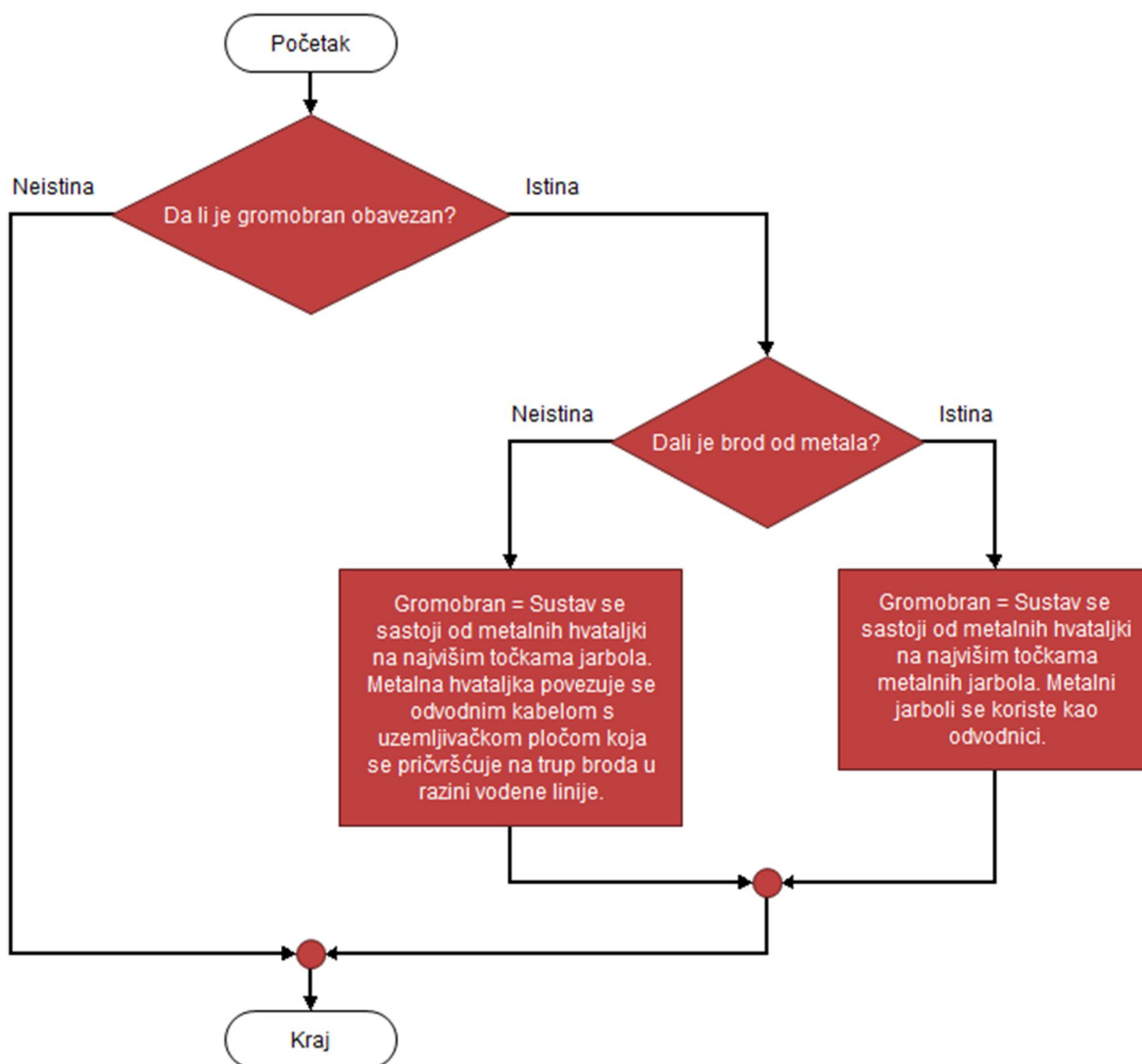
4.1. Klasični postupak projektiranja gromobranskog sustava u brodogradnji

Kod klasičnog pristupa projektiranju sustava za zaštitu od udara groma u brodogradnji primjenjuje se postupak koji odgovara algoritmu prikazanom na slici 4.3.

Kao što je vidljivo na slici 4.3 prvo se odredi da li klasifikacijsko društvo u svojim propisima zahtjeva sustav za zaštitu od udara groma za odabranu vrstu broda. Ukoliko zahtjev postoji izvodi se projektiranje takvog sustava prema propisima odabranog klasifikacijskog društva (pravila klase).

Ukoliko brod ima metalni trup i metalne jarbole, gromobranske hvataljke minimalnog promjera 12 mm se postavljaju na vrh jarbola na način da su viši za 30 cm od najviše kote jarbola. Prilikom projektiranja treba obratiti pažnju na radio komunikacijsku i satelitsku/antensku opremu koja će se ugraditi na jarbole. Gromobranska hvataljka bi trebala biti na većoj visini od takve opreme, uz kontroliranje i uvažavanje kuta zasljepljenja takve opreme od strane metalne hvataljke.

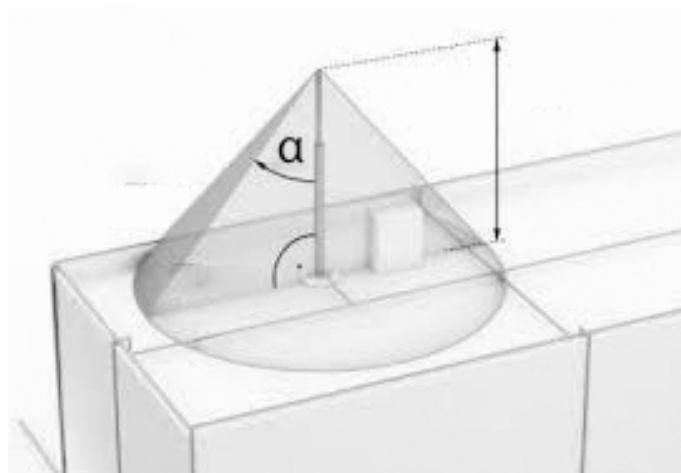
Ukoliko brod ima metalni trup, ali nema metalne jarbole, što je rijedak slučaj, tada se metalna hvataljka „uzemljuje“ tj povezuje na trup broda vodičem čije su karakteristike i dimenzije opisane u propisima odabranog klasifikacijskog društva, a obično minimalnog presjeka od 70 mm^2 za bakreni vod.



Slika 4.3. Algoritam projektiranja gromobranske zaštite na brodu

Kada brod nema metalni trup tada se na njegov trup ugrađuje metalni uzemljivač, odnosno metalna ploča dimenzija i karakteristika određenih pravilima klasifikacijskog društva. Takav uzemljivač se s metalnim hvataljkama povezuje vodičem koji također mora zadovoljiti postavljene zahtjeve u pravilima klasifikacijskog društva. Metalni jarboli se mogu koristiti kao odvodnici.

Time je posao projektiranja gromobranskog sustava na brodu završio. Kao što je vidljivo iz navedene procedure te zahtjeva klasifikacijskih društava, ne postavlja se zahtjev provjere adekvatnosti sustava s obzirom na geometriju broda. Gromobranske hvataljke, kao što je vidljivo na slici 4.4, imaju određeni „doseg“ odnosno područje djelovanja, pa je stoga nužna ovakva provjera kako bi se osigurala sigurnost ljudi i imovine. Osim toga ne postavlja se zahtjev za provjerom zona zaštite u dinamičkim uvjetima na brodu, odnosno prilikom ljuhanja i posrtanja broda.



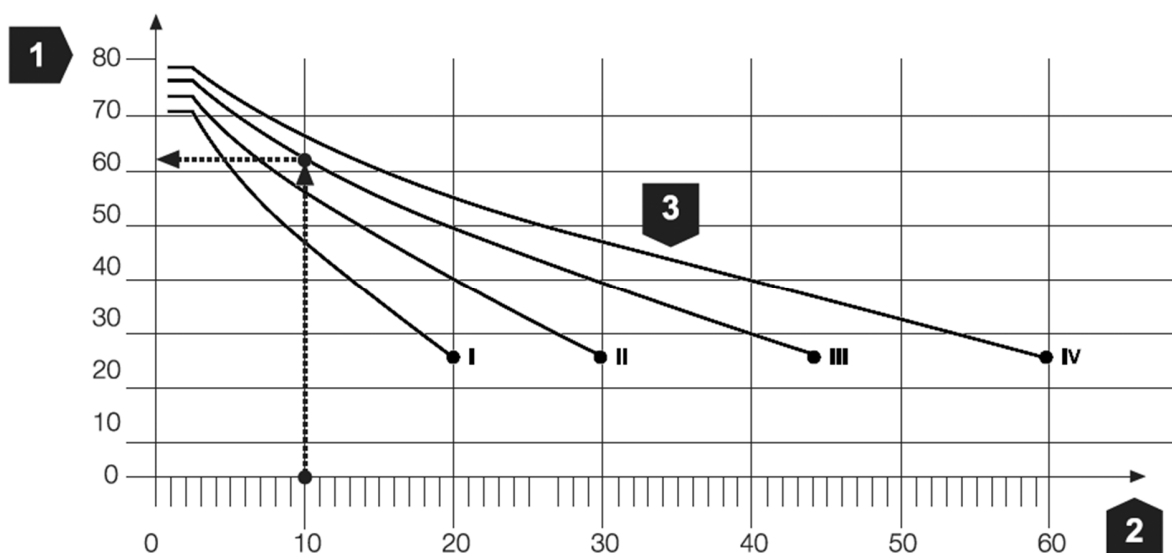
Slika 4.4. Zaštitni kut α djelovanja gromobranske hvataljke [9]

4.2. Projektiranje gromobranske zaštite metodom kotrljajuće kugle

Metode koje se koriste za određivanje smještaja sustava gromobranskih hvataljki: metoda zaštitnog kuta, metoda mreže i metoda kotrljajuće kugle. Metoda kotrljajuće kugle se može upotrijebiti u svim slučajevima i oblicima štice objekta. Prema normi HR EN 62305-3 maksimalne vrijednosti polumjera kotrljajuće kugle te širine petlje su navedene u tablici 4.1., a maksimalne vrijednosti zaštitnog kuta su vidljive na slici 4.5.

Tablica 4.1. Maksimalne vrijednosti polumjera kotrljajuće kugle, širine mreže i zaštitnog kuta prema odgovarajućem razredu zaštite od udara munje LPS-a, iz norme HRN EN 62305-3.

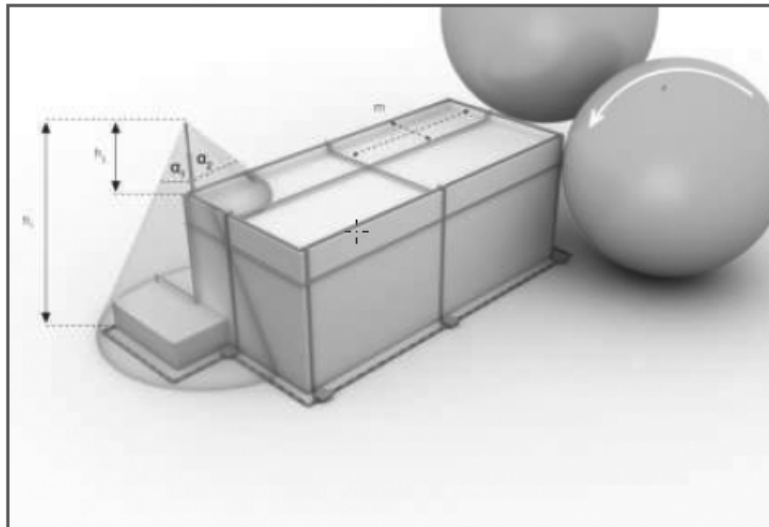
Razred zaštite od udara munje	Metoda zaštite		
	Polumjer kugle munje r	Širina petlje \mathring{S}	Zaštitni kut
I	20 m	5 x 5 m	70 °
II	30 m	10 x 10 m	72 °
III	45 m	15 x 15 m	76 °
IV	60 m	20 x 20 m	79 °



1 – zaštitni kut udara munje [°], 2 – visina sljemena [m], 3 – razred zaštite

Slika 4.5. Zaštitni kut djelovanja gromobranske hvataljke prema normi HRN EN 62305-3 [9]

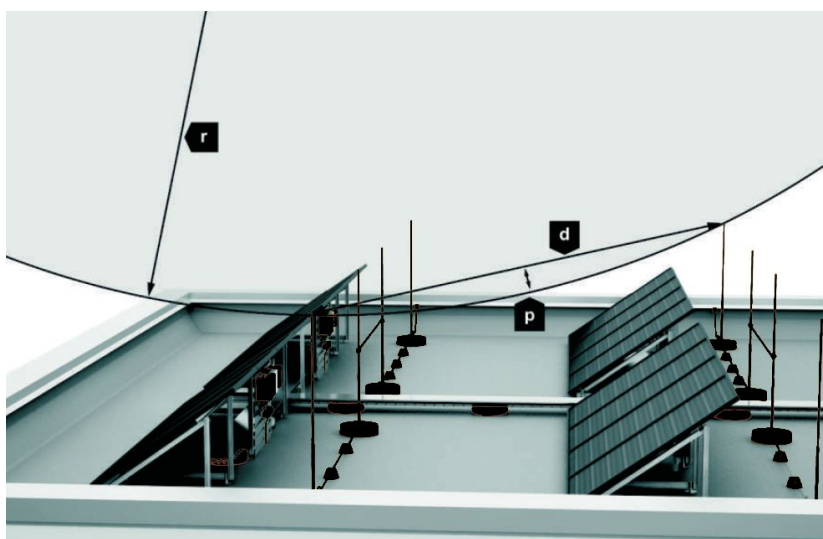
Na slici 4.6 prikazana je metoda kotrljajuće kugle koja se može primijeniti na objekt bilo kakve geometrije, dok se metoda zaštitnog kuta može primijeniti samo za jednostavne objekte i to s maksimalnom visinom metalne hvataljke od 2 m, prema normi HRN EN 62305-3.



Slika 4.6. Metoda zaštite hvataljkama [9]

Kod zaštite od udara groma upotrebom metode kotrljajuće kugle treba obratiti pažnju i na prodiranje između dviju metalnih, odnosno štapnih hvataljki. Prodiranje je prikazano na slici 4.7, a izračunava se po formuli:

$$p = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (4.1)$$



Slika 4.7. Prodiranje kod metode kotrljajuće kugle [9]

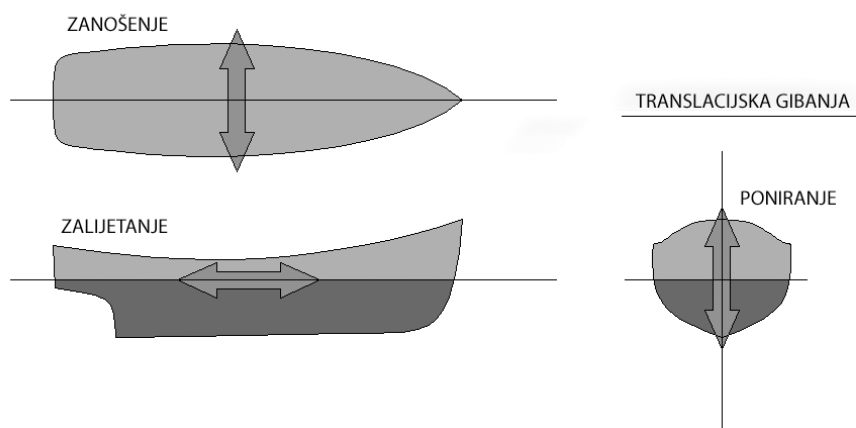
U tablici 4.2 vidi se pregled dubina prodiranja po razredima zaštite od djelovanja munje za neke od karakterističnih vrijednosti. Točan proračun vrši se prema formuli (4.1.).

Tablica 4.2. Dubine prodiranja prema razredima zaštite od udara groma

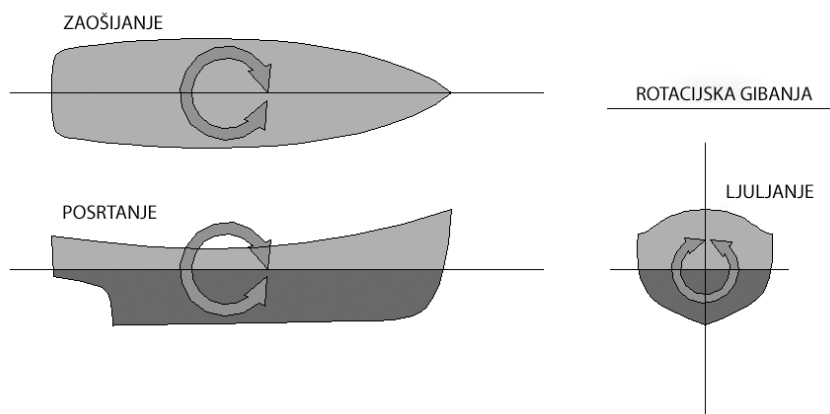
Razmak hvataljki d (m)	Dubina prodiranja Razred zaštite I Kugla munje: R=20 m	Dubina prodiranja Razred zaštite II Kugla munje: R=30 m	Dubina prodiranja Razred zaštite III Kugla munje: R=45 m	Dubina prodiranja Razred zaštite IV Kugla munje: R=60 m
2	0,03	0,02	0,01	0,01
3	0,06	0,04	0,03	0,02
4	0,1	0,07	0,04	0,04
5	0,16	0,1	0,07	0,07
10	0,64	0,42	0,28	0,21
15	1,46	0,96	0,63	0,47
20	2,68	1,72	1,13	0,84

5. ISPITIVANJE SIGURNOSTI GROMOBRANSKOG SUSTAVA NA JEDRILICI U REALNIM UVJETIMA PLOVIDBE

Dinamički uvjeti na brodu se odnose na gibanje plovila koje se može opisati s tri translacijske (zalijetanje, zanošenje i poniranje) i tri rotacijske komponente (ljuljanje, posrtanje i zaušijanje) [10]. Translacijska gibanja plovila su prikazana na slici 5.1., a rotacijska na slici 5.1.. Valjanje broda ima najveći efekt prilikom ispitivanja gibanja broda u realnim uvjetima, sastoji se od ljuljanja i posrtanja.



Slika 5.1. Translacijska gibanja plovila u realnim uvjetima plovidbe [11]



Slika 5.2. Rotacijska gibanja plovila u realnim uvjetima plovidbe [11]

5.1. Matematički model ispitivanja zaštite od udara groma na jedrilici

Kada je brod u okomitom položaju u odnosu na površinu mora odnosno kada nema ljuljanja, visina jarbola i zaštitne metalne hvataljke je najviša, a time i štíčena površina, kao što je prikazano na slici 5.3. Kako se brod pomiče područje zaštite smanjuje kao što je vidljivo na slici 5.4.. Promjene su opisane jednadžbama [10]:

$$h_t = h \cdot \sin \alpha \quad (5.1)$$

$$b = 0,5 \cdot a \cdot \tan \alpha \quad (5.2)$$

$$P = h^2 \cdot \pi \quad (5.3)$$

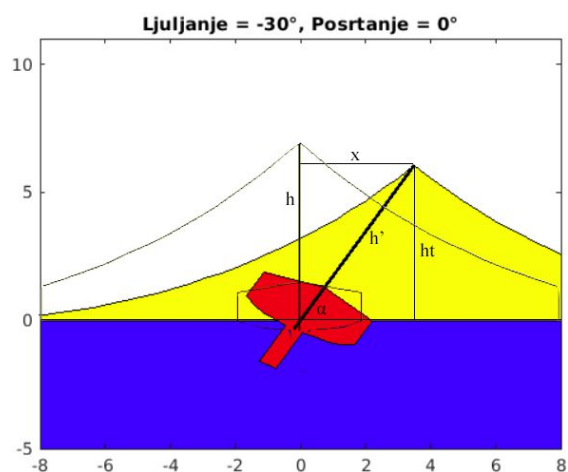
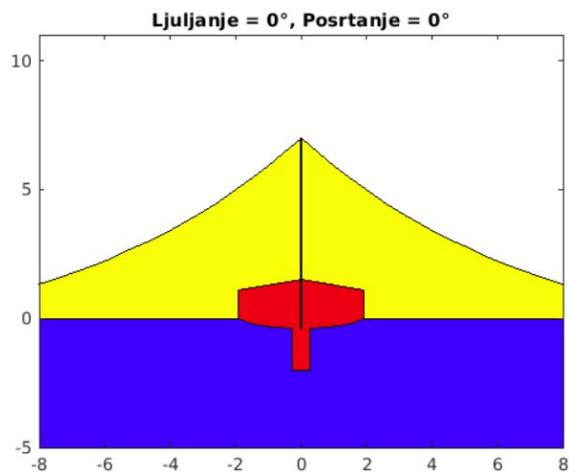
$$P_t = h_t^2 \cdot \pi \quad (5.4)$$

$$l = \sqrt{h^2 - h_t^2} \quad (5.5)$$

$$z = l + 0,5 \cdot a \quad (5.6)$$

gdje je: a – širina broda
b – promjena visine u ovisnosti o kutu nagiba α
h – visina jarbola
 α – kut nagiba jarbola u odnosu na okomicu morske podloge
 h_t – visina jarbola za kut nagiba veći od 0°
P – površina štíčenog dijela
 P_t – površina štíčenog dijela za kut nagiba veći od 0°
l – promjena duljine zaštitne zone
z – potrebna širina zaštitne zone

Vidljivo je da se uslijed valjanja broda visina jarbola vizualno smanjuje, a time se smanjuje i zaštitna zona broda u odnosu na brod u statičkim uvjetima na slici 5.3. Simulacija pokazuje da kod određenog kuta α dio jedrilice se nalazi izvan zone zaštite, kao na slici 5.6. Kod jedrilica u plovidbi, u području izvan zaštite može se nalaziti jedriličar.



Slika 5.3. Zaštitna zona u stacionarnom stanju ($\alpha = 0^\circ$)

Slika 5.4. Promjena zaštitne zone za kut α različit od 0°

Na slici 5.5. prikazana je jedrilica sa bočnim dijelom van zone zaštite uslijed ljuljanja. Dimenzije jedrilice su [10]:

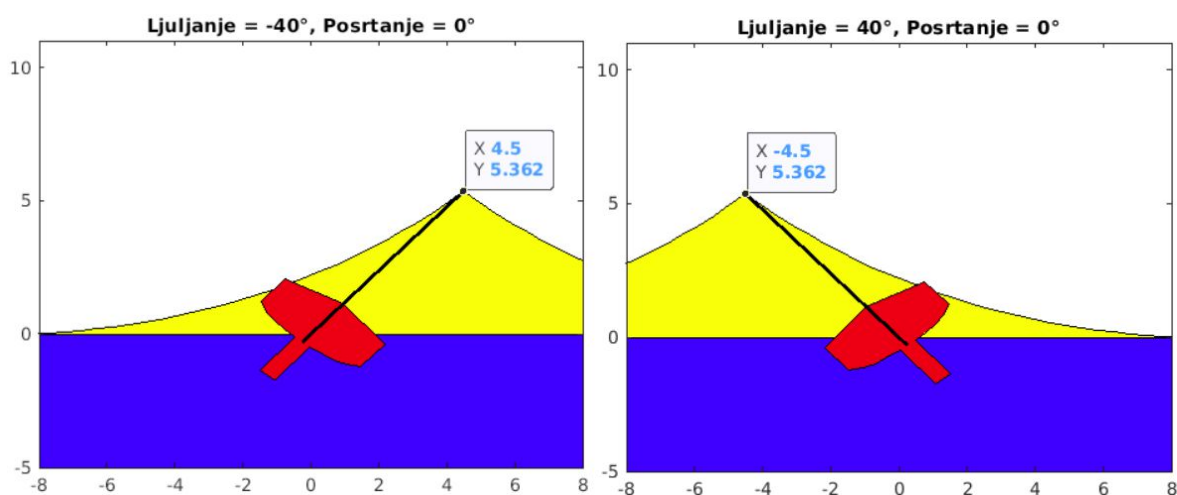
$$L_{OA} = 12,80 \text{ m}$$

$$L_{WL} = 11,45 \text{ m}$$

$$B_{WL} = 3,82 \text{ m}$$

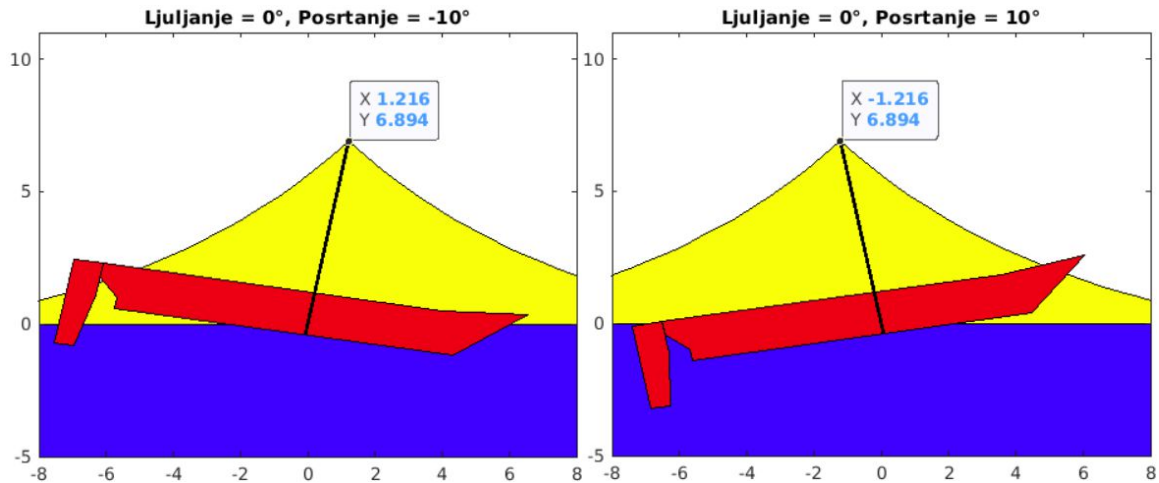
$$T = 2 \text{ m}$$

$$h = 7 \text{ m}$$



Slika 5.5. Model zaštitne zone jedrilice za kut ljuljanja α različit od 0°

Isti problem se javlja i kod posrtanja broda, što je prikazano na slici 5.6. Iako je problem vidljiv na jedrilici, izraženiji je kod velikih putničkih i teretnih brodova, čija je krma relativno daleko od jarbola na kojima se nalaze hvataljke sustava za zaštitu od udara groma.



Slika 5.6. Model zaštitne zone jedrilice kod posrtanja

Konfiguracija jedrilice je standardna – jarbol se nalazi na udaljenosti 3/5 od krme, a 2/5 od pramca. Kao što je vidljivo na slici 5.7, krmeni i pramčani dio broda se u takvoj konfiguraciji prilikom posrtanja nalaze van zaštitne zone.

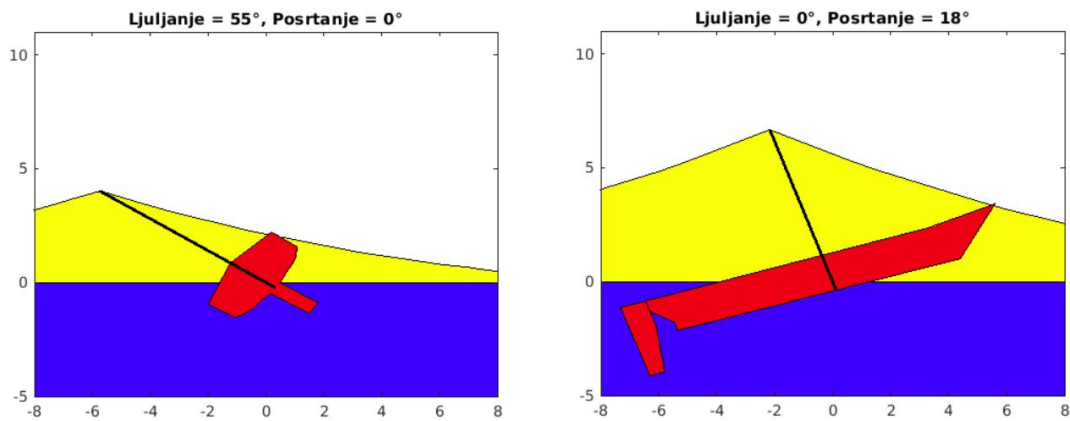
Prema prikazanim matematičkim modelima vidljivo je da nije dostatno promatrati plovilo u statičkim uvjetima. Matematički model dokazuje postojanje izravne opasnosti od udara gromau dinamičkim uvjetima.

5.2. Kritični parametri kod promatrane jedrilice

Kao dio ovog rada razvijen je model u programskom paketu Matlab, koji omogućava grafički prikaz zaštitne zone u prednjem i bočnom prikazu plovila. Moguće je definirati proizvoljne dimenzije plovila, kategoriju zaštite odnosno polumjer kotrljajuće kugle, te se na temelju tih ulaznih podataka iscertava model iz kojeg je vidljivo zadovoljava li odabrana gromobrnska zaštita postavljene uvjete.

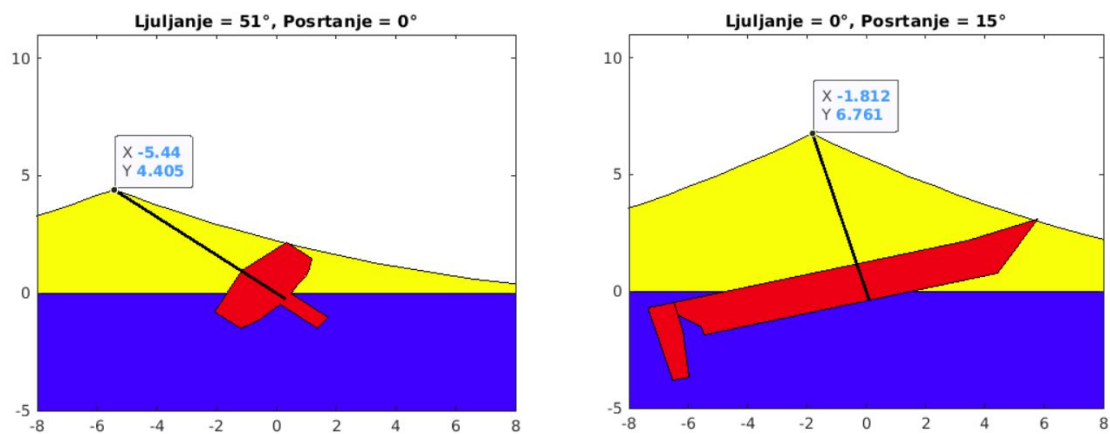
Prema normi HRN EN 62305-3 postoje četiri kategorije zaštite, koje su navedene u tablici 4.1. Jedrilicu ćemo promatrati u sva četiri slučaja, odnosno za polumjere kotrljajuće kugle od 20 m, 30 m, 45 m te 60 m.

Kod polumjera kotrljajuće kugle 60 m, odnosno kategorije IV zaštite, koja se obično primjenjuje u građevinarstvu kritični kut zaštite je 55° kod ljuljanja ili 18° kod posrtanja, kao što je vidljivo na slici 5.7.



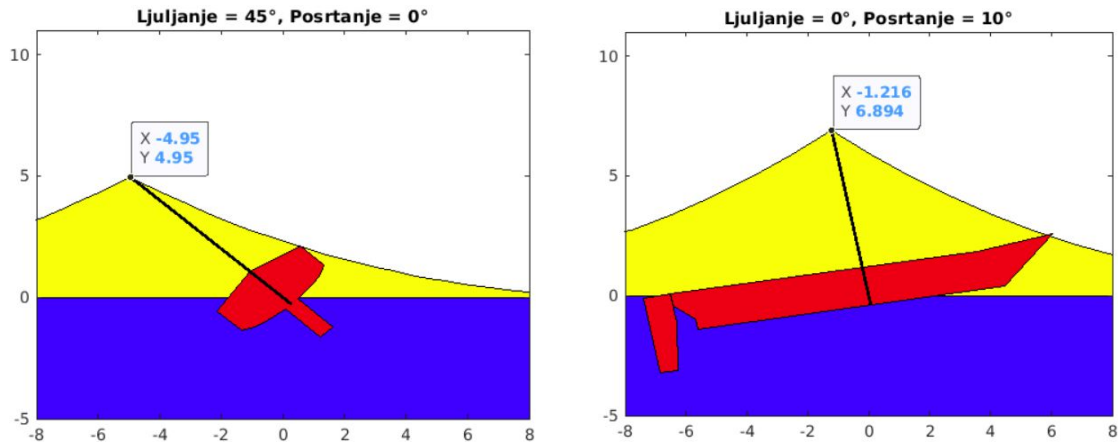
Slika 5.7. Kritični kut jedrilice kod kategorije zaštite IV, $R = 60$ m

Kod polumjera kotrljajuće kugle 45 m, odnosno kategorije III zaštite, kritični kut zaštite je 51° kod ljuljanja ili 15° kod posrtanja, kao što je vidljivo na slici 5.8.



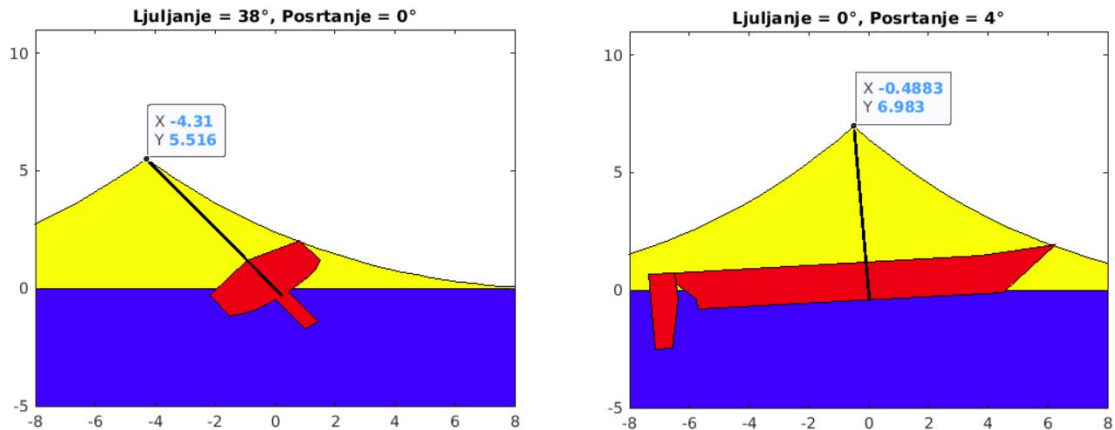
Slika 5.8. Kritični kut jedrilice kod kategorije zaštite III, $R = 45$ m

Kod polumjera kotrljajuće kugle 30 m, odnosno kategorije II zaštite, kritični kut zaštite je 45° kod ljuľanja ili 10° kod posrtanja, kao što je vidljivo na slici 5.9.



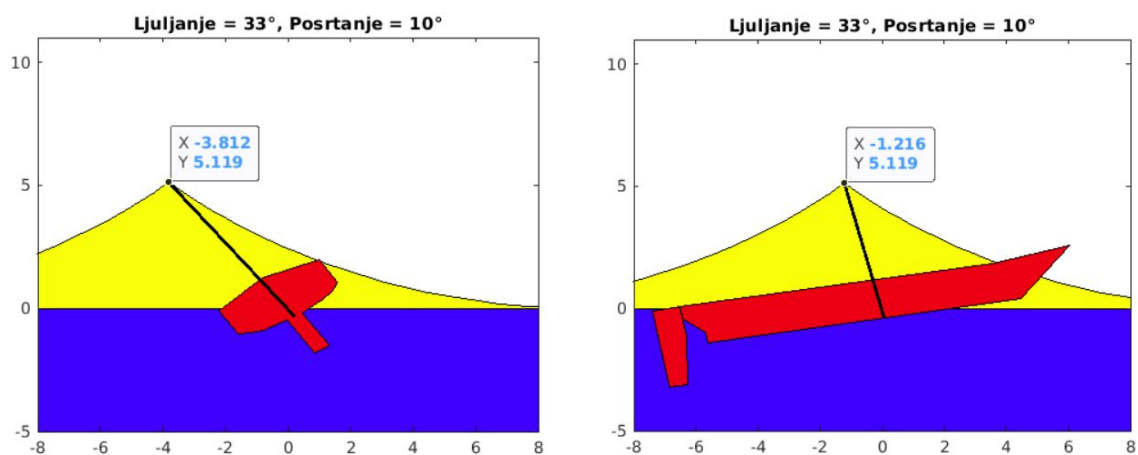
Slika 5.9. Kritični kut jedrilice kod kategorije zaštite II, $R = 30$ m

Kod polumjera kotrljajuće kugle 20 m, odnosno kategorije I zaštite, ovaj efekt je najizraženiji te kritični kut zaštite iznosi 38° kod ljuľanja ili 4° kod posrtanja, kao što je vidljivo na slici 5.10.



Slika 5.10. Kritični kut jedrilice kod kategorije zaštite I, $R = 20$ m

Ukoliko se promatra kombinacija ljuľjanja i posrtanja tada je efekt smanjenja zaštitne zone još izraženiji. Na slici 5.11 se vidi da je dio jedrilice izašao van zaštitne zone kod kuta ljuľjanja od samo 33° i kuta posrtanja od 5°.



Slika 5.11. Kritični kut jedrilice kod kombinacije ljuľjanja i posrtanja pri kategoriji zaštite I

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je dokazano da nije dostatno brod promatrati u statičkim uvjetima kada se govori o gromobranskoj zaštiti. Uslijed valjanja broda visina jarbola se smanjuje, a posljedično tome smanjuje se i zaštitna zona opasnosti od udara groma.

Nađete li se u blizini oluje ili vidite da se ona sprema pronađite zaklon podalje od metalnih objekata. Ni u kojem slučaju nemojte se zadržavati u blizini vode ili u vodi.

Kod projektiranja gromobranske zaštite treba se fokusirati na sastavne komponente gibanja broda. Stoga se kroz ovaj rad opisuje matematički model sustava zaštite od udara groma u dinamičkim uvjetima.

U drugom poglavlju prikazana je teoretska osnova nastanka munje i groma.

Treće poglavlje sadrži regulatorne zahtjeve prilikom projektiranja sustava za zaštitu od udara groma u brodogradnji.

U četvrtom poglavlju prikazan je klasični način projektiranja i implementacije sustava za zaštitu od udara groma koji se izvodi u statičkim uvjetima.

Matematički model zaštitnog područja sustava za zaštitu od udara groma u dinamičkim uvjetima prikazan u petom poglavlju promatra dvije najutjecajnije komponente gibanja – ljuljanje i posrtanje.

Kod projektiranja i konstrukcije plovila potrebno je slijediti pravila odabranog klasifikacijskog društva koja ne definiraju dovoljno detaljno sustave za zaštitu od udara groma (gromobranski sustavi). Neadekvatna pravna regulativa sustava rezultira povećanom opasnošću od udara groma te ugrožavanjem plovila i ljudskih života.

LITERATURA

1. International Maritime Organization: *SOLAS Consolidated Edition*, IMO, 2014.
2. DNV GL: *Rules for classification, class programmes, class guidelines, offshore standards and statutory interpretations*, DNV GL, 2018.
3. Bureau Veritas: *Rules for the Classification of Steel Ships, Consolidated edition for documentation only*, Bureau Veritas, July 2019.
4. Lloyd: *Lloyd's Register Rulefinder 2019 - Version 9.31, Lloyd's Register Rules and Regulations*, Lloyd Register Group Limited, 2019.
5. Croatian Register of Shipping (CRS): *Rules for the classification of ships, part 12 – electrical equipment*, CRS, 2016.
6. Uman, M. A.: *The Lightning Discharge*, Dover Publications, 377, 2001.
7. Kaiser, D.: *Kaiserov elektrotehnički priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb, 1971.
8. Udovičić, B.: *Elektroenergetski sustav*, Kigen, 2005.
9. OBO Bettermann: *OBO priručnik za zaštitu od munje*, OBO Bettermann, 2016.
10. Cvjetković, S. J.: *Model ranog otkrivanja opasnosti od udara groma na plovnim objektima*, doktorska disertacija, Pomorski fakultet Rijeka, 2012.
11. Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME): *Principles of Naval Architecture*, , Vol. III, 1989
12. Hrvatska Enciklopedija: *Munja*, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=42456>, 04.09.2019.
13. <https://www.dulist.hr/poznata-meteorologinja-objasnjava-sto-je-munja-grmljenje-grmljavina-a-sto-grom/591779/>, posjećeno 10. 09. 2019.
14. CROMETEO, DUZS, posjećeno 15. 09. 2019.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Raspored električnog naboja unutar olujnog oblaka	4
Slika 2.2. Slikovno pojašnjenje pojmova pojmova – munja, grmljenje, grmljavina i grom	5
Slika 2.3. Munje nad Marjanom	7
Slika 2.4. Kuglasta munja	8
Slika 2.5. Izravan udar groma	10
Slika 2.6. Shema globalnog elektrostatskog polja i strujnog kruga u atmosferi	12
Slika 2.7. Udar groma na moru	13
Slika 0.1. Formiranje električnog polja uslijed raspodjele naboja na metalnoj konstrukciji	18
Slika 4.2. Rezultantna raspodjela naboja na metalnoj konstrukciji unutar električnog polja	19
Slika 4.3. Algoritam projektiranja gromobranske zaštite na brodu	20
Slika 4.4. Zaštitni kut α djelovanja gromobranske hvataljke.....	21
Slika 4.5. Zaštitni kut djelovanja gromobranske hvataljke prema normi HRN EN 62305-3	22
Slika 4.6. Metoda zaštite hvataljkama	23
Slika 4.7. Prodiranje kod metode kotrljajuće kugle	23
Slika 5.1. Translacijska gibanja plovila u realnim uvjetima plovidbe	25
Slika 5.2. Rotacijska gibanja plovila u realnim uvjetima plovidbe	25
Slika 5.3. Zaštitna zona u stacionarnom stanju ($\alpha = 0^\circ$)	27
Slika 5.4. Promjena zaštitne zone za kut α različit od 0°	27
Slika 5.5. Model zaštitne zone jedrilice za kut ljuljanja α različit od 0°	27
Slika 5.6. Model zaštitne zone jedrilice kod posrtanja	28
Slika 5.7. Kritični kut jedrilice kod kategorije zaštite IV, $R = 60$ m	29
Slika 5.8. Kritični kut jedrilice kod kategorije zaštite III, $R = 45$ m	29
Slika 5.9. Kritični kut jedrilice kod kategorije zaštite II, $R = 30$ m	30
Slika 5.10. Kritični kut jedrilice kod kategorije zaštite I, $R = 20$ m	30
Slika 5.11. Kritični kut jedrilice kod kombinacije ljuljanja i posrtanja pri kategoriji zaštite I ...	31

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Maksimalne vrijednosti polumjera kotrljajuće kugle, širine mreže i zaštitnog kuta prema odgovarajućem razredu zaštite od udara munje LPS-a, iz norme HRN EN 62305-3.	22
Tablica 4.2. Dubine prodiranja prema razredima zaštite od udara groma.....	24

PRILOG

Matematički model ispitivanja zaštite od udara groma na jedrilici


```

%{
* @autor          Tomislav Seser
* @copyright      2019
* @verzija 1.0
%}

close all
clear
clc
%{
    Dimenzije plovila i ostale konstante.

    h          - visina vrha metalne hvataljke
    T          - dubina
    R          - polumjer kotrljajuće kugle
    Bwl        - širina plovila
    Loa        - ukupna duljina
    roll       - ljuljanje u stupnjevima
    pitch      - posrtanje u stupnjevima
    limit      - ograničenje prikaza po x-osi
%}
h = 7;
T = 2;
R = 20;
Bwl = 3.82;
Loa = 12.8;
roll = 33;
pitch = -10;
limit = 8;

% Prednji prikaz
boat1_x = [Bwl/2 Bwl/2 0 -Bwl/2 -Bwl/2 -0.8*Bwl/2 -0.6*Bwl/2 ...
           -0.4*Bwl/2 -0.15*Bwl/2 -0.15*Bwl/2 0.15*Bwl/2 0.15*Bwl/2 ...
           0.4*Bwl/2 0.6*Bwl/2 0.8*Bwl/2];
boat1_y = [0 0.55*T 0.75*T 0.55*T 0 -0.1*T -0.15*T -0.17*T ...
           -0.2*T -T -T -0.2*T -0.17*T -0.15*T -0.1*T];

% Ažuriranje prednjeg prikaza u ovisnosti o kutu ljuljanja
for i=1:length(boat1_x)
    boat1_newx(i) = boat1_x(i)*cosd(roll) - boat1_y(i)*sind(roll);
    boat1_newy(i) = boat1_x(i)*sind(roll) + boat1_y(i)*cosd(roll);
end
boat1_x = boat1_newx;
boat1_y = boat1_newy;

% Bočni prikaz
boat2_x = [0.7*Loa/2 Loa/2 0.6*Loa/2 -Loa/2 -Loa/2 ...
           -0.9*Loa/2 -0.9*Loa/2];
boat2_y = [-0.2*T 0.75*T 0.6*T 0.6*T 0.35*T 0 -0.2*T];

motor_x = [-Loa/2 -0.15*Bwl-Loa/40-Loa/2 -0.15*Bwl-Loa/40-Loa/2 ...
           -Loa/40-Loa/2 -Loa/2];

```

```

motor_y = [0.6*T 0.6*T -T -T 0];

% Ažuriranje bočnog prikaza u ovisnosti o kutu posrtanja
for i=1:length(boat2_x)
    boat2_newx(i) = boat2_x(i)*cosd(pitch) - boat2_y(i)*sind(pitch);
    boat2_newy(i) = boat2_x(i)*sind(pitch) + boat2_y(i)*cosd(pitch);
end
boat2_x = boat2_newx;
boat2_y = boat2_newy;

for i=1:length(motor_x)
    motor_newx(i) = motor_x(i)*cosd(pitch) - motor_y(i)*sind(pitch);
    motor_newy(i) = motor_x(i)*sind(pitch) + motor_y(i)*cosd(pitch);
end
motor_x = motor_newx;
motor_y = motor_newy;

% Pozicija jedrilja
mast_x = [0 0];
mast_y = [-0.2*T h];

% Ažuriranje bočnog prikaza jedrilja u ovisnosti o kutu posrtanja
for i=1:length(mast_x)
    mast_newx(i) = mast_x(i)*cosd(pitch) - mast_y(i)*sind(pitch);
    mast_newy(i) = mast_x(i)*sind(pitch) + mast_y(i)*cosd(pitch);
end
mast1_x = mast_newx;
mast1_y = mast_newy;

% Ažuriranje bočnog prikaza jedrilja u ovisnosti o kutu ljuljanja
for i=1:length(mast_x)
    mast_newx(i) = mast_x(i)*cosd(roll) - mast_y(i)*sind(roll);
    mast_newy(i) = mast_x(i)*sind(roll) + mast_y(i)*cosd(roll);
end
mast2_x = mast_newx;
mast2_y = mast_newy;

% Kumulativni utjecaj ljuljanja i posrtanja na jedrilje.
% Ažuriranje pozicije uslijed ljuljanja nakon primjene posrtanja
for i=1:length(mast_x)
    mast_newx(i) = mast1_x(i)*cosd(roll) - mast1_y(i)*sind(roll);
    mast_newy(i) = mast1_x(i)*sind(roll) + mast1_y(i)*cosd(roll);
end
mast_x = mast_newx;
mast_y = mast_newy;

% Nova pozicija jedrilja u prednjem prikazu
H1 = mast_y(2);
X1 = mast2_x(2);

% Nova pozicija jedrilja u bočnom prikazu
H2 = mast_y(2);
X2 = mast1_x(2);

```

```

% Pozicija kotrljajuće kugle u prednjem prikazu
alpha1 = acosd((R - H1)/R);
xx1 = R*sind(alpha1);
x_r1 = linspace(-xx1,0,30);
y_r1 = R - sqrt(R^2 - (x_r1 + xx1).^2);
y_r1 = y_r1';
x_r1 = [x_r1 -fliplr(x_r1)];
x_r1 = x_r1 + X1;
y_r1 = [y_r1; flipud(y_r1)];
x_r1 = x_r1';

% Pozicija kotrljajuće kugle u bočnom prikazu
alpha2 = acosd((R - H2)/R);
xx2 = R*sind(alpha2);
x_r2 = linspace(-xx2,0,30);
y_r2 = R - sqrt(R^2 - (x_r2 + xx2).^2);
y_r2 = y_r2';
x_r2 = [x_r2 -fliplr(x_r2)];
x_r2 = x_r2 + X2;
y_r2 = [y_r2; flipud(y_r2)];
x_r2 = x_r2';

% Printanje modela (prednji prikaz)
% Pozicija mora
sea_x = [xx1 -xx1 -xx1 xx1];
sea_y = [0 0 -8 -8];

figure(1)
% Printanje kugle
fill(x_r1 , y_r1 , 'y')
hold on
% Printanje mora
fill(sea_x , sea_y , 'b')
% Printanje plovila
fill(boat1_x , boat1_y , 'r')
% Printanje jedrilja
plot(mast2_x , [mast2_y(1) mast2_y(2)] , 'k' , 'linewidth' , 2)
% Primjena osnih limita
axis ([-limit limit -5 2*limit-5])
hold off
% Naslov
title(['Ljuljanje = ' num2str(roll) '°, Posrtanje = ' num2str(pitch)
'°']);

% Printanje modela (bočni prikaz)
% Pozicija mora
sea_x = [xx2 -xx2 -xx2 xx2];

```

```

sea_y = [0 0 -8 -8];

figure(2)
% Printanje kugle
fill(x_r2 , y_r2 , 'y')
hold on
% Printanje mora
fill(sea_x , sea_y , 'b')
% Printanje plovila
fill(boat2_x , boat2_y , 'r')
fill(motor_x , motor_y , 'r')
% Printanje jedrilja
plot(mast1_x , [mast1_y(1) mast1_y(2)] , 'k' , 'linewidth' , 2)
% Primjena osnih limita
axis ([-limit limit -5 2*limit-5])
hold off
% Naslov
title(['Ljuljanje = ' num2str(roll) '°, Posrtanje = ' num2str(pitch)
'°']);

```