



Igor Ivanković<sup>1</sup>  
HOPS d.o.o.  
[igor.ivankovic@hops.hr](mailto:igor.ivankovic@hops.hr)

Alan Župan  
HOPS d.o.o.  
[alan.zupan@hops.hr](mailto:alan.zupan@hops.hr)

Goran Levačić  
HOPS d.o.o.  
[goran.levacic@hops.hr](mailto:goran.levacic@hops.hr)

Dean Dobrec  
HOPS d.o.o.  
[dean.dobrec@hops.hr](mailto:dean.dobrec@hops.hr)

Boris Avramović  
HOPS d.o.o.  
[Boris.Avramovic@hops.hr](mailto:Boris.Avramovic@hops.hr)

Ivan Pavičić  
HOPS d.o.o.  
[Ivan.Pavivic@hops.hr](mailto:Ivan.Pavivic@hops.hr)

## ZAŠTITA PRIJENOSNIH VODOVA OD DIREKTOG UDARA U FAZNI VODIČ

### SAŽETAK

U prvom dijelu rada opisana je zaštita prijenosnih vodova od atmosferskih pražnjenja zaštitnim vodičima koji služe za zaštitu faznih vodiča od direktnog udara munje čime se direktno povećava pogonska sigurnost voda. Drugi dio rada opisuje detekciju struja munja temeljem Sustava za lokaciju atmosferskog pražnjenja implementiranog u HOPS-u, analizu atmosferskih pražnjenja u posljednjih deset godina, te korelaciju isklopa prekidača u ovisnosti o amplitudi udara munje. Treći dio rada opisuje usporedbu statistike događaja uzrokovanih udarima munja dva prijenosna voda nazivnog napona 110 kV i prijenosnog voda nazivnog napona 220 kV s različitim brojem zaštitnih vodiča.

**Ključne riječi:** štice dalekovoda, male struje munje, zaštitni vodiči, SLAP

### PROTECTION OF TRANSMISSION LINES FROM SHIELDING FAILURE

### ABSTRACT

In the first part of the article, it is described the protection of transmission lines from atmospheric discharges by protective ropes which serve to protect the conductors from direct lightning strikes, which directly increases the power line safety. The second part of the paper describes the lightning current detection based on the HOPS implemented Lightning Monitoring Location System, the analysis of atmospheric discharges over the past ten years, and the correlation of switching gear depending on the lightning strike amplitude. The third part of the paper describes the comparison of statistics events caused by lightning strikes of two transmission lines nominal voltage of 110 kV and transmission lines nominal voltage of 220 kV with different number of protective ropes.

**Key words:** transmission lines protection, low lightning current, protective ropes, LLS

<sup>1</sup> Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće/instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća/institucije.

## 1. UVOD

Kvarovi na visokonaponskim prijenosnim vodovima najčešće su uzrokovani udarima munje u stup, zaštitno uže ili (direktno) u fazni vodič. Stoga se prilikom planiranja trase izgradnje prijenosnih vodova i prilikom projektiranja sustava zaštite od atmosferskih pražnjenja trebaju uzeti u obzir parametri kao što su gustoća udara munje na planiranoj trasi, specifični otpor tla te karakteristike planiranih stupova. Navedeni parametri predstavljaju osnovu za izbor nivoa izolacije, tipa uzemljenja kao i položaj i broj zaštitnih užeta na prijenosnom vodu.

Standardna prenaponaska zaštita dalekovoda sastoji se od uzemljivača i zaštitnog užeta koje sprečava direktan udar munje u fazni vodič i nastanak kvarova, ukoliko je amplituda munje veća od podnošljive izolacijske vrijednosti. Zaštitno uže štiti fazne vodiče na način da „prihvati“ struju munje i provede je u zemlju preko uzemljivača, koji je smješten u temelju svakog stupa prijenosnog voda.

Kod struja munja manjih amplituda postoji veća vjerojatnost za direktan udar munje u fazni vodič, odnosno nastanka tzv. greške štice (engl. shielding failure). Uslijed direktnog udara munja su karakteristični valovi vrlo strmih čela, koji mogu uzrokovati prenapone koji u većini slučajeva prelaze vrijednost izolacijske razine voda, što može dovesti do preskoka između faza ili prema zemlji.

## 2. ZAŠTITA PRIJENOSNIH VODOVA OD ATMOSFERSKIH PRAŽNJENJA

Općenito elektroenergetski vodovi se dijele na nadzemne i kableske. Nadzemni elektroenergetski vodovi imaju vodiče iznad zemlje pričvršćeni na izolatorima na odgovarajućim nosivim konstrukcijama. dok kableski elektroenergetski vodovi imaju vodiče koji su izolirani i zaštićeni za polaganje u zemlju (ili vodu). Osnovni dijelovi nadzemnog voda su: vodiči, izolatori, stupovi, temelji, spojni, ovjesni i zaštitni materijal, uzemljenje i zaštitno uže.

Vodiči služe za vođenje i prijenos električne struje te predstavljaju aktivni i najvažniji dio dalekovoda. Za izradu električnih vodiča nadzemnih vodova koriste se različiti materijali, od kojih se traži dobra električna vodljivost, velika mehanička čvrstoća, dobra mogućnost obrade, otpornost protiv oštećenja, starenja i korozije, te prihvatljiva cijena.

Uloga stupova dalekovoda je nošenje i zatezanje vodiča i zaštitnih užadi. Stupovi po funkciji mogu biti nosivi i zatezni, a obzirom na raspored svojih sastavnih elemenata se mogu jako razlikovati, pa tako postoje jednostruki čelično-rešetkasti stupovi i dvostruki čelično-rešetkasti stupovi.

Jednostruki čelično-rešetkasti stupovi su najčešće oblika:

- jela,
- modificirana jela,
- Y stup,
- mačka,

Dvostruki čelično-rešetkasti stupovi imaju horizontalni raspored vodiča i najčešće su oblika:

- dvostruka jela,
- "Dunav",
- "bačva" itd.

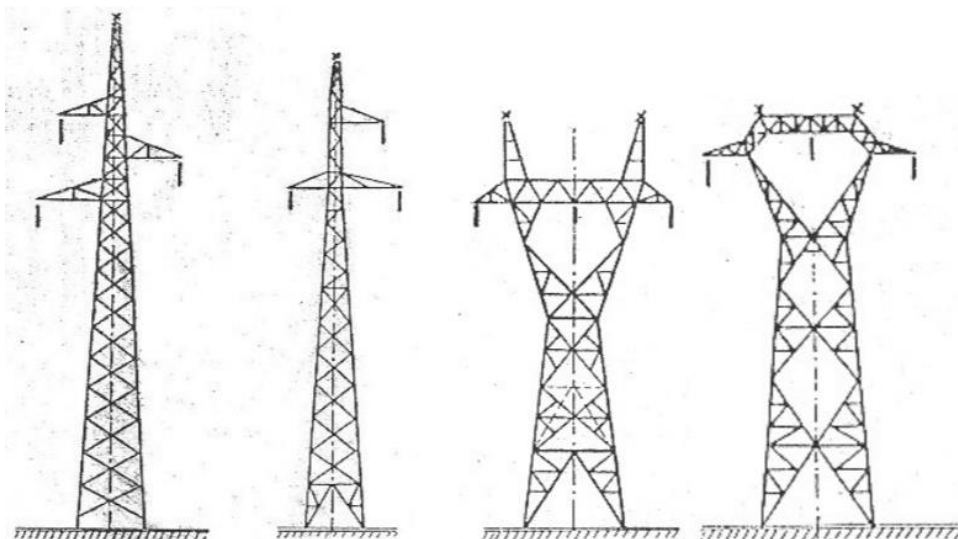
Radi sigurnosti pogona nadzemnog voda i ljudi koji dolaze u blizinu dalekovodnih stupova, stupovi se uzemljuju. Uzemljenje nadzemnog voda u širem smislu obuhvaća: uzemljivač stupa, međusobne galvanske spojeve metalnih dijelova koji nisu pod naponom te samo zaštitno uže.

Zaštitno uže služi za: zaštitu faznih vodiča od direktnog udara munje (povećanje pogonske sigurnosti voda), osiguranje pouzdanog rada relejne zaštite kod kratkih spojeva prema zemlji, galvansko povezivanje uzemljivača svih stupova i poboljšanje cjelokupnog sustava uzemljenja voda.

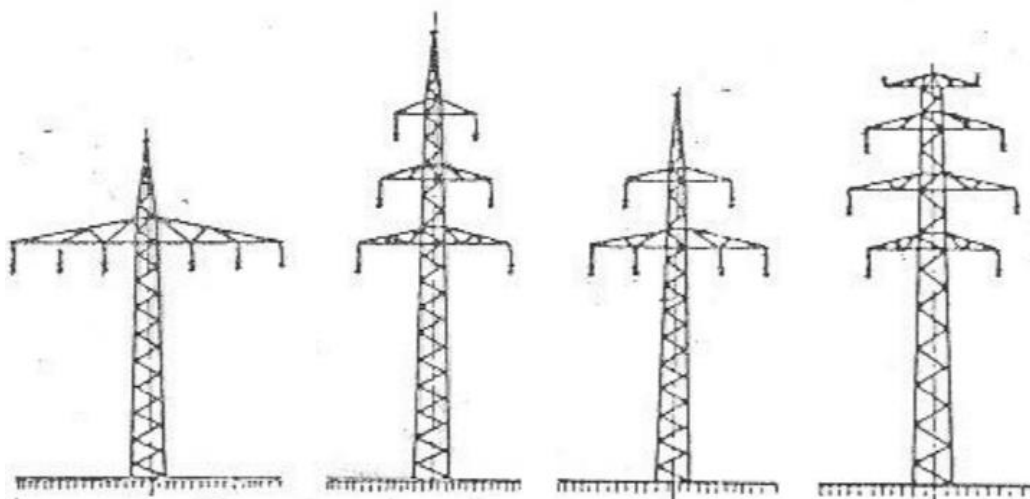
Kod udara munja malih amplituda moguć je direktan udar u fazni vodič, pojava koju zovemo greška štice (engl. shielding failure), pri čemu može doći do nastanka kvara. Kod udara velikih amplituda moguć je udar u zaštitno uže ili stup voda kada može doći do preskoka na izolatorskom lancu, pojava koju zovemo povratni preskok (engl. backflashover), pri čemu može doći do nastanka kvara na vodu. Osim navedenog, moguća je pojava induciranih prenapona uslijed udara munja u blizini voda.

Za dalekovod je svakako najgori direktni udar munje u fazni vodič, što može dovesti do vrlo visokih prenapona i potencijalnog ugrožavanja izolacije dalekovoda. Zbog toga se zaštitna užeta postavljaju kao gromobrani iznad vodiča i uzemljuju da bi preuzela na sebe direktni udarac munje. I udarac munje u stup je također opasan, jer zbog otpora uzemljenja poprima visok električni potencijal, pa može doći do povratnog preskoka od stupa na vodič. Zaštitna užeta u tom slučaju također pomažu jer ukupnu struju munje raspodijele na veći broj stupova. Također, kad munja udari u okolinu voda, zaštitna užeta smanjuju inducirane prenapone u vodičima.

Raspored vodiča i zaštitnih užeta na stupovima može biti različit i zavisi od konstrukcije stupa. Na slikama 1 i 2 su prikazani jednostruki i dvostruki čelično-rešetkasti stupovi dalekovoda sa jednim ili dva zaštitna užeta.

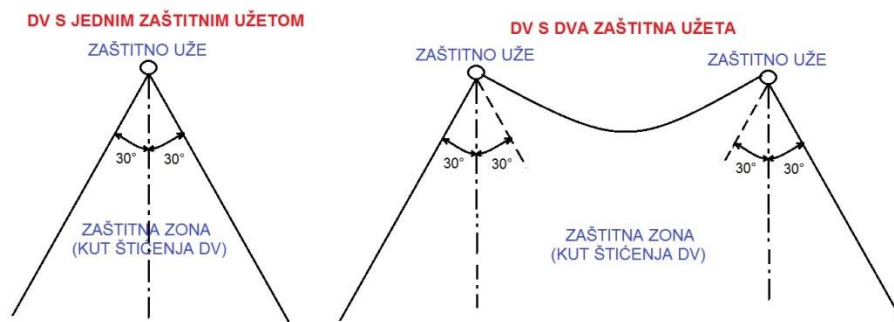


Sl. 1.: Jednostruki čelično-rešetkasti stupovi dalekovoda (Izvor [1])



Sl. 2.: Dvostruki čelično-rešetkasti stupovi dalekovoda (Izvor [1])

Da vodiči budu dovoljno zaštićeni od direktnog udara munje, trebaju se nalaziti unutar zaštitne zone od  $30^\circ$  koju stvaraju zaštitna užeta. Ako se s jednim zaštitnim užetom ne može postići dovoljno široka zaštitna zona, upotrebljavaju se dva ili iznimno čak tri zaštitna užeta (što je dosta rijetko). Primjer DV štice sa jednim i dva zaštitna užeta prikazan je na slici 3.



Sl. 3.: Zaštita DV sa jednim i dva zaštitna užeta (Izvor [2])

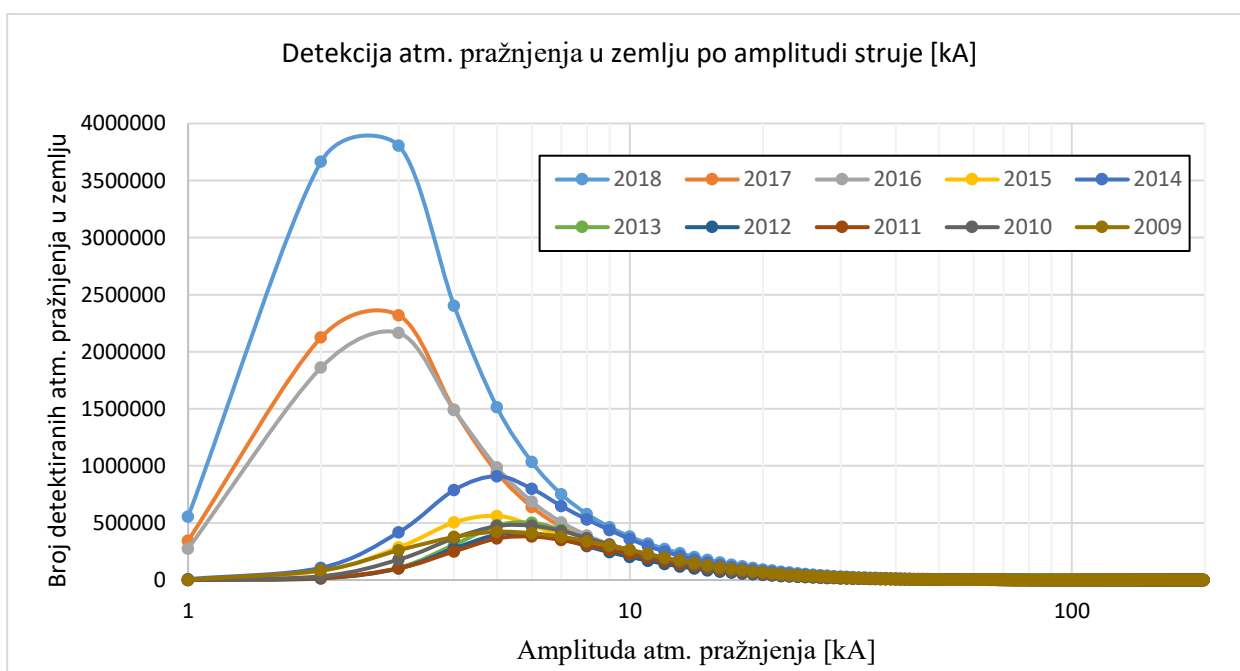
### 3. DETEKCIJA STRUJA MUNJA

Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja (SLAP) predstavlja modernu tehnologiju za praćenje atmosferskih pražnjenja te analizu utjecaja na grmljavinskih aktivnosti na različite sustave [3], [4], [5], [6] kao što je primjerice telekomunikacijska, distribucijska, prijenosna mreža itd.

Sustavi za lociranje atmosferskih pražnjenja pružaju informaciju o vremenu, lokaciji i intenzitetu udara munje u stvarnom vremenu [3], [7]). Navedeni podaci mogu korelirati s podacima o ispadima i kvarovima u mreži, što može doprinijeti kvaliteti praćenja pogona mreže, otkrivanju uzroka i lokacije nastalih kvarova te skraćivanju potrebnog vremena otklanjanju kvarova te ponovnoj uspostavi rada sustava.

#### 3.1. Detekcija atmosferskih pražnjenja

Početakom 2016. godine promijenjen je algoritam za detekciju atmosferskih pražnjenja čime je poboljšana detekcija atmosferskih pražnjenja malih amplituda. Kao posljedica optimizacije algoritma detekcije, u 2016. i 2017. godini zabilježen je značajno veći broj atmosferskih pražnjenja i to onih manjih amplituda. Početkom 2018. godine dodatno je povećana osjetljivost detekcije što je rezultiralo dodatnim povećanjem broja detektiranih atmosferskih pražnjenja (slika 4).

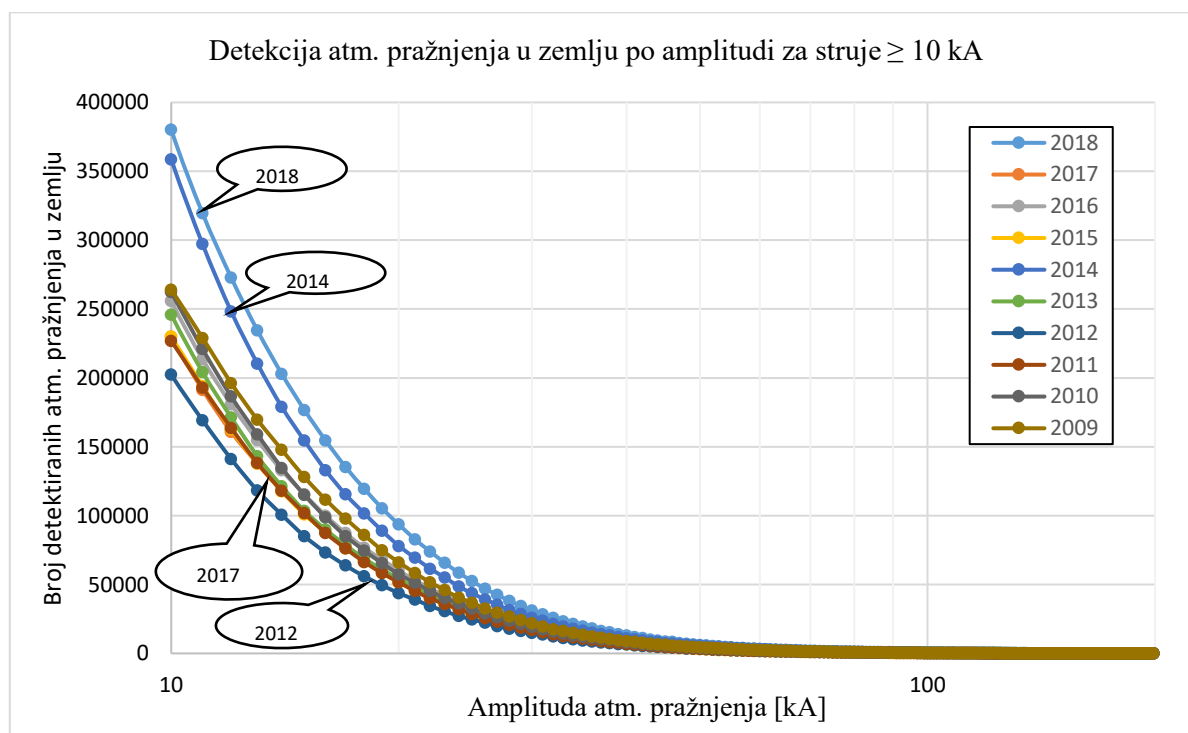


Sl. 4.: Broj detektiranih atmosferskih pražnjenja po amplitudi struje kroz godine (Izvor [7])

Povećanjem detekcije je značajno povećan i ukupni broj detektiranih atmosferskih pražnjenja, što mijenja rezultate statističke analize u 2018. godini u odnosu na prethodno razdoblje (2009. – 2018.), što je prikazano na slici 4 [7].

Statistički gledano, atmosferska pražnjenja malih amplituda (<5kA) u većini slučajeva ne predstavljaju velik rizik od nastanka kvara na visokonaponskim vodovima uslijed udara munje u vod, veći rizik je pri atmosferskim pražnjenjima većih amplitude. Ali povećana sposobnost detekcije atmosferska pražnjenja malih amplituda, otvara mogućnost za detaljnije analize predmetnih pojava i smanjenje broj ispada uzrokovanih istim.

Kako bi se jasnije prikazala distribucija atmosferskih pražnjenja i većih amplituda od 10 kA, na slici 5 prikazana je distribucija za atmosferska pražnjenja amplitude  $\geq 10$  kA u razdoblju od 2009. do 2018. godine.

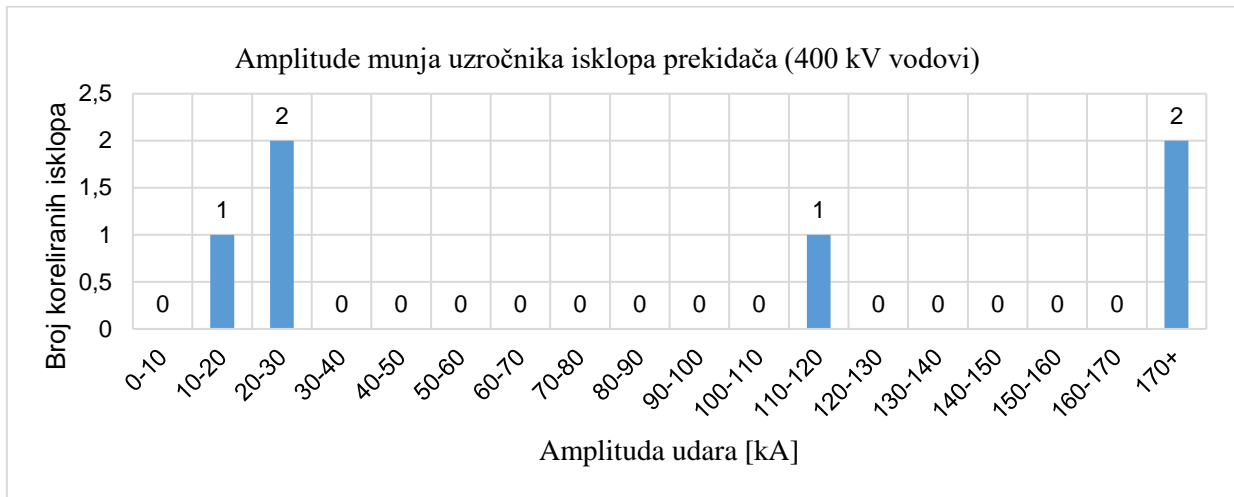


Sl. 5.: – Broj detektiranih atmosferskih pražnjenja za amplitude  $\geq 10$  kA kroz godine (Izvor [7])

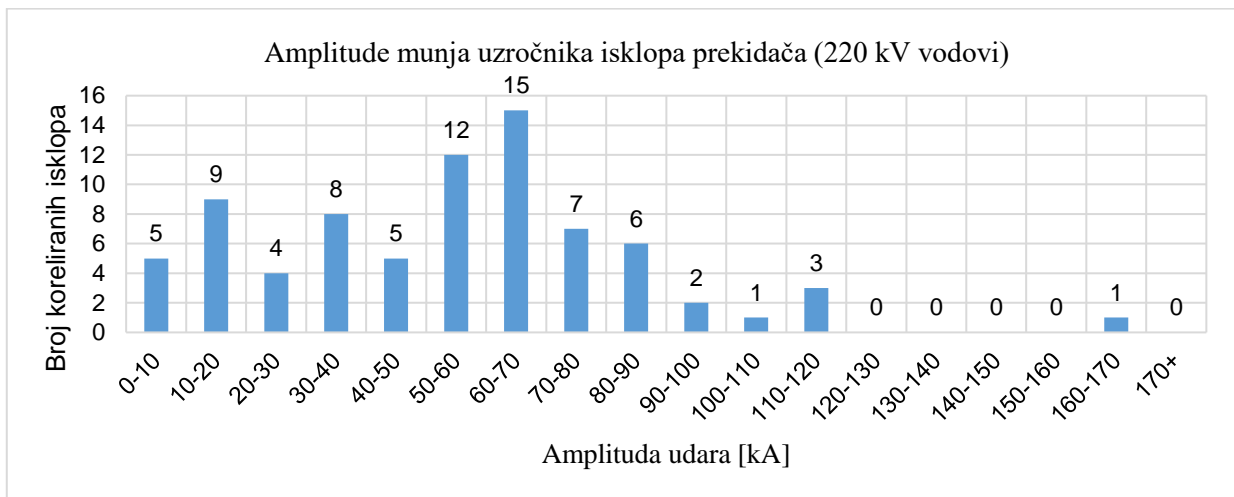
### 3.2. Amplitudna distribucija struja koreliranih udara

Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja (SLAP) osim praćenje atmosferskih pražnjenja omogućuje i analizu vrijednosti amplituda struja munja koje su pozitivno korelirane s isklompima prekidača u vodnim poljima transformatorskih stanica svih naponskih razina u vlasništvu HOPS-a.

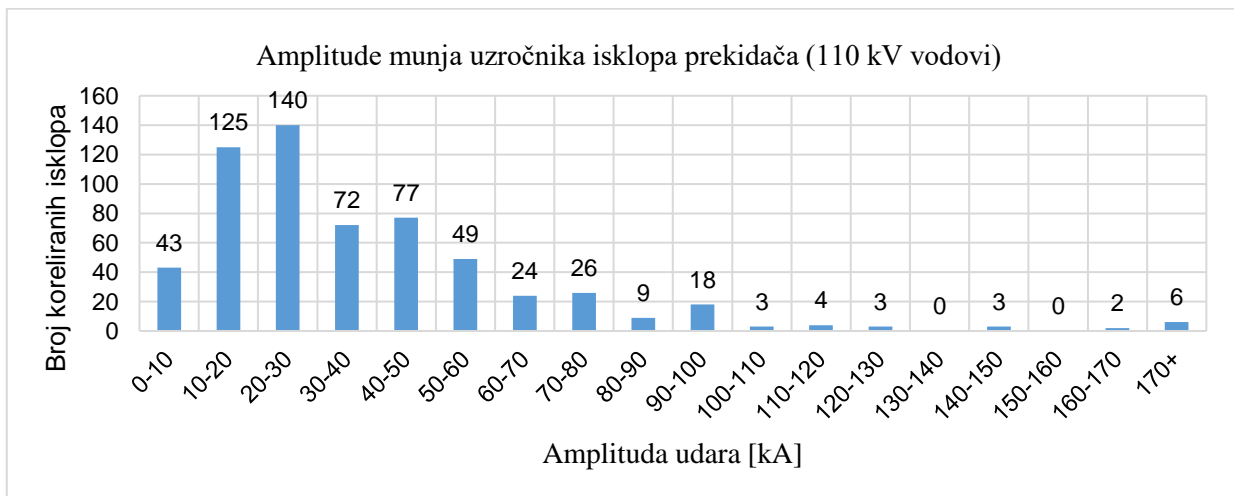
Analizirane struje munja obuhvaćaju apsolutne vrijednosti struja munja (pozitivni i negativni udari munja). U 2018. godini ukupno je zabilježeno 688 isklopa prekidača uzrokovanih udarima munja. Ukoliko se gleda korelacija isklopa prekidača sa udarima munja na 400 kV, 220 kV i 110 kV vodovima možemo reći da je u 2018. godini ukupan broj koreliranih iskolpa bio 6 (400 kV DV), 78 (220 kV DV), 604 (110 kV DV) isklopa. Amplitude munja, broj koreliranih isklopa uzrokovanih munjama za naponske razine 400 kV, 220 kV i 110 kV prikazane su slikama 6, 7 i 8.



Sl. 6.: Amplitude udara uzročnika isklopa prekidača na 400 kV vodovima (Izvor [7])



Sl. 7.: Amplitude udara uzročnika isklopa prekidača na 220 kV vodovima (Izvor [7])

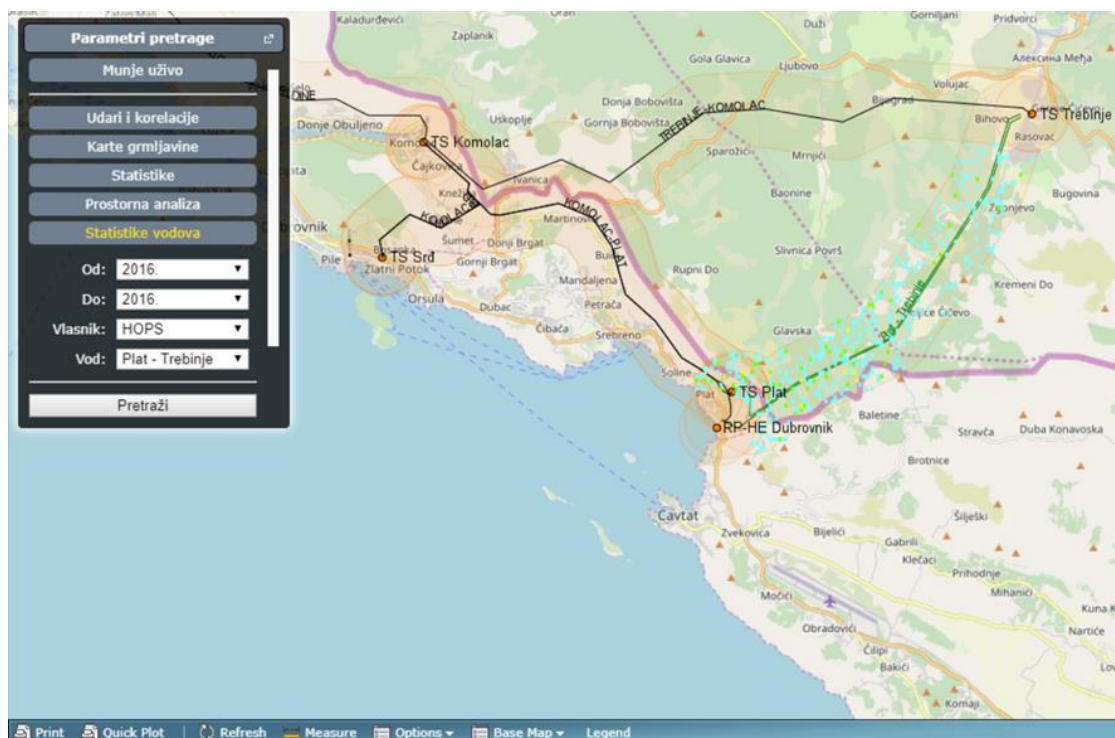


Sl. 8.: Amplitude udara uzročnika isklopa prekidača na 110 kV vodovima (Izvor [7])

#### 4. ANALIZA ZAŠTITE PRIJENOSNOG VODA SA JEDNIM I DVA ZAŠTITNA UŽETA

Usporedbu statistike događaja uzrokovanih udarima munja izvršiti ćemo za dva prijenosna voda nazivnog napona 110 kV i prijenosnog voda naponskog nazivnog napona 220 kV koji su približno iste duljine i koji se nalaze na prostoru s približno istim brojem grmljavinskih dana u godini. Lokacija analiziranih prijenosnih vodova prikazan je na slici 9.

Naponsku razinu 110 kV predstavljaju DV 110 kV Plat-Komolac duljine 11,7 km i DV 110 kV Komolac-Trebinje duljine 17,5 km, dok naponsku razinu 220 kV predstavljaju DV 220 kV Plat-Trebinje, DV 220 kV Dubrovnik-Trebinje 1 i DV 220 kV Dubrovnik-Trebinje 2 (do 2016. godine). Svi događaji analizirani su u periodu od 2011. do 2018. godine.



Sl. 9.: Lokacija analiziranih 220 kV I 110 kV prijenosnih vodova (Izvor HOPS d.o.o.)

Na temelju statistike broja udara munja u DV ili njegovu utjecajnu okolicu jasno se može vidjeti da je u periodu od 2013. do 2018. godine znatno više udara munje u okolini 110 kV prijenosnih vodova DV 110 kV Plat-Komolac i DV 110 kV Komolac-Trebinje (Tablica 1 i Tablica 2) nego u okolini 220 kV prijenosnih vodova, dok je u periodu od 2011. do 2013. godine znatno više udara munje u okolini 220 kV prijenosnih vodova DV 220 kV Dubrovnik-Trebinje 1 i DV 220 kV Dubrovnik-Trebinje 2 (Tablica 2). Na temelju podataka o broju udara munja u 2018. godini jasno se može zaključiti da je 2018. godina bila godina s izuzetno puno grmljavinskih dana u odnosu na ostale godine, a naročito na 2011. godinu kada je broj grmljavinskih dana bio do deset puta manji.

Tablica 1.: Broj udara munja u periodu od 2015. do 2018. godine (Izvor HOPS d.o.o.)

Naziv	Napon (kV)	Duljina (km)	Površina (km <sup>2</sup> )	Broj udara 2018.	Broj udara 2017.	Broj udara 2016.	Broj udara 2015.
Plat-Komolac*	110	11,7	26,2	1550	410	564	531
Komolac-Trebinje	110	17,5	38,0	<b>1969</b>	<b>479</b>	<b>888</b>	<b>573</b>
Plat-Trebinje	220	12,4	27,1	1148	263	531	-
Dubrovnik-Trebinje 1	220	12,0	27,0	-	-	-	454
Dubrovnik-Trebinje 2	220	11,9	26,9	-	-	-	469

\* podatci do 2016. godine se odnose na HE Dubrovnik-Plat-Komolac (12,3 km, 27,1 km<sup>2</sup>)

Tablica 2.: Broj udara munja u periodu od 2011. do 2014. godine (Izvor HOPS d.o.o.)

Naziv	Napon (kV)	Duljina (km)	Površina (km <sup>2</sup> )	Broj udara 2014.	Broj udara 2013.	Broj udara 2012.	Broj udara 2011.
Plat-Komolac*	110	11,7	26,2	<b>1657</b>	<b>726</b>	452	174
Komolac-Trebinje	110	17,5	38,0	1745	531	600	179
Plat-Trebinje	220	12,4	27,1	-	-	-	-
Dubrovnik-Trebinje 1	220	12,0	27,0	1594	406	<b>643</b>	<b>337</b>
Dubrovnik-Trebinje 2	220	11,9	26,9	1614	392	<b>643</b>	<b>340</b>

\* podatci do 2016. godine se odnose na HE Dubrovnik-Plat-Komolac (12,3 km, 27,1 km<sup>2</sup>)

Broj koreliranih isklopa promatranih prijenosnih vodova prikazan u Tablici 3 i Tablici 4 jasno pokazuje da je da je ukupni broj isklopa DV uzrokovanih udarima munja i periodu od 2011. do 2018. značajno viši kod promatranih 110 kV prijenosnih vodova DV 110 kV Plat-Komolac i DV 110 kV Komolac-Trebinje nego kod 220 kV prijenosnih vodova. Naročito jasno vidi se 2018. godine u kojoj je bilo ukupno 8 koreliranih isklopa DV 110 kV Plat-Komolac i jedan koreliranih isklop DV 220 kV Plat-Trebinje.

Uzrok znatno većeg broja koreliranih isklopa uzrokovanih udarima munja kod 110 kV prijenosnih vodova od 220 kV prijenosnih vodova je osim u konstrukciji i u broju zaštitnih vodiča. Promatrani 110 kV prijenosni vodovi imaju samo jedno zaštitno uže, dok 220 kV prijenosni vodovi imaju dva zaštitna užeta.

Tablica 3.: Broj koreliranih isklopa DV uzrokovanih udarima munja u periodu od 2015. do 2018. godine (Izvor HOPS d.o.o.)

Naziv	Napon (kV)	Duljina (km)	Površina (km <sup>2</sup> )	Broj koreliranih isklopa 2018.	Broj koreliranih isklopa 2017.	Broj koreliranih isklopa 2016.	Broj koreliranih isklopa 2015.
Plat-Komolac*	110	11,7	26,2	8	2	0	4
Komolac-Trebinje	110	17,5	38,0	<b>21</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
Plat-Trebinje	220	12,4	27,1	1	1	0	-
Dubrovnik-Trebinje 1	220	12,0	27,0	-	-	-	0
Dubrovnik-Trebinje 2	220	11,9	26,9	-	-	-	0

\* podatci do 2016. godine se odnose na HE Dubrovnik-Plat-Komolac (12,3 km, 27,1 km<sup>2</sup>)

Tablica 4.: Broj koreliranih isklopa DV uzrokovanih udarima munja u periodu od 2011. do 2014. godine

(Izvor HOPS d.o.o.) Naziv	Napon (kV)	Duljina (km)	Površina (km <sup>2</sup> )	Broj koreliranih isklopa 2014.	Broj koreliranih isklopa 2013.	Broj koreliranih isklopa 2012.	Broj koreliranih isklopa 2011.
Plat-Komolac*	110	11,7	26,2	2	17	-	-
Komolac-Trebinje	110	17,5	38,0	<b>12</b>	<b>8</b>	-	-
Plat-Trebinje	220	12,4	27,1	-	-	-	-
Dubrovnik-Trebinje 1	220	12,0	27,0	0	0	-	-
Dubrovnik-Trebinje 2	220	11,9	26,9	0	0	-	-

\* podatci do 2016. godine se odnose na HE Dubrovnik-Plat-Komolac (12,3 km, 27,1 km<sup>2</sup>)

## ZAKLJUČAK

Prilikom planiranja trase izgradnje prijenosnih vodova svih naponskih razina i prilikom njihovog projektiranja izrazito je bitno uzeti u obzir parametre kao što su gustoća udara munje na planiranoj trasi, specifični otpor tla te karakteristike planiranih stupova iz razloga jer navedeni parametri predstavljaju



osnovu za izbor nivoa izolacije, tipa uzemljenja i broj zaštitnih užeta na prijenosnom vodu. Navedene parametre (gustoća udara groma) možemo saznati iz Sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja koji isporučuje podatke o atmosferskim pražnjenjima u Hrvatskoj od početka 2009. godine. Krajem 2012. godine sustav je implementiran u funkcije vođenja prijenosnog elektroenergetskog sustava te od tada provodi korelaciju između isklopa prekidača u mreži s atmosferskim pražnjenjima.

U okviru rada analizirana je zaštita prijenosnih vodova od atmosferskih pražnjenja temeljem njihove konstrukcije i broja zaštitnih vodiča na vodovima. Ukratko je opisan sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja (SLAP) instaliran u HOPS-u kao i korelacija podataka iz sustava SLAP i SCADA od 2013. do 2018. godine. SLAP korelator promatra sve registrirane isklope prekidača na prijenosnim vodovima te identificira isklope uzrokovane udarima munja uz mogućnost određivanja mjesta kvara.

Podaci SLAP korelatora statistički su obrađeni na primjeru DV 110 kV Plat-Komolac i DV 110 kV Komolac-Trebinje, DV 220 kV Plat-Trebinje, DV 220 kV Dubrovnik-Trebinje 1 i DV 220 kV Dubrovnik-Trebinje 2 (do 2016. godine) te je uočeno da je znatno manje koreliranih isklopa kod 220 kV DV-a koji imaju dva zaštitna užeta u odnosu na 110 kV DV koji imaju jedno zaštitno uže.

Moramo napomenuti da je u 2018. godini rađena izmjena u SLAP-u koja se odnosi se na poboljšanje algoritma detekcije atmosferskih pražnjenja pri čemu je ostvarena učinkovitija detekcija atmosferskih pražnjenja malih amplituda čija je pojava vrlo velika, stoga je značajno povećan i ukupni broj detektiranih atmosferskih pražnjenja.

## LITERATURA

- [1] I. Pavić: Prijenos električne energije, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod zavisoki napon i energetiku, Zagreb, 2016.
- [2] N. Šišević: Projektiranje i eksploatacija nadzemnih elektroenergetskih vodova u uvjetima jednovremenog djelovanja vjetra i zaleđenja vodiča, Elektrotehnički fakultet, Podgorica
- [3] B. Franc, I. Uglešić, K. Mesić, M. Šturlan, S. Piliškić: Analiza isklopa prekidača uzrokovanih udarima munja u prijenosnoj mreži u 2014. godini, 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2015.
- [4] I. Ivanković, D. Peharda, D. Novosel, K. Žubrinić-Kostović, A. Kekelj: Smart grid substation equipment maintenance management functionality based on control center SCADA data, Journal of Energy, Vol. 67, No. 3, 2018, 30-35, ISSN: 0013-7448
- [5] B. Franc, I. Uglešić, K. Mesić, M. Šturlan, S. Piliškić: Analiza isklopa prekidača uzrokovanih udarima munja u prijenosnoj mreži u 2014. godini, 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2015.
- [6] I. Ivanković, G. Levačić, A. Župan: Monitoring of Lightning Strikes and Evaluation of Energy Inflow on Substation Equipment, IEEEIC, Genova, 2019.
- [7] B. Franc, B. Filipović-Grčić, N. Stipetić, P. Križić: Statistika udara munja u vodove prijenosne mreže RH za 2018. godinu, 2019., II