

**9. savjetovanje HRO CIGRÉ**  
**Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.**

Ivo Uglešić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb  
ivo.uglesic@fer.hr

Viktor Milardić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb  
viktor.milardic@fer.hr

Bojan Franc  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb  
bojan.franc@fer.hr

Božidar Filipović-Grčić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb  
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr

Boško Milešević  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb  
bosko.milesevic@fer.hr

## USPOSTAVA SUSTAVA ZA LOCIRANJE UDARA MUNJA U HRVATSKOJ

### SAŽETAK

U Hrvatskoj je krajem 2008.g. prvi put uspostavljen sustav za lociranje udara munja (eng. Lightning Location System – LLS) kao dio poznatog LINET sustava koji u Europi ima oko 100 senzora. Četiri senzora LINET sustava su instalirana na slijedećim lokacijama: Komolac kod Dubrovnika, Split, Melina kod Rijeke i Žerjavinec kod Zagreba. Registrirani udari munje arhivirani su u bazu, obrađeni i prikazani na karti. Registrirani udari munje ukazuju na dobru točnost lociranja udara munja.

U članku je prikazan način povezivanja podataka o udarima munja s geografskim podacima elektroenergetskog sustava (EES). Pokazane su analize vezane uz praćenje grmljavinskih aktivnosti i korelaciju s objektima EES-a.

Korelacija registriranih udara munje s podacima iz SCADA sustava dati će informaciju o uzroku ispada ili automatskog ponovnog uklopa dalekovoda.

**Ključne riječi:** sustav za lociranje udara munja, LINET, atmosfersko pražnjenje, GIS, prostorna analiza, relejna zaštita, SCADA

## ESTABLISHMENT OF LIGHTNING LOCATION SYSTEM IN CROATIA

### SUMMARY

At the end of 2008, a lightning location system (LLS) has been established for the first time in Croatia as part of a known LINET system which has round 100 sensors over the Europe. Four sensors have been installed on following locations: Komolac near Dubrovnik, Split, Melina near Rijeka and Žerjavinec near Zagreb. Registered lightning strokes have been archived in the system's database and shown on map. Registered data indicate a satisfactory accuracy in determination of lightning location.

The article also shows a way to correlate lightning data with GIS (Geographic Information System) data of transmission lines. Lightning activity tracking and correlation analyses are presented.

Correlation of LLS data, GIS data and data gained from SCADA system can provide useful information regarding the cause of outage or automatic reclose of a transmission line.

**Key words:** lightning locating system, LINET, atmospheric discharge, GIS, spatial analyses, relay protection, SCADA

## 1. UVOD

Praćenje i nadzor atmosferskih pražnjenja u realnom vremenu i prostoru može biti efikasno sredstvo i značajna pomoć u vođenju EES-a. Prilikom revitalizacije centara vođenja u HEP-Operatoru prijenosnog sustava predviđena je primjena LLS-a. U svijetu se takvi sustavi rašireno koriste i neprekidno usavršavaju već više od dvadesetak godina. Velike razvijene zemlje su u potpunosti pokrivene s više različitih LLS-a, a oni se koriste i u nama susjednim zemljama (Italija, Slovenija, Mađarska). Danas se kao imperativ nameće potreba uvođenja takvih sustava u našoj zemlji i njihova primjena u sustavu HEP-a. Prije svega treba izbjeći da Hrvatska na karti Europe bude "siva zona" u praćenju grmljavinske aktivnosti, ako se zna da se danas velika većina zemalja povezuje na ovom zadatku.

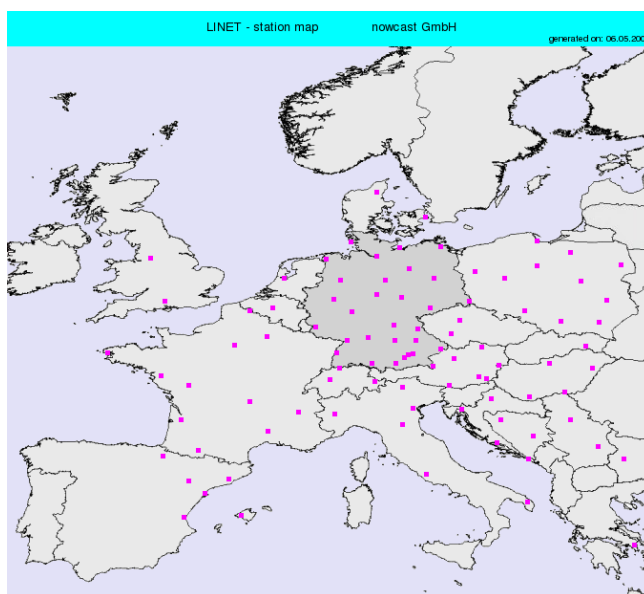
## 2. SUSTAV ZA LOCIRANJE UDARA MUNJA LINET

Europski sustav za lociranje munja (LINET) je razvijen u Njemačkoj, gdje je instalirano 30 senzora, a dodatnih 65 senzora je postavljeno u ostalim europskim državama. Tako je ostvarena pokrivenost sensorima velikog dijela Europe (Slika 1) Ovaj sustav koristi vrlo niski frekvencijski opseg i registrira gustoću magnetskog toka pri atmosferskom pražnjenju pomoću dviju međusobno okomito postavljenih bakrenih prstenova. Preporuča se udaljenost između susjednih senzora ne veća od 200 km.

Godine 2006. sustav LINET je počeo s radom pokrivajući Njemačku i sve ostale susjedne zemlje [2]. Izvještaji LINET sustava daju lokacije udara munja većih i manjih amplituda. Veće amplitude struja obično potječu od udara munja oblak – zemlja (OZ), dok su manje amplitude posljedica pražnjenja među oblacima (OO). Neka svojstva sustava LINET-a su:

Mogućnost detekcije i lociranja ukupnog atmosferskog pražnjenja s jednakom točnošću lociranja mjesta pražnjenja OO i OZ;

- Velika točnost lociranja obje vrste pražnjenja s niskim amplitudama struje;
- Nova 3D tehnika za pouzdano razlučivanje između OO i OZ pražnjenja;
- Izvještaj o nadmorskoj visini OO pražnjenja;
- Postizanje točnosti lokacije do 100 m.

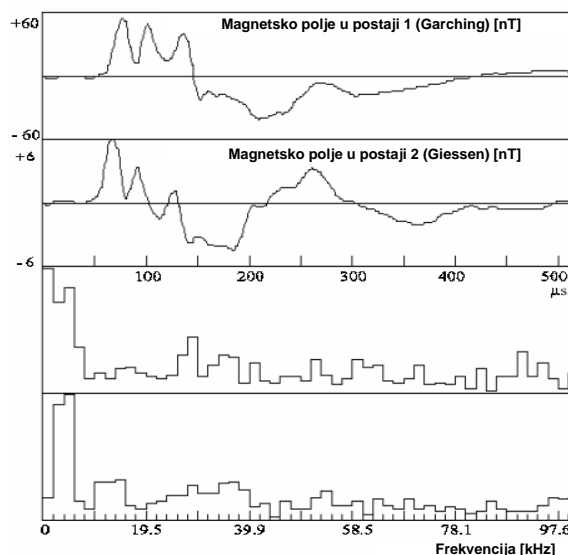


Slika 1. Položaj senzora sustava LINET u Europi

### 2.1. Princip detekcije udara munje

Komponente magnetske indukcije detektiranog signala se mjere pomoću ortogonalne petlje (antene) u realnom vremenu. Pojačana veličina je inducirana struja, a ne napon, i kao rezultat dobivamo vremensku ovisnost magnetske indukcije u rasponu 0,1 – 130 nT [1]. Frekvencijski raspon antene je 1 kHz – 1 MHz.

U propisanim vremenskim intervalima, podaci dobiveni od vanjskih senzora se prenose u glavnu upravljačku stanicu gdje se vrši kombinirana analiza svih signala. Prvi korak je usporedba detekcije istog udara iz dvije različite senzorske postaje. Na Slika 2 se nalazi grafički prikaz ovisnosti jakosti magnetskog polja prvog udara detektiranog signala s dva različita senzora (jedan je udaljen 50 km – postaja 1. Garching, a drugi 400 km – postaja 2. Giessen) i njihova Fourierova transformacija.



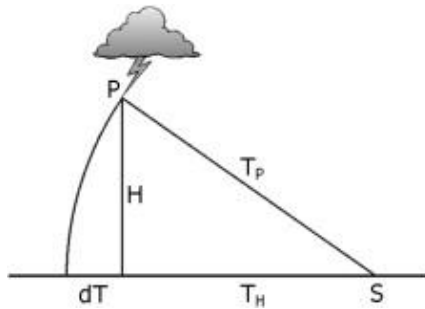
Slika 2. Fourierova transformacija detektiranog signala sa dva različita senzora

Sustav LINET koristi TOA (Time-Of-Arrival) metodu za određivanje lokacije atmosferskog pražnjenja potpomognutu metodom za određivanje pravca (DF, eng. Direction Finding). Primarno se koristi TOA metoda za određivanje lokacije, pri čemu su potrebne najmanje četiri detekcije senzora. Kombiniranjem TOA i DF metode moguće je detektirati pražnjenja pomoću dva ili tri senzora, no u tom slučaju greška određivanja lokacije je povećana [2]. U sustavu LINET važne komponente su optimirane tako da lociraju sva atmosferska pražnjenja, uključujući i ona čije su amplitude manje od 5 kA, pri čemu senzori ne bi smjeli biti predaleko udaljeni [5].

U proteklih 20-ak godina su postavljeni sustavi za lociranje u mnogim zemljama. Za nadgledanje velikih površina prednost imaju vrlo niska (VNF) i nisko-frekvencijska (NF) tehnologija. Ovu tehnologiju koristi i sustav LINET. Ta tehnologija je tradicionalno korištena za detekciju pražnjenja OZ s amplitudama struja iznad 5 kA, dok su se OO pražnjenja detektirala posebnim metodama. Međutim, sustav LINET koristi istu VLF/LF metodu za detekciju OZ i OO pražnjenja [4].

Posebno treba biti uzeto u obzir razlikovanje ova dva načina atmosferskog pražnjenja. Tradicionalno se za tu svrhu koristi impulsni valni oblik (valni oblik razlikovanja), iako je poznato da su takvim postupkom u nekim slučajevima zabilježene netočnosti.

Iz toga je razloga za sustav LINET nedavno razrađen trodimenzionalni (3D) geometrijski algoritam za VNF/NF mreže [3]. Taj se postupak oslanja na poznatoj činjenici da OZ udari emitiraju VNF/NF pražnjenje dominantno u ionizirajućem kanalu blizu razine zemlje, dok OO pražnjenja nastaju u ionizirajućem kanalu među oblacima i visoko iznad razine zemlje. Odgovarajuće razlike u vremenu širenja elektromagnetskih valova (Slika 3) uzrokovanih od visoko i nisko stacioniranih centara pražnjenja su iskorištene za lociranje mjesta pražnjenja. Ta metoda zadovoljavajuće radi, sve dok udaljenost između mjesta udara munje i najbližeg senzora ne prelazi 100 km (odgovara udaljenosti među sensorima oko 200 km); inače razlike u rezultatima ove metode postaju premalene da bi bile primjetne.



Slika 3. Princip detekcije OO pražnjenja – OO i OZ signali s iste 2D lokacije dolaze s vremenskom razlikom  $dT = T_P - T_H$  (P = centar VNF emisije; S = lokacija senzora; H = visina izvora emisije) [2]

Za ovaj sustav su, između ostalog, dva svojstva vrlo važna:

- Senzori u ovom sustavu mjere gustoću magnetskog toka izravno u ovisnosti o vremenu. To svojstvo je korisno za obradu malih signala.
- Svi signali su obrađeni bez obzira na njihov valni oblik; to je moguće zbog toga što je OO-OZ razlučivanje izvršeno pomoću posebno razvijenog 3D algoritma u centralnoj upravljačkoj jedinici, a ne uz pomoć mjerenja valnog oblika u sensorima. Ova 3D tehnika je jako pouzdana, posebice ukoliko je omogućeno da najmanja udaljenost među sensorima ne prelazi 200 do 250 km.

Posebni naponi su učinjeni da bi se postigla visoka točnost lokacije mjesta udara u promatranom području. Danas je postignuto da srednja točnost lokacije iznosi otprilike 100 m.

Izlazni podaci su vrijeme pražnjenja, lokacija pražnjenja, amplituda struje pražnjenja (uključujući i predznak), podjela na OO i OZ pražnjenja, visina za OO pražnjenja i 2D greška pri određivanju lokacije pražnjenja.

## 2.2. Odabir lokacije pri ugradnji senzora

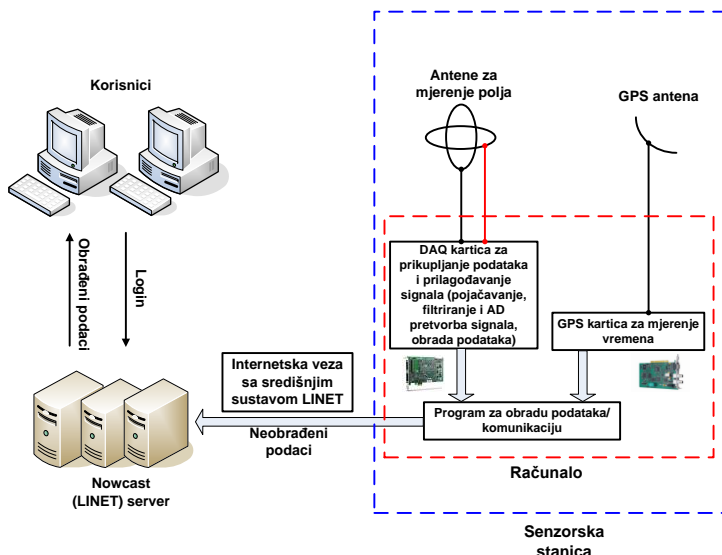
Najprije je potrebno definirati u koje objekte će se instalirati senzori i ostala oprema. Da bi se sustav mogao uspostaviti potrebno je samo da odabrano mjesto ima:

- Niskonaponski priključak za napajanje senzora (za napajanje PC-a na koji je spojena senzorska antena i GPS antena);
- 24-satni spoj na Internet (za komunikaciju senzora i središnjeg računalnog sustava za obradu podataka iz svih senzora);
- Na odabranim lokacijama treba omogućiti neprekidno napajanje senzora (UPS) i pouzdanu internetsku konekciju.

Potrebno je provjeriti i teoretski slučaj o postojanju GPS signala dovoljnog broja satelita na svakoj od lokacija. Na Slika 4 prikazana je antena LINET sustava.



Slika 4. Izgled LINET senzorske antene (ortogonalni prsteni) i GPS antene



Slika 5. Shema toka podataka u sustavu za praćenje atmosferskih pražnjenja LINET

Nakon izbora mjesta, potrebno je provesti preliminarno mjerenje lokalnih smetnji. Točna procedura provjere lokalnih smetnji propisana je za svaki pojedini sustav za praćenje munja. Potrebno je napomenuti da smetnje mogu nastupati povremeno, u dugim vremenskim razmacima, te je stoga mjerenje razine smetnji potrebno provoditi duže vrijeme.

U Hrvatskoj su instalirana četiri senzora na slijedećim lokacijama:

- a) Komolac kod Dubrovnika,
- b) Split,
- c) Melina kod Rijeke i
- d) Žerjavinec kod Zagreba.

Osim navedenih senzora lociranih unutar granica Hrvatske, za detekciju atmosferskih pražnjenja na području Hrvatske koriste i senzori locirani u susjednim zemljama:

- 2 u Bosni i Hercegovini
- 2 u Srbiji
- 5 u Mađarskoj
- 7 u Austriji
- 5 u Italiji

Osim preporučenog razmaka između senzora od 200 km, valja istaknuti da su LINET senzori u stanju registrirati pražnjenja udaljena i do 800 km od položaja senzora. Atmosferska pražnjenja na području Hrvatske u prosjeku detektira 20 ili više senzora. Slika 6 pokazuje senzore najzaslužnije za određivanje lokacija udara na području Hrvatske.



Slika 6. Položaj LINET senzora oko Hrvatske

Podaci koje prikupe LINET senzori šalju se u neobrađenom obliku putem Internetskih veza u Nowcast (LINET) centar. U centru se vrši povezivanje i obrada podataka nakon čega su podaci u formatiranom obliku spremni za isporuku klijentima. Prikaz toka podataka u sustavu za praćenje atmosferskih pražnjenja LINET opisan je na slici 5.

Podaci o atmosferskim pražnjenjima (Tablica ) koji se raspoloživi klijentima su:

- datum i vrijeme pražnjenja
- zemljopisna širina i dužina (GPS koordinate)
- amplituda struje pražnjenja
- tip pražnjenja (OO, OZ)
- visina za pražnjenja tipa OO
- 2D greška u određivanju lokacije pražnjenja

Tablica I. Podaci LINET sustava o atmosferskim pražnjenjima

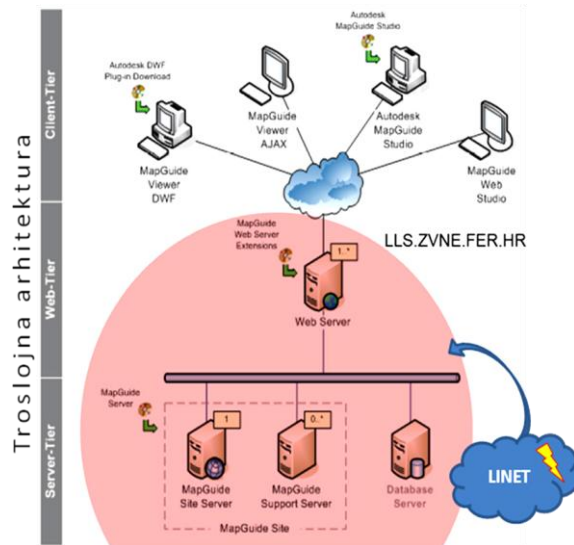
GPS	VRIJEME	TIP	VISINA	STRUJA	GREŠKA
15.8115 45.7404	29.4.2009 18:45:13.0169506	OZ	-	36.1 kA	30 m
15.8932 45.7170	29.4.2009 18:57:05.5952183	OZ	-	-15 kA	40 m
15.8920 45.7036	29.4.2009 19:07:32.7712689	OZ	-	-5.2 kA	50 m
15.8508 45.7407	29.4.2009 18:50:47.1437623	OZ	-	72.2 kA	50 m
15.8502 45.7388	29.4.2009 19:00:03.8719696	OZ	-	8.1 kA	60 m
15.8914 45.7283	29.4.2009 19:00:03.9402258	OZ	-	-2.9 kA	80 m
15.8214 45.7566	29.4.2009 18:50:47.1127271	OO	3600 (m)	-5.5 kA	50 m
15.8963 45.7263	29.4.2009 19:09:53.8456357	OO	4800 (m)	7.4 kA	60 m
15.8647 45.7595	29.4.2009 19:07:01.6730042	OO	4100 (m)	4.7 kA	60 m
15.8117 45.7558	29.4.2009 18:49:09.4577769	OO	5900 (m)	-10.7 kA	80 m

### 3. PROGRAMSKA PODRŠKA

Za učinkovito korištenje podataka prikupljenih sustavom za lokaciju munja potreban je prikladni osnovni i napredni softver. Osnovni softver podrazumijeva vizualizirane i arhivirane podatke prikupljene mjerenjima.

Uz razvoj napredne programske podrške moći će se ostvarivati obrada podataka prema potrebama, kao što je korelacija s radom relejne zaštite ili izrada karata gustoće udara (udar/km<sup>2</sup>god). Na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu razvija se sustav za pohranu podataka o detektiranim atmosferskim pražnjenjima LINET sustava, vizualnu prezentaciju rezultata te obradu izmjerenih podataka. FER-ov sustav za detektiranje atmosferskih pražnjenja (LLS) ima troslojnu arhitekturu [3]. Troslojna arhitektura (Slika 7) sustava sastoji se od:

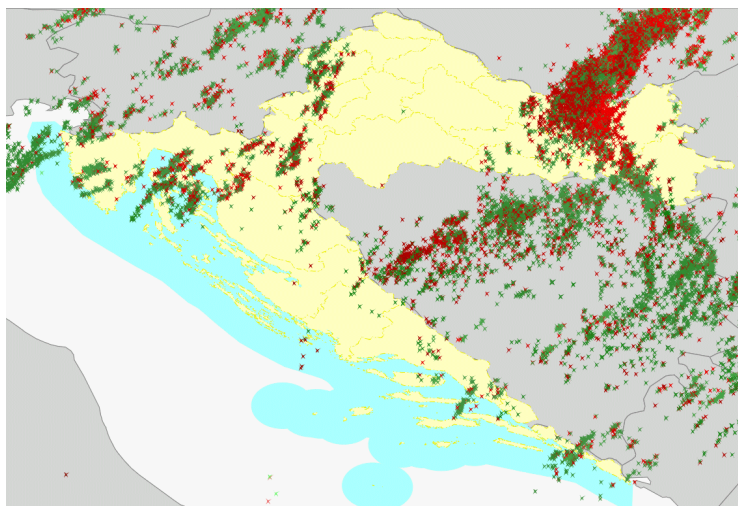
- sloja poslužitelja (poslužitelj baze podataka, MapGuide poslužitelj)
- sloja web-poslužitelja
- sloja klijenata.



Slika 7. Arhitektura LLS sustava razvijanog na FER-u

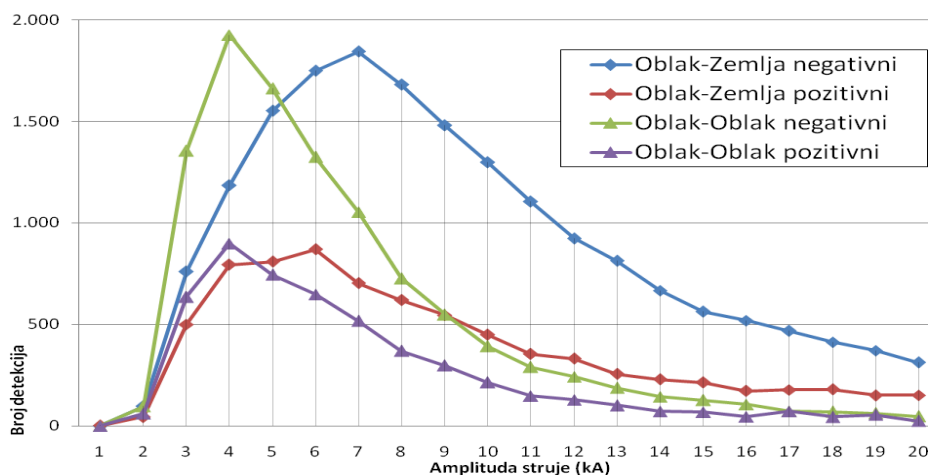
#### 3.1. Arhiviranje izmjerenih podataka

Podaci preuzeti od LINET sustava arhiviraju se u bazu podataka (Oracle). Arhivirani podaci se u bilo kojem trenutku mogu dohvatiti te se nad njima mogu vršiti upiti i analize. U sustavu su arhivirani podaci od 18. siječnja 2009. godine na dalje. Do sada (12. svibnja 2009. godine) je arhivirano ukupno 52491 pražnjenja od kojih je 33893 pražnjenja OZ tipa, 17624 OO tipa, a 974 neodređenog tipa.



Slika 8. Prikaz arhiviranih podataka za dan 1.5.2009. (zeleno-OZ, crveno-OO)

Arhivirani podaci se iz baze podataka kasnije mogu dohvatiti za potrebe vršenja analiza i upita. Slika 9 pokazuje raspodjelu tipova pražnjenja na području Hrvatske po amplitudi struje pražnjenja kroz period 18. siječnja 2009. – 6. svibnja 2009..

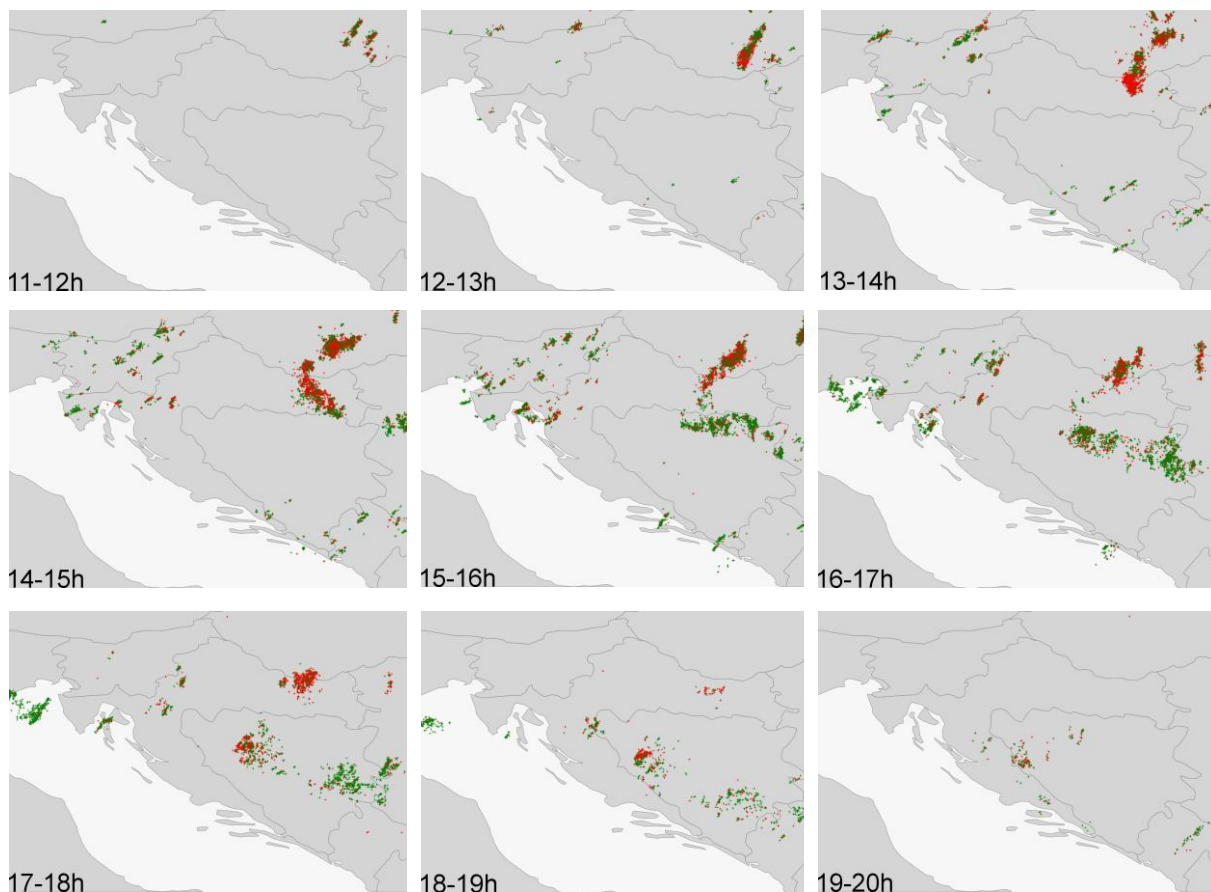


Slika 9. Raspodjela detekcija udara po amplitudi struje za područje Hrvatske

### 3.2. Vizualna prezentacija rezultata mjerenja

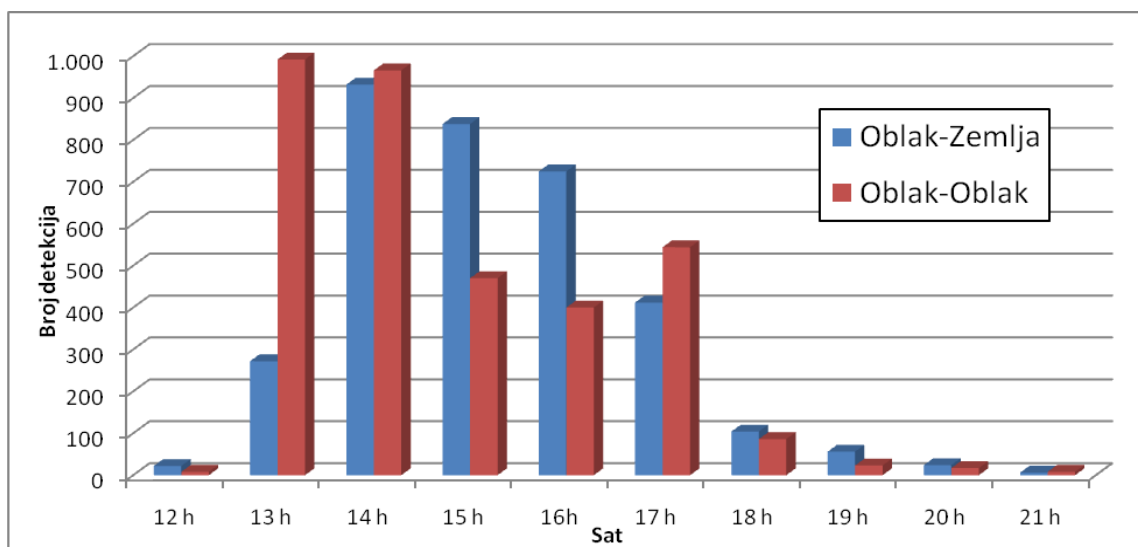
Djelotvoran sustav za lociranje munja treba pokriti šire geografsko područje, kao što je područje jugoistočne Europe u kojem se nalazi Hrvatska. Vizualna prezentacija omogućuje neposredno opažanje nailaska grmljavinskog nevremena, što pomaže u npr. u vođenju elektroenergetskog sustava radi obavljanja adekvatne pripreme. Grmljavine su često lokalnog karaktera, a njihovo se postojanje na nekom području može vidjeti iz jednog centra.





Slika 10. Grmljavinsko nevrijeme na području Hrvatske dana 1.5.2009. (crveno – OO, zeleno – OZ)

Slika 11 pokazuje broj detektiranih pražnjenja u području Hrvatske za promatrano grmljavinsko nevrijeme dana 1. svibnja 2009.

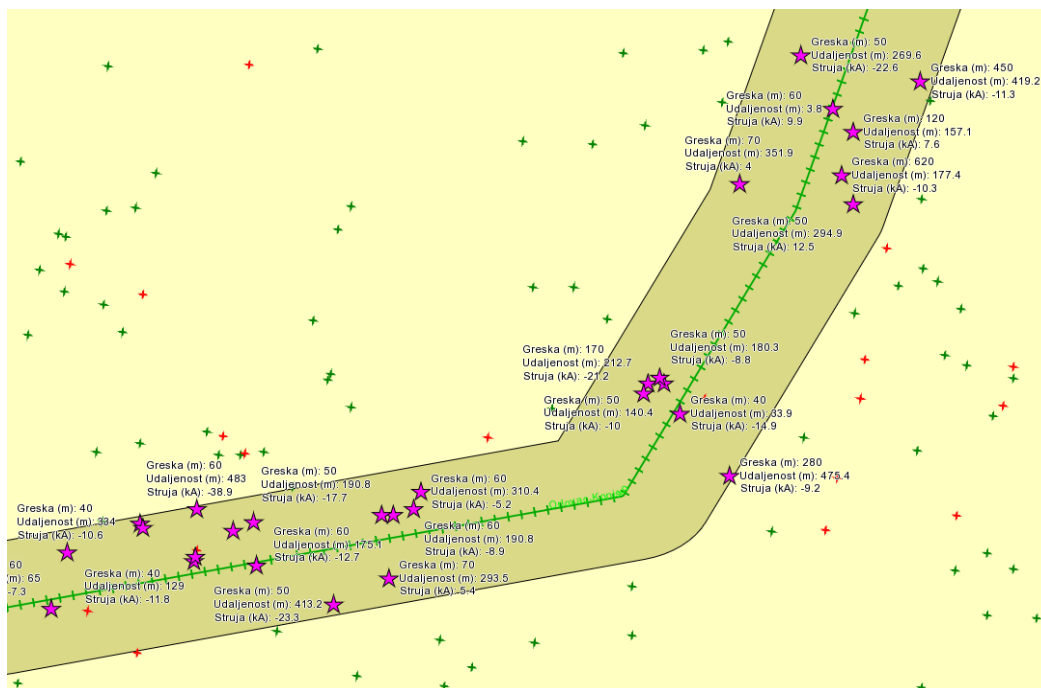


Slika 11. Praćenje grmljavinskog nevremena na području Hrvatske dana 1.5.2009.

### 3.3. Povezivanje s geografskim podacima elektroenergetskog sustava

Geoprostorni podaci prijenosnih vodova i postrojenja povezani su s podacima LLS-a, tj. točnim mjestom i vremenom udara munja. GIS (eng. Geographic Information System) je sustav za donošenje

odluka podržan računalom koji služi za prikupljanje, spremanje, pretraživanje, analiziranje i prikazivanje prostornih podataka. Tako se može trenutno utvrditi korelacija eventualnog kvara i mjesta udara, a mjesto trajnog kvara na dalekovodu može se brzo locirati i uputiti ekipu za održavanje. Na Slika 12 prikazan je primjer detekcije udara munje u zonu oko dalekovoda.



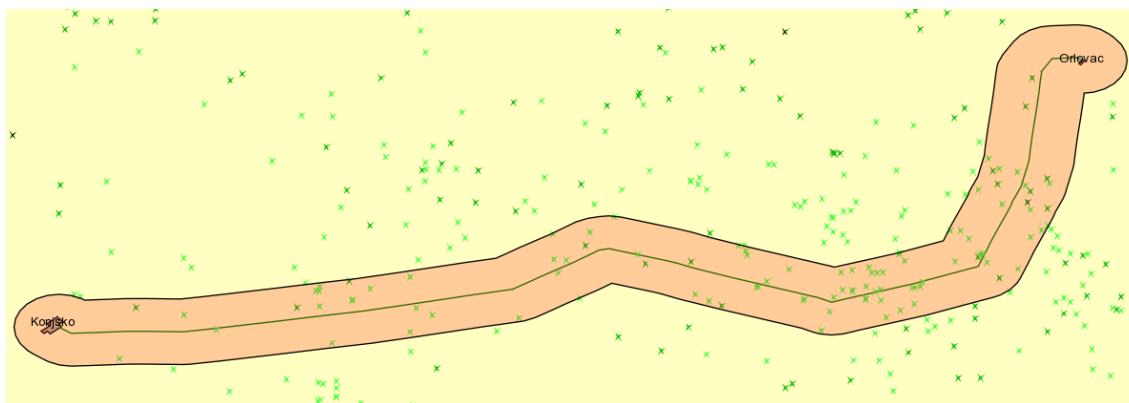
Slika 12. Detekcija udara u zonu oko dalekovoda (na slici polumjer 500 m)

### Obrada izmjerenih podataka

Važna funkcija sustava lociranja munja je izrada karata gustoće udara munje za područja elektroprivrednih objekata. Ovi su podaci korisni inženjerima prilikom odabira načina zaštite vodova i postrojenja od munja. Za svaki vod bi se moglo iz baze podataka o udarima munje, dobiti informaciju o struji munja, njihovom polaritetu, trenutku udara i mjestu kvara. Isto se tako pri izgradnji novih objekata i izboru trasa vodova može uvažiti rizik ispada budućeg voda radi gmljavinskih aktivnosti. Gustoća udara za trasu dalekovoda određuje se prema slijedećem izrazu:

$$N_g = \frac{n}{A \cdot t} \left[ \frac{\text{udara}}{\text{km}^2 / \text{god}} \right] \quad (1)$$

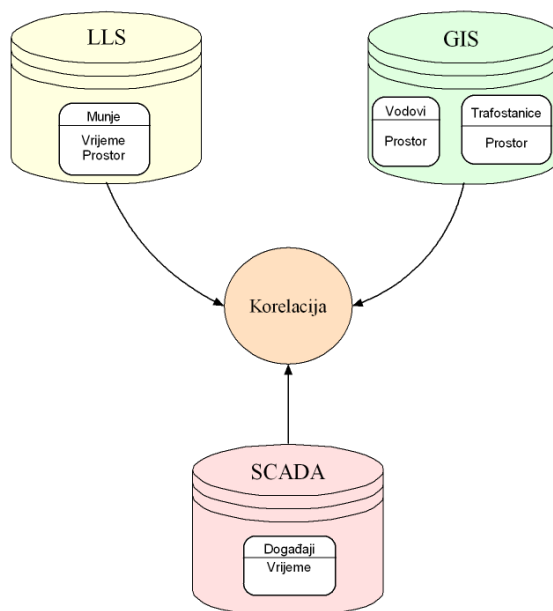
Gdje je: n – broj udara u trasu; A – površina trase; t – vremenski period detekcije.



Slika 13. Detektirani udari u trasi dalekovoda

### 3.4. Povezivanje LLS-a sa sustavom vođenja elektroenergetskog sustava (SCADA)

Sustav za detekciju atmosferskih pražnjenja moguće je povezati sa sustavom vođenja elektroenergetskih objekata (SCADA sustav). Na taj način se u realnom vremenu mogu korelirati podaci o kvarovima u elektroenergetskom sustavu i podaci o atmosferskim pražnjenjima. Korelirani događaji se mogu u vidu karte prikazati korisniku. Na Slika 14 je prikazana shema korelacije.



Slika 14. Shema korelacije LLS-a, GIS-a i SCADA sustava

Podaci sustava za lociranje munja uspoređeni su s podacima o kvarovima u EES-u. U HE-Orlovac je registrirana prorada APU-a u oba sustava na dvostrukom 220 kV dalekovodu Orlovac-Konjsko (DV272/1 i DV272/2) u 16h 27min. Sustav za lociranje munja detektirao je pet udara munja (Tablica 1) u periodu od 16h 26min 0sek do 16h 27min 59sek kao kandidate za uzrok ispada dvostrukog voda. Za točnije određivanje kandidata potrebni su podaci distantne zaštite: GPS sinkronizirano vrijeme i udaljenost mjesta kvara od rasklopnog postrojenja.

Tablica 1 Detektirani udari korelirani s podatkom o ispadu i geometriji dalekovoda Orlovac-Konjsko

GPS lokacija udara	Vrijeme udara	Amplituda struje	Greška lokacije
16.7177 43.6103	4.5.2009 16:26:12.8821294	-25 (kA)	40 m
16.6969 43.6126	4.5.2009 16:26:12.9216174	-14.7 (kA)	40 m
16.7242 43.6112	4.5.2009 16:26:56.8094749	-38.9 (kA)	60 m
16.7205 43.6099	4.5.2009 16:26:56.8322992	-25.5 (kA)	40 m
16.7203 43.6102	4.5.2009 16:26:57.1222884	-9.8 (kA)	60 m

## 4. ZAKLJUČAK

Sustavi za lociranje udara munje se neprestano unapređuju i razvijaju, te su danas snažno oruđe u projektiranju, zaštiti i vođenju elektroenergetskih mreža. Njihova je primjena također i u brojnim drugim tehnološkim sustavima i mrežama raspoređenim na velikim prostranstvima kao što su TK mreže, mreže RTV odašiljača, mreže naftovoda i plinovoda, sustavi osiguranja, vojne instalacije, meteorološki servisi, agencije za zaštitu od šumskih požara itd. U ovom radu je prikazan LLS prikladan za praćenje udara munja za potrebe elektroprivrednih mreža, tj. za potrebe HEP-Operatora prienosnog sustava. Prvi registrirani udari munje su arhivirani u bazu, obrađeni i prikazani na karti Hrvatske. Registrirani udari munje ukazuju na dobru točnost lociranja udara munja. U članku je prikazan i način povezivanja podataka o udarima munje s GIS podacima EES-a te razne analize koje se mogu raditi na taj način. Korelacija

registriranih udara munje s podacima iz SCADA sustava dati će informaciju o uzroku ispada ili automatskog ponovnog uklopa dalekovoda.

## 5. LITERATURA

- [1] Betz H. D., Kulzer R., Gerl A., Eisert B., Oettinger W.P., Jakubassa D.: „On the Correlation between VLF-Atmospherics and Meteorological data”, ICLP Firenze, 1996.
- [2] Hans D. Betz, Kersten Schmidt, Pierre Laroche, Patrice Blanchet, Wolf P. Oettinger, Eric Defer, Z. Dziewit, J. Konarski: „LINET – An international lightning detection network in Europe“, 2007.
- [3] Betz H. D., Schmidt K., Laroche P., Blanchet P., Oettinger W.P., Defer E.: „LINET – A new lightning detection network in Europe”, 13th International Conference on Atmospheric Electricity, August 13-18, 2007., Beijing, China.
- [4] Betz H. D., Oettinger W.P., Schmidt P., Wirz M.: „Modern Lightning Detection and Implementation of a New Network in Germany, Europe”, European Geosciences Union 2005, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 00685,2005.
- [5] Betz H. D., Schmidt K., Fuchs B., Oettinger W.P., Hoeller H.: „Cloud Lightning: Detection and Utilization for Total Lightning Measured in the VLF/LF Regime“, Journal of Lightning Research, August 2007.