

Kristina Mileta, mag.ing.el.  
HELB d.o.o.  
[kristina.mileta@helb.hr](mailto:kristina.mileta@helb.hr)

Dr.sc. Goran Jurišić  
GRID One  
[Goran.juriscic@gridone.hr](mailto:Goran.juriscic@gridone.hr)

Terezija Matijašević, mag.ing.el.  
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu  
[Terezija.matijasevic@fer.hr](mailto:Terezija.matijasevic@fer.hr)

Tomislav Geceg, mag. ing. comp., DSM  
HELB d.o.o.  
[Tomislav.geceg@helb.hr](mailto:Tomislav.geceg@helb.hr)

## DINGO – DISTRIBUTION GRID OPTIMIZATION PILOT PROJEKT U SKLOPU IRI II KK.01.2.1.02

### SAŽETAK

U članku su opisani rezultati razvojno-istraživačkog projekta sufinanciranog iz Europskog fonda za regionalni razvoj pod nazivom Sustav za optimizaciju gubitaka u naprednim mrežama. U projekt su uključene pilot lokacije u DP-u Elektrodalmacija Split i DP Vinkovci gdje su postavljeni mjerno-nadzorni uređaji na ukupno 21 transformatorskoj stanici. Obradeni su i integrirani geoprostorni podaci, kao i pseudonimizirani podaci s obračunskih mjernih mjesta. Koristeći spomenuta mjerenja razvijeni su krovni algoritmi: detekcija fazne pripadnosti kod korisnika, optimizacija redoslijeda faza na transformatorskim stanicama, lokalizacija tehničkih gubitaka, detekcija netehničkih gubitaka i predikcija gubitaka „dan unaprijed“.

Razvijeno je softversko rješenje DINGO za praćenje mjerenja i rezultata algoritama kroz nekoliko različitih alata za preglede. Moguće je pratiti mjerenja s transformatorskih stanica u gotovo stvarnom vremenu, grafički pregledavati povijesna mjerenja ili pratiti gubitke i rezultate proračuna tokova snaga na geografskim podlogama.

**Ključne riječi:** gubici, digitalizacija sekundarne distribucije, mjerenja, strojno učenje, detekcija faza, predikcija, geoinformacijski sustav

## DINGO – DISTRIBUTION GRID OPTIMIZATION PILOT PROJECT WITHIN IRI II KK.01.2.1.02

### SUMMARY

The paper describes the results of the research and development project co-financed by the EU Fund for regional development named Loss optimization system in advanced networks. Pilot locations include distribution area Elektrodalmacija Split and distribution area Vinkovci. There, measuring-monitoring devices are built into 21 transformer stations. Geospatial data has been processed and integrated as well as pseudomised data from metering points. The following main algorithms have been developed using said measurements: end-user phase detection, optimization of transformer phase loads, technical loss localization, non-technical loss detection, and day-ahead losses prediction.

The DINGO software solution which uses several different overview tools has been developed for tracking measurements and algorithm results. It is possible to track transformer station measurements in near-real time, see historical data in graph view, or track losses and power flow calculations on geographic background.

**Key words:** losses, digitalization of secondary distribution, metering, machine learning, phase detection, predictions, geoinformation system

## 1. UVOD

Sustav za optimizaciju gubitaka u naprednim mrežama projekt je započeo 1. kolovoza 2020. koji vodi tvrtka HELB u partnerstvu s HEP-ODS, Sedam IT i Fakultetom elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Projekt je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj putem poziva „Povećanje razvoja novih proizvoda i usluga koji proizlaze iz aktivnosti istraživanja i razvoja - faza II“. Projekt pod kodom KK.01.2.1.02 završava 1. kolovoza 2023. Razvijeni proizvod dobio je ime DINGO – Distribution Grid Optimization.

Cilj projekta je razviti sustav za nadzor sekundarne distribucije. Koristeći široki set algoritama, uključujući one strojnog učenja, obogaćuju se mjerni podaci te ih se povezuje sa pseudostatičnim informacijama o mreži. Osim tehničkih parametara elemenata mreže, koriste se geografske informacije. Softversko rješenje bazirano je na kompleksnoj arhitekturi za istovremeno provođenje različitih obrada velikih količina podataka. Odabrani relevantni rezultati svih procesa prikazuju se na intuitivnom sučelju modernog dizajna prilagođenog krajnjem korisniku čije su glavne funkcionalnosti povijesni pregled mjerenja i odabranih rezultata, prikaz trenutnih mjerenja na transformatorskoj stanici te geografska vizualizacija odabranih rezultata.

U sklopu projekta 21 transformatorska stanica opremljena je mjerno-nadzornim uređajima koji u gotovo stvarnom vremenu (eng. *near-real time*) dostavljaju mjerenja struje, napona, radne i prividne snage po niskonaponskim odvodima. Jedna od opremljenih stanica, 1TS508 Cerić 4 u Distribucijskom području Vinkovci odabrana je za potpunu implementaciju u Sustav. Preostalih 20 stanica je djelomično integrirano u Sustav, provedene su analize opreme, mjerenih podataka, komunikacijskih mogućnosti te geografskih podloga.

## 2. MJERNA OPREMA

DINGO se u iznimno velikoj mjeri oslanja na mjernu opremu. U sklopu projekta postavljeni su mjerno-nadzorni uređaji u transformatorske stanice. Uz njih, tamo gdje su ugrađena koriste se i mjerenja sa sumarnih brojila u transformatorskim stanicama, a neophodna su i mjerenja kod krajnjih korisnika. Obračunska mjerna mjesta krajnjih korisnika moraju biti opremljena naprednim digitalnim brojlilima električne energije

### 2.1. Mjerno-nadzorni uređaji

Cilj razvoja mjerno-nadzornog uređaja je prikupljanje informacija o transformatorskim stanicama neophodnim za primjenu različitih algoritama i dostavljanje istih u najkraćem razumnom vremenu. Osnovne pretpostavke za razvoj mjerno-nadzornih uređaja temeljile su se na analizi stanja transformatorskih stanica (TS) u Hrvatskoj, kao i na minimalnim tehničkim zahtjevima za uspostavu Sustava.

Minimalni tehnički zahtjevi potrebni za daljnje korištenje mjerenja u algoritmima su mjerenja faznih napona, struja, radnih i prividnih snaga po pojedinim odvodima.

Prva polazišna točka analize stanja odnosila se na očekivani broj odvoda. Analizom pilot lokacije i na temelju stručnog iskustva projektnog tima zaključeno je da većina transformatorskih stanica 10(20)/0,4 kV ima između 3 i 15 niskonaponskih odvoda. Provedbom ekonomske analize tržišta donesena je odluka o tipskom rješenju za mjerenje do 15 trofaznih odvoda.

S obzirom da mjerno-nadzorni uređaj mora biti primjenjiv na svim tipovima transformatorskih stanica, uključujući stupne, projektant se odlučio za ormar za vanjsku primjenu minimalnih dimenzija.

Idući je korak bio rješavanje problematike širokog spektra karakteristika odvoda – od nisko i povremeno opterećenih odvoda javne rasvjete ili seoske ulice do visoko i kontinuirano opterećenog odvoda gradske ulice ili odvoda trosmjenskog poduzetništva. Odvodi su na kraju grupirani u tri kategorije te im je na temelju dostupnih informacija iz jednopolnih shema transformatorskih stanica o presjecima kabela dodijeljen strujni mjerni transformator pripadajuće nazivne struje. Mjerno-nadzorni uređaj mora imati mogućnost parametriranja/konfiguracije kako bi ispravno mjerio opterećenja različitih odvoda.

U obzir je uzet i socijalni aspekt potencijalne masovne primjene ovakvog uređaja. Kako bi se minimizirala vjerojatnost potrebe za prekidom napajanja kod krajnjih korisnika, pristupilo se korištenju strujnih mjernih transformatora otvorene jezgre.

Osim elektroenergetskih uvjeta, pažnja je posvećena i komunikacijskoj problematici. Mjerne podatke potrebno je bežično prenijeti u oblak (eng. *cloud*). Na većini TS nije implementirana adekvatna komunikacijska oprema pa je potrebno da mjerno-nadzorni uređaj bude opremljen svojim usmjerivačem i SIM karticom koja će mu omogućiti prijenos podataka. Dodatna relevantna informacija jest i da tipični ormar za vanjsku primjenu u koju se smješta mjerno-nadzorni uređaj predstavlja Faradayev kavez pa je neophodno koristiti:

- 1) Vanjsku antenu ili
- 2) Usmjerivač za vanjsku primjenu sa sigurnosnim funkcijama.

Kako bi mjerno-nadzorni uređaj mogao ispuniti svoju funkciju, minimalni zahtjev za transformatorsku stanicu jest pokrivenost minimalno GPRS signalom ili naprednijim (3G, 4G, LTE, 5G). Primjenu mjerno-nadzornog uređaja u podzemnim stanicama potrebno je ispitati, no očekuje se da bi uz prikladno pozicioniranje komunikacijske antene u većini slučajeva slanje podataka bilo uspješno.

Glavne karakteristike mjerno-nadzornih uređaja su:

- Mjerenje struja (I [A]), napona (U [V]), radnih (P [W]) i prividnih (S [VA]) snaga
- Polu-izravno mjerenje do 15 trofaznih odvoda
- Strujni mjerni transformatori otvorene jezgre
- Klasa točnosti 0.5 mjernog uređaja i pripadajućih mjernih transformatora
- Mogućnost slanja mjernih podataka u gotovo stvarnom vremenu na hardversku infrastrukturu (servere) treće strane
- Usmjerivač (eng. *router*) s mogućnostima
  - Vanjske upotrebe
  - Uspostave sigurne komunikacijske veze (VPN)

## 2.2. Sumarna brojila

Na samom početku, odnosno pri prijavi projekta, sumarna brojila nisu bila dovoljno rasprostranjena pa se razvojni projekt nije oslanjao na njihovu upotrebu. U međuvremenu su razvojnom timu na raspolaganje stavljena i mjerenja sa sumarnih brojila. U sklopu projekta provedena je analiza tipske konfiguracije sumarnih brojila. Analiza je rezultirala prijedlogom seta registara (**Tablica I**) koji uključuje:

- (projektnom timu poznate) HEP-u neophodne registre za poslovne procese
- registre koji su neophodni u slučaju primjene sumarnog brojila za potrebe DINGO sustava te
- registre za koje se očekuje da bi ih akademska zajednica koristila u istraživanjima naprednih mreža, odnosno one koje bi se u budućnosti koristilo u naprednim sustavima (označeni „poželjno“).

Sumarna brojila, kao i svaka oprema, imaju svoja tehničko-ekonomska ograničenja. Prijedlog je uzimao u obzir ograničenja primijenjena na trenutno ugrađenim sumarnim brojilima, konkretno broj registara koji se trenutno šalje.

Za potrebe DINGO Sustava, bitno je napomenuti da se dio funkcionalnosti vezanih za praćenje u gotovo stvarnom vremenu ne može ostvariti sa sumarnim brojilima radi tehnološko-ekonomskih ograničenja centralnog sustava za prihvatanje podataka. Također, dio funkcionalnosti sustava vezan za informacije o pojedinim odvodima neće biti dostupan u slučaju korištenja podataka samo iz sumarnih brojila. Međutim, dio funkcionalnosti vezan za odvođe moguće je uspostaviti koristeći sumarna brojila.

Tablica I Prijedlog registara sumarnih brojila za buduću upotrebu

Registar	Neophodan HEP-Mjerenje	Neophodan za napredne algoritme
REG: A-_T0	+	+
REG: A-_T1	+	+
REG: A-_T2	+	+
REG: A+_T0	+	+

REG: A+_T1	+	+
REG: A+_T2	+	+
REG: P-_T0	+	+
REG: P-_T1	+	+
REG: P-_T2	+	+
REG: P+_T0	+	+
REG: P+_T1	+	+
REG: P+_T2	+	+
REG: R1_T0	+	+
REG: R2_T0	+	+
REG: R3_T0	+	+
REG: R4_T0	+	+
LP: U1		+
LP: U2		+
LP: U3		+
LP: I1		+
LP: I2		+
LP: I3		+
LP: In		+
LP: U_THD_relativni		poželjno
LP: Frekvencija		poželjno
Active energy combined ( +A - A ) L1		+
Active energy combined ( +A - A ) L2		+
Active energy combined ( +A - A ) L3		+
Apparent energy import (+VA) L1		+
Apparent energy import (+VA) L2		+
Apparent energy import (+VA) L3		+
Apparent energy export (-VA) L1		+
Apparent energy export (-VA) L2		+
Apparent energy export (-VA) L3		+
Instantaneous voltage L1 THD		poželjno
Instantaneous voltage L2 THD		poželjno
Instantaneous voltage L3 THD		poželjno
Angle U(L2) - U(L1)		poželjno
Angle U(L3) - U(L1)		poželjno
Angle U(L3) - U(L2)		poželjno

### 2.3. Usporedba

Razvoj mjerno-nadzornih uređaja bio je neophodan za minimiziranje rizika projekta. Uspoređujući 2 rješenja za mjerenje veličina u transformatorskim stanicama, mjerno-nadzorne uređaje i sumarna brojila, jasno je da oba imaju svoje prednosti.

Sumarna brojila uključena su u dugoročne investicijske planove HEP-ODS-a te je logično koristiti ih gdje su dostupna, a gdje ne postoje indicacije o potrebi dubljih mjerenja. S druge strane, mjerno-nadzorni uređaji projektirani su s mišlju ispunjenja svih ciljeva razvojnog projekta pa omogućuju širi set funkcionalnosti DINGO Sustava, odnosno podlogu za neke od naprednih algoritama.

Zaključak projektnog tima je da buduće razvojne aktivnosti trebaju biti fokusirane na optimizaciju primjene sumarnih brojila u sklopu Sustava, što nije bio dio projektnog opsega. Također, primjena mjerno-nadzornog uređaja preporučena je na lokacijama na kojima se i prije integracije stanice u Sustav sumnja na značajne gubitke, a neophodna na stanicama koje nisu opremljene sumarnim brojlilima. Pri odluci treba uzeti u obzir i set željenih funkcionalnosti jer su one ovisne o izvoru podataka.

### 2.4. Obračunska mjerna mjesta

Mjerenja s obračunskih mjernih mjesta (OMM) neophodna su za funkcioniranje DINGO-a. Mjerenja moraju biti s naprednih brojila i uključivati specifičirani set registara. Klasično konfigurirana napredna brojila čija je jedina svrha prikupljanje informacije o potrošnji ne zadovoljavaju minimalne zahtjeve sustava.

Projektni tim razvijao je nekoliko različitih algoritama koji bi nadomjestili nedostatak dijela podataka, no do zaključenja ovog referata nisu evidentirani rezultati svih istraživačkih pravaca na tu temu. Istraživački naponi usmjereni su na nadomještanje nedostajućih registara (varijabli) te na nedostajuće vremenske trenutke, odnosno rupe u podacima. Trenutna verzija DINGO Sustava zahtjeva visoku razinu potpunosti podataka, ali u mogućnosti je upravljati manjim rupama u podacima. Također, ne-napredna brojila imaju relativno mali utjecaj na rezultate algoritama, ali isključivo ako se radi o brojilima na kojima praktično nema potrošnje, npr. napuštena kućanstva. Što se seta registara tiče, za DINGO je neophodno da su napredna brojila konfigurirana da prikupljaju, uz obračunska mjerenja, fazne struje i napone (Tablica II).

Tablica II Registri neophodni za DINGO

Registar
LP: A+_T0
LP: A-_T0
LP: I1
LP: I2
LP: I3
LP: U1
LP: U2
LP: U3

AMR (eng. *automated meter reading*) sustav HEP-ODS-a u pravilu prikuplja podatke o potrošnji u 15-minutnoj rezoluciji, dok se podaci o struji i naponu prikupljaju na 10-minutnoj rezoluciji. Imajući to na umu, algoritmi koji koriste sve registre sinkroniziraju se na polusatne vremenske točke. Gdje je moguće koriste se 10-, odnosno 15-minutna mjerenja radi veće kvalitete.

U sklopu projekta prikupljaju se mjerni podaci sa svih naprednih brojila koja se nalaze u mrežama transformatorskih stanica uključenih u projekt. Kako bi bilo moguće osigurati povjerljivost podataka krajnjih korisnika te istovremeno omogućiti povezivanje podataka u pozadini aplikacije, podaci pojedinih brojila su pseudonimizirani. DINGO je koncipiran na način da su podaci koji bi omogućili identifikaciju krajnjih korisnika razdvojeni u različite dijelove sustava te im je nemoguće pristupiti bez ključa.

Obrada podataka s OMM-a čini velik dio istraživanja na projektu. Mjerne podatke potrebno je prikupljati na dnevnoj bazi te dodatno dopunjavati rupe u podacima na mjesečnoj razini. Podaci se preuzimaju putem API-a (eng. *application programming interface*) na AMR sustavima.

Rezultati algoritama izravno su ovisni o kvaliteti OMM podataka. Na primjer, jedan od razvijenih algoritama je predikcija gubitaka na transformatorskoj stanici „dan unaprijed“. Algoritam je baziran na strojnom učenju i trenira se na jednogodišnjem setu podataka. Kako bi se algoritam mogao primjenjivati u svakodnevnoj upotrebi s visokom razinom točnosti, potrebni su mjerni podaci svih krajnjih korisnika od prethodnog dana sa stanice za koju se pokreće algoritam.

Kako bi se mjerni podaci mogli koristiti u algoritmima, napravljena je dubinska analiza samih mjerenja. Minimalno na pilot lokaciji postavljena je visoka razina očekivanja o kvaliteti podataka. U svrhu znanstvenog napretka potrebno je postići uvjete što bliže idealnima kako bi se pri praktičnoj primjeni mogla prepoznavati odstupanja. U praktičnoj primjeni će upravo analiza odstupanja dovesti do brze detekcije gubitaka. Međutim, postizanje laboratorijskih uvjeta na realnoj pilot lokaciji pokazalo se kao značajan izazov. Više od 2 godine bilo je potrebno da se postigne potreban minimum. Napor cijelog projektnog tima ipak je rezultirao kvalitetnim podlogama koje su u kratkom roku dale više nego zadovoljavajuće rezultate algoritama.

### 3. GEOPROSTORNI PODACI

Geoprostorni (GIS) podaci su, kao i prethodno opisana mjerenja, nezaobilazni element Sustava. Za razliku od mjerenja, koja je potrebno prihvaćati i obrađivati kontinuirano po dolasku informacija u Sustav, geoprostorni podaci pripadaju pseudostatičnom setu informacija, uz jednopolne sheme transformatorskih stanica. Inicijalno se prihvate u DINGO, obrade i pohrane te se izmjene očekuju iznimno.

Geoprostorni podaci se na ulazu u DINGO očekuju u .geojson formatu. Očekuje se sedam .geojson datoteka:

- oznakaStanice\_Izvod
- oznakaStanice\_NNdionica
- oznakaStanice\_NNkblava

- oznakaStanice\_NNormaric
- oznakaStanice\_NNspojnica
- oznakaStanice\_Prikljucak
- oznakaStanice\_TS.

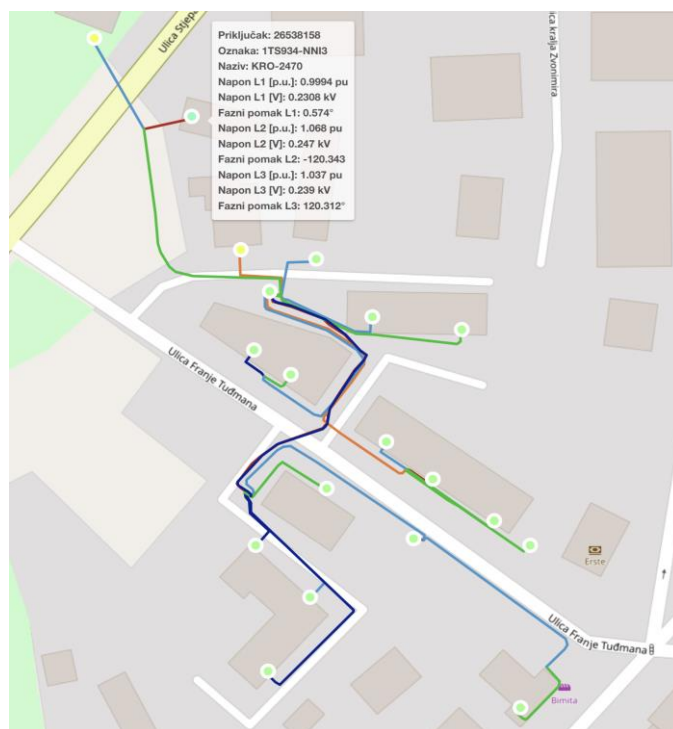
Svaka datoteka sadrži sve elemente tog tipa koji se nalaze na transformatorskoj stanici. Svaki element („feature“ u samoj datoteci) sadrži informaciju o geometrijskim karakteristikama. Osim dionica, svi elementi su tipa točka („Point“) pa uz tu informaciju sadrže i jedan par koordinata u geometrijskim karakteristikama. Dionica je tipa "MultiLineString" i sadrži sve parove koordinata točaka kroz koje dionica prolazi, odnosno na kojima se lomi.

Osim geometrijskih, svaki element ima i popis ostalih karakteristika, kao što su „Broj faza“ kod Priključka, „Izvod naziv“ koji se pojavljuje kod različitih elemenata kao logička poveznica između njih te tehnički parametri kabela (Tip, XD, RD, XN, RN...).

Pri analizi izvornih datoteka zaključeno je da se učestalo pojavljuje nedostatak nekog parametra, posebice kod parametara kabela. Za nadomještanje takve informacije napravljen je lokalni katalog tipova kabela i pripadajućih parametara te algoritam koji određenom elementu tipa dionica pridjeljuje potrebne informacije. Ujedno je prepoznato da postoje redundancije točkastih elemenata, NN dionice bez poznatog krajnjeg čvorišta, nepovezanost linijskih i točkastih elemenata te dionice koje su prikazane u kontinuitetu. Dok za neke primjene geoprostornih podataka ovakvi podaci ne predstavljaju problem, za primjenu u DINGO sustavu razvijen je opsežan algoritam čišćenja .geojson datoteka.

Drugi smjer razvoja vezan na geoprostorne podatke usmjeren je na povezivanje elemenata Priključak s pripadajućim obračunskim mjernim mjestima. Ovaj proces omogućuje pridruživanje potrošnje i lokacije na kojoj se troši, odnosno njime se objedinjuju podaci o tehničkim elementima voda i potrošnji na njemu.

Obradom GIS podataka stvara se logička poveznica između potrošača i distribucijske mreže te se modelira mreža u apstraktan format pogodan za proračune tokova snaga. Osim na ulazu, GIS podaci pogodan su alat i na izlazu iz Sustava – vizualizacija rezultata. Koristeći geografske podloge i informacije o koordinatama elemenata mreže, DINGO objedinjuje iste s mjerenjima i/ili rezultatima algoritama te ih prikazuje na karti. Ovakva se vizualizacija najlakše može usporediti s prikazom gustoće prometa na kartama. Ekvivalentno, u Sustavu se koristi kodiranje bojama kako bi se na intuitivan način prikazali dijelovi mreže s većim (crveno) ili manjim (plavo) opterećenjem ili gubicima (**Slika 1**).



Slika 1 Geografska vizualizacija rezultata proračuna tokova snaga na stanici 1TS934 Solin 13

## 4. KROVNI ALGORITMI

U sklopu projekta planiran je razvitak algoritama za detekciju, lokalizaciju, estimaciju i predikciju gubitaka. U projekt je, međutim, unesena kriva pretpostavka o poznavanju fazne pripadnosti krajnjih korisnika. Podaci pohranjeni u informatičkom sustavu partnera ne odgovaraju stvarnom stanju na terenu. Prepoznavanje ovog izazova predstavljalo je rizik za uspješnu implementaciju ne samo DINGO aplikacije, već i bilo koje druge analize niskonaponske distribucijske mreže. Imajući na umu prelazak na napredne mreže i distribuiranu proizvodnju, projektni tim je prepoznao hitnost ovakve problematike. Iz tog je razloga projekt proširen kako bi uključio i istraživanje i razvoj algoritma za detekciju fazne pripadnosti krajnjih korisnika. Uz to, zanimljivim se pokazao i razvoj algoritma za optimizaciju redoslijeda faza na transformatorskim stanicama.

### 4.1. Detekcija fazne pripadnosti kod korisnika

Kako bi se u DINGO-u, ali i bilo kojem drugom sustavu, mogli raditi proračuni tokova snaga na niskonaponskoj mreži sa stvarnim mjerenjima, neophodno je poznavati faznu pripadnost krajnjih korisnika. Pri priključenju ili zamjeni brojila informacija na koju fazu sekundara energetskog transformatora je priključena koja fazna oznaka (priključna stezaljka) na brojilu u praksi se ne pohranjuje sustavno. Na primjer, neovisno na koju se fazu NN distribucijske mreže u stvarnosti priključi jednofazni korisnik, u brojilu će gotovo uvijek biti zapisano da je priključen na prvu fazu.

Nepoznavanje ove informacije moguće je riješiti korištenjem Ariadna IF3 ili sličnog uređaja. Uređaj radi na principu da se na NN stranu transformatorske stanice priključi centralni dio uređaja obračunajući pažnju da oznake faza na transformatoru odgovaraju oznakama na uređaju. Zatim se s mobilnim dijelom uređaja obilaze krajnji korisnici na stanicama, uređaj se priključuje na svaki fazni spoj (priključnu stezaljku) na pojedinom brojilu te se na sučelju javlja informacija o stvarnoj pripadnosti. Ovim se uređajem osim fazne pripadnosti može detektirati i pripadnost odvodu transformatora.

Pripadnost odvodu transformatora može se detektirati i selektivnim kratkotrajnim isključivanjem odvoda. Međutim, većina stanica sadrži osigurače pruge koji onemogućuju isklapanje po fazi te se ovom tehnikom ne može detektirati faznost krajnjih korisnika.

Korištenje prethodno opisanog uređaja za detekciju faza dugotrajan je posao iz perspektive prikupljanja ili provjere informacije za široko područje ili cijelu Hrvatsku, iznimno je podložan ljudskoj grešci te detekciju nije moguće provesti ukoliko brojilo nije na dostupnom mjestu, a krajnji korisnik nije kod kuće.

U svrhu masovne primjene i automatizacije u DINGO sustavu razvijen je algoritam za detekciju fazne pripadnosti. Algoritam se bazira na strojnom učenju, konkretno algoritmu za klasteriranje podataka. Popularna metoda za klasteriranje podataka jest metoda K-sredina (eng. *K-Means*). Ova metoda nije izravno primjenjiva na zadanu problematiku, već je potrebna modifikacija metode. Inicijalna modifikacija metode prezentirana je u radu [1]. U razvoj se krenulo s tom modifikacijom, međutim ona nije pokazala zadovoljavajuće rezultate za primjenu u detekciji faza. U radu [2] detaljno je opisan istraživački proces na DINGO projektu kojim je razvijen algoritam za detekciju faza. Algoritam je nekoliko puta dodatno modificiran u dijelu upravljanja centroidima. Algoritam je na sintetičkoj mreži različitih veličina i s vremenskim serijama različitih duljina pokazao 100% uspjeh u ispravnoj detekciji faza.

U konačnoj verziji algoritma implementiranog u DINGO koriste se mjerenja faznih napona kod krajnjih korisnika te mjerenja faznih napona na transformatorskoj stanici. Priprema se vremenska serija podataka očišćena od ekstremnih i nevažjećih vrijednosti. Fazni naponi na transformatorskoj stanici definiraju se kao inicijalni centroidi te se za mjerenja svakog pojedinog faznog napona svakog pojedinog krajnjeg korisnika određuje udaljenost od svakog centroida. Na temelju najmanje udaljenosti određeno se mjerenje pridružuje klasteru pripadajućeg napona. Postupak je iterativan do postizanja optimalnog rezultata.

U sklopu projekta algoritam je primijenjen na stvarnoj mreži 1TS508 Cerić 4 u Distribucijskom području Vinkovci. Kako bi se rezultati mogli verificirati korišten je gore opisani uređaj Ariadna IF3. Izlaskom na teren utvrdilo se ispravno fazno stanje za 75% korisnika na stanicama. S obzirom na modifikacije u algoritmu, za njegov ispravan rad nisu potrebne informacije o svim korisnicima na odabranoj mreži. Algoritam je na stvarnoj nesavršenoj mreži dao rezultate s 98.08% točnosti.

### 4.2. Optimizacija redoslijeda faza na transformatorskim stanicama

Ova metoda bazirana je na mjerenjima s mjerno-nadzornog uređaja. Kako bi se mogao primijeniti, potrebna su mjerenja faznih opterećenja svih NN odvoda. Za optimizaciju cjelogodišnje

potrošnje na stanici, potrebna su minimalno devetomjesečna, a idealno jednogodišnja mjerenja kako bi se pokrila sezonalna izmjena ponašanja krajnjih korisnika.

Cilj algoritma je predložiti optimalan redoslijed faza pojedinih odvoda na NN strani transformatorske stanice, a u svrhu smanjenja gubitaka u bakru transformatora koji su ovisni o kvadratu faznih struja.

S obzirom da se potencijalna optimizacija odvija rotacijom faznih vodiča unutar pojedinog odvoda unutar transformatorske stanice, ovakva izmjena nema utjecaja na smanjenje tehničkih gubitaka u niskonaponskoj mreži radi nesimetrije. S druge strane, očekivao bi se pozitivan utjecaj ovakvog zahvata na SN mrežu, međutim verifikacija ove pretpostavke izvan je opsega DINGO projekta.

Metoda je detaljnije opisana u referatu „Optimizacija faznih opterećenja transformatora u svrhu smanjenja gubitaka“ koji je također prijavljen na ovo Savjetovanje.

#### 4.3. Detekcija, klasifikacija i lokalizacija gubitaka

Upravljanje gubicima osnovna je funkcija DINGO-a. Trenutno najčešće primijenjena analiza gubitaka funkcionira na principu sumiranja potrošnje krajnjih korisnika i usporedbe sa sumarnim mjerenjem na transformatorskoj stanici. Ovo je osnova za sve daljnje analize.

DINGO funkcionira na principu produbljenja ove analize koristeći u prethodnim poglavljima opisane ulazne podatke (mjerenja na TS, mjerenja proširenog seta registara kod krajnjih korisnika, geoprostorni podaci). Koristi se *pandapower*, alat otvorenog koda (eng. *open source*) koji je specijaliziran za modeliranje, analizu i optimizaciju elektroenergetskih mreža s mogućnošću visoke razine automatizacije. Primjenom ovog alata, vrši se proračun tokova snaga niskonaponske mreže. Rezultati proračuna su:

- Naponi, radne i jalove snage na svim točkastim elementima mreže po fazi
- Struje na svim linijskim elementima po fazi
- Tehnički gubici na svim linijskim elementima po fazi

za svaki vremenski trenutak u proračunu (polusatni vremenski koraci). Sumiranje podataka o tehničkim gubicima daje informaciju o tehničkim gubicima u mreži promatrane transformatorske stanice.

Klasifikaciju gubitaka na tehničke i netehničke postizemo primjenom jednostavnih formula. Za svaki pojedini trenutak možemo odrediti netehničke gubitke na razini transformatorske stanice koristeći formulu (1). Za širu primjenu ovih rezultata, logično je primijeniti i vremensku komponentu pa sumiranjem rezultata i u vremenu dolazi do izračuna tehničkih i netehničkih gubitaka na transformatorskoj stanici u odabranom periodu (2).

$$\sum P_{neteh} = PTS - \sum P_{consumer} - \sum P_{teh} \quad (1)$$

$$\sum E_{neteh} = ETS - \sum E_{consumer} - \sum E_{teh} \quad (2)$$

Ukoliko se na TS koristi mjerno-nadzorni uređaj umjesto sumarnog brojila, izračun je moguće provesti na razini odvoda umjesto cijele stanice. To znači da za pojedini odvod imamo izračun koliki su tehnički, a koliki netehnički gubici čime se postiže značajan napredak u sagledavanju informacija o gubicima u niskonaponskoj mreži.

Ovim se postupkom tehnički gubici lokaliziraju do razine segmenta odvoda, a netehnički i ukupni gubici do razine odvoda.

#### 4.4. Predikcija gubitaka dan unaprijed

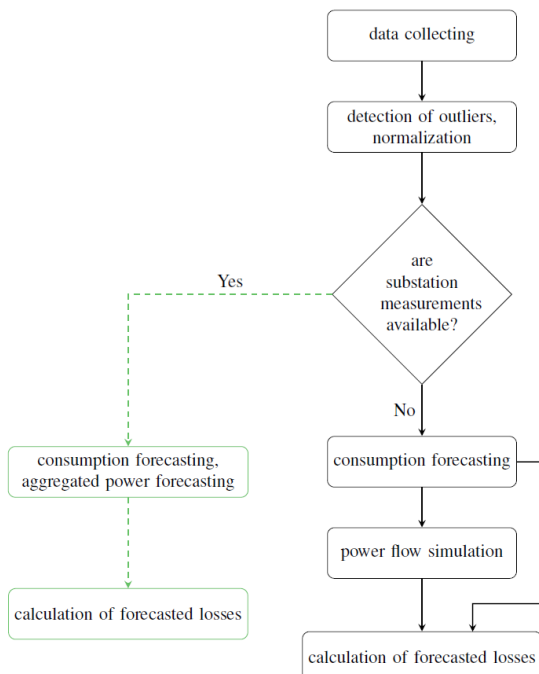
Algoritmi za predikciju gubitaka oslanjaju se na dostupnost i kvalitetu ulaznih podataka, pretprocesiranje podataka prije primjene u algoritmima te na kvalitetu rezultata prethodno primijenjenih algoritama.

Prve faze razvojnog procesa predviđanja gubitaka opisane su u [3]. Objašnjavaju se karakteristike dvaju različita pristupa ovisno o ulaznom setu informacija. Oba modela pretpostavljaju dostupnost mjerenja s obračunskih mjernih mjesta. Pritom prvi koristi geoprostorne podatke, a drugi mjerenja s transformatorske stanice.

Ukoliko su dostupni GIS podaci, moguće je napraviti proračun tokova snaga. Na ulazu proračuna predviđene su potrošnje krajnjih korisnika, a na izlazu je predviđanje opterećenja na transformatorskoj stanici. Oduzimanjem sumiranog iznosa predviđene potrošnje kod krajnjih korisnika od predviđenog opterećenja na transformatorskoj stanici dobiva se predviđeni iznos gubitaka. Ova metoda rezultira predviđanjem tehničkih gubitaka na transformatorskoj stanici.



Druga metoda zasniva se na primjeni algoritma strojnog učenja za predviđanje potrošnje kod krajnjih korisnika i na mjerenjima s TS. Razvoj je pokazao da je algoritam primjenjiv na oba seta podataka uz minimalne izmjene. Mjerenja u TS u sebi sadrže ukupno opterećenje, što uključuje potrošnju krajnjih korisnika, tehničke i netehničke gubitke. Isto kao u prethodnoj metodi, oduzimanjem sumiranog iznosa predviđene potrošnje kod krajnjih korisnika od predviđenog opterećenja na transformatorskoj stanici dobiva se predviđeni iznos gubitaka. Ova metoda, za razliku od prethodne, rezultira predviđanjem ukupnih gubitaka na transformatorskoj stanici.



Slika 2 Dijagram toka za algoritam predviđanja gubitaka na transformatorskoj stanici dan unaprijed

Temeljeći odluku na pretpostavci da su predviđanja gubitaka relevantna operatoru distribucijskog sustava u svrhu nabave istih na tržištu, u DINGO se integrira druga metoda jer je izlazna informacija potpuna umjesto djelomična.

U trenutku pisanja ovog rada razvijaju se novi algoritmi i optimiziraju postojeći kako bi se povećala točnost predikcija i dodatno smanjila ovisnost o odstupanju ponašanja krajnjih korisnika od njihovih uobičajenih obrazaca.

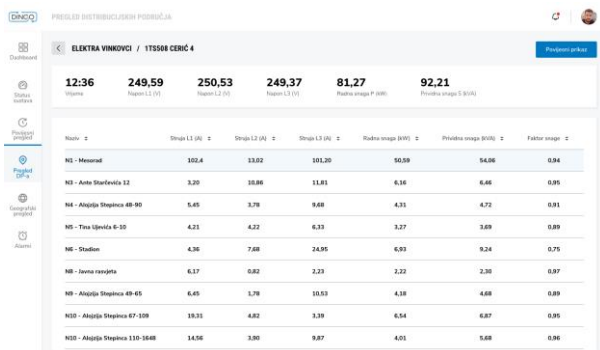
Modeli se treniraju na povijesnim podacima, a primjenjuju koristeći mjerenja prethodnog dana kako bi se predvidjeli gubici sljedećeg dana, odnosno „dan unaprijed“.

## 5. DINGO – VIZUALIZACIJSKI ALATI

DINGO se temelji na širokom setu ulaznih podataka, opsežnom pretprocesiranju istih, krovnim algoritmima (koji uključuju i strojno učenje) te kompleksnom softverskom rješenju za upravljanje Sustavom. Krajnjem korisniku DINGO aplikacije za njezino korištenje potrebno je na jednostavan i intuitivan način prezentirati rezultate. S tim ciljem razvijeno je suvremeno grafičko sučelje s nekoliko različitih tipova pregleda podataka.

Prvi tip pregleda je klasični tablični prikaz koji je u industriji u širokoj upotrebi. On se primjenjuje na popisu distribucijskih područja (DP) s osnovnim informacijama, popisu transformatorskih stanica unutar DP-a te u prikazu trenutnih mjerenja s mjerno-nadzornog uređaja (**Slika 3**).

Drugi tip pregleda je povijesni pregled podataka koji omogućuje pregled krivulja. S obzirom da promjene u vremenu imaju veliki značaj u energetici, pogotovo u energetskej tranziciji, ovaj pregled daje jednostavan vizualni alat za praćenje trendova mjerenja, gubitaka ili predviđanja (**Slika 4**).



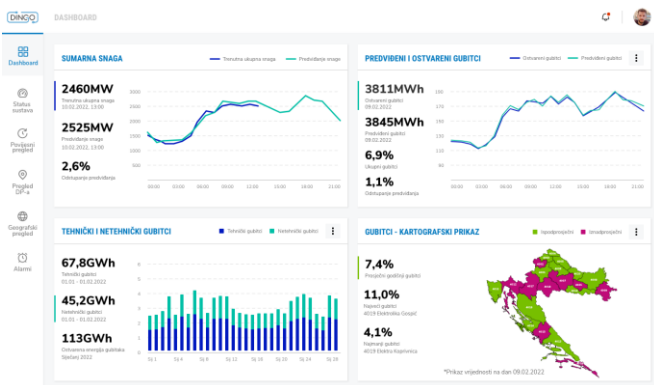
Slika 3 Tablični prikaz trenutnog mjerenja na TS



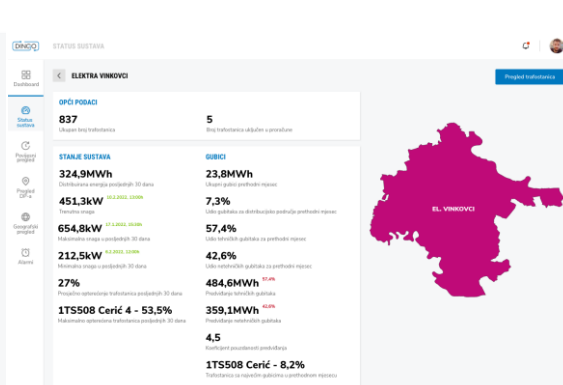
Slika 4 Povijesni prikaz opterećenja na TS

Prethodno je spomenut i geografski pregled podataka. Koristeći karte mogu se prikazati različite dubine mreže. Na „višim“ razinama prikazuju se podaci o transformatorskim stanicama, na primjer općeniti podaci ili ukupni iznos gubitaka, dok je na dubinskom pregledu moguće vidjeti stanje na pojedinim elementima niskonaponske mreže (Slika 1).

Ostali prikazi uključuju kontrolno sučelje (eng. dashboard) ili statuse sustava sa sažetim podacima o sustavu ili DP-u.



Slika 5 DINGO Kontrolno sučelje



Slika 6 Status distribucijskog područja

Potrebno je napomenuti da vrijednosti na prikazanim slikama nisu prikaz stvarnih vrijednosti, niti mjerenih niti izračunatih.

## 6. ZAKLJUČAK

Projekt je inicijalno osmišljen kao razvoj softvera za predviđanje gubitaka na transformatorskim stanicama, što je uspješno i razvijeno. S obzirom na trenutno primijenjene procedure nabave gubitaka, upitno je ima li ta funkcionalnost izravnu praktičnu primjenu u ovom trenutku. Međutim, predikcije se već sada mogu koristiti kao pomoćni alat. Daljnji razvoj algoritama za predikcije može biti usmjeren na skaliranje rezultata na srednjenaponsku mrežu ili optimizaciju algoritma za primjenu u mrežama s visokim udjelom distribuirane proizvodnje, skladištima energije, električnim vozilima i upravljivim potrošačima.

Uz osnovni cilj, projekt je ostvario značajan napredak u vidu automatizacije upravljanja kompleksnim sustavom informacija. Predstavljani su optimalni setovi registara za sumarna i obračunska brojlila, razvijena je skripta za automatizaciju prilagodbe GIS podataka za primjenu u proračunima tokova snaga i uspješno su integrirani svi vanjski podaci. Buduća istraživanja mogla bi biti usmjerena na povećanje točnosti različitih pridruživanja kako bi se nadomjestila problematika nejednoznanih poveznica između različitih sustava podataka.

Razvijen je mjerno-nadzorni uređaj koji se uz manje preinake može koristiti za širi set potreba od onih u DINGO sustavu.

Vjerojatno najznačajniji rezultat istraživanja u sklopu projekta spoznaja je da faznost krajnjih korisnika nije poznata te je proširivanjem opsega projekta postignut razvoj algoritma za detekciju fazne pripadnosti kod korisnika s točnošću iznad 98%. Ovaj je algoritam otporan na ljudsku grešku i problematiku nedostupnosti brojila kada se informacija o faznosti prikuplja terenskim izlaskom.

Razvijen je i algoritam za optimizaciju redoslijeda faza na transformatorskim stanicama čiji je rezultat informacija o optimalnom redoslijedu i iznosu uštede na gubicima. Daljnje istraživanje moglo bi biti usmjereno na mjerenje na srednjem naponu kako bi se mogao analizirati utjecaj optimizacije na gubitke u sredjenaponskoj mreži.

U DINGO je integriran automatizirani proračun tokova snaga za vremenske serije i proračun gubitaka u niskonaponskoj mreži. Daljnji razvoj mogao bi biti usmjeren na dubinsku klasifikaciju netehničkih gubitaka po tipu izvora ili proračun tokova snaga na zahtjev.

Kompleksnost DINGO sustava, primjena u realnoj mreži i jednostavan izgled vizualizacije za prikaz složenih rezultata algoritama dijelom temeljenih na strojnom učenju velika su postignuća istraživačko-razvojnog projekta opisanog u ovom radu. Rezultati projekta ukazuju na potrebu nastavka istraživačko razvojnih aktivnosti, nužnost daljnjeg razvoja umrežavanja različitih informatičkih sustava operatora te smislenost upotrebe rješenja poput DINGO sustava.

## 5. LITERATURA

- [1] Z. S. Hosseini, A. Khodaei, and A. Paaso, "Machine learning enabled distribution network phase identification," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 2, pp. 842–850, 2020.
- [2] T. Matijašević, T. Antić and T. Capuder, "Voltage-based Machine Learning Algorithm for Distribution of End-users Consumption Among the Phases," 2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), Opatija, Croatia, 2022, pp. 974-979, doi: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803565.
- [3] T. Matijašević, T. Antić and T. Capuder, "Machine learning-based forecast of secondary distribution network losses calculated from the smart meters data," 2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Split / Bol, Croatia, 2022, pp. 1-6, doi: 10.23919/SpliTech55088.2022.9854276.