

DOI: [10.46793/CIGRE37.B2.04](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B2.04)**B2.04****DIGITALIZACIJA VISOKONAPONSKIH NADZEMNIH VODOVA****DIGITAL TWINS FOR HIGH-VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES****Branko Đorđević, Mirko Borović, Vladimir M. Ilić, Nikola Šćekić, Aleksandar Radeta,
Marko Đorđević, Zoran Petrović, Valerijan Aksić***

Kratak sadržaj: Digitalizacija visokonaponskih nadzemnih vodova predstavlja virtuelni model elektroenergetske infrastrukture koji omogućava kontinuirano praćenje, analizu i optimizaciju rada prenosne mreže. Ovaj koncept zasnovan je na integraciji stvarnih podataka sa terena, korišćenjem simulacije i primenu analitičkih alata, sa ciljem poboljšavanja efikasnost održavanja, planiranja i upravljanja prenosnom mrežom. Virtuelni model omogućava precizno praćenje stanja infrastrukture, prediktivno održavanje korišćenjem Business intelligence (BI) alata koristeći simulacije za optimizaciju rada mreže, a sa ciljem bržeg donošenja odluka. Za izradu virtuelnih modela jedna od tehnologija za prikupljanje podataka je aero snimanje, koje omogućava preciznu inspekciju, mapiranje i analizu infrastrukture iz vazduha. Ova metoda koristi različite senzorske tehnologije i platforme, uključujući dronove, helikoptere i satelite, kako bi obezbedila detaljne podatke o stanju visokonaponskih nadzemnih vodova i njihovog okruženja. Količina podataka koja se prikupi inspekcijom na gore opisan način je velika i zahteva primenu softvera koji će korisniku obezbediti mehanizme da na brz način iste obradi i da na osnovu istih donosi odluke. U radu je opisan proces prikupljanja i obrade podataka i implementacije softverskog alata koji ima za cilj da transformiše način na koji kompanija EMS AD obavlja inspekciju i održavanje visokonaponskih nadzemnih vodova, omogućavajući proaktivno otkrivanje i rešavanje problema, smanjenje troškova održavanja, povećanje bezbednosti i pouzdanosti rada energetskog sistema.

Ključne reči: digitalizacija, virtuelni model, aero snimanje, Business intelligence (BI) alati, visokonaponski nadzemni vodovi, održavanje

Abstract: The digital twin for high-voltage overhead transmission lines represents a virtual model of the power infrastructure, enabling continuous monitoring, analysis, and optimization of the transmission network's operation.

* Branko Đorđević, EMS AD, branko.djordjevic@ems.rs

Mirko Borović, EMS AD, mirko.borovic@ems.rs

Vladimir M. Ilić, EMS AD, vladimir.m.ilic@ems.rs

Nikola Šćekić, EMS AD, nikola.scekic@ems.rs

Aleksandar Radeta, EMS AD, aleksandar.radeta@ems.rs

Marko Đorđević, EMS AD, marko.djordjevic@ems.rs

Zoran Petrović, EMS AD, zoran.petrovic@ems.rs

Valerijan Aksić, EMS AD, valerijan.aksic@ems.rs

This concept is based on the integration of real field data, the use of simulations, and the application of analytical tools to improve the efficiency of maintenance, planning, and network management. The virtual model allows precise monitoring of infrastructure conditions, predictive maintenance using Business Intelligence (BI) tools, and simulations for network optimization, all with the goal of faster decision-making. One of the technologies used for data collection in the creation of a virtual model is aerial imaging, which enables precise inspection, mapping, and analysis of infrastructure from the air. This method utilizes various sensor technologies and platforms, including drones, helicopters, and satellites, to provide detailed data on the condition of high-voltage overhead transmission lines and their surroundings. The amount of data collected through inspections in this manner is vast and requires the application of software that provides users with mechanisms for rapid data processing and decision-making based on the obtained information. This paper describes the process of data collection and processing, and the implementation of a software aimed at transforming the way EMS AD conducts inspections and maintenance of high-voltage overhead transmission lines. The goal is to enable proactive problem detection and resolution, reduce maintenance costs, and enhance the safety and reliability of the power system's operation.

Key words: *digital twin, virtual model, aerial imaging, Business Intelligence (BI) tools, high-voltage overhead transmission lines, maintenance*

1 UVOD

Digitalizacija visokonaponskih nadzemnih vodova predstavlja virtuelni model elektroenergetske infrastrukture koji omogućava kontinuirano praćenje, analizu i optimizaciju održavanja elemenata prenosne mreže. Virtuelni model elektroenergetske infrastrukture predstavlja digitalnu simulaciju stvarnog elektroenergetskog sistema. Kroz simulacije određenih scenarija, predviđa se ponašanje elektroenergetskog sistema za različite uslove eksploatacije. Virtuelni model omogućava precizno praćenje stanja infrastrukture, kao i prediktivno održavanje korišćenjem Business intelligence (BI) alata. Ovaj koncept zasnovan je na integraciji stvarnih podataka sa terena, korišćenjem simulacije i primenu analitičkih alata, sa ciljem poboljšavanja efikasnost održavanja, planiranja i upravljanja prenosnom mrežom.

2 AERO SNIMANJE

Za izradu virtuelnih modela jedna od tehnologija za prikupljanje podataka je aero snimanje, koje omogućava preciznu inspekciju, mapiranje i analizu. Prikupljanje podataka aero snimanjem je metoda koja se koristi za prikupljanje geografskih, kartografskih i drugih vrsta podataka pomoću različitih platformi. Dronovi, helikopteri i sateliti su tri glavne platforme koje se koriste za prikupljanje podataka sa visine, ali svaka od njih ima svoje specifične prednosti i nedostatke, kao i različite primene u zavisnosti od tipa podataka koji se prikupljaju i specifičnih zahteva korisnika. Aero snimanje može uključivati različite senzorske tehnologije, kao što su fotogrametrija, LiDAR (Light Detection and Ranging), multispektralno snimanje, kao i termalno snimanje.

2.1 Senzorske tehnologije

Fotogrametrija (kamera visoke rezolucije) podrazumeva korišćenje kamera visoke rezolucije za snimanje fotografija koje mogu biti analizirane kako bi se kreirali dvodimenzionalni (2D) ili trodimenzionalni (3D) modeli površine. Ove slike se koriste za pravljenje ortofoto mapa, planiranje terena i analizu promena u okolini.

LiDAR senzori (Light Detection and Ranging) koriste svetlosne impulse za merenje udaljenosti stvarajući na taj način vrlo precizan 3D model terena i objekata čak i u kompleksnim i teško dostupnim područjima.

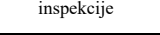
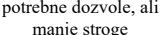
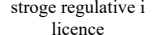
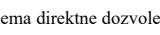
Multispektralno i hiperspektralno snimanje koristi se za analizu različitih vrsta talasnih dužina svetlosti, pa se prikupljanje podataka ogleda u snimanju slika u nekoliko spektralnih opsega, uključujući vidljivu svetlost i infracrveno svetlo.

Termalne kamere mogu se koristiti za prikupljanje podataka o temperaturi objekata i okoline. Ovi podaci su korisni za prepoznavanje grejnih mesta, kao i praćenje temperature objekata.

2.2 Platforme za aero snimanje

Snimanje dalekovoda je specifičan zadatak koji zahteva preciznost i sposobnost da se obuhvati velika površina. U tu svrhu, aero snimanje se koristi za inspekciju i monitoring, kao i za mapiranje i održavanje dalekovoda. U tabeli I dat je uporedni prikaz karakteristika različitih platformi koje se mogu koristiti za aero snimanje dalekovoda. Dronovi su idealni za precizne, lokalizovane inspekcije dalekovoda, posebno u teže dostupnim terenima. Helikopteri su pogodniji za duže trase i kada je potrebno brzo skenirati velike površine, ali su skuplji. Sateliti su korisni za makro-nadzor i detekciju promena u okolini, ali nisu pogodni za otkrivanje specifičnih kvarova.

Tabela I: Uporedni prikaz karakteristika različitih platformi za aero snimanje

Kriterijum	Dron	Helikopter	Satelit
Rezolucija snimka	 cm	 cm - dm	 dm - m
Fleksibilnost leta	 precizan let	 pratiti trase	 fiksna orbita
Dostupnost podataka	 raspoloživost dronova	 planira se unapred	 arhivski podaci
Bezbednost operacije	 ograničeno dometom	 rizik za ljude i opremu	 bez direktne intervencije
Vremenski uslovi	 osetljiv na vetar i kišu	 prilagođen težim uslovima	 radarski
Preciznost detekcije kvarova	 uz dodatne senzore (IR, LIDAR)	 uz dodatne senzore (IR, LIDAR)	 nije pogodna za detaljne inspekcije
Regulativa / dozvole	 potrebne dozvole, ali manje stroge	 stroge regulative i licence	 nema direktne dozvole
Cena po misiji	 Niska do srednja	 Visoka	 Niska po površini, ali ograničena primena

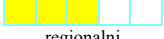
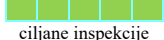
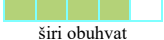
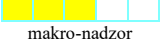
2.3 Analiza primene različitih platformi za snimanje

Odabir platforme za aero snimanje zavisi od dosta faktora, kao što su vrsta snimanja, vrsta opreme koja se koristi, potrebna preciznost i budžet. U tabeli II data je cost-benefit analiza primene različitih vrsti platformi koje se mogu koristiti za aero snimanje dalekovoda.

Svaka platforma, dronovi, helikopteri i/ili sateliti, ima svoje specifične prednosti kada se koriste se za različite vrste misija. Izbor platforme pre svega zavisi od:

- Tipa podataka koji se prikuplja (visoka rezolucija/globalno praćenje)
- Skala misije (mala/velika teritorija)
- Troškova operacije
- Vremenskih uslova za kakarakteristično područje
- Druge logističke prepreke.

Tabela II: Uporedni prikaz karakteristika različitih platformi za aero snimanje

Metoda	Dron	Helikopter	Satelit
Investicija	 srednja	 visoka	 niska
Operativni trošak	 nizak	 visok	 srednji
Preciznost	 veoma visoka	 visoka	 niska-srednja
Obuhvat	 lokalni	 regionalni	 globalna
Isplativost	 ciljane inspekcije	 širi obuhvat	 makro-nadzor

Dronovi su najbolji za lokalizovane, visoko precizne misije sa niskim troškovima i velikom fleksibilnošću. Helikopteri su idealni za veće teritorije i misije koje zahtevaju nošenje teže opreme i zahtevaju srednju fleksibilnost u manevrisanju. Sateliti su najpogodniji za globalno praćenje, analize na velikim razmerama i u dugoročnim studijama.

Za pojedine aplikacije, kombinacija dve ili sve tri platforme može biti najefikasniji pristup za sveobuhvatno prikupljanje podataka i poboljšanje procesa održavanja.

3 PRIKUPLJANJA PODATAKA

Prikupljanje podataka pomoću aero snimanja obuhvata nekoliko ključnih faza:

- Planiranje i izvođenje misije
- Obrada podataka
- Interpretacija podataka

3.1 Planiranje i izvođenje misije

Pre početka snimanja vrši se precizno planiranje misije koje uključuje definisanje oblasti snimanja, visinu leta, preklapanje snimaka (kako bi se obezbedila potpuna pokrivenost), brzinu letenja, i vrste senzora koji će biti korišćeni.

Dronovi ili drugi vazduhoplovni uređaji lete predviđenom rutom, prikupljajući podatke pomoću kamera i senzora. U slučaju dronova, misija može biti automatizovana pomoću predefinisanih ruta i plana letenja.

Proces planiranja i izvođenje misije (slika 1.) ogleda se u sledećim koracima:

1. **Planiranje misije** koje za cilj ima efikasno i bezbedno prikupljanje relevantnih podataka, definisanje zone snimanja, odabir tehnologije (dronovi ili helikopter), određivanje senzora, kao i parametara misije (visina leta, preklapanje snimaka, brzina leta, vremenski uslovi)
2. **Terensko izvođenje misije** koje podrazumeva sigurno i precizno izvođenje snimanja iz vazduha (kalibracija i priprema opreme, usklađivanje senzora i GPS sistema, testiranje komunikacije i kontrole), lansiranje platforme, snimanje duž trase dalekovoda u realnom vremenu, prikupljanje podataka i beleženje napomena sa terena
3. **Prva provera na terenu** ima za cilj da se uveri da su podaci kompletni i upotrebljivi brзом analizom snimaka na laptopu/tabletu, proverom pokrivenosti, oštine i tačnosti pozicioniranja i ako je potrebno dodatnim snimanjem na licu mesta



Slika 1:
Proces planiranja i izvođenja misije

4. **Preuzimanje i skladištenje podataka** podrazumeva organizovano skladištenje za dalju obradu preuzimanjem podataka sa SD kartica i memorija, organizacijom po misijama, lokacijama i vrstama senzora, backup-om podataka na više lokacija (lokalni disk + cloud) i evidencijom metapodataka (lokacije, vreme, senzor, posada)
5. **Priprema za obradu** (neobavezno, ali često uključeno) ima za cilj da se olakša kasnija analiza, a podrazumeva pretvaranje fajlova u standardizovane formate, georeferenciranje (ako nije urađeno automatski) i prvu filtraciju, tj. uklanjanje mutnih snimaka i neupotrebljivih oblaka tačaka.

Svaki dron, helikopter ili satelit koristi GPS/RTK GNSS sistem za precizno pozicioniranje. Po snimanju dobiju se:

1. Vizuelni (RGB) snimci - fotografije dalekovoda iz vazduha (stubovi, provodnici, okolina). Prilikom snimanja prikupljaju se podaci o vremenskim oznakama (timestamp), geolokaciji (GPS koordinate), ugalu snimanja, visina leta, orijentacija kamere i slično. Podaci se nakon obrade koriste za vizuelnu inspekciju, tj. detekciju pukotina, korozije, mehaničkih oštećenja.
2. Termalni (IR) snimci - (radiometrijska) slika delova dalekovoda sa informacijama o površinskoj temperaturi i anomalijama (hot spots), kao i GPS kooridnati i vremenu snimanja. Koriste se za otkrivanje grejanih mesta, što često ukazuje na probleme na spojevima ili kontaktima elemenata dalekovoda.
3. LiDAR podaci u vidu LAS/LAZ fajlova - oblaci tačaka koji sadrže 3D geometriju terena, stubova, provodnika i vegetacije, gde se prikupljaju XYZ koordinate svake tačke, intenzitet reflektovanog signala i eventualno i boja (ako je integrisan RGB).

Primena ovakvih podataka je za analizu bezbednosnih razmaka i geometrijskih deformacija. GNSS podaci sadrži precizne pozicije letelice i kamere i koriste se za georeferenciranje snimaka i oblaka tačaka.

4. Metapodaci u svakom fajlu, ili u pratećim logovima daju informacije o senzoru (tip kamere, žižna daljina, rezolucija, orijentacija) i podatke o letu drona (putanja, brzina, visina leta).

3.2 Obrada podataka

Nakon prikupljanja podataka, potrebno je izvršiti obradu snimljenih podataka (mapiranje). Mapiranje se radi kroz specijalizovane softvere za fotogrametriju (Pix4D, DroneDeploy, Agisoft Metashape, DJI Terra), za point cloud obradu (CloudCompare, LiDAR360, Global Mapper, LiPowerline), za GIS mapiranje i analize (QGIS, ArcGIS). Ovaj proces obuhvata georeferenciranje slika, kreiranje 3D modela, ortofoto mapa, DEM (Digital Elevation Models), ili analizu spektralnih podataka. Očekivani rezultat su precizne mape iz vazдушnih snimaka (ortomozaici), digitalni modeli terena i površina, 3D modeli stubova i rapona i drugih objekata poput saobraćajnica, kuća, električnih vodova i slično.

Nakon obrade, podaci se analiziraju kako bi se izvukli korisni uvidi (izrada preciznih mapa, 3D modela i digitalnih modela terena).

3.3 Interpretacija podataka

Količina podataka koja se prikupi na gore opisan način je velika i zahteva primenu softvera koji će korisniku obezbediti mehanizme da na brz način iste obradi i analizira, kako bi na osnovu istih mogao donositi odluke.

Svi podaci se mogu integrisati u GIS (Geografski Informacioni Sistem) gde se vrši pregled trase dalekovoda, obeležavanje oštećenja (tagovi sa GPS koordinatama), analiza ugroženih zona (npr. vegetacija ili nelegalna gradnja u blizini dalekovoda), planiranje održavanja i radova. Moguće je formirati interaktivne mape (web GIS platforme), 3D prikaz infrastrukture, kao i automatske izveštaje sa fotografijama i GPS lokacijama oštećenja.

4 DIGITALNI DALEKOVOD

Digitalni dalekovod (ili digital twin dalekovoda) je savremeni koncept koji podrazumeva upotrebu naprednih tehnologija za digitalno modelovanje, nadzor i upravljanje održavanjem elektroenergetskom infrastrukturom, u realnom vremenu. Stvarno stanje dalekovoda u realnom vremenu prati se uz pomoć senzora, IoT uređaja, dronova i aero snimanje korišćenjem veštačke inteligencije (AI) čija je uloga prikupljanje, analiza i prikazivanje podataka.

Uvođenjem digitalnog dalekovoda unapređuje se dosadašnji nadzor dalekovoda i otvaraju se nove funkcionalnosti kao što su:

- Prediktivno održavanje (na osnovu istorijskih i real-time podataka, AI predviđa kvarove pre nego što se dese)
- Brža reakcija na incidente (sistem odmah nudi potencijalna mesta kvar i predlaže mere)
- Optimizacija rada (bolje upravljanje rada dalekovoda) iz primenu IoT senzora na samom dalekovodu
- Simulacije i testiranje (testiranje promene u digitalnom okruženju bez rizika)
- Integracija sa drugim sistemima

5 EMS AD I DIGITALNI DALEKOVOD

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije” Beograd (EMS AD) aktivno radi na digitalizaciji prenosnog sistema električne energije, implementirajući savremene tehnologije za unapređenje efikasnosti, pouzdanosti i bezbednosti mreže. Aero snimanje predstavlja savremeni metod za prikupljanje podataka o prenosnoj elektroenergetskoj mreži putem vazdušnih platformi. Ova tehnologija omogućava brzu, preciznu i sigurnu inspekciju dalekovoda, što poboljšava efikasnost upravljanja mrežom i smanjuje potrebu za fizičkim pregledima. Namena aero snimanja nije tu da zameni ljude, već da im olakša i učine život sigurnijim omogućavajući im da obavljaju svoje poslove na daljinu. Aero snimanjem mogu da dosegnu udaljena, opasna ili teško dostupna područja, bez ugrožavanja ljudske bezbednosti. Korišćenjem naprednih senzora, prilikom aero snimanja, kao što su LIDAR, RGB i termalne kamere, omogućava se dobijanje podataka visoke rezolucije za detaljnu analizu i donošenje informisanih odluka. Time se omogućavaju brže inspekcije i prikupljanje podataka, smanjujući zastoje i operativne troškove u poređenju sa tradicionalnim metodama.

5.1 Planiranje i izvođenje misije u EMS AD

U EMS AD za aero snimanje dalekovoda koriste se dronovi. Aero snimanje obavljaju treća lica, ali i ekipe EMS AD.

Podaci koji se prikupljaju su:

- Ortofoto snimci,
- LiDAR snimci,
- RGB slike stubova i raspona,
- Termovizijske RGB slike stubova i raspona.

Prilikom snimanja obavezno je zabeležiti i:

- Datum i vreme snimanja
- Temperaturu ambijenta (°C)
- Brzinu vetra (m/s)
- Intenzitet zračenja (W/m²)

Posebna pažnja se obraća na gradske (urbane) sredine gde se može javiti podgrađenost (objekti na trasi dalekovoda) i zaštitni pojas dalekovoda gde može biti vegetacije (šume).

5.2 Obrada podataka u EMS AD

Glavni zahtevi mapiranja prikupljenih podataka podrazumeva da se naprave ortofoto snimci i LiDAR snimak na osnovu kojih će se napraviti digitalni model površine (DSM - Digital Surface Model), digitalni model terena (DTM - Digital Terrain Model) i model dalekovoda. Datoteke DSM i DTM su osnovni proizvodi iz LiDAR snimanja ili aero-fotogrametrije, a koriste se za analizu i modeliranje prostora.

Podaci dobijeni aero snimanjem LiDAR senzorom moraju se klasifikovati i obezbediti u blokovima u formi datoteka formata .las i raster formatu datoteka.

Pored opšte klasifikacije fajlova koja sadrži neklasifikovane objekte, zemlju, vegetaciju (do 3 m, do 6m i preko 6m visine), zgrada, užadi niskonaponskih, srednjenaponskih i TT vodova, vodenih površina, mostova, puteva i železničkih pruga vrši se i dodatna klasifikacija elemenata dalekovoda kao što su temelj stuba, konstrukcija stuba, izolatorski lanac na stubu, fazni provodnik i zaštitno uže. Na osnovu ovih podataka formira se digitalni model površine i digitalni model terena (slika 2).

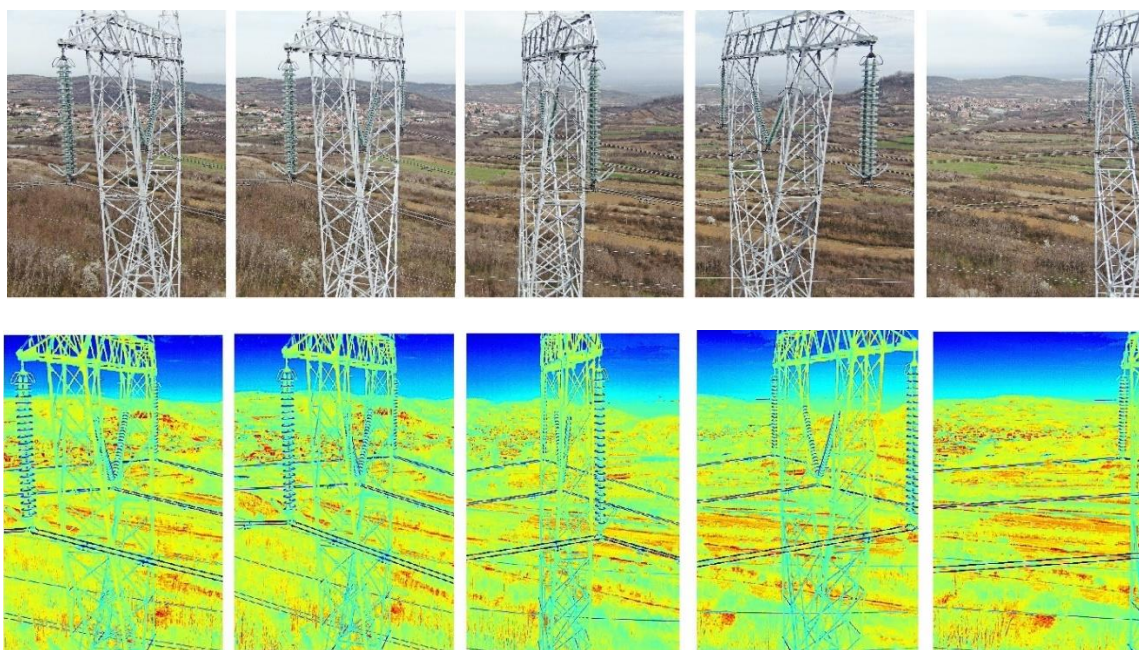


Slika 2: Primer mapiranih podataka

Za dalje analize, neophodni su RGB i termovizijske RGB slike stubova i raspona. Kombinovanje oba tipa snimka daje najbolji uvid u stanje elementa pa AI može automatski klasifikovati probleme (recimo oštećenje izolatorskog članka).

RGB slike svakog stuba moraju obuhvatiti slike konstrukcije iz najmanje dve suprotne dijagonalne perspektive stuba. Slike moraju biti u visokoj rezoluciji. Kod raspona slike moraju obuhvatiti sva tri fazna provodnika i snima se iz ptičije perspektive.

Termovizijske slike se rade u manjoj rezoluciji po istom rasporedu kao i RGB slike (slika 3).



Slika 3: Primer niza RGB i termovizijskih slika na dela stuba (izolatorski lanci)

5.3 Interpretacija podataka u EMS AD

Za potrebe obrade i analize prikupljenih podataka razvija se softversko rešenje (ET) koje koristi napredne tehnologije, uključujući obradu podataka sa LiDAR-a, RGB i termalnih senzora, kao i mašinsko učenje za prepoznavanje potencijalnih problema na elementima dalekovoda. Arhitektura sistema ET zasnovana je na višeslojnom dizajnu koji omogućava modularnost, skalabilnost i jednostavnu integraciju sa postojećim sistemima unutar EMS AD. Sistem se sastoji od nekoliko komponenti, od kojih svaka igra specifičnu ulogu u obradi podataka, generisanju alarma i vizualizaciji rezultata. Sistem je podeljen na dve ključne komponente, pri čemu svaka komponenta ima jasno definisane funkcionalnosti i ulogu u celokupnom radu sistema. Komponenta 1 je korisnički interfejs (frontend) sistema koji omogućava korisnicima interakciju sa podacima i sistemom, dok Komponenta 2 predstavlja kompletnu logiku sistema (backend) koji opslužuje frontend podržavajući napredne funkcionalnosti vezane za mašinsko učenje. Izvršena je integracija sa postojećim GIS rešenjem kako bi se omogućila vizualizacija i analiza geoprostornih podataka prikupljenih sa senzora, uključujući LIDAR, RGB, i termalne podatke. U okviru ET sistema omogućen je prikaz infrastrukture, stubova, raspona i ostalih elemenata mreže na interaktivnim mapama.

U sistemu će postojati dva načina pokretanja analize LiDAR, RGB i termalnih snimaka. Prvi način je automatski i on će se pokretati svaki put kada se uvezu novi snimci, po prethodno definisanim parametrima. Drugi način analize će biti po principu “na zahtev”, gde ključnu funkcionalnost predstavlja Modul za administraciju scenarija. Modul za administraciju scenarija predstavlja funkcionalnost sistema koja korisniku omogućava ponovno pokretanje analize ili filtriranje podataka za sva scenarija na kojima je izvršena izmena ulaznih parametara (slika 4).

Scenarija koja se razvijaju su:

- I. Identifikacija vertikalnog položaja stuba
- II. Identifikacija lančanice užadi i identifikacija naprezanja lančanice
- III. Upravljanje vegetacijom
- IV. Opasnost od pada stabala
- V. Analiza stanja opreme vezane za dalekovod
- VI. Termička analiza stanja opreme
- VII. Line rating analiza
- VIII. Detekcija objekata u zoni dalekovoda

Tok podataka u ET sistemu opisuje put podataka od trenutka prikupljanja preko obrade i analize do skladištenja i vizualizacije (slika 5). Podaci prikupljeni putem dronova s LIDAR, RGB, i termalnim senzorima prolaze kroz različite faze obrade kako bi korisnicima pružili uvid u stanje visokonaponske infrastrukture i omogućili blagovremeno reagovanje na potencijalne probleme. Kvalitet podataka je takođe ključni aspekt koji sistem kontroliše putem servisa za kontrolu kvaliteta.

ET

Scenariji

Pokreni analizu

Početna

Podaci

Scenariji

Dnevnik akcija

Komenci

Izveštaji

Ahina

Podešavanja

Identifikacija vertikalnog položaja stuba

Identifikacija lančanice uzdi i identifikacija naprezanja lančanice

Upravljanje vegetacijom

Opasnost od pada stabila

Analiza stanja opreme vezane za dalekovod

Termička analiza stanja opreme

Line rating analiza

Detekcija objekata u zoni dalekovoda

Identifikacija lančanice uzdi i identifikacija naprezanja lančanice

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur. aculis orae a facillae tortor. Enim massa nunc nunc quam sed facilis et. Varius pharetra scelerisque metus quam pellentesque suspendisse. liget non fames elit bibendum sollicitudin eget. Sit lectus fames tempor vestibulum quis volutpat porta magna sollicitudin.

Ulazni parametri za sigurnosne razmake

Kod objekta	Opis objekta	Sigurnosna visina 110kV (m)	Sigurnosna udaljenost 110kV (m)	Udaljenost i visina za koju se palizam 110kV (m)	Sigurnosna visina 220kV (m)	Sigurnosna udaljenost 220kV (m)	Udaljenost i visina za koju se palizam 220kV (m)	Sigurnosna visina 400kV (m)	Sigurnosna udaljenost 400kV (m)	Udaljenost i visina za koju se palizam 400kV (m)
1	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data
1	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data
1	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data
1	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data

Ulazni parametri za proračun temperature provodnika

Provodnik	Frekvencija provodnika (m)	Područna otpornost provodnika za naznamičnu struju na 20°C (ohm/m)	Temp. koeficijent otpornosti provodnika (1/°C)	Koeficijent apsorpcije sunčevog zračenja	Koeficijent radijacije provodnika	Područna masa aluminijskog plešta (kg/m)	Područna masa čeličnog plešta (kg/m)	Specifična točota aluminijskog plešta (J/kg °C)	Specifična točota čeličnog plešta (J/kg °C)
AlVC 150/25	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data
AlVC 240/40	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data
AlVC 450/65	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data

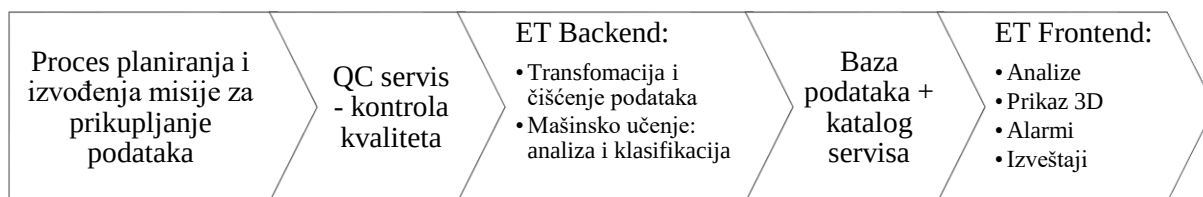
Ulazni parametri za vreme snimanja

Dalekovod	Efektivna vrednost struje provodnika (A)	Temperatura emblejanta (°C)	Intenzitet sunčevog zračenja (W/m2)	Brzina vetra (m/s)	Ugao između vektora brzine vetra i ose provodnika (°)
-----------	--	-----------------------------	-------------------------------------	--------------------	---

Ime i prezime

Pregled istorije

Odjelci



Slika 5: Tok podataka u ET sistemu

5.3.1 Prikupljanje podataka

Dronovi opremljeni senzorima (LIDAR, RGB, termalni) lete iznad visokonaponskih vodova i prikupljaju detaljne informacije o mreži i okolnoj vegetaciji:

- LiDAR podaci prikupljaju 3D tačke sa informacijama o geografskoj lokaciji i visini, omogućavajući precizno mapiranje infrastrukture.
- RGB kamere prikupljaju slike visoke rezolucije za vizuelnu inspekciju stanja mreže.
- Termalni senzori detektuju temperaturne anomalije, pomažući u prepoznavanju potencijalnih problema poput pregrevavanja provodnika ili spojeva istih.

5.3.2 Skladištenje podataka

LAS, RGB, i termalni podaci se skladište na NAS uređaju (Network Attached Storage) u specijalizovanim folderima. Ovi podaci se ne čuvaju direktno u bazi podataka zbog veličine i prirode podataka, već su njihove putanje indeksirane u bazi podataka kojom upravlja Katalog servis. Katalog servis upravlja skladištenjem informacija o putanjama datoteka na NAS-u i omogućava brz pristup ovim podacima kroz odgovarajuće API-jeve.

Takođe obezbeđuje da podaci budu povezani sa relevantnim infrastrukturnim elementima kao što su stubovi i rasponi visokonaponske mreže.

5.3.3 Kontrola kvaliteta podataka

QC (Quality Check) servis automatski analizira prikupljene podatke kako bi procenio njihov kvalitet. Ovaj servis proverava da li su podaci ispravni i da li zadovoljavaju definisane kriterijume kvaliteta, pre nego što se koriste za analizu ili vizualizaciju.

LAS, RGB, i termalni podaci koji prođu QC proveru bivaju označeni kao visokokvalitetni, dok podaci koji ne zadovoljavaju standarde bivaju obeleženi za ručnu proveru. Rezultati QC analize se čuvaju u NoSQL bazi podataka kako bi se osigurala visoke performanse sistema. Ova baza omogućava brzo upisivanje i čitanje rezultata provera, što je ključno za održavanje efikasnosti sistema.

5.3.4 Obrada podataka

Backend aplikacija preuzima prikupljene podatke sa NAS-a, nakon što su prošli QC kontrolu. Podaci se dalje obrađuju kako bi bili spremni za analize mašinskog učenja. Obrada podrazumeva:

- Transformaciju podataka: LAS, RGB i termalni podaci prolaze kroz niz transformacija kako bi se prilagodili modelima mašinskog učenja.
- Čišćenje podataka: Eliminacija nepotpunih ili nekvalitetnih podataka pre analize.

5.3.5 Analiza putem mašinskog učenja (ML)

Modul za treniranje ML modela koristi obrađene podatke za treniranje algoritama mašinskog učenja. Nakon treniranja, modeli se koriste za predikciju potencijalnih problema na infrastrukturi, kao što su oštećenja provodnika ili vegetacija koja ugrožava rad dalekovoda. Verzionisanje modela i podataka omogućava praćenje svih verzija modela i datasetova korišćenih u treninzima.

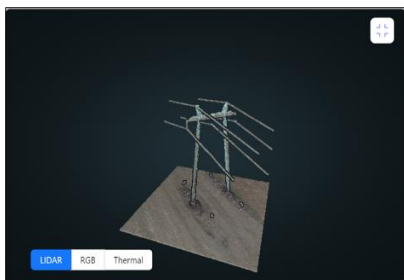
Za detekciju anomalija korišćeni su modeli mašinskog učenja, trenirani na datasetu koji sadrži snimke 350 km mreže sa označenim oštećenjima na infrastrukturi dalekovoda. Dataset je ručno anotiran. Za detekciju različitih delova opreme, koristi se YOLO (You Only Look Once) arhitektura [6, 7]. Modeli su trenirani na anotiranim podacima, gde su tačne lokacije predmeta od interesa označene na slikama. U procesu obuke, YOLO model uči da prepozna obrasce u pikselima koji odgovaraju predmetu od interesa (na primer izolatori) i razvija sposobnost generalizacije na neviđene slike koje bi bile napravljene u budućim inspekcijama dalekovoda. Sličan pristup se uzima i za druge delove opreme ili čak detekciju anomalija. Ideja je da se ovako detektovani delovi opreme šalju drugom modelu mašinskog učenja specijalizovanom za detekciju druge vrste anomalija (na primer zaprljanosti izolatora ili nedostajućih delova).

5.3.6 Skladištenje rezultata i generisanje alarma

Predikcije generisane od strane ML modela skladište se u bazi podataka i koriste se za generisanje alarma. Alarmi obaveštavaju korisnike o detektovanim problemima, kao što su grejna mesta ili nepravilnosti na elementima mreže. NoSQL baza skladišti rezultate analiza i obeležavanja podataka, omogućavajući brzi pristup rezultatima.

5.3.7 Vizualizacija i korisnički interfejs

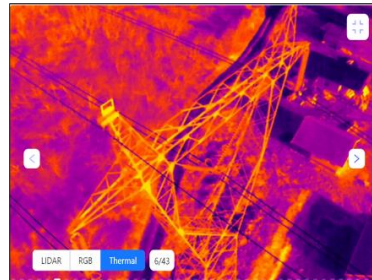
Korisnički interfejs omogućava korisnicima da pregledaju infrastrukturne podatke u realnom vremenu, uz mogućnost interaktivnog pregleda 3D oblaka tačaka, slika visoke rezolucije, i termalnih mapa (slika 6, 7 i 8). OpenLayers i Potree se koriste za vizualizaciju geoprostornih podataka, dok korisnici mogu da analiziraju rezultate predikcija i alarmnih situacija (slika 9 i 10).



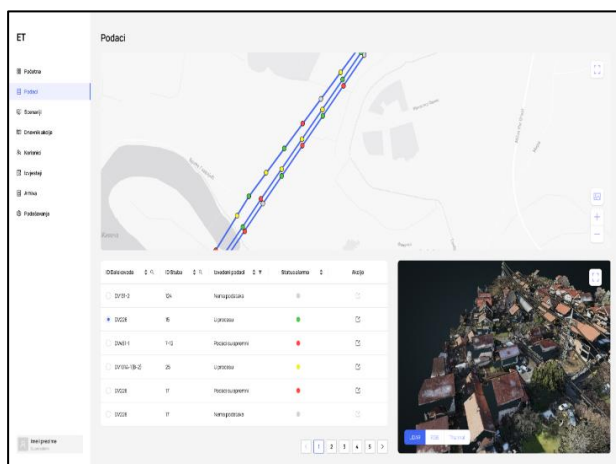
Slika 6: LiDAR snimak



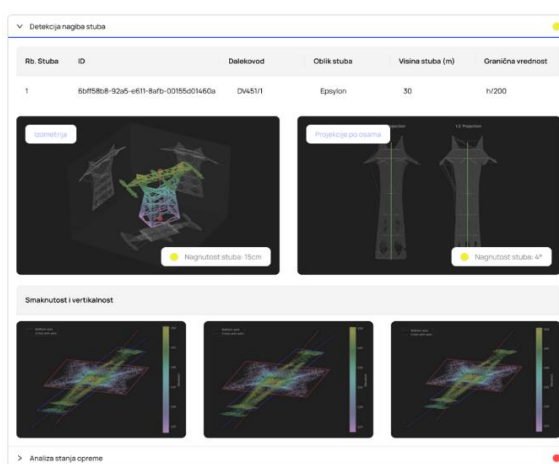
Slika 7: RGB slika



Slika 8: Termalni snimak



Slika 9: Pregled i analiza alarma



Slika 10: Alarmna situacija

5.3.8 Arhiviranje podataka

Podaci, uključujući prikupljene informacije sa dronova i rezultate analize, arhiviraju se na NAS-u za dugoročno čuvanje. Sistem omogućava pretraživanje arhiviranih podataka za analize dugoročnih trendova i poređenje istorijskih informacija.

6 ZAKLJUČAK

Predstavljeni rad pokazuje kako primena savremenih tehnologija u aero snimanju i obradi podataka omogućava pouzdano i efikasno praćenje stanja visokonaponske mreže. Uz pomoć procesa automatizacije, informacionih tehnologija i korišćenjem dronova u EMS AD vrši se snimanje dalekovoda vizuelnim kamerama, termo senzorima i LiDAR senzorima, kako bi se prikupili podaci za modelovanje digitalnog blizanaca i kako bi se otkrivale lokacije i vrste kvarova na elektroenergetskoj mreži u predviđenom roku i to bez potrebe za isključenjem elemenata elektroenergetskog sistema.

Na ovaj način obezbeđuje se automatizovani pregled nadzemnih visokonaponskih vodova korišćenjem drona uz učešće ljudskih resursa, a sve u cilju unapređenja tehnološkog procesa održavanja dalekovoda. Učešće ljudskih resursa ogleda se u transportu neophodne opreme do i sa mesta pregleda dalekovoda, definisanje svih parametara sistema drona neophodnih za ispravan rad, definisanje trase i ostalih tehničkih parametara leta drona (visine leta, dužine trajanja leta i slično), kao i definisanje svih tehničkih parametara senzora.

Razvijeno softversko rešenje (ET) koje koristi napredne tehnologije, uključujući obradu podataka sa LiDAR-a, RGB i termalnih senzora, kao i mašinsko učenje za prepoznavanje potencijalnih problema na elementima dalekovoda, uključujući i razvijanje modula za upravljanje vegetacijom omogućava korisnicima uvid u stanje visokonaponske infrastrukture i omogućuje blagovremeno reagovanje na potencijalne probleme.

Budući razvoj sistema uključuje širenje scenarija analize, unapređenje modela veštačke inteligencije, kao i dalju integraciju sa operativnim i planerskim sistemima EMS AD. Ovakav pristup predstavlja značajan iskorak ka potpunoj digitalizaciji elektroenergetske mreže.

7 LITERATURA

- [1] ICAO Guidelines for Drone Inspection of Power Lines
- [2] IEEE PES Reports on UAV for Utility Inspection
- [3] LiDAR Magazine: "Transmission Line Mapping using UAVs"
- [4] Kompanije: DJI, Trimble, senseFly, Pix4D
- [5] Interna regulativa i dokumenta EMS AD Beograd
- [6] <https://arxiv.org/abs/1506.02640>
- [7] <https://docs.ultralytics.com/>