

Diāna Gauče

**VIDEO ROBOTIZĒTO RISINĀJUMU LIETOJUMS
DATU VĀKŠANĀ UN APSTRĀDĒ
INŽENIERKOMUNIKĀCIJU INFRASTRUKTŪRAS
TEHNISKO DATU UZTURĒŠANAS OPTIMIZĀCIJAI**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte

Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts

Diāna Gauče

Studiju programmas “Elektronika” doktorants

VIDEO ROBOTIZĒTO RISINĀJUMU LIETOJUMS DATU VĀKŠANĀ UN APSTRĀDĒ INŽENIERKOMUNIKĀCIJU INFRASTRUKTŪRAS TEHNISKO DATU UZTURĒŠANAS OPTIMIZĀCIJAI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
ANNA LITVIŅENKO

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Gauče D. Viedo robotizēto risinājumu lietojums datu vākšanā un apstrādē inženierkomunikāciju infrastruktūras tehnisko datu uzturēšanas optimizācijai. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. 56 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2025. gada 26. marta lēmumu, protokols Nr. 38.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Sociālais
fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Promocijas darbs daļēji veikts ar Eiropas Reģionālās attīstības fonda SAM projekta “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” (Nr. 8.2.2.0/20/I/008) atbalstu.



Promocijas darbs daļēji izstrādāts ar AS “Sadales tīkls” atbalstu, izmantojot uzņēmuma nodrošināto testēšanas infrastruktūru, pieejamos eksperimentālos datus un programmatūru to apstrādei. Sadarbība ar industrijas partneri ļāva veikt lietojumā orientētus pētījumus reālos apstākļos, tādējādi paaugstinot darba praktisko nozīmīgumu un zinātnisko validitāti.

Vāka attēls no www.shutterstock.com.

<https://doi.org/10.7250/9789934371899>

ISBN 978-9934-37-189-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 27. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Artūrs Āboltiņš,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. Darius Plonis*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. sc. ing.* Dmitrijs Pavļuks,
Transporta un sakaru institūts, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Dīana Gauče (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 90 attēli, 33 tabulas, seši pielikumi, kopā 157 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 109 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs veltīts datos balstītiem automatizācijas risinājumiem, kas spēj uzlabot virszemes inženierinfrastruktūras uzturēšanas procesus. Darbā izstrādāts un pētīts risinājums infrastruktūras inspekcijas procesa realizācijai, izmantojot *RGB* un *LIDAR* datu kopas savākšanu ar bezpilota gaisakuģu (BGK) palīdzību un masveida datu apstrādi, kas balstās mašīnmācīšanās procesā infrastruktūras elementu tehniskā stāvokļa novērtēšanai. Pētījums ir strukturēts piecās galvenajās daļās, katrā no tām aptverot svarīgu aspektu elektropārvades sistēmu modernizācijā un analīzē: elektroenerģijas sistēmas struktūras un tās attīstības tendenču izmaiņu teorētiskā analīze; digitālās transformācijas apskats enerģētikas nozarē; Latvijas elektroenerģijas sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijas procesa izpēte; alternatīvo metožu teorētisks novērtējums vizuālo un ģeotelpisko defektu identificēšanai; eksperimentāls pētījums par *RGB* un *LIDAR* datu kopā balstītu inspekcijas risinājumu, lai nodrošinātu visaptverošu perspektīvu uz jaunu, efektīvāku metožu integrēšanu energosistēmu pārvaldībā un sekmētu inovāciju integrāciju Latvijas elektroenerģijas sistēmā. Darba rezultāti tika izstrādāti sadarbībā ar AS “Sadales tīkls”, nodrošinot industriālu kontekstu pētījuma veikšanai. Pētījuma gaitā iegūtie rezultāti ir publicēti piecos zinātniskajos rakstos.

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	7
IEVADS.....	8
1. ELEKTROENERĢIJAS SISTĒMAS STRUKTŪRA	13
1.1. Elektroenerģijas ražošana	13
1.2. Elektroenerģijas pārvade.....	14
1.3. Elektroenerģijas sadale	15
1.4. Kopsavilkums.....	16
2. DIGITĀLĀ TRANSFORMĀCIJA ENERĢĒTIKAS JOMĀ	16
2.1. Viedo skaitītāju tehnoloģijas apskats	16
2.2. ĢIS sistēmas pielietojums infrastruktūras tehnisko datu uzturēšanai	17
2.2.1. Ģeotelpisko datu vizualizācija	17
2.2.2. Tehnisko datu uzturēšana ĢIS	17
2.2.3. ĢIS datu interpretācija un analīze	17
2.2.4. ĢIS funkcionālās lietotnes.....	17
2.3. Digitālā dvīņa koncepta pielietojums enerģētikas jomā.....	18
2.3.1. Digitālā dvīņa konceptuālais apskats	18
2.3.2. Digitālais dvīnis energoefektīvu ēku pārvaldībai.....	18
2.3.3. Digitālais dvīnis atjaunojamajiem enerģijas avotiem.....	19
2.3.4. Sadales operatora virszemes infrastruktūras digitālais dvīnis	19
2.4. Kopsavilkums	19
3. LATVIJAS ELEKTROENERĢIJAS SADALES SISTĒMAS INFRASTRUKTŪRAS INSPEKCIJAS PROCESS	20
3.1 AS “Sadales tīkls” inspekcijas procesa pārvaldība un organizācija	20
3.2. Vidējā sprieguma infrastruktūras defektu klasifikācija.....	21
3.3. Kopsavilkums	22
4. ALTERNATĪVĀS METODES DEFEKTU IDENTIFICĒŠANAI	22
4.1. Vizuālo defektu noteikšanas metodes	22
4.1.1. Datu tipi defektu identificēšanai	23
4.1.1.1. SAR attēli.....	23
4.1.1.2. Optiskie satelīta attēli	23
4.1.1.3. Optiskie aerofoto attēli	23
4.1.1.4. Termiskie attēli	23
4.1.1.5. Ultravioletie attēli.....	24
4.1.1.6. Datu tipu salīdzinājums	24
4.1.2. Optisko aerofotoattēlu iegūšanas ierīces	25

4.1.3. Transportlīdzekļu veidi optisko aerofotoattēlu datu vākšanai	25
4.1.4. Datu analīze vizuālo defektu noteikšanai	26
4.2. Ģeotelpisko defektu noteikšanas metodes	26
4.2.1. Datu tipi ģeotelpisko mērījumu īstenošanai	27
4.2.2. LIDAR sensors	27
4.2.3. Transportlīdzekļu punktu mākoņa datu vākšanai	27
4.2.4. Datu analīze ģeotelpisko defektu noteikšanai	28
4.3. Kopsavilkums	299
5. DIGITĀLĀS INSPEKCIJAS RISINĀJUMU EKSPERIMENTĀLAIS PĒTĪJUMS	29
5.1. Datu iegūšanas process	30
5.1.1. Datu kopu iegūšanas tehniskie parametri	30
5.1.2. Datu kopu iegūšanas scenārijs	31
5.1.3. Datu kopu iegūšanas realizācijas parametri	31
5.1.4. Eksperimenta rezultātu kopsavilkums	32
5.2. Datu analīzes process	33
5.2.1. Datu kopu apstrādes rīku funkcionalitātes prasības tehniskie parametri	33
5.2.2. Infrastruktūras vizuālais tehniskā stāvokļa novērtējums	37
5.2.3. Infrastruktūras ģeotelpiskie mērījumi	39
5.2.3.1. Elektropārvades līniju balstu, telpiskā izvietojuma noteikšana	40
5.2.3.2. Gabarītmērījumi	41
5.2.3.3. Vadu izregulēšanās	42
5.2.3.4. Vadu izvietojums balstos un attālumi starp vadu stiprinājumiem	43
5.2.3.5. Balstu izsvēršanas vērtības	44
5.2.3.6. Veģetācijas pārvaldība trašu koridoros un aizsargjoslās	455
5.2.4. Datu apstrādes realizācijas parametri	477
5.2.5. Eksperimenta rezultātu kopsavilkums	478
5.3. Digitālās inspekcijas ieviešanas rekomendācijas	499
5.4. Kopsavilkums	50
SECINĀJUMI	50
LITERATŪRAS SARAKSTS	52

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

Saīsinājums	Saīsinājuma skaidrojums
3D	trīsdimensionāls
ADTI	augstas detalizācijas topogrāfiskā informācija
AI	<i>Artificial intelligence</i> , mākslīgais intelekts
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i> , uzlabota mērīšanas infrastruktūra
API	<i>Application Programming Interface</i> , lietojumprogrammas saskarne
AS	akciju sabiedrība
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i> , Amerikas fotogrammetrijas un attālās izpētes biedrība
AWS	<i>Amazon Web Services</i> , Amazon mākoņdatošanas pakalpojumi
BGK	bezpilota gaisakuģis
BI	<i>Business Intelligence</i> , biznesa inteliģence
CPU	<i>Central Processing Unit</i> , centrālais procesors
DMS	<i>Distribution Management System</i> , sadales tīkla vadības sistēma
FOV	<i>Field of View</i> , skata laukums
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> , datņu pārsūtīšanas protokols
GPS	<i>Global Positioning System</i> , globālā pozicionēšanas sistēma
GIS	ģeotelpiskā informācijas sistēma
ID	identifikators
IR	<i>Infrared</i> , infrasarkanais
IS	informācijas sistēma
LAS	<i>LIDAR Aerial Survey</i> , LIDAR aerolāzerskenēšana – failu formāts
LDAP	<i>The Lightweight Directory Access Protocol</i> , direktoriju vieglpiekļuves protokols
LEK	Latvijas Elektrotehniskā komisija
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> , gaismas noteikšana un diapazona mērīšana
LKS	Latvijas koordinātu sistēma
ML	<i>Machine Learning</i> , mašīnmācīšanās
MMS	<i>Maintenance Management System</i> , uzturēšanas pārvaldības sistēma
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> , normalizētais veģetācijas starpības indekss
NeRF	<i>Neural Radiance Field</i> , neironu radiācijas lauks
NIS	<i>Network Information System</i> , tīkla informācijas sistēma
PLC	<i>Power-line communication</i> , barošanas līniju komunikācija
R-CNN	<i>Region-based Convolutional Neural Network</i> , reģionā balstīts konvolucionālais neironu tīkls
RGB	<i>Red-Green-Blue</i> , sarkans-zaļš-zils (krāsu modelis)
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i> , sistēmas vidējā pārtraukuma ilguma indekss
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i> , sistēmas vidējā pārtraukuma biežuma indekss
SAR	sintezētās apertūras radara attēli
ST	AS “Sadales tīkls”
TO	tehniskais objekts
UI	<i>User Interface</i> , lietotāja saskarne
UTG	<i>Utility to Go</i> , GIS mobilā versija
UV	<i>Ultra Violet</i> , ultravioletais
UX	<i>User Experience</i> , lietotāja pieredze
VS	vidējais spriegums
WGS	<i>World Geodetic System</i> , pasaules ģeodēziskā sistēma
YOLO	<i>You Only Look Once</i> , reāllaika objektu noteikšanas sistēma “Tu paskaties tikai vienu reizi”
ZS	zemspriegums

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Inženierkomunikāciju infrastruktūra ir sabiedrības funkcionēšanas un ekonomikas attīstības pamats, nodrošinot nepārtrauktu piekļuvi būtiskiem resursiem un pakalpojumiem. Elektroapgādes sistēma ir kritiska infrastruktūra, kas ietekmē valsts nacionālo drošību, ekonomiku un ilgtspējīgu attīstību, integrējot atjaunojamus energoresursus. Enerģētikas nozare piedzīvo būtiskas pārmaiņas, kas saistītas ar vides izmaiņām – pārrobežu enerģijas plūsmu pārstrukturēšanu, tirgus liberalizāciju, kā arī elektroenerģijas ražošanu no atjaunojamiem resursiem. Reaģējot uz strauji mainīgo vidi, enerģētikas uzņēmumi pielāgo savus biznesa un tehnoloģiskos procesus, arvien vairāk koncentrējoties uz digitālās transformācijas risinājumiem, kas sekmē enerģijas sadales optimizāciju [1]. Lai nodrošinātu drošu un efektīvu elektroapgādes sistēmas funkcionēšanu, nepieciešama infrastruktūras regulāra uzraudzība un uzturēšana.

Digitālās tehnoloģijas arvien būtiskāk ietekmē dažādas nozares, nodrošinot ievērojamus ekonomiskos ieguvumus. Tādas tehnoloģijas kā mākslīgais intelekts, viedie skaitītāji, lielo datu analīze, lietu internets, robotika, blokķēdes un mākoņdatošana veicina procesu automatizāciju un efektivitāti [2]. Tomēr enerģētikas nozarē joprojām trūkst pietiekamu pētījumu par to, kura no šīm jaunajām tehnoloģijām ir praktiski lietojama sadales sistēmas nozares attīstībai infrastruktūras tehniskā stāvokļa kontroles procesos. Turklāt Latvijā sadales sistēmas tīkla infrastruktūras inspekcijas mūsdienās joprojām tiek veiktas manuāli, izmantojot cilvēkresursus, kas liecina par nepieciešamību pēc papildu tehnoloģiskajiem risinājumiem automatizācijas un efektivitātes paaugstināšanai. Attīstoties digitālajām tehnoloģijām, iespējams izmantot dažādus datu formātus, piemēram, SAR, satelīta datus, termiskos un ultravioletos datus, kā arī punktu mākoņu analīzi, lai optimizētu inspekcijas procesu.

Tika veikti vairāki eksperimenti un publicēti pētījumi par datu apstrādes metodēm, specifiskiem aprēķiniem un to iespējamo lietojumu tehniskās infrastruktūras inspekcijās. Pētījumos aplūkotas šādas pieejas: satelītattēlu apstrādes un klasifikācijas metodes veģetācijas kontrolei un riska novērtēšanai [3]; mašīnmācīšanas un dziļās mācīšanas metodes objektu detekcijai [4]; tālīzpētes un ģeogrāfiskās informācijas apstrādes metodes, izmantojot attēlu klasifikāciju, laika rindu analīzi un indeksu aprēķinus (piemēram, *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)*) veģetācijas veselības novērtēšanai [5]; 3D *LIDAR* punktu mākoņu apstrādes metodes infrastruktūras objektu anomāliju noteikšanai [6]. Tomēr šie pētījumi nepietiekami aptver visas sadales sistēmas infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanas prasības, jo netiek pilnībā ņemtas vērā infrastruktūras topoloģijas specifiskās īpatnības, izmantoto tīkla infrastruktūras elementu materiāli un apkārtējās vides klimatiskie faktori, balstoties Latvijas sadales sistēmas infrastruktūras piemērā.

Darba izstrādes gaitā veikti praktiski eksperimenti un pētījumi par datu iegūšanas un apstrādes metodēm, nodrošinot datus balstītus lēmumu pieņemšanas procesus, kas veicina sadales operatora infrastruktūras tehnoloģisko ilgtspēju.

Darba mērķi un uzdevumi

Promocijas darba galvenais mērķis ir teorētiski izpētīt un praktiski validēt datus balstītu alternatīvo metožu izstrādi sadales sistēmas vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras tehniskajai inspekcijai (vizuālā tehniskā stāvokļa noteikšana un ģeotelpisko mērījumu veikšana).

Lai sasniegtu darba mērķi, definēti vairāki uzdevumi.

1. Veikt padziļinātu literatūras un esošo pētījumu analīzi par digitālo transformāciju un datus balstītiem risinājumiem enerģētikas infrastruktūras jomā.
2. Izpētīt Latvijas sadales sistēmas infrastruktūras tehniskās uzturēšanas vajadzības un identificēt specifiskos izaicinājumus, kas saistīti ar infrastruktūras elementu uzraudzību un kontroli.
3. Izvērtēt dažādu datu formātu (SAR attēli, optiskie satelīta un aerofoto dati, termiskie dati, infrasarkanie dati un punktu mākoņa datu kopas) piemērotību infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanai.
4. Izstrādāt funkcionālās un nefunkcionālās prasības datu iegūšanas un apstrādes procesiem, ņemot vērā AS “Sadales tīkls” infrastruktūras inspekcijas biznesa procesa specifiskās vajadzības.
5. Veikt eksperimentālo pētījumu infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālā novērtējuma metodei reālos poligonos, lai validētu izstrādātā risinājuma efektivitāti un pielāgojamību.
6. Veikt eksperimentālo pētījumu infrastruktūras tehniskā stāvokļa ģeotelpisko mērījumu novērtējuma metodei reālos poligonos, lai validētu izstrādātā risinājuma efektivitāti un pielāgojamību.
7. Izstrādāt rekomendācijas izveidotās inspekcijas metodes integrēšanai sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras tehniskās uzturēšanas procesos, pamatojoties uz tās validāciju, izmantojot Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” piemēru.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Izpētes laikā iegūtie rezultāti

- Izstrādāta un validēta jauna alternatīva metode tehniskās inspekcijas veikšanai, kas balstās virszemes infrastruktūras elementu *RGB* un *LIDAR* datu vākšanā un turpmākā datu analīzē.
- Izstrādātas un definētas funkcionālās un nefunkcionālās prasības datu iegūšanai un apstrādei, pielāgojoties sadales sistēmas operatora infrastruktūras inspekcijas procesa specifiskajām vajadzībām.
- Izstrādāts praktisko eksperimentu rezultātu iegūšanas plāns piedāvātās jaunās inspekcijas metodes validācijai, balstoties izstrādātajās tehniskajās prasībās.
- Īstenots eksperimentālais tests Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” virszemes infrastruktūras poligonos:
 - o infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālais novērtējums balstīts *RGB* datu kopas vākšanā un apstrādē;
 - o infrastruktūras tehniskā stāvokļa ģeotelpisko mērījumu novērtējums balstīts *LIDAR* datu kopas vākšanā un apstrādē.

- Izstrādātas un formulētas detalizētas rekomendācijas par izstrādātās metodes integrāciju sadales sistēmas operatora tehniskajos procesos.

Aizstāvamās tēzes

Promocijas darbā tiek formulētas un aizstāvēšanai izvirzītas vairākas tēzes.

1. *RGB* datu kopas vāktas, izmantojot bezpilota gaisakuģa (BGK) transportu sasaistē ar tīkla elementu ģeogrāfiskās informācijas sistēmas (GIS) datiem, un defektu anotēšanas funkcionalitāti spēj nodrošināt sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālo defektu identificēšanu ar konsekventu datu kvantitāti (vismaz četri attēli punktveida objektiem) un kvalitāti (attēli ar redzamību 2 cm defektu identificēšanai) un samazināt datu iegūšanas laiku laukā vismaz divas reizes, salīdzinot ar manuālās inspekcijas ātrumu, nodrošinot datu iegūšanu ātrumā vismaz 12 km/dienā.
2. *LIDAR* datu kopas ar punktu blīvumu vismaz 50 punkti/m² vāktas, izmantojot bezpilota gaisakuģa (BGK) transportu, un spēj nodrošināt sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras noteikto ģeotelpisko defektu identifikāciju, veicot tīkla modeļa vektorizāciju, izmantojot analītiskos rīkus ar definētām infrastruktūras elementu mērījumu prasībām, un spēj samazināt datu iegūšanas laiku laukā vismaz trīs reizes, salīdzinot ar manuālās inspekcijas ātrumu, sasniedzot datu iegūšanas ātrumu vismaz 18 km/dienā.
3. Punktu mākoņa datu kopas ar blīvumu vismaz 50 punkti/m², ja datu kvalitātes precizitāte ir līdz 10 cm attiecībā pret līniju augstumiem, apstrāde spēj nodrošināt sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras veģetācijas pārvaldību gaisvadu līniju trasēs un aizsargjoslās.

Pētījuma metodoloģija

Pētījuma metodoloģija noteikto mērķu sasniegšanai ietver vairāku posmu izstrādi.

Veikta padziļināta literatūras analīze, kas aptver digitālās transformācijas pētījumus un to lietojumu enerģētikas nozarē. Izanalizēta Latvijas energoapgādes sistēmas izbūve ar īpašu uzsvaru uz sadales sistēmas infrastruktūras specifiku. Veikta padziļināta AS “Sadales tīkls” vidējā sprieguma defektēšanas procesa realizācijas analīze, kur apskatīti infrastruktūras defektu veidi un to bīstamības līmeņi. Veikta zinātniskās literatūras analīze par dažādiem datu avotiem (SAR attēli, optiskie satelīta un aerofoto dati, termiskie dati, ultravioletie dati, punktu mākoņa datu kopas), ko potenciāli varētu izmantot sadales sistēmas infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanai, un salīdzinātas šo datu priekšrocības un ierobežojumi.

Pamatojoties uz veikto teorētisko izpēti, tika izstrādāti tehniskie parametri un datu kvalitātes kritēriji *RGB* un *LIDAR* datu iegūšanai, ņemot vērā AS “Sadales tīkls” tīkla defektu identificēšanas un novērtēšanas procesa specifiskās prasības.

Izveidots detalizēts eksperimentālais plāns un tvērums – veikt datus balstītu defektēšanu gaisvadu elektropārvades līnijām ar kopējo garumu 650 km, izmantojot digitālās inspekcijas tehnoloģijas un metodes. Eksperimentālais plāns ietver vairākus testēšanas posmus reālos lauka apstākļos, izmantojot *RGB* un *LIDAR* datu iegūšanas un apstrādes tehnoloģijas.

- Eksperimentālā *RGB* datu kopas vākšana, izmantojot BGK *DJI Mavic 2 Pro* un iebūvēto optisko 20 MP optisko kameru *RGB* datu iegūšanai par visiem infrastruktūras elementiem, kas ietverti eksperimentālajā plānā.
- Eksperimentālā *LIDAR* datu kopas vākšana, izmantojot BGK *DJI Matrice 300RTK* un *LIDAR* sensoru *YellowScan Mapper* punktu mākoņu datu kopas iegūšanai par visiem infrastruktūras elementiem, kas ietverti eksperimentālajā plānā.
- Iegūto *RGB* un *LIDAR* datu kopas apstrāde un analīze, izmantojot specializētu programmatūru, kas ļauj apstrādāt lielapjoma attēlu un telpiskos datus. Datu apstrādes procesā izstrādāti pielāgoti algoritmi un noteikti kritēriji, kas nodrošina datu klasifikāciju un interpretāciju – vērtību sliekšņu noteikšanu, balstoties daudzdimensionālos analīzes rīkos, lai precīzi definētu dažādus tehniskā stāvokļa indikatorus un identificētu vizuālos un ģeotelpiskos defektus.

Balstoties iegūtajos rezultātos, sniegti secinājumi par izstrādātās metodoloģijas praktisko lietojamību un pielāgošanu turpmākām infrastruktūras inspekcijām, balstoties datu analīzē.

Pētījuma objekts

Promocijas darba pētījuma objekts ir sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūra un tās tehniskā stāvokļa novērtēšanas process – inspekcijas.

Darba rezultātu praktiskais lietojums

Pētījuma praktiskais lietojums saistīts ar elektroapgādes sadales sistēmas datus balstītu tehniskās uzturēšanas un inspekcijas procesu veidošanu, izmantojot modernās datu vākšanas un apstrādes tehnoloģijas. Darba rezultāti piedāvā risinājumus, kas ir tieši lietojami infrastruktūras inspekcijās, nodrošinot efektīvāku un precīzāku infrastruktūras elementu tehniskā stāvokļa novērtēšanu, kas ir kritiski svarīgi nepārtrauktai un drošai elektroenerģijas piegādei.

- Datu pieejamība tiek nodrošināta, izmantojot BGK un *LIDAR* tehnoloģijas, kas ļauj samazināt infrastruktūras apsekošanas laiku divas reizes pat grūti pieejamās vietās.
- *RGB* un *LIDAR* datu kopu apstrāde specializētās programmatūrās nodrošina vienotu lēmumu pieņemšanas procesu, tādējādi novēršot nesakritības iepriekšējo metožu rezultātos (kompetenču atšķirības, piekļūšana objektos, cilvēciska faktora kļūdas).

Pētījuma rezultāti var būt vērtīgs ieguldījums Latvijas enerģētikas nozares modernizācijā, stiprinot inovatīvu tehnoloģiju ieviešanu un praktisko lietojumu kritiskās infrastruktūras pārvaldībā.

Aprobācija

Promocijas darba rezultāti publicēti piecos zinātniskajos rakstos, kas iekļauti starptautisko konferenču rakstu krājumos un zinātniskajos žurnālos.

- D. Gauge and A. Litvinenko, “Impact of data synchronization methods on the quality of engineering NIS data from several integrated applications in GIS architecture”, *2021 IEEE 9th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Riga, Latvia, 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/AIEEE54188.2021.9670142.
- Gauge, D.; Lektauers, A.; Solovjova, I.; Grants, R.; Kolosovs, D.; Litvinenko, A. Application of Digital Twin in Medium-Voltage Overhead Distribution Network Inspection. *Remote Sens.* 2023, *15*, 489. doi: 10.3390/rs15020489.

- D. Gauge, D. Kolosovs and A. Litvinenko, “Analysis on RGB Dataset Requirements for Remote Inspection of Power Grid Infrastructure”, *2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Vilnius, Lithuania, 2023, pp. 1–5, doi: 10.1109/AIEEE58915.2023.10134938.
- D. Gauge and A. Litvinenko, “Experimental Validation of RGB Dataset Analysis for Distribution System Operator Infrastructure Inspections”, *2024 IEEE 11th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Valmiera, Latvia, 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/AIEEE62837.2024.10586699.
- D. Gauge and A. Litvinenko, “LIDAR Dataset Validation for Enhancing Vegetation Management in Distribution System Operator Powerline Infrastructure”, *2024 IEEE 65th International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS)*, Riga, Latvia, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/ITMS64072.2024.10741947.

Pētījuma autore iegūtos rezultātus prezentējusi vairākās zinātniskajās konferencēs, sniedzot pārskatu par pētījuma nozīmīgākajiem atklājumiem un to praktisko lietojumu, kā arī piedaloties diskusijās par tēmas aktualitāti un turpmākās attīstības perspektīvām.

1. Starptautiskā konference “MTTW'22: Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications”, Latvija, Rīga, 2022, 5.–7. oktobris.
2. Rīgas Tehniskās universitātes 63. starptautiskā zinātniskā konference, Latvija, Rīga, 2022, 7. oktobris.
3. Starptautiskā zinātniskā konferencē “2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)”, Viļņa, Lietuva, 2023, 27.–29. aprīlis.
4. Rīgas Tehniskās universitātes 64. starptautiskā zinātniskā konference, Latvija, Rīga, 2023, 6. oktobris.
5. IEEE Starptautiskā informācijas un komunikācijas tehnoloģijas festivālā “IEEE ICTfest” (industriālā diskusija), Latvija, Rīga, 2023, 4.–6. oktobris.
6. Starptautiskā zinātniskā konferencē “The 11th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering AIEEE'2024”, Latvija, Valmiera, 2024, 31. maijs–1. jūnijs.
7. Rīgas Tehniskās universitātes 65. starptautiskā zinātniskā konference “2024 IEEE 65th International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS'2024)”, Latvija, Rīga, 2024, 3. oktobris.
8. Rīgas Tehniskās universitātes 65. starptautiskā zinātniskā konference (sekcija “Fotonika, elektronika un elektroniskie sakari”), Latvija, Rīga, 2024, 11. oktobris.

Promocijas darba autores vadītais noslēguma darbs

- M. Pavlovskis, Maģistra darbs ar projekta daļu “Virszemes elektrotīkla infrastruktūras digitālā vizuālā novērtējuma ieviešana tehniskā stāvokļa izvērtēšanas procesā” maģistra profesionālā studiju programmas “Informācijas tehnoloģijas projektu vadība”, 18.01.2024.

Darba struktūra

Promocijas darbs strukturēts tā, lai sistemātiski izklāstītu tēmas un to nozīmīgumu elektroenerģijas jomā. Darbā ir ievaddaļa, piecas galvenās nodaļas un secinājumi.

- Ievaddaļa sniedz vispārēju pārskatu par pētījuma tēmu, definētajiem mērķiem un uzdevumiem, kā arī norāda pētījuma nozīmi un iespējamo ieguldījumu enerģētikas jomā.
- Nodaļā “Elektroenerģijas sistēmas struktūra” aplūkota elektroenerģijas sistēmas organizācija, darbība un tās trīs pamata komponentes – elektroenerģijas ražošana, pārvade un sadale.
- Nodaļā “Digitālā transformācija enerģētikas jomā” aprakstīti izpētītie digitālās transformācijas aspekti enerģētikas nozarē, digitālo risinājumu ieviešana un to ietekme uz procesu efektivitāti un uzņēmumu darbību.
- Nodaļā “Latvijas elektroenerģijas sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijas process” aplūkota esošā inspekcijas prakse, kas attiecas uz Latvijas elektroenerģijas sadales sistēmas infrastruktūru.
- Nodaļā “Alternatīvās metodes defektu identificēšanai” sniegts sadales operatora virszemes infrastruktūras inspekcijas jaunās metodes piedāvājums.
- Nodaļā “Digitālās inspekcijas risinājuma eksperimentālais pētījums” prezentēti pētījuma rezultāti, kas iegūti, testējot digitālo inspekcijas risinājumu AS “Sadales tīkls” virszemes infrastruktūras poligonā.
- Secinājumos apkopoti darba galvenie rezultāti, kas sniedz pierādījumus par definēto tēžu pamatotību.

1. ELEKTROENERĢIJAS SISTĒMAS STRUKTŪRA

Elektroenerģijas sistēma ir elektrisko komponentu tīkls, ko izmanto, lai ģenerētu, pārsūtītu, izplatītu un izmantotu elektroenerģiju. Tam ir izšķiroša nozīme elektroenerģijas piegādē no spēkstacijām uz mājām, uzņēmumiem un rūpniecībām. Elektroenerģijas sistēmas komponentes ietver enerģijas ražošanu, pārvades un sadales infrastruktūru.

1.1. Elektroenerģijas ražošana

Enerģijas ražošana attiecas uz dažādu enerģijas veidu pārvēršanas procesu elektroenerģijā. Ir vairākas elektroenerģijas ražošanas metodes, katrai no tām ir savas priekšrocības, trūkumi un ietekme uz vidi.

Dažas izplatītākās metodes

- Fosilais kurināmais (dominējošais jebkurā enerģijas ražošanas nozarē, tās rezerves ar laiku samazinās [7]) – akmeņogles, dabasgāze, nafta.
- Atjaunojamā enerģija – saules enerģija, vēja enerģija, hidroenerģija, ģeotermālā enerģija un biomasas.
- Kodolenerģija.

Latvijā no gada laikā visas saražotās elektroenerģijas 70 % īpatsvars ir no atjaunīgajiem energoresursiem Daugavas hidroelektrostacijās saražotā elektroenerģija (dati par 2022. gadu (2670 GWh) apkopoti 1.1. tab.) [8], savukārt pārējais elektroenerģijas daudzums saražots termoelektrostacijās (dabasgāzes).

1.1. tabula

Latvijas lielākie enerģijas ražotāji (2022. gada dati)

Enerģijas avots		Saražotā elektroenerģija, GWh	Jauda, MW
Plāviņu HES	ūdens	1487	908
Rīgas HES	ūdens	661	402
Ķeguma HES	ūdens	522	248
TEC-1	dabasgāze	111	elektriskā – 158 siltuma – 493
TEC-2	dabasgāze	1012	elektriskā – 832 (koģenerācijas režīmā), 881 (kondensācijas režīmā) siltuma – 1124

1.2. Elektroenerģijas pārvade

Elektroenerģijas pārvade ir elektroenerģijas novadišanas process no elektroenerģijas ražošanas avota uz vietām, kur tā ir nepieciešama patēriņam. Tas ietver elektroenerģijas pārvadi lielos attālumos, izmantojot dažādas tehnoloģijas. Primārais mērķis ir pārraidīt jaudu ar minimāliem zaudējumiem un uzturēt nepieciešamo sprieguma līmeni. Pārvades tīkla pamata komponentes ir:

- pārvades apakšstacijas – pakāpju transformatori; šajās apakšstacijās tiek paaugstināts spēkstacijas saražotās elektroenerģijas spriegums efektīvai tālsatiksmes pārraidei;
- pārvades līnijas – augstsprieguma pārvades līnijas pārvada elektroenerģiju lielos attālumos no spēkstacijām uz sadales apakšstacijām; šīs līnijas balsta torņi, un tajās var izmantot dažādas tehnoloģijas, piemēram, gaisa līnijas vai pazemes kabeļus.

Pārvades sistēmas operators Latvijā ir AS “Augstsprieguma tīkls”, kas nodrošina augstsprieguma līniju, apakšstaciju un sadales punktu ekspluatāciju, apkopi un remontu, kā arī tālāko pārvades tīkla attīstību. Latvijas energosistēmas 330 kV tīkls ir Baltijas valstu energosistēmas vidusposms starp tās ziemeļu un dienvidu daļām, kur 16 no 17 apakšstacijām ir divpusēja barošana, kā redzams 1.2. tabulā, kur apkopotī pārvades tīkla parametru dati (Latvijas [8], Igaunijas [9], Lietuvas [10]).

1.2. tabula

Baltijas valstu pārvades tīkla rādītāji (2022. gada dati)

Darbības rādītāji	Uzturētājs	Latvija	Igaunija	Lietuva
		“Augstsprieguma tīkls”	“Elering”	“LitGrid”
Līniju garums, km	330 kV līnijas	1764,50	1634,00	1961,00
	110 kV līnijas	3895,84	3473,00	5069,70
	6–35 kV	–	28	–
Apakšstaciju skaits	330 kV (augstākais spriegums)	17	13	16 + 1* * 400 kV
	110 kV (augstākais spriegums)	123	156–13	219

1.2. tabula (turpinājums)				
Autotransformatoru un transformatoru skaits	330 kV (augstākais spriegums)	26	Nav datu	24 + 3* * 400 kV
	110 kV (augstākais spriegums)	245	Nav datu	4
Uzstādītā jauda, MVA	330 kV (augstākais spriegums)	3800	Nav datu	4400 + 768* * 400 kV
	110 kV (augstākais spriegums)	5156,5	Nav datu	92,6

1.3. Elektroenerģijas sadale

Elektroenerģijas sadales tīkls ir sistēma, kas nodrošina elektroenerģijas piegādi no pārvades tīkla līdz galalietotājiem (mājām, uzņēmumiem un rūpniecības objektiem). Šim tīklam ir izšķiroša nozīme uzticamas un efektīvas elektroenerģijas piegādes nodrošināšanā, lai apmierinātu dažādas patērētāju vajadzības.

Galvenās elektroenerģijas sadales tīkla sastāvdaļas

- Sadales apakšstacijas – saņem elektroenerģiju no pārvades tīkla un izmanto pazeminošus transformatorus, lai samazinātu spriegumu līdz līmenim, kas piemērots lokālai sadalei.
- Sadales līnijas – nodrošina elektroenerģijas padevi no apakšstacijām uz dažādiem rajoniem un galalietotājiem. Sadales līnijām ir zemāks spriegums nekā pārvades līnijām, un tās var būt gan virszemes, gan kabeļu līnijas.
- Transformatori – visā sadales tīklā transformatori tiek izmantoti, lai pēc vajadzības vēl vairāk pielāgotu sprieguma līmeņus. Tie samazina spriegumu dzīvojamām un komerciālām vajadzībām.
- Sadales iekārtas un jaudas slēdži – līdzīgi kā pārvades tīklā, sadales tīklā tiek izmantotas sadales iekārtas un automātiskie slēdži, lai kontrolētu elektroenerģijas plūsmu, aizsargātu pret pārslodzēm un izolētu bojājumus.
- Uzskaites un norēķinu infrastruktūra – lai mērītu patērētās elektroenerģijas daudzumu, patērētāju vietās tiek uzstādīti skaitītāji. Šo skaitītāju savāktie dati tiek izmantoti uzskaitēi un norēķinu vajadzībām.

Latvijā ir reģistrēti 11 sadales operatori, vadošais no tiem ir AS “Sadales tīkls”, kas nodrošina elektroenerģijas piegādi 99 % patērētāju valstī. Salīdzinājumam 1.3. tabulā sniegti Baltijas valstu (Latvijas [11], Lietuvas [12], Igaunijas [13]) sadales tīkla tehniskie rādītāji.

1.3. tabula

Baltijas valstu sadales tīkla rādītāji (2022. gada dati)

Darbības rādītāji	Valsts	Latvija	Igaunija	Lietuva
	Uzturētājs	“Sadales tīkls”	“Enefit”	“Eso”
Līniju garums, km		92 407 39,5 % kabeļu līnijas 60,5 % gaisvadu līnijas	63000 33 % kabeļu līnijas 66 % gaisvadu līnijas	127 504 34,4 % kabeļu līnijas 65,6 % gaisvadu līnijas
Sadalītā elektroenerģija, GWh		6241	6708	10 010
Elektroenerģijas zudumi, %		3,73	3,8	5,05

1.3. tabula (turpinājums)			
Vidējais elektroenerģijas piegādes pārtraukuma ilguma indekss (SAIDI) minūtes (neplāns)	130	238	178,73
Vidējais elektroenerģijas piegādes pārtraukuma skaita indekss (SAIFI)	1,9	1,77	1,52
Pieslēguma punktu skaits	1 114 462	683 660	1 891 190

1.4. Kopsavilkums

Elektroenerģijas sistēma ietver trīs galvenā komponentes – ražošanu, pārvadi un sadali, kas veido savstarpēji saistītu tīklu elektroenerģijas piegādei no ražotājiem līdz patērētājiem.

- Elektroenerģijas ražošanas posms ietver dažādus enerģijas avotus, piemēram, fosilo kurināmo, kodolenerģiju, atjaunojamos energoresursus (vēja, saules, hidroenerģiju), kas tiek pārveidoti elektriskajā enerģijā.
- Pārvades sistēma ir augstsprieguma elektrotīkls, kas veic elektroenerģijas transportēšanu no ražotnēm uz sadales tīkliem vai tieši lielajiem patērētājiem.
- Sadales komponente nodrošina elektroenerģijas piegādi no pārvades sistēmas līdz galapatērētājiem – mājāsaimniecībām, uzņēmumiem un publiskiem objektiem. Sadales tīkls darbojas zemākos sprieguma līmeņos un prasa nepārtrauktu monitoringu un uzturēšanu, jo sadales infrastruktūra visbiežāk ir pakļauta vietējiem vides apstākļiem un intensīvākam nolietojumam.

Šie trīs elektroenerģijas sistēmas posmi ir būtiski, lai nodrošinātu efektīvu un uzticamu elektroapgādi, vienlaikus integrējot jaunas tehnoloģijas un risinot tehniskus izaicinājumus visos līmeņos un tehniskajos pamatprocesos.

2. DIGITĀLĀ TRANSFORMĀCIJA ENERĢĒTIKAS JOMĀ

Nodaļa veltīta digitālās transformācijas apskatam enerģētikas jomā, procesiem, kas ietver dažādu informācijas tehnoloģiju un datu analīzes lietošanu, lai optimizētu energoapgādi, palielinātu enerģijas efektivitāti un samazinātu vides ietekmi.

2.1. Viedo skaitītāju tehnoloģijas apskats

Elektroenerģijas uzskaitē ir viens no obligātajiem pamatprocesiem, ko regulē likumdošana, līdz ar to viedā enerģijas uzskaitē ir milzīgs digitālās transformācijas solis. Tīkla viedizāciju (AMI – *Advanced Metering Infrastructure*) var uzskaitīt par tīkla modernizācijas un attīstības sastāvdaļu. Tā rezultātā ir iegūts milzīgs datu apjoms (viedie skaitītāji nodrošina reāllaika datus ne tikai par elektroenerģijas patēriņu, bet arī spēj fiksēt dažādus iestādītos notikumus – piemēram, sprieguma palielināšanos/pazemināšanos), kas dod iespējas izmantot datu analīzi, lai potenciāli uzlabotu to darbības efektivitāti. Viedo skaitītāju datus var izmantot, lai uzlabotu un novērtētu sprieguma un mainīguma optimizācijas priekšrocības [14], novērtētu sadales līniju zudumus, identificētu un kvantitatīvi noteiktu enerģijas zādzības [15] un nodrošinātu uzlabotu slodzes prognozi, pārtraukumu pārvaldību un sadales sistēmas analīzi [16].

2.2. ĢIS lietojums infrastruktūras tehnisko datu uzturēšanai

ĢIS (ģeotelpiskā informācijas sistēma) ir neatņemama daļa jebkuram mūsdienu inženiertehnisko komunikāciju turētājiem, kā arī šobrīd valstiskā līmenī tiek veidotas centrālās datubāzes [17], kurās tiek uzturēta ADTI (augstas detalizācijas topogrāfiskā informācija), kur ir definēta specifikācija ar nepieciešamo informācijas apjomu un klasifikāciju. Papildus ĢIS ietver gan ģeogrāfisko datu glabāšanas, iegūšanas, attēlošanas, modificēšanas un apstrādes mehānismus, gan lēmumu pieņemšanas, analīzes un zināšanu iegūšanas iespējas. Tās funkcionalitātes var iedalīt četros ĢIS darbības principos: kartes; dati; analīze; lietotnes [18].

2.2.1. Ģeotelpisko datu vizualizācija

Elektroenerģijas sadales operatora infrastruktūras uzturēšanas kontekstā ģeotelpisko datu vizualizāciju var iedalīt vairākās komponentēs.

- Fona kartes – rastra karte (skanēta planšete, skanēta ģeogrāfiskā karte, ortofoto karte) – attēls kā objekts, vektorkarte (1 : 500 mēroga topogrāfiskā karte) – kartes objekti.
- Elektriskā tīkla kartes – tīkla infrastruktūras skatījums, shēmas topoloģijas skatījums.
- Citu komunikāciju turētāju kartes (datu apmaiņas vienošanās gadījumos).
- Specifisko objektu/slāņu kartes (piemēram, arheoloģiskie objekti, dabas parki).

2.2.2. Tehnisko datu uzturēšana ĢIS

ĢIS inženiertehnisko komunikāciju turētāji (tādi kā elektroenerģijas pārvades un sadales sistēmas operatori, telekomunikāciju operatori u. c.) uztur datus, kas ir saistīti ar fiziskās infrastruktūras aktīviem (infrastruktūras komponentes) un visu saistošo atribūtu informāciju (tehniskie parametri). Elektrotīkla infrastruktūras elementi tiek iedalīti trīs vizualizācijas veidos:

- punkti (piemēram, transformators, balsts);
- līnijas (piemēram, kabeļlīnija, gaisvada līnija);
- poligoni (piemēram, aizsargjoslas buferzona).

2.2.3. ĢIS datu interpretācija un analīze

Ģeotelpiskās analīzes priekšrocība ir iespēja apvienot informāciju no vairākiem neatkarīgiem avotiem un iegūt, kā arī vizualizēt jaunas informācijas kopas, izmantojot tādas datu analīzes funkcionalitātes kā interpolācija, ģeostatistikas simulācija, utīlīti savstarpējo datu kopu apvienošanai un validācijai un jauno informācijas slāņu izveide.

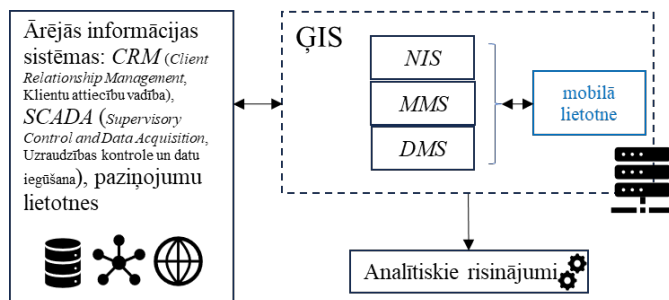
Datu kvalitāte būtiski ietekmē analīzes rezultātu precizitāti, un tas ir jāņem vērā.

2.2.4. ĢIS funkcionālās lietotnes

Sadales operatora infrastruktūras uzturēšanai ĢIS struktūra veidojas no vairākām lietotnēm, pamatlietotnes ir redzamas 2.1. attēlā.

- Tīkla informācijas sistēmā *NIS* (*Network Information System*) – tīkla elementu ģeotelpisko un tehnisko parametru uzturēšanai.

- Tīkla ekspluatācijas pārvaldības sistēma *MMS (Maintenance Management System)* – tīkla apkopes un remonta darbu pārvaldībai.
- Sadales tīkla vadības sistēma *DMS (Distribution Management System)* – tīkla monitoringam un attālinātai vadībai.
- Mobilā ĢIS versija – mobilā lietotne datu pārvaldībai reallaikā (no objektiem).



2.1. att. ĢIS struktūras paraugs [19].

2.3. Digitālā dvīņa koncepta lietojums enerģētikas jomā

Digitālā dvīņa temats ir īpaši aktuāls izpētei, jo starp inteligēntajiem risinājumiem, kas tiek lietoti enerģētikas jomā [20], tas ir vismazāk attīstīts, salīdzinot ar prognozēšanas un automatizācijas risinājumu lietojumiem.

2.3.1. Digitālā dvīņa konceptuālais apskats

Digitālais dvīnis ir formāli organizēts kā digitāli atspoguļots reālās dzīves fiziskās vides attēlojums. Saskaņā ar [21], digitālā dvīņu koncepcija ir balstīta fizisko un virtuālo entītiņu mijiedarbībā fiziskā un virtuālā vidē, izmantojot fiziskus/virtuālus un virtuālus/fiziskus savienojumus. Tas ietver “mērķsadarbību”, t. i., datu apmaiņu starp virtuālo un fizisko partneri. Digitālais dvīnis var ietvert vienu fizisko un virtuālo entītiņu pāri vai vairākas fiziskas entītijas ar atbilstošiem virtuāliem attēlojumiem. [22] reālā dvīņu sistēma un digitālā dvīņu sistēma ir fizisko un virtuālo entītiņu kolekcija. Galvenās virtuālo entītiņu sastāvdaļas, kas nodrošina digitālo dvīņu funkcionalitāti un precizitāti, ir datu vākšana un apstrāde, simulācija un vizualizācija.

2.3.2. Digitālais dvīnis energoefektīvu ēku pārvaldībai

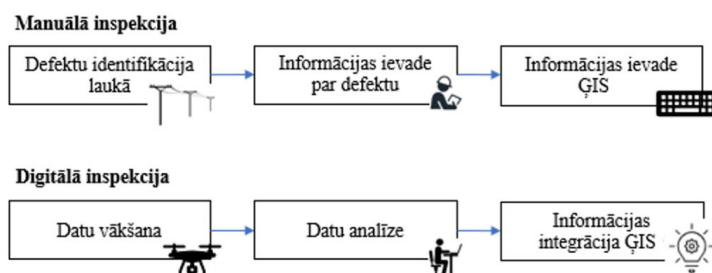
Digitālie dvīņi var atveidot ēkas un to iekārtu digitālo modeli, sniedzot informāciju par energoefektivitāti, apkures un dzesēšanas sistēmām, kā arī citām sistēmām [23]. Tas ļauj uzlabot ēkas pārvaldību un optimizēt energoresursu izmantošanu. Ēku energoefektivitāte ir galvenais jautājums viedo pilsētu kontekstā, un tai būtu jāietver intensīvāka atjaunojamās enerģijas izmantošana.

2.3.3. Digitālais dvīnis atjaunojamajiem enerģijas avotiem

Digitālo dvīņu koncepts tiek lietots arī, lai paaugstinātu efektivitāti atjaunojamo enerģijas avotiem. Tiek piedāvāti parametru vadības matemātiskie modeļi normālā režīma elektroenerģijas sistēmās apstākļiem ar augstu atjaunojamo energoresursu integrāciju. Paneļu izvietošanai ir ietekme uz ražošanu, tāpēc simulācijas rīki dod iespēju izvēlēties optimālāko variantu, ņemot vērā vairākus kritērijus – ziemeļu apgabalu izmantošana palielina ražošanu par aptuveni 10 %, bet kopējā izmantošana un iekšējā atdeves likme ir nedaudz sliktāka. Simulācijas rāda, ka ēnojums dažās virsmās var samazināt saražoto enerģiju pat par 50 %. Tāpēc šīs virsmas nav piemērotas vai ir tikai daļēji piemērotas, lai efektīvi izmantotu saules enerģiju reālās situācijās [24].

2.3.4. Sadales operatora virszemes infrastruktūras digitālais dvīnis

Virszemes tīkla infrastruktūras digitālā dvīņa izveide var radikāli pārveidot tīkla pārvaldības procesus [25]. Digitālā dvīņa izveide ietver datu vākšanu un analīzi, un tā rezultātā tiek veikta automatizēta ar datiem vadīta vidējā sprieguma gaisvadu infrastruktūras pārbaude. 2.2. attēlā redzama pāreja no tradicionālās infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanas uz lauka un cilvēka identificēto defektu reģistrēšanas (ar subjektivitātes iespēju) uz pilnībā attālinātu datu analīzi. Atjauninātā pieeja uzlabo defektu noteikšanas un identificēšanas precizitāti un uzticamību, vienlaikus samazinot tīkla inspekcijas procesa ilgumu.



2.2. att. Manuālās un digitālās inspekcijas procesa plūsmas.

2.4. Kopsavilkums

Nodaļā analizēti nozīmīgi digitālās transformācijas risinājumi enerģētikas sektorā (viedo skaitītāju tehnoloģijas, kas sniedz patēriņa datu kopu detalizētai analīzei; ĢIS lietojums kompleksai datu analīzei; digitālo dvīņu lietojumi), uzsverot to nozīmīgo lomu infrastruktūras pārvaldības un uzturēšanas efektivitātes uzlabošanā. Darbā piedāvāta jauna pieeja – fiziskās infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšana, izmantojot digitālo dvīņa konceptu, kas balstīta infrastruktūras objektu datu apstrādē.

3. LATVIJAS ELEKTROENERĢIJAS SADALES SISTĒMAS INFRASTRUKTŪRAS INSPEKCIJAS PROCESS

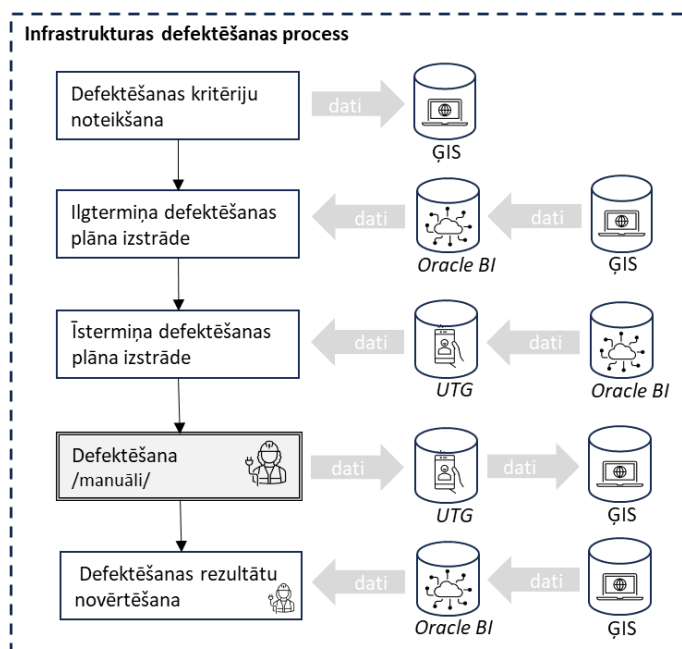
Viens no inženiertehnisko komunikāciju infrastruktūras turētāja pamatuzdevumiem ir uzturēt savā atbildībā esošo infrastruktūru. Infrastruktūras inspekcijas process ir viens no tehniskā tīkla pārvaldības pamatprocesiem, kura ietvaros tiek īstenota nepārtraukta infrastruktūras tehniskā stāvokļa uzraudzība.

3.1. AS “Sadales tīkls” inspekcijas procesa pārvaldība un organizācija

Latvijas lielākā elektrotīkla sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” uzraudzībā ir elektropārvades līnijas 92 407 km [11] garumā. Infrastruktūras vai elektroietaišu inspekcija ir profilaktiskās pārbaudes darbs, kas ir infrastruktūras elementu vizuāla apsekošana, lai atklātu un fiksētu novirzes no tehnisko normatīvu prasībām. Inspekcijas process tiek iedalīts divos virzienos – plānotā (tiek veikta atbilstoši noteiktai periodikai) un ārpuskārtas (tiek veikta neatkarīgi no noteiktās periodikas ar noteiktu mērķi atklāt atkārtotu tehnoloģisko traucējumu (bojājumu) cēloņus vai atklāt defektus pēc pieprasījuma) inspekcija.

Patlaban AS “Sadales tīkls” infrastruktūras plānotās inspekcijas process notiek atbilstoši shēmai, kas redzama 3.1. attēlā. Visas infrastruktūras fiziskā apsekošana norit četru gadu ciklā, to īsteno 115 inspektori visā Latvijas teritorijā, un tā ietver vairākus procesa soļus.

- Inspekcijas kritēriju noteikšana – izstrādāts un uzturēts defektēšanas katalogs saskaņā ar tīkla specifiku un vides apstākļiem.
- Ilgtermiņa inspekcijas plāns četru gadu ciklam – plāns uzturēts ĢIS *MMS* modulī, pārvaldot tīkla uzturēšanas darbus un norādot inspekcijas periodiskumu tehnisko objektu atribūtos.
- Īstermiņa inspekcijas plāns – kārtējā gada plāns, kas sadalīts ceturkšņos, ĢIS *MMS* tiešsaistes datu analīze nodrošina plāna izpildes pārskatus.
- Inspekcija – tīkla elementu tehniskā stāvokļa novērtējums objektos. Inspektori (ar vismaz A elektrodrošības grupu [26]) ĢIS mobilajā lietotnē veic atzīmes par konstatētajiem defektiem objektos.
- Inspekcijas rezultātu novērtēšana – ietver inspekcijas izpildes rādītāju analīzi un kvalitātes pārbaudi, izmantojot biznesa inteliģences risinājumus, ka arī veicot izlases pārbaudes objektos.



3.1. att. Plānotās inspekcijas procesa shēma.

3.2. Vidējā sprieguma infrastruktūras defektu klasifikācija

Vidējā sprieguma infrastruktūras defekts ir jebkuras infrastruktūras komponentes bojājums, kas var ietekmēt tās darbību vai drošību. Atbilstoši AS “Sadales tīkls” definētajam defektu katalogam, defektus var iedalīt divās grupās.

1. Vizuālie defekti – infrastruktūras komponentu vizuālais tehniskā stāvokļa novērtējums, kā arī ar infrastruktūru saistīto aizsargjoslu apstākļu noteikšana.
2. Ģeotelpiskie mērījumi – ģeotelpisko atkāpju noteikšana, kur ietilpst minimālās distances no vadiem līdz zemei laidumos, vadu izregulēšanas mērījumi (nokares) un vadu izvietojums balstos, balstu izsvēršanas noteikšana, veģetācijas esamības noteikšana trašu koridoros.

Papildu defektu grupas gradācijai defekti tiek klasificēti atbilstoši defektu novēršanas steidzamībai.

- Operatīvi bīstams defekts – defekts elektroietaisēs, kas apdraud sabiedrības elektrodrošību no elektrobīstamības viedokļa, kā arī būtiski samazina lietotāju elektroapgādes shēmas drošumu, kas tiešā veidā var izraisīt pārtraukumus un bojājumus elektroīklā, un tos jānovērš iespējami īsā laikā, dispečeram izvērtējot operatīvo situāciju, bet maksimālais novēršanas termiņš ir līdz 48 stundām.

Operatīvi bīstamie vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras defekti

- 6–20 kV GL (gaisvada līnija) izkritis kāsis, kas draud pieskarties pārējiem līnijas elementiem.
- Gaisvada līnijas balsts ir bojāts vai aizlūzis, vai karājas vados.
- 6–20 kV GL uz strāvavadošām daļām atrodas putnu ligzda, zaru krāvums.
- Līnijas gabarīts līdz zemei vai līdz inženierbūvei mazāks par pieļaujamo.
- Redzams bojājums (pārrāvums) sazemējošā vada savienojuma vietā ar zemētāju 6–20 kV GL.
- Augsta steidzamības (bīstams defekts) – konstatētais defekts var radīt apdraudējumu videi un cilvēkam un jānovērš iespējami īsā laikā, ne vēlāk kā 30 kalendārās dienas no defekta konstatēšanas brīža.
- Zemas steidzamības defekts – konstatētais defekts nav bīstams vai nav operatīvi bīstams.

3.3. Kopsavilkums

Nodaļā izklāstīta sadales sistēmas operatora infrastruktūras inspekcijas nozīme efektīvai tīkla pārvaldībai. AS “Sadales tīkls” inspekcijas aptver gan regulārās infrastruktūras pārbaudes, gan ārpuskārtas inspekcijas. Promocijas darbs fokusējas uz sadales sistēmas vidējā sprieguma virszemes infrastruktūru – tīkla elementu defektiem, ietverot mehāniskos bojājumus un ģeotelpiskos mērījumus. Inspekcijas uzlabošana veicina proaktīvu risku identificēšanu, samazinot avārijas un elektroapgādes darbības traucējumu iespējas.

4. ALTERNATĪVĀS METODES DEFEKTU IDENTIFICĒŠANAI

AS “Sadales tīkls” pārvaldībā ir 26 798 km garš vidējā sprieguma virszemes tīkls un 28 646 km garš zemsprieguma virszemes tīkls (2022. gada dati [11]). Esošais inspekcijas process ir pilnībā manuāls, kur tīkla inspektoriem ir jādodas objektos un manuāli jāapseko visas tīkla komponentes, veicot piezīmes par identificētajiem defektiem *UTG* sistēmā. Pēc AS “Sadales tīkls” pietuvināta novērtējuma vidējā sprieguma tīkla inspekcijas normētais ātrums ir 1,4 cilvēkstundas/km, zemsprieguma tīkla inspekcijas normētais ātrums – 3 cilvēkstundas/km. Papildus tīkla inspektoram ir nepieciešams vismaz šāds inventāra komplekts: automašīna; laiva (plūdu gadījumiem); kvadracikls (meža teritorijās un zemesgabalos, kur aizliegts braukt ar automašīnu); laukdators ar *UTG* lietotni; lāzera tālmērs (0,01–100 m); vadu augstuma mērītājs; balstu puvuma pakāpes noteikšanas ierīce.

Ņemot vērā manuālā inspekcijas procesa komplicēto izpildi un apjomīgo darbinieku ekipējumu, pētījumā ir piedāvāts datus balstīts inspekcijas risinājums, ar kuru palīdzību būtu iespējams vienkāršot un automatizēt inspekcijas procesa norisi.

4.1. Vizuālo defektu noteikšanas metodes

Vizuālais tīkla komponentes tehniskā stāvokļa novērtējums ir viena no defektēšanas sastāvdaļām, kuras laikā tiek identificētas jebkādas nevēlamas izmaiņas vai bojājumi infrastruktūras komponentēs. Lai veicinātu procesa digitalizāciju, darbā ir izpētīts attēla datu

lietojums, lai tīkla inspektori veiktu apsekošanu, pētot datus (bez izbraucieniem uz objektiem), kā arī pielāgotu datu analīzes tehnoloģijas, lai maksimāli vienkāršotu procesa izpildi.

4.1.1. Datu tipi defektu identificēšanai

Darba izstrādes gaitā apskatīti potenciālie lietojumi inspekcijas procesa vajadzībām tādiem datu tiptiem kā SAR (sintezētās apertūras radara) attēli, optiskie satelīta attēli, optiskie aerofoto attēli, termiski attēli un ultravioletie attēli.

4.1.1.1. SAR attēli

Sintezētās apertūras radara attēli (*Synthetic Aperture Radar*) ir attēli, kas iegūti, izmantojot sintētisko atstarošanu tehnoloģiju. Šīs tehnoloģijas darbības princips ir šāds: radars sūta radioviļņus uz zemes virsmu, un šie viļņi tiek atstaroti atpakaļ uz radara antenu. Tiek reģistrētas atstarotās viļņu īpašības, ieskaitot to fāzes un amplitūdu, un tiek veikta attiecīgā signāla apstrāde, lai iegūtu attēlu. Izpētīts, ka SAR ir efektīvs veģetācijas kartēšanai un uzraudzībai. Tas ļauj identificēt blīvus krūmus un kokus, kas var apdraudēt elektrotīkla līnijas. SAR var izmantot arī defektu identificēšanai, piemēram, lūzušus balstus vai kokus, kas iegāzušies elektrotīkla līnijās [27], [28].

4.1.1.2. Optiskie satelīta attēli

Optiskie satelīta attēli ir attēli, kas iegūti ar optiskajiem sensoriem, kas uzstādīti uz kosmiskajiem satelītiem, kas uztver dažādu veidu elektromagnētisko viļņu joslas, redzamo gaismu, infrasarkano un ultravioleto starojumu. Optisko satelīta attēlu zemā izšķirtspēja ir līdz 10 m, komercpieāvājumos esošā augstākā izšķirtspēja ir 30 cm [29]. Satelīta attēli var būt neefektīvi mākoņainos laikapstākļos un dienas tumšajā laikā, taču tie piedāvā vairākas priekšrocības elektrotīkla defektēšanā. Tie aptvert lielas teritorijas, ļauj identificēt dažādus objektus un materiālus. Galvenokārt satelīta attēli tiek izmantoti veģetācijas monitoringam elektrotīkla aizsargjoslā. Viens no lietojuma piemēriem ir Lielbritānijas elektroenerģijas un dabasgāzes uzņēmums “*National Grid*”, kas izmanto optiskos satelīta attēlus veģetācijas pārvaldībai [30].

4.1.1.3. Optiskie aerofoto attēli

Optiskie aerofoto attēli (*RGB* krāsu modelis) ir attēli, kas iegūti no gaisa ar fotoaparātu vai kameru. Šie attēli tiek uzņemti no lidmašīnām vai bezpilota gaisa kamerām un sniedz augstas izšķirtspējas attēlus no Zemes virsmas. Tie nodrošina detalizētu un precīzu informāciju – visbiežāk sastopamā izšķirtspēja aerofoto ir 0,1–0,001 m/px, kas var nodrošināt infrastruktūras defektu redzamību.

4.1.1.4. Termiskie attēli

Termiskie attēli ir attēli, kas iegūti, mērot objektu vai apkārtējās vides temperatūru un attēlojot to krāsu kartē, kurā var atšķirt dažādus temperatūras līmeņus. Šie attēli izmanto termiskās kameras vai infrasarkano (*infrared; IR*) kameru tehnoloģiju, lai uztvertu infrasarkanā

starojuma (siltuma) izstarojumu no objektiem un tos attēlotu vizuāli. Šos attēlus var izmantot, lai identificētu bojājumus elektrotīkla elementos, kas vada elektrību, tādējādi var noteikt to temperatūru un analizēt un identificēt atkāpes no normas. Termiskie attēli ir vērtīgi dati, ko var izmantot elektrotīkla defektēšanā tādos objektos kā apakšstacijas, transformatori, kur siltuma izmaiņas signalizē par iespējamo defektu [27], [28], taču līniju infrastruktūrā (posmos, kur nav aktīvu iekārtu) temperatūras izmaiņas identificēt ir grūti, jo šādos attēlos nevar izšķirt mehāniskus bojājumus.

4.1.1.5. Ultravioletie attēli

Ultravioletie (UV) attēli ir attēli, kas iegūti ar speciālām kamerām, kas spēj uztvert ultravioletā starojuma spektru, ko cilvēka acs nespēj redzēt. UV attēlu datus ir iespēja izmantot, lai identificētu korona izlādes, kas ir nevēlamas elektrības plūsmai, jo var izraisīt elektrotīkla līniju defektus un enerģijas zudumus [31].

4.1.1.6. Datu tipu salīdzinājums

Atbilstoši 4.1. tabulā apkopotajam salīdzinājumam par datu izmantošanu elektropārvades elektropārvades virszemes infrastruktūras vizuālā novērtējuma vajadzībām vispiemērotākais datu avots ir optiskie aerofoto attēli – RGB dati (RGB krāsu modelis).

4.1. tabula

Datu avoti vizuālo defektu noteikšanas metodēm

Datu veids	Priekšrocības	Ierobežojumi	Potenciālais pielietojums infrastruktūras defektēšanas procesā
SAR dati	Izmanto radioviļņu starojumu. Tos neietekmē laikapstākļi. Dienas un nakts darbība. Iespējama augsta izšķirtspēja (atkarībā no budžeta).	Ierobežota krāsu izšķirtspēja. Komplicēti interpretējami (prasa specifiskas zināšanas par radaru un attēla radīšanas procesu). Salīdzinoši liels datu apjoms.	Veģetācijas monitorings. Pēcvētru monitorings (neplānotās apskates).
Optiskie satelīta dati	Izmanto redzamo gaismu un citas spektrālās joslas. Krāsaini attēli. Iespējama augsta izšķirtspēja (atkarībā no budžeta).	Apgaismojuma un laika ierobežojumi: mākoņi, migla, nokrišņi, ziemas periods. Datu pieejamība noteiktā teritorijā un periodā.	Veģetācijas monitorings.
Optiskie aerofoto dati	Elastība datu ieguvē, īpaši no helikopteriem vai bezpilota lidaparātiem. Iespējama augsta izšķirtspēja un detalizācija (atkarībā no budžeta).	Apgaismojuma un laika ierobežojumi: mākoņi, migla, nokrišņi. Datu iegūšanas metode var ietekmēt attēlu kvalitāti.	Veģetācijas monitorings. Infrastruktūras elementu vizuālā stāvokļa novērtējums.
IR dati	Izmanto infrasarkanā starojumu. Termiskā informācija. Dienas un nakts darbība.	Datu apstrādes sarežģītība (prasa specifiskas zināšanas). Apgaismojuma un laika ierobežojumi: mākoņi, gaisa piesārņojums.	Elektropārvades tīkla elementu termiskā uzraudzība.
UV dati	Izmanto ultravioletā starojumu. Dienas un nakts darbība. Atšķirīga informācija – iespēja iegūt papildu informāciju, kas nav redzama ar citiem spektrālajiem	Datu apstrādes sarežģītība (prasa specifiskas zināšanas). Apgaismojuma un laika ierobežojumi: mākoņi, putekļi, gaisa piesārņojums.	Elektropārvades tīkla elementu novērtējums (korozija, korona izlādes).

4.1. tabula (turpinājums)		
	joslu datiem, tādējādi ļaujot identificēt un analizēt objektus un defektus, kas citādi būtu neredzami.	

4.1.2. Optisko aerofotoattēlu iegūšanas ierīces

Pētījums rāda, ka optiskie aerofoto attēli ir vispiemērotākie tīkla infrastruktūras vizuālajam tehniskajam novērtējumam. *RGB* attēlu iegūšanai tiek izmantotas optiskās kameras, kas uztver sarkano, zaļo un zilo spektru, nodrošinot inspekcijām nepieciešamo krāsu precizitāti un kvalitāti. Šādas kameras ir sastopamas dažādās ierīcēs – mobilajos telefonos un digitālajās kamerās.

Nemot vērā faktu, ka attēlu kopu ir jāuzņem kustībā (uzņemot attēlus no gaisa vai zemes, piemēram, apsekojot infrastruktūru ar bezpilota gaisakuģu (BGK) jeb dronu palīdzību, tad kameras neatņemamai sastāvdaļai ir jābūt *Gimbal*. *Gimbal* ir mehānisms, kas nodrošina kameras stabilizāciju, saglabājot tās orientāciju nemainīgu pat tad, ja apkārtējās vides apstākļi mainās vai kameras operators veic kustības. Tas ietver vairākas rotējošas asis, kas ļauj kameras iekārtai brīvi kustēties ap visiem trim griezumiem. Pētījumā ietvaros tika salīdzināti *Gimbal* un kameras *DJI Mavic 2 Pro* [32], *DJI Mavic 3 Pro* [33] un *DJI Mini 4 Pro* [34] BGK modeļiem parametri.

4.1.3. Transportlīdzekļu veidi optisko aerofotoattēlu datu vākšanai

Optisko aerofoto datu vākšanai izmanto speciāli aprīkotas iekārtas ar attiecīgiem sensoriem un kameru sistēmām. Tie veic precīzus lidojumus virs interesējošiem objektiem, iegūstot augstas izšķirtspējas *RGB* attēlus. 4.2. tabulā apkopoti dažādi transporta veidi datu vākšanai, norādot to priekšrocības un ierobežojumus.

4.2. tabula

RGB datu vākšanas transportlīdzekļu salīdzinājums inspekcijas procesa vajadzībām

Datu vākšanas transportlīdzeklis	Priekšrocības	Ierobežojumi
Manuāla metode (cilvēkresurss)	Attālums no infrastruktūras. Elastība datu vākšanā (pielāgo situācijai dabā, maina datu vākšanas leņķi, apjomus).	Apgrūtināta piekļuve meža, purvu teritorijās. Ierobežots ātrums (līdz 6 km/dienā). Kravnesība (nav iespējas paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus). Drošības risks personālam.
Robots	Attālums no infrastruktūras. Ir iespēja automatizēt misijas maršrutu.	Ierobežots ātrums (līdz 6 km/dienā). Apgrūtināta caurstaigājamība meža, purvu teritorijās (šķēršļu pārvarēšana). Elektronikas un sensoru jutīgums (elektrotīkla magnētiskā lauka ietekme)
Bezpilota gaisakuģis (drons)	Attālums no infrastruktūras. Ātrums (līdz 30 km/dienā). Ir iespēja automatizēt misijas maršrutu. Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus). Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.	Regulācijas ierobežojumi lidojumiem tikai redzamības zonā.

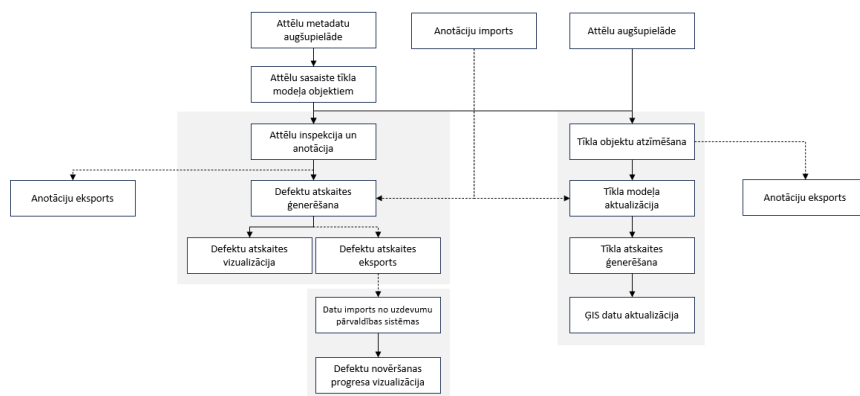
4.2. tabula (turpinājums)		
Pilotēts gaisakuģis (helikopters)	Ātrums (līdz 200 km/dienā). Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt RGB, IR, LIDAR datus). Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.	Attālums no infrastruktūras (± 150 m).
Satelīts	Ātrums (momentāns). Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.	Attālums no infrastruktūras. Nav elastības datu vākšanā (tikai optiskie un radara dati).

Papildus transporta veida tehniskajām priekšrocībām un ierobežojumiem datu vākšanas transporta izvēle ir atkarīga no tādiem parametriem kā operativitāte, apskates detalizācija, budžeta apjoms un nākotnes perspektīvas.

4.1.4. Datu analīze vizuālo defektu noteikšanai

Optisko aerofoto datu apstrāde ietver attēlu, kas iegūti ar optiskiem sensoriem, analīzi, lai maksimāli automatizēti identificētu vizuāli redzamus defektus elektrotīkla infrastruktūrā.

4.1. attēlā redzama datu apstrādes shēma, kurā attēli un to metadati tiek integrēti ar ĢIS aktīvu datiem, regulāri aktualizējot un papildinot informāciju ar augstākās kvalitātes datiem.



4.1. att. Potenciālā attēlu datu analīzes darbplūsmas.

Infrastruktūras defektu identifikācijai jāizmanto automatizētus procesus ar mašīnmācīšanās algoritmiem, piemēram, *YOLOv4* [35], *Faster R-CNN* [36] un *Mask R-CNN* [37].

4.2. Ģeotelpisko defektu noteikšanas metodes

Otra būtiskākā inspekcijas komponente ir infrastruktūras ģeotelpiskie mērījumi, kas nodrošina sabiedrības drošību, pārbaudot attālumu starp vadiem un zemi vai balstu stabilitāti, identificējot izsvēršanas gadījumus. Mērījumu precizitāte ir svarīgs faktors rezultātu sasniegšanai. Patlaban AS “Sadales tīkls” visus mērījumus veic manuāli, izmantojot cilvēkresursus un kalibrētas mēriekārtas, kas ir laikietilpīgs process, jo mērījumi jāveic ik pēc 60–70 metriem, kas ir ekvivalents viena laiduma vidējam garumam. 3D modeļošana jeb digitālais dvīnis ļauj uzraudzīt, prognozēt un kontrolēt objektu stāvokli reālā laikā [38].

4.2.1. Datu tipi ģeotelpisko mērījumu īstenošanai

Punktu mākonis ir datu punktu kopums telpā, kas attēlo objektu trīs dimensiju (3D) formu, ko nosaka koordinātu sistēma. Šos punktus iegūst, izmantojot 3D skenerus – *LIDAR*, kas mēra virsmas, atspoguļojot lāzera impulsus no dažādiem objektiem. *LIDAR* impulsi var atstaroties vairākas reizes, atspoguļojot dažādus objektus (koku galotnes, zemes virsmu, infrastruktūras elementus). Papildus pozicionālajām vērtībām (x , y , z) sistēma saglabā arī citus atribūtus – intensitāti un atstarošanas reižu skaitu. Punktu mākoņi tiek izmantoti 3D modeļu un digitālo dvīņu izstrādei.

4.2.2. *LIDAR* sensors

LIDAR sistēmas nosūta gaismas impulsus un mēra to atgriešanās laiku, lai noteiktu attālumu līdz objektam, izmantojot gaismas ātrumu. Tās darbības princips ir šāds: lāzera stars atspoguļojas no objekta un atgriežas sensorā. Ar 360° skatu var iegūt apkārtnes punktu mākonī. *LIDAR* piedāvā augstu precizitāti (daži centimetri līdz 100 m attālumā), taču tā veiktspēju var ietekmēt slikti laika apstākļi. *LIDAR* sensori tiek izmantoti gan attāluma mērīšanai un infrastruktūras ģeotelpiskajiem mērījumiem, gan atmosfēras monitorēšanai. Darba izstrādes gaitā veikts trīs dažādu sensoru (*DJI Zenmuse L2*, *Yellow Scan Mapper*, *CHCNAV ALPHAAIR*) tehnisko parametru salīdzinājums, ņemot vērā tādus parametrus kā absolūtā precizitāte, svars, lāzera klase, punktu blīvums, impulsu atgriešanas skaits, precizitāte, atkārtojamība, redzamības zona un skenēšanas ātrums. Virszemes infrastruktūras inspekcijā īpaša uzmanība jāpievērš punktu blīvumam un precizitātei. Vidējā sprieguma kabeļi, piemēram, *AXLJ-F 3 × 50/16 mm²* ar 55 mm diametru, ir mazgabarīta elementi, kuriem nepieciešams augsts punktu blīvums, lai *LIDAR* datu apstrādes procesā precīzi identificētu tos visā garumā.

4.2.3. Transportlīdzekļi punktu mākoņa datu vākšanai

LIDAR datu iegūšanai var izmantot dažādus transporta veidus, to priekšrocību un trūkumu salīdzinājums apkopots 4.3. tabulā, ņemot vērā inspekcijas procesa prasības.

4.3. tabula

LIDAR datu vākšanas transporta salīdzinājums inspekcijas procesa vajadzībām

Datu vākšanas transports	Priekšrocības	Ierobežojumi
Manuāla metode (manuāli nēsājami <i>LIDAR</i> skeneri)	Spēj piekļūt grūti sasniedzamām vietām (kur nav atļauta gaisa satiksme). Augsta detalizācijas pakāpe.	Ierobežots ātrums (līdz 6 km/dienā). Kravnesība (nav iespējas paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus). Drošības risks personālam.
Automatizētas (mobīlie <i>LIDAR</i> sensori)	Mobilitāte. Ātrums (līdz 40 km/h).	Ierobežota piekļuve bezceļa vietām. Ierobežots attālums no infrastruktūras.
Bezpilota gaisakuģis (drons)	Ātrums (līdz 30 km/dienā). Ir iespēja automatizēt misijas maršrutu. Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus). Augsta precizitāte. Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.	Regulācijas ierobežojumi lidojumiem tikai redzamības zonā. Papildu lidojuma licences, saskaņošanas atbilstoši regulējumiem. Ierobežots lidojuma laiks.

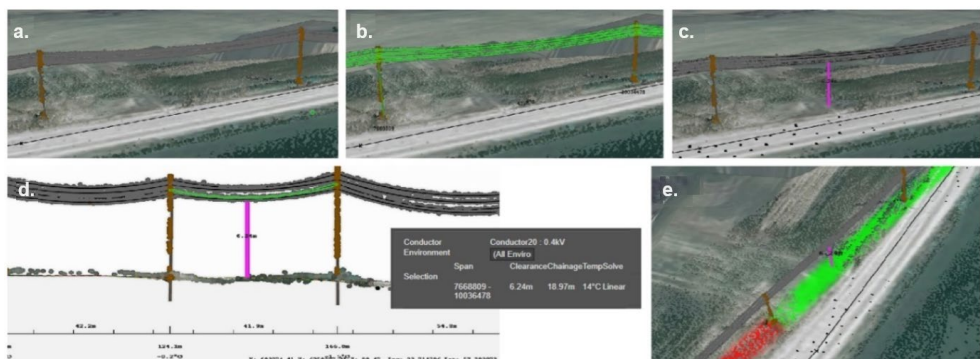
4.3. tabula (turpinājums)		
Pilotēts gaisakuģis (helikopters)	Ātrums (līdz 200 km/dienā). Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus). Augsta precizitāte. Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.	Izmaksas. Papildu lidojuma licences, saskaņošanas atbilstoši regulējumiem. Kompetents personāls.
Pilotēts gaisakuģis (lidmašīna)	Ātrums (līdz > 500 km/dienā). Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus). Augsta precizitāte. Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.	Izmaksas. Nepieciešama piekļuve lidostām. Papildu lidojuma licences, saskaņošanas atbilstoši regulējumiem. Kompetents personāls.

Izvēloties *LIDAR* datu vākšanas transportu, jāņem vērā apsekošanas teritorijas lielums, ģeogrāfiskās īpatnības, datu detalizācijas prasības un pieejamais budžets.

4.2.4. Datu analīze ģeotelpisko defektu noteikšanai

Infrastruktūras ģeotelpisko atkāpju noteikšanai palīdzēs *LIDAR* datu analīze. Datu apstrāde inspekcijām ir jāsadala piecos soļos, kā redzams 4.2. attēlā.

- Datu tīrīšana un klasifikācija, kuras rezultātā ir jānoņem nepareizie dati, kas radušies no putekļiem, lietus vai citiem ārējiem faktoriem. Tad datus ir nepieciešams klasificēt – sadalīt pa komponentēm: zeme, veģetācija, infrastruktūra (balsti, elektrolinijas), ēkas, saskaņā ar LAS 1.4. [39] klasifikācijas kodu.
- Datu vektorizācija un tīkla modeļa izbūve – objektu ģeometriskais attēlojums.
- Datu analīze. Šis bloks ietver ģeotelpiskos mērījumus – attālumu no objektiem (starp elektroliniju un zemi, attālumu no elektrolinijām līdz tuvākajiem koku zariem, krūmiem vai citiem objektiem), kā arī struktūru slīpumu mērījumus iespējamās deformācijas noteikšanai.
- Atskaišu ģenerēšanas process, kas ietver detalizētu datu pārskatu sagatavošanu ar mērķi identificēt anomālijas un atkāpes no iestatītajiem sliekšņiem un noteikt potenciālus riskus un bīstamības zonas.
- Rezultātu vizualizācija – ģeotelpiskais pārskats nodrošinās integrētu un strukturētu datu attēlojumu, kas ļaus veikt pamatotu un efektīvu lēmumu pieņemšanu, balstoties uz analizētiem datiem.



4.2. att. *LIDAR* datu apstrādes process: a) klasifikācija; b) vektorizācija; c) analīze; d) atskaišu izveide; e) vizualizācija.

4.3. Kopsavilkums

Nodaļā apskatītas alternatīvas metodes vizuālo un ģeotelpisko defektu identificēšanai un piedāvāts digitālās inspekcijas risinājums (4.3. att.), kura komponentes ir:

- datu vākšanas transports;
- sensori datu iegūšanai;
- dati – optiskie aerofoto attēli jeb *RGB* dati vizuālo defektu noteikšanai, punktu mākonis jeb *LIDAR* dati ģeotelpisko defektu noteikšanai;
- datu apstrādes rīki;
- informācijas integrācijas (ja nepieciešams procesa realizācijai).



4.3. att. Digitālās inspekcijas risinājuma piedāvājums.

Tālākais darba solis ir risinājuma praktiskā validācija.

5. DIGITĀLĀS INSPEKCIJAS RISINĀJUMU EKSPERIMENTĀLAIS PĒTĪJUMS

Šajā nodaļā apskatīta digitālās inspekcijas empīriskā pārbaude un tās praktisko piemērojamību reālās procesa īstenošanas novērtējums. Darba praktiskā daļa tika realizēta sadarbībā ar AS “Sadales tīkls”, kas nodrošināja tehnisko un metodoloģisko atbalstu.

Pētījuma mērķis ir empīriskā teorijas verifikācija – praktiski apstiprināt digitālo alternatīvu esošajai metodoloģijai tīkla tehniskā stāvokļa novērtēšanai ar eksperimentāliem un praktiskiem pierādījumiem, identificēt saimnieciski izdevīgāko un perspektīvāko metodi.

Pētījuma tvērums – paredzēts veikt defektēšanu AS “Sadales tīkls” 650 km garām gaisvadu elektropārvades līnijām, kurā ietilpst 550 km vidējā sprieguma un 100 km zemsprieguma līniju, izmantojot digitālās defektēšanas tehnoloģijas un metodes.

Pētījuma uzdevumi

1. Noteikt prasības *RGB* un *LIDAR* datu kopu iegūšanas procesam un datu apstrādes rīku funkcionalitātēm, ņemot vērā AS “Sadales tīkls” infrastruktūras inspekcijas procesa specifiskās vajadzības.

2. Veikt eksperimentālo *RGB* datu kopas vākšanas un apstrādes pētījumu un novērtēt infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālās inspekcijas metodes piemērotību reālos apstākļos.
3. Veikt eksperimentālo *LIDAR* datu kopas vākšanas un apstrādes pētījumu un novērtēt infrastruktūras ģeotelpisko mērījumu veikšanas metodes piemērotību reālos apstākļos.

5.1. Datu iegūšanas process

Datu iegūšana ir kritiska pētījumu procesa daļa, kas nodrošina nepieciešamo informāciju, lai sasniegtu noteikto mērķi.

5.1.1. Datu kopu iegūšanas tehniskie parametri

Pētījuma eksperimenta realizācijai ir izstrādātas tehniskās prasības *RGB* un *LIDAR* datu kopu parametriem saskaņā ar inspekcijas procesa vajadzībām, kas ir jānodrošina datu vākšanas īstenošanā, tās apkopotas 5.1. tabulā.

5.1. tabula

RGB/LIDAR datu vākšanas tehnisko prasību parametri

Parametrs	Tehniskās prasības apraksts	
	<i>RGB</i> dati	<i>LIDAR</i> dati
Datu iegūšanas realizācijas periods	Aprīlis–jūnijs, septembris (Latvijas valsts teritorijā).	
Datu kopas galversijas piegāde	Datu piegāde uz AS “Sadales tīkls” <i>FTP</i> serveri. Jānodrošina datu klasifikācija mapēs pēc aktīvu grupām un identifikatoriem.	
Datu vākšanas realizācija	Ievērot Latvijas valsts normatīvos aktus un nodrošināt visu nepieciešamo nosacījumu izpildi [40], tajā skaitā, ja nepieciešams, informēt iedzīvotājus par plānotajiem darbiem īsi pirms datu vākšanas īstenošanas (gadījumos, kad notiks datu vākšana apdzīvotu vietu teritorijā).	
Datu formāts	<i>JPEG, JPG</i>	<i>LAS, LAZ</i>
Koordinātu sistēma	<i>WGS84</i> vai cita vispārpieņemta (Latvijā izmantotā <i>LKS-92 TM</i> [41])	
Datu kopas apjomi	Punktveida objektiem vismaz 4 attēli (no tiem 2 ar tālumaīņu) slīpi divos vertikālos virzienos un no augšas. Līnijveida objektiem ir jānodrošina redzamība visa laiduma garumā, attēlu skaits atkarībā no laiduma garuma.	100 % datu pārklājums. 100 % datu pilnīgums – koridora platums ir noteikts līdz 30 metriem katrā pusē no līnijas centrālās ass koku galotņu augstuma līmenī.
Datu kvalitātes kritēriji	Kvalitātes metrika ir nodrošināt 2 cm vizuālā defekta redzamību. Spilgtums/kontrasts: attēliem jābūt viendabīgiem kvalitātes ziņā, kur objekti ir skaidri redzami — attēla kvalitātes konsekvence visā datu kopā ir svarīga modeļu apmācībai un datorredzes uzdevumiem. Mērķa izšķirtspēja (attēla izmērs): ir jānodrošina optimāla izšķirtspēja, lai tiktu konstatēts 2 cm liels defekts.	Precizitāte un atkārtojamība (<i>accuracy/precision</i>) – <i>LIDAR</i> sistēmai jānodrošina precizitāte un atkārtojamība ar ražotāja specifikācijā norādīto kļūdas vērtību mazāku par 5 cm. Punktu mākoņa blīvums – vismaz 50 pt/m ² Impulsu atgriešanās: <i>LIDAR</i> ierīcei jābūt spējīgai uztvert vismaz divas atgriezeniskās impulsu atbildes. Kvalitātes metrika ir nodrošināt to, ka nav bojātu datu, kā arī punktu mākoņos nedrīkst būt spraugas vai caurumi, kas varētu ietekmēt datu pilnīgumu un precizitāti.
Metadati un ģeoreference	Ģeogrāfiskās atzīmes (ar noteiktu precizitāti), kameras leņķis, <i>FOV</i> (<i>Field of View</i>) (skata laukums), datuma un laika zīmogi, avota informācija.	Datu kopai jābūt papildinātai ar atbilstošiem metadatiem un precīzi ģeoreferencētai, lai nodrošinātu integrāciju ĢIS un kartēšanas programmatūrā, iekļaujot arī temperatūras datus, datuma un laika zīmogus.

5.1. tabula (turpinājums)		
		Punktu atribūti – datu punktiem jāietver atribūti: intensitātes vērtības vai klasifikācijas kategorijas.
Apzīmējumi	Datu kopas komponentiem jābūt nosauktiem atbilstoši to saturam, nodrošinātajām etiķetēm jābūt pareizi saskaņotām ar attēlu saturu.	Jāiekļauj apzīmējumi, kas atbilst plānotajai datu vākšanas misijai.
Dokumentācija	Jānodrošina dokumentācija, kas ietver informāciju par datu kopas izcelsmi (datu vākšanas ierīcēm), vākšanas metodēm, datu kopas tehniskajiem parametriem un jebkādam īpašām specifikācijām.	Jānodrošina detalizēta dokumentācija par datu avotiem, vākšanas metodoloģiju, tehniskajiem parametriem, <i>LIDAR</i> sensora kalibrāciju un specifiskiem faktoriem vai ierobežojumiem, kas var ietekmēt datu kvalitāti vai izmantojamību

5.1.2. Datu kopu iegūšanas scenārijs

Veiktā eksperimenta tvērumā infrastruktūras elementu apjomi ir definēti 5.2. tabulā. Pētījuma ģeogrāfiskais tvērums aptver Talsu un Tukuma novadu reģionā esošo tīklu, kurā tiek veikta viena perioda inspekcijas apjoma analīze. Šajā reģionā tiek pētīts, novērtēts un analizēts elektrotīkla infrastruktūras tehniskais stāvoklis, izmantojot piedāvāto risinājumu (4.3. att.).

5.2. tabula

RGB un LIDAR datu kopas plānotie apjomi

Vidējā sprieguma elektropārvades līnijas			Zemsprieguma elektropārvades līnijas		
km	Balstu skaits	Pārlaidumu skaits	km	Balstu skaits	Pārlaidumu skaits
550	7990	8426	100	2352	2508

Datu kopu iegūšanai tika izvēlētas konkrētas tehniskās ierīces, kas nodrošina 5.1. tabulā definētās prasības, lai atbilstoši pētījuma mērķiem un inspekcijas procesa vajadzībām savāktu un apstrādātu nepieciešamo informāciju.

- *RGB* datu kopas iegūšanai tika izmantots bezpilota gaisakuģis *DJI Mavic 2 Pro*, kas ir aprīkots ar iebūvēto 20 miljonu pikseļu kameru.
- *LIDAR* datu kopas iegūšanai tika izmantots bezpilota gaisakuģis *DJI Matrice 300RTK* ar uzstādītu *YellowScan Mapper LIDAR* sistēmu.

Izejas dati maršrutu plānošanai un datu apjoma noteikšanai tika apkopoti no AS “Sadales tīkls” ĢIS 5.1. attēlā redzamajā formātā.

a.

Iezīme	ID	Iezīme	ID	Tabula	Tabula	Klase	Klase	Grupa	Izskats	X	Y	X2	Y2	ĢIS datu veids
Talsi-1	cbfg8	330718E0189	2.05E+08	201	VS līnijas elementi	1006	AS-3x35	20 kV darba spr.	Kalheadu līnijas	76.10570561	347947.8398	414968.1164	347807.9727	415033.1445 Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10)
Talsi-1	cbfg8	330718E0189	2.05E+08	201	VS līnijas elementi	1006	AS-3x35	20 kV darba spr.	Kalheadu līnijas	77.93623338	347936.1231	415358.8203	347576.7188	415426.0625 Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10)

b.

Iezīme	ID	Iezīme	ID	Klase	Klase	Grupas	Grū	X	Y	X (WGS)	Y (WGS)	Iezīn	Izg	Pastā	Pastaba esamīb
Talsi-1	cbfg8	330718E0189	2.05E+08	600	VS koka l	1092	Koka	347807.973	415033.145	57.2653962	22.5912176	6	2018	-	BEZ pastabiem
Talsi-1	cbfg8	330718E0189	2.05E+08	600	VS koka l	1092	Koka	347769.32	415098.762	57.2650613	22.5923185	5	2018	-	BEZ pastabiem

5.1. att. Izejas dati: (a) līniju veida elementiem; b) punktteida elementiem) ĢIS datubāzes lidojuma plānošanai.

5.1.3. Datu kopu iegūšanas realizācijas parametri

Lai nodrošinātu stabilu *RGB* un *LIDAR* datu ieguvu inspekcijām, nepieciešama darbplūsma, kas ietver koordinēšanu, maršrutu plānošanu, datu vākšanu un apstrādi kvalitātes validācijai. 5.3. tabulā apkopotas nepieciešamās darbības un kompetences.

Datu iegūšanas realizācijas organizācijas aktivitātes

Realizācijas komponentes	Darbības/uzdevumi	Kompetences
Datu iegūšanas operacionālā vadība	Komunikācijas koordinēšana starp visiem iesaistītajiem. Datu vākšanas procesu koordinēšana. Procesā plānoto rezultātu sasniegšana.	Projektu vadības prasmes. Resursu vadības pieredze. Plašas zināšanas par BGK darbību veikšanu un lidojumu plānošanu. Pieredze un zināšanas sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā.
Lidojumu plānošana	Lidojumu atļauju pieteikumu (Civilās aviācijas aģentūra) un lidojumu maršrutu plānošanas nodrošināšana. Komunikācijas koordinēšana starp operacionālo vadību un pilotiem.	Plašas zināšanas par BGK darbību veikšanu un lidojumu plānošanu. Pieredze un zināšanas sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā. A1/A3 kategorijas pilotu apmācība, A2 kategorijas apmācība. <i>LVS-EN 50110-1:2013</i> – elektrodrošības apmācība.
<i>LIDAR</i> datu kopas vākšana	Lidojumu īstenošana. <i>LIDAR</i> datu iegūšanas nodrošināšana. BGK un <i>LIDAR</i> sensora darbības nodrošināšana.	Plašas zināšanas par BGK darbību veikšanu un lidojumu plānošanu. Pieredze gaisvadu elektrolīniju inspekcijās un BGK lidojumu veikšanā (vismaz 200 lidojumu stundas reģistrētas). A1/A3 kategorijas pilotu apmācība, A2 kategorijas apmācība, specifiskas kategorijas apmācība. <i>LVS-EN 50110-1:2013</i> – elektrodrošības apmācība
<i>RGB</i> datu kopas vākšana	Lidojumu īstenošana. <i>RGB</i> attēlu iegūšanas nodrošināšana. BGK darbības nodrošināšana.	Plašas zināšanas par BGK darbību veikšanu un lidojumu plānošanu. Pieredze gaisvadu elektrolīniju inspekcijās. A1/A3 kategorijas pilotu apmācība, A2 kategorijas apmācība. <i>LVS-EN 50110-1:2013</i> – elektrodrošības apmācība.
Datu analīze	<i>RGB</i> un <i>LIDAR</i> datu pārvaldība. Datu kopas kvalitātes pārbaude, apstiprināšana. Komunikācijas koordinēšana starp datu apstrādes un vākšanas pusēm.	Pieredze gaisvadu elektrolīniju inspekcijās. Datu analītikas prasmes. Pieredze ar ĢIS lietotnēm un ģeotelpisko datu analīzi. Plašas zināšanas par BGK darbību veikšanu un lidojumu plānošanu. <i>LVS-EN 50110-1:2013</i> – elektrodrošības apmācība.

5.1.4. Eksperimenta rezultātu kopsavilkums

Šajā nodaļā aprakstīta veiktā *RGB* un *LIDAR* datu vākšanas metodes praktiskā validācija ar bezpilota lidaparātiem, lai identificētu elektrolīniju defektus uzturēšanai un inspekcijai, balstoties iegūto datu apstrādes rezultātos. Rezultātā tika savāktas *RGB* (0,79 TB, 159 235 faili) un *LIDAR* (4,02 TB, 828 faili) datu kopas, aptverot 550 km vidējā sprieguma gaisvadu līnijas un 100 km zemsprieguma gaisvadu līnijas.

Pētījumā iegūtie rezultāti par datu vākšanu un AS “Sadales tīkls” esošo pieredzi par Latvijas vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras inspekcijām apkopoti salīdzinājumā (5.4. tab.).

Datu vākšanas efektivitātes salīdzinājums. Bezpilota lidaparātu un manuālās metodes analīze

Kritērijs	Datu vākšana ar bezpilota lidaparātu palīdzību	Manuālā defektēšana
Ātrums	20 km/dienā (<i>RGB</i> datu kopa)	6 km/dienā

5.4. tabula (turpinājums)		
	30 km/dienā (<i>LIDAR</i> datu kopa)	
Datu apjoms	Liels, daudzveidīgs (*.jpg, *.las)	Ierobežots (balstīts eksperta lēmumā objektā, atkarīgs no piekļuves, informācija tikai par fiksēto defektu)
Drošība	Augsta, attālināta vadība	Zema, paaugstināts risks
Pieejamība	Laba, neatkarīga no zemes apstākļiem	Ierobežota, atkarīga no piekļūšanas objektiem (meži, purvi)
Elastība	Augsta, ātra pielāgošanās	Zema, lēna pielāgošanās (papildu speciālais ekipējums)

Digitālā inspekcija ar BGK būtiski uzlabo elektrolīniju inspekcijas efektivitāti (datu iegūšana līdz 20 km/dienā), drošību (mazinot riskus sarežģītos vides apstākļos) un precizitāti, salīdzinot ar manuālajām metodēm. Šī nodaļa kalpo kā pamats datu analīzei un secinājumiem pētījuma mērķu sasniegšanai.

5.2. Datu analīzes process

Saskaņā ar darba nodaļā “Alternatīvās metodes defektu identificēšanai” izklāstīto, digitālās inspekcijas otrais posms ir datu analīze un defektu identificēšana, lai precīzi novērtētu infrastruktūras tehnisko stāvokli. Šis posms ietver savāktu datu pārskatīšanu, priekšapstrādi un analīzi, izmantojot mākslīgā intelekta objektu atpazīšanas modeļus, lai identificētu vizuālos defektus. Vizuālie defekti attiecas uz tīkla elementu konstrukciju mehāniskajiem bojājumiem, savukārt ģeotelpiskie defekti – uz veģetāciju, attālumu noteikšanu un balstu un vadu izsvēršanās. Precīza analīzes rīku un metožu izvēle ir būtiska efektīvas datu apstrādes nodrošināšanai.

5.2.1. Datu kopu apstrādes rīku funkcionalitātes prasības tehniskie parametri

Ir izstrādātas tehniskās prasības datu apstrādes programmatūrai (5.5. tab.), kas ietver vispārējā sistēmas moduļa funkcionālās un nefunkcionālās (veiktspējas, saskarnes un drošības) prasības, kā arī specifiskas funkcionalitātes *LIDAR* datu ģeotelpiskai analīzei un *RGB* attēlu vizuālo defektu analīzei.

5.5. tabula

Datu apstrādes programmatūras tehnisko prasību parametri inspekcijas procesa vajadzībām

Prasības tips	Prasību apraksts
Vispārējais sistēmas modulis	
Funkcionāls	IS nodrošina datu analīzes procesu <i>LIDAR</i> datu kopai, <i>RGB</i> attēlu datu kopai, ĢIS datiem (tīkla elementa ĢIS datu kopa, atribūtu datu kopa (apkopes dati)) (atbilstoši tehniskās defektēšanas biznesa prasībām – defektu katalogam)
Funkcionāls	IS nodrošina automatizēto ģeotelpisko mērījumu veikšanu, izmantojot <i>LIDAR</i> datus tīkla modeļa jeb digitālā dvīņa izveidei.
Funkcionāls	Ģeotelpisko datu apstrāde un interpretācija

Prasības tips	Prasību apraksts
5.5. tabula (turpinājums)	
Nefunkcionāls, veikspējas	Veiktspēja un mērogojamība - Efektivitāte – algoritmi, lai efektīvi apstrādātu lielas datu kopas - Mērogojamība – iespēja mērogot atbilstoši <i>RGB</i> un <i>LIDAR</i> datu izmēram un sarežģītībai Elementu apjoms augstas veikspējas datu darbībai Pētījuma apjomi: <i>VS/ZS</i> virszemes infrastruktūra – 650 km (10342 punktveida elementi) <i>AS</i> “Sadales tīkls” kopējie virszemes infrastruktūras apjomi: <i>VS/ZS</i> virszemes infrastruktūra – ~ 60 000 km
Nefunkcionāls, veikspējas	Lietotāju skaits: 20 (lietotāji vienlaikus)
Nefunkcionāls, veikspējas	Datu glabāšana, liels ātrums (vismaz 1 Gbit/s) apjomīgo datu kopu augšupielādei un apstrādei
Funkcionāls	<i>IS</i> nodrošina neapstrādātu datu pirmapstrādi (ieskaitot apstrādi, tīrīšanu, analīzi)
Funkcionāls	Atbalstītie failu formāti: <i>*.las</i> (punktu mākonis), <i>*.laz</i> , <i>*.csv</i> , <i>*.jpeg</i> , <i>*.json</i> , <i>*.jpg</i> (navigācija vidē un laika zīmogi)
Funkcionāls	Integrācijas – <i>API</i> vai spraudņi integrēšanai ar <i>AS</i> “Sadales tīkls” ĢIS (ģeogrāfiskās informācijas sistēmas) programmatūru vai citām atbilstošām platformām
Funkcionāls	<i>IS</i> nodrošina simulāciju (digitālā dvīņu modeļa (<i>AI/ML</i>) funkcionalitātes ar mērķi ieviest paredzamo uzturēšanu)
Funkcionāls	Bibliotēkas – tīkla komponentes un tīkla komponentu parametri
Nefunkcionāls, drošības	Mākoņu risinājums <i>ES</i> zonā (ar lokālu alternatīvu)
Nefunkcionāls, drošības	Drošība un datu pārvaldība Bez trešo pušu piekļuves <i>ST</i> datiem – <i>IS</i> nodrošina datu integritāti un drošību apstrādes un uzglabāšanas laikā. Rīki apjomīgo datu kopu efektīvai organizēšanai, glabāšanai un pārvaldībai.
Nefunkcionāls, drošības	Lietotāji ar divu faktoru autorizāciju un autentifikāciju <i>LDAP</i> (<i>Lightweight Directory Access Protocol</i>) (vēlams, nav obligāti)
Funkcionāls	Koordinātu sistēma ar iespēju konvertēt uz <i>LKS-92</i> vai citu atbilstošu alternatīvu (atbilstoši ĢIS datu pārvaldības un datu vākšanas prasībām)
Funkcionāls	Izstrādātājam jānodrošina <i>IS</i> arhitektūras darbplūsmas, ieskaitot datu importēšanu, pirmapstrādi, analīzi, atskaišu veidlapas un datu izvadi <i>ST</i> iekšējai <i>IS</i> (ĢIS, <i>JIRA</i> utt.)
Nefunkcionāls, interfeisa	<i>IS</i> atbalsta regulējamus vairākus skatu izkārtojumus (3D modeļa ekrāns no punktu mākoņa, 2D aktīvu dati no ĢIS, attēlu kolekcijas skats atbilstoši atlasītajiem elementiem) vienā ekrānā
Nefunkcionāls, interfeisa	Lietotāja saskarne un lietotāja pieredze (<i>UI/UX</i>) - Intuītiīva saskarne – lietotājam draudzīgs interfeiss ērtai navigācijai un darbībai - Pielāgošana – iespējas pielāgot skatus, rīkus un darbplūsmas atbilstoši lietotāja vēlmēm - Dokumentācija un atbalsts – visaptveroša dokumentācija un atbalsta resursi lietotājiem - Operatīvo tehnisko atbalstu un palīdzību, ja <i>ST</i> lietotāji piesaka <i>IS</i> problēmas atbilstoši biznesa mērķiem
LIDAR datu analīzes modulis	
Funkcionāls	<i>IS</i> nodrošina datu ievadi un saderību - Vairāku failu formātu atbalsts: iespēja lasīt dažādus <i>LIDAR</i> datu formātus, piemēram, <i>LAS</i>, <i>LAZ</i> utt. - Integrācija ar <i>LIDAR</i> sensoriem – saderība ar dažādiem <i>LIDAR</i> sensoriem un to datu izvadiem.

Prasības tips	Prasību apraksts
5.5. tabula (turpinājums)	
Funkcionāls	IS nodrošina punktu mākoņa datu apstrādi - Punktu mākoņa apstrāde – algoritmi, lai efektīvi pārvaldītu un apstrādātu punktu mākoņa datus - Filtrēšana un trokšņu samazināšana – rīki trokšņa, novirzes un neatbilstošu punktu noņemšanai - Datu segmentēšana un klasifikācija – iespēja segmentēt dažādus objektus vai reljefa tipus un klasificēt punktus: - o tīkla elementi – līniju (vadi) laidumi, stabi, transformatori, X-svires - o vide – veģetācija (krūmi, koku stumbri, koku vainagi), ūdenstilpes, ceļi, ēkas, dzelzceļi, ēkas (piemēram, transformatoru apakšstacija) - o līniju krustojuma vietas ar citām inženierkomunikācijām (citi vadi, caurules) - o zemes reljefs utt. - Iezīmju izvilksana – algoritmi konkrētu pazīmju (malu, stūru utt.) noteikšanai un izvilksanai no punktu mākoņa. - Reģistrācija un izlīdzināšana – iespēja reģistrēt vairākus skenējumus un precīzi tos izlīdzināt, lai iegūtu visaptverošu skatu - Interpolācija un rekonstrukcija – paņēmieni, lai aizpildītu nepilnības un rekonstruētu trūkstošās daļas punktu mākonī
Funkcionāls	IS nodrošina automatizētu ST virszemes infrastruktūras 3D modeļa izveidi - funkcionalitāte modelēt infrastruktūru atbilstoši konfigurējamam balstu novietojumam (vēlams, nav obligāts) - funkcionalitāte modelēt infrastruktūru atbilstoši konfigurējamo līniju tipam
Nefunkcionāls, saskarnes	<i>LIDAR</i> datu sinhronizācija navigācijā ar aktīvu datiem (ĢIS datiem) 2 slāņos
Funkcionāls	IS nodrošina analīzes kritēriju konfigurācijas - Veģetācijas un trases zonas parametri atbilstoši regulācijas noteikumiem un biznesa prasībām - Ģeotelpiskie mērījumu parametri (attālumu mērījumi, balstu slīpuma analīze) - Funkcionalitāte modelēt infrastruktūru atbilstoši konfigurējamiem laikapstākļu parametriem (ar mērķi izveidot modeli līniju ģeometriskām izmaiņām – attālumiem, pārspriegotiem vadiem)
Funkcionāls	IS nodrošina <i>LIDAR</i> atribūtu un papildu datu parametru uzturēšanu - Datu kopas izveides dati un laika zīmogs - Datu kopas savākšanas temperatūra - Datu kopas importēšana no iekšējās IS atbilstoši procesa vajadzībām
Nefunkcionāls, saskarnes	IS nodrošina vizualizāciju un analīzi - Krāsaina 3D vizualizācija – saskarne punktu mākoņu datu vizualizācijas dizainu 3D slāņos - Mērinstrumenti – instrumenti attālumu, leņķu, tilpumu un citu parametru mērīšanai no punktu mākoņa (distances mērīšana, balstu slīpuma mērījumi, attālumi starp vadiem un krūmiem un koku vainagiem) - o Atskaite tabulas <i>excel</i>, <i>csv</i> formātā - o Attālumu, leņķu, tilpumu mērīšana konfigurējamiem laikapstākļiem - Šķērsgriezumu analīze – spēja izveidot šķērsgriezumus un veikt analīzi konkrētos interesējošos reģionos - Izmaiņu noteikšana – rīki vairāku skenējumu salīdzināšanai un izmaiņu noteikšanai laika gaitā. Modelis ir atkārtoti lietojams nākamajiem lidojumiem, sistēmai ir jāatklāj atšķirības starp esošo režīmu un iegūtajiem datiem
Nefunkcionāls, saskarnes	Navigācija (tuvināšana/tālināšana, panoramēšanas tālummaiņa un pagriešana)
Funkcionāls	Datu eksportēšana un integrācija - Eksporta formāti – iespēja eksportēt apstrādātos datus dažādos formātos izmantošanai citās programmatūrās vai sistēmās - Integrācijas <i>API</i> – jābūt iespējai <i>API</i> vai spraudņi integrēšanai ar ST ĢIS vai citām atbilstošām platformām

Prasības tips	Prasību apraksts
5.5. tabula (turpinājums)	
Nefunkcionāls, saskarnes	Filtrēšana, meklēšana, vizualizācija kartes skatā konfigurējami pārkāpumi
Funkcionāls	IS nodrošina precizitātes novērtējumu. Validācijas rīki, lai novērtētu apstrādāto datu precizitāti, salīdzinot ar avota datiem
Funkcionāls	IS nodrošina atskaites izveidi (tabulu un vizuālo) un eksportēšanu - Pārklājuma <i>LIDAR</i> datu pārskats - ĢIS datu precizitāte – aktīvu atrašanās vietas precizitāte - Veģetācijas trases atpazīšana - Vadu attālumi laukumos - Vadu nokares laukumos - Balstu slīpums - Vadu, āķu attālums uz stabiem - Vadu novietojums (vertikāls, horizontāls, vertikāls-trijstūris, horizontāls-trīsstūris, taisnstūris) - Ekstrēmas aktīvu izmaiņas (simulācijas rezultāti)
RGB attēlu datu kopas analīzes modulis	
Funkcionāls	Automātiska un manuāla defektu identificēšana saskaņā ar defektu katalogu un marķējumu ar papildu atribūtu datiem (piemēram, defekta <i>ID</i> vai nosaukums, bīstamības pakāpe, prioritāte)
Funkcionāls	IS nodrošina attēla ievadi un saderību - Vairāku formātu atbalsts – iespēja skatīties dažādus attēlu formātus (<i>*.jpeg</i>, <i>*.jpg</i>) - Kameras integrācija – saderība ar dažādiem kameru veidiem, izšķirtspēju un krāsu telpām
Funkcionāls	IS nodrošina priekšapstrādi un uzlabošanu - Trokšņu samazināšana – filtri un algoritmi, lai samazinātu trokšni un artefaktus attēlos - Attēla uzlabošana – rīki spilgtuma, kontrasta, asuma u. c. regulēšanai. - Krāsu korekcija – metodes, lai koriģētu krāsu līdzsvaru un nodrošinātu konsekventu krāsu attēlojumu
Funkcionāls	IS nodrošina segmentāciju un objektu identificēšanu - Segmentācijas algoritmi – iespēja segmentēt attēlus interesējošos reģionos vai objektos - Objektu noteikšana un atpazīšana – algoritmi identificētu un atpazītu objektu attēlošanai
Funkcionāls	IS nodrošina defektu anotācijas eksportēšanu ar koordinātām, defekta <i>ID</i> , bīstamības pakāpi, attēla <i>ID</i>
Funkcionāls	IS nodrošina iezīmju izņemšanu un analīzi – rīki malu, stūru, faktūru u. c. noteikšanai, funkciju ekstrakcijai un algoritmus tekstūru modeļu analīzei attēlos
Funkcionāls	IS nodrošina statistisko analīzi – rīki attēlu datu statistiskās analīzes veikšanai
Funkcionāls	IS nodrošina klasifikāciju un kategorizēšanu - Mašīnmācīšanās modeļi – mašīnmācīšanās modeļu integrācija attēlu klasifikācijai un kategorizēšanai - Semantiskā segmentācija – paņēmieni semantisko apzīmējumu piešķiršanai dažādām attēla daļām
Nefunkcionāls, saskarnes	IS nodrošina vizualizāciju un prezentāciju - Attēlu displejs – lietotājam draudzīga saskarne attēlu parādīšanai, attēla atrašanās vieta kartē ar skatu lēnķi un daudzstūris ar redzamu laukumu un to analīzes rezultāti - Attēla saistīšana ar aktīviem atbilstoši attēla redzamajam laukumam - Anotācijas rīki – rīki objektu vai elementu anotēšanai un atzīmēšanai attēlos labākai vizualizācijai un izpratnei - Salīdzinošā analīze – rīki, lai salīdzinātu un analizētu vairākus attēlus vai daudzstūrus blakus.

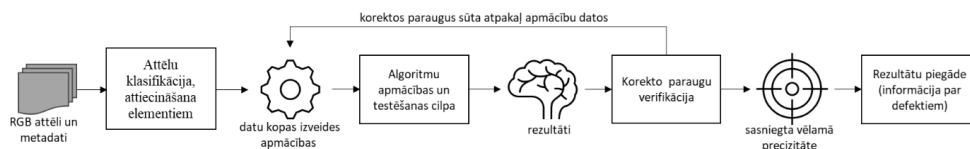
Prasības tips	Prasību apraksts
5.5. tabula (turpinājums)	
Funkcionāls	IS nodrošina datu eksportu – iespēju eksportēt apstrādātos attēlus vai analīzes rezultātus dažādos formātos (*.xls, *.csv u. c.).
Funkcionāls	IS nodrošina mērogojamību – spēju apstrādāt dažādu izmēru un izšķirtspējas attēlus
Funkcionāls	IS nodrošina attēlos fiksēto defektu anotāciju un rezultātu saglabāšanu saskaņā ar datorredzes un mašīnmācīšanās standartiem

Datu analīzes sākšanai sagatavoti šādi dati: ĢIS dati ar objektu izvietojuma un atribūtu datiem, *LIDAR* datu kopa, *RGB* datu kopa, veģetācijas limiti, balstu konstrukciju un līniju tipi, kā arī defektu vērtību sliekšņi defekta riska novērtējumam.

5.2.2. Infrastruktūras vizuālais tehniskā stāvokļa novērtējums

Attēlu apstrādes process ietver vairākpakāpju procedūras noderīgas informācijas izcelšanai. Pētījumā izmantota *Hepta Insights* programmatūras platforma, kas atbilst tehniskajām prasībām (5.5. tab.) un nodrošina vizuālo defektu identifikācijas funkcionalitāti inspekcijām. Programmatūra izmanto *YOLO (Convolutional Neural Network; CNN)* objektu atpazīšanas modeli, apmācītu ar *yolov8* versiju uz *AWS (Amazon Web Services) GPU (Graphics Processing Unit)* mašīnām.

Datu apstrāde ietver vairākus soļus. Vispirms jānodrošina datu lejupielāde programmatūrā. Pēc lejupielādes attēli tika klasificēti, balstoties metadatu koordinātēs un skatpunktā, piesaistīti tuvākajiem punktveida elementiem no ĢIS (piemēram, balstiem, sadales punktiem). Kad dati ir klasificēti, jāveic datu apstrāde, lai identificētu tīkla elementus, procesa automatizācijai jāizmanto defektu atpazīšanas funkcionalitātes. Defektu noteikšanas modeļa izstrādes procesa secība redzama 5.2. attēlā.



5.2. att. Augsta līmeņa shematiskais pārskats par mašīnmācīšanās izstrādes procesu interesējošo objektu noteikšanai.

Datu analīzē ir būtiska attēlu klasifikācija un elementu piesaiste. Procesam nepieciešamas objektu bibliotēkas, kurās aprakstīti identificējamie elementi, kalpojot par atsaucis datubāzēm mašīnmācīšanās modeļu apmācībai un testēšanai. Objektu bibliotēku izveides process ietver:

- elementu identificēšanu un aprakstīšanu;
- elementu atribūtu definēšanu (elementa tips, materiāls; defekta grupas, defektu vērtības, defektu svarīguma pakāpes) un strukturēšanu;
- treniņdatu sagatavošanai objektu bibliotēkās ir jāiekļauj attēlu piemēri, kas attēlo katru elementu dažādos apstākļos un perspektīvās, lai nodrošinātu modeļa robustumu;
- datu anotāciju un marķēšanu;
- bibliotēkas uzturēšanu un paplašināšanu.

Kad objektu bibliotēkas ir izveidotas un katrs elements ir detalizēti definēts, tiek palaists mašīnmācīšanās attēlu apstrādes process *Hepta Insights* programmatūras platformā, lai identificētu elementus attēlos. Katrai identificētajai elementa instancei modelis piešķir noteikšanas varbūtības procentu, kas liecina par ticamību, ar kādu elements ir atpazīts. Balstu tipu identificēšanas gadījumā pētījumā iegūtie rezultāti svārstās no 71 % līdz 97 %. Šāds rezultāts ir iegūts, izmantojot balstu identificēšanas *ML* modeli *Hepta Insights* programmatūrā, kur tika izmantoti AS “Sadales tīkls” infrastruktūras 3196 attēli apmācības fāzē un 565 attēli testēšanas fāzē.

Pēc tīkla elementu identificēšanas *Hepta Insights* programmatūras modelis analizē attēlu, lai noteiktu defektus, izmantojot divus galvenos posmus:

- defektu atpazīšana – defektu identifikācija pēc vizuālām pazīmēm: plaisām, korozijas vai mehāniskām deformācijām (piemērām formas izmaiņas);
- defektu klasifikācija – identificēto defektu klasifikācija pēc novēršanas steidzamības prioritātes, izmantojot iepriekš apmācītas modeļu bibliotēkas, kas atvieglo tīkla uzturēšanas darbu plānošanu.

Šis eksperiments tika veikts vairākos posmos.

- Datu apstrāde – sākotnēji *RGB* datu kopa tika apstrādāta ar modeli, kas identificēja 654 defektus ar ticamības vidējo vērtību 65 % vidējā spriegumā un 39 defektus ar ticamības vidējo vērtību 61 % zemspriegumā (5.6. tab.).
- Manuālā anotācija – pēc datu kopas apstrādes katrs identificētais defekts tika manuāli anotēts *Hepta Insights* programmatūrā, lai pārbaudītu modeļa precizitāti (5.3. attēlā sniegts attēla anotēšanas piemērs).
- Ekspertu validācija – manuālās un modeļu piedāvātās anotācijas tika validētas un saskaņotas ar AS “Sadales tīkls” inspekcijas procesa izpildītājiem, kas sniedza savu ekspertu vērtējumu par katru identificēto defektu.

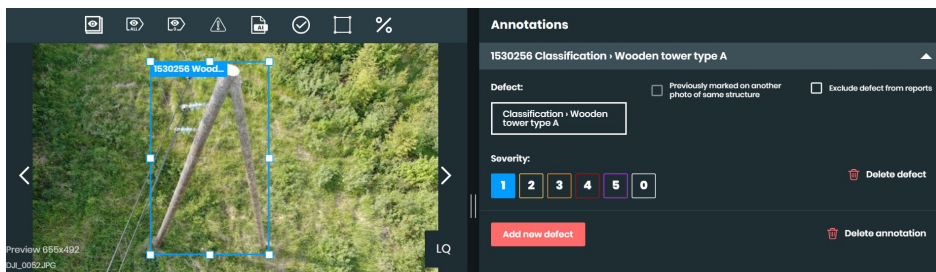
5.6. tabula

Tīkla elementu defektu identifikācijas rezultāts

Defektu identifikācijas metode, kritēriji	Vidējā sprieguma līmenis (1–20kV) / defekta novēršanas steidzamības pakāpe						Zemsprieguma līmenis (0,4–1 kV) / defekta novēršanas steidzamības pakāpe					
	1.	2.	3.	4.	5.	kopā	1.	2.	3.	4.	5.	kopā
Defektu skaits (identifikācijas modelis)	255	202	175	21	1	654	13	1	25	0	0	39
Defektu identificēšanas ticamības %	62 %	73 %	66 %	81 %	41 %	65 %	49 %	54 %	71 %	–	–	61 %
Defektu skaits (manuālā inspekcija)	1563	579	3479	494	6	6121	175	150	239	102	8	674
Līniju km kopgarums	550 km						100 km					
Attēlu skaits	134 752						24 487					

Rezultāti liecina, ka datu daudzums un kvalitāte ir būtiski faktori, kas ietekmē automātiskās defektu noteikšanas veiktspēju. Lai optimizētu defektu noteikšanas procesu, ir jāapsver datu kolekcijas paplašināšana un dažādošana, kā arī papildu metožu izstrāde (piemēram, “*cut-paste-learn*”) kopā ar konvolūcijas neironu tīkliem [42] vai attēlu ģenerēšana, izmantojot *NeRF*

(*Neural Radiance Field*) balstītas sintētiskās attēlu veidošanas un pēcaprādes metodes [43]), kas varētu uzlabot modeļu precizitāti, pat ja pieejamais datu apjoms ir ierobežots.



5.3. att. Elementa anotēšanas piemērs *Hepta Insights* programmatūrā.

5.2.3. Infrastruktūras ģeotelpiskie mērījumi

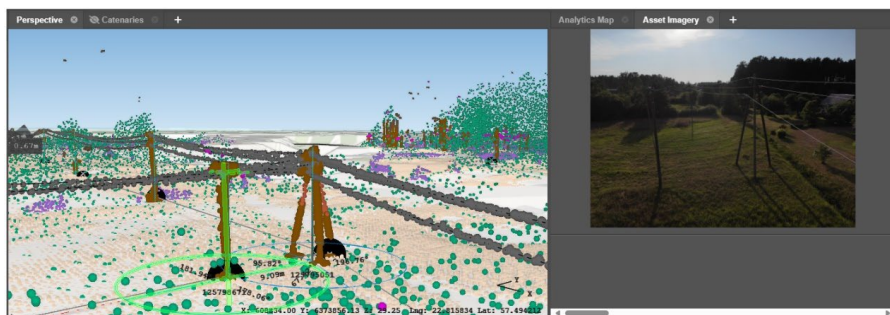
Otrā būtiskākā infrastruktūras tehniskā novērtējuma komponente (pēc vizuālās novērtēšanas) ir ģeotelpiskie mērījumi, kas nodrošina detalizētu pārbaudi, analizējot augstuma, attāluma un objektu kontūru parametrus un to izvietojumu vidē. Ģeotelpisko mērījumu saskaņošana ar tehniskajiem standartiem (Latvijas energostandarts [44]) ir būtiska elektropārvades infrastruktūras uzturēšanā, lai sistemātiski identificētu un kvantificētu novirzes no normatīvajiem parametriem, kas signalizē par iespējamajiem defektiem un bojājumiem. Ģeotelpiskie mērījumi balstu konstrukcijām un vadu izvietojumiem vidē, balstoties *LIDAR* datu analīzē, ietver tīkla elementu izvietojuma precizitātes noteikšanu, gabarītmerījumus, vadu nokares noteikšanu, attālumu mērījumus starp vadiem laidumos, vadu izvietojuma noteikšanu balstos, attālumu mērījumus starp vadu stiprinājumiem, balstu izsvēršanās vērtību noteikšanu un veģetācijas pārvaldību trašu koridoros un aizsargjoslās.

Pētījuma realizācijai tika izmantota *Neara* programmatūra – *web* balstīts datorizētās projektēšanas rīks (*Computer-aided design; CAD*) ar iebūvētajiem nozarei specifiskām *LIDAR* datu apstrādes funkcionalitātēm – inženiertīklu projektēšanas un analīzes rīki, tai skaitā automatizētā punktu mākoņa klasifikācijas funkcionalitāte, tīkla modeļa atskaišu un datu vizualizāciju funkcionalitātes, kas atbilst definētām tehniskajām prasībām *LIDAR* datu analīzes modulim (5.5. tab.).

Kā aprakstīts 4.24. nodaļā “Datu analīze ģeotelpisko defektu noteikšanai”, sākotnējais un kritiski svarīgs posms *LIDAR* datu analīzē ietver rūpīgu datu klasifikāciju, kas nosaka visu turpmāko analīzes darbību precizitāti un efektivitāti. Klasifikācija obligāti ietver šādus slāņus (5.5. tab.): tīkla elementi (līniju (vadi) laidumi, balsti); vide (veģetācija (krūmi, koku stumbri, koku vainagi); ūdenstilpes, ceļi, ēkas); zemes reljefs.

Klasifikācijas procesā tiek lietotas uzlabotas algoritmiskās metodes, lai nodrošinātu augstu precizitāti un atbilstību reālajai situācijai. Automatizētās klasifikācijas modelim tiek izmantota uzraudzītās mācīšanās algoritmu metode (*Supervised Learning*) [45] – tiek izmantoti iepriekš apmācīti desmit tūkstošu kilometru gari tīklu paraugi, lai automātiski klasificētu katru punktu mākonī. Pēc datu klasifikācijas katrs punkts tiek piešķirts noteiktai klasei, kas ļauj

precīzāk interpretēt un analizēt iegūtos datus (5.4. att.). Pētījumā izmantotā datu kopa tika ielādēta *Neara* programmatūrā un tika palaists automatiskais klasifikācijas process, kļūdu identifikācijas gadījumos punktu kategoriju korekcijām tika izmantota manuālās klasifikācijas funkcionalitāte.



5.4. att. AS “Sadales tīkls” infrastruktūras klasifikācijas un vektorizācijas rezultāts.

Nākamais solis pēc objekta klasifikācijas ir vektorizēta vai inženiertehniskā modeļa izveide – klasificēto kategorijās punktu pārveide par matemātiskām formām. Tie punkti, kas atbilst lineārai struktūrai, piemēram elektropārvades līniju vadiem, tiek savienoti, izveidojot līnijas vai polilīnijas. Polilīnijas sastāv no vairākiem savienotiem segmentiem, kas precīzi ataino objekta kontūru, kas precīzi atspoguļo reālo infrastruktūru jeb veido infrastruktūras ģeotelpisko virtuālo kopiju – fiziskās infrastruktūras digitālo dvīņi (5.4. att.). Vektorizācija nodrošina matemātiski precīzu objektu aprakstu, kas ļauj veikt detalizētus inženiertehniskos aprēķinus, precīzi novērtēt un plānot infrastruktūru, kā arī eksportēt datus uz *CAD* vai *GIS* sistēmām.

5.2.3.1. Elektropārvades līniju balstu telpiskā izvietojuma noteikšana

Sadales operatora infrastruktūras elementu izvietojuma precizitāte ir viena no kritiskām prasībām. Tīkla modelis nodrošina balstu koordinātas (x, y) un augstumu, ļaujot salīdzināt dažādu avotu precizitāti (5.7. tab.) un vizualizēt atšķirības starp *GIS* un *LIDAR* datiem.

5.7. tabula

Tehniska objekta *cc4bc* balstu telpiskā izvietojuma salīdzinājums

GIS dati										LIDAR dati				
Iecirknis	TO_ID	Iezīme	Tīkla elementa ID	Klases ID	Klase	Grupas ID	Grupa	GIS dati, X (WGS)	GIS dati, Y (WGS)	Izbūves gads	Aktuālais izvietojums (LIDAR): X	Aktuālais izvietojums (LIDAR): Y	Aktuālais izvietojums (LIDAR): Z (no zemes līmeņa)	Staba perpendikulārs augstums virs zemes, metri (no zemes līmeņa līdz staba augšai)
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	10224234	600	VS koka I	1092	Koka	56,71049142	22,85376717	2006	56,710492	22,853772	127,1513	10,985
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	10224235	601	VS koka A	1092	Koka	56,70641743	22,84841271	2006	56,706446	22,848479	127,3235	10,281
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	10224236	600	VS koka I	1092	Koka	56,70850539	22,85114851	2006	56,708124	22,850685	128,7603	9,769
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	10224238	600	VS koka I	1092	Koka	56,70713509	22,849353	2006	56,706945	22,849148	128,4907	9,91
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	10224239	600	VS koka I	1092	Koka	56,7060578	22,84736127	2006	56,706052	22,847323	127,7503	11,253
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	10242565	600	VS koka I	1092	Koka	56,71361617	22,85783392	2004	56,713609	22,857831	126,3888	12,426
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	11093504	600	VS koka I	1092	Koka	56,71401436	22,85835015	2004	56,714124	22,858512	125,4007	10,305
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	186747087	600	VS koka I	1092	Koka	56,70778891	22,85020971	2017	56,707518	22,849894	128,789	9,931
Tukums-S	cc4bc	33085#E5807	254426807	600	VS koka I	1092	Koka	56,71459185	22,8591179	2021	56,714589	22,859128	123,9493	10,354

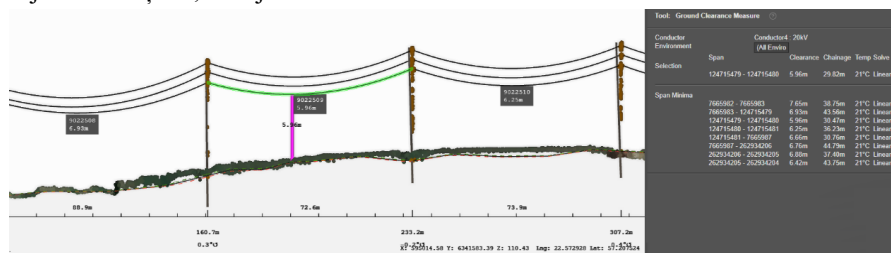
Analizējot atšķirības, ir skaidri redzams, ka *GIS* dati bieži vien nesakrīt ar reālo situāciju objektos. Piemēram, balsts ar identifikatoru 186747087, kura pozīcija *GIS* datubāzē ir reģistrēta

ar būtisku nobīdi (aptuveni 35 m) no tā faktiskās atrašanās vietas. Šī situācija uzsver augstas precizitātes datu nozīmi, ko nodrošina *LIDAR* tehnoloģija, piedāvājot detalizāciju līdz 10 cm, ievērojami pārspējot tradicionālos ĢIS datus. *LIDAR* integrācija ar ĢIS sistēmām būtiski uzlabo datu precizitāti un infrastruktūras analīzi, plānošanu un uzturēšanu, samazinot riskus un izmaksas, kas rodas neprecīzu datu dēļ.

5.2.3.2. Gabarītmērījumi

Gabarītmērījumi – katras laiduma minimālās distances līdz zemei noteikšana, kas ir kritiski svarīgs mērījums sabiedrības drošības nodrošināšanai. Šie mērījumi palīdz novērst potenciālos drošības riskus, kas var rasties no zema augstuma vadiem. Tīkla modelim, kas izveidots, izmantojot *LIDAR* datus un ietver detalizētus atribūtdatus, tika konfigurēti specifiski parametri un sliekšņi (sliekšņu vērtības atbilstoši Latvijas energostandarta [44] un Aizsargjoslu likuma [46] prasībām), kas definē tehniskās prasības un normas, kurām mērījumu vērtībām jāatbilst.

LIDAR datu modelis tika papildināts ar detalizētiem atribūtdatiem, kas ietver dažādus tehniskos parametrus – līnijas guldīšanas veidu, sprieguma līmeni, kabeļa tipu un marku, līniju posmu galapunktu tipu (balsts, transformators, pievads pie mājas). Katrai no šo vērtību kombinācijām ir noteikti distances sliekšņi, lai identificētu, vai konkrētais mērījums atbilst vai neatbilst tehniskajiem standartiem [47]. Pēc parametru konfigurēšanas tika veikta *LIDAR* datu analīze, lai noteiktu minimālos attālumus starp elektropārvades līnijām un zemi, identificējot laidumus, kas neatbilst noteiktajām normām. Šis process automātiski salīdzina datus ar noteiktajiem sliekšņiem, atklājot visas novirzes.



5.5. att. Gabarītmērījumu automātiskā noteikšana *Neara* programmatūrā.

Pētījumā iegūtie pārskati sniedz detalizētu analīzi. Piemēram, līnijas posma (*ID* 9022509) analīze (5.5. att.) rāda, ka līnijas posmā minimālais attālums līdz zemes virsmai ir 5,96 m (minimāli pieļaujamā attāluma vērtība šajā gadījumā ($AS-3 \times 70$ 20 kV d. s. kabelis) ir 6 m [44]) un šis minimālais attālums reģistrēts 29,82 m attālumā no posma sākumpunkta, kura koordinātas ir norādītas balsta ar identifikatoru 124715479 atrašanās vietā.

Lai pārliecinātos, ka pētījumā sasniegtie rezultāti ir korekti, tika organizēta validācija objektos trīs līmeņos.

- Salīdzinājums ar manuālo defektēšanas procesā veiktajiem mērījumiem.
- Ekspertu pārbaude – lai nodrošinātu analīzes precizitāti, eksperti manuāli pārbauda kritiskās zonas un apstiprina automātiskās apstrādes rezultātus.
- Papildu mērījumi – nepieciešamības gadījumos tika veikti papildu mērījumi, lai precizētu neprecizitātes vai pārbaudītu robežgadījumus.

LIDAR datu analīzes un manuālās defektēšanas salīdzinājumā vidējā atkāpe ir 0,09 m ar svārstībām no dažiem centimetriem līdz 97 cm. Detalizēta rezultātu analīze apkopota 5.8. tabulā.

5.8. tabula

LIDAR datu analīzes rezultātu salīdzinājums ar manuālās defektēšanas rezultātiem

Atkāpes lielums	Atkāpes gadījumu %	Rīcība
Līdz 10 cm	41 %	Atkāpe līdz 20 cm tiek uzskatīta par pieņemamu robežu, jo tā ietver mērījumu neprecizitātes, kas rodas fiziskās piekļuves grūtību un vides apstākļu izmaiņu dēļ.
Līdz 20 cm	27 %	
Līdz 50 cm	17 %	Tika veikta ekspertu pārbaude 10 nejauši izvēlētiem gadījumiem, lai pārbaudītu <i>LIDAR</i> datu analīzes rezultātu precizitāti. Pārbaudes rezultāti liecina, ka visos gadījumos <i>LIDAR</i> datu analīzes rezultāti tika atzīti par korektiem, un svārstību vērtības galvenokārt veidojās šādu faktoru dēļ: mērījumu veicēju nepietiekama pieredze; vides apstākļi (apgrūtināta fiziska piekļuve).
Virs 50 cm	15 %	Tika veikti papildu mērījumi 10 nejauši izvēlētiem gadījumiem, lai pārbaudītu <i>LIDAR</i> datu analīzes rezultātu precizitāti. Pārbaudes rezultāti liecina, ka visos gadījumos <i>LIDAR</i> datu analīzes rezultāti tika atzīti par korektiem.

5.2.3.3. Vadu izregulēšanās

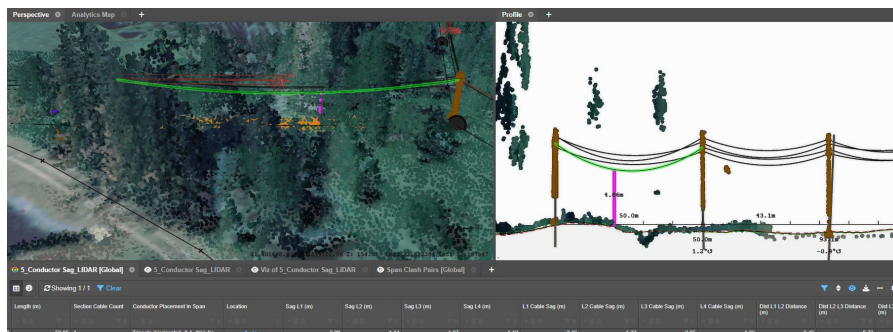
Vadu izregulēšanās – faktisko vadu nokares vērtību noteikšana katrā laidumā, ņemot vērā datu vākšanas laikā esošo gaisa temperatūru, jo nokares lielumu būtiski ietekmē temperatūras svārstības. Šī informācija ir svarīga, lai novērtētu vadu izturību un drošību dažādos klimatiskos apstākļos. Lai veiktu šos aprēķinus, pētījuma laikā tika definētas vairākas kvantitatīvas vērtības, kas ļauj sasniegt noteiktos mērķus:

- vides temperatūra (°C) (*LIDAR* datu vākšanas laika temperatūra);
- faktiskais laiduma garums (m), kas tika noteikts *LIDAR* datu apstrādes rezultātā;
- faktiskais vadu skaits – kopējais laidumā esošo vadu skaits;
- vadu izvietojums laidumā – katrs vads tiek precīzi pozicionēts attiecībā pret citiem vadiem un apkārtni (horizontālais, vertikālais, trīsstūra vertikālais, trīsstūra horizontālais, taisnstūrveida);
- vadu nokare laidumā metros (apakšējam vadam L1, otrajam vadam no apakšas L2, trešajam vadam no apakšas L3, ceturtajam vadam no apakšas L4);
- minimālais savstarpējais vadu attālums laidumā (starp L1 un L2, starp L2 un L3, starp L3 un L4);
- vadu nokare: nevienmērīga, vadi var savīties – koeficients 1 (vadu attāluma starp L1 un L2 īpatsvars pret vadu attālumu starp L2 un L3), koeficients 2 (vadu attāluma starp L1 un L2 īpatsvars pret vadu attālumu starp L3 un L4).

Iegūtie dati tika salīdzināti ar pieļaujamajām vērtībām atbilstoši Latvijas energostandarta [47] prasībām.

Neara programmatūra nodrošina iespējas parametru konfigurācijām un 3D vizualizācijas rīkus vadu nokares analīzei, attēlojot elektropārvades līniju profilus un reljefu. Analīzē tiek noteiktas nokares vērtības un minimālie attālumi līdz zemei vai citiem objektiem, identificējot

vadus ar pārmērīgu nokari, kas apdraud drošību. 5.6. attēlā redzams gadījums, kur 2 m neatbilstība rada drošības risku.



5.6. att. Vadu izregulēšanās noteikšanas piemērs no realizētā pētījumā datiem *Neraa* programmatūrā.

Eksperimenta rezultāti rāda, ka pie 2 m nokares minimālais drošības attālums līdz zemei netiek ievērots vairāk nekā 50 % gadījumu, savukārt pie 3 m nokares neatbilstība pārsniedz 80 %. Tas uzsvēr nepieciešamību rūpīgi kontrolēt vadu nokari, lai samazinātu drošības riskus un uzturētu elektropārvades tīklu drošībā.

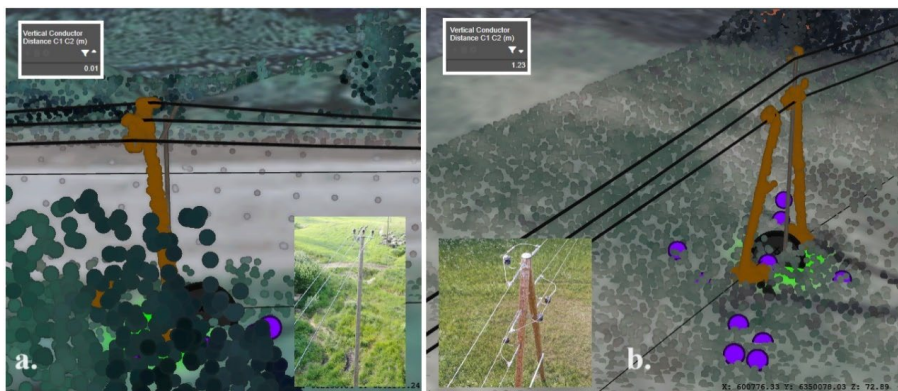
Šo parametru definēšana un *LIDAR* datu masveida automatizēta analīze ļauj precīzi modelēt un kontrolēt elektropārvades līniju stāvokli, nodrošinot uzticamu un drošu elektropārvades tīklu.

5.2.3.4. Vadu izvietojums balstos un attālumi starp vadu stiprinājumiem

Vadu izvietojums balstos un attālumi starp vadu stiprinājumiem – attālumu mērījumi starp vadu stiprinājumiem uz balstiem, lai nodrošinātu struktūras integritāti un stabilitāti. Lai identificētu kritiskās vērtības un atklātu defektus, kas var apdraudēt elektropārvades līniju integritāti un darbību, ir būtiski veikt šādu parametru aprēķinus:

- vertikālais attālums starp vadiem balstā (no pirmā vada (apakšējā) līdz otrajam vadam);
- vertikālais attālums starp vadiem balstā (no otrā vada līdz trešajam vadam);
- vertikālais attālums starp vadiem balstā (no trešā vada līdz ceturtajam vadam).

Vertikālo attālumu aprēķini, balstoties infrastruktūras vektorizācijas modeļa matemātiskajā aprakstā (5.2.3. apakšnodaļa), veikti visiem balstiem. 5.7. attēlā redzams, ka balstiem ar vertikālo vadu ģeometriju aprēķinātās vērtības ir tuvu nullei, un šie parametri nav būtiski defektēšanai. Elektropārvades tīklu uzturēšanā būtiski ir vadu izvietojumi un vertikālie attālumi balstos, īpaši konstrukcijās ar vertikālo izvietojumu, kas pētījumā tvērumā ir 78 % no visām balstu konstrukcijām.



5.7. att. Vadu stiprinājumu vertikālā attāluma noteikšana *Neara* programmatūrā: a) balsts ar vadu horizontālo izvietojuma tipu; b) balsts ar vadu vertikālo izvietojuma tipu.

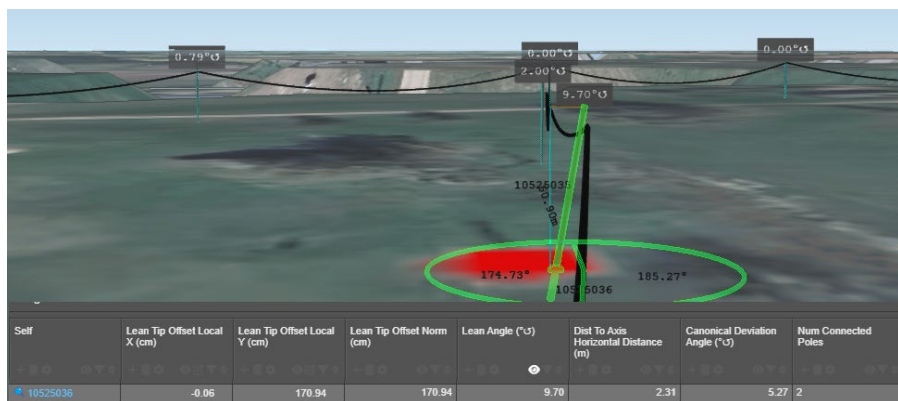
Pētījumā konstatēts, ka vidējais attālums starp vertikāli izvietotiem vadiem ir 0,93 m, savukārt trīsstūra izvietojuma konstrukcijās – 0,84 m. Atkāpes virs 20 cm klasificētas kā defekti, veidojot 0,54 %, ko jānovērš tīkla drošības nodrošināšanai.

5.2.3.5. Balstu izsvēršanas vērtības

Balstu izsvēršanās ir būtisks parametrs, kas ietekmē elektropārvades līniju stabilitāti un drošību. Pētījuma laikā tika veikta detalizēta balstu izsvēršanās analīze, ietverot šādus aspektus:

- balsts atrodas ārpus līnijas ass;
- balsts izsvēries līnijas virzienā jeb sagāzies līnijas virzienā.

Balstu ģeometriskās novirzes noteiktas, izmantojot vektorizēto modeli, lai mērītu attālumus starp balsta centru pie zemes un virsotnes vertikālo asi, klasificējot tos pēc izsvēršanās kritērijiem – līnijas virzienā vai ārpus līnijas ass. *Neara* programmatūrā vizualizētie dati ļauj detalizēti analizēt balstu slīpuma novirzes, veicot atbilstoši konfigurācijas iestatījumus, lai šie aprēķinu rezultāti tiktu vizualizēti (5.8. att.).



5.8. att. Balsta izsvēršanās noteikšanas piemērs *Neara* programmatūrā.

Pētījuma izstrādes gaitā veikta analīze visiem tvērumā esošajiem balstiem, kur 68,4 % balstu ir slīpums līdz 2 grādiem un 0. Saskaņā ar AS “Sadales tīkls” prasībām, slīpums virs 7 grādiem (5.29. att.) liecina par iespējamu strukturālu nestabilitāti, kas var apdraudēt līnijas drošību. Pētījumā konstatēts, ka 1,5 % balstu sasnieguši pieļaujamo slīpuma robežu, bet manuālie rezultāti atklāja nesakritības. Detalizētā analīzē secināts, ka ar aci grūti pamanīt nelielus slīpumus, kur *LIDAR* dati ievērojami pārsniedz manuālo metožu precizitāti.

5.2.3.6. Veģetācijas pārvaldība trašu koridoros un aizsargjoslās

Būtiskākais faktors, kas ietekmē elektropārvades līniju darbību, ir veģetācijas esamība elektropārvades līniju trases koridoros, tās pieaugums un tās radītie riski. Viens no Latvijas sadales tīkla ekspluatācijas darbiem ir elektroliniju trašu tīrīšana no apauguma, kas apdraud līniju drošību. Tradicionālās metodes, izmantojot manuālus mērījumus un vizuālas pārbaudes ik pēc četriem gadiem, ir laikietilpīgas un resursietilpīgas.

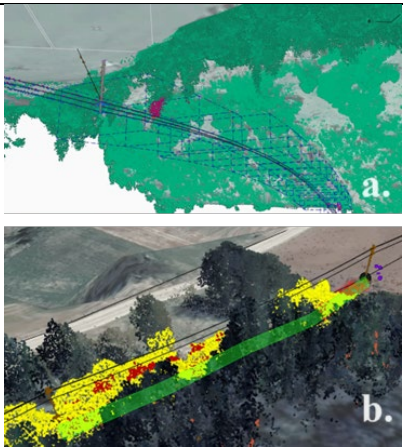
Trašu un aizsargjoslu platuma un augstuma vērtības ir noteiktas regulācijas dokumentos [45], [46] atkarībā no elektropārvades līnijas sprieguma līmeņa un guldīšanas vides. Kritēriji nosaka veģetācijas pārvaldības prasības, kas atbilst dažādu sprieguma līmeņu riska profilam un tehniskajām prasībām. Tie nodrošina efektīvu veģetācijas kontroli, uzturot infrastruktūras drošību un optimizējot resursus. Pētījumā noteiktas šādas aprēķinu vērtības, kas nodrošinās datus balstītu veģetācijas pārvaldības organizāciju:

- S , (%) – veģetācijas seguma platības procents, kas norāda apauguma līmeni konkrētajā teritorijā (laidumā);
- Ir/Nav – veģetācijas iekļaušanās trasē liecina par veģetācijas klātbūtni vai trūkumu elektrolinijas trasē;
- $h_{vert\ min}$, (m) – minimālais pieļaujamais vertikālais attālums starp koku zariem un vadiem, mērot starp divām horizontālām plaknēm;
- $w_{horizon\ min}$, (m) – minimālais pieļaujamais horizontālais attālums starp koku zariem un elektrolinijas vertikālo asi, mērot starp divām vertikālām plaknēm;
- d_{min1} , (m):
 - 6–20 kV – tuvākais pieļaujamais attālums starp koku zaru un elektrolinijas vadu, mērot līdz zariem, kas iekļāvušies elektrolinijas trasē; trases ārējā mala tiek definēta kā nosacītas vertikālas virsmas abpus līnijai, sākot no zemes un turpinoties neierobežotā augstumā;
 - 0,4–1 kV – tuvākais pieļaujamais attālums starp koku zaru un elektrolinijas vadu gaisa telpā, mērot no zemes līdz apakšējā vada horizontālajai plaknei; trases ārējā mala tiek definēta kā nosacītas vertikālas virsmas abpus līnijai, sākot no zemes un turpinoties līdz apakšējā vada horizontālajai plaknei;
- d_{min2} , (m) – zemsprieguma 0,4–1 kV elektrolinijām – tuvākais pieļaujamais attālums starp koku zaru un elektrolinijas vadu gaisa telpā, mērot no zemes līdz apakšējā vada horizontālajai plaknei; trases ārējā mala tiek definēta kā nosacītas vertikālas virsmas abpus līnijai, sākot no zemes un turpinoties līdz apakšējā vada horizontālajai plaknei.

Neara programmatūrā tika ģenerētas ģeometriskas struktūras ar elektrolīniju vektorizēto modeli, kas konfigurētas atbilstoši AS “Sadales tīkls” prasībām (5.9. tab.). Šīs konfigurācijas precīzi atspoguļo elektrotīkla vadu izkārtojumu un to attiecību ar apkārtējo veģetāciju. Datu apstrādes rezultāti apkopoti 5.9. tabulā, kurā var arī vizuāli redzēt veģetācijas esamības apjomus trasēs laidumā *ID* 125462403-7673718. Papildus aprēķiniem tika konfigurēts risku novērtējums, lai būtu iespēja gradēt pēc līmeņiem. Riska līmeņi tiek noteikti, pamatojoties uz attālumu līdz elektropārvades līnijām: zona, kas atrodas 1 m rādiusā no vadiem, tiek klasificēta kā augsta riska līmenis (atzīmēta sarkanā krāsā), savukārt teritorija, kas pārsniedz 1 m, tiek uzskatīta par vidēja riska zonu (atzīmēta dzeltenā krāsā) (5.9. tab.).

5.9. tabula

Veģetācijas noteikšanas *LIDAR* datu analīzes rezultāta piemērs

Parametrs	Vērtība	
Elementa <i>ID</i>	125462403-7673718	
Kabeļa tips	A-3×70 20 kV, kailvadu līnija	
Laiduma garums	78,37 m	
Ieguldīšanas vide	Lauksaimniecībā izmantotā zeme	
Trašu koridora platums	13 m	
S_v (%)	84,73 %	
Iekļaušanās trasē	Vertikāli + horizontāli	
$h_{\text{vert min}}$	1,22 m	
$w_{\text{horizon min}}$	0,15 m	
d_{min1}	0,36 m	
d_{min2}	0,87 m	

LIDAR datu precizitāte tika salīdzināta ar manuāli iegūtiem veģetācijas novērtējumiem, ko veica AS “Sadales tīkls” speciālisti. Rezultāti, kas apkopoti 5.10. tabulā, parādīja vislielākās neatbilstības vidēji augsta riska (10,30 %) un augsta riska (9,09 %) veģetācijas klasifikācijās.

5.10. tabula

Veģetācijas analīzes rezultātu salīdzinājums

Riska līmenis	Veģetācijas esamība laidumā	Laidumu skaits		Abu metožu rezultātu nesakrītības koeficients
		<i>LIDAR</i> datu kopas analīze	manuālā inspekcija	
Nav riska	0–0,2	6786	6834	0,70 %
Zems risks	0,2–0,4	779	746	4,42 %
Vidējais risks	0,4–0,6	411	421	2,38 %
Vidēji augsts risks	0,6–0,8	182	165	10,30 %
Augsts risks	0,8–1	96	88	9,09 %

Pārbaudēs tika apstiprināts, ka *LIDAR* aprēķini ir precīzi visos pārbaudītajos laidumos un atšķirības galvenokārt rodas cilvēku kļūdu dēļ (aptuveni 10 %). Tas uzsver *LIDAR* tehnoloģijas uzticamību veģetācijas riska novērtēšanā.

5.2.4. Datu apstrādes realizācijas parametri

Lai nodrošinātu sistematizētu *RGB* un *LIDAR* datu apstrādi inspekcijas procesam, nepieciešama organizatoriska darbplūsma, kas ietver datu apstrādes koordinēšanu, *LIDAR* un *RGB* datu apstrādi un tehnisko atbalstu. 5.11. tabulā apkopotas realizācijas komponentes.

5.11. tabula

Datu analīzes realizācijas organizācijas aktivitātes

Realizācijas komponentes	Atbildības	Kompetences
Datu apstrādes koordinēšana	<i>RGB</i> un <i>LIDAR</i> datu pārvaldības nodrošināšana. Komunikācijas uzturēšana starp datu apstrādes un vākšanas pusēm.	Procesu vadības prasmes. Pieredze sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā. Plašas zināšanas BGK operāciju veikšanā un lidojumu plānošanā. <i>LVS-EN 50110-1:2013</i> – elektrodrošības apmācība.
<i>LIDAR</i> datu apstrāde	<i>LIDAR</i> datu un analīzes kvalitātes kontrole un apstiprināšana. <i>LIDAR</i> datu apstrāde, izmantojot specializētas programmatūras rīkus. Ģeotelpisko mērījumu veikšana. Ģeotelpiskās iezīmes un defektu identificēšana.	Elektroinženiera kompetence – tehniskā izpratne par elektropārvades līniju struktūru un darbību. Pieredze sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā. Izpratne par <i>LIDAR</i> tehnoloģijām, to darbības principiem un lietojumu. Prasme strādāt ar <i>LIDAR</i> datu apstrādes programmatūru un rīkiem.
<i>RGB</i> datu apstrāde	<i>RGB</i> datu kvalitātes kontrole un apstiprināšana. <i>RGB</i> datu kopas analīze, anotēšana. Vizuālo defektu identificēšana.	Elektroinženiera kompetence – tehniskā izpratne par elektropārvades līniju struktūru un darbību. Pieredze sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā. <i>LVS-EN 50110-1:2013</i> – elektrodrošības apmācība.
Rezultātu interpretācija	Atskaišu sagatavošana. Prasību definēšana un uzturēšana.	Elektroinženiera kompetence – tehniskā izpratne par elektropārvades līniju struktūru un darbību. Pieredze sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā. <i>LVS-EN 50110-1:2013</i> – elektrodrošības apmācība. Spēja analizēt un interpretēt sarežģītus datus, izstrādājot secinājumus un risinājumus. Izpratne par statistikas metodēm un analīzes principiem.
Tehniskais atbalsts	Konfigurāciju nodrošināšana <i>AI</i> modeļu apmācība un vērtēšana automātiskai defektu noteikšanai. Datu apmaiņas nodrošināšana ar citām IS.	IS inženiera kompetences. Praktiskās un teorētiskās zināšanas datu apstrādē, programmēšanas valodas (<i>Python</i>), zināšanas par mašīnmācīšanās bibliotēkām un rīkiem. Datu analītika.

5.2.5. Eksperimenta rezultātu kopsavilkums

Pētījumā validēta metode *RGB* datu apstrādei tīkla elementu mehānisko bojājumu un vizuālo defektu noteikšanai, kā arī *LIDAR* datu apstrādei ģeotelpisko mērījumu veikšanai telpiskā defektu identificēšanai. Rezultātā ietvertajā poligonā tika apstrādātas šādas datu kopas:

- *RGB* datu kopa 0,79 TB infrastruktūras elementu mehānisko bojājumu identifikācijai;
- *LIDAR* datu kopa 4,02 TB infrastruktūras elementu ģeotelpisko mērījumu veikšanai.

5.12. tabulā sniegts AS “Sadales tīkls” vidējā sprieguma poligona pētījumā identificēto defektu un mērījumu skaita kopsavilkums, salīdzinot *RGB* analīzi ar *AI*, manuālo analīzi un *LIDAR* datu analīzi pēc defektu skaita un novērtējuma.

5.12. tabula

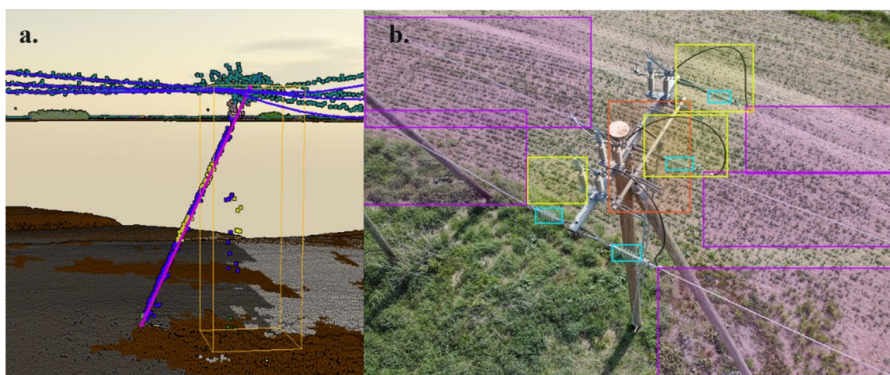
RGB un *LIDAR* datu analīzes un manuālās inspekcijas metožu rezultātu salīdzinājuma apkopojums

Defektu veids	<i>RGB</i> datu kopas analīze (<i>AI</i>)	<i>RGB</i> datu kopas analīze (manuāli)	<i>LIDAR</i> datu kopas analīze (masveida aprēķini)	Manuālā inspekcijas metode, komentārs
Tīkla elementa vizuālais tehniskā stāvokļa defekts	654 (defektu skaits)	6126 (defektu skaits)	–	6780 /defektu skaits/
Balstu, telpiskā izvietojuma noteikšana	–	–	7803 balstu koordinātas	Vizuālais novērtējums, balstīts izvietojuma piesaistē esošajos vides objektos (ēkas, koki). Esošajā procesā pilnvērtīgi nav īstenots visam apjomam.
Gabarītmērījumi	–	–	8254 laidumi	No 8254 veiktiem mērījumiem 15 % gadījumu konstatētas atšķirības, kas pārsniedz 50 cm. Papildu validācijas procesā apstiprināta <i>LIDAR</i> datu aprēķinu precizitāte.
Vadu izregulēšanās	–	–	8254 laidumi	Manuālā vadu izregulēšana, balstoties vizuālajā novērtējumā, tika veikta tikai neatbilstošu gabarītmērījumu gadījumos – konstatētie defekti, atbilstoši <i>LIDAR</i> mērījumu tika apstiprināti kā korekti, taču bez kvantitatīvām vērtībām.
Vadu izvietojums balstos un attālumi starp vadu stiprinājumiem	–	–	8254 laidumi, defektu skaits – 45	Līdz šim nav mērīts, jo manuālais process ir laikietilpīgs.
Balstu izsvēršanas vērtības	–	–	117 balsti (virs 7°)	124 balstu gadījumos ar novirzēm virs 7° – nesakritības tika pārbaudītas gan uz vietas objektos, gan datu analīzē, un tika apstiprināts, ka <i>LIDAR</i> datu aprēķini ir precīzāki.
Veģetācijas pārvaldība trašu koridoros un aizsargjoslās	–	–	1468 laidumi ar risku	1420 laidumi ar risku, nesakritības tika pārbaudītas gan uz vietas objektos, gan datu analīzē, un tika apstiprināts, ka <i>LIDAR</i> datu aprēķini ir precīzāki.

5.3. Digitālās inspekcijas ieviešanas rekomendācijas

Lai veiksmīgi ieviestu vidējā sprieguma infrastruktūras digitālo inspekciju (atbilstoši piedāvātām digitālās inspekcijas risinājumam (4.3. att.)), balstoties veiktajos eksperimentos, izstrādātas rekomendācijas risku mazināšanai sadales operatoriem.

- Lai uzlabotu vidējā sprieguma infrastruktūras inspekciju, ieteicams izvērtēt esošos procesus, pārskatīt defektu katalogu un analizēt inspekcijas rīkus. Digitālais risinājums nenodrošina defektu identificēšanu zemes līmenī, tāpēc ieteicams ieviest hibrīda modeli, kur digitālā inspekcija aptver gaisvadu līnijas un balstus, savukārt manuālā inspekcija – elementus zemes līmenī un slēgtās telpās. Pārskatot inspekciju biežumu un apjomu, iespējams efektīvāk izmantot resursus un uzlabot defektu atklāšanu.
- Ieteicams izstrādāt standartizētas procedūras digitālās inspekcijas procesam, ietverot datu vākšanas plānošanu, apstrādi un analīzi. Tas nodrošinās efektīvāku koordināciju, procesa nepārtrauktību, mazinās kļūdas un atkārtošanos, uzlabos *AI* modeļu pielāgošanu specifiskajiem uzdevumiem un veicinās precīzu infrastruktūras stāvokļa novērtējumu.
- Ieteicams izvēlēties programmatūras rīkus *RGB* un *LIDAR* datu apstrādei, kas automatizē bojājumu un anomāliju noteikšanu infrastruktūras elementos. Rīkiem jānodrošina vizuālo defektu analīze, ģeotelpiskie mērījumi, 3D modelēšana un integrācija ar esošajām sistēmām. Jāņem vērā apstrādes algoritmu precizitāte, automatizācijas līmenis, konfigurācijas elastība un spēja apstrādāt lielus datu apjomus (piemēram, 650 km līnijai – 4,81 TB datu), nodrošinot ātru analīzi sadales operatoru vajadzībām.
- Pirms digitālās inspekcijas ieviešanas nepieciešama rūpīga tīkla elementu un defektu atpazīšanas verifikācija, lai pārbaudītu risinājuma efektivitāti un novērstu nepilnības. Jāuzlabo programmatūras konfigurācija un bibliotēkas, lai nodrošinātu precīzu datu interpretāciju. Pētījumā identificētas problēmas, piemēram, kļūdaina balstu tipoloģija (5.9. att.), tika novērstas pēc bibliotēkas atjaunināšanas. Verifikācija ļauj samazināt kļūdu skaitu un uzlabot risinājuma uzticamību.



5.9. att. Nekorekti aprakstīts tīkla elementa tips: a) balsta vektorizācijas rezultāts; b) balsta fotofiksācija.

- Ilgtspējīgai digitālās inspekcijas ieviešanai jānovērtē investīcijas datu vākšanas infrastruktūrā (BGK, sensori, iekārtas), specializētā programmatūrā un datu glabāšanā, ievērojot IT politikas prasības. Turklāt jāplāno arī uzturēšanas izmaksas, lai nodrošinātu ilgtermiņa darbību un nepārtrauktību, veidojot stratēģiju inspekcijas procesa pilnveidošanai.
- Digitālās inspekcijas ieviešanai nepieciešama darbinieku kompetenču paplašināšana datu apstrādē, analītikā un informācijas sistēmās, kā arī BGK operatoru apmācība. Jāizstrādā mērķtiecīgas apmācību programmas, lai nodrošinātu darbinieku spēju efektīvi izmantot jaunās tehnoloģijas un pieņemt datus balstītus lēmumus, uzlabojot infrastruktūras pārvaldību.

Šīs rekomendācijas veicina digitālo transformāciju, nodrošinot digitālās inspekcijas ieviešanu, mazinot tehniskos riskus. Pilna vai hibrīda ieviešana veicina resursu plānošanu, optimizēšanu un lēmumu pieņemšanu, balstoties datu analīzē, kas ir svarīgi enerģētikas nozares modernizācijai.

5.4. Kopsavilkums

Šajā nodaļā aprakstīts digitālās inspekcijas risinājuma eksperiments AS “Sadales tīkls” poligonā ar 650 km gaisvadu līnijām, izmantojot *DJI Mavic 2 Pro RGB* datu un *DJI Matrice 300RTK* ar *YellowScan Mapper LIDAR* datu ieguvei, kā arī datu apstrādi infrastruktūras stāvokļa noteikšanai. Aprakstīti datu iegūšanas tehniskie parametri un metodes, pielāgojot tos Latvijas sadales sistēmas operatora vajadzībām. Tiek ņemts vērā infrastruktūras izvietojums, klimatiskie apstākļi, fiziskās īpatnības un defektu katalogs, kas ietekmē prasības datu vākšanai.

Pētījumā izstrādātas datu apstrādes metodes infrastruktūras stāvokļa novērtēšanai, ietverot vizuālo defektu identificēšanu un ģeotelpisko analīzi. Attēlu apstrādes procesā elementi tiek sasaistīti ar tīkla komponentēm, un tiek ieviesta anotēšana mākslīgā intelekta modeļu apmācībai. Piedāvātas metodes gabarītmērījumiem, vadu un balstu izvietojuma analīzei, kā arī veģetācijas novērtēšanai trašu koridoros. Rezultāti salīdzināti ar manuālās inspekcijas datiem, apliecinot risinājuma efektivitāti infrastruktūras pārvaldībā.

Nodaļas noslēgumā apkopoti pētījuma rezultāti un sniegtas rekomendācijas riska mazināšanai, ieviešot digitālo inspekciju. Ieteikumi aptver datu vākšanas un apstrādes nodrošināšanu, ieguldījumus tehnoloģijās un speciālistu apmācībā, kā arī ilgtspējīgas risinājuma attīstības stratēģijas.

SECINĀJUMI

Promocijas darbs veltīts sadales sistēmas operatora virszemes infrastruktūras inspekcijas datus balstītas metodes eksperimentālai izpētei.

Lai sasniegtu noteikto mērķi – teorētiski izpētīt un praktiski validēt datus balstītu alternatīvo metožu izstrādi sadales sistēmas vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras tehniskajai inspekcijai, ir izpildīti vairāki uzdevumi.

- Veikta padziļināta literatūras un esošo pētījumu analīze par digitālo transformāciju un datus balstītiem risinājumiem enerģētikas infrastruktūras jomā.

- Izpētītas Latvijas sadales sistēmas virszemes infrastruktūras tehniskās uzturēšanas vajadzības un identificēti specifiskie izaicinājumi, kas saistīti ar infrastruktūras elementu uzraudzību un kontroli.
- Izvērtētas vairāku datu formātu (SAR attēli, optiskie satelīta un aerofoto dati, termiskie dati, infrasarkanie dati un punktu mākoņa datu kopas) lietojuma iespējas infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanai.
- Izstrādātas funkcionālās un nefunkcionālās prasības datu iegūšanas un apstrādes procesiem, ņemot vērā AS “Sadales tīkls” infrastruktūras inspekcijas biznesa procesa specifiskās vajadzības.
- Veikts eksperimentāls pētījums infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālā novērtējuma metodei reālos Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” poligonos, lai validētu izstrādātā risinājuma efektivitāti un pielāgojamību.
- Veikts eksperimentāls pētījums infrastruktūras tehniskā stāvokļa ģeotelpisko mērījumu novērtējuma metodei reālos Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” poligonos, lai validētu izstrādātā risinājuma efektivitāti un pielāgojamību.
- Apkopotas rekomendācijas izstrādātās metodes integrēšanai sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras inspekcijas tehniskajos procesos, balstoties Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” infrastruktūrā veiktā pētījuma piemērā.

Pētījuma gaitā tika izanalizētas un praktiski validētas iespējas pārveidot manuālo virszemes infrastruktūras inspekcijas procesu uz datus balstītu digitālo pieeju, izmantojot aktuālo infrastruktūras objektu *RGB* un *LIDAR* datu kopas. Iegūtie rezultāti apstiprina, ka datu tehnoloģiju lietošana būtiski uzlabo infrastruktūras inspekcijas procesu, veicinot gan precizitāti (defektu identifikācijas lēmumu pieņemšana, balstoties datus), gan efektivitāti (datu vākšanas ātrums, ko paātrina BGK izmantošana). Tas nodrošina automatizētāku un uzticamāku infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanu.

- Vizuālais tehniskā stāvokļa novērtējums – *RGB* datu kopu analīze ļauj identificēt vizuāli uztveramus defektus ar redzamības iespēju līdz 2 cm (mehāniskie bojājumi, infrastruktūras elementu strukturālās izmaiņas), šādu detalizācijas pakāpi balstu konstrukcijām augšēja līmenī nav iespējams nodrošināt manuālajā inspekcijas laikā, tādējādi uzlabojot precizitāti, izmantojot datu analīzi. Eksperiments pierādīja, ka, izmantojot BGK ir iespējams ievērojami paātrināt datu ieguves procesu infrastruktūras vizuālo defektu identificēšanai – *RGB* datu kopas iegūšanai pētījumā tika izmantots BGK *DJI Mavic 2 Pro*, ar kura palīdzību sasniegtais vidējais ātrums bija 20 km dienā, kas ir trīs reizes ātrāk nekā tradicionālā manuālā inspekcija (līdz 6 km dienā).
- Ģeotelpiskais novērtējums – *LIDAR* datu analīze nodrošina līdz 10 cm precīzu infrastruktūras elementu ģeotelpisko pozīciju noteikšanu, tostarp tā pozicionēšanu attiecībā pret apkārtējo vidi un citiem inženiertehniskajiem elementiem. *LIDAR* nodrošina precīzu infrastruktūras topoloģijas un ģeometrijas modelēšanu, identificējot iespējamās novirzes no pieļaujamajiem parametriem (gabarītmērījumi, vadu izregulēšanās, balstu izsvēršanās), kur manuāla mērījumu veikšana būtu gan laikietilpīga, gan mazāk precīza, īpaši objektos ar apgrūtinātu piekļuvi. Eksperiments

pierādīja, ka, izmantojot BGK, ir iespējams ievērojami paātrināt datu ieguves procesu infrastruktūras ģeotelpisko atkāpju identificēšanai – *LIDAR* datu kopas iegūšanai pētījumā tika izmantots BGK *DJI Matrice 300RTK*, ar kura palīdzību sasniegtais vidējais ātrums bija 30 km dienā, kas ir piecas reizes ātrāk nekā tradicionālā manuālā inspekcija (līdz 6 km dienā).

- Veģetācijas novērtējums – *LIDAR* datu kopas analīze nodrošina veģetācijas esamības un apjoma kvantitatīvo novērtējumu noteiktajās trašu un aizsargjoslu zonās ar precizitāti līdz 10 cm, kas ļauj precīzi identificēt tās potenciālo ietekmi uz infrastruktūru. Šī tehnoloģija piedāvā ievērojami augstāku precizitāti līdz 10 cm, salīdzinot ar manuālajām inspekcijām, īpaši attiecībā uz sarežģīti pieejamām teritorijām vai plašām aizsargjoslām (līdz 60 m meža teritorijās). *LIDAR* datu apstrāde ļauj detalizēti noteikt veģetācijas augstumu, blīvumu un izplatību, kas ir būtiski risku vadības un tīkla pārvaldības procesā, un manuālajā režīmā to nodrošināt ir tehniski sarežģīti un laikietilpīgi.

Iegūtie rezultāti un zināšanas veicina inovatīvu un efektīvu tehnisko inspekciju attīstību, balstoties datu analīzē un modernās tehnoloģijās, ļaujot digitāli pārveidot infrastruktūras inspekcijas procesu Latvijā. AS “Sadales tīkls” hibrīda modelis, kas apvieno manuālās inspekcijas ar *RGB* un *LIDAR* metodēm, sniedz priekšrocības ilgtspējīgas attīstības, vides pārvaldības un resursu efektivitātes uzlabošanā un var kalpot par paraugu citiem operatoriem.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Chwiłkowska-Kubala, Szymon Cyfert, Kamila Malewska, Katarzyna Mierzejewska, and W. Szumowski, “The impact of resources on digital transformation in energy sector companies. The role of readiness for digital transformation”, *Technology in Society*, pp. 102315–102315, Jul. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102315>.
2. W. Lyu and J. Liu, “Artificial Intelligence and emerging digital technologies in the energy sector”, *Applied Energy*, vol. 303, pp. 117615–117615, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117615>.
3. C. M. Yung, Y. Zhao, T. Yamamoto, K. Yawata, S. Matsuda and N. Moriwaki, “Tree-Based Approach for Vegetation Monitoring and Risk Assessment Along Powerline Using High Resolution Satellite Image”, *IGARSS 2024 – 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Athens, Greece, 2024, pp. 7501–7505, <https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10641974>.
4. N. Manakitsa, G. S. Maraslidis, L. Moysis, G. F. Fragulis, “A Review of Machine Learning and Deep Learning for Object Detection, Semantic Segmentation, and Human Action Recognition in Machine and Robotic Vision”, *Technologies 2024*, 12, 15, <https://doi.org/10.3390/technologies12020015>.
5. C. Sangeetha, Vishnu Moond, G. M. Rajesh, Jamu Singh Damor, Shivam Kumar Pandey, Pradeep Kumar and Barinderjit Singh, “Remote Sensing and Geographic Information

- Systems for Precision Agriculture: A Review”, *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(2), 287–309, 2024, <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i23945>.
6. Z. Sharifisoraki, Dey Ankita, R. Selzler, M. Amini, James Green, Rajan Sreeraman, F. Kwamena, “Monitoring Critical Infrastructure Using 3D LiDAR Point Clouds”, *IEEE Access*, 11, 314–336, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3232338>.
 7. M. F. Mansuri, B. K. Saxena and S. Mishra, “Shifting from Fossil Fuel Vehicles to H2 based Fuel Cell Electric Vehicles: Case Study of a Smart City”, *2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM)*, Dehradun, India, 2020, pp. 316–321, <https://doi.org/10.1109/ICACCM50413.2020.9213043>.
 8. AS “Latvenergo” mājaslapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 7. janvārī] Pieejams: <https://latvenergo.lv/lv/par-mums/razosana#fakti>.
 9. AS “Elering” mājaslapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 7. janvārī] Pieejams: <https://elering.ee/en/system-operation>.
 10. AS “Litgrid” mājaslapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 7. janvārī] Pieejams: <https://www.litgrid.eu/index.php/power-system/power-system-information/power-system-information/543>.
 11. AS “Sadales tīkls” mājaslapa, 2022.gada pārskats [tiešsaiste], [skatīts 2023. gada 12. augustā] Pieejams: https://sadalestikls.lv/storage/app/media/uploaded-files/Sadales%20tikls_%202022_gada%20p%C4%81rskats.pdf.
 12. AS “ESO” mājaslapa, 2022. gada pārskats [tiešsaiste], [skatīts 2023. gada 12. augustā] Pieejams: <https://www.eso.lt/lt/apie-mus/ataskaitos-ir-dokumentai/finansines-ataskaitos.html#!topic1579>.
 13. AS “Elektrilevi” mājaslapa, 2022. gada pārskats [tiešsaiste], [skatīts 2023. gada 12. augustā] Pieejams: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/Elektrilevi_aastaaruanne_2022.pdf.
 14. Z. Wang, M. Begovic and J. Wang, “Analysis of conservation voltage reduction effects based on multistage SVR and stochastic process”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 431–439, Jan. 2014.
 15. T. Hong and J. Burke, “Calculating line losses in smart grid: A new rule of thumb”, *Proc. IEEE Power Energy Soc. Transmiss. Distrib. Conf. Expo.*, pp. 1–5, Apr. 2010.
 16. P. G. Da Silva, D. Iliæ and S. Karnouskos, “The impact of smart grid prosumer grouping on forecasting accuracy and its benefits for local electricity market trading”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 402–410, Jan. 2014.
 17. Ministru kabineta noteikumi Nr. 281 “*Augstas detalizācijas topogrāfiskās informācijas un tās centrālās datubāzes noteikumi*” [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 10. maijā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/246998-augstas-detalizācijas-topografiskas-informācijas-un-tas-centralas-datubazes-noteikumi>.
 18. K. Kraus, N. Pfeifer, “Determination of terrain models in wooded areas with ALS data”, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1998.
 19. D. Gauge and A. Litvinenko, “Impact of data synchronization methods on the quality of engineering NIS data from several integrated applications in GIS architecture”, *2021 IEEE*

- 9th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Riga, Latvia, 2021, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/AIEEE54188.2021.9670142>.
20. V. Simankov, P. Buchatskiy, A. Kazak, S. Teploukhov, S. Onishchenko, K. Kuzmin, P. Chetyrbok, "A Solar and Wind Energy Evaluation Methodology Using Artificial Intelligence Technologies", *Energies* 2024, 17, 416. <https://doi.org/10.3390/en17020416>.
 21. D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks, "Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2020, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
 22. J. Boensch, M. Elstermann, A. Kimming, J. Ovtcharova, "A Subject-Oriented "Reference Model for Digital Twins", *Comput. Ind. Eng.* 2022, 172, 108556.
 23. R. Bortolini, R. Rodrigues, H. Alavi, L. F. D. Vecchia, N. Forcada, "Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review", *Energies* 2022, 15, 7002, <https://doi.org/10.3390/en15197002>.
 24. M. Belik, O. Rubanenko, "Implementation of Digital Twin for Increasing Efficiency of Renewable Energy Sources", *Energies* 2023, 16, 4787, <https://doi.org/10.3390/en16124787>.
 25. A. Lektauers, J. Pecerska, V. Bolsakovs, A. Romanovs, J. Grabis, A. Teilans, "A Multi-Model Approach for Simulation-Based Digital Twin in Resilient Services", *WSEAS Trans. Syst. Control* 2021, 16, 133–145.
 26. Latvijas Energostandarts LEK025 "Drošības prasības, veicot darbus elektroietaisēs" [tiešsaiste], [skatīts 2024. gadā 8. jūnijā]. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5ee/b5b/8d7/5eeb5b8d7bb60962266085.pdf>.
 27. Van Nhan Nguyen, R. Jenssen, and Davide Roverso, "Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 107–120, Jul. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.016>.
 28. L. Matikainen *et al.*, "Remote sensing methods for power line corridor surveys", *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 119, pp. 10–31, Sep. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011>.
 29. Aviācijas un kosmosa tehnoloģiju uzņēmuma AIRBUS mājaslapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 10. februārī]. Pieejams: <https://www.airbus.com/en/products-services/space/earth-observation/earth-observation-portfolio/pleiades-neo>.
 30. M. Topalov, "National Grid eyes savings of £22 million through satellite imagery initiative", [tiešsaiste] *Current News*, Dec. 13, 2022. [skatīts 2023. gada 3. decembrī]. Pieejams: <https://www.current-news.co.uk/national-grid-eyes-savings-of-22-million-through-satellite-imagery-initiative/>.
 31. Drones, "Application of Infrared & UV Cameras & Drones to Inspect Transmission Lines (Video)", Nov. 06, 2023. [tiešsaiste], [skatīts 2023. gada 21. novembrī]. Pieejams: <https://www.inmr.com/corona-infrared-inspections-power-lines-video/>.
 32. DJI Mavic 2 Pro specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 20. jūlijā]. Pieejams: <https://www.dji.com/lv/mavic-2/info>.

33. DJI Mavic 3 Pro specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 20. jūlijā]. Pieejams: <https://www.dji.com/lv/mavic-3-pro/specs>.
34. DJI Mini 4 Pro specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 20. jūlijā]. Pieejams: <https://www.dji.com/lv/mini-4-pro/specs>.
35. D. Song, F. Yuan and C. Ding, “Track Foreign Object Debris Detection based on Improved YOLOv4 Model”, *2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Beijing, China, 2022, pp. 1991–1995, <https://doi.org/10.1109/IAEAC54830.2022.9930100>.
36. Z. Chen *et al.*, “An Improved Faster R-CNN Transmission Line Bolt Defect Detection Method”, *2022 World Automation Congress (WAC)*, San Antonio, TX, USA, 2022, pp. 82–85, <https://doi.org/10.23919/WAC55640.2022.9934151>.
37. A. Jiang, N. Yan, F. Wang, H. Huang, H. Zhu and B. Wei, “Visible Image Recognition of Power Transformer Equipment Based on Mask R-CNN”, *2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Beijing, China, 2019, pp. 657–661, <https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975213>.
38. Zhan Chao, Luo Yizhao, Li Ronggui, Gao Jun, Zhang Mi, “Power Distribution Network Based on Digital 3D Twin Panoramic Modeling”, ICRTEG, 2020.
39. LAS 1.4 specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 3. augustā]. Pieejams: https://www.asprs.org/wpcontent/uploads/2010/12/LAS_1_4_r13.pdf.
40. Ministru kabineta noteikumi Nr. 248 Bezpilota gaisa kuģu lidojumu noteikumi [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 4. augustā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/351478-bezpilota-gaisa-kugu-lidojumu-noteikumi>.
41. Ministru kabineta noteikumi Nr. 879 Ģeodēziskās atskaites sistēmas un topogrāfisko karšu sistēmas noteikumi [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 5. augustā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/239759-geodeziskas-atskaites-sistemas-un-topografisko-karsu-sistemas-noteikumi>.
42. L. V. T. Vencer and A. R. Caballero, “Applications of Cut, Paste, Learn Synthetic Image Generation, and Convolutional Neural Networks in Marine Animals Classification”, *2023 8th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)*, Bangkok, Thailand, 2023, pp. 376–380, <https://doi.org/10.1109/ICBIR57571.2023.10147420>.
43. S. Moon, J. Lee, J. Lee, D. Nam and W. Yoo, “A Study on NeRF-based Synthetic Image Generation and Post-processing Method for Object Detection”, *2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju Island, Korea, Republic of, 2022, pp. 1560–1562, <https://doi.org/10.1109/ICTC55196.2022.9952798>.
44. Latvijas Energostandarts LEK 015 [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 10. augustā]. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db/5b6/530/5db5b653087ed227551484.pdf>.
45. Y. He, G. Hu and S. Yu, “Hard-Soft Pseudo Labels Guided Semi-Supervised Learning for Point Cloud Classification”, in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 31, pp. 1059–1063, 2024, <https://doi.org/10.1109/LSP.2024.3386115>.

46. Aizsargjoslu likums [tiešsaiste], [skatīts 2024. gadā 8. jūnijā]. Pieejams:
<https://likumi.lv/ta/id/42348-aizsargjoslu-likums>.
47. LEK015 Vidsrieguma gaisvadu elektrolīnijas galvenās tehniskās prasības [tiešsaiste],
[skatīts 2024. gada 10. augustā]. Pieejams:
<https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db/5b6/530/5db5b653087ed227551484.pdf>.



Diāna Gauče dzimusi 1986. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvusi bakalaura grādu elektrozinātnē (2008) un maģistra grādu telekomunikācijās (2010). Biznesa, mākslas un tehnoloģiju augstskolā RISEBA ieguvusi maģistra grādu uzņēmējdarbības vadībā (2013). Strādājusi uzņēmumos, kas specializējas inženiertehniskās infrastruktūras pārvaldībā: SIA "*Citrus Solutions*", SIA "*Tet*", AS "*Sadales tīkls*". Patlaban ir AS "*Sadales tīkls*" attīstības vadītāja.

Zinātniskās intereses ietver tehnoloģiskās inovācijas infrastruktūras pārvaldībā ar fokusu uz mākslīgā intelekta lietošanu, digitālo transformāciju un viedās infrastruktūras risinājumu izstrādi un integrāciju enerģētikas jomā.