



RIGA TECHNICAL  
UNIVERSITY

**Diāna Gauče**

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

Promocijas darbs



# **RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte  
Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts

**Diāna Gauče**

Doktora studiju programmas “Elektronika” doktorante

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

**Promocijas darbs**

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 darbs. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. 186 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.

# 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, Latvija

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.

Diāna Gauče ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 90 attēli, 32 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 (BKG) 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.

Promocijas darbs sastāv no ievada, piecām nodaļām un secinājumiem, ietver 90 attēlus, 33 tabulas un 6 pielikumus. Kopējais lappušu skaits, neieskaitot pielikumus, ir 157. Izmantotās literatūras sarakstā iekļauti 109 informācijas avoti.

## ABSTRACT

The Thesis is dedicated to data-driven automation solutions designed to enhance the maintenance processes of overhead engineering infrastructure. A solution is developed and analyzed for implementing the infrastructure inspection process by capturing RGB and LIDAR datasets using unmanned aerial vehicles (UAVs) and processing large-scale data through machine learning to assess the technical condition of infrastructure elements.

The research is structured into five chapters, each covering a critical aspect of modernization and analysis in power distribution systems: a theoretical analysis of changes in the structure and development trends of power systems, an overview of digital transformation in the energy sector, an examination of the infrastructure inspection process within Latvia's electricity distribution system, a theoretical assessment of alternative methods for identifying visual and geospatial defects, and an experimental investigation into RGB and LIDAR data-based inspection solutions. Together, these chapters provide a comprehensive perspective on integrating new, more efficient methods into energy system management and foster innovation within Latvia's power system. The research findings were developed in collaboration with JSC "Sadales tīkls" providing an industrial context for the study. Results obtained during the research have been published in five scientific articles.

The Thesis consists of an introduction, five chapters, and conclusions, including 90 figures, 33 tables, and 6 appendices. The total page number, excluding appendices, is 157. The bibliography comprises 109 referenced sources.

# SATURS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| SAĪSINĀJUMU SARAKSTS .....                                                                 | 8  |
| SARAKSTS AR TABULĀM.....                                                                   | 10 |
| SARAKSTS AR ATTĒLIEM.....                                                                  | 11 |
| IEVADS.....                                                                                | 14 |
| 1. ELEKTROENERĢIJAS SISTĒMAS STRUKTŪRA.....                                                | 22 |
| 1.1. Elektroenerģijas ražošana.....                                                        | 22 |
| 1.2. Elektroenerģijas pārvade .....                                                        | 24 |
| 1.3. Elektroenerģijas sadale .....                                                         | 25 |
| 1.4. Kopsavilkums .....                                                                    | 27 |
| 2. DIGITĀLĀ TRANSFORMĀCIJA ENERĢĒTIKAS JOMĀ.....                                           | 28 |
| 2.1. Viedo skaitītāju tehnoloģijas apskats.....                                            | 28 |
| 2.2. GIS sistēmas pielietojums infrastruktūras tehnisko datu uzturēšanai .....             | 29 |
| 2.2.1. Ģeotelpisko datu vizualizācija .....                                                | 31 |
| 2.2.2. Tehnisko datu uzturēšana ĢIS.....                                                   | 32 |
| 2.2.3. ĢIS datu interpretācija un analīze.....                                             | 32 |
| 2.2.4. ĢIS funkcionālās lietotnes .....                                                    | 34 |
| 2.3. Digitālā dvīņa koncepta pielietojums enerģētikas jomā .....                           | 35 |
| 2.3.1. Digitālā dvīņa konceptuālais apskats .....                                          | 35 |
| 2.3.2. Digitālais dvīnis energoefektīvu ēku pārvaldībai.....                               | 39 |
| 2.3.3. Digitālais dvīnis atjaunojamajiem enerģijas avotiem .....                           | 40 |
| 2.3.4. Sadales operatora virszemes infrastruktūras digitālais dvīnis .....                 | 42 |
| 2.4. Kopsavilkums .....                                                                    | 43 |
| 3. LATVIJAS ELEKTROENERĢIJAS SADALES SISTĒMAS INFRASTRUKTŪRAS<br>INSPEKCIJAS PROCESS ..... | 44 |
| 3.1. AS “Sadales tīkls” inspekcijas procesa pārvaldība un organizācija .....               | 44 |
| 3.2. Vidējā sprieguma defektu klasifikācija.....                                           | 48 |
| 3.3. Kopsavilkums .....                                                                    | 51 |
| 4. ALTERNATĪVĀS METODES DEFEKTU IDENTIFICĒŠANAI.....                                       | 52 |
| 4.1. Vizuālo defektu noteikšanas metodes .....                                             | 52 |
| 4.1.1. Datu tipi defektu identificēšanai .....                                             | 53 |
| 4.1.1.1. SAR attēli.....                                                                   | 53 |
| 4.1.1.2. Optiskie satelīta attēli.....                                                     | 54 |
| 4.1.1.3. Optiskie aerofoto attēli.....                                                     | 55 |
| 4.1.1.4. Termiskie attēli.....                                                             | 56 |

|                                                                                     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1.1.5. Ultravioletie attēli .....                                                 | 56   |
| 4.1.1.6. Datu tipu salīdzinājums.....                                               | 57   |
| 4.1.2. Optisko aerofotoattēlu iegūšanas ierīces.....                                | 58   |
| 4.1.3. Transportlīdzekļu veidi optisko aerofotoattēlu datu vākšanai .....           | 60   |
| 4.1.4. Datu analīze vizuālo defektu noteikšanai .....                               | 63   |
| 4.2. Ģeotelpisko defektu noteikšanas metodes.....                                   | 64   |
| 4.2.1. Datu tipi ģeotelpisko mērījumu īstenošanai.....                              | 66   |
| 4.2.2. LIDAR sensors.....                                                           | 68   |
| 4.2.3. Transportlīdzekļi punktu mākoņa datu vākšanai.....                           | 72   |
| 4.2.4. Datu analīze ģeotelpisko defektu noteikšanai.....                            | 73   |
| 4.3. Kopsavilkums .....                                                             | 76   |
| 5. DIGITĀLĀS INSPEKCIJAS RISINĀJUMA EKSPERIMENTĀLAIS PĒTĪJUMS.....                  | 78   |
| 5.1. Datu iegūšanas process.....                                                    | 79   |
| 5.1.1. Datu kopu iegūšanas tehniskie parametri .....                                | 80   |
| 5.1.2. Datu kopu iegūšanas scenārijs. ....                                          | 84   |
| 5.1.3. Datu kopu iegūšanas realizācijas parametri .....                             | 89   |
| 5.1.4. Eksperimenta rezultātu kopsavilkums .....                                    | 90   |
| 5.2. Datu analīzes process.....                                                     | 93   |
| 5.2.1. Datu kopu apstrādes rīku funkcionalitātes prasības tehniskie parametri ..... | 94   |
| 5.2.2. Infrastruktūras vizuālais tehniskā stāvokļa novērtējums .....                | 99   |
| 5.2.3. Infrastruktūras ģeotelpiskie mērījumi.....                                   | 116  |
| 5.2.3.1. Elektropārvades līniju balstu, telpiskā izvietojuma noteikšana .....       | 119  |
| 5.2.3.2. Gabarītmērījumi.....                                                       | 120  |
| 5.2.3.3. Vadu izregulēšanās.....                                                    | 125  |
| 5.2.3.4. Vadu izvietojums balstos un attālumi starp vadu stiprinājumiem.....        | 128  |
| 5.2.3.5. Balstu izsvēršanas vērtības .....                                          | 130  |
| 5.2.3.6. Veģetācijas pārvaldība trašu koridoros un aizsargjoslās .....              | 132  |
| 5.2.4. Datu apstrādes realizācijas parametri.....                                   | 138  |
| 5.2.5. Eksperimenta rezultātu kopsavilkums .....                                    | 139  |
| 5.3. Digitālās inspekcijas ieviešanas rekomendācijas .....                          | 141  |
| 5.4. Kopsavilkums .....                                                             | 1466 |
| SECINĀJUMI .....                                                                    | 1477 |
| LITERATŪRAS SARAKSTS.....                                                           | 149  |
| PIELIKUMI .....                                                                     | 158  |

## SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

| Saīsinājums | Saīsinājuma skaidrojums                                                                                                |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3D          | trīsdimensionāls                                                                                                       |
| ADTI        | augstas detalizācijas topogrāfiskās informācija                                                                        |
| AER         | atjaunīgie energoresursi                                                                                               |
| AI          | <i>Artificial intelligence</i> , mākslīgais intelekts                                                                  |
| AMI         | <i>Advanced Metering Infrastructure</i> , uzlabota mērīšanas infrastruktūra                                            |
| API         | <i>Application Programming Interface</i> , lietojumprogrammas saskarne                                                 |
| AR          | <i>Augmented Reality</i> , papildinātā realitāte                                                                       |
| AS          | akciju sabiedrība                                                                                                      |
| ASPRS       | <i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i> , amerikāņu fotogrammetrijas un attālās izpētes biedrība |
| AWS         | <i>Amazon Web Services</i> , amazon mākoņdatošanas pakalpojumi                                                         |
| BGK         | bezpilota gaisa kuģis                                                                                                  |
| BI          | <i>Business Intelligence</i> , biznesa inteliģence                                                                     |
| BIM         | būvniecības informācijas modelēšana                                                                                    |
| CCD         | <i>Charge-Coupled Device</i> , ar uzlādi savienota ierīce                                                              |
| CMOS        | <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> , komplementārs metāla oksīda pusvadītājs                               |
| CPU         | <i>Central Processing Unit</i> , centrālais procesors                                                                  |
| DMS         | <i>Distribution Management System</i> , sadales tīkla vadības sistēma                                                  |
| ES          | Eiropas savienība                                                                                                      |
| 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                                                      |
| ĢIS         | ģeotelpiskā informācijas sistēma                                                                                       |
| ID          | identifikators                                                                                                         |
| IoT         | <i>Internet of Things</i> , lietu internets                                                                            |
| IR          | <i>Infrared</i> , infrasarkanais                                                                                       |
| IS          | informācijas sistēma                                                                                                   |
| KPI         | <i>Key Performance Indicator</i> , galvenais veiktspējas rādītājs                                                      |
| 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> , komunikācija caur elektropārvades līnijām                                            |
| R-CNN       | <i>Region-based Convolutional Neural Network</i> , reģionu 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> , ĢIS mobilā versija                                                          |
| UV    | <i>Ultra Violet</i> , ultraviolets                                                                 |
| UX    | <i>User Expierience</i> , lietotāja pieredze                                                       |
| VR    | <i>Virtual Reality</i> , virtuālā realitāte                                                        |
| VS    | vidējais spriegums                                                                                 |
| WGS   | <i>World Geodetic System</i> , pasaules ģeodēziskā sistēma                                         |
| XML   | <i>Extensible Markup Language</i> , paplašināmā iezīmēšanas valoda                                 |
| YOLO  | <i>You Only Look Once</i> , reāllaika objektu noteikšanas sistēma “Tu paskaties tikai vienu reizi” |
| ZS    | zemspriegums                                                                                       |

## SARAKSTS AR TABULĀM

| N.p.k. | Tabulas numurs | Tabulas nosaukums                                                                                                |
|--------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.     | 1.1. tab.      | Latvijas lielākie Enerģijas ražotāji (2022.gada dati)                                                            |
| 2.     | 1.2. tab.      | Baltijas valstu pārvades tīkla rādītāji (2022.gada dati)                                                         |
| 3.     | 1.3. tab.      | Baltijas valstu sadales tīkla rādītāji (2022.gada dati)                                                          |
| 4.     | 3.1. tab.      | Plānotās defektēšanas periodiskums                                                                               |
| 5.     | 3.2. tab.      | Gaisvada līniju operatīvi bīstamo defektu piemēri                                                                |
| 6.     | 4.1. tab.      | Datu avoti vizuālo defektu noteikšanas metodēm                                                                   |
| 7.     | 4.2. tab.      | Gimbal un kameras salīdzinājums                                                                                  |
| 8.     | 4.3. tab.      | Datu vākšanas transportlīdzekļu salīdzinājums inspekcijas procesa vajadzībām                                     |
| 9.     | 4.4. tab.      | Atribūtu saraksts punktam                                                                                        |
| 10.    | 4.5. tab.      | <i>LIDAR</i> sensoru sistēmas salīdzinājums                                                                      |
| 11.    | 4.6. tab.      | Datu vākšanas transporta salīdzinājums defektēšanas procesa vajadzībām                                           |
| 12.    | 4.7.tab.       | Alternatīvo defektu identificēšanas metožu piemēri elektroenerģijas infrastruktūrā citās valstīs                 |
| 13.    | 5.1. tab.      | <i>RGB</i> datu vākšanas tehnisko prasību parametri inspekcijas procesa vajadzībām                               |
| 14.    | 5.2. tab.      | <i>LIDAR</i> datu vākšanas tehnisko prasību parametri inspekcijas procesa vajadzībām                             |
| 15.    | 5.3. tab.      | <i>RGB</i> un <i>LIDAR</i> datu kopas plānotie apjomi                                                            |
| 16.    | 5.4. tab.      | Datu iegūšanas realizācijas organizācijas aktivitātes                                                            |
| 17.    | 5.5. tab.      | Savāktā <i>RGB</i> un <i>LIDAR</i> datu kopu apjomi                                                              |
| 18.    | 5.6. tab.      | Datu vākšanas efektivitātes salīdzinājums: bezpilota lidaparātu un manuālās metodes analīze                      |
| 19.    | 5.7. tab.      | Datu apstrādes programmatūras tehnisko prasību parametri inspekcijas procesa vajadzībām                          |
| 20.    | 5.8. tab.      | Rekomendāciju apkopojums identificēšanas precizitātes uzlabošanai                                                |
| 21.    | 5.9. tab.      | Vidējā sprieguma tīkla elementu defektu identifikācijas modeļa rezultāts                                         |
| 22.    | 5.10. tab.     | Tīkla elementu defektu manuālās identifikācijas rezultāts                                                        |
| 23.    | 5.11. tab.     | Zemsprieguma tīkla elementu defektu identifikācijas modeļa rezultāts                                             |
| 24.    | 5.12. tab.     | Apkopojs par veiktajiem datos balstītajiem vizuāli identificējamajiem tehniskā stāvokļa defektiem                |
| 25.    | 5.13. tab.     | Pētījumā izmantoto objektu identifikācijas modeļu tehniskie parametri                                            |
| 26.    | 5.14. tab.     | Tehniska objekta cc4bc balstu telpiskā izvietojuma salīdzinājums                                                 |
| 27.    | 5.15. tab.     | AS “Sadales tīkls” infrastruktūrai noteiktie minimālie vertikālie gaisvadu elektrolīnijas vadu attālumi no zemes |
| 28.    | 5.16. tab.     | <i>LIDAR</i> datu analīzes rezultātu salīdzinājums ar manuālās defektēšanas rezultātiem                          |
| 29.    | 5.17. tab.     | Minimālie attālumi starp kailvadiem gaisvadu elektrolīnijās                                                      |
| 30.    | 5.18. tab.     | AS “Sadales tīkls” infrastruktūras aizsargjoslu noteiktās platības                                               |
| 31.    | 5.19. tab.     | Veģetācijas noteikšanas <i>LIDAR</i> datu analīzes rezultāta piemērs                                             |
| 32.    | 5.20. tab.     | Veģetācijas analīzes rezultātu salīdzinājums                                                                     |
| 33.    | 5.21. tab.     | Datu analīzes realizācijas organizācijas aktivitātes                                                             |

## SARAKSTS AR ATTĒLIEM

| N.p.k. | Attēla numurs | Attēla nosaukums                                                                                                                              |
|--------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.     | 1.1. att.     | Elektroenerģijas sistēma.                                                                                                                     |
| 2.     | 1.2. att.     | Ražotāju kopējā sadales tīklā nodotā saules elektroenerģijas apjoma dinamika (GWh).                                                           |
| 3.     | 1.3. att.     | Baltijas valstu pārvades tīkls.                                                                                                               |
| 4.     | 1.4. att.     | Elektroenerģijas sistēmas tendences.                                                                                                          |
| 5.     | 2.1. att.     | Elektroenerģijas uzskaites viedais skaitītājs (Latvija, 2024).                                                                                |
| 6.     | 2.2. att.     | Elektrotīkla atslēguma kartes: Latvijas [32], Lietuvas [33] un Igaunijas [34].                                                                |
| 7.     | 2.3. att.     | GIS darbības komponentes.                                                                                                                     |
| 8.     | 2.4. att.     | GIS skats ar un bez fona kartes (ST pielietojums, <i>Trimble Inc.</i> programmatūra).                                                         |
| 9.     | 2.5. att.     | Ģeostatistiskā aprēķina standarta darbplūsma [37].                                                                                            |
| 10.    | 2.6. att.     | GIS struktūras prototips [38].                                                                                                                |
| 11.    | 2.7. att.     | Datu pārvaldības modeļa piemērs sadales operatora IT infrastruktūrā [39].                                                                     |
| 12.    | 2.8. att.     | Digitālā dvīņa vispārīgā konceptuālā struktūra [59].                                                                                          |
| 13.    | 2.9. att.     | Galvenie mākslīgā intelekta pielietojumi enerģētikas nozarē [60].                                                                             |
| 14.    | 2.10. att.    | Datu integrācijas process [53].                                                                                                               |
| 15.    | 2.11. att.    | Pieslēgtā saules ģenerācijas jauda (kumulatīvi) (MW) [13].                                                                                    |
| 16.    | 2.12. att.    | Galvenās (a.) pieejas AER prognozēm un mašīnmācīšanās algoritmi (b.) saules enerģijas prognozēm [67].                                         |
| 17.    | 2.13. att.    | Paneļu uzstādīšanas simulācijas energoefektivitātes aprēķiniem [70].                                                                          |
| 18.    | 2.14. att.    | Sadales sistēmas operatoru jaunā loma [71].                                                                                                   |
| 19.    | 2.15. att.    | Manuālās un digitālās inspekcijas procesa plūsmas.                                                                                            |
| 20.    | 3.1. att.     | Plānotās inspekcijas procesa shēma.                                                                                                           |
| 21.    | 3.2. att.     | Inspekcijas izpilde, izmantojot UTG lietotni.                                                                                                 |
| 22.    | 3.3. att.     | Tīkla pārvaldības struktūrshēma.                                                                                                              |
| 23.    | 3.4. att.     | Gabarītmērījumu veikšanā izmantotā iekārta un faktiskās vērtības ievade UTG.                                                                  |
| 24.    | 3.5. att.     | Dažādās steidzamības defektu vizuālie piemēri.                                                                                                |
| 25.    | 4.1. att.     | Balstu konstrukcija.                                                                                                                          |
| 26.    | 4.2. att.     | SAR attēla paraugs [77].                                                                                                                      |
| 27.    | 4.3. att.     | Optiskā satelīta attēla paraugs [77].                                                                                                         |
| 28.    | 4.4. att.     | Aerofoto attēla paraugs.                                                                                                                      |
| 29.    | 4.5. att.     | Termisko attēlu paraugs.                                                                                                                      |
| 30.    | 4.6. att.     | UV attēla paraugs, korona izlāde [82].                                                                                                        |
| 31.    | 4.7. att.     | Bezpilota gaisa kuģu piemēri ( <i>DJI Mavic 2 Pro</i> , <i>DJI Mavic 3 Pro</i> , <i>DJI Mini 4 Pro</i> ) ar iebūvētām optiskajām RGB kamerām. |
| 32.    | 4.8. att.     | Infrastruktūras datu vākšanas transporta veidu piemēri.                                                                                       |
| 33.    | 4.9. att.     | Datu atšķirību salīdzinājuma vizualizācija, izmantojot dažādus transporta veidus.                                                             |
| 34.    | 4.10. att.    | Potenciālā attēlu datu analīzes darbplūsma.                                                                                                   |
| 35.    | 4.11. att.    | Defekta anotācijas piemērs.                                                                                                                   |
| 36.    | 4.12. att.    | Balstu izsvēršanas piemērs ārpus līnijas ass.                                                                                                 |
| 37.    | 4.13. att.    | Gabarītu mērījuma piemērs.                                                                                                                    |



|     |            |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 38. | 4.14. att. | Veģetācijas defekta piemērs elektrotīkla aizsargjoslā.                                                                                                                                                                                                  |
| 39. | 4.15. att. | Punktu mākoņa paraugs.                                                                                                                                                                                                                                  |
| 40. | 4.16. att. | <i>LIDAR</i> a lāzera impulsu atstarošanās.                                                                                                                                                                                                             |
| 41. | 4.17. att. | <i>LIDAR</i> sistēmas darbības princips [90].                                                                                                                                                                                                           |
| 42. | 4.18. att. | <i>LIDAR</i> sistēmas komponentes.                                                                                                                                                                                                                      |
| 43. | 4.19. att. | <i>LIDAR</i> sensoru piemēri ( <i>DJI Zenmuse L2</i> , <i>YellowScan Mapper</i> , <i>CHCNAV AlphaAiR 450</i> ).                                                                                                                                         |
| 44. | 4.20. att. | Infrastruktūras <i>LIDAR</i> datu vākšanas transporta piemērs ar bezpilota lidaparātu.                                                                                                                                                                  |
| 45. | 4.21. att. | Defektēšanas procesa prasības ietekmes piemērs uz <i>LIDAR</i> sensora.                                                                                                                                                                                 |
| 46. | 4.22. att. | LAS 1.4 formāta klasifikācijas kodi.                                                                                                                                                                                                                    |
| 47. | 4.23. att. | Datu manuālā klasifikācija [95].                                                                                                                                                                                                                        |
| 48. | 4.24. att. | Potenciālā <i>LIDAR</i> datu apstrādes darbplūsmā.                                                                                                                                                                                                      |
| 49. | 4.25. att. | Infrastruktūras ģeotelpiska defekta noteikšanas piemērs.                                                                                                                                                                                                |
| 50. | 4.26. att. | Digitālās inspekcijas risinājuma piedāvājums.                                                                                                                                                                                                           |
| 51. | 5.1. att.  | Pētījuma ģeogrāfiskais tvērums (a. Virszemes elektropārvades līnijas, b. Vidējā sprieguma līnijas, c. Zemsprieguma līnijas).                                                                                                                            |
| 52. | 5.2. att.  | <i>RGB</i> attēla rezultāts, kas iegūts no testa lidojuma.                                                                                                                                                                                              |
| 53. | 5.3. att.  | Balstu konstrukciju tipi (a. P tipa koka balsts ar transformatoru, b. 3 kāju koka balsts, c. I tipa koka balsts).                                                                                                                                       |
| 54. | 5.4. att.  | Precizitātes un atkārtojamības ietekmes ilustrācija uz vadu mērījumu kvalitāti.                                                                                                                                                                         |
| 55. | 5.5. att.  | <i>DJI Matrice 300RTK BGK</i> ar uzstādīto <i>YellowScan Mapper LIDAR</i> sensoru.                                                                                                                                                                      |
| 56. | 5.6. att.  | Izejas dati (a. līniju veida elementiem, b. punktveida elementiem) GIS datu bāzes lidojuma plānošanai.                                                                                                                                                  |
| 57. | 5.7. att.  | Vizuālo defektu piemēri (a. Infrastruktūras elementa bojājumi b. Infrastruktūras elementa komponentes neesamība).                                                                                                                                       |
| 58. | 5.8. att.  | Datu attēlu apstrādes process.                                                                                                                                                                                                                          |
| 59. | 5.9. att.  | Attēlu uzņemšanas izvietojums un skata virziens.                                                                                                                                                                                                        |
| 60. | 5.10. att. | Datu lejupielādes statusa vizualizācija.                                                                                                                                                                                                                |
| 61. | 5.11. att. | Augsta līmeņa shematisks pārskats par mašīnmācīšanās izstrādes procesu interesējošo objektu noteikšanai.                                                                                                                                                |
| 62. | 5.12. att. | AS “Sadales tīkls” infrastruktūras koka balsta A tipa attēlu piemēri.                                                                                                                                                                                   |
| 63. | 5.13. att. | Elementa anotēšanas piemērs <i>Hepta Insights</i> programmatūrā.                                                                                                                                                                                        |
| 64. | 5.14. att. | Balstu identificēšanas statistika.                                                                                                                                                                                                                      |
| 65. | 5.15. att. | Balstu automātiskās identificēšanas rezultāts (a. Koka balsta I ar transformatoru identificēšana; b. Koka balsta A ar pastabu identificēšana).                                                                                                          |
| 66. | 5.16. att. | Objektu identificēšanas modeļa darbības princips (a. infrastruktūras elementu identifikācija; b. defektu identifikācija infrastruktūras elementos).                                                                                                     |
| 67. | 5.17. att. | Defektu redzamības piemēri (a. "Vadu savienojumu skaits 1-2" defekts; b. "Izolators - netīrs" defekts).                                                                                                                                                 |
| 68. | 5.18. att. | Defekta "Atvienots vads no izolatora" anotācijas (a. sistēmas ģenerētā anotācija, b. manuāli pievienotā anotācija) un sistēmas ģenerētas defekta atskaites piemērs (c. atskaite sistēmas ģenerētam defektam, d. Atskaite manuāli pievienotam defektam). |
| 69. | 5.19. att. | <i>LIDAR</i> datu klasifikācija (a. neklasificētie dati, b. klasificētie dati).                                                                                                                                                                         |

|     |            |                                                                                                                                                                                                                         |
|-----|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 70. | 5.20. att. | AS "Sadales tīkls" infrastruktūras vektorizācijas piemērs.                                                                                                                                                              |
| 71. | 5.21. att. | Balstu izvietojuma statuss (līnijas fragments).                                                                                                                                                                         |
| 72. | 5.22. att. | Gabarītmērījumu automātiskā noteikšana Neara programmatūrā.                                                                                                                                                             |
| 73. | 5.23. att. | Gabarītmērījumu noteikšana Neara programmatūrā (a. masveida skata vizualizācija, b. viena laiduma vizualizācija).                                                                                                       |
| 74. | 5.24. att. | Gabarītmērījumu noteikšana dažādās metodēs (a. Neara programmatūrā, b. papildus mērījums, c. manuālās defektēšanas rezultātā) objektam (d.) ar fiziski grūtu piekļuvi (e. zemes reljefa izskats bez veģetācijas slāņa). |
| 75. | 5.25. att. | Vadu izregulēšanas noteikšanas piemērs no realizētā pētījumā datiem Neara programmatūrā.                                                                                                                                |
| 76. | 5.26. att. | Faktiska sakarība starp vadu nokari un neatbilstošiem gabarītiem pētāmajā tvērumā.                                                                                                                                      |
| 77. | 5.27. att. | Vadu stiprinājumu vertikālā attāluma noteikšana Neara programmatūrā (a. balsts ar vadu horizontālo izvietojuma tipu; b. balsts ar vadu vertikālo izvietojuma tipu).                                                     |
| 78. | 5.28. att. | Balstu konstrukcijas sadalījums pēc vadu ģeometriskā izvietojuma tipa                                                                                                                                                   |
| 79. | 5.29. att. | Attālumu vērtības starp vadu stiprinājumiem vertikālajiem un trīsstūra (vertikālais) vadu izvietojuma ģeometrijas tipiem.                                                                                               |
| 80. | 5.30. att. | Balsta izsvēršanās noteikšanas piemērs Neara programmatūrā.                                                                                                                                                             |
| 81. | 5.31. att. | Elektropārvades līniju balstu slīpuma leņķu diapazoni grādos.                                                                                                                                                           |
| 82. | 5.32. att. | Balstu izsvēršanas $9.70^\circ$ defekts.                                                                                                                                                                                |
| 83. | 5.33. att. | Balstu izsvēršanās $4.22^\circ$ vizualizācija: (a. objekta fotofiksācija, b. balsta LIDAR datu skats līnijas virzienā, c. balsta LIDAR datu skats no augšas, d. balsta LIDAR datu profila skats).                       |
| 84. | 5.34. att. | Trašu koridoru tehniskie parametri atbilstoši sprieguma līmeņiem: a. vidējais spriegums, b. zemspriegums.                                                                                                               |
| 85. | 5.35. att. | AS "Sadales tīkls" infrastruktūras veģetācijas tīrīšanas specializētā tehnika (a. horizontālā apauguma tīrīšanai; b. vertikālā apauguma tīrīšanai (koku zaru apzāģēšanai)).                                             |
| 86. | 5.36. att. | Uzģenerētas Neara programmatūrā ģeometrijas ar vadiem saskaņā ar AS "Sadales tīkls" procesa prasībām.                                                                                                                   |
| 87. | 5.37. att. | Tīkla modeļa (a.) salīdzinājums ar faktisko fotofiksāciju (b.) objektā.                                                                                                                                                 |
| 88. | 5.38. att. | Hibrīdas inspekcijas procesa struktūrshēma.                                                                                                                                                                             |
| 89. | 5.39. att. | Digitālās inspekcijas procesa organizācijas struktūrshēma.                                                                                                                                                              |
| 90. | 5.40. att. | Nekorekti aprakstīts tīkla elementa tips (a. balsta vektorizācijas rezultāts, b. balsta fotofiksācija).                                                                                                                 |

# IEVADS

## Tēmas aktualitāte

Inženierkomunikāciju infrastruktūra ir pamats sabiedrības ikdienas funkcionēšanai un ekonomikas attīstībai, jo tā nodrošina nepārtrauktu piekļuvi dzīvībai svarīgiem resursiem un pakalpojumiem. Efektīva šīs infrastruktūras uzturēšana un modernizācija ir būtiska, lai nodrošinātu drošu, uzticamu un ilgtspējīgu pakalpojumu pieejamību.

Elektroapgādes infrastruktūra ir kritiskā infrastruktūra jebkurai valstij vairāku iemeslu dēļ:

- Enerģijas piegādes nodrošināšana sabiedrībai un uzņēmumiem.
- Nacionālās drošības aspekts - elektroapgādes sistēmas pārtraukumi var izraisīt nopietnas sekas nacionālajai drošībai, ietekmējot sabiedrisko kārtību.
- Ekonomikas stabilitāte un attīstība, jo elektroapgādes nestabilitāte ne tikai var radīt zaudējumus uzņēmumiem un individuālajiem lietotājiem, bet arī tas ietekmē investīciju vidi un uzņēmumu konkurētspēju starptautiskajos tirgos.
- Ilgtspējīga attīstība un atjaunojamie energoresursi - elektroapgādes infrastruktūra ir nepieciešama, lai integrētu atjaunojamos energoresursus (saules vai vēja enerģiju) valsts energoapgādes sistēmā.

Nepārtrauktas enerģijas piegādes uzturēšana ir būtiska, lai nodrošinātu valsts izdzīvošanu krīzes situācijās un ikdienas funkcionēšanā. Sadales sistēmas ir būtiska infrastruktūras sastāvdaļa, kas nodrošina elektroenerģijas piegādi no pārvades sistēmas līdz patērētājiem. Lai garantētu kritisko pakalpojumu nepārtrauktību, ir būtiski nodrošināt visaptverošu infrastruktūras pārklājumu visā valsts teritorijā. Tā kā infrastruktūras elementi funkcionē vairākus desmitus gadu, to ilglaicīga uzturēšana un nepārtraukta uzraudzība ir nepieciešama, lai saglabātu atbilstošu tehnisko stāvokli un nodrošinātu sistēmas ilgtspējīgu darbību.

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].

Latvijā lielākais sadales sistēmas operators AS “Sadales tīkls”, kuram viens no stratēģiskajiem mērķiem ir uzņēmuma digitālā transformācija, kuram ir definēti šādi fokusa virzieni: digitālie risinājumi, datos balstīta attīstība un zinātība, informācijas sistēmu drošība un attīstība [2].

Ka arī viens no prioritāriem inovāciju attīstības virzieniem AS “Sadales tīkls” Attīstības plānā 2024.-2033. ir uz jaunām tehnoloģijām balstītas pamatprocesu realizācijas metodes un rīki, kas ir saistīti ar tīkla stāvokļu noteikšanu, kas veicinātu jaunu vai būtiski uzlabotu tehnoloģiju, darbības metožu, materiālu izpēti un pielietojuma analīzi uzņēmuma praksē, ar mērķi sekmēt uzņēmuma tehnoloģisko ilgtspēju un darbības efektivitātes palielināšanu [3].

Digitālās tehnoloģijas arvien būtiskāk ietekmē dažādas nozares, nodrošinot ievērojamus ekonomiskos ieguvumus. Tādas tehnoloģijas kā mākslīgais intelekts, viedie skaitītāji, lielo datu analīze, lietu internets, robotika, blokkēdes un mākoņdatošana veicina procesu automatizāciju un efektivitāti [4]. Tomēr enerģētikas nozarē joprojām trūkst pietiekamu pētījumu par to, kura

no šīm jaunajām tehnoloģijām ir praktiski pielietojama sadales sistēmas nozares attīstībai infrastruktūras tehniskās stāvokļa kontroles procesos. Turklāt Latvijā sadales sistēmas tīkla infrastruktūras inspekcijas mūsdienās joprojām tiek veiktas manuāli, izmantojot cilvēku resursus, kas norāda uz nepieciešamību pēc papildu tehnoloģiskajiem risinājumiem automatizācijas un efektivitātes paaugstināšanai.

Tehniska procesa realizācijas pieeja, kas ir atkarīga no cilvēka zināšanām, pieredzes un infrastruktūras fiziskās pieejamības ir laikietilpīga un resursietilpīga, kā arī bieži vien nav pilnīgi precīza. Cilvēciskais faktors var radīt kļūdu iespējamību. Papildus tam ir sarežģīti novērtēt speciālistu darba kvalitāti, produktivitāti un objektivitāti, jo cilvēki ir pakļauti ārējiem faktoriem, piemēram, laikapstākļiem, fiziskam nogurumam un izsīkumam, kas var ietekmēt pārbaudes rezultātus [5]. Tehnoloģiju attīstības rezultātā ir pieejami dažādi datu formāti, kas piedāvā alternatīvas pieejas infrastruktūras apsekošanai, balstoties uz datu analīzi. Šie formāti ietver:

- sintezētās apertūras radara (SAR) attēlus
- optiskos satelīta datus,
- optiskos aerofoto datus,
- infrasarkanos (termiskos) datus,
- ultravioletos datus,
- Punktu mākoņu datu kopas.

Tomēr šādu datu pielietojums reālos apstākļos Latvijas sistēmas sadales infrastruktūras tehniskajam novērtējumam vēl nav pilnībā pārbaudīts un apstiprināts.

Tika veikti vairāki eksperimenti un publicēti pētījumi par datu apstrādes metodēm, specifiskiem aprēķiniem un to iespējamo pielietojumu tehniskās infrastruktūras inspekcijās. Pētījumos aplūkotas šādas pieejas: satelītattēlu apstrādes un klasifikācijas metodes veģetācijas kontrolei un riska novērtēšanai [6], mašīnmācīšanas un dziļās mācīšanas metodes objektu detekcijai [7], tālīzpētes un ģeogrāfiskās informācijas apstrādes metodes izmantojot attēlu klasifikāciju, laika rindu analīzi un indeksu aprēķinus (piemēram, *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)*) veģetācijas veselības novērtēšanai [8], ka arī 3D *LIDAR* punktu mākoņu apstrādes metodes infrastruktūras objektu anomāliju noteikšanai [9]. Tomēr šie pētījumi nepietiekami aptver visas Latvijas sadales sistēmas infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanas prasības, jo netiek pilnībā ņemtas vērā Latvijas infrastruktūras topoloģijas specifiskās īpatnības, izmantoto tīkla infrastruktūras elementu materiāli un apkārtējās vides klimatiskie faktori. Tas apgrūtina pilnvērtīgu atbilstību Latvijas spēkā esošajiem un pielietojamiem Latvijas elektrotehniskās komisijas (LEK) energostandartos [10] noteiktajām tehniskajām prasībām. Turklāt šajos pētījumos trūkst detalizēta analīze par šādu tehnoloģiju un datu apstrādes risinājumu praktisku ieviešanu un integrāciju tehniskajos pamatprocesos, kas ir būtiski infrastruktūras efektīvai pārvaldībai un uzturēšanai.

Lai veicinātu Latvijas kritiskās infrastruktūras – sadales sistēmas tīkla tehniskās uzturēšanas procesu digitālo transformāciju un veidotu iespēju veikt uz datiem balstītus lēmumus ir svarīgi izziņāt tehnisko procesu reālas vajadzības, izpētīt vairāku formātu datu ieguvumus procesa veiksmīgai realizācijai, izmēģināt praktiski reālajos poligonos, ka arī izstrādāt esošā procesa alternatīvo modeli, pielietojot tehnoloģijas risinājumus atbilstoši AS “Sadales tīkls” 10 gadu

attīstības plāna virzieniem. Darbs ir fokusēts uz praktiskajiem eksperimentiem, ar mērķi sekmēt uzņēmuma tehnoloģisko ilgtspēju.

Lai veicinātu Latvijas kritiskās infrastruktūras, īpaši sadales sistēmas tīkla tehniskās uzturēšanas procesu, digitālo transformāciju un nodrošinātu iespēju pieņemt uz datiem balstītus lēmumus, ir nepieciešams padziļināti izziņāt tehnisko procesu reālās praktiskās vajadzības. Tas ietver vairāku datu formātu priekšrocību izpēti, kas ir būtiskas procesa veiksmīgai realizācijai, kā arī šo datu pielietojuma praktisku testēšanu reālos apstākļos, piemēram, poligonos. Turklāt jāizstrādā esošo procesu alternatīvais modelis, izmantojot mūsdienīgus tehnoloģiskos risinājumus, kas atbilst AS “Sadales tīkls” 10 gadu attīstības plāna stratēģiskajiem virzieniem. Darba ietvaros realizēts pētījums ir koncentrēts uz praktisku eksperimentu veikšanu ar mērķi veicināt uzņēmuma tehnoloģisko ilgtspēju un optimizēt infrastruktūras tehniskās uzturēšanas procesus, nodrošinot to efektivitāti un ilgtspējību ilgtermiņā.

### **Darba mērķis 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). Validāciju īstenot AS “Sadales tīkls” infrastruktūras poligonos. Tas ietver metodes izstrādi, kā arī detalizētu rekomendāciju izstrādi piedāvātā risinājuma ieviešanai un integrēšanai sadales sistēmas operatora tehniskās uzturēšanas procesos, lai veicinātu inovatīvu un efektīvu tehnisko inspekciju metožu attīstību, kas balstītas uz datu analīzi un modernas tehnoloģijas izmantošanu un digitāli transformētu esošo komplicēto tehnisko procesu Latvijas mērogā.

Lai sasniegtu darba mērķi, tiek formulēti šādi 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**

Šī pētījuma zinātniskā novitāte izpaužas jaunās pieejas izstrādē datos balstītas tehniskās inspekcijas metožu ieviešanai, izmantojot AS “Sadales tīkls” sadales sistēmas infrastruktūru kā pētījuma objektu. Pētījuma gaitā tiek integrēti moderni tehnoloģiskie risinājumi, kas sniedz iespēju veikt precīzāku un efektīvāku infrastruktūras novērtēšanu.

Galvenie rezultāti ietver:

1. Jaunu principu izstrāde inspekcijas metodei. Izstrādāta un validēta jaunā alternatīvā metode tehniskās inspekcijas veikšanai, kas balstās uz virszemes infrastruktūras elementu *RGB* un *LIDAR* datu vākšanu un turpmāku datu analīzi.
2. Tehnisko prasību definēšana. Izstrādātas konkrētas funkcionālās un nefunkcionālās prasības datu iegūšanai un apstrādei, pielāgojoties sadales sistēmas operatora infrastruktūras inspekcijas procesa specifiskajām vajadzībām.
3. Praktisko eksperimentu rezultātu iegūšanas plāns piedāvātās jaunās inspekcijas metodes validācijai, balstoties uz izstrādātām tehniskām prasībām.
4. Eksperimentālo testu realizācija Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” infrastruktūras poligonos, kas pierāda izstrādātās metodes efektivitāti reālos apstākļos, demonstrē precizitātes un ātruma uzlabojumu salīdzinājumā ar tradicionālajām inspekcijas metodēm:
  - Sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālais novērtējums balstīts *RGB* datu kopas vākšanā un apstrādē.
  - Sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras tehniskā stāvokļa ģeotelpisko mērījumu novērtējums balstīts *LIDAR* datu kopas vākšanā un apstrādē.
5. Rekomendāciju izstrāde. Formulētas detalizēti ieteikumi par izstrādātās metodes integrāciju sadales sistēmas operatora tehniskajos procesos, pamatojoties uz iegūtiem rezultātiem uz Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls”.

Šie rezultāti veicina enerģētikas nozares digitālās transformācijas progresu, kā arī optimizē tehniskās uzturēšanas procesus, izmantojot modernizētas datu apstrādes metodes un automatizāciju.

### **Aizstāvamās tēzes**

Promocijas darbā tiek formulētas un aizstāvēšanai izvirzītas vairākas tēzes:

1. *RGB* datu kopas vāktas, izmantojot bezpilota gaisa kuģa (BGK) transportu sasaistē ar tīkla elementu ģeogrāfiskās informācijas sistēmas (ĢIS) datiem un defektu anotēšanas funkcionalitāti spēj nodrošināt sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālo defektu identificēšanu ar konsekvētu datu kvantitāti (vismaz četri attēli punktveida objektiem) un kvalitāti (attēli ar redzamību 2cm defektu identificēšanai) un samazināt datu iegūšanas laiku laukā vismaz divas reizes salīdzinot ar manuālās inspekcijas ātrumu, nodrošinot datu iegūšanu ātrumā vismaz 12km/dienā.

2. *LIDAR* datu kopas ar punktu blīvumu vismaz 50punkti/m<sup>2</sup> vāktas, izmantojot bezpilota gaisa kuģa (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 18km/dienā.
3. Punktu mākoņa datu kopas, ar blīvumu vismaz 50punkti/m<sup>2</sup>, ja datu kvalitātes precizitāte ir līdz 10cm attiecībā pret līniju augstumiem, apstrāde spēj nodrošināt sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras veģetācijas pārvaldību gaisvadu līniju trasēs un aizsargjoslās.

### **Pētījuma metodika**

Lai sasniegtu izvirzīto pētījuma mērķi, pētījuma metodoloģija ietver vairāku posmu izstrādi.

Tiek veikta padziļināta literatūras analīze, kas aptver digitālās transformācijas pētījumus un to pielietojumu enerģētikas nozarē. Tiek izanalizēta Latvijas energoapgādes sistēmas izbūve ar īpašu uzsvāri uz sadales sistēmas infrastruktūras specifiku. Tika veikta padziļināta AS “Sadales tīkls” vidējā sprieguma tīkla defektēšanas procesa realizācijas analīze, kur tika apskatīti infrastruktūras defektu veidi, to bīstamības līmeņi. Tika veikts zinātniskās literatūras analīze un par dažādiem datu avotiem (SAR attēli, optiskie satelīta un aerofoto dati, termiskie dati, ultravioletie dati, punktu mākoņa datu kopas) kurus potenciāli varētu izmantot sadales sistēmas infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanai, un tika 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. Definētie parametri nodrošina precizitāti un uzticamību infrastruktūras elementu tehniskā stāvokļa inspekcijā, kā arī ļauj standartizēt datu vākšanu un apstrādi, pielāgojot tos reālajām tīkla apsekošanas vajadzībām un tehniskā stāvokļa novērtēšanai.

Lai validētu izstrādātās tehniskās prasības un metodoloģiju, tika 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 tiek 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.

Eksperimentālā plāna rezultāti kalpo kā pamats tehnoloģisko risinājumu validācijai, tos salīdzinot ar esoša procesa realizācijas metodēm un ar to rezultātiem. Eksperimentā tika analizēta jaunās pieejas efektivitāte un precizitāte, kā arī novērtēti iegūtie dati attiecībā pret tradicionālajām metodēm. Šis salīdzinājums ļauj identificēt ieguvumus, optimizācijas iespējas un potenciālos trūkumus, tādējādi sniedzot pamatotus secinājumus par izstrādātās metodoloģijas praktisko pielietojumu un pielāgošanu turpmākām infrastruktūras inspekcijām, balstoties uz datu analīzi.

### **Pētījuma objekts**

Pētījuma objekts ir sadales sistēmas operatora vidējā sprieguma virszemes infrastruktūra un tās tehniskā stāvokļa novērtēšanas process - inspekcijas. Pētījums fokusējas uz infrastruktūras elementu inspekcijas digitalizācijas iespējām, īpašu uzmanību pievēršot *RGB* un *LIDAR* datu izmantošanai infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtējumā, kā arī uz to balstīto tehnoloģisko risinājumu ieviešanu un efektivitātes novērtēšanu. Pētījuma objekts aptver ne tikai pašas infrastruktūras fizisko elementu novērtēšanu, bet arī datu kopas vākšanas, apstrādes un analīzes metodes.

Galvenais uzsvars tiek likts uz to, kā šīs tehnoloģijas var integrēt esošajā infrastruktūras inspekcijas procesā, lai samazinātu laiku, kas nepieciešams inspekcijām, optimizētu manuālo resursu izmantošanu laukā, kā arī nodrošinātu augstāku inspekcijas precizitāti un uzticamību, salīdzinot ar tradicionālajām manuālajām metodēm.

### **Darba 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 pielietojami 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 objektiem, cilvēciska faktora kļūdas).

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

### **Aprobācija (publikācijas, projekti, konferences)**

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

1. 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.
2. D. Gauge, A. Lektauers, I. Solovjova, R. Grants, D. Kolosovs, A. Litvinenko, "Application of Digital Twin in Medium-Voltage Overhead Distribution Network Inspection," *Remote Sens.* 2023, 15, 489. <https://doi.org/10.3390/rs15020489>.
  3. 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.
  4. 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.
  5. 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

Pētījuma rezultāti ir analizēti un diskutēti ar AS “Sadales tīkls” nozares ekspertiem, kas sniedza vērtīgu atgriezenisko saiti un priekšlikumus turpmākai metodikas uzlabošanai un pielietošanas iespējām inspekcijas procesa transformācijas kontekstā.

### **Darba struktūra**

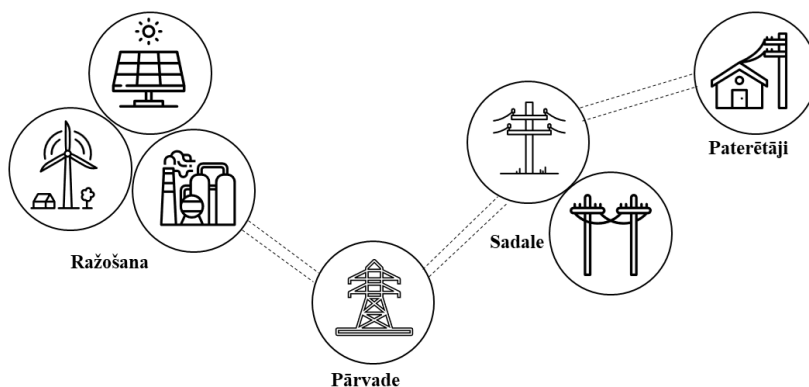
Promocijas darbs strukturēts tā, lai sistemātiski izklāstītu tēmas un to nozīmīgumu elektroenerģijas jomā. Darba ir ievaddaļa, piecas galvenās nodaļas un secinājumi.

- Ievaddaļa sniedz vispārēju pārskatu par pētījuma tēmu, definētājiem 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” sniegta sadales sistēmas 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 tiek apkopoti darba galvenie rezultāti, kas sniedz pierādījumus par definēto tēžu pamatotību.

Kopumā promocijas darbs sastāv no ievaddaļas, piecām galvenajām nodaļām, secinājumiem un sešiem pielikumiem, kopējais lappušu skaits ir 157.

# 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 (1.1. att.): enerģijas ražošanu, pārvades un sadales infrastruktūru.



1.1. att. Elektroenerģijas sistēma.

## 1.1. Elektroenerģijas ražošana

Enerģijas ražošana attiecas uz dažādu enerģijas veidu pārvēršanas procesu elektroenerģijā. Tas ir būtisks mūsdienu sabiedrības aspekts, jo elektroenerģija ir būtisks resurss dažādiem lietojumiem, tostarp dzīvojamajiem, komerciāliem un rūpnieciskiem mērķiem. Ir vairākas elektroenerģijas ražošanas metodes, katrai no tām ir savas priekšrocības, trūkumi un ietekme uz vidi. Šeit ir dažas izplatītās metodes:

- Fosilais kurināmais (dominējošais jebkurā enerģijas ražošanas nozarē tās rezerves ar laiku samazinās [11]):
  - o Akmeņogles -tas ietver ogļu sadedzināšanu, lai iegūtu tvaiku, kas pēc tam vada turbīnas, kas savienotas ar ģeneratoriem.
  - o Dabaszgāze - līdzīga oglēm, bet kā primāro kurināmā avotu izmanto dabaszgāzi.
  - o Nafta - ar naftu darbināmas elektrostacijas ir retāk sastopamas, taču dažos reģionos tās joprojām pastāv [12].
- Atjaunojamā enerģija:
  - o Saules enerģija - fotoelementi pārvērš saules gaismu elektrībā.
  - o Vēja enerģija -vēja turbīnas uztver vēja kinētisko enerģiju un pārvērš to elektroenerģijā.

- Hidroenerģija - plūstoša vai krītoša ūdens enerģiju izmanto, lai ražotu elektroenerģiju hidroelektrostacijās.
- Ģeotermālā enerģija - zemes iekšpuses siltums tiek izmantots, lai ražotu tvaiku, kas darbina turbīnas, kas savienotas ar ģeneratoriem.
- Biomasa - organiskos materiālus, tādus kā, koksni vai lauksaimniecības atlikumus, sadedzina vai apstrādā, lai ražotu elektroenerģiju.
- Kodolenerģija - kodola skaldīšana ietver atoma kodola sadalīšanu, atbrīvojot ievērojamu enerģijas daudzumu. Šo enerģiju izmanto tvaika un piedziņas turbīnu ražošanai.

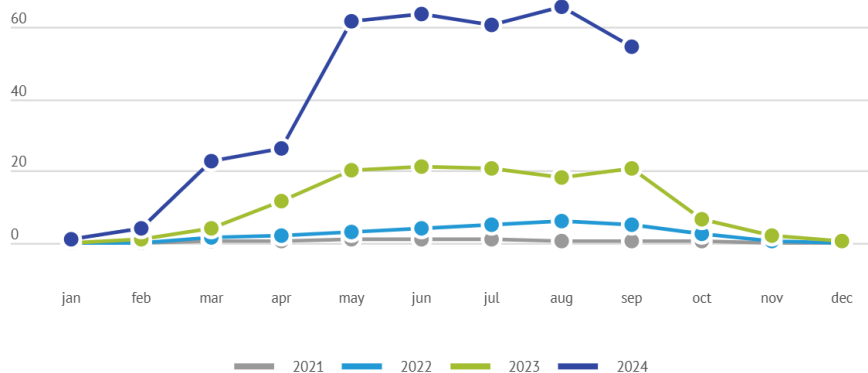
Enerģijas ražošanas metodes izvēle ir atkarīga no tādiem faktoriem kā resursu pieejamība, vides apsvērumi, izmaksas un tehnoloģiskā iespējamība. Pēdējos gados ir notikusi globāla pāreja uz atjaunojamo enerģijas avotu īpatsvara palielināšanu (arī Latvijā ir vērojamas šīs tendences, skatoties uz 1.2. att. parādītu ražotāju kopējo sadales tīklā nodoto saules elektroenerģijas apjoma dinamiku [13]), lai samazinātu ietekmi uz vidi un atkarību no galīgā fosilā kurināmā. Tehnoloģiju, enerģijas uzglabāšanas un tīkla pārvaldības sasniegumi arī ietekmē elektroenerģijas ražošanas ainavu.

Latvijā no gada visas saražotās elektroenerģijas 70% īpatsvars ir no atjaunīgajiem energoresursiem Daugavas hidroelektrostacijās saražotās elektroenerģijas (dati par 2022.gadu - 2670 GWh ir apkopoti 1.1. tab.) [14], savukārt pārējais elektroenerģijas daudzums saražots termoelektrostacijās (dabaszāzes).

1.1. tabula

Latvijas lielākie Enerģijas ražotāji (2022.gada dati)

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

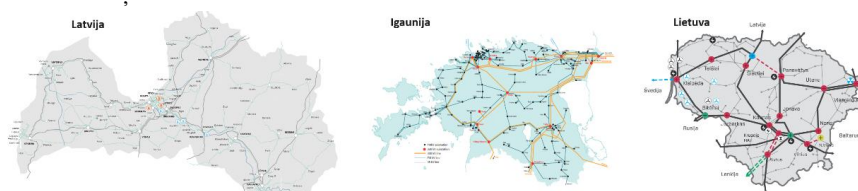


1.2.att. Ražotāju kopējā sadales tīklā nodotā saules elektroenerģijas apjoma dinamika (GWh).

## 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 sastāvdaļas un 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 paaugstina spēkstacijās saražotās elektroenerģijas spriegumu efektīvai tālsatiksmes pārraidei.
- Pārvades līnijas - augstsprieguma pārvades līnijas pārvada elektroenerģiju lielos attālumos no spēkstacijām uz sadales apakšstacijām. Šīs līnijas atbalsta torņi, un tajās var izmantot dažādas tehnoloģijas, piemēram, gaisa līnijas vai pazemes kabeļus.



1.3. att. Baltijas valstu pārvades tīkls.

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. 1.3. att. ir parādīta Baltijas valstu pārvades tīkla topoloģija, ka arī ir apkopoti (1.2. tab.) pārvades tīkla parametru dati [14, 15, 16], pēc kuriem var secināt ka visi trīs Baltijas valstu operatori ir līdzīgi pēc lieluma,

kur Latvijas energosistēmas 330 kV tīkls ir Baltijas valstu energosistēmas vidus posms starp tās ziemeļu un dienvidu daļām, kur 16 no 17 apakšstacijām ir divpusēja barošana.

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*<br>* 400kV       |
|                                             | 110 kV (augstākais spriegums) | 123                    | 156-13    | 219                    |
| Autotransformatoru un transformatoru skaits | 330 kV (augstākais spriegums) | 26                     | Nav datu  | 24+3*<br>* 400kV       |
|                                             | 110 kV (augstākais spriegums) | 245                    | Nav datu  | 4                      |
| Uzstādītā jauda, MVA                        | 330 kV (augstākais spriegums) | 3800                   | Nav datu  | 4400 + 768*<br>* 400kV |
|                                             | 110 kV (augstākais spriegums) | 5156,5                 | Nav datu  | 92,6                   |

Elektroenerģijas pārvades tīklu projektēšana un darbība ir ļoti svarīga, lai nodrošinātu stabilu un drošu elektroenerģijas piegādi, kas atbilstu patērētāju prasībām. Pastāvīgie sasniegumi tehnoloģiju jomā (tādi kā virtuālās spēkstacijas [17], blokķēžu integrācija elektroenerģijas decentralizācijai [18], datus balstīti efektivitātes risinājumi energosistēmas elastībai [19] un citi) un atjaunojamo enerģijas avotu integrācija [20] nosaka elektrotīklu attīstību visā pasaulē.

### 1.3. Elektroenerģijas sadale

Elektroenerģijas sadales tīkls ir sistēma, kas nodrošina elektroenerģijas piegādi no pārvades tīkla līdz galalietotājiem, piemēram, 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 ir:

- 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 mēritu patērētās elektroenerģijas daudzumu, patērētāju vietās tiek uzstādīti skaitītāji. Šo skaitītāju savākie dati tiek izmantoti uzskaitē un norēķinu vajadzībām.

Latvijā vadošais sadales operators starp reģistrētajiem 11 ir AS “Sadales tīkls”, kas nodrošina elektroenerģijas piegādi 99% patērētājiem valstī. Salīdzinājumā (1.3. tab.) ar citu Baltijas valstu operatoru (Latvijas [21], Lietuvas [22], Igaunijas [23]) tehniskajiem rādītājiem, Latvijas sadales sistēmas operators ierindojās vidējā pozīcijā, neskatoties uz to, ka infrastruktūras apjomi un kvalitātes rādītāji ir ļoti līdzīgi. Tomēr katram operatoram ir sava infrastruktūras specifika (Latvijas virszemes infrastruktūra pārsvarā sastāv no koka balstu konstrukcijām, atšķirībā no kaimiņvalstu dzelzsbetona virszemes infrastruktūras), uzturēšanas plāni un attīstības stratēģija.

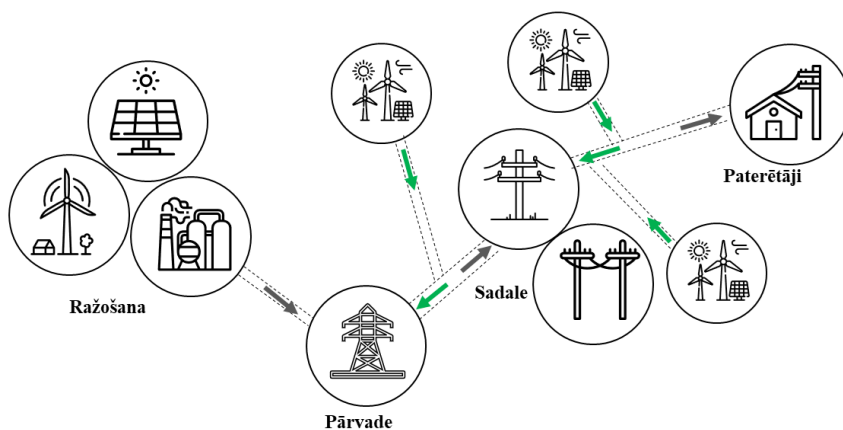
1.3.tabula

Baltijas valstu sadales tīkla rādītāji (2022.gada dati)

| Darbības rādītāji                                                                       |            | Latvija                                                    | Igaunija                                              | Lietuva                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                                                                                         | Uzturētājs | “Sadales tīkls”                                            | “Enefit”                                              | “Eso”                                                      |
| Līniju garums, km                                                                       |            | 92 407<br>39,5 % kabeļu līnijas<br>60,5 % gaisvadu līnijas | 63000<br>33 % kabeļu līnijas<br>66 % gaisvadu līnijas | 127504<br>34,4 % kabeļu līnijas<br>65,6 % gaisvadu līnijas |
| Sadalītā elektroenerģija, GWh                                                           |            | 6241                                                       | 6708                                                  | 10010                                                      |
| Elektroenerģijas zudumi, %                                                              |            | 3,73                                                       | 3,8                                                   | 5,05                                                       |
| 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                                                                |            | 1114462                                                    | 683660                                                | 1891190                                                    |

Latvijas elektroenerģijas infrastruktūra ir valsts ekonomiskās attīstības mugurkauls, kurai ir izšķiroša loma ekonomikas izaugsmes veicināšanā, inovāciju veicināšanā un iedzīvotāju vispārējās dzīves kvalitātes uzlabošanā. Tā nodrošina nepārtrauktu elektroenerģijas piegādi katrai māsaimniecībai Latvijā ar aptuveni 1 miljonu pieslēgto objektu. Elektroenerģijas sistēma ir sarežģīts un savstarpēji savienots tīkls, un tā pareiza darbība ir vitāli svarīga mūsdienu sabiedrībā. Tādi sasniegumi kā viedie tīkli un

atjaunojamās enerģijas integrācija palīdz uzlabot energosistēmu efektivitāti, uzticamību un ilgtspējību [24]. Sadales operatora mērķis ir nodrošināt vienmērīgu un drošu elektroenerģijas piegādi patērētājiem, vienlaikus samazinot enerģijas zudumus un reaģējot uz mainīgajiem pieprasījuma modeļiem. Nākotnē sadales operatoru loma varētu mainīties atkarībā no daudziem faktoriem, piemēram, tehnoloģisko inovāciju ieviešanas, atjaunojamās enerģijas izmantošanas pieauguma, enerģijas uzglabāšanas tehnoloģiju attīstības un citas tendences enerģētikas nozarē. Tendences (1.4. att.) norāda, ka sadales sistēmas operatoram ir nepieciešams pārvaldīt elektroenerģijas plūsmu divos virzienos: gan no aktīvajiem ražotājiem uz tīklu, gan no tīkla līdz patērētājiem. Šie faktori var ietekmēt sadales operatoru uzdevumus un iespējas, ļaujot tiem efektīvāk pārvaldīt enerģijas plūsmas (divvirziena) un pielāgoties mainīgajiem tirgus apstākļiem.



1.4. att. Elektroenerģijas sistēmas tendences.

Sadales operatoru loma ir dinamiska un mainās, atkarībā no nozares attīstības un tehnoloģisko inovāciju ieviešanas, tāpēc kvalitatīvās un drošas valstij kritiskās infrastruktūras uzturēšana ir svarīgs un izaicinošs uzdevums.

## 1.4. Kopsavilkums

Elektroenerģijas sistēma sastāv no trim galvenajām komponentēm – ražošanas, pārvades un sadales, kas veido savstarpēji saistītu tīklu elektroenerģijas piegādei no ražotājiem līdz patērētājiem.

- Elektroenerģijas ražošanas posms ietver dažādus enerģijas avotus, piemēram, fosilo kurināmo, kodolenerģiju, atjaunojamās 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 gala patērētājiem – mājsaimniecībām, 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

Termiņš digitālā transformācija var attiekties uz jebko, kas mainās no analogās uz digitālo. Globālā mērogā tā ir digitālajā laikmetā notiekošo izmaiņu kopums. Digitālā transformācija enerģētikas jomā ir process, kurā tiek izmantotas digitālās tehnoloģijas, lai uzlabotu enerģētikas nozares efektivitāti, drošību un ilgtspēju. Šis process ietver dažādu informācijas tehnoloģiju un datu analīzes pielietojšanu, lai optimizētu energoapgādi, palielinātu enerģijas efektivitāti un samazinātu vides ietekmi. Digitālā transformācija enerģētikas jomā ir būtiska, lai sasniegtu mērķus attiecībā uz ilgtspējīgu attīstību, samazinātu emisijas un nodrošinātu efektīvu un drošu enerģijas piegādi sabiedrībai.

### 2.1. Viedo skaitītāju tehnoloģijas apskats

Viena no atslēgām, kas veicina tehnisko procesu digitālās transformācijas attīstību, ir pieejamie dati. Elektroenerģijas uzskaitē ir viens no obligātajiem no likumdošanas puses regulētajam pamata procesiem, līdz ar to viedā enerģijas uzskaitē ir milzīgs digitālās transformācijas solis. Viedais elektroenerģijas skaitītājs (viens no Latvijā uzstādītajiem viedajiem skaitītājiem ir attēlots 2.1. att.), elektroenerģijas patēriņa mērierīce, kas uzskaita elektroenerģijas daudzumu (saņemto un/vai nodoto) atbilstoši valsts likumdošanā noteiktajam tirdzniecības intervālam (slodžu profila integrācijas periodam) un ļauj to apkalpot, neierodoties objektā [25].



2.1. att. Elektroenerģijas uzskaites viedais skaitītājs (Latvija, 2024).

Tīkla viedizāciju (AMI - Advanced Metering Infrastructure) var uzskaitīt par tīkla modernizācijas un attīstības sastāvdaļu. Tā rezultātā ir iegūts milzīgs datu apjoms, 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 [26], novērtētu sadales līniju zudumus, identificētu un kvantitatīvi noteiktu enerģijas zādības [27] un nodrošinātu uzlabotu slodzes prognozi, pārtraukumu pārvaldība un sadales sistēmas analīze [28].

Latvijā viedo elektroenerģijas skaitītāju apjoms sasniedzis 1057500 (98 % no kopējā AS “Sadales tīkls” klientu elektroenerģijas skaitītāju skaita) [21]. Kaimiņvalstīs arī notiek tīkla modernizācijas darbi analoģo skaitītāju nomainas virzienā. Lietuvā plāno veikt mērierīču nomainu aktīvākajai patērētāju daļai (attiecas uz patērētājiem, kuri patērē vairāk nekā 1000 kWh gadā) līdz 2026.gadam [29]. Savukārt Igaunijā jau vairāk nekā 700000 viedo skaitītāju ir uzstādīti [30] un ir pieejami ikstundas dati.

Viedie skaitītāji nodrošina reāllaika datus ne tikai par elektroenerģijas patēriņu, bet arī spēj fiksēt dažādus iestādītos notikumus – piemēram, sprieguma palielināšanas/pazemināšanas notikumus, kas palīdz operatīvāk reaģēt un preventīvi novērst bojājumus. Lai uzticētos datu balstītiem lēmumiem ir svarīgi uzraudzīt datu nolasīšanas procesu.

Datu pārraide – viedie skaitītāji ļauj attālināti nolasīt uzskaites datus, kas tiek pārraidīti uz operatora sistēmu divos dažādos veidos:

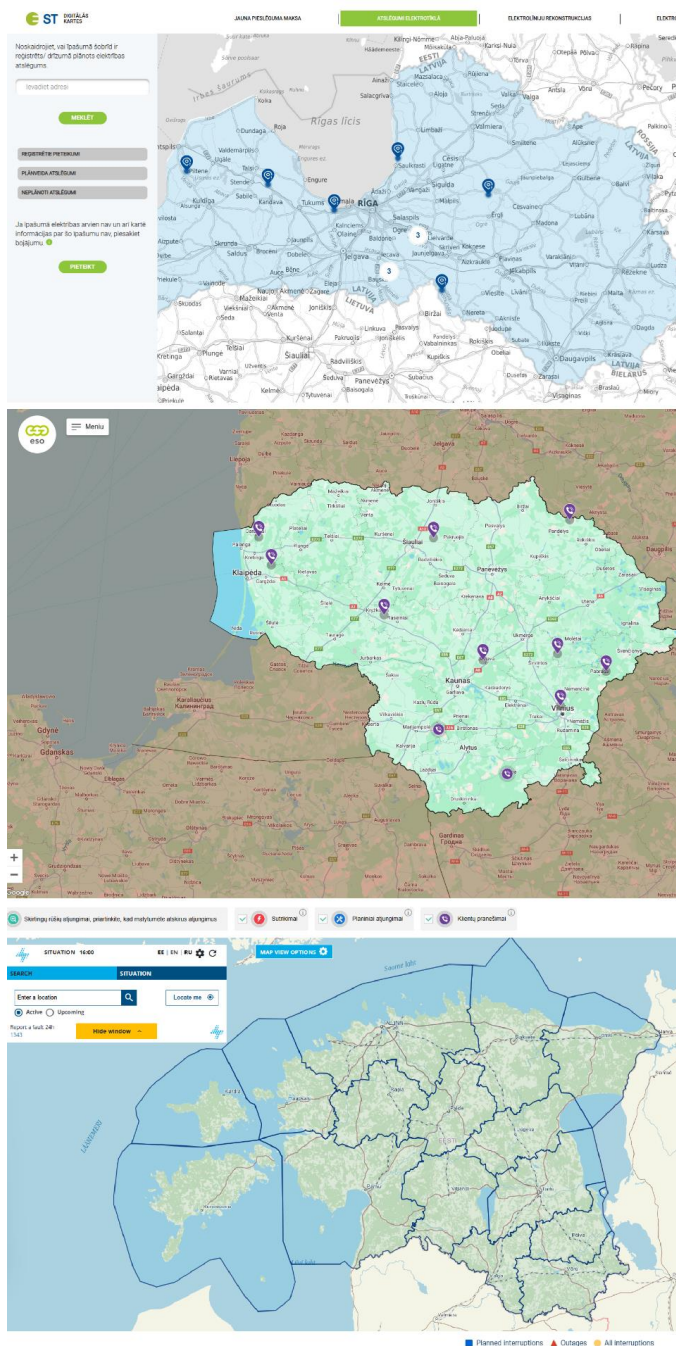
- caur elektropārvades līnijām, jeb PLC (Power-line Communication) tehnoloģija;
- izmantojot bezvadu pārraidi, jeb GPS (Global Positioning System) tehnoloģija.

## **2.2. GIS sistēmas pielietojums infrastruktūras tehnisko datu uzturēšanai**

Tehnoloģisko inovāciju progresa laikmetā informācija ir attīstības atslēga un viens no nozīmīgajiem resursiem. Līdz ar to ĢIS (ģeotelpiskā informācijas sistēma) ir neatņemama daļa jebkuram mūsdienu inženiertehnisko komunikāciju turētājiem, kā arī šobrīd valstiskā līmenī tiek veidotas centrālās datu bāzes [31] kurās tiek uzturēta ADTI (augstas detalizācijas topogrāfiskā informācija), kur ir definēta specifikācija ar nepieciešamo informācijas apjomu un klasifikāciju. Tas nenozīmē, ka inženierkomunikāciju infrastruktūras turētājiem ir jāierobežojas ar tām prasībām, bet ir jāizmanto maksimāli ĢIS piedāvātās funkcionalitātes un iespējas (plānošana un prognozēšana, informācijas ievākšana, situācijas pārvaldība, tendenču izprašana, prioritāšu izvirzīšana, izmaiņu fiksēšana), lai viedizētu un automatizētu procesus, palielinot gan efektivitāti, gan kvalitāti.

Pētot Baltijas valstu sadales operatoru pieredzi tīkla infrastruktūras informācijas uzturēšanai, ir redzams, ka ĢIS informāciju plaši izmanto ne tikai pamatdarbības iekšējos procesos, bet arī integrējot to ar citām sistēmām (kā piemērs 2.2. att. ĢIS integrācija ar operatora mājas lapu par aktuāliem atslēgumiem tīklā un statusiem).

Informācijas vajadzības pieaugums, iniciē arī plašāko ĢIS datu pielietojumu (datu veidu spektrs), papildus pieaugs arī kvalitātes kritēriji avota datiem: datu esamība, datu aktualitāte (cik ātri dati tiks atjaunoti ĢIS pēc reālām izmaiņām dabā), datu precizitāte.



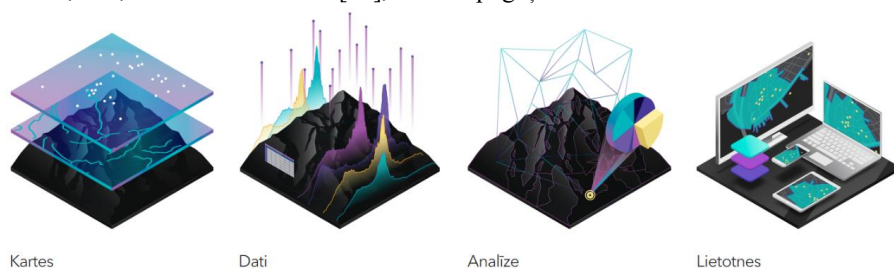
2.2. att. Elektrotīkla atslēguma kartes: Latvijas [32], Lietuvas [33] un Igaunijas [34].

ĢIS sevī ietver gan ģeogrāfisko datu glabāšanas, iegūšanas, attēlošanas, modificēšanas un apstrādes mehānismus, gan lēmumu pieņemšanas, analīzes un zināšanu iegūšanas iespējas.

Balstoties uz definīcijām no LR likumdošanas [35]:

- ģeotelpiskā informācija - jebkura informācija, kas tieši vai netieši norāda uz konkrētu atrašanās vietu vai ģeogrāfisko apgabalu, kurā atrodas ģeotelpiskais objekts;
- ģeotelpiskās informācijas infrastruktūra - normatīvajos aktos noteiktas ģeotelpisko datu kopas, to metadati, ģeotelpiskās informācijas kopīgas izmantošanas un atkalizmantošanas nosacījumi, ģeotelpiskās informācijas pakalpojumi, informācijas un telekomunikācijas tehnoloģijas, ar kurām nodrošina ģeotelpiskās informācijas apriti un ģeotelpiskās informācijas pakalpojumu sniegšanu, un kārtība, kādā tiek koordinēta un uzraudzīta iesaistīto institūciju darbība;

var secināt, ka ĢIS izmanto tehnoloģijas, kas atbalsta ģeotelpisko datu vizualizāciju, analīzi, uzglabāšanu un koplietošanu. Līdz ar to var iedalīt 4 ĢISa darbības principus: kartes, dati, analīze un lietotnes [36], ka ir atspoguļots 2.3. att.



2.3. att. ĢIS darbības komponentes.

### 2.2.1. Ģeotelpisko datu vizualizācija

Ģeotelpisko datu vizualizācijas, jeb karšu slāņi ir svarīgi, ĢIS lietotāji veido tematiskos karšu slāņus un strādā ar tiem katru dienu — tās nodrošina pamata pieredzi un praktisku saskarni ĢIS pielietošanai. Kartes nodrošina kritisku kontekstu, 2.4. att. var redzēt salīdzinājumu ĢIS sistēmas skatam ar infrastruktūras shēmu bez fona kartes un kopā ar fona karti, kas ļauj noorientēties vidē. Kartes ļauj izpētīt datus, atklāt un interpretēt modeļus.

Elektroenerģijas sadales operatora infrastruktūras uzturēšanas kontekstā kartes var iedalīt sekojošā sarakstā:

- Fona kartes: rastra karte (skanēta planšete, skanēta ģeogrāfiskā karte, ortofoto karte) –attēls kā objekts un 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 (piem. arheoloģiskie objekti, dabas parki).

Visām kartēm (pielietojšanai Latvijā) ir jābūt LKS-92 koordinātu sistēmā, kas ir salāgojama ar WGS84 (*World Geodetic System 1984*) koordinātu sistēmu ja ir nepieciešama datu apmaiņa ar citu valstu sadarbības partneriem.



2.4. att. ĢIS skats ar un bez fona kartes (ST pielietojums, *Trimble Inc.* programmatūra).

### 2.2.2. Tehnisko datu uzturēšana ĢIS

ĢIS nodrošina nepieciešamos rīkus datu ievākšanai (manuālai vai automātiskai), jo ir kā datubāze, kas ir strukturēta tādā veidā, ka jebkuram objektam kas ir šajā datu bāzē, ir iespējams uzzināt tā ģeogrāfisko atrašanos vietu un papildus informāciju kas ir vajadzīga par šo objektu (katra elementa atribūti).

ĢISā inženiertehnisko komunikāciju turētāji (tādi kā, elektroenerģijas pārvades un sadales sistēmas operatori, telekomunikāciju operatori, etc.) uztur datus, kas ir saistīti ar fiziskās infrastruktūras aktīviem (tīkla komponentes) un visu saistošo atribūtinformāciju (tehniskie parametri). Elektrotīkla infrastruktūras elementus dala 3 atspoguļošanas veidos:

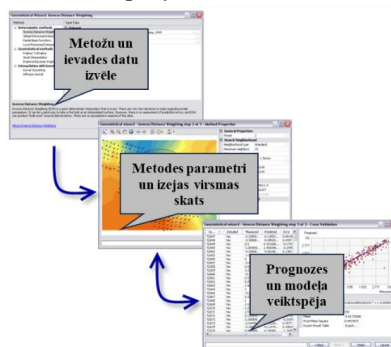
- Punkti (piem. transformators, balsts).
- Līnijas (piem. kabeļlīnija, gaisvada līnija).
- Poligoni (piem. aizsargjoslas buferzona).

Elementus var klasificēt un konfigurēt hierarhijas pēc nozīmes (piemēram, sadales operatora Punktvēda objektu hierarhija veido šādu plūsmu: barošanas apakšstacijas komponentes → vidējā sprieguma (VS) tīkla komponentes → sadales apkārtstacijas komponentes → zemsprieguma (ZS) līniju komponentes → ārējā apgaismojuma komponentes → augstsprieguma (AS) komponentes → kartes objekti), ka arī veidot bibliotēkas, lai vizualizētu atbilstoši regulējumiem.

### 2.2.3. ĢIS datu interpretācija un analīze.

Nemot vērā faktu, ka ĢIS datu bāzē satur vairākus elementus, tas nozīmē, ka katram elementam ir iespēja definēt atribūtdatus (kas būtu nepieciešami iepriekšdefinētajos

procesos), ka arī tīkla elementi sava starpā loģiski jāsavieno (lai to pārbaudītu, tad ir jāveido validācijas aprēķinu, kas pārbaudīts vai topoloģiski korekti ir savienoti savā starpā elementi). Izmantojot ĢIS primāros datus (līnijveida un punkteveida elementi) kompleksā ar aprakstošiem datiem pastāv iespēja konfigurēt ģeotelpiskās analīzes aprēķinus/filtrus/datu izsaukumus un veidot mijiedarbības ar datiem, veidojot aprēķina darbplūsmu, kā attēlots 2.5. att., lai aprēķinātu un vizualizētu nepieciešamu informāciju.



2.5. att. Ģeostatistikā aprēķina standarta darbplūsmu [37].

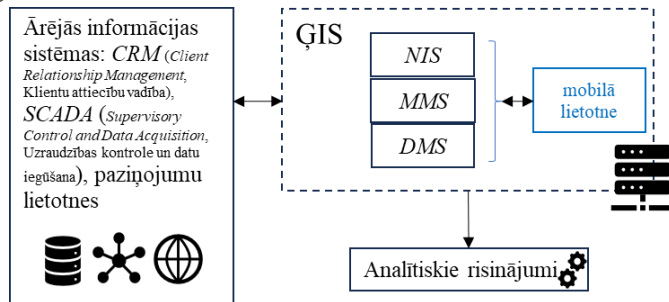
Ģeostatiskā analītiķa rīkkopā ir iekļauti rīki datu analīzei, dažādu izvades virsmu veidošanai, ģeostatistisko slāņu pārbaudei un pārveidošanai citos formātos, ģeostatistikas simulācijas un jutīguma analīzes veikšanai un palīdzībai paraugu ņemšanas tīklu projektēšanā. Atkarībā no programmatūras rīku iespējas funkcionalitāšu skaits var variēt, vispopulārākās ir sekojošas kopas:

- Interpolācija - satur ģeoapstrādes rīkus, kas veic interpolāciju, ko var izmantot kā atsevišķus rīkus vai *ModelBuilder* un *Python*;
- Simulācija - paplašina krigingu (*Kriging* - kas pazīstams arī kā Gausa procesa regresija, ir interpolācijas metode, kuras pamatā ir Gausa process, ko regulē iepriekšējās kovariācijas. Saskaņā ar piemērotiem iepriekšējiem pieņēmumiem, kriging nodrošina vislabāko lineāro objektīvo prognozi neatlasītās vietās), veicot ģeostatistisko simulāciju, un ļauj iegūt simulētos rezultātus punktiem vai daudzstūra poligoniem;
- Utilīti - vispārīgi lietojami rīki, lai iegūtu datu kopas apakškopas, veiktu savstarpēju validāciju, lai novērtētu modeļa veikspēju, pārbaudītu jutību pret pusvariogrammas parametru izmaiņām un vizuāli attēlotu interpolācijas rīku izmantotos apgabalus;
- Ģeostatistiskie slāņi - rīki, kas ģenerē punktu atrašanās vietas prognozes, eksportē ģeostatistiskos slāņus rastra un vektoru formātos, izgūst un iestata interpolācijas modeļa parametrus (XML parametru failā) un ģenerē jaunus ģeostatistiskos slāņus (pamatojoties uz XML parametru failu un datu kopu).

Telpiskās analīzes priekšrocība ir tajā, ka pastāv iespēja apvienot informāciju no vairākiem neatkarīgiem avotiem un iegūt jaunas informācijas kopas. Datu kvalitāte būtiski ietekme analīzes rezultātu precizitāti, tas ir jāņem vērā.

#### 2.2.4. ĢIS funkcionālās lietotnes

ĢIS, kā korporatīvā sistēma ar ģeotelpisko informāciju par infrastruktūras aktīviem nekad neeksistē neatkarīgi, tā ir viena no IT arhitektūras komponentēm, kas ir saintegrēta ar vairākām citām sistēmām, ka arī pati ĢIS struktūrā var apvienot vairākas lietotnes (kā attēlots 2.6. att. var sadales sistēmas operatora ĢIS komponentes varētu būt: NIS (*Network Information System*) – tīkla informācijas sistēmā, kur pārvaldīt infrastruktūras aktīvus, MMS (*Maintenance Management System*) – kur centralizēti pārvaldīt apkopes un remonta darbus, ka arī DMS (*Distribution Management System*), ar kuru palīdzību ir iespēja monitorēt un vadīt tīklu) un nodrošināt piekļuvi tām, lai operētu ar datiem interaktīvās kartēs, savāktu datus un apmainīties ar ģeotelpisko informāciju.



2.6. att. ĢIS struktūras prototips [38].

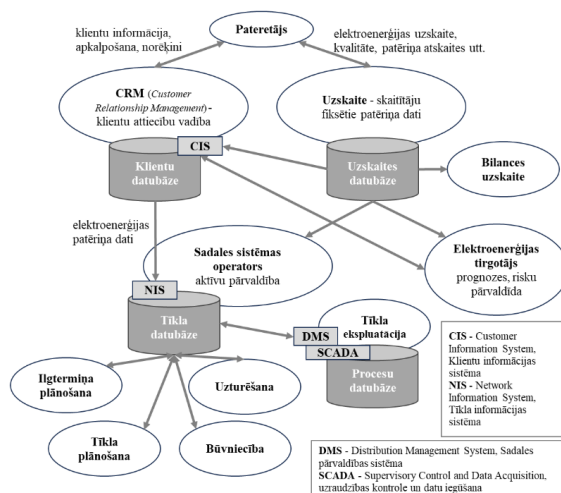
Inženiertehniskās infrastruktūras turētājiem ir ļoti būtiska ĢIS integrācija ar mobilo telefonu, jo telefons ir ierīce ar nepārtrauktu atrašanās vietas atpazīšanu, kā arī spēju uzņemt fotoattēlus ar ģeogrāfisko atzīmi un apkopot datus pēc atrašanās vietas vai navigēt uz objektiem, sinhronizējot rezultātus ar ĢIS desktop versiju, līdz ar to paātrinot pamatprocesus, informācijas apmaiņu un nodrošinot datu kvalitāti.

Tehnoloģiskais risinājums ar ĢIS integrācijas palīdzību ar darbplūsmu, resursa vadības sistēmu un transporta kontroles sistēmu ļaus objektīvi kontrolēt inženiertehniskā infrastruktūras uzturēšanas situāciju reāllaikā (balstoties uz datiem). Ir arī ierobežojošie faktori, kā:

- Piekļuve tīkla datiem;
- Mobilo aplikāciju ierobežojumi;
- Bezvadu tīkla pārklājums,

kurus jāņem vērā un papildus izstrādāt risku mazināšanas risinājumus veidojot integrācijas ar lietotnēm. Sadales sistēmas operatora ĢIS moduļu un integrāciju vispārējā arhitektūra (viens no iespējamiem sadales operatora IT arhitektūras piemēriem parādīts 2.7. att.) nepārtraukti attīstās, iekļaujot jaunus datu avotus un uzlabojot sistēmas funkcionalitāti, lai nodrošinātu efektīvāku infrastruktūras pārvaldību un datu apstrādes iespējas





2.7. att. Datu pārvaldības modeļa piemērs sadales operatora IT infrastruktūrā [39].

## 2.3. Digitālā dvīņa koncepta pielietojums enerģētikas jomā

### 2.3.1. Digitālā dvīņa konceptuālais apskats

*Industry 4.0* vai ceturrtā industriālā revolūcija attiecas uz būtisku pārveidi ražošanas un rūpniecības nozarēs, ko veicina digitālo tehnoloģiju un lietu interneta (*IoT*) integrācija dažādos ražošanas un piegādes ķēžu aspektos. Tā ir ceturrtā lielā industriālā revolūcija, un katrai no iepriekšējām revolūcijām ir raksturīgi īpaši tehnoloģiski sasniegumi [39]:

- Pirmā rūpnieciskā revolūcija: tā sākās 18. gadsimta beigās, un to raksturoja plaši izplatīta tvaika dzinēju un mehanizācijas izmantošana, kas būtiski mainīja lauksaimniecību, ražošanu un transportu.
- Otrā industriālā revolūcija: notika 19. gadsimta beigās un 20. gadsimta sākumā, un šajā posmā tika ieviesta elektrība, masveida ražošana un konveijera līnija, kas ļāva ražot preces lielā mērogā.
- Trešā industriālā revolūcija: bieži dēvēta par digitālo revolūciju, šis periods sākās 20. gadsimta vidū, un to raksturoja plaši izplatīta datoru, automatizācijas un elektronikas izmantošana rūpnieciskajos procesos.
- Ceturtā industriālā revolūcija (*Industry 4.0*): šo revolūciju, kas turpinās, virza digitālo tehnoloģiju, piemēram, mākslīgā intelekta, lielo datu analītikas, lietu interneta (*IoT*), mākoņdatošanas un kiberfizikālo sistēmu konverģence.

Rūpniecība 4.0 pārveido ražošanu un rūpniecību, jo:

- Viedā ražošana: tā ietver sensoru, datu analīzes un savienojamības izmantošanu, lai uzraudzītu un kontrolētu dažādus ražošanas procesa aspektus. Tas ļauj veikt reāllaika pielāgojumus, paredzamu apkopi un uzlabot efektivitāti;



- IoT un savienojamība: ierīces un mašīnas ir savstarpēji savienotas, ļaujot apmainīties ar datiem un informāciju. Šī savienojamība nodrošina labāku koordināciju un saziņu ražošanas procesā;
- Lielie dati un analīze: tiek analizēts liels sensoru un ierīču ģenerēto datu apjoms, lai gūtu ieskatu ražošanas procesos, identificētu tendences un pieņemtu uz datiem balstītus lēmumus;
- Automatizācija un robotika: Ražošanā tiek izmantoti roboti un autonomas sistēmas, lai veiktu uzdevumus precīzi un konsekventi. Tas samazina nepieciešamību pēc cilvēka iejaukšanās, veicot atkārtotus vai bīstamus uzdevumus;
- Aditīvā ražošana (3D drukāšana): 3D drukas tehnoloģijas tiek izmantotas, lai izveidotu sarežģītus un pielāgotus komponentus un produktus;
- Papildinātā realitāte (AR – *Augmented Reality*) un virtuālā realitāte (VR – *Virtual Reality*): šīs tehnoloģijas tiek izmantotas apmācībai, uzturēšanai un attālam atbalstam rūpnieciskos apstākļos;
- Kiberdrošība. Tā kā digitālās tehnoloģijas kļūst arvien integrētākas, datu un sistēmu aizsardzība pret kiberdraudiem kļūst vissvarīgākā;
- Ilgtspējība un zaļā ražošana: Rūpniecība 4.0 uzsver ilgtspējību, izmantojot energoefektīvus procesus un samazinot atkritumu daudzumu [40].

Rūpniecība 4.0 ir būtiskas izmaiņas produktu projektēšanā, ražošanā un piegādē, kā rezultātā tiek panākta lielāka efektivitāte, pielāgošana un konkurētspēja. Tas neaprobežojas tikai ar ražošanu, bet arī ietekmē piegādes ķēdes pārvaldību, loģistiku un citas rūpniecības nozares. Mērķis ir izveidot elastīgākas un savstarpēji savienotas sistēmas, kas var pielāgoties mainīgajām tirgus prasībām un tehnoloģiju sasniegumiem.

Neatņemams termins Rūpniecība 4.0 tvērumā ir Digitālais dvīnis. Digitālais dvīnis ir fiziska objekta, sistēmas vai procesa digitāls attēlojums vai modelis [41]. Tas ir jēdziens, kas ir guvis ievērību dažādās nozarēs, tostarp ražošanā, veselības aprūpē, pilsētplānošanā un citās, pateicoties sasniegumiem tādās tehnoloģijās kā lietu internets (IoT), sensori, datu analītika un simulācija.

Galvenās digitālo dvīņu īpašības un lietojumi ietver:

- Modelēšana un simulācija: digitālie dvīņi ļauj izveidot virtuālus modeļus, kas atkārtο fizisko vienību, piemēram, mašīnu, ēku vai pat visu pilsētu. Šie modeļi var simulēt reālo uzvedību un mijiedarbību [19];
- Reāllaika dati: tie bieži ir savienoti ar fizisko līdzinieku, izmantojot sensorus un IoT ierīces, ļaujot apkopot reāllaika datus un pārsūtīt tos digitālajam dvīnim. Šos datus var izmantot, lai uzraudzītu un kontrolētu fizisko vienību [42];
- Uzraudzība un paredzamā analīze: digitālos dvīņus izmanto fiziskā objekta vai sistēmas stāvokļa un veiktspējas uzraudzībai. Analizējot datus no sensoriem, ir iespējams atklāt problēmas, paredzēt apkopes vajadzības un optimizēt darbības [43];

- Testēšana un optimizācija: digitālos dvīņus var izmantot, lai pārbaudītu un optimizētu dizainu pirms fiziskas ieviešanas. Tas ir vērtīgi ražošanā, kur produktu prototipi var būt dārgi [44];
- Tālvadības pults: dažos gadījumos digitālos dvīņus izmanto, lai attālināti kontrolētu un pārvaldītu fiziskos līdzekļus. Piemēram, inženieris var izmantot iekārtas digitālo dvīni, lai pielāgotu tās iestatījumus vai diagnosticētu problēmas no attālas vietas [45];
- Komplicētās sistēmas: tās ir īpaši noderīgas komplicēto sistēmu, piemēram, viedo pilsētu, pārvaldīšanai, kur dažādus komponentus (piemēram, satiksmi, enerģiju un atkritumu apsaimniekošanu) var attēlot un analizēt kā digitālos dvīņus, lai uzlabotu efektivitāti un ilgtspējību [46].

Digitālie dvīņi piedāvā veidu, kā savienot fizisko un digitālo pasauli visdažādākās projekcijās, ļaujot labāk pieņemt lēmumus, palielināt efektivitāti un samazināt izmaksas dažādās lietojumprogrammās. Tā kā tehnoloģija turpina attīstīties, digitālās dvīņu iespējas, visticamāk, kļūs vēl sarežģītākas un plaši izplatītas. Kā vienu no spilgtākajiem piemēriem digitālo dvīņu pielietojumā, ko sabiedrība jau ikdienā izmanto, var minēt veselības aprūpes industriju: veselības aprūpē digitālie dvīņi var attēlot pacienta fizioloģiskos datus, lai palīdzētu diagnostikā, ārstēšanas plānošanā un uzraudzībā. Tos var izmantot arī medicīnisku procedūru vai zāļu mijiedarbības simulēšanai [47]. Runājot par enerģētikas nozari, tad tur digitālie dvīņi var attēlot spēkstacijas vai tīklus, lai optimizētu enerģijas ražošanu, samazinātu dīkstāves laiku un uzlabotu energoefektivitāti [48].

*Digital Twin*, jeb Digitālais dvīnis ir digitāla kopija vai modelis reālajam objektam, procesam vai sistēmai. Tas ietver reāla objekta vai procesa digitālo replicēšanu, kas var atspoguļot tā stāvokli, darbību un uzvedību. Digitālie dvīņi palīdz uzlabot sistēmas pārvaldību un efektivitāti. Terminu digitālais dvīnis pirmo reizi ieviesa amerikāņu datorzinātnieks, mākslinieks un rakstnieks D. H. Gelernters 1991./1992. gadā [49]. Ideju par digitālo dvīņu praktiskās pielietošanas kontekstā pirmo reizi M.Grīvess prezentēja 2002. gadā Mičiganas Universitātē, lai izveidotu produkta dzīves cikla vadības centru [50]. 2012. gadā Nacionālā aeronautikas un kosmosa administrācija ierosināja ideju par simulācijas atbalstītu digitālo dvīņu [51], kas ievērojami palielināja uzmanību uz šo koncepciju. Tā rezultātā digitālais dvīnis ir viena no vadošajām tehnoloģiju tendencēm mūsdienu pasaulē [29].

Neraugoties uz digitālā dvīņa jēdziena pieaugošo popularitāti un nozīmi, šim terminam joprojām ir dažādas izpratnes, interpretācijas un definīcijas, sākot no abstraktas un neskaidras, piemēram, "virtuālas informācijas konstrukciju kopums, kas pilnībā apraksta potenciālu vai faktisku fizisku saražotu produktu no mikro atomu līmeņa līdz makrogeometriskajam līmenim" [50] vai "digitāls attēlojums, kas ir pietiekams, lai atbilstu lietošanas gadījumu kopuma prasībām" [52], uz risinājumu orientētiem jēdzieniem, piemēram, "fizikālo skaitļu digitālais attēlojums indivīdiem, kā arī virtuālajām entītijām informācijas sistēmā, kas savstarpēji savieno tradicionāli atdalītus elementus un nodrošina integrētu skatījumu visos dzīves ciklos" [53]. Tomēr,

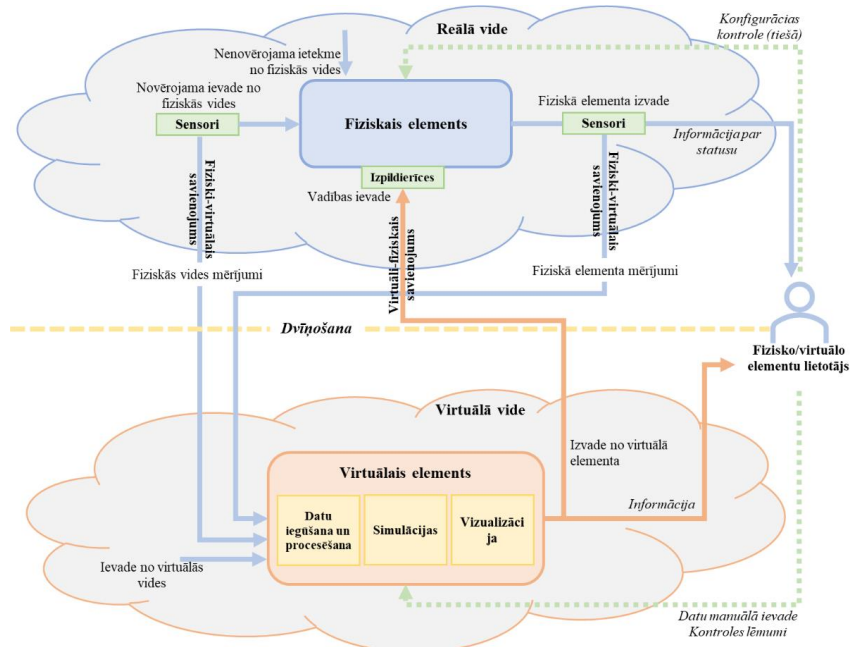
neskatoties uz interpretāciju dažādību, digitālo dvīņu kopīga iezīme ir fakts, ka tie ir fizisko aktīvu dinamiskas digitālas replikācijas, kuru mērķis ir atbalstīt lēmumu pieņemšanu sarežģītā vidē, lai samazinātu izmaksas, nodrošinātu ilgtspējību, novērstu problēmas un radītu uzņēmējdarbību. vērtību. Šajā kontekstā digitālo dvīni var definēt "kā fiziska objekta vai sistēmas dinamisku virtuālu attēlojumu visā tā dzīves ciklā, izmantojot reāllaika datus, lai nodrošinātu izpratni, mācīšanos un argumentāciju" [54].

Sākotnējā produkta dzīves cikla pārvaldības pieejā digitālais dvīnis sastāvēja no trim daļām [55]:

- Fiziska vienība reālajā telpā;
- Virtuāla vienība virtuālajā telpā;
- Datu un informācijas savienojumi, kas savieno virtuālās un fiziskās vienības.

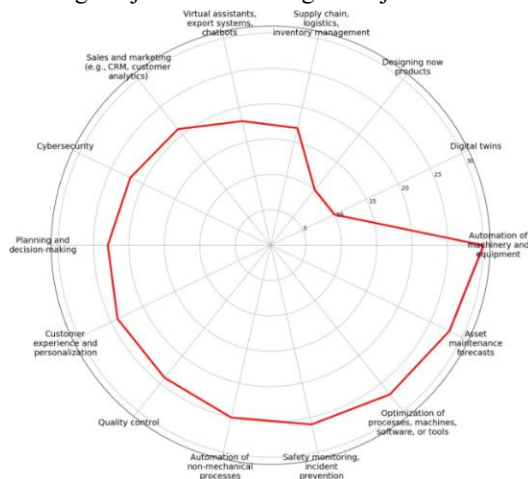
Tomēr jaunākajā digitālā dvīņa koncepcijā ir iekļautas piecas dimensijas: fiziskās entitijas darbības joma, fiziskās entitijas pazīmes, datu komunikācijas forma, virtuālās entitijas darbības joma un lietotājam specifiska izvades/vērtības radīšana [56].

Kā parādīts 2.8. att., digitālais dvīnis ir formāli organizēts kā digitāli atspoguļots reālās dzīves fiziskās vides attēlojums. Saskaņā ar [57], digitālā dvīņa koncepcija ir balstīta uz fizisko un virtuālo entitiju mijiedarbību 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 saturēt vienu fizisko un virtuālo entitiju pāris vai vairākas fiziskas entitijas ar atbilstošiem virtuāliem attēlojumiem. [58] reālā dvīņa sistēma un digitālā dvīņa sistēma ir fizisko un virtuālo entitiju kolekcija. Galvenās virtuālo entitiju sastāvdaļas, kas nodrošina digitālo dvīņu funkcionalitāti un precizitāti, ir datu vākšana un apstrāde, simulācija un vizualizācija.



2.8.att. Digitālā dvīņa vispārīgā konceptuālā struktūra [59].

Digitālā dvīņa temats ir īpaši aktuāls izpētei, kā redzams 2.9. att., kur apkopoti galvenie inteliģento risinājumu pielietojumi enerģētikas nozarē, no kuriem var redzēt, ka vadības pozīcijas ieņem prognozēšanas un automatizācijas uzdevumi, un mazāk pielietojumu šobrīd ir digitālajam dvīnim enerģētikas jomā.

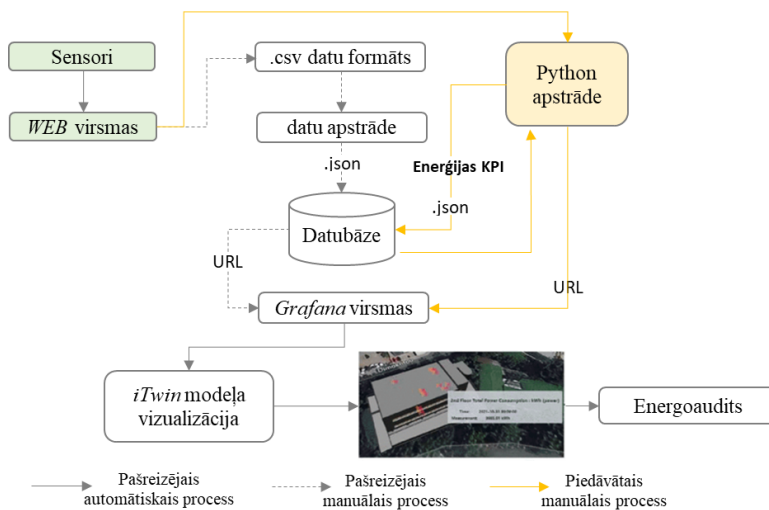


2.9. att. Galvenie mākslīgā intelekta pielietojumi enerģētikas nozarē [60].

### 2.3.2. Digitālais dvīnis energoefektīvu ēku pārvaldībai

Digitālie dvīņi var atveidot ēkas un to iekārtu digitālo modeļi, sniedzot informāciju par energoefektivitāti, apkures un dzesēšanas sistēmām, kā arī citas sistēmas [61]. 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. Tādējādi daudzas Eiropas valstis tagad veicina saules enerģijas izmantošanu karstā ūdens ražošanai, sniedz finansiālus stimulus un ievieš obligātus būvniecības noteikumus [62].

Eiropā pēc energoefektivitātes direktīvas 2012/27 [63] un 16247 sērijas standartu [64] izstrādes un izdošanas tajā pašā gadā energoauditi ir izveidoti kā pārbaudīta prakse, lai samazinātu enerģijas patēriņu ēkas. Taču ir fakts, ka šajā posmā energoauditi tiek veikti saskaņā ar tradicionālo inženiertehnisko praksi, neizmantojot tehnoloģiskos sasniegumus pilnā mērā. Ir veikts konceptuālais modelis energoauditu veikšanai, izmantojot attālinātos mērījumus un to apstrādi informācijas loģikā no digitālajiem dvīņiem, BIM vidē [65] – tādā veidā digitāli transformējot elektroenerģijas patēriņa inspekcijas procesu. Papildus gadījumam, kad ir iespējams tieši integrēt sensoru datus digitālajā dvīnī, 2.10. att. parādītas pašreizējās un piedāvātās darbplūsmas par to, kā ar enerģiju saistītos KPI varētu automātiski attēlot iTwin modeļi, izmantojot savāktos datus [65].

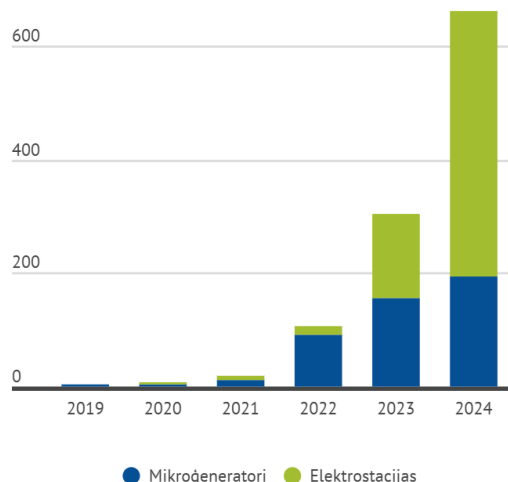


2.10.att. Datu integrācijas process [53].

Digitālais dvīnis ir spēcīgs instruments energoefektīvu ēku pārvaldībai, sniedzot plašu un detalizētu informāciju un iespēju veikt analīzi un optimizēt ēkas pārvaldību, lai samazinātu elektroenerģijas patēriņu un līdz ar to negatīvo ietekmi uz vidi, kas korelē ar Eiropas zaļās kursa stratēģiju [66] un balstās uz principu "energoefektivitāte pirmajā vietā".

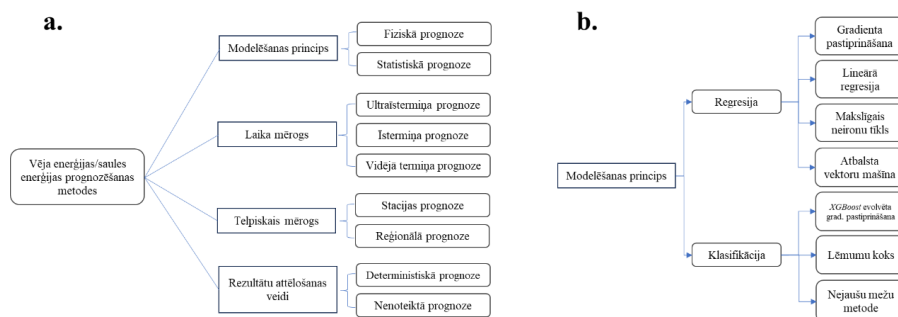
### 2.3.3. Digitālais dvīnis atjaunojamajiem enerģijas avotiem

Atjaunojamo energoresursu izmantošana visā pasaulē kļūst arvien izplatītāka (arī Latvijā (par to liecina Latvijas sadales operatora 2023.gada elektroapgādes apskata dati [13] – 128.01 megavatu saražotās jaudas no ap 500 saules elektrostacijām). Tomēr zaļās enerģijas vērienīga iesaistīšanās (Latvijas dinamiku pēc pieslēgt saules ģenerācijas jaudas pēdējos trīs gados var redzēt 2.11. att.) noved pie izkliedētu enerģijas tīklu izveides, kas apvieno vairākas dažādas ražošanas metodes, no kurām katrai ir savas īpatnības, un rezultātā tiek veikta datu vākšana un apstrāde, kas nepieciešama, lai optimizētu šādas energosistēmas kļūst aktuālākas. Jaunu tehnoloģiju izstrāde AER optimālākai izmantošanai ir viens no mūsdienu pētījumu galvenajiem uzdevumiem enerģētikas jomā, kur nozīmīga vieta atvēlēta uz mākslīgo intelektu balstītu tehnoloģiju izmantošanai, ļaujot pētniekiem būtiski paaugstināt energoresursu efektivitāti visu veidu AER izmantošanu energosistēmās.



2.11.att. Pieslēgtā saules ģenerācijas jauda (kumulatīvi) (MW) [13].

AER digitālā dvīņa virtuālās daļas izstrādei, kas nodrošinātu elektrostaciju darbības režīmu, prognozēšanu un plānošanu [67, 68], veido augstās precizitātes pakāpes procesa modeli, modernu pieeju pielietošanas metodiku no atjaunojamiem energoresursiem iegūtās enerģijas daudzuma novērtēšanai, pamatojoties uz mākslīgā intelekta tehnoloģijām (viens no fragmentiem parādīts 2.12. att.), pieejas datu apstrādei un vadības procesu optimizācijai ekspluatācijas energosistēmu ar integrāciju atjaunojamiem enerģijas avotiem.



2.12.att. Galvenās (a.) pieejas AER prognozēm un mašīnmācīšanās algoritmi (b.) saules enerģijas prognozēm [67].

Izveidojot integrētās energosistēmas digitālos dvīņus, pastāv iespēja gūt labumu no digitāla dvīņa prognozēšanas iespējām, lai uzlabotu koordināciju starp dažādiem enerģijas pārveidotājiem, tādējādi uzlabojot energoefektivitāti, izmaksu ietaupījumu un oglekļa emisiju samazināšanu. Lai mazinātu ietekmi no vairākiem nenoteiktības avotiem un sarežģītas apkārtējās vides jauna uz digitālā dvīņa balstīta nākamās dienas plānošanas metode - vairāku vektoru enerģijas sistēma savā virtuālajā telpā, kas mijiedarbojas ar fizisko integrēto energosistēmu, lai manipulētu ar tās darbībām –

neironu tīkls, kas ir apmācīts dot rezultātu, ņemot vērā vēsturiskās prognozēšanas kļūdas, ka arī nākamās dienas prognozes. Ir pierādīts, ka uz digitālā dvīņa balstītā metode spēj samazināt integrētās energosistēmas darbības izmaksas par 63,5%, salīdzinot ar esošajām uz prognozēm balstītām plānošanas metodēm [69].

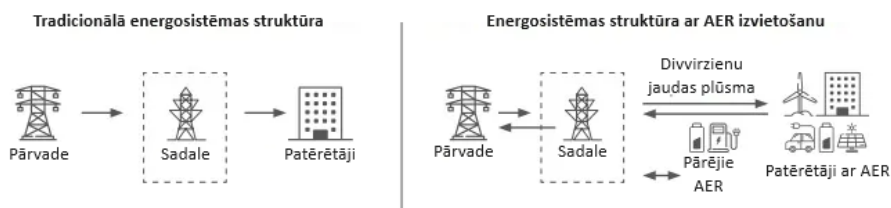
Digitālo dvīņu konceptu pielieto arī, lai paaugstinātu efektivitāti atjaunojamo enerģijas avotiem. Ir piedāvāti parametru vadības matemātiskie modeļi normālā režīma elektroenerģijas sistēmās apstākļiem ar augstu AER integrāciju. Kā parādīts 2.13. att. paneļu izvietojšanai ir ietekme uz ražošanu, tāpēc 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 palīdz noskaidrot, ka dažām virsmām ir līdz pat 50% zudumi ēnojuma dēļ, un tāpēc tās nav vai ir piemērotas reālai lietošanai.



2.13.att. Paneļu uzstādīšanas simulācijas energoefektivitātes aprēķiniem [70].

#### 2.3.4. Sadales operatora virszemes infrastruktūras digitālais dvīnis

Jaunā sadales sistēmas operatoru loma – kā var redzēt 2.14. att. – divvirzienu jaudas plūsmas nodrošināšana, būtiski ietekmēs elektroenerģijas sistēmas darbību šodien. Elastības palielināšana sadales tīklos: izmantojot AER pieaugošo izplatību, sadales sistēmas operatori varētu iegādāties elastīguma pakalpojumus, piemēram, sprieguma regulēšanu, tīkla noslodzes pārvaldību un slodzes maksimumu samazināšanu, no aktīviem, kas jau ir pievienoti to sadales tīklam. Šādu pakalpojumu izmantošana vēl vairāk veicinātu atjaunojamo energoresursu integrāciju sadales tīklā un jo īpaši mainīgo atjaunojamo enerģijas avotu integrāciju.



2.14.att. Sadales sistēmas operatoru jaunā loma [71].

Līdz ar to tīkls un to pārvaldība ir ļoti nozīmīga sadales operatoriem:

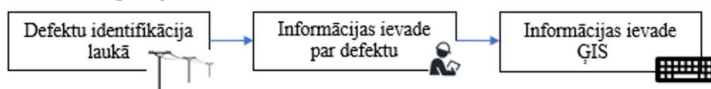
- Efektīvā resursu izmantošana - tīkla pārvaldība ļauj optimizēt resursu izmantošanu, nodrošinot, ka elektroenerģijas plūsmas tiek pareizi plānotas, lai nodrošinātu efektīvu un ekonomiski izdevīgu darbību. Pārvaldības sistēmas un procedūras palīdz sadales operatoriem uzturēt augstu sistēmas uzticamību un

pieejamību. Tas ir svarīgi, lai nodrošinātu nepārtrauktu resursu piegādi klientiem un novērstu negatīvas sekas, kas saistītas ar traucējumiem vai avāriju gadījumiem.

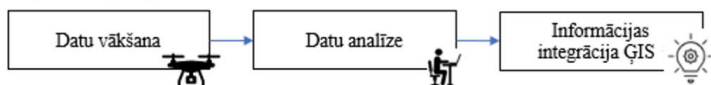
- Pārvaldība un uzraudzība - tīkla pārvaldības sistēmas nodrošina nepieciešamo rīku un instrumentu komplektu, lai uzraudzītu un pārvaldītu tīkla darbību. Tas ietver datu uzkrāšanu, analīzi, kā arī ātru reaģēšanu uz jebkādiem problēmu gadījumiem, kas varētu rasties infrastruktūrā.
- Kvalitātes kontrole - tīkla pārvaldība ļauj sadales operatoriem nodrošināt augstu pakalpojumu kvalitāti, kontrolējot un uzraugot faktorus, piemēram, SAIDI, SAIFI rādītājus un citus svarīgus parametrus.
- Inovācijas un modernizācija - tīkla pārvaldība ietver arī tehnoloģiju izmantošanu, lai uzlabotu tīkla efektivitāti un veicinātu inovācijas. Tas var ietvert jaunu tīkla tehnoloģiju ieviešanu, automatizāciju un citus uzlabojumus, kas palīdzētu optimizēt procesus.

Virszemes tīkla infrastruktūras digitālā dvīņa izveide var radikāli pārveidot tīkla pārvaldības procesus [72]. Digitālā dvīņa izveide ietver datu vākšanu un analīzi, kā rezultātā tiek veikta automatizēta ar datiem vadīta vidējā sprieguma gaisvadu infrastruktūras pārbaude. 2.15. att. parādīta 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 tas samazina tīkla inspekcijas procesa ilgumu un pārvalda cilvēkresursu trūkuma un transporta izmaksu jautājumus.

#### Manuālā inspekcija



#### Digitālā inspekcija



2.15.att. Manuālās un digitālās inspekcijas procesa plūsmas.

## 2.4. Kopsavilkums

Šajā sadaļā tiek analizēti digitālās transformācijas risinājumi enerģētikas sektorā, uzsverot to būtisko lomu infrastruktūras pārvaldības un uzturēšanas efektivitātes paaugstināšanā.

Viedo skaitītāju tehnoloģijas sniedz iespējas precīzai un detalizētai datu ieguvei un analīzei, kas ļauj uzlabot elektroenerģijas patēriņa monitoringu un pielāgot patēriņa paradumus atbilstoši reālajām vajadzībām.



GIS pielietojums infrastruktūras tehnisko datu uzturēšanā nodrošina iespēju kompleksai datu analīzei un vizualizācijai, apvienojot dažādus kartogrāfiskos un datu slāņus lēmumu pieņemšanas procesā, tādējādi veicinot infrastruktūras tehniskā stāvokļa uzraudzību un uzturēšanu.

Digitālo dvīņu tehnoloģija, kas pēdējā laikā attīstās strauji, piedāvā inovatīvus risinājumus dažādos pielietojumos, piemēram, energoefektīvu ēku pārvaldībā un atjaunojamo energoresursu izmantošanas optimizācijā. Darbā ir piedāvāta jauna pieeja, izmantojot digitālo dvīņa konceptu - fiziskās infrastruktūras stāvokļa novērtēšana, kas balstīta uz datu apstrādi no infrastruktūras objektiem. Šī pieeja ļauj aizstāt manuālas inspekcijas, nodrošinot objektīvāku un efektīvāku infrastruktūras tehniskā stāvokļa pārraudzību un pārvaldību, tādējādi samazinot cilvēka faktora kļūdu iespējamību un uzlabojot lēmumu pieņemšanas kvalitāti.

### **3. LATVIJAS ELEKTROENERĢIJAS SADALES SISTĒMAS INFRASTRUKTŪRAS INSPEKCIJAS PROCESS**

Inženiertehnisko komunikāciju infrastruktūras turētājam viens no pamatzdevumiem ir uzturēt savā atbildībā esošo infrastruktūru. Latvijas lielākajam elektrotīkla sadales sistēmas operatoram AS “Sadales tīkls” uzraudzībā esot nozīmīgs valstij elektroietaišu (elektroiekārtu un konstrukciju kopums, kas paredzēts kopīgu funkciju veikšanai) apjoms – elektropārvades līniju garums – 92407 km [21], kas sastāda sekojošo elektrotīkla struktūru:

- Gaisvadu elektrolīnijas (0.4 kV) – 31 %;
- Gaisvadu elektrolīnijas (6-20 kV) – 29 %;
- Kabeļu elektrolīnijas (0.4 kV) – 30 %;
- Kabeļu elektrolīnijas (6-20 kV) – 9 %.

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

Elektroietaišu inspekcija ir profilaktiskās pārbaudes darbs, kas ir elektroiekārtu, kā arī elektroietaišu ēku un būvju vizuāla apsekošana, lai atklātu un fiksētu novirzes no tehnisko normatīvu prasībām. Veicot defektēšanu jānovērtē elektroietaišu elementu tehniskais stāvoklis un jāfiksē to atkāpe no noteiktām normām. Šis process ir nepieciešams elektroapgādes objektu pilnvērtīgai darbības nodrošināšanai, kas ir viens no galvenajiem sadales tīkla operatora tehniskās apkopes darbiem, lai identificētu bīstamos defektus un Aizsargjoslu likuma pārkāpumus [73], ka arī tas kritiski sabiedrības drošības nodrošināšanai. Inspekcijas process tiek iedalīts divos virzienos:

- Plānotā inspekcija - tiek veikta atbilstoši noteiktai periodikai, AS “Sadales tīkls” esošā perioditāte atbilstoši tehniskā objekta veidam ir apkopota 3.1. tab., un tās

laikā tiek fiziski apskatīti visi Tehniskā objekta teritorijā esošie tīkla elementi un elektrotīkla aizsargjoslas.

- Ārpuskārtas inspekcija - tiek veikta neatkarīgi no noteiktās periodikas ar noteiktu mērķi atklāt atkārtotu tehnoloģisko traucējumu (bojājumu) cēloņus vai atklāt defektus, kas saistīti ar iesniegumiem par piegādātās elektroenerģijas kvalitāti vai elektroietaišu tehnisko stāvokli un pēc citiem ST iekšējiem dokumentiem. Ārpuskārtas defektēšanā var tikt apskatīta tikai daļa no Tehniskā objekta teritorijā esošiem elektrotīkla posmiem. Ārpuskārtas apskates un inspekcijas nemaina plānoto inspekciju periodiskumu.

Svarīgi ir identificēt, novērst un labot infrastruktūras defektus savlaicīgi, lai nodrošinātu tās ilgtspējīgu darbību, uzticamību un drošību. To var panākt ar regulāru apkopi, inspekcijām, kā arī ar uzlabojumiem un modernizāciju, lai palielinātu infrastruktūras izturību pret bojājumiem un uzlabotu tās efektivitāti.

3.1. tabula

Plānotās defektēšanas periodiskums

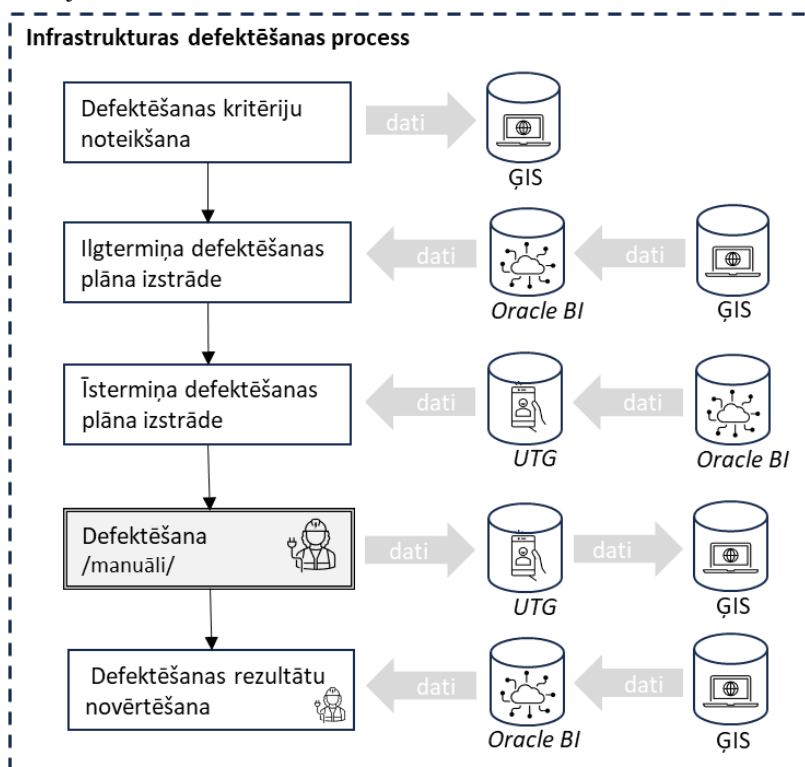
| Tehniskā objekta veids                                                                                                                                                                                                                            | Paraugs                                                                             | Periodiskums    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Augstsprieguma apakšstacija - visi elektriskās ķēdes elementi, kuri ietilpst augstsprieguma apakšstacijas elektriskā shēmā no AS "Sadales tīkls" apkalpošanas un piederības robežas uz 110kV transformatoru izvadiem līdz atejošām elektrolīnijām |    | 1 reizi gadā    |
| Sadales punkts - visi elektriskās ķēdes elementi, kuri ietilpst sadales punkta elektriskā shēmā no pienākošām elektrolīnijām līdz atejošām 6-20kV elektrolīnijām                                                                                  |   | 1 reizi 2 gados |
| Komutācijas punkts - visi elektriskās ķēdes elementi, kuri ietilpst komutācijas punkta elektriskā shēmā no pienākošām elektrolīnijām līdz atejošām elektrolīnijām                                                                                 |  | 1 reizi 2 gados |
| Ārtipa jaudas slēdzis - visi elektriskās ķēdes elementi, kuri ietilpst jaudas slēdža elektriskā shēmā, balsts vai konstrukcija, kurā ir izbūvēts jaudas slēdzis                                                                                   |  | 1 reizi 2 gados |
| Transformatora apakšstacija - visi elektriskās ķēdes elementi, kuri ietilpst transformatoru apakšstacijas elektriskā shēmā no pienākošo vidsprieguma elektrolīniju pieslēguma vietām līdz atejošām zemsprieguma elektrolīniju pieslēguma vietām   |  | 1 reizi 4 gados |

| 3.1. tabula (turpinājums)                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                   |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Vidsprieguma elektrolīnija - kailvadi, pārklāti vadi, kabeļi kabeļbalstos, kabeļu apdares un kabeļu trases, balsti, pastabi, komutācijas aparāti (izņemot jaudas slēdzus), kuri ir izbūvēti tehniskā objektā esošajos balstos, pārsprieguma novadītāji, vīdsprieguma uzskaites, strāvmaiņi, spriegummaiņi u.c. elementi |  | 1 reizi 4 gados |
| Zemsprieguma elektrolīnija - kabeļi, piekarkabeļi un vadi, balsti, pastabi, sadalnes un komutācijas aparāti, spriegumu paaugstinājošie vai pazeminošie transformatori, elektroenerģijas uzskaites un ar tām saistošie elektriskās shēmas elementi                                                                       |  | 1 reizi 4 gados |

Šobrīd AS “Sadales tīkls” infrastruktūras inspekcijas process notiek atbilstoši shēmai (3.1. att.). Visas infrastruktūras fiziskā apsekošana noriet 4 gadu ciklā, kas sastāv no sekojošiem procesa soļiem:

- Defektēšanas kritēriju noteikšana – infrastruktūras defektēšanas katalogs, kas ir izstrādāts konkrētajai infrastruktūrai, ņemot vērā tās funkcijas, vides apstākļus un citas relevantos faktorus, lai nodrošinātu infrastruktūras drošību, uzticamību un ilgtspējīgu darbību.
- Ilgtermiņa defektēšanas plāna izstrāde – plāns, kurā tiek uzturēta visa informācija par plānoto defektēšanu 4 gadu ciklā. Plānu uztur ĢIS sistēmā MMS (*Maintenance Management System*) modulī, kur ir pārvaldīti vis tīkla uzturēšanas darbi tehniskajos objektos, norādot plānotā defektēšanas perioditātes gadu pie TO poligona lietotāju atribūtu sarakstā.
- Īstermiņa defektēšanas plāna izstrāde – tekošā gada defektēšanas plāns, sadalīts ceturkšņu griezumā. Izmantojot tiešsaistes datus no ĢIS MMS ir iespēja redzēt situāciju par plāna izpildēm, izmantojot biznesa inteliģences atskaišu risinājumus.
- Inspekcija – inspekcijas izpildē personāls izmanto UTG (*Utility to Go* - mobilā lietojuma ĢIS aplikācija elektrotīkla uzturēšanai, bojājumu darbu aprītei un operatīvās informācijas ieguvei) lietotni, kur katram inspekcijas veicējam tiktu piešķirti nepieciešamas inspekcijas darbības, ka arī ir iespēja objektā (tai skaitā arī bezsaistes režīmā) un ir jāveic atzīmēs par defektu konstatāciju un nodefektētajiem objektiem. Defektēšanu veic tīkla inspektors ar vismaz A elektrodrošības grupu [74]. 3.2. att. ir demonstrēts inspekcijas izpildes process ar UTG lietotni un tas lietotnes skatiem.
- Defektēšanas rezultātu novērtēšana – noslēdzošais solis defektēšanas procesā, atskaišu analīze (*Oracle BI* - globāla tehnoloģiju uzņēmuma *Oracle Corporation* biznesa inteliģences risinājums), kur pārbauda defektēšanas

izpildes rādītājus, ka arī novērtē kvalitāti, izlases kārtā veicot pārbaudes objektos.



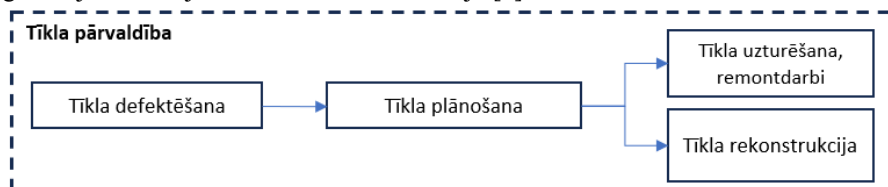
3.1.att. Plānotās inspekcijas procesa shēma.



3.2.att. Inspekcijas izpilde, izmantojot UTG lietotni.

Šobrīd plānotās defektēšanas procesa realizācijai ir nepieciešama apjomīga cilvēku resursa (ar specifiskām zināšanām elektroapgādē) iesaiste infrastruktūras apsekošanai klātienē (reālajā vidē) – virs 100 defektēšanas meistari visā Latvijas teritorijā.

Ka arī svarīgs aspekts defektēšanas procesa izpildes kvalitātes radītājiem ir tas, ka šis process nav neatkarīgs, bet viens no svarīgiem posmiem kopējā tīkla pārvaldībā, kā parādīts 3.3 .att., un tā rezultāts var būtiski ietekmēt lēmumus, jo ik AS “Sadales tīkls” gadu atjauno vidēji 1400-1800km elektrolīniju [3].



3.3.att. Tīkla pārvaldības struktūrshēma.

## 3.2. Vidējā sprieguma defektu klasifikācija

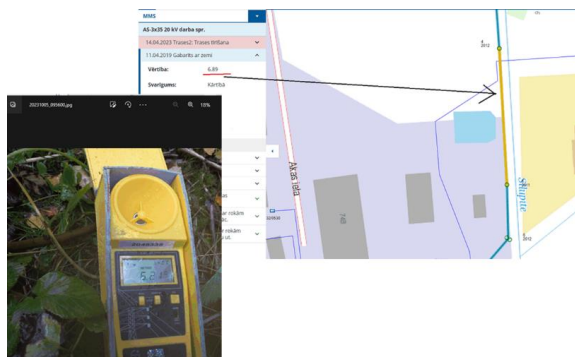
Infrastruktūras defekts ir jebkura infrastruktūras sastāvdaļas vai sistēmas bojājums, kas var ietekmēt tās darbību vai drošību. Tas var ietvert mehāniskus bojājumus, koroziju jeb puvi, nodilumu, kā arī funkcionālus vai operacionālus traucējumus, kas traucē infrastruktūras korektu darbību vai var radīt risku cilvēku drošībai un apkārtējai videi.

Infrastruktūras defekti var būt dažāda veida un ietekmēt elektrotīklus un energoapgādes sistēmu kopumā. Šie defekti var būt rezultāts no dažādiem faktoriem, tostarp dabas katastrofām, vecuma, nelabvēlīgas ārējās vides ietekmes, sliktas apkopes vai nevienmērīgas izmantošanas. AS “Sadales tīkls” regulāri nodrošina savas infrastruktūras defektēšanas (tehniskā stāvokļa izvērtēšanas) procesu, kurā rezultāta preventīvi identificē defektus tīkla elementos (vizuālie defekti) ārējo faktoru ietekmes rezultātā (vētru sekas, dzīvnieku vai citu objektu mehāniskie bojājumi, utt.), ka arī novērtē veģetācijas apjomus infrastruktūras aizsargjoslu zonās, lai preventīvi novērstu bojājumus infrastruktūras elementos un nodrošinātu nepārtrauktību elektroapgādes procesā.

Atbilstoši AS “Sadales tīkls” definētajam defektu katalogam (kopējais iespējamo definēto defektu skaits infrastruktūras komponentēm pārsniedz 200 vērtības), defektus var sadalīt divās grupās:

- Vizuālie defekti – infrastruktūras komponentu vizuālais tehniskā stāvokļa novērtējums, ka arī ar infrastruktūru saistīto aizsargjoslu apstākļu noteikšana (piemēram, citu objektu identifikācija (objektu identifikācija, piemēram - ēkas, ūdenstilpes, dažādu priekšposteņu izvietojums u.c.) aizsargjoslās).
- Ģeotelpiskie mērījumi – ģeotelpisko atkāpju noteikšana, kur ietilpst: minimālās distances no vadiem līdz zemei laidumos (jeb gabarītmerījumi - minimālie attālumi katrā laidumā no zemāka vada līdz zemei – to mēra ar attāluma mērītāju un vērtības ievada UTG lietotnē, kā parādīts 3.4.att.), vadu

izregulēšanas mērījumi (nokares) un vadu izvietojums balstos, balstu izsvēršanas noteikšana, veģetācijas esamības un apjomu noteikšana trašu koridoros.



3.4.att. Gabarītmērījumu veikšanā izmantotā iekārta un faktiskās vērtības ievade UTG.

Tiek izšķirtas sekojošas defektu novēršanas steidzamības (paraugi attēloti 3.5. att.):

- 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 elektrotīklā un tos jānovērš iespējami īsā laikā, Dispečeram izvērtējot operatīvo situāciju, bet maksimālais novēršanas termiņš ir līdz 48 stundām. Operatīvi bīstamo defektu saraksts ir norādīts 3.2. tab.
- 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.

3.2.tabula

Gaisvada līniju operatīvi bīstamo defektu piemēri

| Defekta apraksts                                                           | Defekta piemērs                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 6-20 kV GL izkritis kāsis un draud pieskarties pārējiem līnijas elementiem |  |



| 3.2. tabula (turpinājums)                                                             |                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| GL balsts ir bojāts vai aizlūzis vai karājas vados                                    |     |
| 6-20 kV GL uz strāvvadošām daļām atrodas putnu ligzda, zaru krāvējs                   |    |
| Līnijas gabarīts līdz zemei vai līdz inženierbūvei mazāks par pieļaujamo              |   |
| Redzams bojājums (pārrāvums) sazemējošā vada savienojuma vietā ar zemētāju 6-20 kV GL |  |



3.5.att. Dažādās steidzamības defektu vizuālie piemēri.

### 3.3. Kopsavilkums

Šajā nodaļā tika detalizēti izklāstīta sadales sistēmas operatora infrastruktūras inspekcijas procesa nozīme efektīvai un nepārtrauktai tīkla pārvaldībai. AS “Sadales tīkls” elektroietaišu inspekcijas process ir komplicēts un aptver gan regulārās, plānotās pārbaudes, kas tiek veiktas ar noteiktu periodiskumu katram elektroietaišu tipam, gan ārpuskārtas inspekcijas, kas tiek īstenotas neparedzētu bojājumu vai citu ārkārtas situāciju gadījumos. Promocijas darba ietvaros pētījums ir fokusēts uz virszemes vidējā sprieguma infrastruktūras inspekcijām, tāpēc īpaša uzmanība tiek vērsta vidējā sprieguma tīkla defektiem un to klasifikācijai. Defekti tiek iedalīti divās kategorijās: infrastruktūras mehāniskie bojājumi, kas redzami vizuāli, un ģeotelpiskie mērījumi. Turklāt, tiek novērtēta arī defektu novēršanas steidzamība, ņemot vērā to potenciālo ietekmi uz tīkla drošību un darbības nepārtrauktību. Šāda pieeja ļauj nodrošināt efektīvu infrastruktūras pārvaldību un savlaicīgu defektu novēršanu, tādējādi uzlabojot tīkla uzticamību un drošumu.

Inspekcijas procesa savlaicīga defektu identificēšana ir būtiska, lai preventīvi novērstu elektroenerģijas piegādes pārtraukumus patērētājiem un garantētu drošu vidi sabiedrībai. Tāpēc inspekcijas pilnveidošana ir stratēģiski nozīmīgs solis, kas nodrošina ne tikai tīkla darbības nepārtrauktību, bet arī veicina infrastruktūras ilgtspēju un drošību. Šo procesu pilnveidošana ļauj proaktīvi identificēt potenciālos riskus un savlaicīgi īstenot atbilstošus preventīvus pasākumus, tādējādi samazinot avārijas situāciju un tīkla darbības traucējumu iespējamību.



## 4. ALTERNATĪVĀS METODES DEFEKTU IDENTIFICĒŠANAI

AS “Sadales tīkls” pārvaldībā ir 26798 km garš vidējā sprieguma virszemes tīkls un 28646 km garš zemsprieguma virszemes tīkls (pēc 2022.gada datiem [21]). Esošais inspekcijas process ir pilnībā manuāls process, kur tīkla inspektoriem ir jādodas objektos un manuāli jāapseko visas tīkla komponentes, veicot UTG sistēmā piezīmes par identificētajiem defektiem. Pēc AS “Sadales tīkls” pietuvināta novērtējuma vidējā sprieguma tīkla inspekcijas normētais ātrums ir 1,4 cilvēkstundas/km un zemsprieguma tīkla inspekcijas normētais ātrums ir 3 cilvēkstundas/km. Papildus tīkla inspektoram ir nepieciešams vismaz šāds inventāra komplekts:

- Automašīna - tīkls pārklāj visu Latvijas valsts teritoriju, tāpēc tīkla inspektoriem (visiem) ir nepieciešams auto, lai nokļūtu no reģionālās bāzes līdz objektiem, kas no bāzes var atrasties tai skaitā vairākos simts km attālumā.
- Laiva - plūdu gadījumos, vai piekļuves fiziski apgrūtinātās teritorijās tīkla inspektori (tie, kam atbildībā ir šīs specifiskās teritorijas) infrastruktūras apsekošanām izmanto laivas.
- Kvadricikls - meža teritorijās un zemesgabalos kur aizliegts iebraukt ar auto tīkla inspektori (tie, kam atbildībā ir šīs specifiskās teritorijas) izmanto kvadriciklus.
- Laukdators ar UTG lietotni – tīkla inspektori šobrīd izmanto *Dell latitude 7220* laukdatorus ar uzinstalētu UTG programmatūru, lai no objektiem veiktu atzīmes par konstatētajiem defektiem tīkla elementos.
- Tālmērs lāzera (0,01 m - 100 m) – tīkla inspektori izmanto lai nodrošinātu ģeotelpiskos mērījumus (pārlaiduma distances, attālums līdz objektiem aizsargjoslās).
- Vadu augstuma mērītājs – tīkla inspektori izmanto lai veiktu gabarītmērījumus, kas ir viens no svarīgiem drošības aspektiem, ko regulē LR likumdošana [75].
- Balstu puvuma pakāpes noteikšanas ierīce – tīkla inspektori izmanto, lai maksimāli korekti noteiktu koka balstu puvuma pakāpi, veicot pārbaudes vairākos augstuma līmeņos.

Nemot vērā manuālā inspekcijas procesa izpildi un komplicēto darbinieku ekipējumu, sadales sistēmas operatori atbalsta jaunās tehnoloģijas ieviešanu, izmaiņas metodēs, ar kuru palīdzību būtu iespējams vienkāršot un automatizēt inspekcijas procesa norisi.

### 4.1. Vizuālo defektu noteikšanas metodes

Vizuālais tīkla komponentes tehniskā stāvokļa novērtējums ir viens no defektēšanas sastāvdaļas, kura laikā tiek identificētas jebkādas nevēlamas izmaiņas vai bojājumi infrastruktūras komponentēs. Svarīgākais aspekts vizuālās infrastruktūras apsekošanā ir redzamība, tāpēc esošajā AS “Sadales tīkls” manuālajā inspekcijas procesā bieži

izmanto binokli, lai no zemes labāk ieraudzītu un novērtētu tīkla elementu (fotofiksācija no zemes ir attēlota 4.1. att., kur var redzēt attāluma ierobežojumus balstu konstrukcijas komponentu redzamībai) stāvokli balstos: izolatori, traversas, kāši, āķi, zemējuma vadi un citas komponentes.



4.1.att. Balstu konstrukcija.

Lai veicinātu procesa viedizācību ir vērts izpētīt attēla datu pielietojumu, lai tīkla inspektoriem veiktu apsekošanu, pētot datus (bez izbraucieniem uz objektiem), ka arī pielāgotu datu analīzes tehnoloģijas lai maksimāli vienkāršotu procesa izpildi.

#### 4.1.1. Datu tipi defektu identificēšanai

##### 4.1.1.1. SAR attēli

Sintezētās apertūras radara attēli (*Synthetic Aperture Radar* - SAR) ir attēli, kas iegūti, izmantojot sintētisko atstarošanu tehnoloģiju, SAR attēla paraugs (4.2. att.). SAR ir attēlošanas tehnoloģija, kas ļauj radarā iegūt augstas izšķirtspējas attēlus no zemes virsmas, pat naktī un nepārtrauktās mākoņu klātbūtnē.

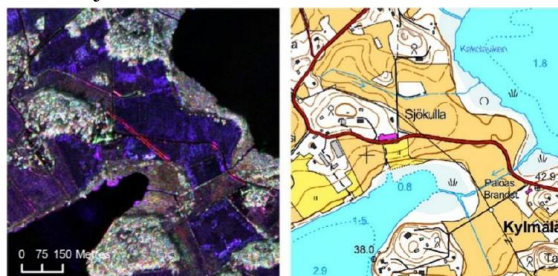
Šīs tehnoloģijas darbības princips ir šāds: radars sūta radioviļņus uz zemes virsmu, un šie viļņi tiek atstaroti atpakaļ uz radara antenu. Tiek reģistrētas atstarotās viļņu īpašības, ieskaitot to fāzes un amplitūdu un tiek veikta attiecīgā signāla apstrāde, lai iegūtu attēlu. Izmaksas par SAR attēliem nosaka vairāki faktori: attēla izšķirtspēja; attēla izmērs; attēla atjaunināšanas biežums; pakalpojuma operatora izvēle. Kopumā SAR attēlu izmaksas ir sākot no 3 EUR līdz 50 EUR par 1 kvadrātkilometru (pakalpojumu operatoru līgumu noteikumos bieži ir sastopams minimālais pasūtījuma apjoms, piemēram 50 km<sup>2</sup>), atkarībā no iepriekš nosauktajiem faktoriem [76]. SAR piedāvā vairākas priekšrocības, kas to padara par piemērotu elektrotīkla vizuālai apsekošanai:

- Nodrošina atbilstošas izšķirtspējas attēlus, kas ļauj identificēt defektus, piemēram, lūzušus elektrotīkla balstus vai veģetācijas un citu objektu esamību trašu koridoros vai aizsargjoslās. Lielākā daļa SAR attēlu no satelīta var iegūt

attēlus ar izšķirtspēju no 1 līdz 13 px/m, ka arī eksistē satelīti, kas var iegūt SAR attēlus ar izšķirtspēju līdz 0.1 px/m.

- Darbojas gan dienas, gan nakts laikā, ka arī bez negatīvām ietekmēm no laikapstākļiem.
- Ļauj veikt apsekošanu lielās platībās izmantojot satelītu.

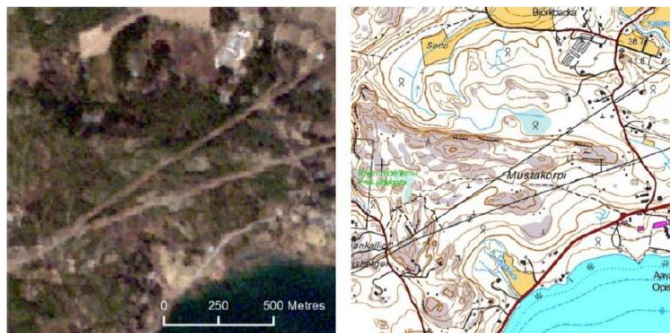
Ir pētīts, ka SAR ir efektīvs veģetācijas kartēšanai un uzraudzībai. Tas ļauj identificēt blīvus krūmus un kokus, kas var apdraudēt elektrotīkla līnijas. SAR var izmantot arī defektu identificēšanai, piemēram, lūzušus balstus vai iegāzušos kokus elektrotīkla līnijās [77, 78]. SAR attēli nodrošina detalizētu informāciju par zemes virsmas ģeometriju un struktūru, kā arī par virsmas materiāla īpašībām. Tie ir noderīgi dažādās nozarēs, ieskaitot vides pētniecību, lauksaimniecību, zemes resursu izmantošanu, katastrofu novēršanu un citus pielietojumus, kur precīza un detalizēta zemes virsmas informācija ir būtiska.



4.2.att. SAR attēla paraugs [77].

#### 4.1.1.2. Optiskie satelīta attēli

Optiskie satelīta attēli, kuru paraugs ir parādīts 4.3. att., ir attēli kas iegūti ar optiskajiem sensoriem, kas uzstādīti uz kosmiskajiem satelītiem, kas uztver dažādu veidu elektromagnētisko viļņu joslas, redzamo gaismu, infrasarkanu un ultravioletu starojumu. Izmaksas par optiskajiem satelīta attēliem nosaka tādi paši faktori kā SAR attēliem. Kopumā optisko satelīta attēlu izmaksas ir sākot no 0 eiro (atvērtie dati) līdz vairākiem simtiem eiro par 1 kvadrātkilometru (pakalpojumu operatoru līgumu noteikumos bieži ir sastopams minimālais pasūtījuma apjoms, piemēram 50 km<sup>2</sup>), atkarībā no iepriekš nosauktajiem faktoriem [79]. Optisko satelīta attēlu zemā izšķirtspēja ir līdz 10 m un komercpiedāvājumos esoša augstāka izšķirtspēja ir 30 cm [80]. Satelīta attēli var būt neefektīvi mākoņainos laikapstākļos un dienas tumšajā laikā, taču tie piedāvā vairākas priekšrocības elektrotīkla defektēšanā. Tie aptver lielas teritorijas, ļauj identificēt dažādus objektus un materiālus. Galvenokārt satelīta attēli tiek izmantoti veģetācijas monitoringam elektrotīkla aizsargjoslā. Vienu no pielietojuma piemēriem var minēt Lielbritānijas elektroenerģijas un dabasgāzes uzņēmumu “National Grid”, kas izmanto optiskos satelīta attēlus veģetācijas pārvaldībai [81]. Optiskie satelīta attēlus iespējams izmantot tehniskās infrastruktūras defektu identifikācijai, piemēram, bojātu vai lūzušu balstu noteikšanai elektropārvades līnijās [77], ka arī iegāzušos koku detektēšanai elektrolīniju trasēs [78].

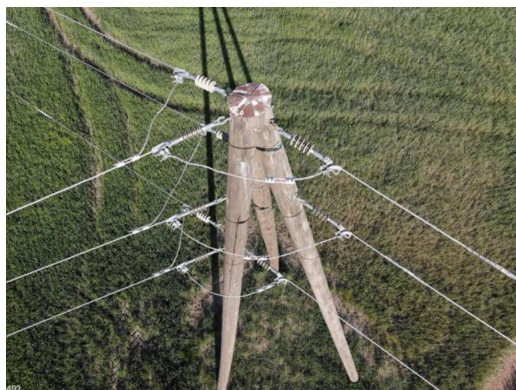


4.3.att. Optiskā satelīta attēla paraugs [77].

Optiskie satelīta attēli piedāvā detalizētu un plašu informāciju par Zemes virsmu, un tas ir svarīgs instruments daudzās zinātniskās, komerciālās un valsts nozarēs, tādās kā kartogrāfija, zemes pārvaldība, vides pētniecībā, pilsētu plānošana un infrastruktūras attīstība, kur dati varētu palīdzēt novērtēt infrastruktūras izvietojumu un izstrādāt attīstības stratēģijas.

#### 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, 4.4. att. ir demonstrēts aerofoto attēla paraugs, kur redzama balstu konstrukcija no augšas. Tie nodrošina detalizētu un precīzu informāciju - visbiežāk sastopamā izšķirtspēja aerofoto ir sākot no 0.1 m/px līdz 0.001 m/px, kas varētu nodrošināt redzamību infrastruktūras defektiem. Aerofoto izmaksas var ievērojami atšķirties atkarībā no vairākiem faktoriem: attēla izšķirtspēja, izvēlētais datu vākšanas transportlīdzeklis, lidojuma augstums utt. Ka arī *RGB* (*Red, Green, Blue*) krāsu modelis nodrošina lielu krāsu reprodukcijas elastību.

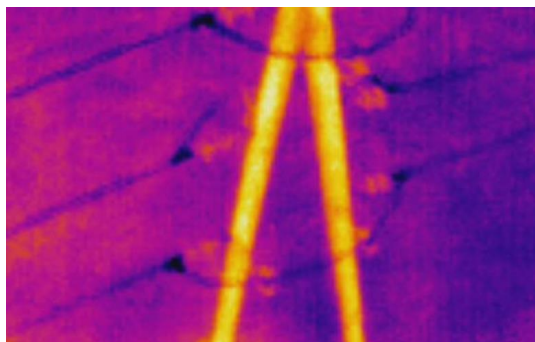


4.4.att. Aerofoto attēla paraugs.

*RGB* attēli piedāvā vairākas priekšrocības un pielietojumus elektrotīkla infrastruktūras defektēšanā. Pastāv iespēja pielāgot dažādām vajadzībām un iegūt augstas izšķirtspējas attēlus, lai identificētu dažādus objektus un materiālus. Aerofoto tiek izmantoti veģetācijas monitoringam un elektrotīkla elementu bojājumu identificēšanai [77, 78].

#### **4.1.1.4. Termiskie attēli**

Termiskie attēli ir attēli, kas iegūti, mērot objektu vai apkārtējās vides temperatūru un attēlojot tos kā krāsu karte, kurā atšķirami temperatūras veidi, to vizualizācijas paraugs ir demonstrēts 4.5. att. Šie attēli izmanto termiskās kameras vai infrasarkanā (IR – infrared) 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 noteikt to temperatūru un analizēt un identificēt atkāpes no normas. Termiskie attēli ir vērtīgi dati, kurus var izmantot elektrotīkla defektēšanā tādos objektos kā apakšstacijās, transformatoros, kur siltuma izmaiņas signalizē par iespējamo defektu [77, 78], taču līniju infrastruktūrai (posmos kur nav aktīvu iekārtu) temperatūras izmaiņas grūti identificēt, jo tie nenorāda uz kādiem mehāniskajiem bojājumiem. Termogrāfijas kameru izšķirtspēja var būt no 0.025 līdz 0.05 m/px, bet izšķirtspēja nav vienīgais faktors, kas ietekmē attēla kvalitāti. Svarīgi parametri ir termogrāfijas kameras jutība, objektīva kvalitāte un attēla apstrādes algoritmi.



4.5. att. Termisko attēlu paraugs.

#### **4.1.1.5. Ultravioletie attēli**

Ultravioletie (UV) attēli ir attēli, kas iegūti, izmantojot UV starojumu. Šie attēli tiek uzņemti ar speciāliem fotoaparātiem vai kamerām, kas spēj uztvert ultravioletā starojuma spektru, ko cilvēka acs parasti nespēj redzēt. Ultravioletā starojuma spektrs ir ļoti plašs un aptver dažādas frekvences un viļņu garumus, no kuriem daži ir redzami, bet citi nav redzami cilvēka acīm. UV attēlu uzņemšanai ir divas galvenās metodes:

atstarotā UV un fluorescences UV. Atstarotā UV metode izmanto UV gaismu, kas tiek atstarota no objektiem. Fluorescences UV metode izmanto UV gaismu, lai iniciētu fluorescences procesu objektiem, tādējādi tie pēc starojuma absorbēšanas izstaro gaismu. UV attēlu datus ir iespēja izmantot, lai identificētu korona izlādes kā to var redzēt 4.6. att, kas ir nevēlamas elektrības plūsmas, jo var izraisīt elektrotīkla līniju defektus un enerģijas zudumus [82]. UV kameru izšķirtspēja var būt no 0.025 līdz 0.05 m/px



4.6.att. UV attēla paraugs, korona izlāde [82].

#### 4.1.1.6. Datu tipu salīdzinājums

Atbilstoši apkopotam salīdzinājumam (4.1. tab.) par datu izmantošanu elektropārvades elektropārvades virszemes infrastruktūras vizuālā novērtējuma vajadzībām vispiemērotākais datu avots ir optiskie aerofoto attēli – *RGB* dati (*RGB* krāsu modelis). Optisko aerofoto datu izmantošana nodrošina augstas izšķirtspējas attēlus, kas ļauj detalizēti pētīt un identificēt infrastruktūras elementus, pateicoties krāsainajiem attēliem ir viegli identificēt tīkla komponentes un veikt precīzus novērojumus dabas un cilvēka radītajās izmaiņās. Datu kopas iegūšana varētu būt ātra (atkarībā no izvēlēta datu iegūšanas transporta) un var tikt veikta regulāri, nodrošinot aktuālu informāciju par apskatāmo teritoriju. Kopumā optisko aerofoto datu izmantošana nodrošina plašas iespējas, bet tai ir jāņem vērā arī minētie (4.1. tab.) ierobežojumi.

Datu avoti vizuālo defektu noteikšanas metodēm

| Datu veids             | Priekšrocības                                                                                                                                                                                                                                                      | Ierobežojumi                                                                                                                                                  | Potenciālais pielietojums infrastruktūras defektēšanas procesā                         |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| SAR dati               | Izmanto radioviļņu starojumu. Nav ietekmes no laika apstākļiem. Dienas un nakts darbība. Iespējama augsta izšķirtspēja (atkarībā no budžeta).                                                                                                                      | Ierobežots krāsu izšķirtspēja. Kopleicēti interpretējami (prasa specifiskas zināšanas par radaru un attēla radīšanas procesu). Salīdzinoši liels datu apjoms. | Veģetācijas monitorings. Pēc vētru 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. <b>Infrastruktūras elementu vizuālā stāvokļa novērtējums.</b> |
| 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 joslu datiem, tādējādi ļaujot identificēt un analizēt objektus un defektus, kas citādi būtu neredzami. | Datu apstrādes sarežģītība (prasa specifiskas zināšanas). Apgaismojuma un laika ierobežojumi: mākoņi, putekļi, gaisa piesārņojums.                            | Elektropārvades tīkla elementu novērtējums (korozija, korona izlādes).                 |

#### 4.1.2. Optisko aerofotoattēlu iegūšanas ierīces

Optiskie aerofoto ir vispiemērotākā datu kopa, lai veiktu vizuālo tehnisko novērtējumu tīkla infrastruktūras komponentēm. Lai iegūtu RGB attēlu kopu ir nepieciešams izvēlēties atbilstošo ierīci – optisko kameru, kas spēj uztvert attēlus, izmantojot trīs pamatkrāsas - sarkano (*Red*), zaļu (*Green*) un zilu (*Blue*) un optiskus elementus, piemēram, lēcas un objektīvus, lai fokusētu gaismu un veidotu attēlu uz sensora vai filmas. izmanto daudzos ierīcēs, tostarp mobilajos telefonos, digitālajās kamerās, webkamerās un videokamerās, tās spēj nodrošināt labu krāsu atbilstību un kvalitāti.

Ņemot vērā faktu, ka attēlu kopu ir jāuzņem kustībā (uzņemot attēlus no gaisa vai zemes, piemēram apsekojot infrastruktūru ar bezpilota gaisa kuģu (dronu) palīdzību, piemēri ar iebūvētām kamerām parādīti 4.7. att.), tad kameras neatņemamai sastāvdaļai



ir jābūt Gimbal. Gimbal ir mehānisms, kas nodrošina stabilizāciju kamerai, saglabājot tās orientāciju nemainīgu pat tad, ja apkārtējās vides apstākļi mainās vai kameras operators veic kustības. Tas sastāv no vairākām rotējošām asīm, kas ļauj kameras iekārtai brīvi kustēties ap visiem trim griezumiem.



4.7.att. Bezpilota gaisa kuģu piemēri (*DJI Mavic 2 Pro*, *DJI Mavic 3 Pro*, *DJI Mini 4 Pro*) ar iebūvētām optiskajām RGB kamerām.

4.2. tab. ir parādīts vairāku iebūvēto bezpilota gaisa kuģos optisko kameru salīdzinājums, kas sniedz informāciju par šo kameru spējām un īpašībām, pēc kurām ir iespēja izvēlēties kameru, kas vislabāk atbilst konkrētajām vajadzībām un uzdevumiem.

4.2.tabula

Gimbal un kameras salīdzinājums

| Parametrs                                                                                                                        | DJI Mavic 2 Pro [83]                                                                  | DJI Mavic 3 Pro [84]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | DJI Mini 4 Pro [85]                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Gimbal mehāniskais diapazons:<br><i>Tilt</i> - leņķa maiņa;<br><i>Roll</i> – griešana;<br><i>Pan</i> – horizontālā pārvietošana. | Tilt: -135° to 100°<br>Roll: -45° to 45°<br>Pan: -100° to 100°                        | Tilt: -140° to 50°<br>Roll: -50° to 50°<br>Pan: -23° to 23°                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Tilt: -135° to 80°<br>Roll: -135° to 45°<br>Pan: -30° to 30°                       |
| Gimbal vadāmais diapazons:<br><i>Tilt</i> - leņķa maiņa;<br><i>Pan</i> – horizontālā pārvietošana.                               | Tilt: -90° to 30°<br>Pan: -75° to 75°                                                 | Tilt: -90° to 35°<br>Pan: -5° to 5°                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Tilt: -90° to 60°<br>Roll: -90° or 0°                                              |
| Kameras objektīvs:<br><i>FOV</i> ( <i>Field of View</i> ) – skata lauks.                                                         | FOV: 77°<br>Formāta ekvivalents:<br>28 mm<br>Apertūra: f/2.8-f/11<br>Fokuss: 1 m to ∞ | <i>Hasselblad</i> kamera:<br>FOV: 84°<br>Formāta ekvivalents:<br>24 mm<br>Apertūra: f/2.8-f/11<br>Fokuss: 1 m to ∞<br><br><i>Medium Tele</i> kamera:<br>FOV: 35°<br>Formāta ekvivalents:<br>70 mm<br>Apertūra: f/2.8<br>Fokuss: 3 m to ∞<br><br><i>Tele</i> kamera:<br>FOV: 15°<br>Formāta ekvivalents:<br>166 mm<br>Apertūra: f/3.4<br>Fokuss: 3 m to ∞ | FOV: 82.1°<br>Formāta ekvivalents:<br>24 mm<br>Apertūra: f/1.7<br>Fokuss: 1 m to ∞ |



| 4.2. tabula (turpinājums)                           |                                                         |                                                                                                                                                                                                                            |                                              |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Kameras ISO diapazons                               | 100-3200 ( <i>Auto</i> )<br>100-12800 ( <i>Manual</i> ) | 100-6400                                                                                                                                                                                                                   | 12 MP: 100-6400<br>48 MP: 100-3200           |
| Kameras sensora izmērs                              | 1-inch CMOS,<br>Efektīvie pikseļi: 20 MP                | <i>Hasselblad</i> kamera:<br>4/3 CMOS, Efektīvie pikseļi: 20 MP<br><br><i>Medium Tele</i> kamera:<br>1/1.3-inch CMOS,<br>Efektīvie pikseļi: 48 MP<br><br><i>Tele</i> kamera:<br>1/2-inch CMOS,<br>Efektīvie pikseļi: 12 MP | 1/1.3-inch CMOS,<br>Efektīvie pikseļi: 48 MP |
| Maksimālā kameras izšķirtspēja                      | 5427×3648                                               | <i>Hasselblad</i> kamera:<br>5280×3956<br><br><i>Medium Tele</i> kamera:<br>8064×6048<br><br><i>Tele</i> kamera:<br>4000×3000                                                                                              | 8064×6048                                    |
| Kameras slēdža ātrums                               | 8-1/8000 s                                              | <i>Hasselblad</i> kamera:<br>8-1/8000 s<br><br><i>Medium Tele</i> kamera:<br>2-1/8000 s<br><br><i>Tele</i> kamera:<br>2-1/8000 s                                                                                           | 12MP: 1/16000-2 s<br>48MP: 1/8000-2 s        |
| Kameras optiskā tālummaiņa ( <i>Digital Zoom</i> )? | Nav                                                     | <i>Hasselblad</i> kamera: 1-3×<br><br><i>Medium Tele</i> kamera: 3-7×<br><br><i>Tele</i> kamera: 7-28×                                                                                                                     | 12MP: 1-3x<br><br>4K: 1-3x<br><br>FHD: 1-4x  |
| Kameras foto formāts                                | JPEG/DNG (RAW)                                          | JPEG/DNG (RAW)                                                                                                                                                                                                             | JPEG/DNG (RAW)                               |

Kameras tehnisko parametru noteikšana ir ietekmējošākais kritērijs vēlama datu kvalitātes sasniegšanā, tomēr negarantē augstās kvalitātes *RGB* datu kopas iegūšanu, jo papildus attēlu kvalitāti ietekmē arī tādi faktori, kā datu vākšanas ātrums un attālums līdz objektiem, klimatiskie apstākļi.

#### 4.1.3. Transportlīdzekļu veidi optisko aerofotoattēlu datu vākšanai

Optisko aerofoto datu vākšanai tiek izmantoti speciāli pielāgoti lidaparāti, kas aprīkoti ar attiecīgo sensoru un kameras sistēmu. Šie lidaparāti ir paredzēti, lai veiktu

precīzus un sistemātiskus lidojumus virs interesējošās teritorijas, lai iegūtu *RGB* attēlus ar augstu izšķirtspēju un precizitāti. 4.3. tab. ir apkopoti vairāki datu vākšanas transporta veidi, ka arī to priekšrocības un ierobežojumi.

4.3.tabula

Datu vākšanas transportlīdzekļu salīdzinājums inspekcijas procesa vajadzībām

| Datu vākšanas transportlīdzeklis   | Priekšrocības                                                                                                                                                                                                                                      | Ierobežojumi                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Manuāla metode (cilvēkresurss)     | Attālums no infrastruktūras.<br>Elastība datu vākšanā (pielāgo situācijai dabā, mainīt datu vākšanas leņķi, apjomus).                                                                                                                              | Apgrūtinātā piekļuve meža, purvu teritorijās.<br>Ierobežots ātrums (līdz 6km/dienā).<br>Kravnesība (nav iespējas paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus).<br>Drošības risks personālam. |
| Robots                             | Attālums no infrastruktūras.<br>Ir iespēja automatizēt misijas maršrutu.                                                                                                                                                                           | Ierobežots ātrums (līdz 6km/dienā).<br>Apgrūtināta caurstaigamība meža, purvu teritorijās (šķēršļu pārvarēšana ).<br>Elektronikas un sensoru jutīgums (ietekme no elektrotīkla magnētiskā laukuma)         |
| Bezpilota gaisa kuģis (drons)      | Attālums no infrastruktūras.<br>Ātrums (līdz 30km/dienā).<br>Ir iespēja automatizēt misijas maršrutu.<br>Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus).<br>Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām. | Regulācijas ierobežojumi lidojumiem tikai redzamības zonā.                                                                                                                                                 |
| Pilotēts gaisa kuģis (helikopters) | Ātrums (līdz 200km/dienā).<br>Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus).<br>Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.                                                                            | Attālums no infrastruktūras ( $\pm 150m$ ).                                                                                                                                                                |
| Satelīts                           | Ātrums (momentāni).<br>Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.                                                                                                                                                                         | Attālums no infrastruktūras.<br>Nav elastības datu vākšanā (tikai optiskie un radar dati).                                                                                                                 |

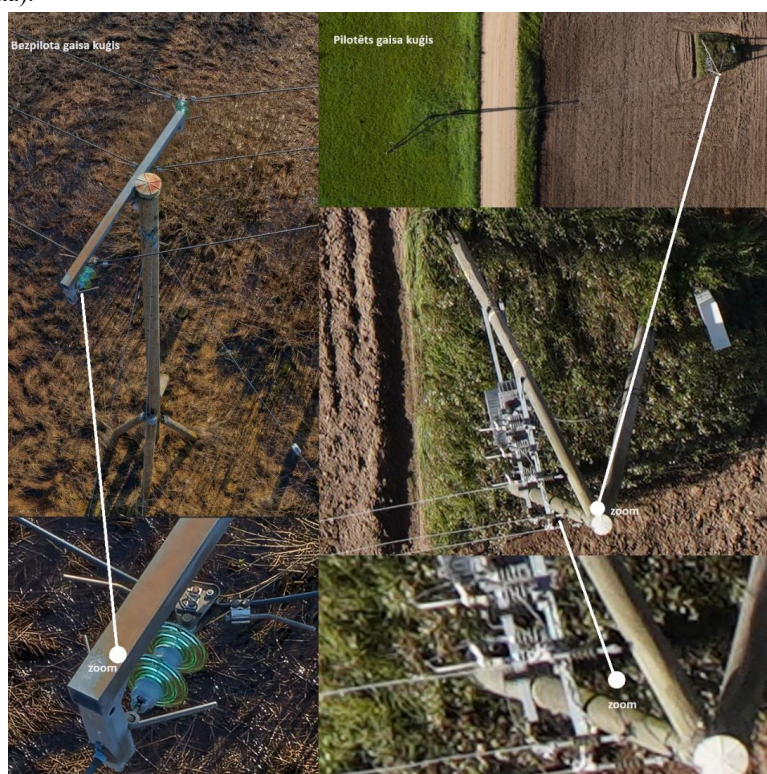
Papildus transporta veida tehniskajām priekšrocībām un ierobežojumiem, datu vākšanas transporta izvēle ir atkarīga no daudziem parametriem, tostarp:

- Operativitāte – jādefinē vai dati ir nepieciešami akūti vai plānveidīgi noteikta perioda garumā.
- Datu apjomi – masveida infrastruktūras apskatei jāizmanto ātrdarbīgos transporta veidus, lokālajām apskatēm ātrums nedod ietekmi.
- Attālums no infrastruktūras – jādefinē infrastruktūras apskates detalizāciju.
- Izmaksas – budžets apjoms viennozīmīgi ietekmēs transporta veida izvēli, tas noteikti jāvērtē kopā ar efektivitātes aspektiem (apjomi, kvalitāte, ātrums).
- Nākotnes perspektīvas – pastāv iespēja, ka transporta veida izvēle ir atkarīga no nākotnes perspektīvām un attīstības virzieniem. Iespējams ir vērts ieguldīt tehnoloģijās, kas nākotnē piedāvās papildu priekšrocības.



4.8.att. Infrastruktūras datu vākšanas transporta veidu piemēri.

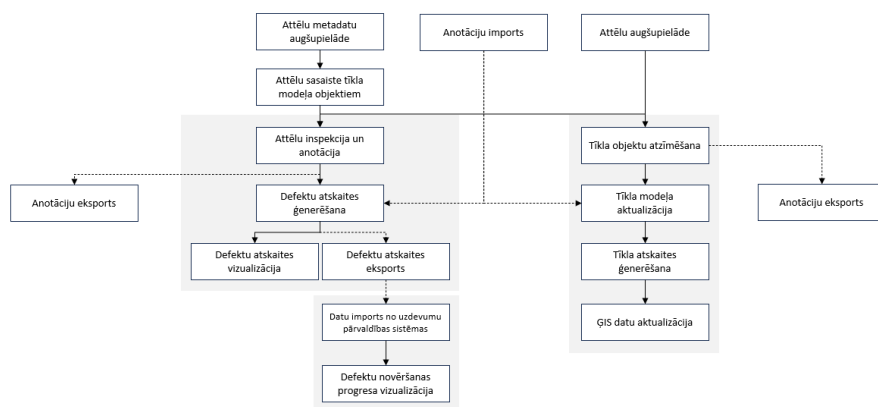
Izvēloties datu vākšanas transportu (daži piemēri ir attēloti 4.8. att.) ir jāpielāgo atbilstošu kameru (kameru parametri ir aprakstīti sadaļā "4.1.2. Optisko aerofotoattēlu iegūšanas ierīces"), lai sasniegu uzstādīto mērķi, tas jāskatās kompleksā, jo kvalitātes ietekmi dod katra no apskates sistēmas komponentēm. Vizuālais piemērs parādīts 4.9. att., kā var atšķirties rezultāta kvalitāte izvēloties dažādas datu vākšanas transporta metodes, bet nemainot kameras veidu. Kā redzams pietuvinot *RGB* attēlu tīkla infrastruktūras komponentes redzamība var būtiski atšķirties – 4.9. att. redzams, ka no datiem, kas savākti ar bezpilota gaisa kuģi var novērtēt izolatora (kā infrastruktūras elementa) vizuālo tehnisko stāvokli, atšķirībā no datiem, kurus vāca helikopters – minētajā piemērā uz kvalitāti ietekmēja datu vākšanas augstums (kameras attālums no objekta).



4.9.att. Datu atšķirību salīdzinājuma vizualizācija, izmantojot dažādus transporta veidus.

#### 4.1.4. Datu analīze vizuālo defektu noteikšanai

Optisko aerofoto datu apstrāde ir process, kurā tiek apstrādāti un analizēti attēli, kas iegūti no gaisa līdzekļiem, izmantojot optisko sensoru sistēmas. Optisko aerofoto datu apstrādes procesa shēma elektrotīkla infrastruktūras inspekcijas vajadzībām ir vizualizēta (4.10. att.). Elektrotīkla inspekcijas procesa nepieciešamība ir maksimāli automatizēti identificēt vizuāli redzamos defektus infrastruktūras elementos, izmantojot attēlu (optisko aerofoto datu kopa) apstrādi. No attēlu apstrādes procesa shēmas (4.10. att.) ir redzams, ka apstrādi un defektu identificēšanu jārealizē savienojot attēlus, to metadatu ar GIS aktīvu datiem, nepārtraukti papildinot ar jau esošajiem rezultātiem un aktualizējot esošo informāciju ar augstākās kvalitātes datiem.



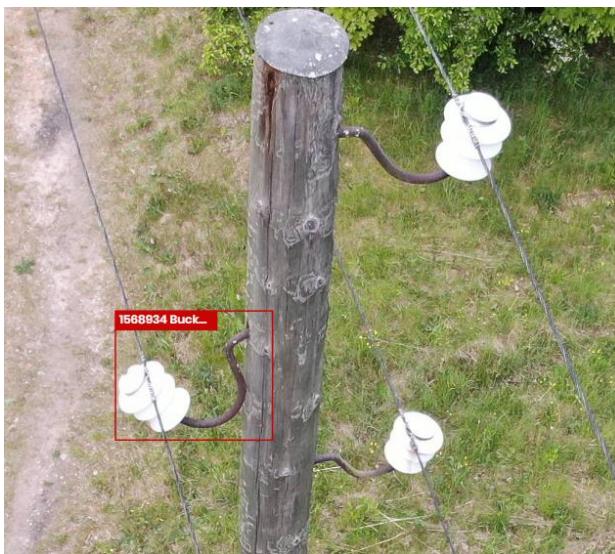
4.10.att. Potenciālā attēlu datu analīzes darbplūsma.

Efektīvākais veids infrastruktūras defektu identifikācijai ir automatizēts process, pielietojot mašīnmācīšanās (Machine Learning – ML) algoritmu modeļus, šobrīd izplatīti pielieto šādus AI objektu atpazīšanas modeļus:

- *YOLOv4* (angļu val. *you only look once v4*) ir objektu atpazīšanas modelis, kas ir apmācīts ar lielu attēlu un marķējumu datu kopu, kas spēj identificēt dažāda veida objektus attēlos [86]. Darbojas pielietojot vienkāršu un efektīvu pieeju elementu atpazīšanā, sadalot attēlu pikseļu režģos un katram režģim piešķirot objektu klasifikāciju un kontūras. Elektrotīkla infrastruktūras elementos var identificēt vizuālos defektus, tādus kā plaisas balstu konstrukcijās, mehāniski bojātus izolatorus;
- *Faster R-CNN* (angļu val. *region-based convolutional neural network*) ir objektu atpazīšanas modelis, kas spēj identificēt objektus un kontūras attēlos [87]. Darbojas pielietojot divas darbības. Pirmajā darbībā tiek identificēti iespējamie objektu kandidāti. Otrajā darbībā tiek precizētas objektu kontūras. Modelis piemērots mazu vai grūti saskatāmu objektu atpazīšanai attēlā. Elektrotīkla infrastruktūras elementos var identificēt vizuālos defektus, tādus kā plaisas balstu konstrukcijās, mehāniski bojātus izolatorus;

- *Mask R-CNN* (angļu val. *region-based convolutional neural network with mask*) ir objektu atpazīšanas modelis, kas spēj identificēt objektus un kontūras attēlos [88]. Darbojas izmantojot trīs darbības. Pirmajā darbībā tiek identificēti iespējamie objektu kandidāti. Otrajā darbībā tiek precizētās objektu kontūras. Trešajā darbībā tiek identificētas objektu maskas (objekta kontūras, kas ir ar vienu krāsu). Modelis piemērots identificēt objektus attēlā, kas ir neregulāras formas. Elektrotīkla infrastruktūras elementos var identificēt vizuālos defektus, tādus kā plaisas balstu konstrukcijās, mehāniski bojātus izolatorus.

Zinot faktu, ka infrastruktūras specifikai katram sadales operatoram ir savas atšķirības (stratēģijas, tehniskās politikas un klimata ietekmes rezultātā), ir svarīgi veidot un uzturēt noteiktās infrastruktūras un defektu anotāciju kolekciju – apkopotu informāciju par defektiem sistēmā, kas ietver detalizētu informāciju par atklātajiem defektiem (defekta anotācijas piemērs ir parādīts 4.11. att.), lai būtu iespēja nepārtraukti aktualizēt datus, uzlabotu programmēšanas procesu, paaugstinot automatizētas identificēšanas rezultātu kvalitāti.



4.11.att. Defekta anotācijas piemērs.

Aprakstītā veidā attēlu datu kopas apstrāde var izmantot defektēšanas procesā, lai operatīvi un efektīvi identificētu vizuālos defektus (jebkādas neregulāras formas vai struktūras, kas varētu norādīt uz defektiem vai problēmām) vai potenciālos riskus infrastruktūras elementos. Šāda metode varētu palīdzēt uzlabot defektēšanas procesa efektivitāti un samazināt nepieciešamo cilvēkresursu skaitu defektu identifikācijas procesā.

## 4.2. Ģeotelpisko defektu noteikšanas metodes



Otrā inspekcijas komponente, ne mazāk svarīgā kā vizuālais tīkla komponentes tehniskā stāvokļa novērtējums, ir infrastruktūras ģeotelpiskie mērījumi, kas ir kritiski, lai nodrošinātu drošības aspektus sabiedrībai, piemēram pārliecināties par gabarītmērījumiem (distances no vadiem līdz zemei, distances starp vadiem, ka arī balstu konstrukciju izsvēršanas (piemērs parādīts 4.12. att.).



4.12.att. Balstu izsvēršanas piemērs ārpus līnijas ass.

Mērījumu precizitāte ir ietekmējošākais faktors, lai sasniegtu vēlamu rezultātu. Šobrīd visus mērījumus AS “Sadales tīkls” veic manuālajā režīmā, izmantojot cilvēkresursu un kalibrētas mēriekārtas (tas arī ir laikietilpīgs process, jo mērījumi jāveic katrā vada laidumā, kas sastāda 60-70m intervālu) – tādā veidā (parādīts 4.13.att., ka distance no vada līdz zemei ir 5.42m, bet pieļaujamā minimālā distance ir 6m) identificē atkāpes no noteiktajām tehniskajos standartos pieļaujamam vērtībām.



4.13.att. Gabarītu mērījuma piemērs.

Veģetācijas esamība infrastruktūras aizsargjoslās un trasēs arī ir ģeotelpiskie defekti (viens no piemēriem ir parādīts 4.14. att.), kurus atbilstoši jāidentificē, jo savādāk ja elektrolīnijās trasēs aug koki un/vai krūmi, kas var apdraudēt drošu elektroenerģijas

piegādi, sabiedrības drošību un ierobežot iespēju operatīvi novērst elektrotīkla bojājumus.



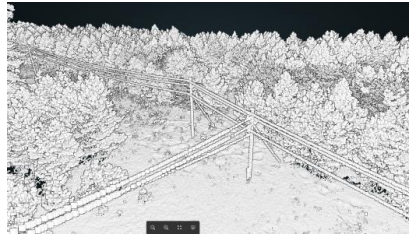
4.14.att. Veģetācijas defekta piemērs elektrotīkla aizsargjoslā.

Ģeotelpisko defektu noteikšana reālajā vidē ir apgrūtināta ar vairākiem izaicinājumiem: laika apstākļi, piekļuves ierobežojumi (purvs, privātīpašuma teritorijas, mežs), ka arī subjektīvi pieņemtie lēmumi par mērījumu nepieciešamību noteiktajos punktos. Lai veicinātu mērījumu izpildes procesa atvieglošanu un automatizāciju, ir vērts novērtēt 3D infrastruktūras datu modeļa pielietojumu.

3D modelēšana ir objekta trīsdimensiju modeļa izveide, vai tā saucamais reālā objekta digitālais dvīnis (fiziska objekta spoguļattēls). Izmantojot virtuālo digitālo dvīni pastāv iespēja uzraudzīt, prognozēt un kontrolēt objektu stāvokli un uzvedību reālajā dzīvē [89].

#### **4.2.1. Datu tipi ģeotelpisko mērījumu īstenošanai**

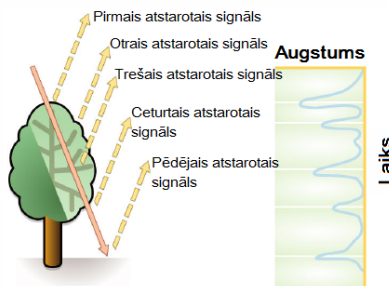
Punktu mākonis ir datu punktu kopums telpā. Tas ir datu punktu kopums (katrs punkts attēlo konkrēto datu vienību telpā, ka arī tiek izmantoti dažādi atribūti, piemēram, krāsas, izmēri vai simboli, lai parādītu papildu informāciju par katru punktu), ko nosaka noteikta koordinātu sistēma. 3D koordinātu sistēmā punktu mākonis var noteikt kādas reālas vai izveidotas fiziskas sistēmas formu. Punktu mākoņi tiek izmantoti, lai izveidotu 3D sietus un citus modeļus, ko izmanto 3D modelēšanā. Punktu mākoņus var iegūt izmantojot 3D skenerus, kas mēra daudzus punktus uz apkārtējo objektu ārējām virsmām (punktu mākoņa datu vizualizācijas paraugs ir parādīts 4.15. att., kurā atspoguļots elektrolīnijas fragments).



4.15.att. Punktu mākoņa paraugs.

Punktu mākoņi pārvērš objektu 3D modelī. Viens no nozīmīgākajiem punktu mākoņu lietojumiem ir digitālo dvīņu izstrāde no *LIDAR* punktu mākoņiem.

*LIDAR*a izstarotie lāzera impulsi tiek atspoguļoti gan no objektiem, kas atrodas uz zemes virsmas, gan no objektiem, kas atrodas virs zemes: no veģetācijas, ēkām, tiltiem utt. Vienu lāzera impulsu var atstarot un atgriezt sensorā vienu vai vairākas reizes, 4.16. att. ir sniegts piemērs ar piecām impulsa atstarošanas reizēm. Jebkurš lāzera impulss, virzoties uz zemes virsmu, tiek pakļauts vairākiem atspīdumiem, sadaloties tik daļās, no cik virsmām tas tiek atstarots. Pirmais atstarotais signāls ir visievērojamākais un atbildīs ainavas augstākajam objektam, piemēram, koka galotnei vai ēkas jumtam. Pirmais atstarotais signāls var atbilst arī zemes virsmai. Šajā gadījumā *LIDAR*s uztvers tikai vienu atspulgu. Lai iegūtu vairāku objektu augstumus lāzera impulsa ceļā, tiek izmantots liels atstaroto signālu skaits. Atspīdumi no “spektra” vidus parasti atbilst veģetācijai, un pēdējais atstarojums tiek izmantots zemes virsmas modelēšanai. Tomēr pēdējais atstarojums ne vienmēr atbilstīs zemei. Piemēram, kad impulss skar resnu zaru un nesasniedz zemes virsmu. Šajā gadījumā pēdējais atstarojums nāks nevis no zemes, bet gan no zara.



4.16.att. *LIDAR*a lāzera impulsa atstarošanās.

Papildus pozicionālajām vērtībām  $x$ ,  $y$  un  $z$  sistēma saglabā arī papildu informāciju. Katram lāzera impulsam tiek reģistrēti un saglabāti šādi atribūti: intensitāte, atstarošanas skaits, atgriešanās reižu skaits, punktu klasifikācijas vērtības, lidojuma līnijas galapunkti, *RGB* vērtības, GPS laiks, skenēšanas leņķis un virziens. 9.tabulā ir aprakstīti atribūti, ko ir iespējams iegūt katram punktam.



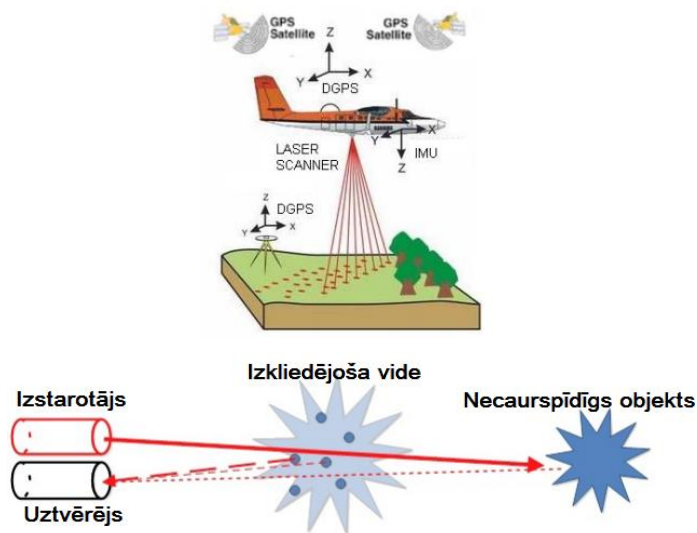
## Atribūtu saraksts punktam

| Lidara atribūts          | Apraksts                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Intensitāte              | Lāzera impulsa atstarošanas stiprums, kas atbilst <i>LIDARa</i> punktam.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Atstarota signāla numurs | Izstarotais lāzera impulss var radīt līdz pieciem atstarotiem signāliem atkarībā no objektiem, no kuriem tas tiek atstarots, un lāzerskenera iespējām. Pirmais atgrieztais impulss tiks apzīmēts kā atstarošanas signāls numurs viens, otrais kā numurs divi un tā tālāk.                                                                                    |
| Atstaroto signālu skaits | Atstaroto signālu skaits ir kopējais atstarošanas skaits konkrētam impulsam. Piemēram, lāzera datu punkts var būt otrais no pieciem atstarotiem signāliem.                                                                                                                                                                                                   |
| Punktu klasifikācija     | Katrs tālāk apstrādātais <i>LIDARa</i> punkts var saturēt klasifikācijas vērtību, kas nosaka objekta veidu, kas atspoguļoja lāzera impulsu. <i>LIDARa</i> punktus var iedalīt vairākās kategorijās, ieskaitot zemes virsmu, meža lapotnes augšējo robežu un ūdens virsmu. Klasēm tiek piešķirtas veselu skaitļu koda vērtības, kas tiek glabātas LAS failos. |
| Lidojuma līnijas riba    | Punkti tiek parādīti atkarībā no vērtības, kas ir 0 vai 1. Punktiem uz lidojuma līnijas ir vērtība, kas vienāda ar 1, pārējiem - vienāda ar 0.                                                                                                                                                                                                               |
| RGB                      | Pastāv iespēja <i>LIDARa</i> datiem piešķirt RGB atribūtu. Šī atribūta informācija bieži tiek iegūta no attēliem, kas tiek uzņemti vienlaikus ar lāzera attēlveidošanu.                                                                                                                                                                                      |
| GPS laiks                | GPS laiks, kas atbilst impulsa izstarošanas brīdim. Laika vērtība atbilst nedēļā pagājušo sekunžu skaitam.                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Skenēšanas leņķis        | Skenēšanas leņķis ir vērtība grādos no -90 līdz +90. Pie 0 grādiem lāzera impulss tiek izstarots perpendikulāri un tiek fiksēts zemākais punkts. Pie -90 grādu vērtības lāzers izstaro impulsus pa kreisi, bet pie +90 - pa labi no lidmašīnas lidojuma virzienā. Lielākā daļa lāzerskenēšanas sistēmu darbojas diapazonā no -30 līdz +30 grādiem.           |
| Skenēšanas virziens      | Skenēšanas virziens ir virziens, kādā kustas skenēšanas sistēmas spogulis, kad sistēma izstaro lāzera signālu. Vērtība 1 atbilst pozitīvam skenēšanas virzienam, un vērtība 0 atbilst negatīvai skenēšanai. Pozitīvs virziens nozīmē, ka skeneris virzās no kreisās uz labo pusi lidojuma virzienā, bet negatīvs virziens nozīmē pretējo.                    |

Apstrādātos telpiski organizētos lāzermērīšanas datus sauc par punktu mākonī. Avota punktu mākoņi ir apjomīgas punktu kopas ar x, y, z vērtībām, kā arī papildu atribūtiem.

## 4.2.2. LIDAR sensors

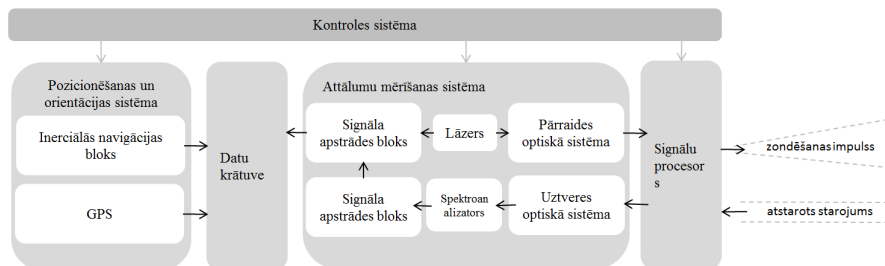
*LIDAR (Light Detection and Ranging)* sistēmas darbojas, nosūtot gaismas impulsu uz mērķi un mērot laiku, kas paiet, līdz signāls tiek atspoguļots atpakaļ uz *LIDAR* sensoru. Pamatojoties uz šo laika starpību un gaismas ātrumu, var noteikt attālumu līdz objektam.



4.17.att. *LIDAR* sistēmas darbības princips [90].

- Optiskais diapazons ( $\lambda \leq 1.5 \text{ mkm}$ );
- Stārojuma avots - lāzers.

*LIDAR* sistēma darbības princips ir parādīts 4.17.att. un sistēmas komponentes 4.18.att. - lāzera starojums tiek novirzīts uz objektu, atspoguļots no objekta un atgriezts atpakaļ uz *LIDAR*. Pēc tam *LIDAR* ierīce nosaka attālumu līdz objektam. Ar 360° skata leņķi (piemēram, *LIDAR* ar rotējošu spoguļi) var iegūt apkārtējās vides punktu mākonī. Šai tehnoloģijai ir liela priekšrocība - augsta noteikšanas precizitāte (vairāki centimetri 100 metru attālumā), bet arī trūkums - atmosfēras transmisijas kritiskums, kas nozīmē, ka sliktie laika apstākļi var ietekmēt datu kvalitāti. *LIDAR* sensoru kompleksu veidi ir divi: *LIDAR* sensori attālumu mērīšanai – kas arī ir atbilstoši elektropārvades infrastruktūras ģeotelpiskajiem mērījumiem, topogrāfijai (skenēšanai) un *LIDAR* sensori atmosfēras stāvokļa, atmosfēras piesārņojuma monitoringam.



4.18.att. *LIDAR* sistēmas komponentes.

Pastāv divas attāluma noteikšanas metodes:

- Impulsa lāzera darbība - īsi impulsi (10-9 sek), augsts impulsa atkārtošanas ātrums (kHz). Tiek mērīts laiks, kas pagājis no atstarotās gaismas impulsa nosūtīšanas un saņemšanas brīža. Attālums līdz punktam uz objekta virsmas:

$$D = 0,5 \cdot c \cdot t \quad (1)$$

kur:

$c$  - gaismas ātrums;

$t$  - kopējais gaismas ceļa pārvietošanās laiks līdz atstarošanas punktam un atpakaļ;

$D$  - attālums līdz atstarošanas punktam.

- Nepārtrauktus viļņus izstarojoši lāzeri (CW lāzeri) - mēra fāzes nobīdi  $\varphi$  starp izstaroto un uztverto viļņi. Gaismas viļņa pārejas laiks līdz objektam:

$$t = \left(\frac{\varphi}{2\pi}\right) \cdot T \quad (2)$$

kur:

$\varphi$  - fāzes nobīde;

$T$  - lāzera starojuma gaismas svārstību periods.

Attālums līdz punktam uz objekta virsmas aprakstīts (1) formulā.

*LIDAR* sensoru tirgus ir ļoti plašs un piedāvā dažādus *LIDAR* sensoru modeļus (*LIDAR* sensoru piemērus var redzēt 4.19.att.) un sistēmas risinājumus, kurus ir iespējams pielāgot vairākiem lietošanas scenārijiem, jo atšķiras pēc tehniskajiem parametriem. *LIDAR* sistēmas izvēle ir kritisks solis, lai nodrošinātu precīzus un uzticamus datus, kas nepieciešami infrastruktūras defektēšanas mērķim un ģeotelpiskajiem mērījumiem.



4.19.att. *LIDAR* sensoru piemēri (*DJI Zenmuse L2*, *YellowScan Mapper*, *CHCNAV AlphaAIR 450*).

Lai izvēlētos vispiemērotāko *LIDAR* sensoru virszemes infrastruktūras pielietojumam, ir būtiski veikt detalizētu salīdzinājumu starp dažādiem sensoriem. 4.5. tab. ir veikts trīs dažādu sensoru tehnisko parametru salīdzinājums, kur tika ņemti vērā tādi parametri kā absolūta precizitāte, svars, lāzera klase, punktu blīvums, impulsu

atgriešanas skaits, precizitāte, atkārtojamība, redzamības zona un skenēšanas ātrums. Šāds salīdzinājums palīdzēs noteikt, kurš sensors tehniski vislabāk atbilst specifiskajām prasībām.

4.5.tabula

*LIDAR* sensoru sistēmas salīdzinājums

| Parametrs                     | DJI Zenmuse L2 [91]                                                                            | Yellow Scan Mapper [92]        | CHCNAV ALPHAIR 450 [93]                                                                       |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vispārējā sistēmas veiktspēja |                                                                                                |                                |                                                                                               |
| Absolūta precizitāte          | 5 cm @ 150 m (horizontāli)<br>4 cm @ 150 m (vertikāli)                                         | 4 cm                           | <10 cm Hz<br><5 cm V                                                                          |
| Svars                         | 0.905kg                                                                                        | 1.3kg                          | 0.95kg                                                                                        |
| Punktu blīvums                | > 100 punkti/m2                                                                                | 230 punkti/m2 @ 60 m AGL 10m/s | 570 punkti/m2 @ 50 m AGL<br>280 punkti/m2 @ 100 m AGL                                         |
| Lāzera skeneris               |                                                                                                |                                |                                                                                               |
| Lāzera klase                  | 1 (IEC 60825-1:2014)                                                                           | -                              | 1 (IEC 60825-1:2014)                                                                          |
| Impulsu atgriešanās skaits    | Līdz 5                                                                                         | Līdz 2                         | Līdz 3                                                                                        |
| Precizitāte                   | 5 cm @ 150 m (horizontāli)<br>4 cm @ 150 m (vertikāli)                                         | 4cm                            | 20mm                                                                                          |
| Atkārtojamība                 | 2cm                                                                                            | 4cm                            | 15mm                                                                                          |
| Redzamības zona               | 70° x 3°                                                                                       | 81.7 ° x 25.1°                 | 70.4° x 4.5°                                                                                  |
| Skenēšanas ātrums             | Viena atgriešanās:<br>max. 240000 punkti/m2<br>Vairākas atgriešanas:<br>max. 1200000 punkti/m2 | Līdz 240 000                   | Viena atgriešanās:<br>max. 240000 punkti/m2<br>Vairākas atgriešanas:<br>max. 720000 punkti/m2 |

Skatoties no virszemes infrastruktūras defektēšanas prizmas, īpaši jāpievērš uzmanība tādiem tehniskajiem parametriem, ka punktu blīvums un precizitāte, jo tāda tīkla komponente, ka vads pārlaidumā ir mazgabarīts elements, piemēram vidējā sprieguma kabeļa AXLJ-F 3x50/16mm<sup>2</sup> 12/20kV ārējais diametrs ir 55mm. Šis aspekts prasa lielākas vērtības punktu blīvuma parametrā, lai *LIDAR* datu apstrādes procesā identificēt šo komponenti visā garumā, un prasības pret precizitātes, jo viens no defektu parametriem ir gabarītmēģumi (mazākā attāluma (no vada līdz zemei) noteikšana laidumā).

### 4.2.3. Transportlīdzekļi punktu mākoņa datu vākšanai

*LIDAR* datu vākšanai tiek izmantoti dažādi transporta veidi, kuriem katram ir savas priekšrocības un trūkumi atkarībā no biznesa procesa prasībām, vides apstākļiem un plānotajiem datu vākšanas apjomiem. 4.6. tab. ir apkopots *LIDAR* datu vākšanas transportu salīdzinājums ar priekšrocībām un trūkumiem pret defektēšanas procesa prasībām.

4.6.tabula

Datu vākšanas transporta salīdzinājums defektēšanas procesa vajadzībām

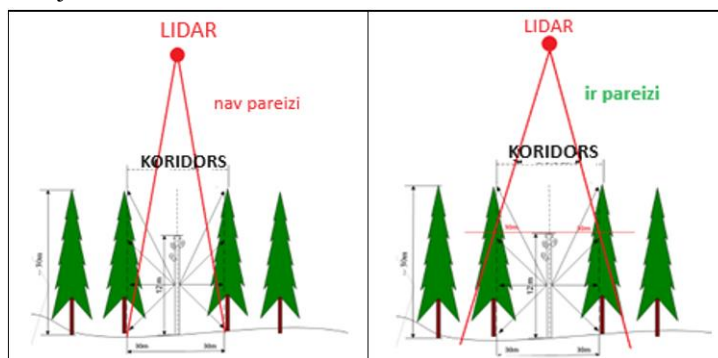
| Datu vākšanas transports                               | Priekšrocības                                                                                                                                                                                                                             | Ierobežojumi                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Manuāla metode (manuāli nēsājami <i>LIDAR</i> skeneri) | Spēj piekļūt grūti sasniedzamām vietām (kur nav atļauta gaisa satiksme).<br>Augsta detalizācijas pakāpe.                                                                                                                                  | Ierobežots ātrums (līdz 6km/dienā).<br>Kravnesība (nav iespējas paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus).<br>Drošības risks personālam.     |
| Automašīnas (mobīlie <i>LIDAR</i> sensori)             | Mobilitāte.<br>Ātrums (līdz 40km/h).                                                                                                                                                                                                      | Ierobežota piekļuve bezceļa vietām.<br>Ierobežots attālums no infrastruktūras.                                                                                |
| Bezpilota gaisa kuģis (drons)                          | Ātrums (līdz 30km/dienā).<br>Ir iespēja automatizēt misijas maršrutu.<br>Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus).<br>Augsta precizitāte.<br>Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām. | Regulācijas ierobežojumi lidojumiem tikai redzamības zonā.<br>Papildus lidojuma licences, saskaņošanas atbilstoši regulējumiem.<br>Ierobežots lidojuma laiks. |
| Pilotēts gaisa kuģis (helikopters)                     | Ātrums (līdz 200km/dienā).<br>Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus).<br>Augsta precizitāte.<br>Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.                                            | Izmaksas.<br>Papildus lidojuma licences, saskaņošanas atbilstoši regulējumiem.<br>Kompetents personāls.                                                       |
| Pilotēts gaisa kuģis (lidmašīna)                       | Ātrums (līdz >500km/dienā).<br>Kravnesība (ir iespēja paralēli vākt <i>RGB</i> , <i>IR</i> , <i>LIDAR</i> datus).<br>Augsta precizitāte.<br>Nav ierobežojumu piekļuvei meža, purvu teritorijām.                                           | Izmaksas.<br>Nepieciešama piekļuve lidostām.<br>Papildus lidojuma licences, saskaņošanas atbilstoši regulējumiem.<br>Kompetents personāls.                    |

Piemērotākā *LIDAR* datu vākšanas transporta izvēles procesā (viens no *LIDAR* datu vākšanas veidiem ar bezpilota lidaparātu ir parādīts 4.20.att.), jāņem vērā arī tādus aspektus, ka plānotās apsekošanas teritorijas lielums un tās ģeogrāfiskās īpatnības, datu detalizācijas prasības atbilstoši pielietojuma mērķiem, pieejamais budžets.



4.20.att. Infrastruktūras *LIDAR* datu vākšanas transporta piemērs ar bezpilota lidaparātu.

Inspekcijas procesā ir ļoti svarīgi apzināt infrastruktūras veidu, ģeogrāfisko izvietojumu, vides apstākļus un pielietojuma īpašus faktorus – no tā būs atkarīga *LIDAR* datu vākšanas transporta izvēle. Viens no piemēriem, kas ierobežo attāluma parametrus no *LIDAR* sensora līdz infrastruktūrai ir demonstrēts 4.21. att. – veģetācijas identifikācija trašu koridorā ir nepieciešama vienāda platuma līdz vadu līmenim, nenodrošinot aerolāzerskenera vajadzīgo leņķi (piemēram, lidojot zemāk) pastāv risks pazaudēt datus, kas apstrādes procesā kropļos informāciju un veģetācijas apjoma aprēķinu rezultāti pārlaidumos nebūs korekti, jo netiks savākti dati biznesam nepieciešamajā tvērumā.

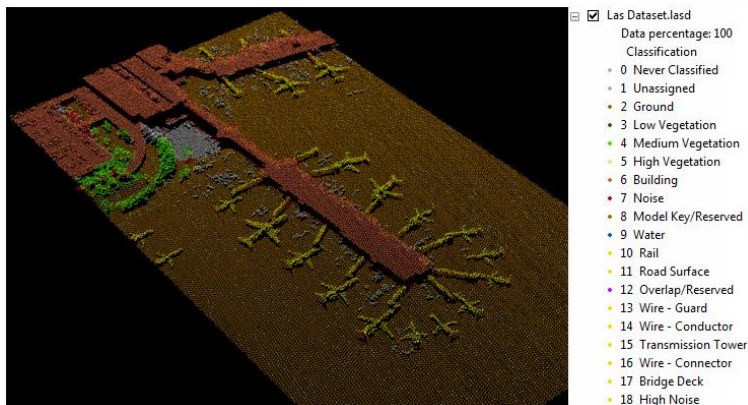


4.21.attēls. Defektēšanas procesa prasības ietekmes piemērs uz *LIDAR* sensora.

#### 4.2.4. Datu analīze ģeotelpisko defektu noteikšanai

Katrā punktu var raksturot ar tam piešķirtu klasifikācijas klasi, kas nosaka objekta veidu, no kura tiek atstarots lāzera signāls. *LIDAR*a punktus var iedalīt vairākās kategorijās, ieskaitot Zemes virsmu, meža lapotnes augšējo robežu un ūdens virsmu.

Klasēm tiek piešķirtas veselu skaitļu koda vērtības, kas tiek glabātas LAS failos. Klasifikācijas kodus ir apstiprinājusi Amerikas Fotogrammetrijas un attālās uzrādes biedrība (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS*) LAS formātiem 1.1, 1.2, 1.3 un 1.4. LAS 1.4 ir jaunākā versija [94], un tajā ir ietverta 4.22. att. norādītā papildu punktu klasifikācija un informācija.



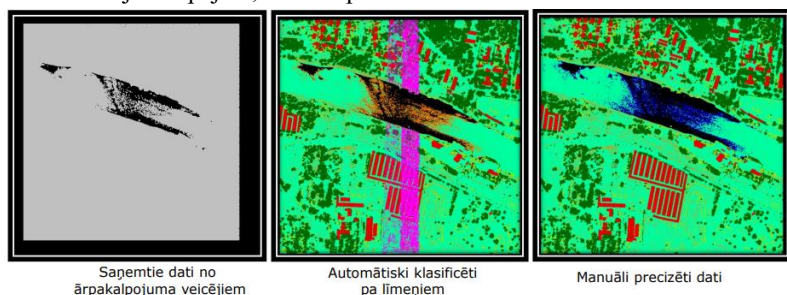
4.22.att. LAS 1.4 formāta klasifikācijas kodi.

Ja klasifikācija ir balstīta uz *LIDARa* datiem, iespējams, ka punkti ietilpst vairākās klasifikācijas kategorijās vienlaikus. Klasifikācijas karodziņi tiek izmantoti, lai sekundāri aprakstītu vai klasificētu *LIDARa* punktus. LAS 1.0 versijā *LIDARa* punkti nevar vienlaikus atbalstīt divas piešķirtās klasifikācijas vērtības. Piemēram, lāzera atstarošanās no ūdens virsmas ir jānoņem no galīgās izvades datu kopas, taču tiem joprojām ir jāatrodas LAS failā un jāmanipulē kā pilns *LIDARa* punkts. Programmā LAS 1.0 šo punktu nevarēja iestatīt kā ūdeni un to nevar analizēt. Vēlākās versijās (LAS 1.1 un jaunākās versijās) šīs problēmas risināšanai tika izmantoti klasifikācijas karodziņi. LAS standartam ir pievienoti klasifikācijas karodziņi, lai varētu pievienot papildu informāciju punktiem, kas pārsniedz tradicionālās klasifikācijas vērtības. Katram *LIDARa* punktam varat iestatīt šādus karogus:

- Sintētiskais punkts - punkts, kas nav saistīts ar lāzera uzmērīšanas datiem, piemēram, digitalizēts no fotogrammetriskā stereopāra;
- Atslēgas punkts - punkts attiecas uz modeļa galvenajiem punktiem, un to nedrīkst izdalīt ar retināšanas algoritmu;
- Izslēgšanas punkts - punkts nav iekļauts apstrādē;
- Pārklājuma punkts - punkts apgabalā, kur pārklājas divi vai vairāki gaisa maršruti (attiecas uz LAS versiju 1.4).

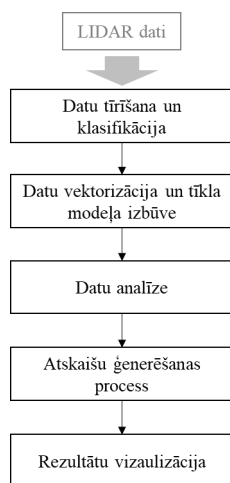
Šos karogus var iestatīt kopā ar klasifikācijas kodu. Piemēram, ierakstam "ūdens" var izmantot atbilstošo ūdens klasifikācijas kodu, bet var izmantot arī karogu "izslēgts". Punkts joprojām tiks atstāts datu kopā, taču tas tiks izslēgts no papildu analīzes, kas tiek pakļauta LAS failiem.

Pastāv iespēja interaktīvi rediģēt LAS datu kopas un veikt ģeoapstrādi ar dažāda veida klasifikācijas iespējām, daži no piemēriem attēloti 4.23.att.



4.23.att. Datu manuālā klasifikācija [95].

*LIDAR* datu apstrāde tīkla inspekcijām ir ļoti būtiska, lai efektīvi analizētu un uzraudzītu dažādus infrastruktūras ģeotelpiskās atkāpes. 4.24. att. ir parādīts potenciālais *LIDAR* datu apstrādes process tīkla inspekcijām. Savāktie neapstrādāti *LIDAR* dati par inspekcijas objektiem ir jāapstrādā, lai iegūtu vērtīgu informāciju par infrastruktūru.



4.24.att. Potenciālā *LIDAR* datu apstrādes darbplūsma.

Pirmais solis būtu datu tīrīšana un filtrēšana, kura rezultātā ir jānoņem nepareizie dati, kas radušies no putekļiem, lietus vai citiem ārējiem faktoriem. Tad datus ir nepieciešams segmentēt vai klasificēt – sadalīt pa komponentēm: zeme, veģetācija, infrastruktūra (balsti, elektrolīnijas), ēkas. Tad ir svarīgi ģeoreferencēt un integrēt ar GPS datiem, nodrošinot precīzu koordinātu sistēmu. Tad tiek veidoti 3D modeļi (infrastruktūras objektu modeļi, virsmas modeļi, lai vizualizētu un analizētu datus. Datu analīzes bloks sastāv no ģeotelpiskajiem mērījumiem: attālumiem no objektiem (starp elektrolīniju un zemi, attālumi no elektrolīnijām līdz tuvākajiem koku zariem, krūmiem vai citiem objektiem), ka arī leņķu mērījumi (struktūru slīpumu mērījumi iespējamās



deformācijas noteikšanai). Nākamais solis ir atskaišu un detalizētu datu pārskatu sagatavošana, lai identificētu potenciālus riskus un bīstamības zonas. 3D infrastruktūras stāvkoka un potenciālo problēmu vizualizācija varētu tikt izmantota uz datiem balstītai lēmumu pieņemšanai.



4.25.att. Infrastruktūras ģeotelpiska defekta noteikšanas piemērs.

*LIDAR* datu apstrāde tīkla inspekcijām ir komplekss un daudzpakāpju process, kas prasa rūpīgu datu analīzi un katra mērījuma interpretāciju (defekta piemērs ir parādīts 4.25. att.), lai nodrošinātu virszemes infrastruktūras drošību un ilgtspējību.

### 4.3. Kopsavilkums

Šajā sadaļā tiek apskatītas alternatīvas metodes vizuālo un ģeotelpisko defektu identificēšanai, ar mērķi izstrādāt attālinātās jeb digitālās inspekcijas risinājumu. Digitālā infrastruktūras inspekcija ir viens no viediem un robotizētajiem risinājumiem, kas spētu nodrošināt efektīvāku un drošāku infrastruktūras pārvaldību.

Starptautiskajā praksē alternatīvās defektu identificēšanas metodes kļūst arvien tehnoloģiski attīstītākas. Pieaug to risinājumu izmantošana, kas balstīti uz bezpilota gaisa kuģiem, attālinātiem sensoriem un mākslīgā intelekta algoritmiem. Kā parāda apkopotie piemēri (skat. 4.7. tabulu), šīs metodes ļauj nodrošināt automatizētu un augstas precizitātes infrastruktūras tehniskā stāvkoka novērtējumu. Piemēram, ASV Oukridžas Nacionālā laboratorija izstrādājusi automatizētu dronu inspekcijas sistēmu, kas izmanto termogrāfiskos attēlus, radiofrekvenču sensorus un akustiskos devējus, nodrošinot reāllaika defektu identificēšanu infrastruktūrā [96]. Citos pētījumos izmantoti BGK iegūti augstas izšķirtspējas attēli un dziļās mācīšanās modeļi bojājumu automātiskai klasifikācijai [97]. Eiropas līmenī Grieķijā, ALTITUDE projekts izmanto BGK un mašīnmācīšanās algoritmus, lai automatizētu elektroenerģijas pārvades tīkla inspekciju, izmantojot augstas izšķirtspējas BGK datus un 5G datu pārraidi efektīvai un ātrai datu apstrādei [98].

Tāpat ir piemēri praksē, kur datu vākšanā tiek izmantota *LIDAR* tehnoloģija – kā, piemēram, Jaunzēlandē, kur sadales sistēmu operators *Transpower* izmanto šos datus, lai novērtētu veģetācijas radītos riskus un optimizētu preventīvo apkopi [99]. Savukārt Lielbritānijas uzņēmums *Sees.ai* testē pilnībā autonomas BGK sistēmas augstsprieguma līniju pārbaudei, kur AI tiek izmantots korozijas un citu bojājumu analīzei [100].

4.7.tabula

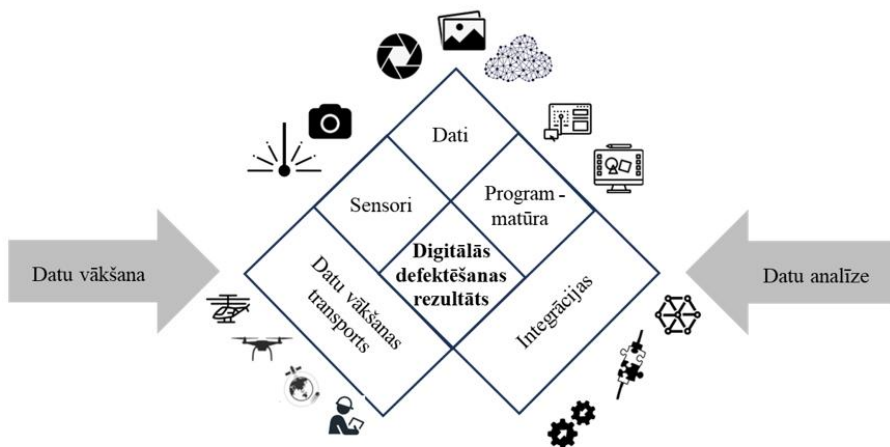
Alternatīvo defektu identificēšanas metožu piemēri elektroenerģijas infrastruktūrā citās valstīs

| Valsts                      | Datu veids                                     | Datu vākšana          | Datu apstrāde                | Pielietojums                                         |
|-----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------------------------|
| Amerikas Savienotās Valstis | Termoattēli, SAR attēli, skaņas detektori      | BGK                   | Reāllaika novērtējums        | Reāllaikā elektrotīkla komponentu pārbaude           |
| Amerikas Savienotās Valstis | Optiskie aerofoto attēli                       | BGK                   | Mašīnmācīšanās algoritmi     | Bojājumu noteikšana elektropārvades torņos           |
| Grieķija                    | Augstās izšķirtspējas optiskie aerofoto attēli | BGK, 5G datu pārraide | Mašīnmācīšanās algoritmi     | Pārvades tīkla inspekcijas automatizācija            |
| Lielbritānija               | Optiskie aerofoto attēli                       | Autonomie BGK         | AI sistēmas                  | Augstsprieguma līniju inspekcija (korozijas analīze) |
| Jaunzēlande                 | <i>LIDAR</i> ortofoto                          | Lidmašīna             | ĢIS sistēmas analītikas rīki | Veģetācijas risku novērtēšana                        |

Šie piemēri apliecina, ka līdzīgas tehnoloģiskās pieejas tiek arvien aktīvāk integrētas arī starptautiskajā praksē, bet pārsvarā ir fokusēti uz pārvades sistēmas infrastruktūru (augstsprieguma tīkliem), tādējādi pamatoti nostiprinot izvēlēto metožu aktualitāti šī pētījuma kontekstā vidējā sprieguma tīkla infrastruktūras inspekcijām.

Digitālās inspekcijas praktiskā validācija ir būtisks solis, lai novērtētu šīs tehnoloģijas potenciālu un priekšrocības reālajā vidē, pirms tā tiek plaši ieviesta komplicētajos tehniskos infrastruktūras uzturēšanas procesos. 4.26. att. ir demonstrēts digitālās inspekcijas piedāvātais risinājums, kas kalpo kā pamatmodelis tālākai attīstībai un validācijai. Risinājuma komponentes ir datu vākšanas un datu analīzes fāzes.

Datu vākšanas procesam nepieciešamie resursi ietver transportlīdzekļus un sensorus, kas kalpo datu iegūšanai turpmākai analīzei. Lai veiktu analīzi, ir nepieciešamas datu kopas (*RGB* un *LIDAR* datu kopas) un programmatūras rīki *RGB* attēlu datu apstrādei defektu identifikācijai un ģeotelpisko datu apstrādei mērījumu īstenošanai. Digitālās inspekcijas rezultātā iegūtais identificēto defektu saraksts, ja nepieciešams, tiek integrēts citās operatora informācijas sistēmās, lai nodrošinātu pāreju uz nākamajiem procesiem, kas saistīti ar tīkla plānošanu un uzturēšanu.



4.26.att. Digitālās inspekcijas risinājuma piedāvājums.

Risinājuma praktiskā validācija kalpos kā pārbaudes un eksperimentēšanas veids, kas ļauj identificēt gan ieguvumus, gan izaicinājumus, kas varētu rasties, ieviešot digitālo inspekciju, kā pastāvīgu sadales sistēmas operatora infrastruktūras pamatprocesu.

## 5. DIGITĀLĀS INSPEKCIJAS RISINĀJUMA EKSPERIMENTĀLAIS PĒTĪJUMS

Šajā nodaļā tiks apskatīta digitālās defektēšanas (metode, kas izmanto modernās tehnoloģijas, lai identificētu un analizētu defektus infrastruktūras objektos.) empīriskā pārbaude un tās praktisko piemērojamību reālās procesa īstenošanas novērtējums. Promocijas darba praktiskā daļa tika realizēta sadarbībā ar AS “Sadales tīkls”, kas nodrošināja tehnisko un metodoloģisko atbalstu.

Pētījuma nepieciešamības motivācija:

- Tehnoloģijas testēšana reālajā vidē - projekts nodrošina iespēju praktiski pārbaudīt digitālās defektēšanas tehnoloģijas īstos ekspluatācijas apstākļos. Tas palīdz noteikt tehnoloģijas efektivitāti, precizitāti un pielietojumu reālos scenārijos;
- Risku apzināšana - projekts ļauj identificēt potenciālos riskus un problēmas, kas varētu rasties, ieviešot digitālo defektēšanu plašākā mērogā. Tas ļauj ieviest nepieciešamos uzlabojumus un novērst iespējamās šķēršļus vēl pirms tehnoloģijas pilnas mēroga ieviešanas;
- Datu kvalitātes novērtēšana - projekta laikā tiek savākti dati, kas ļauj novērtēt to kvalitāti un piemērotību defektu analīzei. Tas palīdz noteikt, vai izmantotās tehnoloģijas spēj nodrošināt nepieciešamo datu precizitāti un detalizāciju defektēšanas vajadzībām.

Risinājuma sagaidāmie ieguvumi:

- Uzlabota defektu identificēšana - izmantojot digitālās defektēšanas tehnoloģijas, iespējams ātrāk un precīzāk identificēt defektus, salīdzinot ar tradicionālajām metodēm, kas var būt laika un resursu ietilpīgas, tas nozīmētu uzturēšanas izmaksu samazinājumu - precīza un savlaicīga defektu atklāšana ļauj veikt tikai nepieciešamos remontdarbus, tādējādi samazinot kopējās uzturēšanas izmaksas;
- Dato balstīta lēmumu pieņemšana - izmantojot augstas precizitātes datus no digitālās defektēšanas, iespējams pieņemt labāk informētus lēmumus par infrastruktūras uzturēšanu un uzlabojumiem;
- Palielināta infrastruktūras drošība - regulāra un detalizēta defektu uzraudzība palīdz novērst nopietnus bojājumus un uzlabot infrastruktūras drošību, kas ir kritiski svarīga sabiedrības un ekonomikas labklājībai;
- Uzlabota datu pārvaldība un piekļuve – vairāku formātu datu apstrādes un uzglabāšanas sistēmas ļauj viegli piekļūt savāktajiem datiem, veikt to analīzi un izmantot tos nākotnes plānošanā;
- Ilgtspējīga infrastruktūras pārvaldība: Digitālās defektēšanas tehnoloģijas veicina efektīvāku resursu izmantošanu un palīdz izstrādāt ilgtspējīgas infrastruktūras pārvaldības stratēģijas;
- Procesu digitālā transformācija - projekta laikā personāls iegūst jaunas prasmes un zināšanas, kas paaugstina organizācijas tehnisko kompetenci un spēju izmantot modernas tehnoloģijas.

Pētījuma mērķis: 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” 650km garām gaisvadu elektropārvades līnijām, kurā ietilpst 550km vidējā sprieguma un 100km zemsprieguma līniju, izmantojot digitālās defektēšanas tehnoloģijas un metodes.

Pētījuma uzdevumi:

1. Izvirzīt 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 izvirzīto mērķi. Datu kvalitāte un ticamība būtiski ietekmē

praktiskā eksperimenta rezultātu un precizitāti. Tādēļ ir svarīgi izvēlēties piemērotas datu iegūšanas metodes, kas atbilst pētījuma vajadzībām un nodrošina uzticamus un reprezentatīvus datus.

Praktiskajā pētījuma daļā tiek izmantotas modernās datu ieguves metodes elektrolīniju inspekcijām, kur būtiski ir ievākt augstas izšķirtspējas *RGB* datus un *LIDAR* datus. Šī pieeja nodrošina visaptverošu un detalizētu informāciju par elektrolīniju infrastruktūru un tās apkārtējo vidi, kas ir kritiska, lai veiktu precīzu analīzi un identificētu potenciālos draudus vai traucējumus elektropārvades līniju infrastruktūrā.

### 5.1.1. Datu kopu iegūšanas tehniskie parametri

*RGB* dati tiek izmantoti, lai iegūtu vizuālu pārskatu par elektrolīniju stāvokli, kas ļauj identificēt bojājumus, korozijas pazīmes, veģetācijas izplatību un citus vizuāli pamanāmus defektus un infrastruktūras elementu bojājumus. Šādus datus jāiegūst, izmantojot augstas izšķirtspējas kameras, kas nodrošina precīzus un detalizētus attēlus no dažādiem leņķiem un attālumos, kas ir kritiski svarīgi, lai pilnībā vizuāli novērtētu infrastruktūras tehnisko stāvokli. 5.1. tab. ir apkopotas un sistematizētas būtiskākās tehniskās prasības, kas jāievēro, izmantojot *RGB* datus infrastruktūras vizuālā tehniskā stāvokļa novērtēšanai. Šīs vadlīnijas nodrošina nepieciešamos prasības datu kvalitātei, precizitātei un konsekvencei, lai nodrošinātu uzticamu un detalizētu infrastruktūras stāvokļa analīzi.

5.1.tabula

*RGB* datu vākšanas tehnisko prasību parametri inspekcijas procesa vajadzībām

| Parametrs                         | Tehniskās prasības apraksts                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datu ieguves realizācijas periods | Aprīlis – Jūnijs, Septembris (Latvijas valsts teritorijā).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Datu kopas gala versijas piegāde  | Datu piegāde uz AS “Sadales tīkls” FTP serveri. Jānodrošina datu klasifikācija mapēs pēc aktīvu grupām un identifikatoriem.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Datu vākšanas realizācija         | Ievērot Latvijas valsts normatīvos aktus un nodrošināt visu nepieciešamo nosacījumu izpildi [101], tajā skaitā, ja nepieciešams, informēt iedzīvotājus par plānotajiem darbiem īsi pirms datu vākšanas īstenošanas (gadījumos, kad notiks datu vākšana apdzīvotu vietu teritorijā).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Datu kvalitātes kritēriji         | <p><u>Formāts:</u> <i>RGB</i> attēli (jpeg, jpg).</p> <p><u>Apjomi:</u> AS “Sadales tīkls” infrastruktūras elementu <i>RGB</i> attēli (laidumiem - optimālais attēlu skaits, lai redzamība aptvertu vismaz visu laidumu, vismaz 4 attēli punktveida objektiem (no kuriem 2 attēli ar tāluma maiņu) un vismaz šādiem virzieniem - slīpi (slīpi divos vertikālos virzienos) un zemāko (no augšas)), nodrošina, ka datu kopā ir daudzveidīga attēlu kopa, kas attēlo dažādus aktīvus, leņķus. Šī dažādība palīdz izveidot stabilāku un vispārīgāku modeli. Mērķis ir maksimāli automātiski identificēt definētos defektus (skat. pielikumā 1) un saistīt attēla ģeogrāfisko atrašanās vietu ar elementu ar precizitāti līdz 0,5 m.</p> |

Datu kvalitātes  
kritēriji

Koordinātu un telpiskā sistēma: WGS84 vai cita vispārpieņemta (piem. Latvijā izmantotā LKS-92 TM [102]).

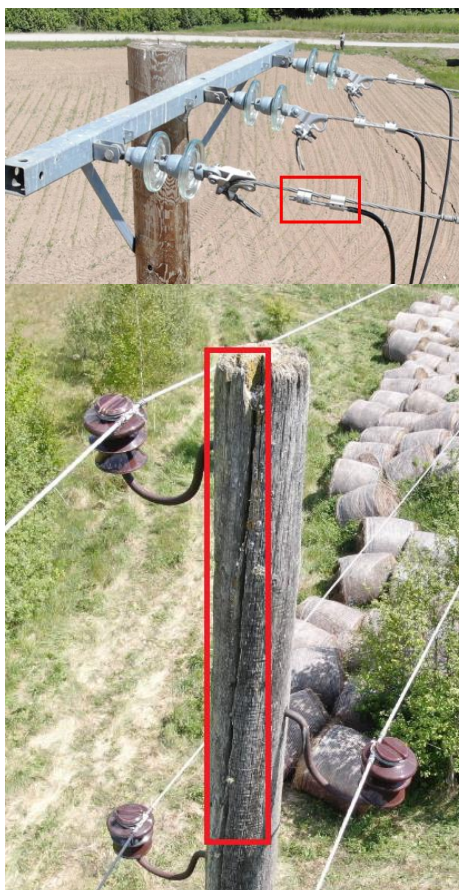
Metadati: ģeogrāfiskās atzīmes (ar noteiktu precizitāti), kameras leņķis, FOV (*Field of View*) (skata laukums), datuma un laika zīmogi, avota informācija - svarīgi ir precīzi sasaistīt attēlu pret infrastruktūras aktīviem.

Kvalitāte: Piemērot, lai identificētu vizuālo defektu (mazākais identificējamais defekts ir 2cm liels).

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 optimālu izšķirtspēju, lai tiktu konstatēts 2 cm liels defekts.

*Mazgabarīta defektu piemēri (spaiļu defekts, koka balstu struktūras (plaisa) defekts:*



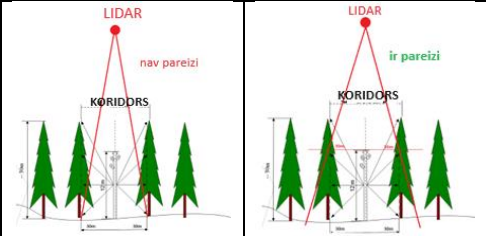
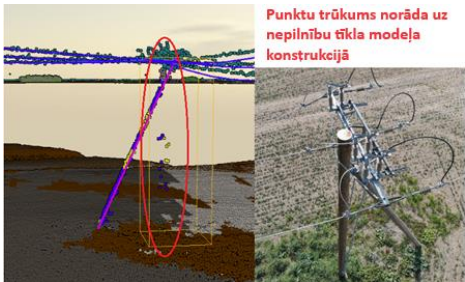
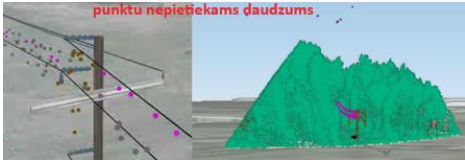
| 5.1.tabula (turpinājums)  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datu kvalitātes kritēriji | <p><u>Apzīmējumi:</u> Datu kopas komponentiem jābūt nosauktiem atbilstoši to saturam, nodrošinātajām etiķetēm jābūt pareizi saskaņotām ar attēlu saturu.</p> <p><u>Dokumentācija:</u> jānodrošina dokumentācija, kas ietver informāciju par datu kopas izcelsmi (datu vākšanas ierīcēm), vākšanas metodēm, datu kopas tehniskajiem parametriem un jebkādam īpašām specifikācijām.</p> |

*LIDAR* tehnoloģija ļauj iegūt trīsdimensiju datus, kas sniedz precīzu informāciju par reljefu, objektu augstumu un tīkla telpisko izvietojumu. *LIDAR* dati tiek savākti, izmantojot lāzera impulsus, kas atstarojas no virsmas un objektu, radot augstas precizitātes trīsdimensiju modeļus. Šie dati ir īpaši noderīgi, lai analizētu elektroliniju un to atbalsta konstrukciju ģeotelpisko stāvokli un veikt nepieciešamus pārbaudes mērījumus: novērtētu attālumu starp vadiem un veģetāciju, kā arī identificētu potenciālos šķēršļus un draudus līniju drošībai. Informācija, kas atspoguļota 5.2. tab. ietver nepieciešamos tehniskos parametrus, kas ir kritiski svarīgi datu vākšanas procesam un nodrošina augstu precizitāti infrastruktūras defektu identificēšanai.

5.2.tabula

*LIDAR* datu vākšanas tehnisko prasību parametri inspekcijas procesa vajadzībām

| Parametrs                         | Tehniskās prasības apraksts                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datu ieguves realizācijas periods | Aprīlis – Jūnijs, Septembris (Latvijas valsts teritorijā).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Datu kopas gala versijas piegāde  | Datu piegāde uz AS “Sadales tīkls” FTP serveri. Jānodrošina datu klasifikācija mapēs pēc aktīvu grupām un identifikatoriem.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Datu vākšanas realizācija         | Ievērot Latvijas valsts normatīvos aktus un nodrošināt visu nepieciešamo nosacījumu izpildi [101], tajā skaitā, ja nepieciešams, informēt iedzīvotājus par plānotajiem darbiem īsi pirms datu vākšanas īstenošanas (gadījumos, kad notiks datu vākšana apdzīvotu vietu teritorijā).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Datu kvalitātes kritēriji         | <p><u>Formāts:</u> LAS, LAZ.</p> <p><u>Apjomi:</u> pārklājums — Ir jānodrošina, ka datu kopa pilnībā aptver visu nepieciešamo ģeogrāfisko vai telpisko apgabalu, kas ir saistīts ar projekta prasībām. Datu pārklāšanās jāminimizē, izlīdzinot datu kopu, lai izvairītos no dublēšanās un lieka datu pārklājuma. Pilnīgums — jānodrošina, lai datu kopa pilnīgi aptvertu interesējošo apgabalu, nodrošinot, ka netrūkst neviena nozīmīga informācijas fragmenta un nav būtisku datu iztrūkumu.</p> <p>Objektu ģeogrāfiskās atrašanās vietas ir sniegtas 2.pielikumā, koridora platums ir noteikts līdz 30 metriem katrā pusē no līnijas centrālās ass koku galotņu augstuma līmenī.</p> |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datu kvalitātes kritēriji |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Datu kvalitātes kritēriji | <p><u>LIDAR datu kvalitāte:</u></p> <p>Precizitāte un atkārtojamība (accuracy/precision) – LIDAR sistēmai jānodrošina precizitāte un atkārtojamība ar ražotāja specifikācijā norādīto kļūdas vērtību mazāku par 5 cm.</p> <p>Punktu mākoņa blīvums – punktu mākoņa blīvumam jābūt vismaz 50 pt/m<sup>2</sup>, lai nodrošinātu 10 cm precizitāti (ņemot vērā maksimāli pieļaujamās 5cm kļūdas precizitātei un atkārtojamībai) un pietiekamu detalizāciju infrastruktūras līniju (vadu) un veģetācijas elementu (koku, krūmu, zaru) redzamībai, ka arī zemes reljefa precīzai modelēšanai.</p> <p>Impulsu atgriešanās: LIDAR ierīcei jābūt spējīgai uztvert vismaz divas atgriezeniskās impulsa atbildes, lai nodrošinātu pietiekamu datu kvalitāti un detalizāciju.</p> <p>Kvalitātes kontrole: Jānodrošina, ka nav bojātu datu, kā arī punktu mākoņos nedrīkst būt spraugu vai caurumu, kas varētu ietekmēt datu pilnīgumu un precizitāti.</p> <p><i>Nevēlamās situācijas piemēri, kas var ietvert sekojošas problēmas un kļūdas:</i></p> <div data-bbox="512 971 977 1253">  <p>Punktu trūkums norāda uz nepilnību tīkla modeļa konstrukcijā</p> </div> <p><i>Datu pārklājuma nepilnības:</i> Situācijas, kad datu kopa neaptver visu nepieciešamo ģeogrāfisko vai telpisko apgabalu, radot trūkstošas informācijas zonas.</p> <div data-bbox="512 1352 977 1512">  <p>punktu nepietiekams daudzums.</p> </div> <p><i>Punktu mākoņa zems blīvums:</i> Situācijas, kad LIDAR datu punkta blīvums ir zemāks par prasīto normu, piemēram, mazāk par 50 punkti uz kvadrātmetru, kas var novest pie neprecīza infrastruktūras elementu attēlojuma.</p> |



|                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Datu kvalitātes kritēriji</p> | <p style="text-align: center;"><b>vaļām trūkst punkti</b></p>  <p><i>Spraugas un caurumi punktu mākoņos:</i> Situācijas, kad <i>LIDAR</i> punktu mākonis satur spraugas vai caurumus, radot datu pilnīguma un ticamības problēmas, kas var ietekmēt infrastruktūras vai reljefa precīzu kartēšanu.</p> <p><b>Metadati un ģeoreference:</b> Datu kopai ir jābūt papildinātai ar atbilstošu metadatu informāciju un precīzi ģeoreferencētai, lai nodrošinātu tās integrējamību ģeogrāfiskās informācijas sistēmās (ĢIS) un kartēšanas programmatūrā. Tas ietver arī precīzu temperatūras datu, datuma un laika zīmogu iekļaušanu.</p> <p>Punktu atribūti - datu punktiem jāietver atribūti: intensitātes vērtības vai klasifikācijas kategorijas (piemēram, zeme, veģetācija, un ēkas).</p> <p><u>Apzīmējumi:</u> <i>LIDAR</i> datu kopā var tikt iekļauti apzīmējumi, kas atbilst plānotajai datu vākšanas misijai vai ir noteikti saskaņā ar īpašām vienošanām.</p> <p><u>Dokumentācija:</u> Jānodrošina detalizēta dokumentācija, kas ietver informāciju par datu avotiem, vākšanas metodoloģiju, datu kopas tehniskajiem parametriem, <i>LIDAR</i> sensora kalibrāciju, kā arī jebkādu specifiskus apsvērumus vai ierobežojumus, kas var ietekmēt datu kvalitāti vai izmantošanu.</p> |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Apvienojot *RGB* un *LIDAR* datus, tiek iegūta kompleksa un daudzpusīga informācija, kas ļauj detalizēti un precīzi novērtēt elektrolīniju stāvvokli un apkārtējās vides apstākļus. Šāda datu integrācija nodrošina visaptverošu pieeju defektu identificēšanā un novēršanā, veicinot efektīvāku un proaktīvāku elektrolīniju pārvaldību un uzturēšanu.

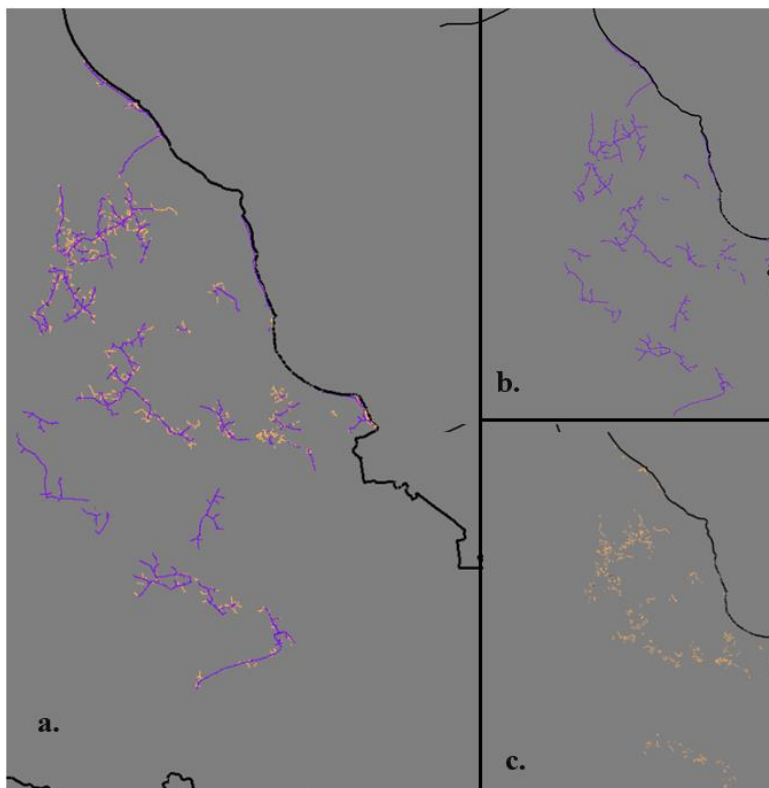
### 5.1.2. Datu kopu iegūšanas scenārijs.

Šajā sadaļā tiek izklāstīta pieeja, kas tiek izmantota, lai sistemātiski savāktu un apstrādātu informāciju, kas nepieciešama pētījuma vajadzībām.

Pētījuma tvērumā (5.3. tab.) ir precīzi definēti noteikto aktīvu apjomi, kas ietver sevī gan līnijveida elementus (virszemes elektropārvades līniju pārlaidumi), gan punktveida elementus (balstu konstrukcijas). Pētījuma ģeogrāfiskais tvērums, kas atspoguļots 5.1. att., aptver Talsu un Tukuma novadu reģionā esošo tīklu, kurā tiek veikta viena gada defektēšanas apjoma analīze. Šajā reģionā tiek pētīts, novērtēts un analizēts elektrotīkla infrastruktūras stāvvoklis, koncentrējoties uz noteiktā laika posma defektēšanas aktivitātēm.

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              |



5.1.att. Pētījuma ģeogrāfiskais tvērums (a. Virszemes elektropārvades līnijas, b. Vidējā sprieguma līnijas, c. Zemsprieguma līnijas).

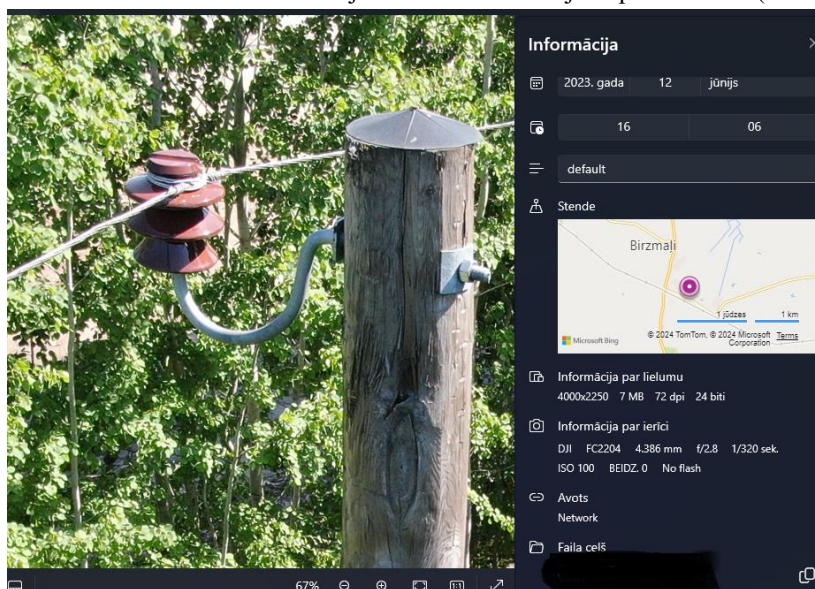
Datu kopu iegūšanai tika izvēlētas konkrētas tehniskās ierīces, kas nodrošina definētas 5.1. tab. un 5.2. tab. prasības, lai atbilstoši pētījuma mērķiem un inspekcijas procesa vajadzībām savāktu un apstrādātu nepieciešamo informāciju:

- RGB datu kopas iegūšanai tiek izmantots bezpilota gaisa kuģis *DJI Mavic 2 Pro* (tehniskā specifikācija pieejama 3.pielikumā), kurš ir aprīkots ar iebūvēto kameru, kurai ir specifiski parametri, lai nodrošinātu konsekvenci un minimizētu kļūdas:
  - 1" CMOS (CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) ir tehnoloģija, kas tiek izmantota attēlu sensoros digitālajās kamerās, salīdzinot ar CCD (*Charge-Coupled Device*), CMOS sensori patērē

mazāk enerģijas nekā CCD sensori, tie var lasīt datus no katra pikseļa individuāli, ļaujot ātrāku attēlu iegūšanu un apstrādi - faktiskais 1” sensora diagonālais izmērs ir aptuveni 16 mm.

- Efektīvie pikseļi: 20 miljoni - pikseļi, kas tiek faktiski izmantoti attēla uzņemšanai, kamera var uzņemt attēlus ar 20 megapikseļu izšķirtspēju, nodrošinot un tieši ietekmējot augstas kvalitātes attēlus ar izcilu detalizāciju un precizitāti.
- FOV (*Field of View*): 77° - kamera aptver aptuveni 77 grādu platu skatu lēnķi. Šis lēnķis tiek mērīts horizontāli un norāda uz to, cik plašu skatu kamera var uztvert no noteikta attāluma.
- 35 mm Formāta ekvivalents: 28 mm norāda uz objektīva skatīšanās lēnķi, salīdzinot to ar tradicionālajiem 35 mm filmas kamerām. Šis skatīšanās lēnķis ir svarīgs, lai izprastu, cik plašu redzes lauku kamera var aptvert un kāds būs attēlu izkropļojumu līmenis.
- Diafragmas atvērums (*Aperture*): f/2.8–f/11 ietekmē gaismas daudzumu, kas nonāk objektīvā, un fokusa dziļumu attēlā. f/2.8–f/11 nodrošina plašu diapazonu no nesamazinātas diafragmas līdz lieliem f/11, kas nodrošina attēla kvalitāti gan ar zemu, gan ar augstu apgaismojumu.
- Attēla izšķirtspēja: 5472×3648 norāda uz attēla dimensijām pikseļos, ko drona iebūvētā kamera var uzņemt un radīt.

Lai novērtētu izvēlēta sensora piemērotību, tika veikts eksperimentāls lidojums testēšanas nolūkos, iegūtie rezultāti, kas parādīti 5.2. att. demonstrē tīkla komponentu redzamību atbilstošu defektēšanas vajadzībām un definētajiem parametriem (5.1. tab.).



5.2.att. RGB attēla rezultāts, kas iegūts no testa lidojuma.

Lai nodrošinātu 2cm vizuālo defektu redzamību, BGK lidojuma augstums var variēt no 12 metriem līdz 15 metriem. Specifiskās konstrukcijas punktveida elementu apsekošanai (5.3.att. ir vizualizēti balstu konstrukciju tipi) un fiksēšanai lidojums ir paredzēts nolaižoties līdz pat 3 metriem no zemes līmeņa objektos, bet ne zemāk.

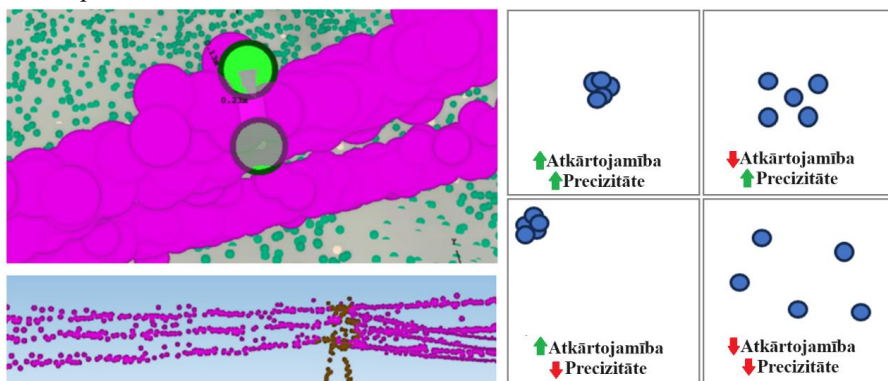


5.3.att. Balstu konstrukciju tipi (a. P tipa koka balsts ar transformatoru, b. 3 kāju koka balsts, c. I tipa koka balsts).

- *LIDAR* datu kopas iegūšanai *YellowScan Mapper LIDAR* sistēma (tehniskā specifikācija pieejama 4. pielikumā) tiek izmantota kā galvenais datu avots, nodrošinot trīsdimensiju punktu mākonī ar nepieciešamo kvalitāti:
  - Skatleņķis (*Field of view*): 81.7 grādi - ir leņķis, kurā *LIDAR* sensors var skenēt apkārtējo vidi un tas ir kritisks faktors, kas ietekmē datu vākšanas efektivitāti un mērījumu kvalitāti.
  - Atkārtojamība (*Precision*): 2 cm nozīmē, ka katrs mērījums, ko veic *LIDAR* sistēma, ir precīzs līdz  $\pm 2$  centimetriem no faktiskās vērtības. Atkārtojamība attiecas uz mērījumu atkārtojamību un konsekveni. Tā norāda, cik labi atkārtoti mērījumi ir vienādi vai tuvumā viens otram, neatkarīgi no tā, cik precīzi tie ir attiecībā pret patieso vērtību.
  - Precizitāte (*Accuracy*): 3 cm nozīmē, ka sistēma spēj noteikt objektu vai virsmas atrašanās vietu ar kļūdas robežu, kas nepārsniedz  $\pm 2$  centimetrus. Precizitāte attiecas uz mērījumu tuvumu faktiskajai vai patiesajai vērtībai. Tā norāda, cik precīzi mērījums atbilst īstajai vērtībai.

Gan atkārtojamība, gan precizitāte ir svarīgi aspekti, lai novērtētu *LIDAR* sistēmas mērījumu kvalitāti. Augsta atkārtojamība nodrošina konsekventus mērījumus, bet augsta precizitāte norāda, ka šie mērījumi atbilst patiesajai vērtībai. Efektīvai *LIDAR* sistēmas izmantošanai ir svarīgi izprast un optimizēt gan šos parametrus, lai iegūtu precīzus un uzticamus datus. 5.4. att. ir attēloti divi galvenie faktori, kas ietekmē mērījumu rezultātus: precizitāte un atkārtojamība. Tas demonstrē, kā šie faktori ietekmē *LIDAR* sistēmas spēju precīzi un konsekventi noteikt elektrolīniju vadu pozīciju telpā:

- Augsta precizitāte un augsta atkārtojamība - mērījumu punkti ir gan tuvu patiesajai vadu atrašanās vietai, gan savstarpēji blīvi sakopoti. Šāda kombinācija nodrošina visaugstāko mērījumu kvalitāti, jo mērījumi ir gan precīzi, gan atkārtojami.
- Augsta precizitāte un zema atkārtojamība - mērījumu punkti ir tuvu patiesajai vērtībai, bet izkļaidēti. Tas liecina par labu precizitāti, taču zemā atkārtojamība norāda uz iespējamu sistēmas nestabilitāti vai ietekmēm no ārējiem faktoriem.
- Zema precizitāte un augsta atkārtojamība - mērījumu punkti ir cieši kopā, bet attālināti no patiesās vadu atrašanās vietas. Tas norāda uz stabilu, bet nepareizu mērījumu sistēmu, kurā mērījumi ir konsekventi, bet neatbilst patiesajai vērtībai.
- Zema precizitāte un zema atkārtojamība - mērījumu punkti ir gan attālināti no patiesās vērtības, gan izkļaidēti. Šāda kombinācija norāda uz zemas kvalitātes mērījumiem, kurus ietekmē gan neprecizitāte, gan mērījumu nekoncekvence, kā parādīts attēlā, tad distance.



5.4.att. Precizitātes un atkārtojamības ietekmes ilustrācija uz vadu mērījumu kvalitāti.

Šim pētījumam datu iegūšanai tika izmantots bezpilota gaisa kuģis *DJI Matrice 300RTK*. (tehniskā specifikācija pieejama 5. pielikumā). Šī platforma nodrošina pietiekamu kravnesību (maksimālais pacelšanas svars līdz 9kg) *YellowScan Mapper LIDAR* sensora, kura svars kopā ar baterijām ir 1.5kg uzstādīšanai un efektīvai darbībai. 5.5. att. redzams *DJI Matrice 300RTK* bezpilota lidaparāts, aprīkots ar *YellowScan Mapper LIDAR* sensoru, kas tiek izmantots pētījuma objekta datu iegūšanai.





5.5.att. DJI Matrice 300RTK BGK ar uzstādīto YellowScan Mapper *LIDAR* sensoru.

Plānojot bezpilota lidaparāta lidojumu ar *LIDAR* sensoru, jāņem vērā, ka viens no mērķim ir noteikt veģetāciju infrastruktūras aizsargjoslu teritorijās, tas nozīmē ka jāizmanto izejas dati (5.6. att. izejas dati no AS “Sadales tīkls” ĢIS sistēmas) ar precīzi definētājiem infrastruktūras aizsargjoslu robežām (saskaņā ar Aizsargjoslu likuma [73] noteikumiem, aizsargjoslu un trašu platumi ir diferencēti ne tikai attiecībā uz vidēja un zema sprieguma līnijām, bet arī ņemot vērā dažādās infrastruktūras guldīšanas vides. Meža teritorijās, kur aizsargjoslu platumi ir paredzēti aizsargjoslām, platuma vērtība tiek noteikta 60 metru robežās) un mērķa teritoriju, kurā nepieciešama veģetācijas analīze. Šie faktori ietekmēja lidojuma augstuma un ātruma izvēli, lai nodrošinātu pietiekamu precizitāti veģetācijas identifikācijai. Testa lidojumu rezultāti parādīja, ka faktiskie lidojuma augstuma rādītāji variē no 30 līdz 40 metriem virs zemes, savukārt lidojuma ātrums ir diapazonā no 5 līdz 7 metriem sekundē.

a.

| Izveidots | TO_ID | Iezīme      | ID       | Tabula | Tabula              | Klases1 | Klase   | Grupa            | Izveidots        | X1          | Y1          | X2          | Y2          | Ģeometriskā vide                                  |
|-----------|-------|-------------|----------|--------|---------------------|---------|---------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------------------------|
| Talsi-1   | cbfg8 | 33071#E0189 | 2.05E+08 | 201    | VS līnijas elements | 1006    | AS-3x35 | 20 kV darba spr. | Kalvadur līnijas | 76.10570563 | 347847.8338 | 414968.3164 | 347807.3727 | 415033.1445 Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |
| Talsi-1   | cbfg8 | 33071#E0189 | 2.05E+08 | 201    | VS līnijas elements | 1006    | AS-3x35 | 20 kV darba spr. | Kalvadur līnijas | 77.93623338 | 347616.1211 | 415358.8203 | 347576.7188 | 415426.0625 Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |

b.

| Izveidots | TO_ID | Iezīme      | ID       | Klases | Klase     | Grupas | Gru  | X          | Y          | X (WGS)    | Y (WGS)    | Iezīmē | Izg. | Pastā | Pastaba esamība |
|-----------|-------|-------------|----------|--------|-----------|--------|------|------------|------------|------------|------------|--------|------|-------|-----------------|
| Talsi-1   | cbfg8 | 33071#E0189 | 2.05E+08 | 600    | VS koka I | 1092   | Koka | 347807.973 | 415033.145 | 57.2653962 | 22.5912176 | 6      | 2018 | -     | BEZ pastabēm    |
| Talsi-1   | cbfg8 | 33071#E0189 | 2.05E+08 | 600    | VS koka I | 1092   | Koka | 347769.32  | 415098.762 | 57.2650613 | 22.5923185 | 5      | 2018 | -     | BEZ pastabēm    |

5.6.att. Izejas dati (a. līniju veida elementiem, b. punktveida elementiem) ĢIS datu bāzes lidojuma plānošanai.

### 5.1.3. Datu kopu iegūšanas realizācijas parametri

Lai nodrošinātu stabilu *RGB* un *LIDAR* datu vākšanas procesa realizāciju, kas atbilstu inspekcijas procesa vajadzībām, ir nepieciešama datu iegūšanas procesa darbplūsma, kas ietver šādas galvenās komponentes: datu iegūšanas operacionālā vadība, datu iegūšanas maršrutu plānošana, *LIDAR* datu kopas vākšana un apstrāde kvalitātes validācijai, *RGB* datu kopas vākšana un apstrāde kvalitātes validācijai. 5.4. tab. ir apkopotas *RGB* un *LIDAR* datu kopas iegūšanas realizācijas komponentes ar nepieciešamajām darbībām un kompetencēm.

## Datu iegūšanas realizācijas organizācijas aktivitātes

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

## 5.1.4. Eksperimenta rezultātu kopsavilkums

Šajā sadaļā ir veikta pētījuma praktiskā validācija par *RGB* un *LIDAR* datu kopu ievākšanas metodes pielietojumu, izmantojot bezpilota lidaparātus, ar mērķi tās identificēt defektus elektrolīniju uzturēšanai un inspekcijai balstoties uz iegūto datu kopu apstrādes rezultātu.

Rezultātā, plānotajā poligonā tika savāktas *RGB* un *LIDAR* datu kopas (apjomi ir parādīti 5.5. tab.), aptverot 550 km vidējā sprieguma gaisvadu līnijas un 100 km zemā sprieguma gaisvadu līnijas. Salīdzinot ar manuālās inspekcijas ātrumu, kur AS “Sadales

tīkls” gaisvadu līniju inspekcijas vidējais dienas apjoms bez datu iegūšanas sastāda 6 km, var secināt, ka datu iegūšanas ātrums pārsniedz esošā procesa efektivitāti vairāk nekā trīs reizes. Jāņem vērā, ka datu iegūšana ir tikai viena no divām procesa fāzēm, kur otrā fāze ietver datu analīzi, kas ir nepieciešama defektu identificēšanai.

5.5.tabula

Savāktā RGB un LIDAR datu kopu apjomi

| Datu veids      | Datu kopas apjoms, TB | Failu skaits | Datu vākšanas ātrums, km/dienā                                                                             | Inspekcijas ātrums manuālajā režīmā, km/dienā |
|-----------------|-----------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| RGB datu kopa   | 0,79 TB               | 159235       | Vidēji 20 km/dienā                                                                                         | 6 km/dienā                                    |
| LIDAR datu kopa | 4,02 TB               | 828          | Vidēji 30-35 km/dienā (atkarībā no laika apstākļiem un līnijas sazarojuma, maksimālais ātrums 60 km/dienā) |                                               |

Datu iegūšanas procesā, izmantojot bezpilota lidaparātus ar optiskās kameras un LIDAR sensoriem elektropārvades līniju defektēšanai, tika identificēti vairāki ierobežojumi, kas var ietekmēt datu kvalitāti un ievākšanas efektivitāti:

- Laika apstākļu ierobežojumi:
  - o Ietekme uz LIDAR datiem: lietus, migla un stiprs vējš var ievērojami ietekmēt LIDAR datu precizitāti un uzticamību. Mitruma daļiņas gaisā var izkliedēt lāzera starus, radot neprecīzus mērījumus vai datu zaudējumus.
  - o Ietekme uz RGB datiem: Slikta redzamība, piemēram, migla vai blīvi mākoņi, var samazināt RGB attēlu kvalitāti. Apgaismojuma apstākļi, piemēram, ēnas vai tiešā saules gaisma, var radīt problēmas attēlu kontrastā un redzamībā.
- Bezpilota lidaparātu lidojuma laika ierobežojumi - akumulatoru ierobežojumi: bezpilota lidaparātu akumulatoru kapacitāte ierobežo lidojuma laiku, kas var būt nepietiekams lielu teritoriju vai garu elektrolīniju pārklājumam vienā lidojumā. Tas var prasīt vairākus lidojumus un var izraisīt operāciju efektivitātes samazināšanos.
  - o Lidojuma drošības noteikumi un regulējumi (Ministru kabineta noteikumi Nr.248 "Bezpilota gaisa kuģu lidojumu noteikumi" [101])
  - o Lidojumu ierobežojumi - atsevišķās teritorijās var būt noteikti lidojumu ierobežojumi, piemēram, aizliegtas zonas (virs lidostām, militārajiem objektiem utc.) vai augstuma un distances (lidojumi ārpus tiešās redzamības zonas) ierobežojumi, kas var apgrūtināt lidaparāta lidojumu un datu ievākšanu.
  - o Nepieciešamās atļaujas - lidojumiem noteiktās teritorijās var būt nepieciešamas speciālas atļaujas, kas var radīt papildu administratīvos izaicinājumus un aizkavējumus. Lidojumu maršruti var šķērsot arī privātīpašumos esošās elektrolīnijas, tāpēc zemes īpašniekiem varētu



radīties jautājumi par lidojumiem, lai mazinātu komunikāciju ir jāveic papildu zemes īpašnieku apziņošana.

- Tehniskie ierobežojumi:
  - Sensoru kalibrācija – jānodrošina, ka *LIDAR* sensors ir pareizi saskaņots ar bezpilota lidaparāta koordinātu sistēmu, ka mērījumu attālumi ir precīzi un atbilst reālajai videi, ka *LIDAR* sensora datu iegūšana ir precīzi sinhronizēta ar citiem datu avotiem (*GPS*), lai nodrošinātu datu precizitāti.
  - Lidaparātu tehniskā uzturēšana - bezpilota lidaparāta tehniskais stāvoklis un regulāra uzturēšana ir būtiska, lai nodrošinātu to efektivitāti un uzticamību. Tehniskas kļūmes (neatbilstošs datu pārklājums un blīvums, neprecīzas dažādu materiālu atstarošanas īpašības) var radīt ievērojamus datu ievākšanas pārtraukumus.

Šo ierobežojumu apzināšana un to iespējamā mazināšana ir būtiska, lai optimizētu datu ievākšanas procesus un uzlabotu elektrolīniju defektēšanas efektivitāti un precizitāti.

Datu iegūšana, izmantojot bezpilota lidaparātus, ir ātrāks un efektīvāks process, salīdzinot ar manuālo inspekciju, kas šobrīd tiek veikta AS “Sadales tīkls”, izmantojot cilvēkresursu. Salīdzinājums veikts, ņemot vērā datu vākšanas apjomu un ātrumu, kas nepieciešams, lai veiktu pilnīgu elektrolīniju inspekciju, izmantojot abas metodes. Tika analizēti gan tiešais laika patēriņš datu vākšanai, gan arī papildu faktori, piemēram, nepieciešamās atļaujas, piekļuves grūtības un darba drošības aspekti. Pēc apkopotās informācijas (5.6. tab.) no pētījumā iegūtiem rezultātiem par datu vākšanu un AS “Sadales tīkls” esošo pieredzi par Latvijas vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras inspekcijām, var redzēt, ka bezpilota lidaparātu, kas aprīkoti ar *RGB* kamerām un *LIDAR* sensoriem, priekšrocības ir:

- Spēja ātri un efektīvi savākt datus par plašām teritorijām (*RGB* datu kopas iegūšanai – 20 km/dienā, *LIDAR* datu kopas iegūšanai – 30 km/dienā).
- Liela savākto datu apjoma nodrošināšana vienā lidojumā, kas ļauj iegūt detalizētus un daudzveidīgus datus (datu esamība visiem tīkla elementiem neatkarībā no defektu esamības).
- Mazāks risks cilvēka dzīvībai un veselībai, jo datu vākšana notiek attālināti (nav nepieciešama fiziska piekļuve privātīpašuma teritorijām, kur mēdz būt suņi vai citi dzīvnieki un kukaiņi (ērces) meža teritorijās)).
- Spēja ātri pielāgoties dažādiem apstākļiem un pārbaudāmām vietām (apdzīvotas vietas, purvainās zonas, meži).

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)<br>30 km/dienā ( <i>LIDAR</i> datu kopa) | 6 km/dienā                                                                                                     |
| Datu apjoms | Liels, daudzveidīgs (*.jpg, *.las)                                           | Ierobežots (balstīts uz eksperta lēmumu objektā, atkarīgs no piekļuves, informācija tikai par fiksēto defektu) |
| Drošība     | Augsta, attālināta vadība                                                    | Zema, paaugstināts risks                                                                                       |
| Pieejamība  | Labā, neatkarīga no zemes apstākļiem                                         | Ierobežota, atkarīga no piekļūšanas objektiem (meži, purvi)                                                    |
| Elastība    | Augsta, ātra pielāgošanās                                                    | Zema, lēna pielāgošanās (papildus speciālais ekipējums)                                                        |

Izmantojot digitālās inspekcijas metodi un datu iegūšanai izmantojot bezpilota lidaparātus, ir iespējams būtiski uzlabot elektroinīju inspekcijas procesa efektivitāti (palielinot datu iegūšanas ātrumu līdz 20 km/dienā un nodrošināt datu esamību visiem pārbaudītājiem tīkla elementiem), drošību (samazinot cilvēka veselības risku piekļūšanai objektiem sarežģītajos vides apstākļos) un precizitāti, salīdzinot ar manuālajām metodēm. Šī sadaļa kalpos kā pamats turpmākai datu analīzei un secinājumu apkopošanai, kas ir nepieciešami, lai atbildētu uz pētījuma jautājumiem un sasniegtu izvirzītos mērķus.

## 5.2. Datu analīzes process

Saskaņā ar darba "Alternatīvās metodes defektu identificēšanai" nodaļas kopsavilkumā digitālās inspekcijas risinājuma piedāvājumu (4.26. att.), otrais nozīmīgais posms ir iegūto datu analīze un defektu identificēšana. Šis process ir kritisks, lai nodrošinātu precīzu un efektīvu infrastruktūras stāvokļa novērtējumu, kas balstās uz savāktajiem datiem no attiecīgajiem sensoriem un datu ievākšanas ierīcēm. Datu analīzes posms ietver rūpīgu savāktu datu apstrādi un interpretāciju. Tas sākas ar datu pārskatīšanu un priekšapstrādi, kurā tiek izfiltrēti traucējumi un kļūdaini mērījumi. Tiek izmantota attēlu datu analīzes darbplūsma, kas attēlota 4.10. att., ietverot *RGB* attēlu, to attēlu metadatu un elementu un defektu anotāciju izmantošanu mākslīgā intelekta objektu atpazīšanas modeļa pielietojumam, kā aprakstīts darba sadaļā "Datu analīze vizuālo defektu noteikšanai".

Lai uzsāktu datu apstrādi praktiskajā pētījumā, ir būtiski sākotnēji noteikt, kuri analīzes rīki vai programmatūras tiks izmantoti. Šī atlase ir kritiska, jo izvēlētie instrumenti būtiski ietekmē datu apstrādes efektivitāti, precizitāti un gala rezultātu kvalitāti. Precīza analīzes rīku vai programmatūras izvēle ir būtiska veiksmīgas datu apstrādes nodrošināšanai praktiskajā pētījumā, jo tā garantē analīzes precizitāti un atbilstību pētījuma prasībām un mērķiem.

Digitālās defektēšanas risinājumā datu analīzes uzdevums ir noteikt virszemes elektropārvades līniju tehniskā stāvokļa novirzes un identificēt defektus infrastruktūras elementos:

- Vizuāli identificējami tehniskā stāvokļa defekti - infrastruktūras elementi var ciest no dažādiem vizuāli konstatējamiem defektiem, kas var ietekmēt to funkcionēšanu un drošību, piemēram konstrukcijas bojājumi (mehāniskie bojājumi, deformācijas, korozijas pazīmes), izolācijas bojājumi (plaisas, noberzumi), elektriskie bojājumi (sadedzināti savienojumi):
  - Vizuālie defektu veidi līniju elementos – pārlaidumos.
  - Vizuālie defektu veidi punktveida elementos – balstu konstrukcijās, sadales punktos.
- Ģeotelpiskajiem mērījumiem identificējamie tehniskā stāvokļa defekti:
  - Veģetācijas esamības trašu koridoros novērojami defekti.
  - Gabarītmērījumi attiecībā uz minimālo attālumu noteikšanu no zemāka vada pārlaidumā līdz zemes līmenim.
  - Vadu nokares identificēšana.
  - Balstu izsvēršanās analīze.
  - Vertikālie distances mērījumi vadiem balstu līmenī.
  - Infrastruktūras elementu izvietojuma precizēšana.

### 5.2.1. Datu kopu apstrādes rīku funkcionalitātes prasības tehniskie parametri

Atbilstoši šim uzdevumam ir apkopotas datu apstrādes programmatūras tehniskās prasības (5.7. tab.), kur atsevišķi ir izdalīts vispārējais sistēmas modulis ar funkcionālajiem un nefunkcionālajiem (veiktspējas, lietojamības (interfeisa) un drošības) prasību tiptiem, ka arī atsevišķi apkopotas nepieciešamas funkcionalitātes *LIDAR* datu analīzes modulim, lai realizētu datu ģeotelpisko analīzi un *RGB* attēlu datu kopas analīzes moduli, lai realizētu vizuālo infrastruktūras defektēšanu.

5.7.tabula

Datu apstrādes programmatūras tehnisko prasību parametri inspekcijas procesa vajadzībām

| Sistēmas modulis | Prasības tips | Prasību apraksts                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vispārējais      | 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 katalogu skatīt 1. pielikumā) |
| Vispārējais      | Funkcionāls   | IS nodrošina automatizēto ģeotelpisko mērījumu veikšanu, izmantojot <i>LIDAR</i> datus tīkla modeļa jeb digitālā dvīņa izveidei.                                                                                                                                   |
| Vispārējais      | Funkcionāls   | Ģeotelpisko datu apstrāde un interpretācija                                                                                                                                                                                                                        |

| Sistēmas modulis          | Prasības tips               | Prasību apraksts                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5.7. tabula (turpinājums) |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Vispārējais               | Nefunkcionāls /veiktspējas/ | Veiktspēja un mērogojamība: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Efektivitāte – algoritmi, lai efektīvi apstrādātu lielas datu kopas</li> <li>- Mērogojamība - iespēja mērot atbilstoši RGB un LIDAR datu izmēram un sarežģītībai</li> </ul> Elementu apjoms augstas veiktspējas datu darbībai:<br>Pētījuma apjomi:<br>VS/ZS virszemes infrastruktūra – 650 km (10342 punktveida elementī)<br>AS “Sadales tīkls” kopējie virszemes infrastruktūras apjomi:<br>VS/ZS virszemes infrastruktūra – ~60000 km |
| Vispārējais               | Nefunkcionāls /veiktspējas/ | Lietotāju skaits: 20 (vienlaicīgi lietotāji)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Vispārējais               | Nefunkcionāls /veiktspējas/ | Datu glabāšana, liels ātrums (vismaz 1 Gbit/s) apjomīgo datu kopu augšupielādei un apstrādei                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Vispārējais               | Funkcionāls                 | IS nodrošina neapstrādātu datu pirmapstrādi (ieskaitot apstrādi, tīrīšanu, analīzi)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Vispārējais               | Funkcionāls                 | Atbalstītie failu formāti: *.las (Punktu Mākonis), *.laz, *.csv, *.jpeg, *.json, *.jpeg, *.jpg( navigācija vidē un laika zīmogi)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Vispārējais               | Funkcionāls                 | Integrācijas — API vai spraudņi integrēšanai ar AS “Sadales tīkls” ĢIS (ģeogrāfiskās informācijas sistēmas) programmatūru vai citām atbilstošām platformām                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Vispārējais               | Funkcionāls                 | IS nodrošina simulāciju (digitālā dvīņu modeļa (AI/ML) funkcionalitātes ar mērķi ieviest paredzamo uzturēšanu)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Vispārējais               | Funkcionāls                 | Bibliotēkas: tīkla komponentes un tīkla komponentu parametri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Vispārējais               | Nefunkcionāls /drošības/    | Mākoņu risinājums ES zonā (ar lokālu alternatīvu)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Vispārējais               | Nefunkcionāls /drošības/    | Drošība un datu pārvaldība:<br>Bez trešo pušu piekļuves ST datiem – IS nodrošina datu integritāti un drošību apstrādes un uzglabāšanas laikā. Rīki apjomīgo datu kopu efektīvai organizēšanai, glabāšanai un pārvaldībai.                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Vispārējais               | Nefunkcionāls /drošības/    | Lietotāji ar divu faktoru autorizāciju un autentifikāciju<br>LDAP ( <i>Lightweight Directory Access Protocol</i> ) (vēlams, nav obligāti)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Vispārējais               | Funkcionāls                 | Koordinātu sistēma ar iespēju konvertēt uz LKS-92 vai citu atbilstošu alternatīvu (atbilstoši ĢIS datu pārvaldības un datu vākšanas prasībām)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Vispārējais               | Funkcionāls                 | Izstrādātājam jānodrošina IS arhitektūras darbplūsmas, ieskaitot: datu importēšana, pirmapstrāde, analīze, atskaišu veidlapas un datu izvide ST iekšējai IS (ĢIS, JIRA utt.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Vispārējais               | Nefunkcionāls /interfeiss/  | IS atbalsta regulējamus vairākus skatu izkārtojumus (3D modeļa ekrāns no Punktu mākoņa, 2D aktīvu dati no ĢIS, attēlu kolekcijas skats atbilstoši atlasītajiem elementiem) vienā ekrānā                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Vispārējais               | Nefunkcionāls /interfeiss/  | Lietotāja saskarne un lietotāja pieredze (UI/UX): <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intuitīvs interfeiss – lietotājam draudzīgs interfeiss ērtai navigācijai un darbībai</li> <li>- Pielāgošana — iespējas pielāgot skatus, rīkus un darbplūsmas atbilstoši lietotāja vēlmēm</li> </ul>                                                                                                                                                                                                               |

| Sistēmas modulis            | Prasības tips              | Prasību apraksts                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5.7. tabula (turpinājums)   |                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Vispārējais                 | Nefunkcionāls /interfeiss/ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dokumentācija un atbalsts - visaptveroša dokumentācija un atbalsta resursi lietotājiem</li> <li>- Operatīvo tehnisko atbalstu un palīdzību, ja ST lietotāji pieteic IS problēmas atbilstoši biznesa mērķiem</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| LIDAR datu analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina datu ievadi un saderību:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vairāku failu formātu atbalsts: iespēja lasīt dažādus LIDAR datu formātus, piemēram, LAS, LAZ utt.</li> <li>- Integrācija ar LIDAR sensoriem - saderība ar dažādiem LIDAR sensoriem un to datu izvadiem.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| LIDAR datu analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina Punktu mākoņa datu apstrādi</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Punktu mākoņa apstrāde – algoritmi, lai efektīvi pārvaldītu un apstrādātu punktu mākoņa datus</li> <li>- Filtrēšana un trokšņu samazināšana — rīki trokšņa, novirzes un neatbilstošu punktu noņemšanai</li> <li>- Datu segmentēšana un klasifikācija - iespēja segmentēt dažādus objektus vai reljefa tipus un klasificēt punktus: <ul style="list-style-type: none"> <li>o Tīkla elementi: līniju (vadi) laidumi, stabi, transformatori, X-svīras</li> <li>o Vide: veģetācija (krūmi, koku stumbri, koku vainagi), ūdenstilpes, ceļi, ēkas, dzelzceļi, ēkas (piemēram, transformatoru apakšstacija)</li> <li>o Līniju krustojuma vietas ar citām inženierkomunikācijām (citi vadi, caurules)</li> <li>o Zemes reljefs</li> <li>o utt.</li> </ul> </li> <li>- Iezīmju izvilksana – algoritmi konkrētu pazīmju (malu, stūru utt.) noteikšanai un izvilksanai no punktu mākoņa.</li> <li>- Reģistrācija un izlīdzināšana - iespēja reģistrēt vairākus skenējumus un precīzi tos izlīdzināt, lai iegūtu visaptverošu skatu</li> <li>- Interpolācija un rekonstrukcija — paņēmieni, lai aizpildītu nepilnības un rekonstruētu trūkstošās daļas punktu mākonī</li> </ul> |
| LIDAR datu analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina automatizētu ST virszemes infrastruktūras 3D modeļa izveidi</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- funkcionalitāte modelēt infrastruktūru atbilstoši konfigurējamam balstu novietojumam (vēlams, nav obligāts)</li> <li>- funkcionalitāte modelēt infrastruktūru atbilstoši konfigurējamo līniju tipam</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| LIDAR datu analīzes modulis | Nefunkcionāls /interfeiss/ | LIDAR datu sinhronizācija navigācijā ar aktīvu datiem (ĢIS datiem) 2 slāņos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| LIDAR datu analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina analīzes kritēriju konfigurācijas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Veģetācijas un trases zonas parametri atbilstoši regulācijas noteikumiem un biznesa prasībām</li> <li>- Ģeotelpiskie mērījumu parametri (attālumu mērījumi, balstu slīpuma analīze)</li> <li>- Funkcionalitāte modelēt infrastruktūru atbilstoši konfigurējamiem laikapstākļu parametriem (ar mērķi izveidot modeli līniju ģeometriskām izmaiņām – attālumiem, pārspriegotiem vadiem)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| LIDAR datu analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina LIDAR atribūtu un papildu datu parametru uzturēšanu:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Datu kopas izveides dati un laika zīmogs</li> <li>- Datu kopas savākšanas temperatūra</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

| Sistēmas modulis                       | Prasības tips              | Prasību apraksts                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5.7. tabula (turpinājums)              |                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| LIDAR datu analīzes modulis            | Funkcionāls                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Datu kopas importēšana no iekšējās IS atbilstoši procesa vajadzībām</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| LIDAR datu analīzes modulis            | Nefunkcionāls /interfeiss/ | <p>IS nodrošina vizualizāciju un analīzi:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Krāsaina 3D vizualizācija —interfeiss punktu mākoņu datu vizualizācijas dizainu 3D slāņos</li> <li>- 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) <ul style="list-style-type: none"> <li>o Atskaites tabulas formātā excel, csv.</li> <li>o Attālumu, leņķu, tilpumu mērīšana konfigurējamiem laikapstākļiem</li> </ul> </li> <li>- Šķēsgriezumu analīze - spēja izveidot šķēsgriezumus un veikt analīzi konkrētos interesējošos reģionos</li> <li>- Izmaiņu noteikšana – rīki vairāku skenējumu salīdzināšanai un laika gaitā izmaiņu noteikšanai. Modelis ir atkārtoti lietojams nākamajiem lidojumiem, sistēmai ir jāatklāj atšķirības starp esošo režīmu un iegūtajiem datiem</li> </ul> |
| LIDAR datu analīzes modulis            | Nefunkcionāls /interfeiss/ | Navigācija (tuvināšana/tālināšana, panoramēšanas tālummaiņa un pagriešana)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| LIDAR datu analīzes modulis            | Funkcionāls                | <p>Datu eksportēšana un integrācija:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eksporta formāti - iespēja eksportēt apstrādātos datus dažādos formātos izmantošanai citās programmatūrās vai sistēmās</li> <li>- Integrācijas API — jābūt iespējai API vai spraudņi integrēšanai ar ST ĢIS vai citām atbilstošām platformām</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| LIDAR datu analīzes modulis            | Nefunkcionāls /interfeiss/ | Filtrēšana, meklēšana, vizualizācija kartes skatā konfigurējami pārkāpumi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| LIDAR datu analīzes modulis            | Funkcionāls                | IS nodrošina precizitātes novērtējumu. Validācijas rīki, lai novērtētu apstrādāto datu precizitāti salīdzinājumā atsauces datiem.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| LIDAR datu analīzes modulis            | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina atskaites izveidi (tabulu un vizuālo) un eksportēšanu:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pārklājuma LIDAR datu pārskats</li> <li>- ĢIS datu precizitāte - aktīvu atrašanās vietas precizitāte</li> <li>- Veģetācijas trases attīrīšana</li> <li>- Vadu attālumi laidumos</li> <li>- Vadu nokares laidumos</li> <li>- Balstu slīpums</li> <li>- Vadu, āķu attālums uz stabiem</li> <li>- Vadu novietojums (vertikāls, horizontāls, vertikāls-trijstūris, horizontāls-trīsstūris, taisnstūris)</li> <li>- Ekstrēmas aktīvu izmaiņas (simulācijas rezultāti)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | Automātiska un manuāla defektu identificēšana, saskaņā ar defektu katalogu un marķējumu ar papildu atribūtu datiem (piemēram: defekta ID vai nosaukums, bīstamības pakāpe, prioritāte)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina attēla ievadi un saderību:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vairāku formātu atbalsts - iespēja skatīties dažādus attēlu formātus (*.jpeg, *.jpg)</li> <li>-</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| Sistēmas modulis                       | Prasības tips              | Prasību apraksts                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5.7. tabula (turpinājums)              |                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kameras integrācija - saderība ar dažādiem kameru veidiem, izšķirtspēju un krāsu telpām</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina priekšapstrādi un uzlabošanu:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trokšņu samazināšana - filtri un algoritmi, lai samazinātu troksni un artefaktus attēlos</li> <li>- Attēla uzlabošana - rīki spilgtuma, kontrasta, asuma u.c. regulēšanai.</li> <li>- Krāsu korekcija - metodes, lai koriģētu krāsu līdzsvaru un nodrošinātu konsekventu krāsu attēlojumu.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                             |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina segmentāciju un objektu identificēšanu:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Segmentācijas algoritmi - iespēja segmentēt attēlus interesējošos reģionos vai objektos</li> <li>- Objektu noteikšana un atpazīšana - algoritmi identificētu un atpazītu objektu attēlošanai</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | IS nodrošina defektu anotācijas eksportēšanu ar koordinātām, defekta ID, bīstamības pakāpi, attēla ID                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | IS nodrošina iezīmju izņemšanu un analīzi — rīki malu, stūru, faktūru u.c. noteikšanai, funkciju ekstrakcijai un algoritmus tekstūru modeļu analīzei attēlos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | IS nodrošina statistisko analīzi – rīki attēlu datu statistiskās analīzes veikšanai.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | <p>IS nodrošina klasifikāciju un kategorizēšanu:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mašīnmācīšanās modeļi - mašīnmācīšanās modeļu integrācija attēlu klasifikācijai un kategorizēšanai</li> <li>- Semantiskā segmentācija — paņēmieni semantisko apzīmējumu piešķiršanai dažādām attēla daļām</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Nefunkcionāls /interfeiss/ | <p>IS nodrošina vizualizāciju un prezentāciju:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Attēlu displejs - lietotājam draudzīgs interfeiss attēlu parādīšanai, attēla atrašanās vieta kartē ar skata leņķi un daudzstūris ar redzamu laukumu un to analīzes rezultāti</li> <li>- Attēla saistīšana ar aktīviem atbilstoši attēla redzamajam laukumam</li> <li>- Anotācijas rīki — rīki objektu vai elementu anotēšanai un atzīmēšanai attēlos labākai vizualizācijai un izpratnei</li> <li>- Salīdzinošā analīze — rīki, lai salīdzinātu un analizētu vairākus attēlus vai daudzstūrus blakus.</li> </ul> |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | IS nodrošina datu eksportu – iespēju eksportēt apstrādātos attēlus vai analīzes rezultātus dažādos formātos (*.xls, *.csv u.c.).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls                | IS nodrošina mērogojamību - spēju apstrādāt dažādu izmēru un izšķirtspējas attēlus.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| Sistēmas modulis                       | Prasības tips | Prasību apraksts                                                                                                              |
|----------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5.7. tabula (turpinājums)              |               |                                                                                                                               |
| RGB attēlu datu kopas analīzes modulis | Funkcionāls   | IS nodrošina attēlos fiksēto defektu anotāciju un rezultātu saglabāšanu saskaņā ar datorredzes un mašīnmācīšanās standartiem. |

Lai īstenotu izvirzīto pētījumu un uzsāktu datu analīzi – digitālo inspekciju, no procesa perspektīvas tika sagatavoti šādi dati:

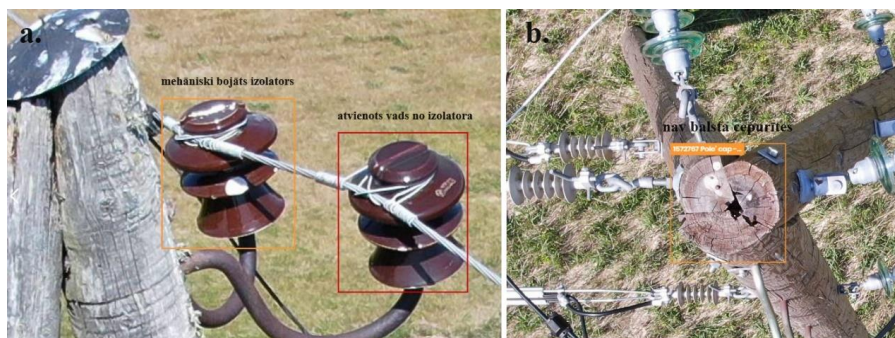
- Ģeogrāfiskās informācijas sistēmas dati, ietverot izvietojuma koordinātes, elementu identifikatorus un atribūtu datus.
- Klasificēti vai neapstrādāti *LIDAR* dati, kas aptver pētījuma objekta zonu.
- *RGB* attēli, kas asociēti ar tīkla elementiem.
- Informācija par veģetācijas apjoma limitiem trašu tīrīšanas koridoros un aizsargjoslās.
- Saraksts ar balstu konstrukcijas tipiem, līniju veidiem.
- Informācija par datu sliekšņiem automātiskai risku novērtēšanai un atskaites apjoma definēšana.

Šie dati kalpo par pamatu turpmākajām analītiskajām procedūrām un nodrošina uzticamu un visaptverošu informācijas bāzi defektu identificēšanai un novērtēšanai. Datu analīzes process ir būtisks digitālās defektēšanas procesā, jo tas ļauj sistemātiski apstrādāt un interpretēt visdažādāko informāciju par infrastruktūras stāvokli, ko sniedz dažādas avotu, ģeogrāfisko informācijas sistēmu dati, *LIDAR* uzņēmumi un *RGB* attēli. Šis process ļauj uz datiem balstīti identificēt esošos un potenciālos defektus un novērtēt to smagumu. Tas palīdz uzlabot infrastruktūras uzturēšanas efektivitāti un drošību, samazinot neparedzētu traucējumu risku un optimizējot resursu izmantošanu.

### 5.2.2. Infrastruktūras vizuālais tehniskā stāvokļa novērtējums

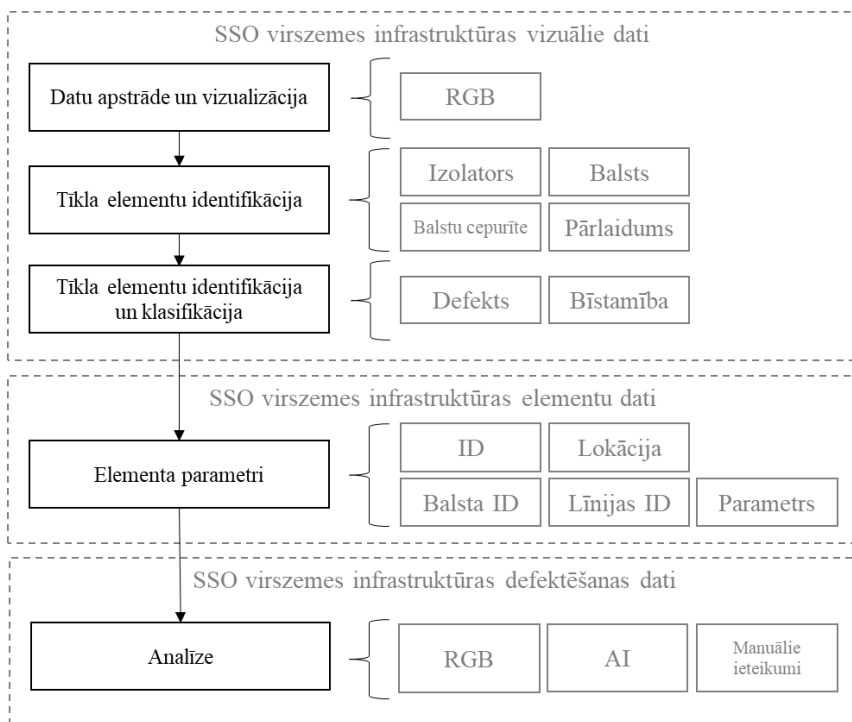
Viens no būtiskākajiem infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanas komponentiem ir vizuāli identificējamo defektu atklāšana un analīze. Vizuālie defekti infrastruktūras tehniskajā novērtējumā var tikt klasificēti divās kategorijās: viegli pamanāmie defekti, kad trūkst kāda no tīkla elementa komponentēm, un grūti pamanāmie defekti, kuru identificēšanai nepieciešama detalizētāka pārbaude, piemēram, mehāniski bojāts izolators vai izkrituši stiprinājumi, kā redzams 5.7. att..





5.7.att. Vizuālo defektu piemēri (a. Infrastruktūras elementa bojājumi b. Infrastruktūras elementa komponentes neesamība).

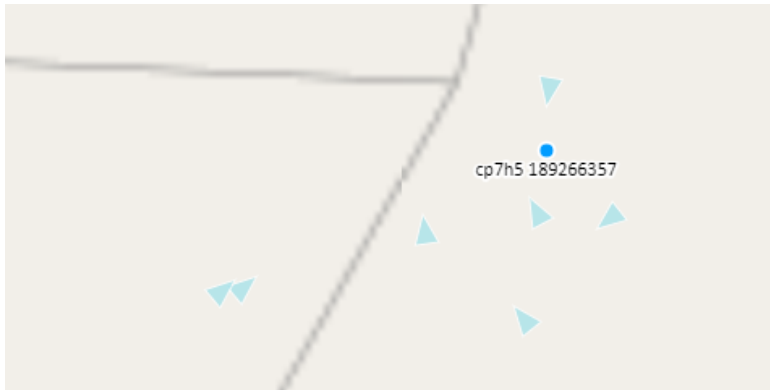
Datu attēlu apstrādes process ietver daudzpakāpju procedūras, kas paredzētas attēlu apstrādei un interpretācijai ar mērķi izdalīt no tiem noderīgu informāciju. Pētījuma ietvaros tika izmantota *Hepta Insights* programmatūras platforma, jo tā nodrošina definētos (5.7. tab.) programmatūrai tehnisko prasību parametrus un funkcionalitātes vizuālo defektu identificēšanai vajadzībām inspekcijas procesa ietvaros. Programmatūrā ietver mākslīgā intelekta *YOLO (CNN - Convolutional Neural Network)* metodes izmantošanu objektu identifikācijas modeļu apmācībai, izmantojot *yolov8* versiju, kur modeļu apmācība notiek uz *AWS (Amazon Web Services) GPU (Graphics Processing Unit)* mašīnām, kas nodrošina lielāku veikspēju salīdzinājumā ar *CPU (Central Processing Unit)* izmantošanas [108]. 5.8. att. ilustrē loģisko procesu, kurā programmatūra analizē elektrotīkla infrastruktūras vizuālos attēlus, iegūtus no BGK lidojumiem, ar mērķi sagatavot gala ziņojumu par konstatētajiem elektrotīkla defektiem.



5.8.att. Datu attēlu apstrādes process.

Datu apstrādes pirmais solis ir datu ievade programmatūrā. Atkarībā no datu apjoma un izmantotās tehnikas veikspējas, šis process var aizņemt ievērojamu laika periodu. Pētījuma ietvaros datu ievadi realizēja atbilstoši sekojošai metodoloģijai:

- *Hepta Insights* platformā tika ielādēta pētījuma poligona pamatinformācija no AS “Sadales tīkls” ĢIS datu bāzes, atbilstoši apjomam, kā norādīts 5.1. att., tādējādi izveidojot pētāmā objekta struktūru bez pievienotajiem *RGB* datiem.
- *RGB* datu kopa ar izmēru 0,79 terabaiti tika augšupielādēta no *FTP* servera, uz kura glabājas dati, kas iegūti no BGK, un tika lejupielādēta *Hepta Insights* platformā.
- Pēc datu lejupielādes visi attēli tika klasificēti un saskaņā ar attēla metadatu informāciju par koordinātēm un skatpunktu tika piesaistīti tuvākajiem punktveida elementiem (piemēram, balstiem, sadales punktiem), kā parādīts 5.9. att..



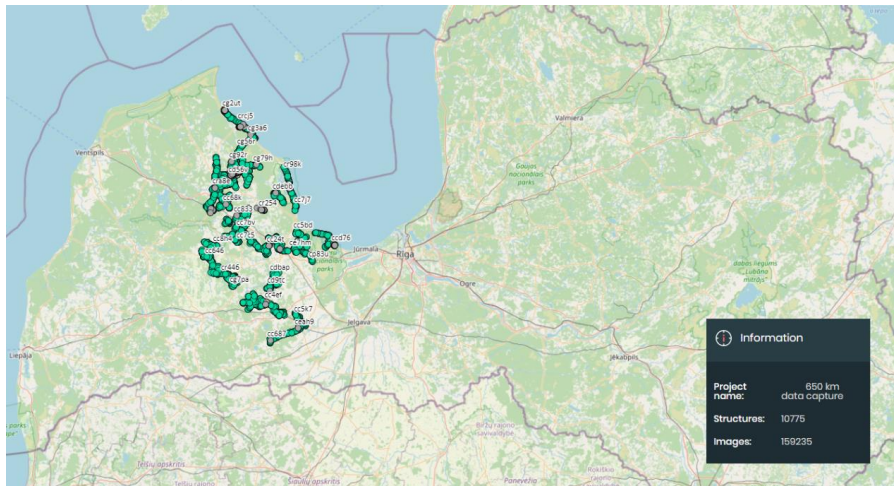
5.9.att. Attēlu uzņemšanas izvietojums un skata virziens.

RGB datu kopas lejupielādes rezultāti ir parādīti 5.10. att., kur zaļā krāsā ir vizualizēta tīkla struktūra ar piesaistītajiem attēliem, bet pelēkā krāsā ir norādīti punktveida elementi, kuriem nav pieejami dati. Šāda vizualizācija ļauj ātri validēt datu esamību attiecībā uz elementiem.

Iemesli, kāpēc realizējamā pētījumā dati nav pieejami ir vairāki:

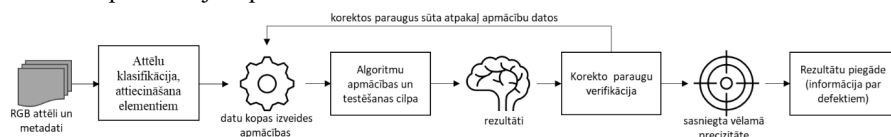
- Esošā ĢIS datu kvalitāte.
- Liegta piekļuve no zemesīpašnieku puses, slēgtās privātīpašuma teritorijas (pētījuma laikā nebija realizēts zemesīpašnieku apziņošanas process par plānotajiem darbiem, bet informācija tika sniegta objektos).

Kvantitatīvi lejupielādes rezultāti ir šādi: no ĢIS datu bāzes tika importēti 10 775 punktveida elementi, tostarp 10 342 balsti un 433 sadales punkti. No FTP servera tika lejupielādēti un klasificēti 159 235 attēli. Sakarā ar iepriekš minētajiem iemesliem, attēli netika piešķirti 213 balstu konstrukcijām, kas veido 2,05% no plānotā apjoma.



5.10.att. Datu lejupielādes statusa vizualizācija.

Kad dati ir klasificēti, jāveic datu apstrāde saskaņā ar procesa soļiem, kuri redzami 5.8. att., lai identificētu tīkla elementus. Procesu automatizācijai jāizmanto defektu atpazīšanas funkcionalitātes. Ņemot vērā sadales operatora infrastruktūras elementu un defektu daudzveidību un faktu, ka sadales operatoriem katrā valstī piemīt reģiona infrastruktūras un tās tehniskās informācijas specifika (Latvijas sadales operatora AS “Sadales tīkls” defektu katalogs ir sniegts 1.pielikumā), tad sadales operatoriem ir jāizstrāda savai specifikai atbilstošs mašīnmācīšanās modeļu kopums. Modeļa izstrādes procesa secība ir parādīta 5.11.att., kas sakās ar attēlu klasifikāciju un attiecināšanu infrastruktūras elementiem, tad datu kopas sagatavošanu (infrastruktūras attēli, defektu attēlu paraugus un to anotācijas) apmācības algoritmiem un to testēšanai. Nākamais solis ir mašīnmācīšanās testēšana – piedāvāto ieteikumu validācija un apmācības datu kopas papildināšana ar papildus paraugiem. Pēc validācijas ir svarīgi novērtēt modeļa piedāvāto korekto rezultātu īpatsvaru pret kopējo rezultātu, kas dod precizitātes kvantitatīvo rādītāju. Šī precizitātes metrika ir kritiska, lai izvērtētu modeļa spēju pareizi identificēt defektus un pielāgot tālākos optimizācijas soļus, nodrošinot tā atbilstību praktiskajām prasībām.



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

Attēlu klasifikācija un to attiecināšana uz konkrētiem elementiem ir svarīgs solis datu analīzē un interpretācijā. Lai uzsāktu šo procesu, ir nepieciešams izveidot objektu bibliotēkas, kurās tiek detalizēti aprakstīti visi iespējamie elementi, kas jāidentificē. Šīs bibliotēkas kalpo kā atsaucē datubāzes, kas nodrošina nepieciešamo kontekstu un parametrus mašīnmācīšanās modeļu apmācībai un testēšanai.

Objektu bibliotēku izveides process

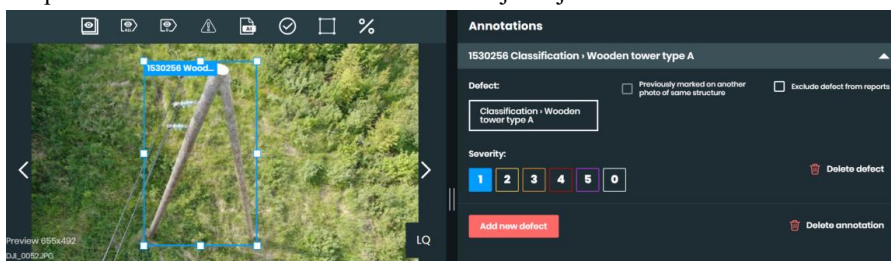
- Elementu identificēšana un aprakstīšana. Sākotnēji jānosaka un jāsaraksta visi potenciālie elementi, kuriem jābūt klasificētiem attēlos. Šie elementi ietver infrastruktūras komponentes:
  - elektrolīniju balsti (vairāki tipi) un to elementi (saraksts ar balstu konstrukcijas tipiem ir sniegts 6.pielikumā): balsta cepurītes, balsta pastabi, pastabu bandāžas, balsta stiprinājums gruntī, balsta traversas, balsta bultskrūves, balsta atsaite, kāši un āķi, izolatori, spaiļes, strāvvadošo daļu aizsardzība;
  - transformatori;
  - jaudas slēdži;
  - atdalītāji un to elementi: atdalītāja piedziņa, atdalītāja kontaktsavienojumi, atdalītāja lokdzēses elementi, atdalītāja zemēšanas naži;

- drošinātājslēdži (tai skaitā drošinātāju pamatnes);
  - vadi (strāvvadošās daļas), to tipi: kailvadi, izolēti vadi, pārklāti vadi, vadu sējumi un stiprinājumi;
  - izlādņi;
  - zemējumi: zemējuma vadi, zemētājs;
  - arī balsta komponentes: marķējumi, stārķa ligzdas uz balstiem, kabeļa aizsargs balstam, kabeļa gals balstam, slēdzenes.
- Elementu atribūtu definēšana (elementa tips, materiāls; defekta grupas, defektu vērtības, defektu svarīguma pakāpes atbilstoši defektu katalogam (1.pielikums)) un strukturēšana. Atribūti organizēti vienotā datu struktūrā, kas ļauj efektīvi pārvaldīt un izmantot informāciju klasifikācijas un analīzes procesā.
  - Treniņdatu sagatavošanai izveidotajās objektu bibliotēkās ir iekļauti attēlu piemēri, kas attēlo katru elementu dažādos apstākļos un perspektīvās (kā parādīts 5.12. att. koka balsta A tipa vairāki attēli no vārākajiem objektiem), lai nodrošinātu modeļa robustumu. Šie attēli kalpos kā treniņdati mašīnmācīšanās modeļu apmācībai, nodrošinot, ka modeļi spēs identificēt elementus pat dažādos vides (ar atšķirīgo fona informāciju vai apgaismojuma apstākļos).



5.12.att. AS “Sadales tīkls” infrastruktūras koka balsta A tipa attēlu piemēri.

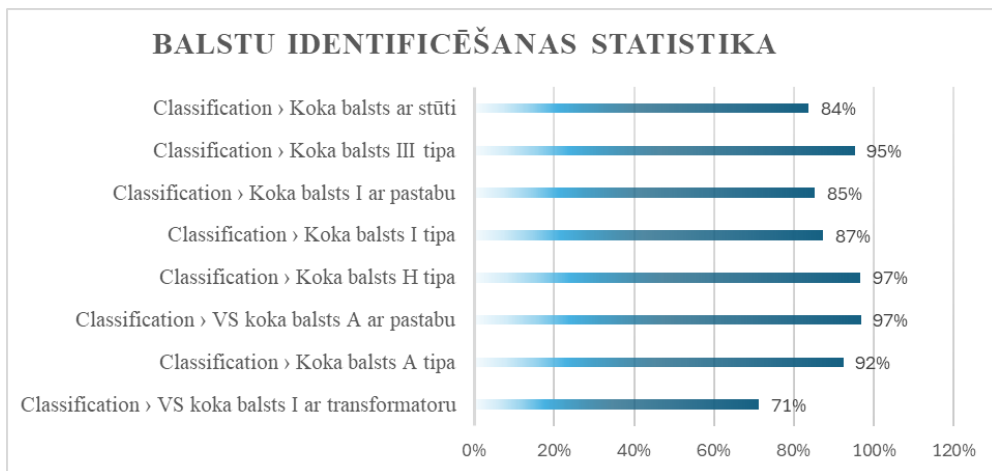
- Datu anotācija un marķēšana - katrs attēls tika anotēts, norādot elementus, kas jāidentificē, un pievienojot tiem atbilstošās metadatu vērtības (elementa vai defekta nosaukumu, identifikatoru, svarīguma pazīmi), kā tas ir attēlots 5.13.att.. Datu marķēšana ir būtiska, lai modeļi varētu mācīties no etalona piemēriem un efektīvi identificēt elementus jaunajos attēlos.



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

- Bibliotēkas uzturēšana un paplašināšana - objektu bibliotēkas pakāpeniski un regulāri jāatjaunina un jāpaplašina, iekļaujot jaunas elementu kategorijas un uzlabojot esošo elementu aprakstus. Tas nodrošina, ka mašīnmācīšanās modeļi var adaptēties un uzturēt augstu precizitāti ilgtermiņā.

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. Šis process ietver automatizēto klasifikāciju (mašīnmācīšanās algoritms izmanto iepriekš definētās objektu bibliotēkas kā pamatu, lai analizētu un klasificētu elementus attēlos). Modelis pārlūko attēlus un identificē elementus, pamatojoties uz iepriekš apgūtajām iezīmēm un atribūtiem. Balstu identificēšanas rezultāts atspoguļots 5.14.att.. Katrai identificētajai elementa instancei modelis piešķir noteikšanas varbūtības procentu, kas norāda uz ticamību, ar kādu elements ir atpazīts. Balstu tipu identificēšanas gadījumā, tas svārstās no 71% līdz 97%. Šie ticamības rādītāji palīdz novērtēt identificēšanas procesa precizitāti un uzticamību. Šāds rezultāts ir iegūts, izmantojot balstu identificēšanas *ML* modeli *Hepta Insights* programmatūra, kur tika izmantoti 3196 attēli apmācības fāzē un 565 attēli testēšanas fāzē.



5.14.att. Balstu identificēšanas statistika.

Identificētie elementi un to noteikšanas varbūtības tiek vizualizēti 5.4. att., ko nodrošina *Hepta Insights* platforma, sniedzot skaidru pārskatu par klasifikācijas rezultātiem. Identifikācijas rezultāti tiek salīdzināti ar fiksētajiem datiem AS “Sadales tīkls” ĢIS sistēmā un eksperta vērtējumiem. Varbūtības procenti (rādītājs, kas norāda, cik liela daļa no prognozētajiem pozitīvajiem gadījumiem patiesībā ir pozitīvi) palīdz identificēt gadījumus, kad nepieciešama manuāla pārbaude vai papildu treniņdatu iekļaušana, lai uzlabotu modeļa spēju atpazīt elementus ar lielāku precizitāti. Šis process arī vizuāli ilustrēts 5.14. att., kur redzams, ka "koka I tipa balstam ar transformatoru" nepieciešama paplašināta iepriekš definēto paraugu kolekcija. Analīze liecina, ka, balstam ar tipu "koka balsts I ar transformatoru" ir par 26% zemāka

identificēšanas varbūtība salīdzinājumā ar balsta tipu "koka balsts A tipa ar pastabu". Tas norāda uz nepieciešamību paplašināt treniņdatu bāzi ar "koka balsts I ar transformatoru" paraugiem, lai uzlabotu modeļa precizitāti un pārliecību par šo konkrētu elementu identificēšanu.

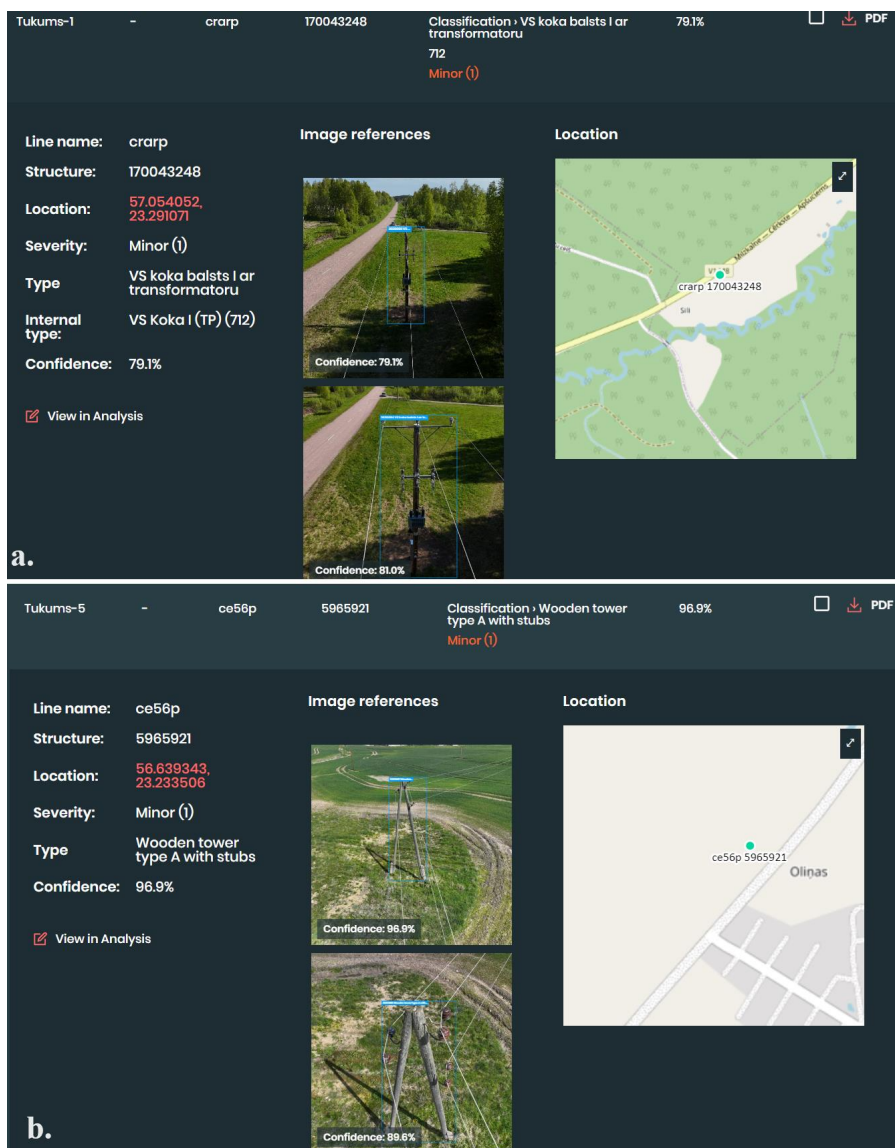
Šis iteratīvais process ir būtisks, lai uzlabotu mašīnmācīšanās modeļa efektivitāti un nodrošinātu tā spēju pielāgoties jauniem datiem un apstākļiem. Analīze, skaidri norāda uz to, ka modeļa precizitātes uzlabošanai nepieciešama plašāka treniņdatu bāze, īpaši attiecībā uz sarežģītākiem balsta tipiem, piemēram, "koka I tipa balstu ar transformatoru", rekomendācijas praktiskajām rīcībām ir apkopotas (5.8. tab.).

5.8.tabula

Rekomendāciju apkopojums identificēšanas precizitātes uzlabošanai

| <b>Faktors</b>                           | <b>Rekomendācija praktiskām rīcībām</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datu daudzveidības nepieciešamība        | "Koka I tipa balstam ar transformatoru" varbūtības rādītājs 71 % norāda uz nepieciešamību palielināt paraugu daudzumu ar tā tipa balsta paraugiem un veidot lielāku datu daudzveidību, lai nodrošinātu modeļa spējai ar lielāku varbūtības rādītāju identificēt šos elementus dažādos apstākļos un perspektīvās.                                                                                                                                              |
| Modeļa pielāgošana un uzlabošana         | Zemāka noteikšanas varbūtība 71 % balsta tipam "Koka I tipa balstam ar transformatoru" salīdzinājumā ar citiem balstu tipiem (84 %-97 %) norāda uz nepieciešamību pielāgot modeļa parametrus un paplašināt treniņdatu kopumu ar šī balsta tipa papildus piemēriem un variācijām. Tas ir būtiski, lai modeļa veikspēja būtu vienlīdz augsta visiem elementu tipiem.                                                                                            |
| Kompleksitātes ietekme uz identificēšanu | "Koka I tipa balsts ar transformatoru", ir sarežģītāks (1 no 8 tipiem, kas sastāv no divām vizuāli atšķirīgajām komponentēm: stabi un transformators) elements salīdzinājumā ar "Koka balstu A tipa ar pastabu", kā liecina rezultāti (5.15.att.), kas varētu izskaidrot zemāko noteikšanas varbūtību. Sarežģītāku elementu atpazīšanai ir nepieciešams vairāk treniņdatu, kas aptver dažādus iespējamus konfigurācijas scenārijus un apgaismojuma apstākļus. |
| Papildu apmācības nepieciešamība         | Lai uzlabotu identifikācijas precizitāti šādam sarežģītākam balsta tipam, nepieciešamas papildu apmācības un vairāk datu paraugu, kas nodrošina dažādu situāciju pārklājumu un palīdz modelim apgūt specifiskās iezīmes.                                                                                                                                                                                                                                      |
| Praktiskās pielietošanas nozīme          | Šie rezultāti norāda uz praktisku nepieciešamību pastāvīgi atjaunot un paplašināt treniņdatu kopas, lai nodrošinātu modeļa spēju efektīvi pielāgoties dažādām situācijām un nodrošināt augstas (< 95 %) precizitātes identificēšanas iespējas.                                                                                                                                                                                                                |





5.15.att. Balstu automātiskās identificēšanas rezultāts (a.Koka balsta I ar transformatoru identificēšana; b. Koka balsta A ar pastabu identificēšana).

Pēc tīkla elementu identifikācijas būtiska loma ir tehniskā stāvokļa novērtējumam, kas ietver defektu identifikāciju. Šī metode ietver tīkla elementu vizuālu apskati, lai konstatētu redzamos defektus. Šim nolūkam tiks izmantots *Hepta Insights* programmatūras tīkla defektu identificēšanas modelis, tas darbojas izmantojot attēlu analīzi. *Hepta Insights* programmatūras modelis sākas ar attēla datu apstrādi, lai nodrošinātu augstas kvalitātes informāciju turpmākajai analīzei. Sākotnējā datu apstrāde ietver vairākus posmus:



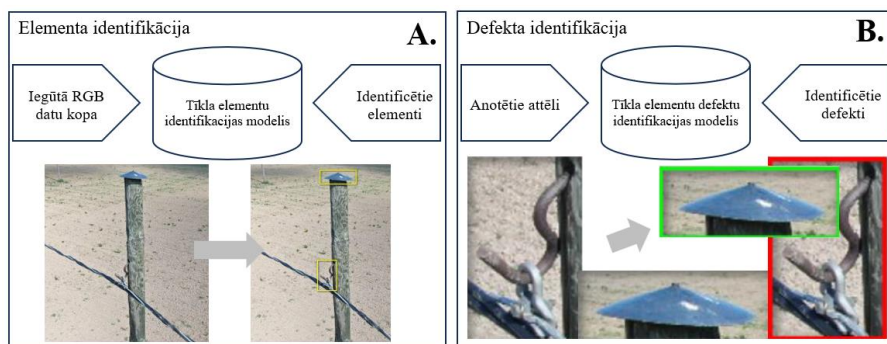
- Trokšņu filtrēšana - attēlā esošie trokšņi tiek noņemti, izmantojot Gausa filtrēšanas metodi, kas aizvieto pikseļa vērtību ar apgabala vidējo vērtību, kura centrā ir pikselis tādā veidā izlīdzina attēlu, samazinot augstfrekvences trokšni, kas palīdz uzlabot attēla kvalitāti un noņemt nevēlamus traucējumus.
- Atspulgu noņemšana - tiek pielietoti algoritmi, kas samazina atspulgu un citu gaismas avotu izraisītus traucējumus: polarizācijas filtri un histogrammas izlīdzināšana, lai uzlabotu attēla skaidrību.

Elektrotīkla elementu identifikācijas un defektu identificēšanas modeļi ir izstrādāti Hepta Insights programmatūrā, lai automatizētu un uzlabotu defektu atklāšanas procesu, to darbības princips ir attēlots 5.16. att.. Pēc attēla datu apstrādes modelis izmanto elementu noteikšanas algoritmus, lai identificētu tīkla elementus (5.16. att. kreisajā pusē) un to defektus (5.16. att. labajā pusē). Šis process ietver vairākus soļus:

- Formas atpazīšana - algoritms analizē attēlā redzamo objektu formas, izmantojot metodes kā kontūru izsekošanu un Hough transformācijas (funkciju iegūšanas paņēmieni, kas ar balsošanas procedūru spēj atrast nepilnīgus objektu gadījumus noteiktā formu klasē), lai precīzi noteiktu elementu kontūras un ģeometriskās īpašības.
- Izmēru analīze - identificēto objektu izmēri tiek analizēti un salīdzināti ar zināmiem parametriem, kas palīdz noteikt, vai objekti atbilst gaidītajiem tīkla elementu izmēriem.
- Krāsas identifikācija - krāsu analīze tiek veikta, lai noteiktu elementu un defektu krāsas īpašības, izmantojot RGB krāsu telpas, kas ļauj precīzāk identificēt defektus, kas var izpausties kā krāsu izmaiņas vai anomālijas.

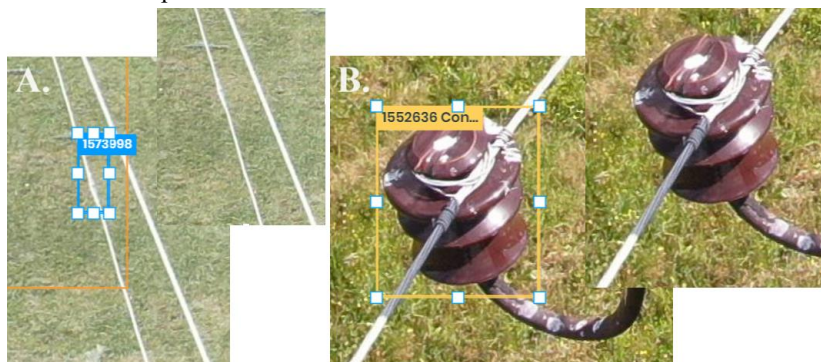
Kad tīkla elementi ir identificēti, *Hepta Insights* programmatūras modelis analizē attēlu, lai noteiktu iespējamus defektus. Šis process ietver:

- Defektu atpazīšana - algoritmi, neironu tīkli, tiek izmantoti, lai atpazītu defektus pēc to vizuālajām pazīmēm: plaisām, korozijas, deformācijām.
- Defektu klasifikācija - identificētie defekti tiek klasificēti pēc to novēršanas steidzamības, izmantojot iepriekš apmācītas modeļu bibliotēkas, kas palīdz noteikt nepieciešamo rīcību un prioritāti uzturēšanas darbiem.



5.16.att. Objektu identificēšanas modeļa darbības princips (a. infrastruktūras elementu identifikācija; b. defektu identifikācija infrastruktūras elementos).

Vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras datu apstrādes kvantitatīvie rezultāti, pielietojot tīkla elementu defektu identifikācijas modeli, ir detalizēti atspoguļoti 5.9. tab.. Tabulā ir iekļauti tikai tie defekti, kuru identifikācijas ticamības sliekšnis pārsniedz 40%. Modeļa kopējais ticamības rādītājs vidēji ir 65%, kas norāda uz modeļa vispārējo precizitāti defektu identificēšanā, taču tas svārstās no 41% līdz 86%. IZanalizējot defektu vizuālo izskatu, var secināt, ka šī svārstība atkarīga no defekta vizuālās redzamības atšķirības: defekta lieluma, formas un krāsas, kā arī no defektu skaita tīklā, 5.17.att. ilustrētie defekti ietver "Vadu savienojumu skaits 1-2", kuri pētījuma eksperimentā tika identificēti ar vidējo ticamības vērtību 58%. Savukārt "Izolators - netīrs" defekti tika atklāti ar augstāku ticamību – 82%. Vizuālais novērtējums no cilvēka puses norāda, ka defekta saskatīšana izolatorā ir ievērojami vieglāka nekā precīza vadu savienojumu skaita noteikšana, kas var izskaidrot atšķirības ticamības līmeņos. Defekti ar skaidri izteiktām vizuālām pazīmēm tiek noteikti ar augstāku ticamības līmeni, savukārt mazāk izteiktu defektu atpazīšana ir sarežģītāka, kā rezultātā tiek novērots zemāks ticamības procents.



5.17.att. Defektu redzamības piemēri (a."Vadu savienojumu skaits 1-2" defekts; b."Izolators - netīrs" defekts).

5.9.tabula

Vidējā sprieguma tīkla elementu defektu identifikācijas modeļa rezultāts

| Defekts                                                                 | Defektu skaits                           |     |     |    |   | kopā | Defektu identificēšanas ticamības %      |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----|-----|----|---|------|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                                         | Defekta novērtēšanas steidzamības pakāpe |     |     |    |   |      | Defekta novērtēšanas steidzamības pakāpe |     |     |     |     |     |
|                                                                         | 1                                        | 2   | 3   | 4  | 5 |      | 1                                        | 2   | 3   | 4   | 5   |     |
| Bruva › Kāts/āķis saliekts - Jā - 3                                     | -                                        | -   | 1   | -  | - | 1    | -                                        | -   | 73% | -   | -   | 73% |
| Izolators › Piesārņots (netīrs)                                         | -                                        | 155 | 16  | -  | - | 171  | -                                        | 77% | 87% | -   | -   | 82% |
| Izolators › Atšķīries vads no izolatora - Jā - 4                        | -                                        | -   | -   | 7  | - | 7    | -                                        | -   | -   | 86% | -   | 86% |
| Izolators › Bojāts vada stiprinājums - Jā - 4                           | -                                        | -   | 7   | 14 | - | 21   | -                                        | -   | 82% | 77% | -   | 80% |
| Izolators › Taptolators iekrītis - Jā - 1                               | 5                                        | -   | -   | -  | - | 5    | 77%                                      | -   | -   | -   | -   | 77% |
| Izolators › Taptolators bojāts - Jā - 3                                 | 15                                       | 37  | 17  | -  | - | 69   | 69%                                      | 73% | 71% | -   | -   | 71% |
| Izolators › Piekariolators bojāts - Jā - 3                              | -                                        | 2   | 1   | -  | - | 3    | -                                        | 80% | 54% | -   | -   | 67% |
| Balsts › Balsta cepurīte - Bojāta - 3                                   | -                                        | -   | 33  | -  | - | 33   | -                                        | -   | 69% | -   | -   | 69% |
| Balsts › Balsta cepurīte - Nav - 3                                      | -                                        | -   | 90  | -  | - | 90   | -                                        | -   | 75% | -   | -   | 75% |
| Balsts › Balsta augšā pūve - Maznozīmīga (bez darbības) - 1             | 1                                        | -   | -   | -  | - | 1    | 45%                                      | -   | -   | -   | -   | 45% |
| Elektronlīnijas › Vada stieples bojājumi - Vadu stieples attīdītājs - 5 | -                                        | -   | -   | -  | 1 | 1    | -                                        | -   | -   | -   | 41% | 41% |
| Elektronlīnijas › Atsargjoslu pārklāpums - Jā - 3                       | -                                        | -   | 8   | -  | - | 8    | -                                        | -   | 59% | -   | -   | 59% |
| Elektronlīnijas › Vada savienojumi pārslaidumā - 1-2 savienojumi - 1    | 234                                      | -   | -   | -  | - | 234  | 58%                                      | -   | -   | -   | -   | 58% |
| Elektronlīnijas › Vada savienojumi pārslaidumā - 3-5 savienojumi - 2    | -                                        | 8   | -   | -  | - | 8    | -                                        | 60% | -   | -   | -   | 60% |
| Apcīmējumi › Briedinājuma zīme "BE" - Nav - 3                           | -                                        | -   | 1   | -  | - | 1    | -                                        | -   | 44% | -   | -   | 44% |
| Pastaba › Nav pastaba baidāta - Jā (80 cm un vairāk līdz zemei) - 3     | -                                        | -   | 1   | -  | - | 1    | -                                        | -   | 46% | -   | -   | 46% |
| Defektu skaits kopā/ Vidējais Defektu identificēšanas ticamības %       | 255                                      | 202 | 175 | 21 | 1 | 654  | 62%                                      | 73% | 66% | 81% | 41% | 65% |

Pēc RGB datu kopas apstrādes, izmantojot tīkla elementu defektu identifikācijas modeļus (5.13. tab.), tika veikta manuāla validācija *Hepta Insights* programmatūrā. Šajā procesā katrs identificētais RGB datos infrastruktūras elementa tehniskā stāvokļa vizuālais defekts tika manuāli anotēts un saskaņots ar AS “Sadales tīkls” inspekcijas procesa izpildītājiem. Validācijas process tika realizēts sekojošos etapos:

- Datu apstrāde - sākotnēji RGB datu kopa tika apstrādāta ar modeli, kas identificēja 654 defektus ar ticamības vidējo vērtību 65 % (5.9. tab.).
- Manuālā anotācija - pēc datu kopas apstrādes, katrs identificētais defekts tika manuāli anotēts *Hepta Insights* programmatūrā, lai pārbaudītu modeļa precizitāti (5.18. att. ir sniegts sistēmas un manuālas 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.

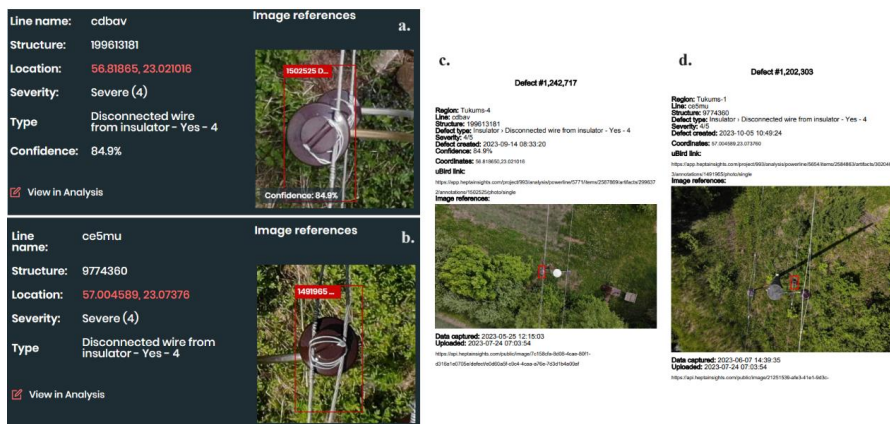
Validācijas procesa rezultātā tika akceptēti papildus manuāli identificētie 6126 defekti (5.10.tab.), kas veido 90,4 % no visiem vidējā sprieguma tīkla elementu defektiem tvērumā. Šie rezultāti norāda uz nepieciešamību papildināt defektu identifikācijas modeļu skaitu ar papildus defektu veidu anotācijām un apmācības datu kopu, lai uzlabotu identifikēšanas precizitāti un aptveri. Defektu identifikācijas modeļu attīstība, apmācības datu kopu paplašināšana uzlabos inspekcijas rezultātus.

5.10.tabula

Tīkla elementu defektu manuālās identifikācijas rezultāts

| Defekts                                                         | Defektu skaits (vidējā sprieguma tīkla elementiem) |     |     |     |   |      | Defektu skaits (zemajā sprieguma tīkla elementiem) |    |    |    |   |      |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----|-----|-----|---|------|----------------------------------------------------|----|----|----|---|------|
|                                                                 | Defekta novēršanas steidzamības pakāpe             |     |     |     |   | kopā | Defekta novēršanas steidzamības pakāpe             |    |    |    |   | kopā |
|                                                                 | 1                                                  | 2   | 3   | 4   | 5 |      | 1                                                  | 2  | 3  | 4  | 5 |      |
| Brīva / Kāts / ūdeņš saņemts - Jā - 3                           | -                                                  | -   | 41  | -   | - | 41   | -                                                  | -  | 7  | -  | - | 7    |
| Brīva / Kāts / ūdeņš saņemts - Jā, ir slodzes uz izolatoru - 4  | -                                                  | -   | 1   | -   | - | 1    | -                                                  | -  | -  | 58 | - | 58   |
| Brīva / Kāts / ūdeņš saņemts - Jā, nav slodzes uz izolatoru - 1 | 26                                                 | -   | -   | -   | - | 26   | 35                                                 | -  | -  | -  | - | 35   |
| Brīva / Kāts / ūdeņš bojāts stiprinājums - Jā - 4               | -                                                  | -   | -   | 259 | - | 259  | -                                                  | -  | -  | -  | - | -    |
| Brīva / Brīva bojāta vai puvusi - Jā - 4                        | -                                                  | -   | -   | 2   | - | 2    | -                                                  | -  | -  | 4  | - | 4    |
| Brīva / Kāts / ūdeņš: iekrītis - Jā - 4                         | -                                                  | -   | -   | 7   | - | 7    | -                                                  | -  | -  | -  | - | -    |
| Brīva / Metāla traversa bojāta - Jā - 3                         | -                                                  | -   | 1   | -   | - | 1    | -                                                  | -  | -  | -  | - | -    |
| Brīva / Brīva bojāta vai puvusi - Apakšējā - 4                  | -                                                  | -   | -   | -   | - | -    | -                                                  | -  | -  | 1  | - | 1    |
| Zemējums / Zemējuma iekrītis rokturu krāsā - Jā / Jā / Jā - 2   | -                                                  | 48  | -   | -   | - | 48   | -                                                  | -  | -  | -  | - | -    |
| Zemējums / Zemējums bojāts - Zemējuma konturs bojāts - 3        | -                                                  | -   | 1   | -   | - | 1    | -                                                  | -  | 19 | -  | - | 19   |
| Zemējums / Zemējums bojāts - Zemējuma vads ir pārrauts - 3      | -                                                  | -   | 6   | -   | - | 6    | -                                                  | -  | 13 | -  | - | 13   |
| Zemējums / Zemējums bojāts - Zemējuma vads ir pārrauts - 5      | -                                                  | -   | -   | -   | - | -    | -                                                  | -  | -  | -  | 1 | 1    |
| Atsaite / Atsaite: nav brīdinošie atzīkrojumi - Jā - 3          | -                                                  | -   | 17  | -   | - | 17   | -                                                  | -  | 22 | -  | - | 22   |
| Atsaite / Atsaite: savienojums ar mūlvadu - Nepieciešams - 3    | -                                                  | -   | -   | -   | - | -    | -                                                  | -  | 1  | -  | - | 1    |
| Atsaite / Atsaite: pārplūsi - Jā - 3                            | -                                                  | -   | 2   | -   | - | 2    | -                                                  | -  | 4  | -  | - | 4    |
| Atsaite / Atsaite: nav saņemta - Jā - 3                         | -                                                  | -   | 4   | -   | - | 4    | -                                                  | -  | 1  | -  | - | 1    |
| Atsaite / Atsaite: nav nepieciešama - Nav - 1                   | 1                                                  | -   | -   | -   | - | 1    | -                                                  | -  | -  | -  | - | -    |
| Atsaite / Atsaite: nenospiesta - Jā - 3                         | -                                                  | -   | 5   | -   | - | 5    | -                                                  | -  | 4  | -  | - | 4    |
| Atsaite / Atsaite: nav atbilstošā leņķī - Jā - 3                | -                                                  | -   | -   | -   | - | -    | -                                                  | -  | 1  | -  | - | 1    |
| Izolators / Piesārņots (netīrs)                                 | -                                                  | 209 | -   | -   | - | 209  | -                                                  | 51 | -  | -  | - | 51   |
| Izolators / Atkājes vads no izolatora - Jā - 4                  | -                                                  | -   | -   | 8   | - | 8    | -                                                  | -  | -  | 1  | - | 1    |
| Izolators / Dubultāzums - Bojāts - 3                            | -                                                  | -   | 140 | -   | - | 140  | -                                                  | -  | 59 | -  | - | 59   |
| Izolators / Dubultāzums - Nepieciešams - 3                      | -                                                  | -   | 249 | -   | - | 249  | -                                                  | -  | -  | -  | - | -    |
| Izolators / Bojāts vada stiprinājums - Jā - 4                   | -                                                  | -   | 9   | 75  | - | 84   | -                                                  | 4  | -  | 10 | - | 14   |
| Izolators / Stikla tapizolators - Jā (bez darbības) - 1         | 46                                                 | -   | -   | -   | - | 46   | 2                                                  | -  | -  | -  | - | 2    |
| Izolators / Tapizolators iekrītis - Jā - 1                      | 78                                                 | -   | -   | -   | - | 78   | -                                                  | -  | -  | -  | - | -    |
| Izolators / Tapizolators bojāts - Jā - 3                        | 71                                                 | 17  | 16  | -   | - | 104  | -                                                  | -  | 1  | -  | - | 1    |
| Izolators / Atsardzība pret putniem - Bojāts - 2                | -                                                  | 1   | -   | -   | - | 1    | -                                                  | -  | -  | -  | - | -    |
| Izolators / Piekariolators bojāts - Jā - 3                      | -                                                  | 1   | 4   | -   | - | 5    | -                                                  | -  | 1  | -  | - | 1    |
| Izolators / Bojāts ZS izolators - Jā - 3                        | -                                                  | -   | -   | -   | - | -    | -                                                  | -  | 4  | -  | - | 4    |
| Citi / Neklasificēti defekti                                    | 1                                                  | 12  | 17  | 2   | - | 32   | 2                                                  | 2  | 2  | -  | 4 | 10   |

| Defekts                                                                      | Defektu skaits (vidējā sprieguma tīkla elementiem) |            |             |            |          |             | Defektu skaits (zemajā sprieguma tīkla elementiem) |            |            |            |          |            |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------|-------------|------------|----------|-------------|----------------------------------------------------|------------|------------|------------|----------|------------|
|                                                                              | Defekta novērtēšanas standarta pakāpe              |            |             |            |          | kopā        | Defekta novērtēšanas standarta pakāpe              |            |            |            |          | kopā       |
|                                                                              | 1                                                  | 2          | 3           | 4          | 5        |             | 1                                                  | 2          | 3          | 4          | 5        |            |
| Balsts : Nāpniecietams Papildus bultskrūvis - Jā - 3                         | -                                                  | -          | 3           | -          | -        | 3           | -                                                  | -          | 1          | -          | -        | 1          |
| Balsts : Būvniecietams - Nāpniecietams - 3                                   | -                                                  | -          | 75          | -          | -        | 75          | -                                                  | -          | 65         | -          | -        | 65         |
| Balsts : Kabeļu līnijas signālmietojums - Eszvēries 30 cm un vairāk - 2      | -                                                  | 1          | -           | -          | -        | 1           | -                                                  | 1          | -          | -          | -        | 1          |
| Balsts : Kabeļa aizsargs balstam - Nav aizsargāts - 1                        | 2                                                  | -          | -           | -          | -        | 2           | 2                                                  | -          | -          | -          | -        | 2          |
| Balsts : Kabeļa aizsargs balstam - Nav atbilstošs pēc augstuma - 1           | 3                                                  | -          | -           | -          | -        | 3           | 1                                                  | -          | -          | -          | -        | 1          |
| Balsts : Kabeļa aizsargs balstam - Nav atbilstošs pēc materiāla - 1          | -                                                  | -          | -           | -          | -        | -           | 4                                                  | -          | -          | -          | -        | 4          |
| Balsts : Kabeļa aizsargs balstam - Nav nostiprināts - 1                      | -                                                  | -          | -           | -          | -        | -           | -                                                  | -          | -          | -          | 1        | 1          |
| Balsts : Balstam pietais, iedrupumi - Armatūra ir redzama līd: 50 cm garumā  | -                                                  | -          | -           | -          | -        | -           | -                                                  | 1          | -          | -          | -        | 1          |
| Balsts : Bojājuma vietas uzcūrtāji - Bojāts (Augsts) - 5                     | -                                                  | -          | -           | -          | 1        | 1           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Balsts : Iekrituši, nodokšusies piekarspatle - Jā - 4                        | -                                                  | 18         | -           | -          | -        | 18          | -                                                  | 60         | -          | 1          | -        | 61         |
| Balsts : Mehāniski bojāts (koka b.) - Atrautas šķēpēles (balsta matņa) - 4   | -                                                  | -          | -           | 1          | -        | 1           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Balsts : Mehāniski bojāts (koka b.) - Atrautas šķēpēles (bez darbības) - 1   | 7                                                  | -          | -           | -          | -        | 7           | 1                                                  | -          | -          | -          | -        | 1          |
| Balsts : Balsta cepurīte - Bojāts - 3                                        | -                                                  | -          | 93          | -          | -        | 93          | -                                                  | -          | 21         | -          | -        | 21         |
| Balsts : Balsta cepurīte - Nāpniecietams - 3                                 | -                                                  | -          | 18          | -          | -        | 18          | -                                                  | -          | 3          | -          | -        | 3          |
| Balsts : Balsta konstrukcija neatbilstoša - Jā - 3                           | -                                                  | -          | 2           | -          | -        | 2           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Balsts : Balsta augstā pīve - Nedaudz (jāmaina kāsts) - 3                    | -                                                  | -          | 43          | -          | -        | 43          | -                                                  | -          | 1          | -          | -        | 1          |
| Balsts : Balsta augstā pīve - Būvniecietams (jāmaina balsts) - 4             | -                                                  | -          | -           | 57         | -        | 57          | -                                                  | -          | 5          | -          | -        | 5          |
| Balsts : Balsta augstā pīve - Macrocimlīga (bez darbības)                    | 67                                                 | -          | -           | -          | -        | 67          | 2                                                  | -          | -          | -          | -        | 2          |
| Balsts : Balsta apakšā pīve (0,2-2m augstumā) - 3 - 4 cm pīves dziļums (bal) | -                                                  | -          | 1           | -          | -        | 1           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Balsts : Balsta apakšā pīve (0,2-2m augstumā) - 5 - 6 cm pīves dziļums (bal) | -                                                  | -          | -           | 2          | -        | 2           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Balsts : Rīta - 100% - 3                                                     | -                                                  | -          | 2           | -          | -        | 2           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Balsts : Grunts ap balstu - Nav nobīdēts - 4                                 | -                                                  | -          | -           | 13         | -        | 13          | -                                                  | -          | -          | 2          | -        | 2          |
| Balsts : Grunts ap balstu - Izskalots - 3                                    | -                                                  | -          | 2           | -          | -        | 2           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Balsts : Vada nav aizsargāts - Jā - 3                                        | -                                                  | -          | -           | -          | -        | -           | -                                                  | -          | 5          | -          | -        | 5          |
| Balsts : Balstā stārkā līgda - Uz kronšteina - 3                             | -                                                  | -          | -           | -          | -        | -           | -                                                  | -          | 1          | -          | -        | 1          |
| Balsts : The stork's nest at the pole - Bez kronšteina - 4                   | -                                                  | -          | -           | -          | -        | -           | -                                                  | -          | -          | 10         | -        | 10         |
| Elektrolīnijas : AMKA ūde vadi bojāti - Jā - 3                               | -                                                  | -          | 1           | -          | -        | 1           | -                                                  | -          | 1          | -          | -        | 1          |
| Elektrolīnijas : Vada stiples bojājumi - Bojāts ar pārrāvumiem - 4           | -                                                  | -          | -           | 39         | -        | 39          | -                                                  | -          | -          | 10         | -        | 10         |
| Elektrolīnijas : Vada stiples bojājumi - Vadu stiples attīdums - 5           | -                                                  | -          | -           | -          | 5        | 5           | -                                                  | -          | -          | 2          | -        | 2          |
| Elektrolīnijas : Uz vada uzturēšana - Jā - 3                                 | -                                                  | -          | -           | -          | -        | -           | 1                                                  | -          | -          | -          | -        | 1          |
| Elektrolīnijas : Aizsargoslas pārdojums - Jā - 3                             | -                                                  | -          | 19          | -          | -        | 19          | -                                                  | -          | 1          | -          | -        | 1          |
| Elektrolīnijas : Vada savienojumu skaits pārslaidumā - 1-2 savienojumi - 1   | 1159                                               | -          | -           | -          | -        | 1159        | 122                                                | -          | -          | -          | -        | 122        |
| Elektrolīnijas : Vada savienojumu skaits pārslaidumā - 3-5 savienojumi - 2   | -                                                  | 123        | -           | -          | -        | 123         | -                                                  | -          | -          | -          | -        | 18         |
| Apcīmējumi : Līnijas operatīvās apcīmējums - Negarets - 4                    | -                                                  | -          | -           | 8          | -        | 8           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Līnijas operatīvās apcīmējums - Nav - 3                         | -                                                  | -          | 10          | -          | -        | 10          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Līnijas operatīvās apcīmējums - Nav sālsāms - 1                 | 16                                                 | -          | -           | -          | -        | 16          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Balsta kārtas mums - Negarets - 2                               | -                                                  | 37         | -           | -          | -        | 37          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Balsta kārtas mums - Nav - 3                                    | -                                                  | -          | 1011        | -          | -        | 1011        | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Balsta kārtas mums - Nav sālsāms - 1                            | 30                                                 | -          | -           | -          | -        | 30          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Aizsargoslas čme - Jāmaina - 2                                  | -                                                  | 58         | -           | -          | -        | 58          | -                                                  | 10         | -          | -          | -        | 10         |
| Apcīmējumi : Aizsargoslas čme - Nav - 3                                      | -                                                  | -          | 1           | -          | -        | 1           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Brīdīdājuma čme "BE" - Bojāts - 2                               | -                                                  | 15         | -           | -          | -        | 15          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Brīdīdājuma čme "BE" - Nav - 3                                  | -                                                  | -          | 1450        | -          | -        | 1450        | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Brīdīdājuma lentas - Bojāts - 1                                 | 22                                                 | -          | -           | -          | -        | 22          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Apcīmējumi : Brīdīdājuma lentas - Nav - 3                                    | -                                                  | -          | 42          | -          | -        | 42          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Bandātas valīgas - Jā - 3                                          | -                                                  | -          | 119         | -          | -        | 119         | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Bandātas, skavas noslaidīdās, valīgas - Augstāda: > 1/4 starp norm | -                                                  | -          | 9           | -          | -        | 9           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Bandātas, skavas noslaidīdās, valīgas - Apakšāda: 0 - 5 cm attālū  | -                                                  | -          | 7           | -          | -        | 7           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Bandātas, skavas noslaidīdās, valīgas - Apakšāda: 6 - 9 cm attālū  | -                                                  | 16         | -           | -          | -        | 16          | -                                                  | 1          | -          | -          | -        | 1          |
| Pastabi : Bandātas, skavas attālūms no pastaba virsotnes - 0 - 5 cm attālū   | -                                                  | -          | 8           | -          | -        | 8           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Bandātas, skavas attālūms no pastaba virsotnes - 6 - 9 cm attālū   | -                                                  | 23         | -           | -          | -        | 23          | -                                                  | 1          | -          | -          | -        | 1          |
| Pastabi : No stūb bandage - Ies (50 cm and more to the ground) - 3           | -                                                  | -          | 3           | -          | -        | 3           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Nav pastaba bandāta - Jā (mazāk par 50 cm) - 3                     | -                                                  | -          | 17          | -          | -        | 17          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Pastabam iedrupumi - Iedrupumi (jāmaina pastabs) - 3               | -                                                  | -          | 10          | -          | -        | 10          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Pastabs pīvis - 1 - 2 cm pīves dziļums (pastaba matņa, Zema) - 2   | -                                                  | -          | -           | -          | -        | -           | -                                                  | 1          | -          | -          | -        | 1          |
| Pastabi : Pastabs pīvis - 3 - 4 cm pīves dziļums (pastaba matņa) - 3         | -                                                  | -          | 2           | -          | -        | 2           | -                                                  | -          | 1          | -          | -        | 1          |
| Pastabi : Pastabs pīvis - 5 - 6 cm pīves dziļums (pastaba matņa) - 4         | -                                                  | -          | -           | 2          | -        | 2           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Pastabi : Nedemontēti pastabi - Jā - neitruiti - 1                           | 33                                                 | -          | -           | -          | -        | 33          | 3                                                  | -          | -          | -          | -        | 3          |
| Pastabi : Nedemontēti pastabi - Jā - mītāds zemē - 1                         | 1                                                  | -          | -           | -          | -        | 1           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Atdalītāji : Atdalītāja lokēdēses defekti - Mehāniski - 3                    | -                                                  | -          | 12          | -          | -        | 12          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Atdalītāji : Silēdēses defekti - Jā - 3                                      | -                                                  | -          | 7           | -          | -        | 7           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Atdalītāji : VS drošinātāju pamatas izolatori - Bojāti - 4                   | -                                                  | -          | -           | 13         | -        | 13          | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| Atdalītāji : Atdalītāja izolatori bojāti - Mehāniski - 4                     | -                                                  | -          | -           | 5          | -        | 5           | -                                                  | -          | -          | -          | -        | -          |
| <b>Defektu skaits kopā</b>                                                   | <b>1563</b>                                        | <b>579</b> | <b>3479</b> | <b>494</b> | <b>6</b> | <b>6121</b> | <b>175</b>                                         | <b>150</b> | <b>239</b> | <b>102</b> | <b>8</b> | <b>674</b> |



5.18.att. Defekta "Atvienots vads no izolatora" anotācijas (a. sistēmas ģenerētā anotācija, b. manuāli pievienotā anotācija) un sistēmas ģenerētas defekta atskaite piemērs (c. atskaite sistēmas ģenerētam defektam, d. Atskaite manuāli pievienotam defektam).

Zemsprieguma virszemes infrastruktūras datu apstrādes kvantitatīvie rezultāti, pielietojot tīkla elementu defektu identifikācijas modeļus, ir līdzīgi vidējā sprieguma datu apstrādes rezultātiem un ir detalizēti atspoguļoti 5.11. tab.. Zemsprieguma infrastruktūras defektu identifikācijas modeļa kopējais ticamības rādītājs vidēji ir 61 %, kas pa 4% zemāks, nekā vidējā sprieguma infrastruktūras datu apstrādes rezultāts. Atkarībā no defektu tiptiem ticamības rādītājs svārstās diapazonā no 49 % - attiecas uz defektiem, kuriem ir sarežģītāka vizuālā atpazīstamība "1 vai 2 savienojumi laidumā"), bet nepārsniedzot 70 %, kas salīdzinājumā ar vidējā sprieguma infrastruktūras datu apstrādes rezultātiem par 16 % ir zemāks.

5.11.tabula

Zemsprieguma tīkla elementu defektu identifikācijas modeļa rezultāts

| Defekts                                                                    | Defektu skaits                        |   |    |      | Defektu identificēšanas ticamības %   |     |     |                            |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---|----|------|---------------------------------------|-----|-----|----------------------------|
|                                                                            | Defekta novērtēšanas ticamības pakāpe |   |    | kopā | Defekta novērtēšanas ticamības pakāpe |     |     | Ticamības % vidējā vērtība |
|                                                                            | 1                                     | 2 | 3  |      | 1                                     | 2   | 3   |                            |
| Balsts › Balsta cepurīte - Bojāta - 3                                      | -                                     | - | 11 | 11   | -                                     | -   | 70% | 70%                        |
| Balsts › Balsta cepurīte - Nepieciešama - 3                                | -                                     | - | 14 | 14   | -                                     | -   | 71% | 71%                        |
| Elektrrolīnijas › Vadu savienojumu skaits pārļaidumā - 1-2 savienojumi - 1 | 13                                    | - | -  | 13   | 49%                                   | -   | -   | 49%                        |
| Elektrrolīnijas › Vadu savienojumu skaits pārļaidumā - 3-5 savienojumi - 2 | -                                     | 1 | -  | 1    | -                                     | 54% | -   | 54%                        |
| Defektu skaits kopā/ Vidējais Defektu identificēšanas ticamības %          | 13                                    | 1 | 25 | 39   | 49%                                   | 54% | 71% | 61%                        |

Validācijas procesa rezultātā tika akceptēti papildus manuāli identificētie 674 defekti (5.10.tabula) zemsprieguma infrastruktūras elementiem. Šie rezultāti norāda, ka zemsprieguma tīklā pie esošā modeļa ir iespējams automatizēti noteikt tikai 5,5 % no visiem esošajiem defektiem. Modeļu spēja automatizēti identificēt defektus zemsprieguma tīklā ir ierobežota. Šis rezultāts atklāj būtiskus trūkumus pašreizējā modeļa veikspējā un norāda uz nepieciešamību pēc uzlabojumiem. Tas arī izskaidrojams ar faktu, ka datu kopas, kas bija izmantota modeļu apmācībai un testēšanai ir izveidota pētījuma laikā un ar 5.13.tab. norādīto datu kopas apjomu, kur zemsprieguma paraugu īpatsvars pret vidējā sprieguma elementiem ir orientējoši 15 %, kas salīdzinājumā ar vidējā sprieguma infrastruktūras datu apstrādes rezultātiem par 16 % ir zemāks.

kas korelē ar pētījuma gaitā iegūto datu daudzumu (zemsprieguma infrastruktūras *RGB* attēlu skaits - 24487 un vidējā sprieguma infrastruktūras *RGB* attēlu skaits - 134752). Ņemot vērā to, ka sadales sistēmas operatora infrastruktūra ir kritiskā infrastruktūra un katra operatora infrastruktūrai piemīt sava reģionālā specifika, kas ir noteikta tīkla kodeksa [109]. Salīdzinot ar vidējā sprieguma tīklu, kur defektu identificēšanas modeļa rezultātu īpatsvars ir ievērojami augstāks – 9,6 %, šie rezultāti uzsver izaicinājumus, kas saistīti ar defektu identifikāciju zemsprieguma infrastruktūrā. Lai uzlabotu modeļa efektivitāti zemsprieguma tīklu defektu identificēšanā, nepieciešama paplašināta apmācības datu kopa un uzlaboti algoritmi, nodrošinot to ar lielāku testēšanas ciklu skaitu, kas spēj labāk atpazīt dažādus defektu tipus šajā specifiskajā infrastruktūrā.

Modeļa spēju identificēt defektus ar augstāku ticamības rādītāju var uzlabot, izmantojot plašākas un dažādākas apmācības datu kopas. Defektu identificēšanai tika izmantots atvērta koda rīks *LabelImg* anotāciju veidošanai. *Bounding boxes* (taisnstūrveida rāmji ap objektiem, kur katrai anotācijai tika pievienota attiecīgā klase) anotēšanas veids tika izmantots. Anotēšanas piemērs ir redzams 62.attēlā kur identificēšanas objekts ar apvilkt ar rāmi un tai ir piešķirti divu līmeņu atribūti: objekta nosaukums vai identifikators (konkrēts tīkla elements vai konkrēts defekts) un objekta kritiskuma pakāpe (*severity*) turpmākai defektu bīstamības riska gradācijai. Lai nodrošinātu, ka pētījuma rezultāti var tikt izmantoti modeļa apmācībai, anotācijas dati ir rūpīgi saglabāti. Šī saglabāšana ir būtiska, lai nodrošinātu modeļa veiktspējas uzlabošanu nākotnē, izmantojot reālus un precīzi anotētus datu punktus:

- Modeļa apmācības uzlabošana - anotācijas dati, kas ir iegūti manuālās validācijas rezultātā, nodrošina vērtīgu resursu modeļa apmācībai, palīdzot tam labāk atpazīt un klasificēt dažādus defektu tipus.
- Datu kvalitātes nodrošināšana - rūpīgi izveidoti (kā parādīts 5.13. att. anotācijas rāmim ir jābūt) un saglabāti anotācijas dati garantē augstu datu kvalitāti, kas ir būtiska veiksmīgai modeļa apmācībai un tā precizitātes uzlabošanai.
- Nākotnes modeļu attīstības iespējas - saglabātie anotācijas dati kalpo arī kā pamats turpmākiem soļiem un modeļa attīstībai, ļaujot izmantot šos datus, lai izstrādātu uzlabotus defektu identifikācijas algoritmus un paaugstinātu automatizēto defektu atpazīšanas īpatsvaru.

Šajā pētījumā tika analizēta *RGB* datu kopa, lai novērtētu tās efektivitāti elektropārvades līniju vizuālo defektu noteikšanā un infrastruktūras elementu tehniskā stāvokļa novērtēšanā. Pētījuma rezultāti ir apkopoti (5.12. tab.), kur redzams, ka zemsprieguma līnijās automātiski identificēto defektu īpatsvars 5.5% ir gandrīz divreiz mazāks salīdzinājumā ar vidēja sprieguma līnijām – 9,6 %. Šo atšķirību var izskaidrot ar faktu, ka zemsprieguma līniju kopgarums ir 5.5 reizēs mazāks pētījuma tvērumā salīdzinot ar vidējā sprieguma līniju kopgarumu, kas nozīmē, ka proporcionāli ir pieejams mazāks datu apjoms. Šis rezultāts norāda uz nepieciešamību pēc lielākas datu kolekcijas, lai uzlabotu automatizēto defektu noteikšanas precizitāti.

Apkopojums par veiktajiem datos balstītajiem vizuāli identificējamajiem tehniskā stāvokļa defektiem

| Kritērijs                                  | Vidējais spriegums | Zemspriegums |
|--------------------------------------------|--------------------|--------------|
| Līniju km kopgarums                        | 550 km             | 100 km       |
| Attēlu skaits                              | 134752             | 24487        |
| Identificēto defektu skaits                | 6780               | 713          |
| Automātiski identificēto defektu skaits    | 654                | 39           |
| Manuāli identificēto defektu skaits        | 6121               | 674          |
| Defektu identificēšanas ticamības rādītājs | 65 %               | 61 %         |

Papildus šiem rezultātiem tika konstatēts, ka datu daudzums un kvalitāte ir būtiski faktori, kas ietekmē automātiskās defektu noteikšanas veikspēju. Zemo spriegumu līniju ierobežotā datu pieejamība samazina modeļu apmācības iespējas, tādējādi ierobežojot to spēju efektīvi identificēt defektus. Savukārt vidēja sprieguma līnijās, kurās ir plašāks datu apjoms, modeļi spēja identificēt defektus ar lielāku precizitāti un automātiski identificēto defektu īpatsvaru. Atkarībā no infrastruktūras elementu skaita tīkla, Latvijas sadales operatora tīkls sastāv no vairāk nekā 1 miljons balstiem, kur vienas regulāras inspekcijas datu apjoms spēs palielināt defektu identifikācijas automatizācijas līmeni.

Lai optimizētu defektu noteikšanas procesu, ir jāapsver datu kolekcijas paplašināšana un dažādošana, kā arī papildus metožu izstrāde, kas varētu uzlabot modeļu precizitāti, pat ja pieejamais datu apjoms ir ierobežots. Viena no perspektīvām pieejām šajā jomā ir sintētisko datu pielietošana. Sintētisko datu ģenerēšana sniedz iespēju mākslīgi paplašināt treniņu datu kopas, radot reālistiskas attēlu variācijas, kas potenciāli palīdzēs uzlabot modeļu apmācību un vispārināšanas spējas. Šāda pieeja ir aplūkota, piemēram, jūras dzīvnieku klasifikācijā, kur izmantotas metodes kā “cut-paste-learn” kopā ar konvolūcijas neironu tīkliem [106], kā arī objektu detekcijas uzdevumos, kur attēli tiek ģenerēti, izmantojot *NeRF* (Neural Radiance Field) balstītas sintētiskās attēlu veidošanas un pēcapstrādes metodes [107]. Minētās pieejas potenciālā rezultativitāte ir jāvalidē ar praktiskiem eksperimentiem. Pētījums parādīja, ka *RGB* datu analīze ir efektīvs rīks elektropārvades līniju vizuālo defektu noteikšanā. Tomēr, lai pilnībā izmantotu šīs tehnoloģijas potenciālu, ir būtiski nodrošināt pietiekamu datu apjomu un kvalitāti. Plašāka datu kolekcija uzlabos defektu noteikšanas precizitāti un uzticamību, tādējādi veicinot drošāku un efektīvāku elektropārvades infrastruktūras uzturēšanu.

Mašīnmācīšanās defektu atpazīšanas modeļu veikspējas novērtēšanai būtiskākie rādītāji ir šādi:

- Precizitāte ir rādītājs, kas norāda, cik liela daļa no prognozētajiem pozitīvajiem gadījumiem patiesībā ir pozitīvi - norāda uz algoritma spēju pareizi identificēt defektus starp visiem atpazītajiem pozitīvajiem gadījumiem. To izmanto, ja kļūdaini pozitīvie rezultāti ir īpaši nevēlami vai var rādīt ievērojamas izmaksas vai nevēlamas sekas.



$$\text{Precizitāte} = \frac{\text{Taisnība Pozitīvs}}{\text{Taisnība Pozitīvs} + \text{Kļūdaini Pozitīvs}} \quad (3)$$

- Atsauksana (jeb jūtīgums), ir rādītājs, kas norāda, cik liela daļa no visiem patiesajiem pozitīvajiem gadījumiem ir pareizi identificēta kā pozitīva, respektīvi mēra algoritma spēju pareizi atpazīt visus faktiskos defektus. Tas ir būtisks gadījumos, kad kļūdaini negatīvi rezultāti, piemēram, neidentificēti defekti, var novest pie nopietnām problēmām vai drošības riskiem.

$$\text{Atsauksana} = \frac{\text{Taisnība Pozitīvs}}{\text{Taisnība Pozitīvs} + \text{Kļūdaini Negatīvs}} \quad (4)$$

- F2 rādītājs apvieno precizitāti un atsauksanu, sniedzot harmonisku vidējo ar lielāku svaru atsauksanai. Tas ir noderīgs rādītājs, ja defektu neatpazīšana ir nopietnāka problēma nekā kļūdaina atpazīšana.

$$F2 \text{ rādītājs} = (1 + 2^2) \cdot \frac{\text{Precizitāte} \cdot \text{Atsauksana}}{(2^2 \cdot \text{Precizitāte}) + \text{Atsauksana}} = 5 \cdot \frac{\text{Precizitāte} \cdot \text{Atsauksana}}{4 \cdot \text{Precizitāte} + \text{Atsauksana}} \quad (5)$$

5.13. tab. ir sniegts pārskats par pētījumā izmantotajiem mašīnmācīšanās modeļa tehniskajiem parametriem un modeļu izveides paraugu apjomiem. Datu analīze liecina, ka augsto prognozēšanas precizitātes procentu nosaka ne tikai paraugu apjoms, bet arī identificējamā objekta specifika, piemēram, sarežģītība un izmēri, kas prasa rūpīgu objekta īpašību analīzi. Tādējādi pētījuma rezultāti apstiprina, ka gan paraugu apjoms, gan objekta specifika ir kritiski faktori, kas jāņem vērā MI modeļa izstrādē un pielietošanā.

5.13.tabula

Pētījumā izmantoto objektu identifikācijas modeļu tehniskie parametri

| Modeļa nosaukums                              | Defekta klase        | Precizitāte | Atsauksana | F2 rādītājs | Anotāciju skaits | Apmācības attēlu skaits | Testa attēlu skaits |
|-----------------------------------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|------------------|-------------------------|---------------------|
| Insulator Detection EastEU                    | insulator normal     | 75.80%      | 80.10%     | 79.20%      | 2408             | 545                     | 97                  |
| Pole cap missing v2 08.2023                   | pole_cap_broken      | 96.50%      | 60.00%     | 64.91%      | 88               | 1796                    | 318                 |
|                                               | pole_cap_missing     | 96.90%      | 81.20%     | 83.92%      | 133              |                         |                     |
|                                               | pole_cap_normal      | 98.30%      | 98.50%     | 98.46%      | 1902             |                         |                     |
| Tower type classifier v3                      | tower_concrete_I     | 95.00%      | 90.70%     | 91.53%      | 269              | 3196                    | 565                 |
|                                               | tower_wooden_H       | 93.20%      | 83.30%     | 85.11%      | 40               |                         |                     |
|                                               | tower_wooden_A       | 97.40%      | 89.80%     | 91.22%      | 388              |                         |                     |
|                                               | tower_wooden_I       | 96.80%      | 95.60%     | 95.84%      | 2220             |                         |                     |
|                                               | tower_wooden_III     | 99.60%      | 94.40%     | 95.40%      | 113              |                         |                     |
|                                               | tower_wooden_stub    | 95.30%      | 93.80%     | 94.10%      | 477              |                         |                     |
|                                               | tower_wooden_support | 92.00%      | 95.10%     | 94.46%      | 254              |                         |                     |
| Cross-arm classifier v2                       | crossarm             | 93.70%      | 95.70%     | 95.29%      | 970              | 838                     | 94                  |
| Stub classifier v4                            | trap_concrete_stub   | 80.60%      | 93.60%     | 90.68%      | 954              | 1040                    | 184                 |
|                                               | tria_concrete_stub   | 52.00%      | 32.80%     | 35.42%      | 64               |                         |                     |
|                                               | wooden_stub          | 61.50%      | 25.00%     | 28.37%      | 31               |                         |                     |
| Grounding classifier v2                       | grounding            | 82.20%      | 89.20%     | 87.71%      | 256              | 578                     | 102                 |
| Hook bent v6                                  | hook normal          | 99.20%      | 97.80%     | 98.08%      | 8362             | 2578                    | 287                 |
|                                               | hook bent            | 81.60%      | 76.50%     | 77.47%      | 416              |                         |                     |
| Span connection v5 LatAm 01.2024              | span connection      | 90.80%      | 78.20%     | 80.43%      | 5685             | 3413                    | 380                 |
| Construction under the line (S) LatAm 06.2024 | construction         | 52.20%      | 62.70%     | 60.28%      | 4781             | 3992                    | 705                 |
| Vegetation model v4.1 LatAm 05.2024           | flora_branches_1m    | 41.00%      | 34.20%     | 35.37%      | 4783             | 10852                   | 1206                |
|                                               | flora_bushes_2_4m    | 42.60%      | 43.50%     | 43.32%      | 4261             |                         |                     |



Šie rādītāji ir fundamentāli, lai nodrošinātu visaptverošu un precīzu defektu atpazīšanas modeļu darbības novērtējumu, tādējādi ļaujot optimizēt modeļu parametru izvēli un uzlabot to kopējo efektivitāti specifiskos lietošanas scenārijos.

### 5.2.3. Infrastruktūras ģeotelpiskie mērījumi

Otrā (pēc vizuālās elektropārvades infrastruktūras elementu tehniskā stāvokļa noteikšanas) no būtiskākajiem infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtēšanas komponentēm ir ģeotelpiskie mērījumi, kas ļauj veikt detalizētu un visaptverošu infrastruktūras pārbaudi, izmantojot tādus parametrus kā augstuma mērījumi, attālumu noteikšana un objektu kontūru izveide.

Ģeotelpisko mērījumu rezultātu saskaņošana ar tehniskajiem standartiem (Latvijas Energostandarts [107]) ir būtisks solis elektropārvades infrastruktūras uzturēšanā. Šāda pieeja nodrošina iespēju sistemātiski identificēt un kvantificēt novirzes no normatīvajiem parametriem, kas norāda uz potenciāliem defektiem un infrastruktūras bojājumiem.

Šīs pētījuma daļas mērķis ir detalizēti izskatīt ģeotelpisko mērījumu integrācijas procesus ar tehniskajiem standartiem, analizējot to ietekmi uz defektu identificēšanas precizitāti un izveidot visaptverošu metodoloģiju *LIDAR* datu pielietošanai elektropārvades infrastruktūras defektu identificēšanā, nodrošinot zinātnisku pamatojumu un empīrisku pierādījumu par tās efektivitāti un praktisko pielietojumu.

AS “Sadales tīkls”, kā sadales sistēmas operatoram, ir interese sasniegt vairāku svarīgu rādītāju noteikšanu (ģeotelpiskie mērījumi balstu konstrukcijām un vadu izvietojumiem vidē), balstoties uz *LIDAR* datu analīzi, lai uzlabotu elektropārvades infrastruktūras pārvaldību un drošību. Šie rādītāji ietver:

- Tīkla elementu izvietojuma precizitātes noteikšana - precīza tīkla elementu (balstu, sadales punktu, transformatoru) izvietojuma noteikšana salīdzinājumā ar esošo ģeogrāfiskās informācijas sistēmu datiem. Ņemot vērā, ka daudzi tīkla elementi ir uzstādīti tīklā vairāk nekā pirms 50 gadiem (gaisvadu elektrolīnijas kalpošanas laiks ir noteikts ne mazāks par 30-40 gadiem), detalizēta izvietojuma informācija bieži vien nav pieejama, padarot šo uzdevumu īpaši svarīgu.
- Gabarītmērījumi - katras laiduma minimālās distances līdž zemei noteikšana, kas ir kritiski svarīgs mērījums sabiedrības drošības nodrošināšanai. Šie mērījumi palīdz novērst potenciālos drošības riskus, kas var rasties no zema augstuma vadiem.
- Vadu nokares - 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 klimatiskajos apstākļos.
- Attālumi starp vadiem katrā laidumā - precīza attālumu noteikšana starp vadiem katrā laidumā, lai nodrošinātu atbilstību drošības standartiem [107] un novērstu potenciālo īssavienojumu risku.

- Vadu izvietojums balstos un attālumi starp vadu stiprinājumiem - attālumu mērījumi starp vadu stiprinājumiem uz balstiem, lai nodrošinātu struktūras integritāti un stabilitāti.
- Balstu izsvēršanas vērtības - balstu izsvēršanas vērtību noteikšana, kas ir būtiska, lai novērtētu balstu stabilitāti un nodrošinātu, ka tie spēj izturēt uzlikto slodzi.
- Veģetācijas pārvaldība trašu koridoros un aizsargjoslās - veģetācijas izauguma monitorings trašu koridoros un aizsargjoslās, lai novērstu potenciālus bojājumus un uzturētu atbilstošu attālumu starp veģetāciju un elektropārvades infrastruktūru.

Šo rādītāju detalizēta noteikšana un analīze, izmantojot *LIDAR* tehnoloģiju, nodrošinās visaptverošu un precīzu elektropārvades infrastruktūras stāvokļa novērtējumu. *LIDAR* datu izmantošana ļauj ne tikai precīzi kartēt un analizēt infrastruktūras elementus, bet arī identificēt potenciālās problēmas un defektus, kas varētu ietekmēt tīkla darbību un drošību. Turklāt šī pieeja nodrošina ilgtermiņa ieguvumus, jo tā ļauj veikt proaktīvus uzturēšanas pasākumus, novērst iespējamus bojājumus un samazināt ārkārtas situāciju risku. Tādējādi *LIDAR* datu integrācija ar elektropārvades infrastruktūras pārvaldības sistēmām veicina efektīvāku un drošāku tīkla ekspluatāciju, uzlabojot kopējo uzticamību un pakalpojumu kvalitāti.

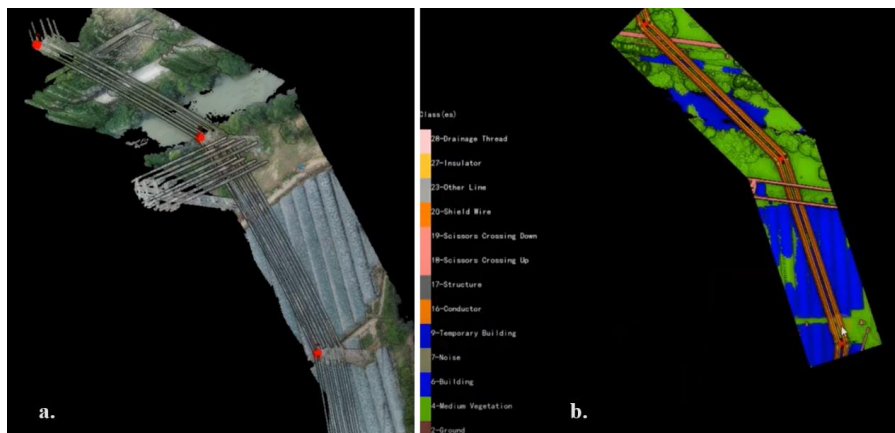
Kā attēlots 4.24. att. redzamajā shēmā, sākotnējais posms *LIDAR* datu analīzē ietver rūpīgu datu klasifikāciju. Šis solis ir kritiski svarīgs, jo tas nosaka visu turpmāko analīzes darbību precizitāti un efektivitāti. *LIDAR* datu klasifikācija ietver dažādu atgriezto signālu kategoriju noteikšanu un segmentāciju, piemēram, zemes virsmu, veģetāciju, infrastruktūras elementus un citus objektus.

Pētījuma realizācijai tika izmantota *Neara* programmatūra – web-balstīts *CAD* (*Computer-aided design* - datorizētās projektēšanas) rīks 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 moduļim (5.7. tab.). Atbilstoši tām izvirzītām prasībām, klasifikācija obligāti ietver sekojošus slāņus:

- Tīkla elementi:
  - līniju (vadi) laidumi;
  - balsti (stabi).
- Vide:
  - veģetācija (krūmi, koku stumbri, koku vainagi);
  - ūdenstilpes;
  - ceļi;
  - ēkas.
- Zemes reljefs.

Klasifikācijas procesā tiek pielietotas uzlabotas algoritmiskās metodes, lai nodrošinātu augstu precizitāti un atbilstību reālajai situācijai. Automatizētās klasifikācijas modelim

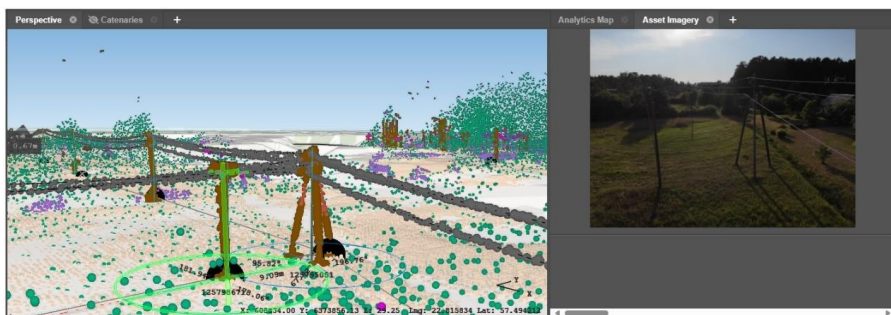
tiek izmantota Uzraudzītās mācīšanās algoritmu metode (*Supervised Learning*) [108] - tiek izmantoti iepriekš apmācīti desmit tūkstošu koridoru kilometru gari tīklu paraugi, lai automātiski klasificētu katru punktu mākonī. Pēc datu klasifikācijas katrs punkts tiek piešķirts noteiktai klasei, kā ir demonstrēts 5.19. att., kas ļauj precīzāk interpretēt un analizēt iegūtos datus. Pētījumā izmantota datu kopa tika ielādēta *Neara* programmatūrā un tika palaists automatiskais klasifikācijas process. Programmatūrā ir pieejama funkcionalitāte arī pilnīgi manuālai klasifikācijai, ja tiks identificētas klasifikācijas kļūdas, kura tika izmantota punktu kategoriju korekcijām un detalizētākai analīzei.



5.19.att. *LIDAR* datu klasifikācija (a. neklasificētie dati, b. klasificētie dati).

Šī rūpīgā klasifikācija veido pamatu turpmākajiem analīzes soļiem, piemēram, objekta identifikācijai, defektu noteikšanai un infrastruktūras stāvokļa novērtēšanai. Kvalitatīva datu klasifikācija ir būtiska, lai nodrošinātu, ka turpmākās analīzes ir precīzas un uzticamas, tādējādi ļaujot pieņemt pamatotus un efektīvus lēmumus par elektropārvades infrastruktūras uzturēšanu un uzlabošanu.

Kad pētāmais objekts ir veiksmīgi klasificēts, nākamais solis ir vektorizēta vai inženiertehniskā modeļa izveide. Vektoru ģenerēšana ir kritisks solis, kurā klasificētie kategorijās punkti tiek pārveidoti par matemātiskām formām. Tie punkti, kas atbilst lineārai struktūrai, piemēram elektropārvades līniju vadiem, tiek savienoti, izveidojot līnijas vai polilīnijas, kas precīzi atspoguļo vadu trajektorijas. 5.20. att. ir sniegts AS “Sadales tīkls” infrastruktūras posma vektorizēta modeļa piemērs (attēla kreisajā pusē), ka arī to infrastruktūras elementu reālā izskata fotofiksācija (attēla labajā pusē) no objekta – dati tika apstrādāti *Neara* programmatūrā. 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.



5.20.att. AS “Sadales tīkls” infrastruktūras vektorizācijas piemērs.

Vektorizācija veido matemātiski precīzu objektu aprakstu, kuru var viegli apstrādāt, analizēt, veidojot detalizētus inženiertehniskos aprēķinus, kas nodrošina iespēju noteikt precīzas vērtības, kas nepieciešamas infrastruktūras novērtēšanai un plānošanai, ka arī eksportēt uz CAD vai ĢIS sistēmām.

### 5.2.3.1. Elektropārvades līniju balstu, telpiskā izvietojuma noteikšana

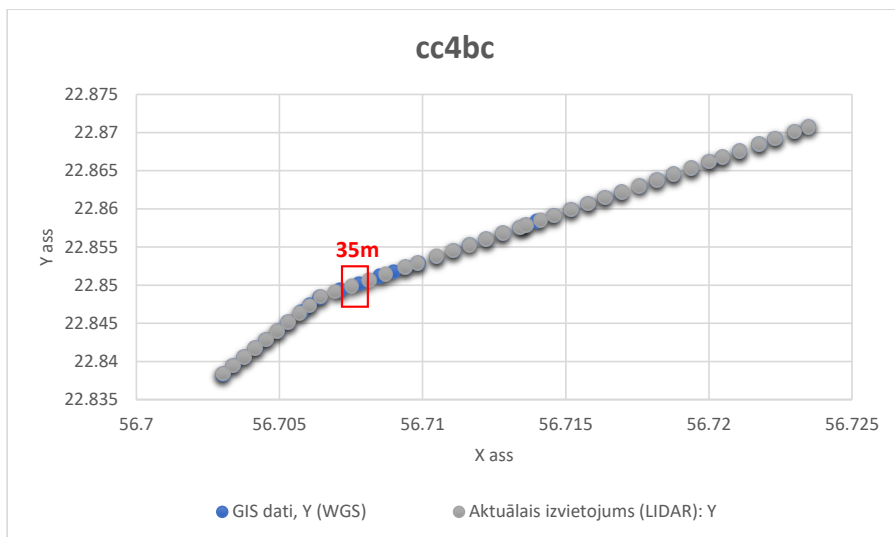
Viena no AS “Sadales tīkls” biznesa procesa kritiskajām prasībām ir tīkla infrastruktūras elementu izvietojuma precizitāte. Lai sasniegtu šo mērķi, no izveidotā tīkla modeļa tika iegūtas precīzas koordinātas par balstu atrašanās vietām (x, y koordinātes), kā arī to faktiskais augstums. 5.14. tab. ir prezentēts detalizēts viena tehniskā objekta cc4bc datu salīdzinājums, kas sniedz ieskatu precizitātes atšķirībās starp dažādiem datu avotiem. Papildus šiem kvantitatīvajiem datiem, attēlotais grafiskais salīdzinājums (5.21. att.) sniedz vizuālu ieskatu starpību raksturā starp GIS un LIDAR datiem. Pelēkie punkti attēlo aktuālo infrastruktūras elementu izvietojumu, savukārt zilie punkti norāda uz GIS datu bāzē pieejamo informāciju.

Analizējot šo grafisko attēlojumu, ir skaidri redzams, ka GIS dati bieži vien nesakrīt ar reālo situāciju uz vietas. Piemēram, balsts ar identifikatoru 186747087, kura pozīcija GIS datu bāzē ir reģistrēta ar būtisku nobīdi no tā faktiskās atrašanās vietas - šī nobīde ir aptuveni 35 metri. Šāda mēroga neprecizitātes var būtiski ietekmēt infrastruktūras pārvaldību un plānošanu.

5.14. tabula

Tehniska objekta cc4bc balstu telpiskā izvietojuma salīdzinājums

| GIS dati |              |                      |              |            |              |       |                      |                      |                 | LIDAR dati                                |                                           |                                                                   |                                                  |
|----------|--------------|----------------------|--------------|------------|--------------|-------|----------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| T_O_ID   | Iezīme       | Tīkls<br>elementa ID | Klases<br>ID | Klase      | Grupas<br>ID | Grupa | GIS dati,<br>X (WGS) | GIS dati,<br>Y (WGS) | Izbūvēs<br>gads | Aktuālais<br>izvietojums<br>(LIDAR):<br>X | Aktuālais<br>izvietojums<br>(LIDAR):<br>Y | Aktuālais<br>izvietojums<br>(LIDAR):<br>Z<br>(no zemes<br>līmeņa) | Staba<br>perpendikulārs<br>virsmas virsmei,<br>m |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 10224234             | 600          | V'S koka I | 1092         | Koka  | 56.7105              | 22.8538              | 2006            | 56.7105                                   | 22.8538                                   | 127.151                                                           | 10.985                                           |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 10224235             | 601          | V'S koka A | 1092         | Koka  | 56.7064              | 22.8484              | 2006            | 56.7064                                   | 22.8485                                   | 127.324                                                           | 10.281                                           |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 10224236             | 600          | V'S koka I | 1092         | Koka  | 56.7085              | 22.8511              | 2006            | 56.7081                                   | 22.8507                                   | 128.76                                                            | 9.769                                            |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 10224238             | 600          | V'S koka I | 1092         | Koka  | 56.7071              | 22.8494              | 2006            | 56.7069                                   | 22.8491                                   | 128.491                                                           | 9.91                                             |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 10224239             | 600          | V'S koka I | 1092         | Koka  | 56.7061              | 22.8474              | 2006            | 56.7061                                   | 22.8473                                   | 127.75                                                            | 11.253                                           |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 10242565             | 600          | V'S koka I | 1092         | Koka  | 56.7136              | 22.8578              | 2004            | 56.7136                                   | 22.8578                                   | 126.389                                                           | 12.426                                           |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 11093504             | 600          | V'S koka I | 1092         | Koka  | 56.714               | 22.8584              | 2004            | 56.7141                                   | 22.8585                                   | 125.401                                                           | 10.305                                           |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 186747087            | 600          | V'S koka I | 1092         | Koka  | 56.7078              | 22.8502              | 2017            | 56.7075                                   | 22.8499                                   | 128.789                                                           | 9.931                                            |
| cc4bc    | 33085#E 5807 | 254426807            | 600          | V'S koka I | 1092         | Koka  | 56.7146              | 22.8591              | 2021            | 56.7146                                   | 22.8591                                   | 123.949                                                           | 10.354                                           |



5.21. att. Balstu izvietojuma statuss (līnijas fragments).

Šī situācija uzsver nepieciešamību pēc augstas precizitātes datiem, ko var nodrošināt, izmantojot *LIDAR* tehnoloģijas. *LIDAR* dati piedāvā ievērojami augstāku detalizācijas pakāpi (atbilstoši definētajām prasībām punktu mākoņa datu kvalitātei (5.2. tab.) precizitāte tiks nodrošināta 10cm robežās) un precizitāti salīdzinājumā ar tradicionālajiem GIS datiem, kas bieži balstās uz novecojušām un mazāk precīzām mērījumu metodēm. Integrējot *LIDAR* datus ar esošajām ĢIS sistēmām, iespējams ievērojami uzlabot datu kvalitāti un precizitāti no vairākiem desmitiem metriem, ka liecina pētījuma rezultāts, līdz 10 cm. Tas ļauj veikt precīzāku infrastruktūras elementu analīzi, plānošanu un uzturēšanu, kā arī samazina potenciālos riskus un izmaksas, kas saistītas ar neprecīzu datu izmantošanu.

### 5.2.3.2. Gabarītmērījumi

Gabarītmērījumi ir kritisks process elektropārvades infrastruktūras pārvaldībā, nodrošinot precīzu un drošu tīkla elementu izvietojuma analīzi un novērtējumu. Šie mērījumi palīdz noteikt minimālos attālumus starp elektropārvades līnijām un zemi, kā arī starp dažādiem infrastruktūras elementiem, lai garantētu drošību un atbilstību tehniskajiem standartiem. Minimālo attālumu noteikšana ir būtiska, lai garantētu drošību un novērstu iespējamās avārijas situācijas. Elektropārvades līnijām jāatrodas pietiekamā augstumā virs zemes, lai izvairītos no iespējamajiem saskares gadījumiem ar cilvēkiem, transportlīdzekļiem vai veģetāciju. Šie mērījumi tiek veikti katrā laidumā, nodrošinot detalizētu un precīzu informāciju.

Izveidotajam tīkla modelim, kas ietver detalizētus atribūtdatus, tika konfigurēti specifiski parametri un sliekšņi (sliekšņu vērtības atbilstoši Latvijas energostandarta [107] un Aizsargjoslu likuma [73] noteiktas prasības ir apkopotas 5.15. tab.), kas definē

tehniskās prasības un normas, kurām mērījumu vērtībām jāatbilst. Šo parametru un sliekšņu konfigurēšana ir būtisks solis, lai nodrošinātu precīzu un efektīvu tīkla pārvaldību.

5.15. tabula

AS “Sadales tīkls” infrastruktūrai noteiktie minimālie vertikālie gaisvadu elektrolīnijas vadu attālumi no zemes

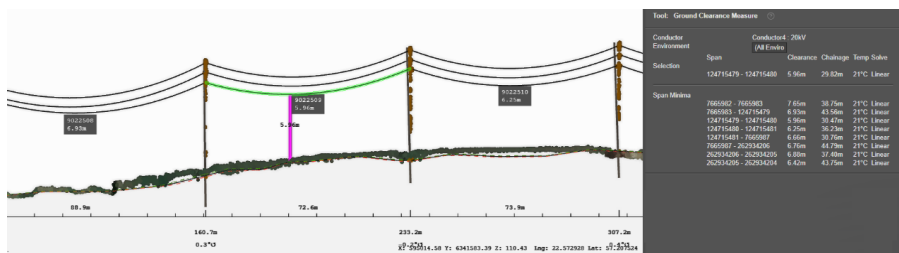
| Guldīšanas vide                                                 | Minimālais attālums, m |                  |                    |                  |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|--------------------|------------------|
|                                                                 | Zemspriegums           |                  | Vidējais spriegums |                  |
|                                                                 | kailvadiem             | izolētiem vadiem | kailvadiem         | izolētiem vadiem |
| Apdzīvotas vietas                                               | 6 m                    | 5 m              | 7 m                | 7 m              |
| Meža zeme                                                       | 6 m                    | 5 m              | 6 m                | 6 m              |
| Lauksaimniecībā izmantojama zeme                                | 6 m                    | 5 m              | 6 m                | 6 m              |
| Grūti pieejams apvidus                                          | 5 m                    | 4,5 m            | 5 m                | 4,5 m            |
| Pirmie un pēdējie līniju posmi pie transformatoru apakšstacijām | -                      | -                | 5 m                | 4,5 m            |
| Pievadi pie mājām                                               | -                      | 3,5 m            | -                  | -                |

Modelis tika papildināts ar detalizētiem atribūtdatiem, kas ietver dažādus tehniskos parametrus:

- Līnijas guldīšanas vide: apdzīvotas vietas, meža zeme, lauksaimniecībā izmantojama zeme, grūti pieejams apvidus;
- Līnijas sprieguma līmenis: ZS līnijas elements, VS līnijas elements;
- Kabeļa tips: kailvadu līnijas, izolēts vads (0,4-1kV), pārklāts vads (6-20kV);
- Kabeļa marka: A-2x16, A-2x50, A-4x16, A-4x25, A-4x35, A-4x50, A-4x70, AMKA-1x16+25, AMKA-3x120+95, AMKA-3x16+25, AMKA-3x35+50, AMKA-3x50+70, AMKA-3x70+95; A-3x25 20 kV darba spr., A-3x35 20 kV darba spr., A-3x50 20 kV darba spr., A-3x70 20 kV darba spr., A-3x95 20 kV darba spr., AS-3x25 20 kV, AS-3x35 20 kV, AS-3x50 20 kV, AS-3x70 20 kV, C-3x35 20kV; CCST-3x35 20kV d.s., CCST-3x75 20kV d.s., CCSX-3x35 20kV d.s., CCSX-3x70 20kV d.s., SAX-3x35 20kV d.s., SAX-3x50 20kV d.s.;
- Līnijas posmu galapunktu tipi: balsts, transformators, pievads pie mājas.

Katrai no šīm vērtībām tika noteikti pieļaujamie sliekšņi, lai identificētu, vai konkrētais mērījums atbilst vai neatbilst tehniskajiem standartiem [108].

Pēc parametru un sliekšņu konfigurēšanas tika veikta mērījumu analīze (analizējot *LIDAR* datus, tiek noteikti minimālie attālumi starp elektropārvades līnijām un zemes virsmu katrā laidumā pret zemes virsmu, kā tas ir attēlots profila skatā 5.22. att.), lai noteiktu, kuri laidumi atbilst noteiktajām normām un kuri nē. Šis process ietver automātisku datu salīdzināšanu ar konfigurētajiem sliekšņiem, identificējot visas novirzes no pieļaujamajām vērtībām.



5.22. att. Gabarītmerījumu automātiskā noteikšana *Neara* programmatūrā.

Detalizēts 5.22.att. redzama līnijas posma analīzes pārskats:

- Minimālā attāluma noteikšana:
  - Mērījuma vērtība - *LIDAR* datu analīzē noteikts, ka līnijas posma minimālais attālums līdz zemes virsmai ir 5,96 metri.
  - Mērījuma atrašanās vieta - šis minimālais attālums reģistrēts 29,82 metru attālumā no posma sākumpunkta, kura koordinātas ir norādītas balsta ar identifikatoru 124715479 atrašanās vietā.
- Līnijas posma specifika:
  - Sprieguma līmenis - minētais posms ir vidējā sprieguma līnija, kas darbina 20 kV spriegumu.
  - Izmantotais kabelis - šajā līnijas posmā izmantots AS-3x70 20 kV d.s. kabelis, kas ir specifiski konfigurēts šādām vidējā sprieguma līnijām.
  - Guldīšanas vide – lauksaimniecībā izmantojama teritorija.
- Atbilstība tehniskajām prasībām:
  - Tehniskie sliekšņi - balstoties uz vidējā sprieguma līniju tehniskajiem standartiem un drošības prasībām, minimālie pieļaujamie attālumi ir stingri noteikti [107], šajā gadījumā 6 metri
  - Identificētais neatbilstošais gabarīts - saskaņā ar šiem sliekšņiem, identificētā minimālā vērtība 5,96 metri ir zemāka par pieļaujamo robežu 6 metri, tādējādi klasificējot šo līnijas posmu kā neatbilstošu.

Šī detalizētā analīze parāda, kā *LIDAR* tehnoloģijas un precīzi konfigurētie tehniskie sliekšņi var palīdzēt identificēt un novērst potenciālās problēmas elektropārvades infrastruktūrā, nodrošinot tās drošu un efektīvu darbību.

Lai atvieglotu anomāliju identificēšanu un novēršanu, laidumi, kuru mērījumi neatbilst tehniskajām prasībām, tika vizualizēti kartes skatā. Kā parādīts 5.23. att., šī vizualizācija nodrošina skaidru un intuitīvu veidu, kā identificēt problemātiskās zonas. Tas arī dod iespēju efektīvi navigēt un detalizētāk pētīt lokālos ārpus normas gadījumus, identificēt un novērst problēmas.



5.23. att. Gabarītmērījumu noteikšana *Nera* programmatūrā (a. masveida skata vizualizācija, b. viena laiduma vizualizācija).

Lai pārliecinātos, ka pētījumā sasniegtie rezultāti ir korekti, tika organizēta validācija objekto 3 līmeņos:

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

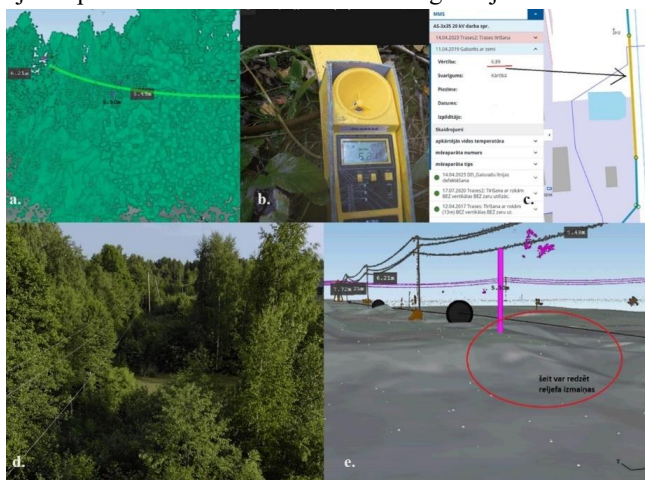
Apkopojot *LIDAR* datu analīzes rezultātus un salīdzinot tos ar manuālās defektēšanas laikā piefiksētajām vērtībām, vidējā atkāpe starp šīm divām metodēm ir 0,09 metri. Tomēr, atsevišķu mērījumu rezultāti svārstās no dažiem centimetriem līdz pat 97 centimetriem. Šie rezultāti ir sīkāk analizēti un apkopoti 5.16. tab., kur tie ir sagrupēti atbilstoši dažādām gradācijām.



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 no fiziskās piekļuves grūtībām un vides apstākļu izmaiņām.                                                                                                                                                                                                              |
| Līdz 20 cm      | 27 %               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Līdz 50 cm      | 17 %               | Tika veikta ekspertu pārbaude 10 nejauši izvēlētiem gadījumiem, lai pārbaudītu LIDAR datu analīzes rezultātu precizitāti. Pārbaudes rezultāti liecina, ka visos gadījumos LIDAR datu analīzes rezultāti apstiprinājās, un svārstību vērtības galvenokārt veidojās šādu faktoru dēļ: mērījumu veicēju nepietiekamas pieredzes, vides apstākļiem (apgrūtināta fiziska piekļuve). |
| Virs 50 cm      | 15 %               | Tika veikti papildus mērījumi 10 nejauši izvēlētiem gadījumiem, lai pārbaudītu LIDAR datu analīzes rezultātu precizitāti. Pārbaudes rezultāti liecina, ka visos gadījumos LIDAR datu analīzes rezultāti apstiprinājās                                                                                                                                                          |

Atkāpju svārstības virs 50 cm atspoguļo atšķirības starp manuālās un automatizētās mērīšanas metodēm dažādos apstākļos un situācijās. Reālos apstākļos var būt grūti piekļūt noteiktiem laiduma punktiem, kas apgrūtina precīzu manuālo mērījumu veikšanu un palielina kļūdu iespējamību. Šāds piemērs ir attēlots Attiecīgajā piemērā, kas ir attēlots 5.24. att., ir redzams, ka vairākkārtīgi veiktie manuālie mērījumi parādīja būtiskas variācijas rezultātos salīdzinājumā pret automatizēto metodi (6.21m/6.89m – 5.49m), šim gadījumam bija veikts padziļināts audits, kura rezultātā tika konstatēts, ka objekta zonā pastāv zemes uzberums, kas būtiski ietekmē mērījumu rezultātus. Fiziski objektam grūti piekļūt un pārbaudīt tiešā veidā dziļas veģetācijas un purvainas zemes virsmas dēļ. Šajā gadījumā mērījumu atšķirību galvenokārt izraisa fiziskie faktori, kas ietekmē mērījumu precizitāti: zemes uzberums un veģetācijas slānis.



5.24. att. Gabarītmerījumu noteikšana dažādās metodēs (a. *Neara* programmatūrā, b. papildus mērījums, c. manuālās defektēšanas rezultātā) objektam (d.) ar fiziski grūtu piekļuvi (e.zemes reljefa izskats bez veģetācijas slāņa).

Secinot var teikt, ka šī pieeja gabarītmērījumu noteikšanai nodrošina, ka *LIDAR* datu analīzes rezultāti ir uzticami un atbilst pieņemtajiem tehniskajiem standartiem, vienlaikus ņemot vērā praktiskās īstenošanas apstākļus.

Automatizētās *LIDAR* datu analīzes izmantošana elektrolīniju gabarītu noteikšanā piedāvā vairākas būtiskas priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālajām manuālajām metodēm. Šīs priekšrocības ietver augstāku precizitāti, efektivitāti un drošību. Zemāk ir aprakstītas galvenās priekšrocības:

- Augsta precizitāte - *LIDAR* tehnoloģija nodrošina ļoti detalizētus trīsdimensiju modeļus, kas ļauj precīzi izmērīt attālumus starp elektrolīnijām un zemes virsmu, kā arī starp citiem objektiem. Automatizētais process samazina cilvēciskās kļūdas iespējamību, kas bieži rodas manuālo mērījumu veikšanas laikā.
- Efektivitāte - automatizētās sistēmas spēj efektīvi apstrādāt lielus datu apjomus, ļaujot aptvert plašas teritorijas un veikt mērījumus uzreiz vairākiem objektiem salīdzinājumā ar manuālajām metodēm.
- Drošība un pieejamība - spēja analizēt grūti pieejamus objektus, neapdraudot personālu (samazināta cilvēku iesaiste bīstamās zonās).

#### 5.2.3.3. Vadu izregulēšanās

Elektropārvades līniju vektorizācija sniedz papildu iespējas, kas ļauj izveidot precīzus elektrolīniju modeļus. Izmantojot analītiskas metodes, šie modeļi var precīzi noteikt katra vada nokari un identificēt defektus - vadu izregulēšanas gadījumus. Lai veiktu šos aprēķinus, pētījuma laikā tika definētas vairākas kvantitatīvas vērtības, kas ļauj sasniegt izvirzītos mērķus:

- Vides temperatūra (°C), mērījumu veikšanas laikā (*LIDAR* datu vākšanas laika temperatūra) jāņem vērā temperatūra, jo tā ietekmē vadu garumu un nokari;
- 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:
  - o Apakšējam vadam L1, m
  - o 2.vadam no apakšas L2, m
  - o 3.vadam no apakšas L3, m
  - o 4.vadam no apakšas L4, m
- Minimālais savstarpējais vadu attālums laidumā:
  - o Starp L1 un L2
  - o Starp L2 un L3
  - o Starp L3 un L4

- Vadu nokare: Nevienmērīga, vadi var savīties:
  - koeficients1 (vadu attāluma starp L1 un L2 īpatsvars pret vadu attālumu starp L2 un L3)
  - koeficients2 (vadu attāluma starp L1 un L2 īpatsvars pret vadu attālumu starp L3 un L4).

Iegūtos datus salīdzina ar pieļaujamajā vērtībām atbilstoši Latvijas energostandarta [109] prasībām. Attālumiem starp vadiem, vidējā sprieguma elektrolīnijās ar tapizolatoriem ar jebkuru vadu izvietojumu attālumam starp kailvadiem  $d$  (m) izejot no vadu tuvinājuma laidumā, jābūt ne mazākām par aprēķināto pēc šādas formulas:

$$d = \frac{U}{110} + 0,19\sqrt{fb} \quad (6)$$

kur:

$U$  – elektrolīnijas spriegums, kV;

$f$  – gabarītlaidumam atbilstoša vislielākā nokare, m;

$b$  – apledošanas sienas biezums, mm (bet ne lielāks par 20 mm).

Pēc šīs formulas aprēķinātie attālumi starp kailvadiem nokarēm līdz 4m attēloti 5.17. tab.. Šo formulu izmanto, lai nodrošinātu drošu attālumu starp kailvadiem, lai samazinātu risku, ka vadi varētu pieskarties vai tuvoties viens otram neparedzētos apstākļos, piemēram, stipras apledošanas vai vēja ietekmē.

5.17. tabula

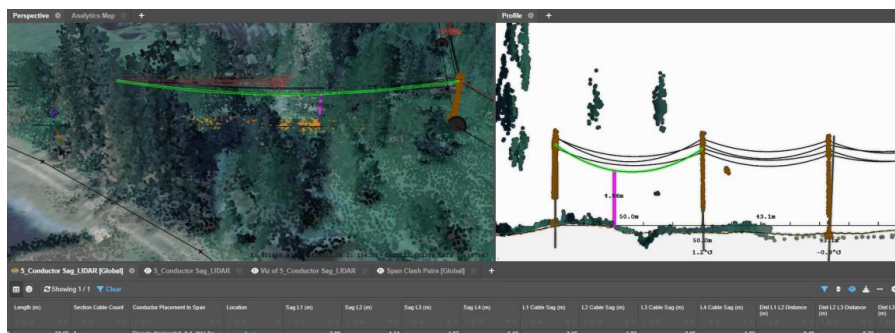
Minimālie attālumi starp kailvadiem gaisvadu elektrolīnijās

| $U, \text{ kV}$ | $b, \text{ mm}$ | Minimālais attēlums starp vadiem, m vadu nokarēm, m |     |      |      |      |      |
|-----------------|-----------------|-----------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|
|                 |                 | līdz 1,5                                            | 2   | 2,5  | 3    | 3,5  | 4    |
| 6-10            | 5               | 0,6                                                 | 0,7 | 0,75 | 0,8  | 0,85 | 0,9  |
|                 | 10              | 0,8                                                 | 0,9 | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,25 |
|                 | 15              | 0,95                                                | 1,1 | 1,25 | 1,35 | 1,45 | 1,55 |
|                 | 20              | 1,1                                                 | 1,3 | 1,4  | 1,5  | 1,65 | 1,75 |
| 20              | 5               | 0,7                                                 | 0,8 | 0,85 | 0,9  | 1,0  | 1,0  |
|                 | 10              | 0,9                                                 | 1,0 | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  |
|                 | 15              | 1,1                                                 | 1,2 | 1,35 | 1,45 | 1,55 | 1,65 |
|                 | 20              | 1,2                                                 | 1,4 | 1,5  | 1,65 | 1,8  | 1,9  |

Šādā veidā tiek iegūta precīza informācija par vadu izregulēšanas gadījumiem, kas ir kritiski svarīga elektropārvades tīklu drošai ekspluatācijas nodrošināšanai.

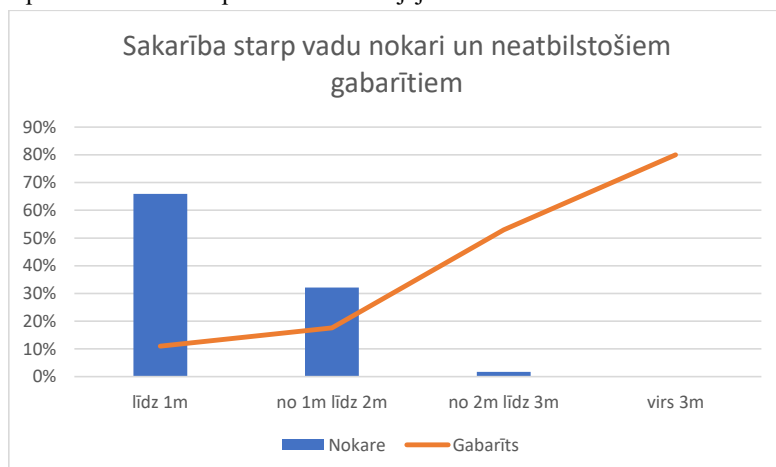
Programmatūra *Neara* nodrošina vizualizācijas rīkus, lai parādītu vadu nokari uz 3D modeļa. Programmatūras grafiskā interfeisā tiek izveidoti elektropārvades līniju profili, kas parāda līnijas un apkārtējās vides reljefa kontūru garumā. Analizējot profilus, tiek noteiktas vadu nokares vērtības, minimālie attālumi starp elektropārvades līnijām un zemes virsmu vai citiem objektiem katrā laidumā. Pamatojoties uz aprēķiniem, tiek identificēti vadi ar pārmērīgu nokari vai citiem defektiem, kas varētu radīt risku drošībai. 5.25. att. demonstrēts gadījums, kurā elektropārvades līnijas vada neatbilstoša nokare 2 metru apmērā rada negatīvu efektu, nenodrošinot nepieciešamo drošības gabarītu attālumu līdz zemei. Šāda situācija var radīt nopietnus drošības riskus,

jo minimālais pieļaujamais attālums netiek ievērots, kas ir kritiski svarīgi sabiedrības drošībai un infrastruktūras uzturēšanai.



5.25. att. Vadu izregulēšanas noteikšanas piemērs no realizētā pētījumā datiem *Neara* programmatūrā.

Pētījuma rezultāti daļēji apstiprināja eksperta pieņēmumu, ka lielāka vadu nokare nenodrošina drošu attālumu līdz zemei. 5.26. att. redzamā shēma ilustrē faktisko sakarību starp vadu nokari un neatbilstošiem gabarītiem. Pie 2 metru nokares, vairāk nekā 50% gadījumu netiek ievērots minimālais drošības attālums līdz zemei - palielināta iespēja, ka vadi nonāk pārāk tuvu zemei, radot drošības apdraudējumu sabiedrībai un apgrūtinot elektrolīniju uzturēšanu. Šī neatbilstība būtiski palielinās, ja nokare sasniedz 3 metrus, kur neatbilstoši gabarīti pārsniedz 80 %. Šie dati uzsvēr nepieciešamību rūpīgi monitorēt un kontrolēt vadu nokari - būtiski palielinās negadījumu risks, jo ievērojami vairāk gadījumu neatbilst drošības normām, kas var izraisīt potenciālus elektropārvades tīkla bojājumus un drošības incidentus.



5.26. att. Faktiska sakarība starp vadu nokari un neatbilstošiem gabarītiem pētāmajā tvērumā.

Šo parametru definēšana un masveida automatizēta analīze ļauj precīzi modelēt un kontrolēt elektropārvades līniju stāvakli, nodrošinot uzticamu un drošu elektropārvades

tīklu. Nokares un savstarpējo attālumu mērījumi ir īpaši svarīgi drošības un uzturēšanas uzdevumu veikšanai, jo tie palīdz savlaicīgi identificēt potenciālos defektus un novērst iespējamus incidentus.

#### 5.2.3.4. Vadu izvietojums balstos un attālumi starp vadu stiprinājumiem

Papildus mērījums kas ir izpēfīts eksperimenta gaitā un ietilpst AS “Sadales tīkls” defektēšanas procesa biznesa prasību sarakstā ir elektropārvades vadu izvietojums balstos un attālumi starp vadu stiprinājumiem. Tie ir būtiski parametri, kas ietekmē elektrotīkla drošību, uzturēšanu un darbības efektivitāti. Detalizēta vadu pozicionēšanas analīze katrā balstā ļauj novērtēt konstrukcijas stabilitāti un atbilstību drošības standartiem un nodrošina iespēju ātri identificēt un novērst potenciālus defektus vai nesakritības ar projektētajiem parametriem.

Lai identificētu kritiskās vērtības un atklātu defektus, kas var apdraudēt elektropārvades līniju integritāti un darbību, ir būtiski veikt aprēķinus šādiem parametriem:

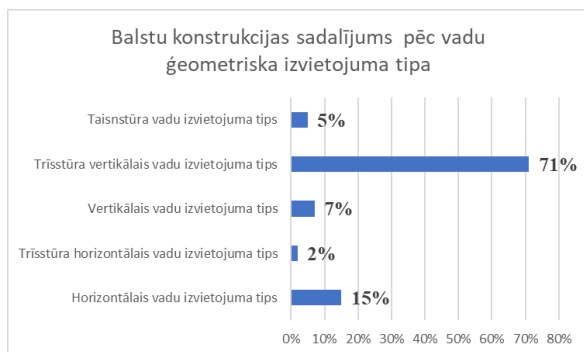
- Vertikālais attālums starp vadiem balstā (no pirmā vada (apakšējā) līdz otrajam vadam);
- Vertikālais attālums starp vadiem balstā (no otrā vada līdz trešajam vadam);
- Vertikālais attālums starp vadiem balstā (no trešā vada līdz ceturtajam vadam).

Šo vertikālo attālumu aprēķināšana tiek veikta, balstoties uz infrastruktūras vektorizācijas modeļa matemātisko aprakstu, kā detalizēti izklāstīts sadaļā "5.2.3 Infrastruktūras ģeotelpiskie mērījumi". Pētījuma gaitā tika veikti aprēķini visiem balstiem. Daži piemēri ir attēloti 5.27. att., kur redzams, ka balstu konstrukcijām ar vertikālo vadu izvietojuma ģeometrijas tipu aprēķinātās vērtības ir tuvu nullei. Šie parametri, ņemot vērā konstrukcijas specifiku, nav būtiski defektēšanas procesa vajadzībām.



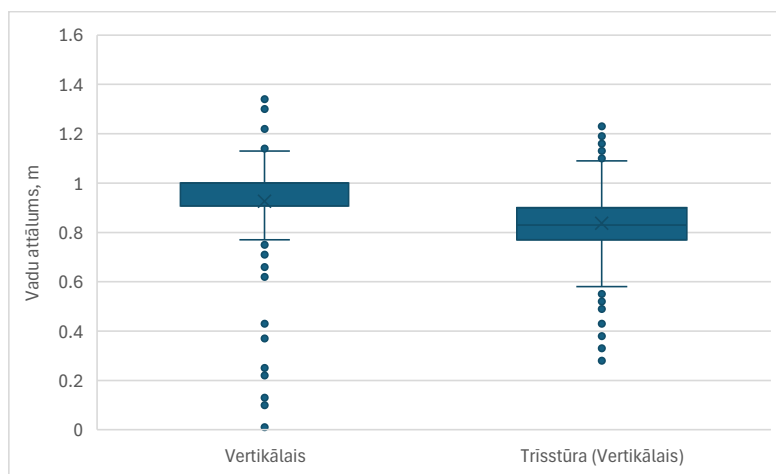
5.27.att. Vadu stiprinājumu vertikālā attāluma noteikšana *Neara* programmatūrā (a. balsts ar vadu horizontālo izvietojuma tipu; b. balsts ar vadu vertikālo izvietojuma tipu).

Pētījuma teritorijā balstu konstrukcijas sadalījums, kas atspoguļots 5.28. attēlā pēc vadu ģeometriskā izvietojuma tipa ir sekojošais: horizontālais vadu izvietojuma tips – 15 %; trīsstūra horizontālais vadu izvietojuma tips – 2 %; vertikālais vadu izvietojuma tips – 7 %; trīsstūra vertikālais vadu izvietojuma tips – 71 %; taisnstūra vadu izvietojuma tips – 5 %.



5.28.att. Balstu konstrukcijas sadalījums pēc vadu ģeometriskā izvietojuma tipa

Elektropārvades tīklu uzturēšanā būtiska nozīme ir vadu izvietojumam balstos un vertikālajiem attālumiem starp vadu stiprinājumiem, it īpaši balstu konstrukcijās ar vertikālo vadu izvietojumu. Pētījuma laikā tika analizēti 78 % no visām balstu konstrukcijām ar šo specifiku. Diagrammā 5.29. att. ir parādīts identificēto vērtību klāsts, kur redzams, ka vidējais attālums starp vadiem ar vertikālo izvietojumu ir 0,93 m, savukārt vidējais attālums balstu konstrukcijām ar trīsstūra vertikālo vadu izvietojumu ir nedaudz mazāks - 0,84 m.



5.29. att. Attālumu vērtības starp vadu stiprinājumiem vertikālajiem un trīsstūra (vertikālais) vadu izvietojuma ģeometrijas tipiem.

Lielākās atkāpes no noteiktās vidējās vērtības, kas pārsniedz 20 cm, tika klasificētas kā defekti. Šādu defektu īpatsvars sastādīja 0,54 %, un tie ir jākoordinē novēršanai, lai nodrošinātu elektropārvades tīkla drošību un uzticamību. Defektu identificēšana un novēršana ir kritiska, lai uzturētu optimālu infrastruktūras darbību un mazinātu potenciālos riskus.

### 5.2.3.5. Balstu izsvēršanas vērtības

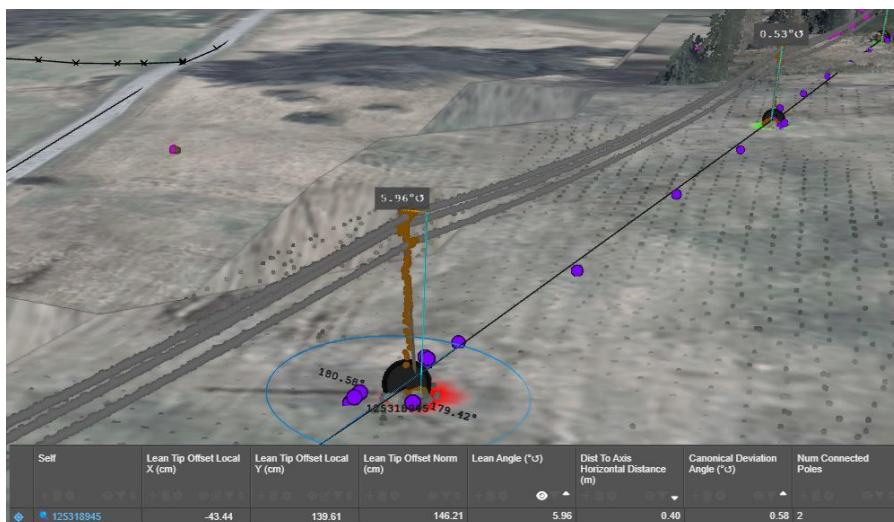
Balstu ģeometriskās novirzes noteikšana izmantojot *LIDAR* datus un vektorizāciju palīdz precīzi novērtēt elektropārvades līniju stabilitāti un drošību.

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

- Balsts atrodas ārpus līnijas ass – balsta centrs zemes līmenī atrodas virs 1 metra no līnijas ass. Šāda novirze var ietekmēt līnijas stabilitāti un prasa rūpīgu uzraudzību un korekcijas, lai novērstu iespējamus defektus un avārijas situācijas.
- Balsts izsvēries līnijas virzienā, jeb sagāzies līnijas virzienā – novērtējums tiek veikts, nomērot attālumu (novirzi), par cik balsta virsotnes vertikālā ass ir novirzījusies līnijas vadu virzienā no balsta centra zemes līmenī. Šāda izsvēršanās var radīt papildu slodzi uz vadiem un balstiem, palielinot risku līnijas bojājumiem.

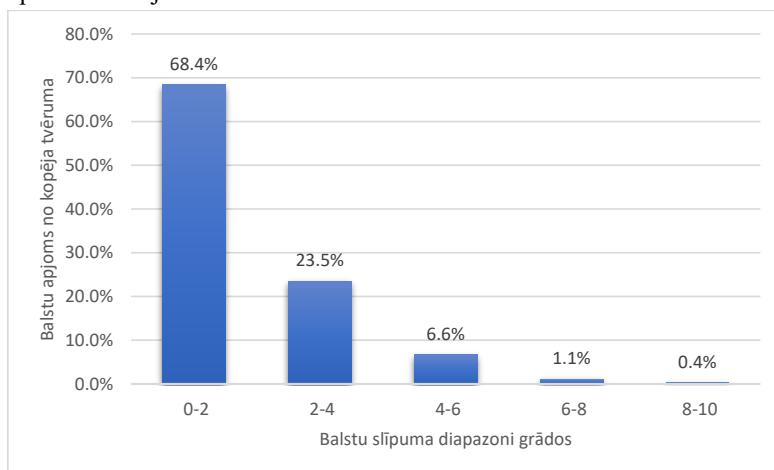
Balsts izsvēries ārpus līnijas ass – novērtējums tiek veikts, nomērot attālumu (novirzi), par cik balsta virsotnes vertikālā ass ir novirzījusies ārpus līnijas ass no balsta centra zemes līmenī. Šī izsvēršanās var izraisīt līnijas nestabilitāti un prasīt tūlītēju inženiertehnisko iejaukšanos. Identificētās novirzes un izsvēršanās gadījumi ir jākoordinē un jānovērš, lai uzturētu optimālu infrastruktūras darbību un samazinātu potenciālos riskus.

Lai noteiktu balstu ģeometriskās novirzes tika identificēti katra balsta centri zemes līmenī un balstu virsotnes pozīcijas, izmantojot vektorizēto modeli. Tad katram balstam tika izmērīti attālumi (novirzes) starp balsta centru zemes līmenī un balsta virsotnes vertikālo asi un tika klasificētas novirzes, balstoties uz noteiktajiem balsta izsvēršanās kritērijiem līnijas virzienā vai ārpus līnijas ass. Ir veikti atbilstoši konfigurācijas uzstādījumi, lai šo aprēķinu rezultāti tiktu vizualizēti Neara programmatūrā. Šāda vizualizācija ļauj detalizēti pārbaudīt un analizēt balstu slīpuma datus. Kā redzams 5.30. att., šī pieeja nodrošina skaidru un precīzu balstu izkārtojuma attēlojumu, kas ir būtiski, lai identificētu un novērtētu strukturālās anomālijas un iespējamus defektus.



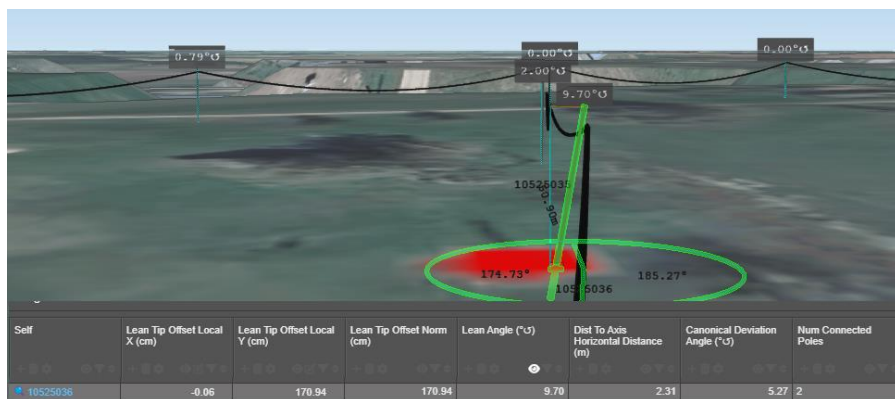
5.30. att. Balsta izsvēršanas noteikšanas piemērs *Neara* programmatūrā.

Pētījumā ietilpstošo balstu analīzes rezultāti sniedz iespēju apkopot statistiku par balstu slīpuma leņķiem, kā redzams 5.31. att.. Šī statistika norāda, kādi apjomi no visiem analizētajiem balstiem ir konstatēti slīpums piecos dažādos diapazonos. Vislielākais apjoms, 68,4 %, sastāda balsti ar slīpumu līdz 2 grādiem. Saskaņā ar AS “Sadales tīkls” biznesa procesa tehniskajām prasībām ir noteikts, ka slīpums, kas pārsniedz 7 grādus (piemērs balsta izsvēršanas defektam ir attēlots 5.31. att.), var norādīt uz strukturālām nepilnībām vai nestabilitāti, kas būtiski ietekmē elektropārvades līnijas darbību un drošību.



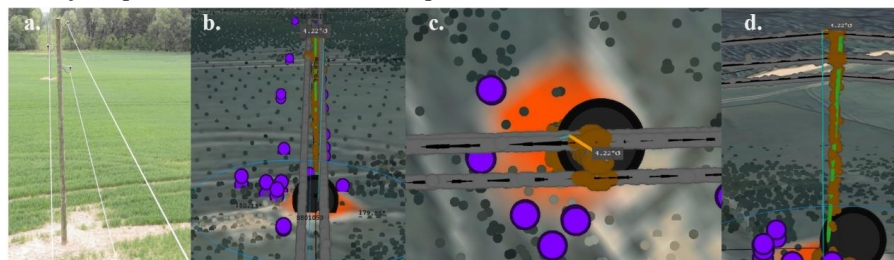
5.31. att. Elektropārvades līniju balstu slīpuma leņķu diapazoni grādos.





5.32. att. Balstu izsvēršanas 9.70° defekts.

Pētījuma rezultāti atklāja, ka 1.5% no analizēto balstu kopējā skaita ir sasnieguši pieļaujamo slīpuma robežu. Šie elementi tika validēti, salīdzinot ar manuāli iegūtajiem rezultātiem, kas atklāja nesakritības. Padziļināti pētīt šīs nesakritības, tika konstatēts, ka faktiski objektā ar cilvēka aci ir grūti pamanīt un identificēt balsta slīpuma vērtības. To ilustrē 5.33. att., kurā redzama balsta izsvēršanās 4.22 grādu leņķī, izmantojot fotofiksāciju un vairāku rakursu *LIDAR* datus. Tie ir tie gadījumi, kad *LIDAR* dati ievērojami pārsniedz manuālās metodes precizitāti.



5.33. att. Balstu izsvēršanās 4.22° vizualizācija: (a. objekta fotofiksācija, b. balsta *LIDAR* datu skats līnijas virzienā, c. balsta *LIDAR* datu skats no augšas, d. balsta *LIDAR* datu profila skats).

*LIDAR* datu un vektorizēto modeļu izmantošana elektropārvades balstu izsvēršanās novērtēšanā sniedz augstāku precizitāti un efektivitāti salīdzinājumā ar tradicionālajām manuālajām metodēm. Šī tehnoloģija spēj identificēt nelielas slīpuma novirzes, kas ir kritiskas elektropārvades līnijas drošībai un darbības integritātei, īpaši apstākļos, kur manuālā pārbaude ir sarežģīta.

#### 5.2.3.6. Veģetācijas pārvaldība trašu koridoros un aizsargjoslās

Viens no būtiskākajiem faktoriem, kas ietekmē elektropārvades līniju darbību, ir veģetācijas esamība elektropārvades līniju trases koridoros, tās pieaugums un tā radītie riski. Veģetācijas kontakts ar elektropārvades līnijām var izraisīt īssavienojumus,

avārijas atslēgšanas un pat nopietnus ugunsgrēkus. Viens no Latvijas sadales operatora tīkla ekspluatācijas regulārajiem darbiem ir trašu tīrīšana - darba process, kura laikā tiek attīrīta elektrolīnijas trase un tās aizsargjosla no apauguma (koki, zari, krūmi), kurš jau apdraud vai tuvākajā laikā apdraudēs elektrolīnijas drošumu. Tradicionālās metodes veģetācijas pārvaldībai ir laukietilpīgas un resursu ietilpīgas, balstītas uz manuāliem mērījumiem un vizuālām pārbaudēm ik pēc 4 gadiem.

Atbilstoši elektropārvades līnijas veidam, sprieguma līmenim un ieguldīšanas videi AS “Sadales tīkls” infrastruktūrai ir Latvijas likumdošanā [73] un tehniskajā standartā [107] noteiktas aizsargjoslu un trašu koridoru platības, vērtības ir apkopotas 5.18. tab., kur var redzēt, ka līnijas, kas ir izbūvētas mežu teritorijās aizsargjosla ir platākā nekā trašu koridors:

- Trašu koridors ir platība, kurā tiek izbūvēta elektropārvades līnija. Tas ietver tieši tos zemes gabalus, pa kuriem tiek izstieptas līnijas un novietoti stabi vai balsti. Trašu koridors nodrošina pietiekamu vietu elektropārvades līniju fiziskajai uzstādīšanai un regulārai apkopei.
- Aizsargjosla - ir noteikta platība ap trašu koridoru, kas nodrošina papildu drošības buferi, lai aizsargātu elektropārvades līnijas no ārējiem apdraudējumiem, kā arī lai nodrošinātu apkārtējo teritoriju drošību. Aizsargjoslā tiek ierobežota koku audzēšana, būvniecība un citas cilvēku darbības, kas varētu apdraudēt līnijas vai radīt risku.

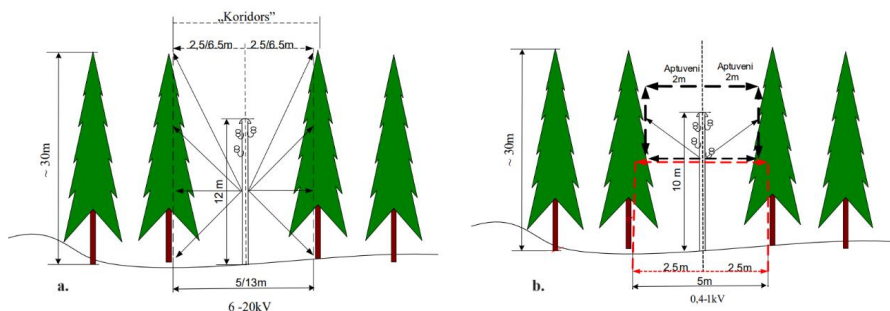
5.18. tabula

AS “Sadales tīkls” infrastruktūras aizsargjoslu noteiktās platības

| Elektropārvades līnijas spriegums un veids | Trases koridora platums, m | Aizsargjoslas platums, m | Elektropārvades līniju ieguldīšanas vide |
|--------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| VS (6-20 kV), EPL                          | 60 m                       | 13 m                     | Meža teritorija                          |
|                                            | 13 m                       | 13 m                     | Ārpus apdzīvotās vietas teritorijā       |
|                                            | 5 m                        | 5 m                      | Apdzīvotās vietas teritorija             |
| ZS (0,4 kV), EPL                           | 13 m                       | 5 m                      | Meža teritorija                          |
|                                            | 13 m                       | 5 m                      | Ārpus apdzīvotās vietas teritorijā       |
|                                            | 5 m                        | 5 m                      | Apdzīvotās vietas teritorija             |
| VS, ZS (0,4-20 kV), kabeļu līnijas         | 3 m                        | 3 m                      | Meža teritorija                          |
|                                            | 2 m                        | 2 m                      | Ārpus apdzīvotās vietas teritorijā       |
|                                            | 2 m                        | 2 m                      | Apdzīvotās vietas teritorija             |

Tas notiek tāpēc, ka meža teritorijās pastāv lielāks risks, ka augošie koki vai vētras laikā nolauzti koki varētu sabojāt elektropārvades līnijas. Platākā aizsargjosla nodrošina, ka līnijas tiek pasargātas no iespējamiem kokiem vai zaru kritieniem, kas varētu izraisīt bojājumus vai pat izraisīt negadījumus.

Papildus aizsargjoslu un trašu koridoru platībām elektropārvades infrastruktūras uzturēšanā būtisks parametrs ir arī trašu koridora augstums, kas ir tieši atkarīgs no līnijas sprieguma līmeņa. Šis parametrs ir svarīgs, jo tas nosaka, kāda veģetācija ir pieļaujama koridora zonā virs elektrolīnijas.



5.34. att. Trašu koridoru tehniskie parametri atbilstoši sprieguma līmeņiem: a. vidējais spriegums, b. zemspriegums.

Kā parādīts 5.34. att., pastāv būtiskas atšķirības trašu koridora augstuma prasībās atkarībā no sprieguma līmeņa. Vidējā sprieguma elektrolīnijām, kuru sprieguma diapazons ir no 6 kV līdz 20 kV, trašu koridoram nav noteikts maksimālais augstuma ierobežojums. Tas nozīmē, ka visa veģetācija, kas aug virs šādām līnijām, tiek uzskatīta par risku, un ir nepieciešams to sistemātiski apgriezt vai iztīrīt. Tomēr zemsprieguma līnijām, kur spriegums svārstās diapazonā no 0,4 kV līdz 1 kV, tiek noteikts specifisks trašu koridora augstuma ierobežojums – 2 metri. Šis ierobežojums nozīmē, ka veģetācija, ieskaitot koku zarus, kas atrodas 2 metrus vai vairāk virs elektrolīnijas, netiks apgriezta vai iztīrīta, jo tā netiek uzskatīta par būtisku draudu zemsprieguma līnijām, ja vien tā nerada tiešu apdraudējumu līniju integritātei.

Aprakstītie kritēriji nosaka veģetācijas pārvaldības procesa prasības, kas atspoguļo dažādo sprieguma līmeņu elektrolīniju riska profilu un tehniskās prasības. Šie kritēriji nodrošina efektīvu veģetācijas kontroles stratēģiju īstenošanu, vienlaikus uzturot infrastruktūras drošību un optimizējot uzturēšanas resursus. Pētījuma gaitā tika noteiktas šādas aprēķinu vērtības:

- $S$ , (%) - veģetācijas seguma platības procents, kas norāda apauguma līmeni konkrētajā teritorijā (laidumā);
- $Ir/Nav$  - veģetācijas iekļaušanās trasē norāda uz veģetācijas klātbūtni vai trūkumu elektrolīnijas 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 elektrolīnijas vertikālo asi, mērot starp divām vertikālām plaknēm;
- $d_{min1}$ , (m):
  - 6-20kV - tuvākais pieļaujamais attālums starp koku zaru un elektrolīnijas vadu, mērot līdz zariem, kas iekļāvušies elektrolīnijas trasē. Trases ārējā mala tiek definēta kā nosacītas vertikālas virsmas abpus līnijai, sākot no zemes un turpinoties neierobežotā augstumā;
  - 0,4-1kV - tuvākais pieļaujamais attālums starp koku zaru un elektrolīnijas 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 0,4-1kV elektrolīnijām - tuvākais pieļaujamais attālums starp koku zaru un elektrolīnijas 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.

Šie kritēriji precīzi definē pieļaujamus attālumus un prasības, kas jāievēro veģetācijas pārvaldībā, lai garantētu elektrolīniju drošu darbību dažādos apstākļos un sprieguma līmeņos.

Vērtību analīze būtiski atvieglos datus balstītu veģetācijas pārvaldības organizāciju:

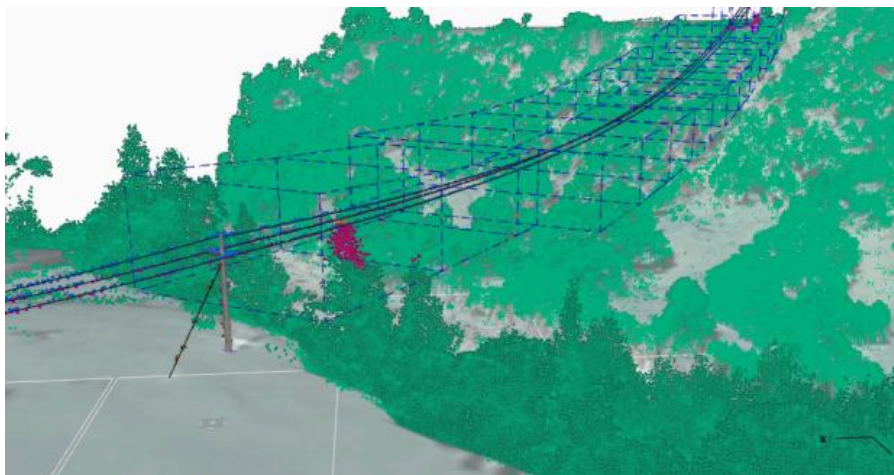
- Tā nodrošinās iespēju veidot uzkrāto trašu prioritāšu rangu, kas ļaus plānot trašu tīrīšanas darbus, balstoties uz prioritātes secību. Veģetācijas seguma platības analīze kopā ar aprēķinātajiem attālumiem līdz elektrolīniju vadiem ļauj klasificēt trašu apaugumu dažādās riska pakāpēs, tādējādi nodrošinot optimālu resursu sadali.
- Turklāt šī analīze sniegs iespēju efektīvi pārvaldīt trašu tīrīšanas specializēto tehniku. Zinot veģetācijas apauguma vertikālo vai horizontālo tipu, būs iespējams izvēlēties un rezervēt vispiemērotāko tehniku, tādējādi uzlabojot darbu efektivitāti un precizitāti.

5.35. att. ilustrē, ka horizontālā un vertikālā apauguma likvidēšanai tiek pielietotas attiecīgi specializētas tehnikas vienības, kas ir izvēlētas, balstoties uz konkrēto veģetācijas tipu un tīrīšanas prasībām.



5.35. att. AS “Sadales tīkls” infrastruktūras veģetācijas tīrīšanas specializētā tehnika (a. horizontālā apauguma tīrīšanai; b. vertikālā apauguma tīrīšanai (koku zaru apzāģēšanai)).

5.36. att. redzamas *Neara* programmatūrā ģenerētas ģeometriskas struktūras, kurās iekļauts elektrolīniju vektorizētais modelis, tika konfigurētas saskaņā ar AS “Sadales tīkls” noteiktajām procesa prasībām. Šīs ģeometriskās konfigurācijas precīzi atspoguļo elektrotīkla vadu izkārtojumu un to relāciju ar apkārtējo veģetāciju, kas ir būtiski efektīvai elektrolīniju pārvaldībai un uzturēšanai.



5.36. att. Uzģenerētas Neara programmatūrā ģeometrijas ar vadiem saskaņā ar AS “Sadales tīkls” procesa prasībām.

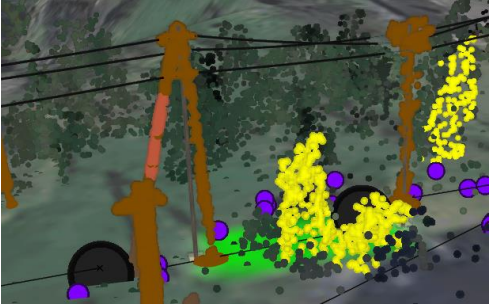
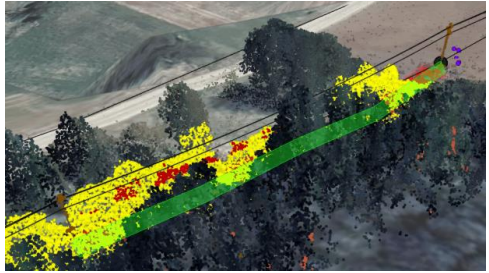


5.37. att. Tīkla modeļa (a.) salīdzinājums ar faktisko fotofiksāciju (b.) objektā.

Datu apstrādes rezultāti ir parādīti 5.19. tab., kurā var arī vizuāli redzēt veģētācijas esamības apjomus trasēs laidumos ID 128227799-21898393 (5.37. att. papildus ir attēlots laiduma faktiskā izskata (objekta fotofiksācija) salīdzinājums ar tīkla digitālo modeli) un 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 metra rādiusā no vadiem, tiek klasificēta kā augsta riska līmenis (atzīmēta sarkanā krāsā), savukārt teritorija, kas pārsniedz 1 metru, tiek uzskatīta par vidēja riska zonu (atzīmēta dzeltenā krāsā). Šāda pieeja uzlabo lietotāja izpratni, sniedzot vizuālus attēlojumus par riska līmeņiem ekrānā. Savukārt atribūtu tabulārie dati atspoguļo mērījumu kvantitatīvās vērtības.



Veģētācijas noteikšanas *LIDAR* datu analīzes rezultāta piemērs

| Parametrs              | Vērtība                        |                                                                                     |
|------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Elementa ID            | 128227799-21898393             |   |
| Kabeļa tips            | AS-3x25 20 kV, kailvadu līnija |                                                                                     |
| Laiduma garums         | 9,99 m                         |                                                                                     |
| Ieguldīšanas vide      | Lauksaimniecībā izmantotā zeme |                                                                                     |
| Trašu koridora platums | 13 m                           |                                                                                     |
| $S_v$ (%)              | 16,6 %                         |                                                                                     |
| Iekļaušanās trasē      | Vertikāli                      |                                                                                     |
| $h_{vert\ min}$        | 2,74 m                         |                                                                                     |
| $w_{horizon\ min}$     | -                              |                                                                                     |
| $d_{min1}$             | 3,04 m                         |                                                                                     |
| $d_{min2}$             | -                              |  |
| Elementa ID            | 125462403-7673718              |                                                                                     |
| Kabeļa tips            | A-3x70 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          |                                                                                     |
| $h_{vert\ min}$        | 1,22 m                         |                                                                                     |
| $w_{horizon\ min}$     | 0,15 m                         |                                                                                     |
| $d_{min1}$             | 0,36 m                         |                                                                                     |
| $d_{min2}$             | 0,87 m                         |                                                                                     |

Lai novērtētu šo aprēķinu precizitāti, *LIDAR* datu rezultāti tika salīdzināti ar manuāli iegūtiem veģētācijas novērtējumiem, ko veica AS “Sadales tīkls” speciālisti laukā. Rezultāti attiecībā uz veģētācijas pārklājumu laidumos, izmantojot abas metodes, ir attēloti 5.20. tab. Salīdzinot rezultātus, ņemot vērā riska gradāciju, vislielākās neatbilstības tika novērotas vidēji augsta riska veģētācijas klasifikācijā ar novirzi 10,30 %, kā arī augsta riska klasifikācijā ar novirzi 9,09 %. Lai verificētu *LIDAR* datu analīzes precizitāti, lauka pārbaudēs tika atkārtoti novērtēti laidumu trases, kuros tika

konstatētas atšķirības augsta (8 laidumos) un vidēji augsta riska vērtībās (17 laidumos). Pārbaudes procesā AS “Sadales tīkls” eksperti apstiprināja, ka uz *LIDAR* balstītie aprēķini ir precīzi visos pārbaudītajos laidumos. Atkārtotais novērtējums norādīja, ka neatbilstības galvenokārt radās cilvēku kļūdu dēļ, kas bija aptuveni 10% robežās, tādējādi vēl vairāk uzsverot *LIDAR* tehnoloģijas uzticamību veģetācijas riska novērtēšanā elektrolīniju pārvaldībā.

5.20. tabula

Veģetācijas analīzes rezultātu salīdzinājums

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

Mērījumu rezultāti ļauj veikt detalizētu analīzi, prognozēt potenciālos riskus, kas saistīti ar veģetācijas augšanu, un plānot profilaktiskus pasākumus, nodrošinot nepārtrauktu un drošu elektrotīkla darbību.

#### 5.2.4. Datu apstrādes realizācijas parametri

Lai nodrošinātu sistematizētu datu apstrādes un analīzes procesu sadales sistēmas virszemes infrastruktūras inspekcijai, izmantojot *RGB* un *LIDAR* datus, ir nepieciešama datu apstrādes organizatoriskā darbpilūsma, kas ietver šādas galvenās komponentes: datu apstrādes koordinēšana, *LIDAR* un *RGB* datu apstrāde, tehniskā atbalsta nodrošināšana. 5.21. tab. ir apkopotas realizācijas komponentes ar nepieciešamajām atbildībām un kompetencēm.

5.21. 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.<br>Pieredze sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā.<br>Plašas zināšanas BGK operāciju veikšanā un lidojumu plānošanā.<br>LVS-EN 50110-1:2013 - elektrodrošības apmācība. |

| 5.21. tabula (turpinājums) |                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>LIDAR</i> datu apstrāde | <i>LIDAR</i> datu un analīzes kvalitātes kontrole un apstiprināšana.<br><i>LIDAR</i> datu apstrāde, izmantojot specializētas programmatūras rīkus.<br>Ģeotelpisko mērījumu veikšana.<br>Ģeotelpiskās iezīmes un defektu identificēšana. | Elektroinženiera kompetence - tehniskā izpratne par elektropārvades līniju struktūru un darbību.<br>Pieredze sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā.<br>Izpratne par <i>LIDAR</i> tehnoloģijām, to darbības principiem un pielietojumu.<br>Prasme strādāt ar <i>LIDAR</i> datu apstrādes programmatūru un rīkiem.                                              |
| <i>RGB</i> datu apstrāde   | <i>RGB</i> datu kvalitātes kontrole un apstiprināšana.<br><i>RGB</i> datu kopas analīze, anotēšana.<br>Vizuālo defektu identificēšana.                                                                                                  | Elektroinženiera kompetence - tehniskā izpratne par elektropārvades līniju struktūru un darbību.<br>Pieredze sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā.<br>LVS-EN 50110-1:2013 - elektrodrošības apmācība.                                                                                                                                                        |
| Rezultātu interpretācija   | Atskaišu sagatavošana.<br>Prasību definēšana un uzturēšana.                                                                                                                                                                             | Elektroinženiera kompetence - tehniskā izpratne par elektropārvades līniju struktūru un darbību.<br>Pieredze sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijā.<br>LVS-EN 50110-1:2013 - elektrodrošības apmācība.<br>Spēja analizēt un interpretēt sarežģītus datus, izstrādājot secinājumus un risinājumus.<br>Izpratne par statistikas metodēm un analīzes principiem. |
| Tehniskais atbalsts        | Konfigurāciju nodrošināšana<br><i>AI</i> modeļu apmācība un vērtēšana automātiskai defektu noteikšanai.<br>Datu apmaiņas nodrošināšana ar citām IS.                                                                                     | IS inženiera kompetences<br>Praktiskās un teorētiskās zināšanas datu apstrādē, programmēšanas valodas ( <i>Python</i> ), par mašīnmācīšanās bibliotēkām un rīkiem.<br>Datu analītika.                                                                                                                                                                               |

Izvērtējot realizācijas komponentes, ir jāatzīmē, ka sadales sistēmas infrastruktūras inspekcijām būs nepieciešamas specifiskās datu analītikas kompetences, kas manuālajā procesā netika izmantotas:

- *AI* modeļu apmācība – kritiskā komponente *RGB* datu analīzei, jo tās nodrošina attēlu apstrādi, objektu detekciju, kas ir nepieciešamas defektu identificēšanas automatizācijai un infrastruktūras elementu novērtēšanai.
- *LIDAR* datu apstrāde - punktu mākoņu apstrādes, lai veiktu detalizētu infrastruktūras vektorizāciju un analīzi, kas sniedz papildu dimensiju un precizitāti inspekcijās, kur *RGB* dati nav pietiekami.

### 5.2.5. Eksperimenta rezultātu kopsavilkums

Praktiskajā pētījumā veikta piedāvātas metodes validācija *RGB* datu kopas apstrādei, lai identificētu tīkla elementu mehāniskos bojājumus - sadales sistēmas virszemes infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālos defektus un *LIDAR* datu kopas apstrādi, lai veiktu ģeotelpiskās mērījumus, kas ļauj noteikt defektus telpiskajā vidē.



Papildus ir piedāvāti risinājumi defektu vizualizācijai un analīzei (atbilstoši defektu skaitam ģeogrāfiskajā topoloģijā, defektu bīstamības līmeņiem), tādējādi optimizējot tīkla plānošanas un lēmumu pieņemšanas procesus, padarot tos pārskatāmākus un efektīvākus.

Rezultātā, pētījumā ietvertajā poligonā tika apstrādātas sekojošas datu kopas:

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

Identificēto defektu un veikto mērījumu skaita 5.22. tab. sniegtais kopsavilkums pētījumā ietvertajā AS “Sadales tīkls” vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras poligonā atspoguļo salīdzinājumu starp dažādām analīzes metodēm (*RGB* datu analīze ar mākslīgā intelekta (*AI*) palīdzību, manuālā analīze un *LIDAR* datu analīze) attiecībā uz defektu skaitu un novērtējumu.

5.22. tabula

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

| Defektu veids                                                  | <i>RGB</i> datu kopas analīze (AI) | <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 uz izvietojuma piesaisti esošajiem vidē objektiem (ēkām, kokiem). Esošajā procesā pilnvērtīgi nav īstenots visam apjomam.                                                                                     |
| Gabarītmērījumi                                                | -                                  | -                                       | 8254 laidumi                                        | No 8254 veiktām 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 uz vizuālo novērtējumu, 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 attālumā 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° - nesakrītības tika pārbaudītas gan uz vietas objektos, gan datu analīzē, un tika apstiprināts, ka <i>LIDAR</i> datu aprēķini ir precīzāki.                                                          |

| 5.22. tabula (turpinājums)                              |   |   |                       |                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------|---|---|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Veģetācijas pārvaldība trašu koridoros un aizsargjoslās | - | - | 1468 laidumi ar risku | 1420 laidumi ar risku, nesakritības tika pārbaudītas gan uz vietas objektos, gan datu analizē, un tika apstiprināts, ka <i>LIDAR</i> datu aprēķini ir precīzāki. |

Balstoties uz veikto *RGB* un *LIDAR* datu kopas analīzes salīdzinājumu ar manuālās inspekcijas metodēm, var izdarīt šādus secinājumus:

- *LIDAR* tehnoloģija ievērojami uzlabo precizitāti, īpaši attiecībā uz telpisko izvietojumu noteikšanu un infrastruktūras defektu novērtēšanu. Pārbaudēs konstatētie rezultāti norāda, ka *LIDAR* mērījumu precizitāte ir apstiprināta gan uz vietas objektos, gan datu analizē, un būtiskas nesakritības netika novērotas.
- *RGB* datu analīze ar mākslīgā intelekta palīdzību ir efektīva tīkla elementu vizuālo defektu identificēšanā, tomēr manuālās metodes joprojām dominē attiecībā uz defektu skaita identificēšanu. Tas notiks līdz laikam, kamēr *AI* modeļi nebūs uztrenēti līdz ticamības līmenim (atsevišķo objektu identificēšanai tas prasa virs 1000 paraugu sagatavošanu)
- *LIDAR* tehnoloģijas pielietošana ļauj samazināt manuālā darba apjomu, jo īpaši sarežģītās vai grūti pieejamās vietās, izmantojot *LIDAR* datu masveida aprēķinu iespējas, tādējādi optimizējot tīkla inspekcijas procesu un mazinot manuāla resursa iesaisti procesos.
- *LIDAR* datu kopas nodrošina precīzāku veģetācijas riska novērtējumu elektrolīniju trašu koridoros un aizsargjoslās, salīdzinot ar manuālo metodi, kur tika konstatētas lielākās nesakritības vidēji augsta riska zonās. *LIDAR* datu precizitāte ir apstiprināta un uzskatāma par uzticamāku riska novērtēšanai.
- Manuālās inspekcijas metode bieži vien ir laikietilpīga un mazāk precīza, it īpaši veicot gabarītmērījumus un analizējot telpiskos datus. Papildu validācijas rezultāti norāda, ka 15% gadījumu manuālās mērījumu atšķirības pārsniedza 50 cm, kas apliecina *LIDAR* tehnoloģijas pārākumu šajās situācijās.

Datu apstrādes realizācijai identificēti arī sekojošie ierobežojumi, kas var ietekmēt rezultātu:

- Lielu datu kopu apstrāde var būt laikietilpīga un prasīt ievērojamus datu apstrādes jaudas resursus. Tas varētu ierobežot sistēmas pielietojamību reāllaikā vai lielos tīklos.
- Automātiskās defektu atpazīšanas algoritmu efektivitāte ir atkarīga no to apmācības kvalitātes un pielāgojamības dažādiem defektu veidiem. Nepietiekami trenēti vai ierobežoti algoritmi var identificēt defektus ar zemu ticamības radītāju.

Šo ierobežojumu apzināšana un to iespējamā mazināšana ir būtiska, lai optimizētu datu ievākšanas procesus un uzlabotu elektrolīniju defektēšanas efektivitāti un precizitāti.

### 5.3. Digitālās inspekcijas ieviešanas rekomendācijas

AS “Sadales tīkls” virszemes infrastruktūras digitālās inspekcijas eksperimentālās validācijas rezultāti liecina, ka elektroenerģijas sadales sistēmas virszemes infrastruktūras manuālo inspekcijas procesu iespējams digitāli pārveidot, izmantojot šādas pieejas:

- Infrastruktūras vizuālajam tehniskā stāvokļa novērtējumam izmantot augstas izšķirtspējas *RGB* datu kopu analīzi, kas nodrošina vairāku vizuālo defektu un anomāliju identificēšanu, efektīvāku ātruma ziņā un precīzāku (redzamība no augšas) defektu uzraudzību salīdzinājumā ar tradicionālajām metodēm.
- Ģeotelpisko mērījumu veikšanai izmantot *LIDAR* datu kopu analīzi un telpisko parametru aprēķinus, kas ļauj īstenot masveida aprēķinus un noteikt infrastruktūras elementu telpisko izvietojumu, attālumus. Šāda pieeja nodrošina precīzus datus, kas nepieciešami infrastruktūras stāvokļa novērtējumam, kā arī atbilstības un drošības prasību izpildei.

Šāda digitālā transformācija ne tikai samazina nepieciešamību pēc manuālām inspekcijām, bet arī ievērojami uzlabo inspekcijas procesu precizitāti. Defektu identifikācija, balstoties uz datiem, ļauj labāk pamatot katra novērotā defekta esamību, kas, savukārt, uzlabo uzturēšanas un plānošanas procesu kvalitāti elektroenerģijas sadales tīklā.

Digitālo inspekciju pieejas nodrošina analītiskus rīkus, kas ļauj veikt detalizētu datu analīzi, identificējot tendences un modeļus, kas var liecināt par potenciālām problēmām. Šāda informācija ir būtiska, lai veiktu proaktīvas darbības, kas var novērst nopietnākas bojājumu sekas, samazinot plānotos un neplānotos apkalpošanas darbus un uzlabojot elektroenerģijas piegādes uzticamību.

Veiksmīgai vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras digitālās inspekcijas ieviešanai vai pakāpeniskai transformācijai, pamatojoties uz veiktajiem eksperimentiem, ir piedāvātas sekojošas rekomendācijas, kas sadales sistēmas operatoriem samazinās riskus:

- Esošā inspekcijas procesa izvērtēšana: defektu kataloga izveide vai pārskatīšana, statistika par defektu apjomiem, ka arī padziļinātu analīzi par esošajiem inspekcijas rīkiem un metodēm, lai identificētu to stiprās un vājās puses. Ir svarīgi analizēt esošo informāciju, lai identificētu tendences un problemātiskās jomas, kas var ietekmēt inspekcijas efektivitāti. Ir svarīgi ņemt vērā, ka piedāvātais digitālais risinājums šobrīd nenodrošina defektu identificēšanu zemes līmenī. Tādēļ varētu būt lietderīgi izstrādāt hibrīda modeli, kas attēlots 5.38. att., kas apvieno manuālo inspekciju ar digitālo inspekcijas risinājumu vidējā sprieguma virszemes infrastruktūrai. Piedāvātajā hibrīdā modelī infrastruktūras elementi, kuriem nav paredzēti defekti zemes līmenī (20kV gaisvadu līnijas, dzelzsbetona balsti, koka balsti ar dzelzsbetona pastabiem, metāla balsti) tiks pārbaudīti ar digitālas inspekcijas risinājumu, savukārt elementi, kuriem jāpārbauda tehnisko stāvokli zemes līmenī (koka balsti) vai prasa apsekošanu iekšējās vai slēgtajos skapjos (transformatoru apakšstacijas, sadales punkti) tiks pārbaudīti manuāli. Tas ietver arī esošo

The diagram is divided into two horizontal sections. The top section, titled 'Manuālā inspekcija:', shows a workflow starting with a worker icon, leading to a box 'Infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtējums', then to a cylinder 'DEFEKTI /UTG/'. To the right, text lists 'Koka balsti - 1x4gados', 'Transformatoru apkalpošana - 1x4gados', and 'Sadales punkti - 1x2gados'. The bottom section, titled 'Digitālā inspekcija:', shows a workflow starting with a box 'dati' containing 'RGB', 'GIS', and 'LIDAR', which feed into two boxes: 'Vizuālo defektu noteikšana' and 'Ģeotelpisko defektu noteikšana'. These feed into a cylinder 'DEFEKTI' with the word 'apstrāde' below it. To the right, text lists 'Koka balsti - 1x4gados', 'Koka balsti ar dzelzsbetona pastabiem - 4gados', 'Mestība balsti - 1x4gados', 'Dzelzsbetona balsti - 1x4gados', and '20kV GVL (gaissvadu līnijas) - 1x4gados'. An icon of a person at a computer is shown at the bottom right. A central vertical line connects the two sections, with a database icon and the text 'GIS' and 'tika plānošana' on the right side.

**Manuālā inspekcija:**

Infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtējums

DEFEKTI /UTG/

Koka balsti - 1x4gados  
Transformatoru apkalpošana - 1x4gados  
Sadales punkti - 1x2gados

**Digitālā inspekcija:**

dati

RGB

GIS

LIDAR

Vizuālo defektu noteikšana

Ģeotelpisko defektu noteikšana

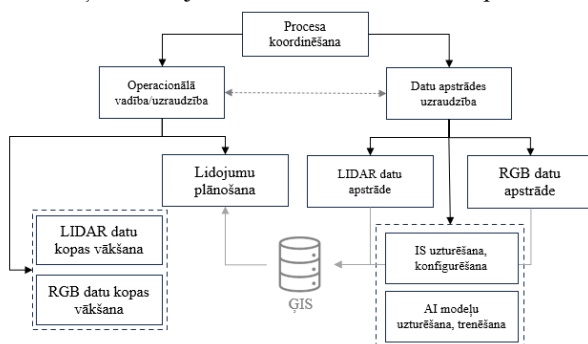
DEFEKTI

apstrāde

Koka balsti - 1x4gados  
Koka balsti ar dzelzsbetona pastabiem - 4gados  
Mestība balsti - 1x4gados  
Dzelzsbetona balsti - 1x4gados  
20kV GVL (gaissvadu līnijas) - 1x4gados

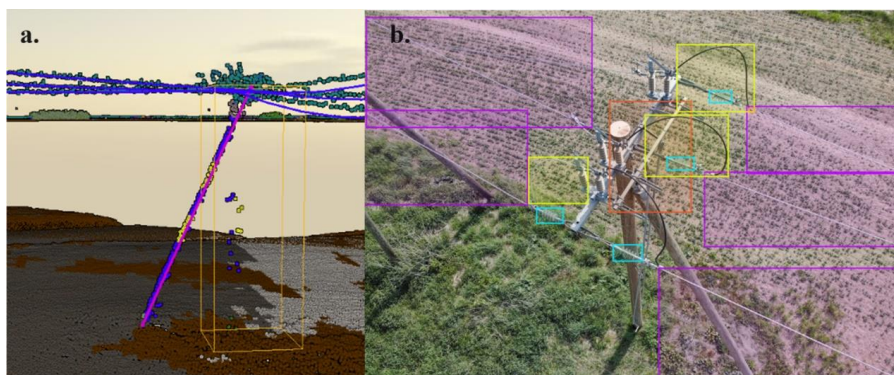
GIS tika plānošana

- Standartizētas procedūras noteikšana - izstrādāt un ieviest standartizētas procedūras digitālajās inspekcijas procesa realizācijai. Digitālās inspekcijas organizatoriskā shēma, kas attēlota 5.39. att., izklāsta galvenos procesa posmus, sākot ar datu vākšanas operatīvo pārraudzību, tostarp lidojumu plānu izstrādi, kas balstīta uz inspekcijas ilgtermiņa plāniem, regulāro pārbaudes periodu un elektrotīkla ģeogrāfisko izvietojumu, līdz pat datu kopu vākšanas nodrošinājumam. Digitālās inspekcijas otrs nozīmīgākais posms ir datu apstrāde un analīze. Šis posms ietver datu apstrādes darbību veikšanu, pārskatu sagatavošanu, kā arī IS konfigurācijas uzturēšanu atbilstoši uzņēmuma vajadzībām un regulējumu izmaiņām. Tāpat ir jānodrošina IS datu automatizācijas funkcionalitāšu nepārtraukta uzlabošana, tai skaitā *AI* modeļu apmācība un pielāgošana specifiskajiem inspekcijas uzdevumiem. Standartizētas procedūras ļaus efektīvāk koordinēt inspekcijas komandas darbības: mazinās darbību atkārtoto un iespējamās kļūdas, vienlaikus nodrošinot datus balstītos rezultātus, kas veicina precīzāku infrastruktūras tehniskā stāvokļa novērtējumu un tālākās uzturēšanas plānošanu.



143

- Datu apstrādes rīku izvēle - izvēlēties un pielāgot specializētus programmatūras rīkus, kas nodrošina tehniskās un funkcionālās prasības *RGB* un *LIDAR* datu apstrādei, kas ļautu automatizēti identificēt bojājumus un anomālijas virszemes infrastruktūras elementos. Pētījumā AS "Sadales tīkls" virszemes infrastruktūras inspekciju vajadzībām ir izstrādātās prasības *RGB* datu apstrādes rīkiem ir apkopotas 5.7. tab., kas spēj nodrošināt vizuālo defektu analīzi, izmantojot attēlu sasaisti ar tīkla elementiem no ĢIS un objektu atpazīšanu, ka arī aprakstītas funkcionalitātes *LIDAR* datu apstrādes risinājumiem, kas nodrošina detalizētu ģeotelpisko mērījumu veikšanu, precīzu infrastruktūras objektu 3D modelēšanu, jeb vektorizācijas funkcionalitāti un ģeotelpisko noviržu noteikšanu. Datu apstrādes rīku izvēles procesā ir būtiski ņemt vērā šādus kritērijus: apstrādes algoritmu precizitāte un efektivitāte (liela apjoma datu apstrāde, automatizācijas līmenis), integrācijas iespējas ar esošajām informācijas sistēmām, pielāgojamība operatora vajadzībām (konfigurāciju elastība) un lietošanas ērtums (vizualizācijas, datu filtrēšanas funkcionalitātes). Papildu uzmanība jāpievērš šo rīku spēju pārvaldīt lielus datu apjomus (pētījuma rezultāti liecina, ka, veicot datu vākšanu infrastruktūras 650 km garai līnijai, iegūtais kopējais datu apjoms ir 4,81 TB, no kuriem 0,79 TB veido *RGB* datu kopas, un *LIDAR* dati savukārt aizņem 4,02 TB.) un nodrošināt ātru analīzes laiku, kas ir kritiski sadales sistēmas operatoriem, kuru saimniecībā esošais elementu skaits ir desmitos reizēs lielāks salīdzinoši pret pārvades operatoru uzturēšanā esošo tīklu.
- Defektu atpazīšanas verifikācijas īstenošana - pirms digitālās inspekcijas plaša mēroga ieviešanas veikt rūpīgu verifikāciju visiem tīkla elementiem un to tipiem, kurus plāno ietvert digitālās inspekcijās. Šis process, lai gan laikietilpīgs, ļauj praktiski pārbaudīt risinājuma efektivitāti un identificēt potenciālās nepilnības, nodrošinot turpmāku datu precizitāti un ticamību. Verifikācijas laikā jāveic programmatūras konfigurācijas, kā arī elementu un defektu bibliotēku uzlabošana, lai nodrošinātu korektu datu interpretāciju un novērstu neprecizitātes. Pētījuma gaitā tika identificēta būtiska nepilnība, kas parādīta 5.40. att., kur nekorekta balsta konstrukcijas vektorizācija radās dēļ atbilstoša balsta tipa (I balsts ar pastabu) trūkuma elementu tipoloģijas bibliotēkā. Rezultātā sistēma identificēja balstu ar nekorektu balsta konstrukciju (I balsts), ko vēlāk verificēja, izmantojot fotofiksācijas datus, rezultātā tika reģistrēts defekts "izsvēries balsts", kas neeksistē. Pēc bibliotēkas atjaunināšanas un atkārtota modeļa pārreķināšanas problēma tika novērsta. Lai izvairītos no līdzīgām situācijām, verifikācijas posmā ieteicams veikt padziļinātu analīzi visiem atklātajiem neatbilstību gadījumiem, kas ļaus precīzi identificēt trūkumus un veikt nepieciešamās izmaiņas. Šāda pieeja nodrošinās digitālās inspekcijas risinājuma uzticamību, samazinot kļūdu skaitu.



5.40. att. Nekorekti aprakstīts tīkla elementa tips (a.balsta vektorizācijas rezultāts, b.balsta fotofiksācija).

- **Infrastruktūras investīciju novērtējums** - lai nodrošinātu ilgtspējīgu un efektīvu digitālās inspekcijas risinājuma ieviešanu, ir nepieciešams rūpīgi izvērtēt nepieciešamos kapitālieguldījumus vairākās jomās. Pirmkārt, jānovērtē resursu iegādes izmaksas datu vākšanas infrastruktūras izveidei, iekļaujot bezpilota gaisa kuģu (BGK), sensoru un citu datu ieguves iekārtu iegādi un integrāciju. Otrkārt, nepieciešams analizēt izdevumus par specializētas programmatūras licencēm un pielāgošanu, kas nodrošinās datu apstrādi un analīzi, tāpat arī atbilstošu datu glabāšanas risinājumu (piemēram, datu centru serveri vai mākoņpakalpojumi) izveidi un uzturēšanu, ievērojot operatora informācijas tehnoloģiju politikas prasības. Tāpat ir būtiski izstrādāt detalizētu sistēmas uzturēšanas plānu, ietverot ikgadējo tehniskās apkopes un programmatūras atjauninājumu izmaksas, lai nodrošinātu risinājuma ilgtermiņa darbību un operacionālo nepārtrauktību. Kopumā šāds investīciju novērtējums sniegs skaidru priekšstatu par nepieciešamajiem resursiem un palīdzēs formulēt stratēģiju digitālās inspekcijas sistēmas pilnveidošanai un attīstībai.
- **Personāla kompetenču pilnveide** – Digitālās inspekcijas risinājuma ieviešana nav iespējama bez darbinieku kompetenču paplašināšanas tādās jomās kā datu apstrāde, analītika un informācijas sistēmu inženierija, kas iepriekš nebija būtiska manuālā inspekcijas procesa ietvaros. Papildus nepieciešama arī BGK operatoru specializētā apmācība, lai nodrošinātu drošu un korektu datu vākšanu. Tāpēc ir kritiski svarīgi izstrādāt un īstenot mērķtiecīgas apmācību programmas speciālistiem, kas aptvertu prasmes darbam ar jaunajām tehnoloģijām un digitālajiem risinājumiem. Tas ļaus darbiniekiem ne tikai efektīvi darboties ar iegūtajiem datiem, bet arī kompetenti izmantot analītiskos rīkus un interpretēt rezultātus, pieņemot uz datiem balstītus lēmumus, kas stiprinās vispārējo infrastruktūras pārvaldības kvalitāti.

Šīs rekomendācijas nodrošina strukturētu ietvaru, kuru īstenošana sekmēs digitālo transformāciju, nodrošinot digitālās inspekcijas risinājuma ieviešanu sadales sistēmu operatora infrastruktūrā, samazinot riskus uz tehniskajām problēmām. Digitālās

inspekcijas risinājuma pilna vai daļēja (hibrīda) ieviešana kalpo par pamatu mērķtiecīgai resursu plānošanai un optimizēšanai un veicinot lēmumu pieņemšanu, kas balstīta uz datu analīzi, kas ir būtiska modernizētam un inovatīvam enerģētikas nozares vadības procesam.

## 5.4. Kopsavilkums

Šajā nodaļā detalizēti aprakstīts digitālās inspekcijas risinājuma eksperimentālais pētījums AS “Sadales tīkls” virszemes infrastruktūras poligonā ar kopējo gaisvadu līniju garumu 650km, iekļaujot *RGB* un *LIDAR* datu kopu iegūšanu, pielietojot BGK (*DJI Mavic 2 Pro RGB* datu vākšanai un *DJI Matrice 300RTK* ar *LIDAR* sensoru *YellowScan Mapper* punktu mākoņa datu kopas iegūšanai), un to datu apstrādes procesu infrastruktūras elementu tehniskā stāvokļa noteikšanai.

Tiek izklāstīti datu kopu iegūšanas tehniskie parametri, scenāriji un realizācijas metodes, kas nodrošina sākotnējo datu vākšanu, balstoties uz inovatīvām tehnoloģijām un aprīkojumu. Tiek definēti nepieciešamie tehniskie nosacījumi un specififikācijas, lai nodrošinātu izvirzīto mērķu sasniegšanu, atbilstoši Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” inspekcijas vajadzībām. Jāuzsver, ka infrastruktūras ģeogrāfiskais izvietojums, klimatiskie apstākļi un virszemes fiziskās infrastruktūras specifika (piemēram dzelzsbetona balstu pārsvars, izolēto un kailvadu līniju īpatsvars) un sadales operatora definētais defektu katalogs būtiski ietekmēs tehnisko parametru izstrādi datu iegūšanas prasībām.

Turpmākajā pētījumā posmā tiek piedāvātas datu apstrādes metodes infrastruktūras elementu tehniskā stāvokļa vizuālajai un ģeotelpiskajai novērtēšanai, kā arī definētas tehniskās prasības šo metožu īstenošanai. Ir izstrādāts un detalizēti analizēts attēlu apstrādes process vizuālo defektu identifikācijai, kurā noteiktu elementu attēli, izmantojot ģeoreferences datus, tiek saistīti ar tīkla komponentēm, un tiek ieviesta elementu un defektu anotēšanas funkcionalitāte, kas nodrošina datu kopu uzkrāšanu mākslīgā intelekta modeļu apmācībai un attīstībai. Tiek piedāvātas un analizētas metodes sadales sistēmas virszemes infrastruktūras ģeotelpiskā izvietojuma noteikšanai, tostarp: distances no līniju vadiem līdz zemei (gabarītmērījumi), vadu izregulēšanās un izvietojums, balstu izsvēršanās vērtības, ka arī veģetācijas esamības un apjoma novērtēšanai trašu koridoros. Pētījuma rezultāti tika pārbaudīti, salīdzinot tos ar esošā manuālā inspekcijas procesa datiem, kas apliecina piedāvātā datus balstītā risinājuma efektivitāti un potenciālu infrastruktūras pārvaldības procesos.

Nodaļas noslēgumā sniegts eksperimentālā pētījuma rezultātu kopsavilkums un apkopotas rekomendācijas, kas vērstas uz riska mazināšanu, ieviešot digitālās inspekcijas risinājumu sadales sistēmas operatoru infrastruktūrā. Rekomendācijās izklāstīti būtiski aspekti datu vākšanas un apstrādes procesu nodrošināšanai, kā arī uzsvērti nepieciešamie ieguldījumi tehnoloģijās un speciālistu kompetenču attīstībā. Ieteikumi aptver arī ilgtspējas un efektivitātes nodrošināšanas stratēģijas ilgtermiņa risinājuma uzturēšanai un tālākai attīstībai.

## SECINĀJUMI

Šis darbs ir veltīts sadales sistēmas operatora virszemes infrastruktūras inspekcijas datus balstītai metodes eksperimentālai izpētei.

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi - teorētiski izpētīt un praktiski validēt uz datiem balstītu alternatīvo metožu izstrādi sadales sistēmas vidējā sprieguma virszemes infrastruktūras tehniskajai inspekcijai, ir izpildīti sekojošie uzdevumi:

- Veikta padziļināta literatūras un esošo pētījumu analīze par digitālo transformāciju un datus balstītiem risinājumiem enerģētikas infrastruktūras jomā.
- Izpētīta 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) pielietojuma 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 eksperimentālais pētījums infrastruktūras tehniskā stāvokļa vizuālā novērtējuma metodei reālajos Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” poligonos, lai validētu izstrādātā risinājuma efektivitāti un pielāgojamību.
- Veikts eksperimentālais 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 uz Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” infrastruktūrā veikta pētījuma piemēra.

Pētījuma gaitā tika izanalizētas un praktiski validētas iespējas pārveidot manuālo virszemes infrastruktūras inspekcijas procesu uz datiem balstītu digitālu pieeju, izmantojot aktuālo infrastruktūras objektu *RGB* un *LIDAR* datu kopas. Iegūtie rezultāti apstiprina, ka datu tehnoloģiju pielietošana būtiski uzlabo infrastruktūras inspekcijas procesu, veicinot gan precizitāti (defektu identifikācijas lēmumu pieņemšana, balstoties uz datiem), 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 2cm, (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 kuru palīdzību sasniegtais vidējais ātrums bija 20 km dienā, kas ir trīsreiz ātrāk nekā tradicionālā manuālā inspekcija (līdz 6 km dienā).

- Ģeotelpiskais novērtējums - *LIDAR* datu analīze nodrošina līdz 10cm 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 it sevišķi objektos ar apgrūtināšu piekļušanu. 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 kuru palīdzību sasniegtais vidējais ātrums bija 30 km dienā, kas ir piecreiz 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 10cm, kas ļauj precīzi identificēt tās potenciālo ietekmi uz infrastruktūru. Šī tehnoloģija piedāvā ievērojami augstāku precizitāti līdz 10cm, salīdzinot ar manuālajām inspekcijām, īpaši attiecībā uz sarežģīti pieejamām teritorijām vai plašām aizsargjoslām (līdz 60m 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 var tikt izmantotas, lai veicinātu inovatīvu un efektīvu tehnisko inspekciju metožu attīstību, kas balstītas uz datu analīzi un modernas tehnoloģijas izmantošanu un digitāli transformētu esošo infrastruktūras inspekcijas komplicēto tehnisko procesu Latvijas mērogā. AS “Sadales tīkls” infrastruktūrā šādu metožu ieviešana hibrīda modeļa formātā, kas apvieno tradicionālās manuālās inspekcijas ar *RGB* un *LIDAR* datu balstītām metodēm, var radīt plašas priekšrocības, veicinot ilgtspējīgas attīstības principu ievērošanu, uzlabojot vides pārvaldību un nodrošinot efektīvāku resursu izmantošanu. Turklāt tas var kalpot par paraugu citiem operatoriem citās valstīs, lai modernizētu inženiertehniskās infrastruktūras (arī gāzes, telekomunikācijas sistēmas) inspekcijas pieejas.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Chwilkowska-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. AS "Sadales tīkls" oficiālā mājas lapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 12. janvārī]. Pieejams: <https://sadalestikls.lv/lv/strategija-merki-attistiba>.
3. AS "Sadales tīkls" attīstības plāns [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 12. janvārī]. [https://sadalestikls.lv/storage/app/media/uploaded-files/Att%C4%ABst%C4%ABbas\\_pl%C4%81ns\\_2024-2033\\_ar%20pielikumiem.pdf](https://sadalestikls.lv/storage/app/media/uploaded-files/Att%C4%ABst%C4%ABbas_pl%C4%81ns_2024-2033_ar%20pielikumiem.pdf).
4. 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>.
5. X. Hu and R. H. Assaad, "The use of unmanned ground vehicles (mobile robots) and unmanned aerial vehicles (drones) in the civil infrastructure asset management sector: Applications, robotic platforms, sensors, and algorithms", *Expert Systems with Applications*, vol. 232, pp. 120897–120897, Dec. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120897>.
6. 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, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641974
7. 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>.
8. 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/ijec/2024/v14i23945>.
9. 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>.
10. Latvijas Elektrotehniskās Komisijas energostandartu apkopojums [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 15. janvārī]. Pieejams: <https://latvenergo.lv/lv/par-mums/lek-energostandarti>
11. 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, doi: 10.1109/ICACCM50413.2020.9213043
12. U.S. Energy Information Administration, Preliminary Monthly Electric Generator Inventory “Oil-fired power plants provide small amounts of U.S. electricity capacity and generation”, [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 15. februārī]. Pieejams: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=31232>
  13. AS “Sadales tīkls” mājas lapa, Elektroapgādes apskats 2023.gada janvāris-septembris [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 7. janvārī] Pieejams: <https://sadalestikls.lv/lv/elektroapgades-apskats>
  14. AS “Latvenergo” mājas lapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 7. janvārī] Pieejams: <https://latvenergo.lv/lv/par-mums/razosana#fakti>
  15. AS “Elering” mājas lapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 7. janvārī] Pieejams: <https://elering.ee/en/system-operation>
  16. AS “Litgrid” mājas lapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 7. janvārī] Pieejams: <https://www.litgrid.eu/index.php/power-system/power-system-information/power-system-information/543>
  17. M. S. Viana, D. S. Ramos, G. Manassero Junior, M. E. M. Udaeta, “Analysis of the Implementation of Virtual Power Plants and Their Impacts on Electrical Systems”, *Energies* 2023, 16, 7682. <https://doi.org/10.3390/en16227682>
  18. M. Casquijo, B. Mataloto, J. C. Ferreira, V. Monteiro, J. L. Afonso, J. A. Afonso, “Blockchain and Internet of Things for Electrical Energy Decentralization: A Review and System Architecture”, *Energies* 2021, 14, 8043. <https://doi.org/10.3390/en14238043>
  19. J. Zhang *et al.*, “The Framework and Practices of Digital Twin City”, *2022 IEEE 12th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Beijing, China, 2022, pp. 111-116, doi: 10.1109/ICEIEC54567.2022.9835084
  20. S. Lu, B. Zhou, L. Chen and W. Yao, “Discuss of the future Power Generation Structure in China Southern Power Grid with High Penetration of PV Generation”, *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Guangzhou, China, 2018, pp. 1196-1201, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602066
  21. AS “Sadales tīkls” mājas lapa, 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](https://sadalestikls.lv/storage/app/media/uploaded-files/Sadales%20tikls_%202022_gada%20p%C4%81rskats.pdf)
  22. AS “ESO” mājas lapa, 2022.gada pārskats [tiešsaiste], [skatīts 2023. gada 12. augustā] Pieejams: <https://www.eso.lt/lt/apie-mus/ataskaitos-ir-dokumentai/finansines-ataskaitos.html#!topic1579>
  23. AS “Elektrilevi” mājas lapa, 2022.gada pārskats [tiešsaiste], [skatīts 2023. gada 12. augustā] Pieejams: [https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/Elektrilevi\\_aastaaruanne\\_2022.pdf](https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/Elektrilevi_aastaaruanne_2022.pdf)
  24. G. Lazaridis, P. Khodashenas, A. Drosou, P. Chatzimisios, D. Tzovaras and A. Krendzel, “Digital & Green Transitions of the European Manufacturing Sector through

- beyond 5G-enabled technologies & innovations”, *2022 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Thessaloniki, Greece, 2022, pp. 91-91, doi: 10.1109/CSCN57023.2022.10051028
25. A Vision for Modern Grid, Washington, DC, USA, Mar. 2007, [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 19. martā]. Pieejams: <http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/>
  26. 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
  27. 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.
  28. P. G. Da Silva, D. Iliaē 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.
  29. AS “ESO”, Smart meters, Smart energy [tiešsaiste], [skatīts 2024.gada 7. aprīlī]. Pieejams: <https://ismaniejiskaitikliai.lt/en>
  30. AS “Elektrilevi”, Metering data [tiešsaiste], [skatīts 2024.gada 7. aprīlī]. Pieejams: <https://elektrilevi.ee/en/kasulik-info?tab=mooteandmed>
  31. 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>
  32. AS “Sadales tīkls” bojājumu digitālā karte [tiešsaiste], [skatīts 2024.gada 12.jūlijā]. Pieejams: <https://karte.sadalestikls.lv/lv/atslegumi-elektrotikla>
  33. AS “ESO” bojājumu digitālā karte [tiešsaiste], [skatīts 2024.gada 12.jūlijā]. Pieejams: <https://www.eso.lt/lt/atjungimai-planiniai-neplaniniai.html>
  34. AS “Elektrilevi” bojājumu digitālā karte [tiešsaiste], [skatīts 2024.gada 12.jūlijā]. Pieejams: <https://www.elektrilevi.ee/en/katkestused/katkestuste-kaart>
  35. Ģeotelpiskās informācijas likums [tiešsaiste], [skatīts 2024.gada 15.jūlijā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/202999-geotelpiskas-informācijas-likums>.
  36. Kraus, K and N. Pfeifer, 1998, “Determination of terrain models in wooded areas with ALS data” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*
  37. Esri, Geospatial Analyst tutorial, 2018.
  38. D.Gauce 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)*, 2021, doi: 10.1109/AIEEE54188.2021.9670142.
  39. M. N. Hassan Reza, C. Agamudai Nambi Malarvizhi, S. Jayashree and M. Mohiuddin, “Industry 4.0–Technological Revolution and Sustainable Firm Performance”, *2021 Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0)*, Raigarh, India, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ETI4.051663.2021.9619363.

40. G. Lazaridis, P. Khodashenas, A. Drosou, P. Chatzimisios, D. Tzovaras and A. Krendzel, "Digital & Green Transitions of the European Manufacturing Sector through beyond 5G-enabled technologies & innovations", *2022 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Thessaloniki, Greece, 2022, pp. 91-91, doi: 10.1109/CSCN57023.2022.10051028.
41. K.Y.H. Lim, N.T. Le, N. Agarwal and B.H. Huynh, "Digital Twin Architecture and Development Trends on Manufacturing Topologies", in *Implementing Industry 4.0*, Cham:Springer International Publishing, vol. 202, pp. 259-286, 2021, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-67270-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-67270-6_10).
42. S. Guan, W. Hu and H. Zhou, "Online Control Method of DC Motor Based on Digital Twin Architecture in Network Environment", *2023 42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, 2023, pp. 5391-5396, doi: 10.23919/CCC58697.2023.10239818.
43. S. Wang and Y. Xu, "Design and Application of a Digital Twin System for Mobile Robot Ranging Sensors", *2023 International Conference on Design Science (ICDS)*, Shanghai, China, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICDS59539.2023.10311448.
44. C. Fan, "Integrating Human Mobility and Infrastructure Design in Digital Twin to Improve Equity and Resilience of Cities", *2022 IEEE 2nd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, Boston, MA, USA, 2022, pp. 1-2, doi: 10.1109/DTPI55838.2022.9998905.
45. M. Aquib, M. C. Chandorkar and S. Doolla, "Digital Twin Approach for Remote Monitoring of Microgrids", *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON49645.2022.9969080.
46. Q. Lu, H. Jiang, S. Chen, Y. Gu, T. Gao and J. Zhang, "Applications of Digital Twin System in a Smart City System with Multi-Energy", *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, Beijing, China, 2021, pp. 58-61, doi: 10.1109/DTPI52967.2021.9540135.
47. M. Shrivastava, R. Chugh, S. Gochhait and A. B. Jibril, "A Review on Digital Twin Technology in Healthcare", *2023 International Conference on Innovative Data Communication Technologies and Application (ICIDCA)*, Uttarakhand, India, 2023, pp. 741-745, doi: 10.1109/ICIDCA56705.2023.10099646.
48. Catherine Bischofberger, Digital twins and the smart grid, 24 May 2022 [tiešsaiste], [skatīts 2023.gada 17.novembrī]. Pieejams: <https://etech.iec.ch/issue/2022-03/digital-twins-and-the-smart-grid>.
49. D. Gelernter, "Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox", *In How It Will Happen and What It Will Mean*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1993; 256p.
50. M. Grieves, "Origins of the Digital Twin Concept", Florida Institute of Technology: Melbourne, FL, USA, 2016.

51. P. G. Da Silva, D. Ilić 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.
52. Industrial Internet Consortium. Digital Twins for Industrial Applications: Definition, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases. [tiešsaiste] 2020. [skatīts 2022.gada 31.oktobrī]  
Pieejams: [https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC\\_Digital\\_Twins\\_Industrial\\_Apps\\_White\\_Paper\\_2020-02-18.pdf](https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf)
53. *ISO/DIS 23247-1*; Automation Systems and Integration—Digital Twin Framework for Manufacturing. ISO: Geneva, Switzerland, 2020.
54. K. Sandkuhl, J. Stirna, "Supporting Early Phases of Digital Twin Development with Enterprise Modeling and Capability Management: Requirements from Two Industrial Cases", In *Enterprise, Business-Process and Information Systems Modeling*, Springer International Publishing; Springer: Cham, Switzerland, 2020; Volume 387, pp. 284–299.
55. M. Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication", *White Pap.* 2014, 1, 1–7.
56. S. R. Newrzella, D. W. Franklin, S. Haider, "5-Dimension Cross-Industry Digital Twin Applications Model and Analysis of Digital Twin Classification Terms and Models", *IEEE Access* 2021, 9, 131306–131321. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115055.
57. 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>.
58. J. Boensch, M. Elstermann, A. Kimming, J. Ovtcharova, "A Subject-Oriented Reference Model for Digital Twins", *Comput. Ind. Eng.* 2022, 172, 108556.
59. D. Gauce, A. Lektuers, I. Solovjova, R. Grants, D. Kolosovs, A. Litvinenko, "Application of Digital Twin in Medium-Voltage Overhead Distribution Network Inspection", *Remote Sens.* 2023, 15, 489. <https://doi.org/10.3390/rs15020489>.
60. 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>.
61. 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>.
62. G. Silva and A. Araújo, "Framework for the Development of a Digital Twin for Solar Water Heating Systems", *2022 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, Lisbon, Portugal, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCAD55197.2022.9853899.
63. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, 2012.

64. Energy audits - Part 2: Buildings, Brussels, Belgium: CEN-CENELEC, 2012.
65. P. Spūdys, N. Afxentiou, P. Konatzii, A. Jurelionis and P. A. Fokaides, "Employment of digital twins for the implementation of energy audits", *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split / Bol, Croatia, 2022, pp. 1-5, doi: 10.23919/SpliTech55088.2022.9854242.
66. Eiropas Komisija, Eiropas zaļais kurss [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 1. jūnijā]. Pieejams: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_lv](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_lv).
67. P. Y. Buchatskiy, S. V. Teploukhov, S. V. Onishchenko, K. K. Kuzmin, T. Y. Bychkov, "Software Tools for Evaluating Renewable Energy Sources", *Russ. J. Earth Sci.* 2023, 5, 1–8.
68. R. D. Kumar, K. Prakash, P. A. Sundari, S. Sathya, "A Hybrid Machine Learning Model for Solar Power Forecasting", *E3S Web Conf.* 2023, 387, 04003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338704003>.
69. M. You, Q. Wang, H. Sun, I. Castro, J. Jiang, "Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties", *Appl. Energy* 2022, 305, 117899. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117899>.
70. 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>.
71. IRENA (2019), Innovation landscape brief: Future role of distribution system operators, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi [tiešsaiste]. [skatīts 2024.gada 5.jūlijā]. Pieejams: <https://reglobal.org/distribution-system-operators-and-renewables/>.
72. A. Lektuers, 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.
73. Aizsargjoslu likums [tiešsaiste], [skatīts 2024.gadā 8.jūnijā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/42348-aizsargjoslu-likums>.
74. 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>.
75. Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 008-14 "Inženiertīklu izvietojums" [tiešsaiste], [skatīts 2024.gadā 8.jūnijā]. Pieejams: <https://likumi.lv/doc.php?id=269200>.
76. D. Amitrano, Gerardo Di Martino, R. Guida, and G. Ruello, "Earth Environmental Monitoring Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar: A Critical Review of...", [tiešsaiste] *ResearchGate*, Feb. 08, 2021. [skatīts 2023.gada 7.decembrī] Pieejams: [https://www.researchgate.net/publication/349110452\\_Earth\\_Environmental\\_Monitoring\\_Using\\_Multi-Temporal\\_Synthetic\\_Aperture\\_Radar\\_A\\_Critical\\_Review\\_of\\_Selected\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/349110452_Earth_Environmental_Monitoring_Using_Multi-Temporal_Synthetic_Aperture_Radar_A_Critical_Review_of_Selected_Applications).

77. 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.016>.
78. 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011>.
79. "Satellite Imagery Pricing - Home - Aerial/Satellite Digital Mapping Solutions - LAND INFO" [tiešsaiste] *LAND INFO Worldwide Mapping*, Apr. 06, 2020. [skatīts 2024.gada 10.februārī]. Pieejams: <https://landinfo.com/satellite-imagery-pricing/>.
80. Aviācijas un kosmosa tehnoloģiju uzņēmuma AIRBUS mājas lapa [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 10. februārī]. Pieejams: <https://www.airbus.com/en/products-services/space/earth-observation/earth-observation-portfolio/pleiades-neo>.
81. 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/>.
82. 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/>.
83. DJI Mavic 2 Pro specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 20. jūlijā]. Pieejams: <https://www.dji.com/lv/mavic-2/info>.
84. DJI Mavic 3 Pro specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 20. jūlijā]. Pieejams: <https://www.dji.com/lv/mavic-3-pro/specs>.
85. DJI Mini 4 Pro specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 20. jūlijā]. Pieejams: <https://www.dji.com/lv/mini-4-pro/specs>.
86. 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, doi: 10.1109/IAEAC54830.2022.9930100.
87. 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, doi: 10.23919/WAC55640.2022.9934151.
88. 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, doi: 10.1109/iSPEC48194.2019.8975213.
89. Zhan Chao , Luo Yizhao , Li Ronggui, Gao Jun, Zhang Mi, "Power Distribution Network Based on Digital 3D Twin Panoramic Modeling", ICRTEG, 2020.
90. LiuPei, LiYingcheng, XueYanli, DingXiaobo, LuoXiangyong, "Application and Precision Analyses of Airborne LIDAR Technique in Zhejiang Area", 2009



- International Conference on Geo-spatial Solutions for Emergency Management and the 50th Anniversary of the Chinese Academy of Surveying and Mapping.
91. DJI Zenmuse L2 specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 3. augustā]. Pieejams: <https://enterprise.dji.com/zenmuse-l2/specs>.
  92. YellowScan Mapper specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 3. augustā]. Pieejams: <https://www.yellowscan.com/products/mapper/>.
  93. CHCNAV AlphaAir 450 specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 3. augustā]. Pieejams: <https://chcnav.com/product-detail/alphaair-450>.
  94. LAS 1.4 specifikācija [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 3. augustā]. Pieejams: [https://www.asprs.org/wpcontent/uploads/2010/12/LAS\\_1\\_4\\_r13.pdf](https://www.asprs.org/wpcontent/uploads/2010/12/LAS_1_4_r13.pdf).
  95. Pēteris Pētersons, "Aerolāzerskenēšanas dati, ieguve, tehniskais raksturojums, apstrāde, digitālā augstuma modeļa pamatdatu sagatavošana", LĢIA, 2021.
  96. Oak Ridge National Laboratory "Protecting electric grid health with drone-based power line inspection", August 27, 2024 [tiešsaiste], [skatīts 2025. gada 30. aprīlī]. Pieejams: <https://www.ornl.gov/news/protecting-electric-grid-health-drone-based-power-line-inspection>.
  97. Z. A. Siddiqui, U. Park, "A Drone Based Transmission Line Components Inspection System with Deep Learning Technique", *Energies* 2020, 13, 3348. <https://doi.org/10.3390/en13133348>.
  98. G. Chatzargyros, A. Papakonstantinou, V. Kotoula, D. Stimoniaris, D. Tsiamitros, "UAV Inspections of Power Transmission Networks with AI Technology: A Case Study of Lesbos Island in Greece", *Energies* 2024, 17, 3518. <https://doi.org/10.3390/en17143518>.
  99. ESRI mājas lapa, Case Study: Imagery, *LIDAR*, and GIS Transform Transpower's Vegetation Management, January 28, 2025 [tiešsaiste], [skatīts 2025. gada 30. aprīlī]. Pieejams: <https://energycentral.com/o/esri/case-study-imagery-LIDAR-and-gis-transform-transpowers-vegetation-management>.
  100. W. Ralston "Autonomous Drones Could Soon Run the UK's Energy Grid", July 6, 2022 [tiešsaiste], [skatīts 2025. gada 30. aprīlī]. Pieejams: <https://www.wired.com/story/autonomous-drones-could-soon-run-the-uks-energy-grid/>.
  101. 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>.
  102. 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>.
  103. U. U. Hafeez and A. Gandhi, "Empirical Analysis and Modeling of Compute Times of CNN Operations on AWS Cloud", *2020 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC)*, Beijing, China, 2020, pp. 181-192, doi: 10.1109/IISWC50251.2020.00026.

104. Tikla kodekss elektroenerģijas nozarē [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 10. augustā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/257943-tikla-kodekss-elektroenerģijas-nozare>.
105. 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, doi: 10.1109/ICBIR57571.2023.10147420.
106. 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, doi: 10.1109/ICTC55196.2022.9952798.
107. Latvijas Energostandarts LEK 015 [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 10. augustā]. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db/5b6/530/5db5b653087ed227551484.pdf>.
108. 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, doi: 10.1109/LSP.2024.3386115.
109. LEK015 Vidsprieguma gaisvadu elektrolīnijas galvenās tehniskās prasības [tiešsaiste], [skatīts 2024. gada 10. augustā]. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db/5b6/530/5db5b653087ed227551484.pdf>.

## **PIELIKUMI**

## AS "Sadales tīkls" virszemes infrastruktūras defektu saraksts

| Defekts                                                                                             | Klases ID_vērtības code | Klases ID | Nosacījums                                             | Vērtība (code) | Vērtība (code) - atšifrējums                                    | Nosacījuma veids | Pielietojums | Grupas ID | V S | Z S |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|--------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|------------------|--------------|-----------|-----|-----|
| Trases2: Trases tīrīšana_Horizontāli                                                                | 173623858_2             | 173623858 | Trases2: Trases tīrīšana                               | 2              | Horizontāli                                                     | Novērojums       | Jā           | 95.00     | +   | +   |
| Trases2: Trases tīrīšana_Horizontāli+Vertikāli                                                      | 173623858_1             | 173623858 | Trases2: Trases tīrīšana                               | 1              | Horizontāli+Vertikāli                                           | Novērojums       | Jā           | 95.00     | +   | +   |
| Brīdinājuma zīme "BE",_Nav                                                                          | 17940389_1              | 17940389  | Brīdinājuma zīme "BE".                                 | 1              | Nav                                                             | Novērojums       | Jā           | 31.00     | +   | +   |
| Trases2: Atsevišķu koku nozāģēšana/apzāģēšana (gab.)_Nepieciešama                                   | 173626995_1             | 173626995 | Trases2: Atsevišķu koku nozāģēšana/apzāģēšana (gab.) . | 1              | Nepieciešama                                                    | Novērojums       | Jā           | 95.00     | +   | +   |
| Balsta kārtas Nr._Nav                                                                               | 17940387_1              | 17940387  | Balsta kārtas Nr.                                      | 1              | Nav                                                             | Novērojums       | Jā           | 31.00     | +   |     |
| Balsta augšāpuve_Būtiska (jāmaina balsts)                                                           | 17940394_4              | 17940394  | Balsta augšāpuve                                       | 4              | Būtiska (jāmaina balsts)                                        | Novērojums       | Jā           | 31.00     | +   | +   |
| Balsts izsvēries_ārpuss līnijas ass_Izsvēries ārpus līnijas ass 0,5 - 0,9 metri (b.taisnošana_Zema) | 17940391_7              | 17940391  | Balsts izsvēries ārpus līnijas ass                     | 7              | Izsvēries ārpus līnijas ass 0,5 - 0,9 metri (b.taisnošana_Zema) | Novērojums       | Jā           | 31.00     | +   | +   |
| Balsta cepurīte_Nav                                                                                 | 17940393_1              | 17940393  | Balsta cepurīte                                        | 1              | Nav                                                             | Novērojums       | Jā           | 31.00     | +   | +   |
| Vada savienojumi pārlaidumā_Līdz 2                                                                  | 80839420_1              | 80839420  | Vada savienojumi pārlaidumā                            | 1              | Līdz 2                                                          | Novērojums       | Jā           | 12.00     | +   | +   |
| Vadu nokare_Palielināta vadu nokare                                                                 | 17941055_1              | 17941055  | Vadu nokare                                            | 1              | Palielināta vadu nokare                                         | Novērojums       | Jā           | 32.00     | +   | +   |
| Balsta augšāpuve_Maznozīmīga (bez darbības)                                                         | 17940394_2              | 17940394  | Balsta augšāpuve                                       | 2              | Maznozīmīga (bez darbības)                                      | Novērojums       | Jā           | 31.00     | +   | +   |

|                                                                                                                 |                 |               |                                      |   |                                                                               |            |    |       |   |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Aizsargjoslas zīme_Nav                                                                                          | 10395<br>9068_1 | 1039<br>59068 | Aizsargjoslas zīme                   | 1 | Nav                                                                           | Novērojums | Jā | 64.00 | + | + |
| Trases2: Nepieciešama dastošana (m3)_Nepieciešama                                                               | 17362<br>7895_1 | 1736<br>27895 | Trases2: Nepieciešama dastošana (m3) | 1 | Nepieciešama                                                                  | Novērojums | Jā | 95.00 | + |   |
| Balsta apakšāpuve (zemes līmenī)_3 - 4 cm puves dziļums (pastaba pielikšana)                                    | 17940<br>398_3  | 1794<br>0398  | Balsta apakšāpuve (zemes līmenī)     | 3 | 3 - 4 cm puves dziļums (pastaba pielikšana)                                   | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsta kārtas Nr._Nepareizs                                                                                     | 17940<br>387_2  | 1794<br>0387  | Balsta kārtas Nr.                    | 2 | Nepareizs                                                                     | Novērojums | Jā | 31.00 | + |   |
| Bandāžas vaļīgas_Jā                                                                                             | 17940<br>517_1  | 1794<br>0517  | Bandāžas vaļīgas                     | 1 | Jā                                                                            | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balsta apakšāpuve (zemes līmenī)_1 - 2 cm puves dziļums (pastaba pielikšana_Zema)                               | 17940<br>398_2  | 1794<br>0398  | Balsta apakšāpuve (zemes līmenī)     | 2 | 1 - 2 cm puves dziļums (pastaba pielikšana_Zema)                              | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsts izsvēries līnijas virzienā_Sagāzes līnijas virzienā no 0,5 - 0,9 metri no vertikāles (b.taisnošana_Zema) | 13460<br>5059_1 | 1346<br>05059 | Balsts izsvēries līnijas virzienā    | 1 | Sagāzes līnijas virzienā no 0,5 - 0,9 metri no vertikāles (b.taisnošana_Zema) | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Līnijas operatīvais apzīmējums_Nav                                                                              | 17940<br>390_1  | 1794<br>0390  | Līnijas operatīvais apzīmējums       | 1 | Nav                                                                           | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsta demontāža_Nepieciešama                                                                                   | 14386<br>30_1   | 1438<br>630   | Balsta demontāža                     | 1 | Nepieciešama                                                                  | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balsta apakšāpuve (0,2-2m augstumā)_3 - 4 cm puves dziļums (balsta maiņa)                                       | 13674<br>3339_1 | 1367<br>43339 | Balsta apakšāpuve (0,2-2m augstumā)  | 1 | 3 - 4 cm puves dziļums (balsta maiņa)                                         | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |

|                                                                                             |             |           |                                    |   |                                                          |            |    |       |   |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|------------------------------------|---|----------------------------------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Brīdinājuma zīme "BE". Bojāts                                                               | 17940389_2  | 17940389  | Brīdinājuma zīme "BE".             | 2 | Bojāts                                                   | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsts izsvēries ārpus līnijas ass_Izsvēries ārpus līnijas ass 1 - 1,9 metri (b.taisnošana) | 17940391_5  | 17940391  | Balsts izsvēries ārpus līnijas ass | 5 | Izsvēries ārpus līnijas ass 1 - 1,9 metri (b.taisnošana) | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsta augšāpuve_Nedaudz (jāmaina kāsis)                                                    | 17940394_3  | 17940394  | Balsta augšāpuve                   | 3 | Nedaudz (jāmaina kāsis)                                  | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Aizsargjoslas zīme_Nepareiza                                                                | 103959068_3 | 103959068 | Aizsargjoslas zīme                 | 3 | Nepareiza                                                | Novērojums | Jā | 64.00 | + | + |
| Nedemontēti pastabi_Jā - neizrauti                                                          | 18856627_1  | 18856627  | Nedemontēti pastabi                | 1 | Jā - neizrauti                                           | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balsta apakšāpuve (zemes līmenī)_5 - 6 cm puves dziļums (pastaba pielikšana)                | 17940398_4  | 17940398  | Balsta apakšāpuve (zemes līmenī)   | 4 | 5 - 6 cm puves dziļums (pastaba pielikšana)              | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Kabeļu līnijas signālmietīņš_Nepieciešams                                                   | 23073803_1  | 23073803  | Kabeļu līnijas signālmietīņš       | 1 | Nepieciešams                                             | Novērojums | Jā | 32.00 | + | + |
| Vada savienojumi pārlaidumā_Vairāk par 2                                                    | 80839420_2  | 80839420  | Vada savienojumi pārlaidumā        | 2 | Vairāk par 2                                             | Novērojums | Jā | 12.00 | + | + |
| Dubultsējums_Nepieciešams                                                                   | 5865866_1   | 5865866   | Dubultsējums                       | 1 | Nepieciešams                                             | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Vadu nokare_Nevienmērīga, vadi var savīties                                                 | 17941055_3  | 17941055  | Vadu nokare                        | 3 | Nevienmērīga, vadi var savīties                          | Novērojums | Jā | 32.00 | + | + |
| Balstā stārķa ligzda._Bez kronšteina                                                        | 18725851_1  | 18725851  | Balstā stārķa ligzda.              | 1 | Bez kronšteina                                           | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balstā stārķa ligzda._Uz kronšteina                                                         | 18725851_2  | 18725851  | Balstā stārķa ligzda.              | 2 | Uz kronšteina                                            | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |

|                                                                                                        |             |           |                                          |   |                                                                      |            |    |       |   |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|------------------------------------------|---|----------------------------------------------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Zemējums, zemējuma kontūrs bojāts_Jā                                                                   | 17943343_1  | 17943343  | Zemējums, zemējuma kontūrs bojāts        | 1 | Jā                                                                   | Novērojums | Jā | 45.00 | + |   |
| Balsta cepurīte_Bojāta                                                                                 | 17940393_2  | 17940393  | Balsta cepurīte                          | 2 | Bojāta                                                               | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsta apakšā tukšs vidus_Jā (balsts jāmaina)                                                          | 134840527_1 | 134840527 | Balsta apakšā tukšs vidus                | 1 | Jā (balsts jāmaina)                                                  | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Nepieciešams Zemējums (arī atkārtotais)._Jā (atbilstoša kopējā pret.)                                  | 1016192_1   | 1016192   | Nepieciešams Zemējums (arī atkārtotais)  | 1 | Jā (atbilstoša kopējā pret.)                                         | Novērojums | Jā | 25.00 |   | + |
| Svešu vadu, elementu demontāža._Nepieciešama                                                           | 134738164_1 | 134738164 | Svešu vadu, elementu demontāža           | 1 | Nepieciešama                                                         | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balsta apakšā puve (zemes līmenī)_7 cm un vairāk puves dziļums (pastaba pielikšana)                    | 17940398_5  | 17940398  | Balsta apakšā puve (zemes līmenī)        | 5 | 7 cm un vairāk puves dziļums (pastaba pielikšana)                    | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsts izsvēries līnijas virzienā_Sagāzies līnijas virzienā 1 - 1,9 metri no vertikāles (b.taisnošana) | 134605059_2 | 134605059 | Balsts izsvēries līnijas virzienā        | 2 | Sagāzies līnijas virzienā 1 - 1,9 metri no vertikāles (b.taisnošana) | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Atsaitei: nav brīdinošie aizsargelementi_Jā                                                            | 82752658_1  | 82752658  | Atsaitei: nav brīdinošie aizsargelementi | 1 | Jā                                                                   | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balsta apakšā puve (0,2-2m augstumā)_5 - 6 cm puves dziļums (balsta maiņa)                             | 136743339_2 | 136743339 | Balsta apakšā puve (0,2-2m augstumā)     | 2 | 5 - 6 cm puves dziļums (balsta maiņa)                                | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Trases2: Trases tīrīšana_Vertikāli                                                                     | 173623858_3 | 173623858 | Trases2: Trases tīrīšana                 | 3 | Vertikāli                                                            | Novērojums | Jā | 95.00 | + | + |
| Vada stieples bojājumi_Bojātas ar pārrāvumiem                                                          | 134715693_1 | 134715693 | Vada stieples bojājumi                   | 1 | Bojātas ar pārrāvumiem                                               | Novērojums | Jā | 32.00 | + | + |

|                                                                                                 |                     |                   |                                                         |   |                                                            |                    |    |           |   |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------------------------------|---|------------------------------------------------------------|--------------------|----|-----------|---|---|
| Pastabs puvis_3<br>- 4 cm puves<br>dziļums<br>(pastaba maiņa)                                   | 17940<br>519_3      | 1794<br>0519      | Pastabs<br>puvis                                        | 3 | 3 - 4 cm<br>puves<br>dziļums<br>(pastaba<br>maiņa)         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Izolators<br>bojāts_Jā                                                                          | 82763<br>630_1      | 8276<br>3630      | Izolators<br>bojāts                                     | 1 | Jā                                                         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 |   | + |
| Stikla<br>tapizolators_Jā<br>(bez darbības)                                                     | 18105<br>7668_<br>1 | 1810<br>5766<br>8 | Stikla<br>tapizolator<br>s                              | 1 | Jā (bez<br>darbības)                                       | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + |   |
| Zemētājslēdžu<br>rokturu<br>krāsa_Jāatjauno                                                     | 13474<br>7511_<br>1 | 1347<br>4751<br>1 | Zemētājslē<br>džu<br>rokturu<br>krāsa                   | 1 | Jāatjauno                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Kabelis nav<br>nostiprināts_Jā                                                                  | 17941<br>077_1      | 1794<br>1077      | Kabelis<br>nav<br>nostiprināt<br>s                      | 1 | Jā                                                         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 51.<br>00 | + | + |
| Aizsargjoslu<br>pārkaņpums_Jā                                                                   | 17941<br>078_1      | 1794<br>1078      | Aizsargjosl<br>u<br>pārkaņpums                          | 1 | Jā                                                         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 12.<br>00 | + | + |
| Kāsis/āķis<br>saliekts_Jā                                                                       | 82764<br>328_1      | 8276<br>4328      | Kāsis/āķis<br>saliekts                                  | 1 | Jā                                                         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 31.<br>00 | + | + |
| Aizsargjoslas<br>zīme_Jāatjauno                                                                 | 10395<br>9068_<br>2 | 1039<br>5906<br>8 | Aizsargjosl<br>as zīme                                  | 2 | Jāatjauno                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 64.<br>00 | + | + |
| Balstā stārķa<br>ligzda_Nav, bet<br>ir kronšteins                                               | 18725<br>851_3      | 1872<br>5851      | Balstā<br>stārķa<br>ligzda.                             | 3 | Nav, bet<br>ir<br>kronšteins                               | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Balsta apakšā<br>puve (0,2-2m<br>augstumā)_7<br>cm un vairāk<br>puves dziļums<br>(balsta maiņa) | 13674<br>3339_<br>3 | 1367<br>4333<br>9 | Balsta<br>apakšā<br>puve (0,2-<br>2m<br>augstumā)       | 3 | 7 cm un<br>vairāk<br>puves<br>dziļums<br>(balsta<br>maiņa) | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 31.<br>00 | + | + |
| Balsta kārtas<br>Nr_Nav<br>salasāms                                                             | 17940<br>387_3      | 1794<br>0387      | Balsta<br>kārtas Nr.                                    | 3 | Nav<br>salasāms                                            | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 31.<br>00 | + |   |
| Kāsis/āķis:<br>bojāts<br>stiprinājums_Jā                                                        | 13474<br>2637_<br>1 | 1347<br>4263<br>7 | Kāsis/āķis:<br>bojāts<br>stiprinājums                   | 1 | Jā                                                         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Balstā stārķa<br>ligzda var<br>izraisīt<br>bojājumus_Jā                                         | 13460<br>4548_<br>1 | 1346<br>0454<br>8 | Balstā<br>stārķa<br>ligzda var<br>izraisīt<br>bojājumus | 1 | Jā                                                         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |



|                                                      |             |           |                                  |   |                                              |            |    |       |   |   |
|------------------------------------------------------|-------------|-----------|----------------------------------|---|----------------------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Zemējums bojāts. Zemēju ma izvada krāsojuma bojājumi | 13464304_5  | 134644304 | Zemējums bojāts.                 | 5 | Zemējuma izvada krāsojuma bojājumi           | Novērojums | Jā | 65.00 | + | + |
| Kabeļa guldīšanas dziļums 40 - 50 cm dziļumā         | 13462066_3  | 134642066 | Kabeļa guldīšanas dziļums        | 3 | 40 - 50 cm dziļumā                           | Novērojums | Jā | 12.00 | + | + |
| Atsaite: nenospriegota_Jā                            | 17940473_1  | 17940473  | Atsaite: nenospriegota           | 1 | Jā                                           | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Pastabs puvīšs 1 - 2 cm puvīšs (pastaba maiņa_Zema)  | 17940519_2  | 17940519  | Pastabs puvīšs                   | 2 | 1 - 2 cm puvīšs dziļums (pastaba maiņa_Zema) | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Vadu nokare. Nokare pārsniedz pieļaujamo             | 17941055_2  | 17941055  | Vadu nokare                      | 2 | Nokare pārsniedz pieļaujamo                  | Novērojums | Jā | 32.00 | + | + |
| Atsaites: nepieciešamība Jā                          | 1016120_1   | 1016120   | Atsaites: nepieciešamība         | 1 | Jā                                           | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Vada stieples bojājumi_Vadu stieples attīnīšanās     | 134715693_2 | 134715693 | Vada stieples bojājumi           | 2 | Vadu stieples attīnīšanās                    | Novērojums | Jā | 32.00 | + | + |
| Līnijas operatīvais apzīmējums_Nav salasāms          | 17940390_3  | 17940390  | Līnijas operatīvais apzīmējums   | 3 | Nav salasāms                                 | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Kabeļa guldīšanas dziļums_30 - 39 cm dziļumā         | 13462066_2  | 134642066 | Kabeļa guldīšanas dziļums        | 2 | 30 - 39 cm dziļumā                           | Novērojums | Jā | 12.00 | + | + |
| Svešu vadu demontāža_Nepieciešama                    | 134738160_1 | 134738160 | Svešu vadu demontāža             | 1 | Nepieciešama                                 | Novērojums | Jā | 12.00 | + | + |
| Brusa bojāta vai puvusi._Jā                          | 134709125_1 | 134709125 | Brusa bojāta vai puvusi.         | 1 | Jā                                           | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Līnijas operatīvais apzīmējums_Nepareizs             | 17940390_2  | 17940390  | Līnijas operatīvais apzīmējums   | 2 | Nepareizs                                    | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsta konstrukcija neatbilstoša_Jā                  | 82757179_1  | 82757179  | Balsta konstrukcija neatbilstoša | 1 | Jā                                           | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |

|                                                                                                                          |             |           |                                                  |   |                                                                         |            |    |       |   |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Pastabam izdrupumi_Izdrupumi (jāmaina pastabs)                                                                           | 81430687_4  | 81430687  | Pastabam izdrupumi                               | 4 | Izdrupumi (jāmaina pastabs)                                             | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balstam plaisas, izdrupumi_Armatūra ir redzama līdz 50 cm garumā (balstamaiņa_Zema)                                      | 134604257_1 | 134604257 | Balstam plaisas, izdrupumi                       | 1 | Armatūra ir redzama līdz 50 cm garumā (balstamaiņa_Zema)                | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balstam plaisas, izdrupumi_Armatūra nav redzama (bez darbības)                                                           | 134604257_3 | 134604257 | Balstam plaisas, izdrupumi                       | 3 | Armatūra nav redzama (bez darbības)                                     | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Metāla traversa bojāta_Jā                                                                                                | 134743835_1 | 134743835 | Metāla traversa bojāta                           | 1 | Jā                                                                      | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Bandāžas, skavas noslīdējušas, vaļīgas (augšējā)_Augšējā: >1/4 starp normālām bandāžu vietām no augšas (bandāžu remonts) | 134845992_1 | 134845992 | Bandāžas, skavas noslīdējušas, vaļīgas (augšējā) | 1 | Augšējā: >1/4 starp normālām bandāžu vietām no augšas (bandāžu remonts) | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Nepieciešams Izlādņu pievienojums_Jā                                                                                     | 1016169_1   | 1016169   | Nepieciešams Izlādņu pievienojums                | 1 | Jā                                                                      | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Pastabs puvis_5 - 6 cm puves dziļums (pastaba maiņa)                                                                     | 17940519_4  | 17940519  | Pastabs puvis                                    | 4 | 5 - 6 cm puves dziļums (pastaba maiņa)                                  | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Sveši vadi laidumā_Jā                                                                                                    | 11894727_1  | 11894727  | Sveši vadi laidumā                               | 1 | Jā                                                                      | Novērojums | Jā | 12.00 | + | + |
| Kabeļa aizsargs balstam_Bojāts                                                                                           | 1016374_2   | 1016374   | Kabeļa aizsargs balstam                          | 2 | Bojāts                                                                  | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Kabeļa aizsargs balstam_Nav                                                                                              | 1016374_1   | 1016374   | Kabeļa aizsargs balstam                          | 1 | Nav                                                                     | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |

|                                                                                                         |                 |                   |                                         |   |                                                                 |            |    |       |   |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Bandāžas, skavas noslīdējušas, vaļīgas. Apakšējā: 0 - 5 cm attālumā līdz balsta galam (bandāžu remonts) | 13461<br>3733_1 | 1346<br>1373<br>3 | Bandāžas, skavas noslīdējušas, vaļīgas. | 1 | Apakšējā: 0 - 5 cm attālumā līdz balsta galam (bandāžu remonts) | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balstam plaisas, izdrupumi_Armatūra ir redzama virs 50 cm (balsta maiņa)                                | 13460<br>4257_2 | 1346<br>0425<br>7 | Balstam plaisas, izdrupumi              | 2 | Armatūra ir redzama virs 50 cm (balsta maiņa)                   | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Balsts atrodas ārpus līnijas ass 0,5 - 0,9 metriem (balsta pārcelšana_Zemā)                             | 83453<br>054_2  | 8345<br>3054      | Balsts atrodas ārpus līnijas ass        | 2 | 0,5 - 0,9 metriem (balsta pārcelšana_Zemā)                      | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Nedemontēti pastabi_Jā - mētājās zemē                                                                   | 18856<br>627_2  | 1885<br>6627      | Nedemontēti pastabi                     | 2 | Jā - mētājās zemē                                               | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Vada savienojumi pārlaidumā_Vairāk par 5                                                                | 80839<br>420_3  | 8083<br>9420      | Vada savienojumi pārlaidumā             | 3 | Vairāk par 5                                                    | Novērojums | Jā | 12.00 | + | + |
| Atsaites savienojums ar nullvadu_Nepieciešams                                                           | 82754<br>114_1  | 8275<br>4114      | Atsaites savienojums ar nullvadu        | 1 | Nepieciešams                                                    | Novērojums | Jā | 11.00 |   | + |
| Balstam sēnes/piepes_Jā (balsta maiņa)                                                                  | 13484<br>0455_1 | 1348<br>4045<br>5 | Balstam sēnes/piepes                    | 1 | Jā (balsta maiņa)                                               | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Atdalītāja lokdzēses defekti_Mehāniski                                                                  | 13466<br>1826_1 | 1346<br>6182<br>6 | Atdalītāja lokdzēses defekti            | 1 | Mehāniski                                                       | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Grunts ap balstu_Izskalota                                                                              | 10216<br>4501_2 | 1021<br>6450<br>1 | Grunts ap balstu                        | 2 | Izskalota                                                       | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Kontaktspaile bojāta_Jā                                                                                 | 10161<br>73_1   | 1016<br>173       | Kontaktspaile bojāta                    | 1 | Jā                                                              | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Pastabs puvis_7 cm un vairāk puves dziļums (pastaba maiņa)                                              | 17940<br>519_5  | 1794<br>0519      | Pastabs puvis                           | 5 | 7 cm un vairāk puves dziļums (pastaba maiņa)                    | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |

|                                                                         |             |             |                                                    |   |                                |            |    |       |   |   |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------------------------------|---|--------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Grunts ap balstu_Nav noblietēta                                         | 102164501_1 | 102164501_1 | Grunts ap balstu                                   | 1 | Nav noblietēta                 | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Apzīmējumi ("iesl.", "atsl.")_Nav                                       | 17943228_1  | 17943228_1  | Apzīmējumi ("iesl.", "atsl.")                      | 1 | Nav                            | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Zemējums bojāts. Zemējuma vads ir pārtrauts                             | 13464304_3  | 13464430_4  | Zemējums bojāts.                                   | 3 | Zemējuma vads ir pārtrauts     | Novērojums | Jā | 65.00 | + | + |
| Zemējums bojāts. Zemējuma kontūrs bojāts                                | 13464304_1  | 13464430_4  | Zemējums bojāts.                                   | 1 | Zemējuma kontūrs bojāts        | Novērojums | Jā | 65.00 | + | + |
| Kabeļu līnijas signālmietīnš_Bojāts                                     | 23073803_3  | 23073803_3  | Kabeļu līnijas signālmietīnš                       | 3 | Bojāts                         | Novērojums | Jā | 32.00 | + | + |
| Nepieciešamas Papildus bultskrūves_Jā                                   | 18723954_1  | 18723954_1  | Nepieciešamas Papildus bultskrūves                 | 1 | Jā                             | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| AMKA drošinātājķīsis_Nepieciešams                                       | 128520670_1 | 128520670_1 | AMKA drošinātājķīsis                               | 1 | Nepieciešams                   | Novērojums | Jā | 11.00 |   | + |
| Atsaite: pārplisusi_Jā                                                  | 134616618_1 | 134616618_1 | Atsaite: pārplisusi                                | 1 | Jā                             | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Nepieciešams Zemējums (arī atkārtotais)._Jā (neatbilstošā kopējā pret.) | 1016192_2   | 1016192_2   | Nepieciešams Zemējums (arī atkārtotais).           | 2 | Jā (neatbilstošā kopējā pret.) | Novērojums | Jā | 25.00 |   | + |
| Kabeļa guldīšanas dziļums_Mazāk par 30 cm dziļumā                       | 134642066_1 | 134642066_1 | Kabeļa guldīšanas dziļums                          | 1 | Mazāk par 30 cm dziļumā        | Novērojums | Jā | 12.00 | + | + |
| Zemējums bojāts. Zemējuma vads ir bojāts                                | 13464304_2  | 13464430_4  | Zemējums bojāts.                                   | 2 | Zemējuma vads ir bojāts        | Novērojums | Jā | 65.00 | + | + |
| Kabeļa aizsargs balstam_Nav atbilstošs pēc materiāla                    | 1016374_4   | 1016374_4   | Kabeļa aizsargs balstam                            | 4 | Nav atbilstošs pēc materiāla   | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Neatbilstošs Vadu, piekarkabeļu izvietojums balstā_Jā                   | 82795417_1  | 82795417_1  | Neatbilstošs Vadu, piekarkabeļu izvietojums balstā | 1 | Jā                             | Novērojums | Jā | 11.00 |   | + |

|                                                                                                          |                     |                   |                                                 |   |                                                                     |                    |    |           |   |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------------------------|---|---------------------------------------------------------------------|--------------------|----|-----------|---|---|
| Kāsis/āķis:<br>izkritis_Jā                                                                               | 82764<br>197_1      | 8276<br>4197      | Kāsis/āķis:<br>izkritis                         | 1 | Jā                                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Atsaite: nav<br>sazemēta_Jā                                                                              | 13461<br>6548_<br>1 | 1346<br>1654<br>8 | Atsaite:<br>nav<br>sazemēta                     | 1 | Jā                                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 |   | + |
| Balstam plaisas,<br>izdrupumi_Arm<br>atūra nav<br>sasaistīta (balsta<br>maiņa)                           | 13460<br>4257_<br>4 | 1346<br>0425<br>7 | Balstam<br>plaisas,<br>izdrupumi                | 4 | Armatūra<br>nav<br>sasaistīta<br>(balsta<br>maiņa)                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 31.<br>00 | + | + |
| Bojāts vada<br>stiprinājums_Jā                                                                           | 80304<br>961_1      | 8030<br>4961      | Bojāts<br>vada<br>stiprinājum<br>s              | 1 | Jā                                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Mehāniski<br>bojāts (koka<br>b.)_Atrautas<br>šķēpeles (balsta<br>maiņa)                                  | 13474<br>3655_<br>1 | 1347<br>4365<br>5 | Mehāniski<br>bojāts<br>(koka b.)                | 1 | Atrautas<br>šķēpeles<br>(balsta<br>maiņa)                           | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Nav pastaba<br>bandāža_Jā<br>(mazāk par 80<br>cm)                                                        | 13474<br>4419_<br>2 | 1347<br>4441<br>9 | Nav<br>pastaba<br>bandāža                       | 2 | Jā (mazāk<br>par 80<br>cm)                                          | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Tapizolators<br>bojāts_Jā                                                                                | 13472<br>6144_<br>1 | 1347<br>2614<br>4 | Tapizolator<br>s bojāts                         | 1 | Jā                                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 31.<br>00 | + |   |
| Atsējies vads no<br>izolatora_Jā                                                                         | 13462<br>5090_<br>1 | 1346<br>2509<br>0 | Atsējies<br>vads no<br>izolatora                | 1 | Jā                                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Nepieciešams<br>papildus<br>balsts_Jā                                                                    | 14358<br>5378_<br>1 | 1435<br>8537<br>8 | Nepiecieša<br>ms<br>papildus<br>balsts          | 1 | Jā                                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 12.<br>00 | + | + |
| Brusas,<br>traversas<br>stiprinājumi<br>bojāti_Jā                                                        | 82789<br>685_1      | 8278<br>9685      | Brusas,<br>traversas<br>stiprinājum<br>i bojāti | 1 | Jā                                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Brusa bojāta vai<br>puvusi<br>(atd.)._Augšējā<br>un apakšējā                                             | 13470<br>6537_<br>3 | 1347<br>0653<br>7 | Brusa<br>bojāta vai<br>puvusi<br>(atd.).        | 3 | Augšējā<br>un<br>apakšējā                                           | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Nepieciešams<br>Ciešs<br>stiprinājums_Jā                                                                 | 82763<br>081_1      | 8276<br>3081      | Nepiecieša<br>ms Ciešs<br>stiprinājum<br>s      | 1 | Jā                                                                  | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + |   |
| Balsts<br>izsvēries_ārpus<br>līnijas<br>ass_Izsvēries<br>ārpus līnijas ass<br>>2 metri<br>(b.taisnošana) | 17940<br>391_6      | 1794<br>0391      | Balsts<br>izsvēries_ā<br>rpus līnijas<br>ass    | 6 | Izsvēries<br>ārpus<br>līnijas ass<br>>2 metri<br>(b.taisnoš<br>ana) | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 31.<br>00 | + | + |

|                                                                                                        |             |           |                                                |   |                                                                 |            |    |       |   |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|------------------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Atdalītāja izolators bojāts_Mehāniski                                                                  | 134658929_1 | 134658929 | Atdalītāja izolators bojāts                    | 1 | Mehāniski                                                       | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Bandāžas, skavas noslīdējušas, vaļīgas_Apakšējā: 6 - 9 cm attālumā līdz balsta galam (bandāžu remonts) | 134613733_2 | 134613733 | Bandāžas, skavas noslīdējušas, vaļīgas.        | 2 | Apakšējā: 6 - 9 cm attālumā līdz balsta galam (bandāžu remonts) | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Enkurs_Nepieciešams                                                                                    | 23213813_1  | 23213813  | Enkurs                                         | 1 | Nepieciešams                                                    | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Kabeļa aizsargs balstam_Nav atbilstošs pēc augstuma                                                    | 1016374_3   | 1016374   | Kabeļa aizsargs balstam                        | 3 | Nav atbilstošs pēc augstuma                                     | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Bandāžas, skavas attālumš no pastaba virsotnes_0 - 5 cm attālumā līdz pastaba galam                    | 134613377_1 | 134613377 | Bandāžas, skavas attālumš no pastaba virsotnes | 1 | 0 - 5 cm attālumā līdz pastaba galam                            | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Kabeļu līnijas signālmietīņš_I zsvēries 30 cm un vairāk                                                | 23073803_2  | 23073803  | Kabeļu līnijas signālmietīņš                   | 2 | Izsvēries 30 cm un vairāk                                       | Novērojums | Jā | 32.00 | + | + |
| Zemējums bojāts_Zemējuma izvads bojāts                                                                 | 134644304_4 | 134644304 | Zemējums bojāts.                               | 4 | Zemējuma izvads bojāts                                          | Novērojums | Jā | 65.00 | + | + |
| Uzmetumi_Jā                                                                                            | 134746017_1 | 134746017 | Uzmetumi                                       | 1 | Jā                                                              | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Uz vada uzmetums_Jā                                                                                    | 17941057_1  | 17941057  | Uz vada uzmetums                               | 1 | Jā                                                              | Novērojums | Jā | 12.00 | + | + |
| Balsts aizlūzis_Jā                                                                                     | 82758331_1  | 82758331  | Balsts aizlūzis                                | 1 | Jā                                                              | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Atsaite: nav atbilstošā leņķī_Jā                                                                       | 134616231_1 | 134616231 | Atsaite: nav atbilstošā leņķī                  | 1 | Jā                                                              | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Kabeļa aizsargs balstam_Nav nostiprināts                                                               | 1016374_5   | 1016374   | Kabeļa aizsargs balstam                        | 5 | Nav nostiprināts                                                | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Brusa bojāta vai puvusi (atd.)._Augšējā                                                                | 134706537_2 | 134706537 | Brusa bojāta vai puvusi (atd.).                | 2 | Augšējā                                                         | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |

|                                                                         |                 |               |                                       |   |                                        |            |    |       |   |   |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|---------------------------------------|---|----------------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Atdalītāja pievienojumu vadu defekti_Jā                                 | 13466<br>4727_1 | 1346<br>64727 | Atdalītāja pievienojumu vadu defekti  | 1 | Jā                                     | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Rūsa_100%                                                               | 13472<br>6355_1 | 1347<br>26355 | Rūsa                                  | 1 | 100%                                   | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Piekarizolators bojāts_Jā                                               | 83449<br>352_1  | 8344<br>9352  | Piekarizolators bojāts.               | 1 | Jā                                     | Novērojums | Jā | 51.00 | + |   |
| Izolators izkritis_Jā                                                   | 82763<br>798_1  | 8276<br>3798  | Izolators izkritis                    | 1 | Jā                                     | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Atdalītāja operatīvais apzīmējums_Na v vispār, nav salasāms             | 13464<br>4001_3 | 1346<br>44001 | Atdalītāja operatīvais apzīmējums     | 3 | Nav vispār, nav salasāms               | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Nav pastaba bandāža_Jā (80 cm un vairāk līdz zemei)                     | 13474<br>4419_1 | 1347<br>44419 | Nav pastaba bandāža                   | 1 | Jā (80 cm un vairāk līdz zemei)        | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Atsaitei: stieplu, izolatoru bojājumi_Jā                                | 13461<br>7215_1 | 1346<br>17215 | Atsaitei: stieplu, izolatoru bojājumi | 1 | Jā                                     | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Brusa bojāta vai puvusi (atd.)._Apakšējā                                | 13470<br>6537_1 | 1347<br>06537 | Brusa bojāta vai puvusi (atd.).       | 1 | Apakšējā                               | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Izkritusi, noāķējusies piekarspāle_Jā                                   | 82768<br>683_1  | 8276<br>8683  | Izkritusi, noāķējusies piekarspāle    | 1 | Jā                                     | Novērojums | Jā | 11.00 |   | + |
| Aizsardzība pret putniem_Nav                                            | 86383<br>822_1  | 8638<br>3822  | Aizsardzība pret putniem              | 1 | Nav                                    | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Bandāžas bojātas_Ieplisusi (mehāniska plaisa)                           | 17940<br>518_2  | 1794<br>0518  | Bandāžas bojātas                      | 2 | Ieplisusi (mehāniska plaisa)           | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Balsts atrodas ārpus līnijas ass_Vairāk par 1 metru (balsta pārcelšana) | 83453<br>054_3  | 8345<br>3054  | Balsts atrodas ārpus līnijas ass      | 3 | Vairāk par 1 metru (balsta pārcelšana) | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Drošinātājslēdzā nepieciešamība_Jā                                      | 13674<br>2477_1 | 1367<br>42477 | Drošinātājslēdzā nepieciešamība       | 1 | Jā                                     | Novērojums | Jā | 12.00 |   | + |
| Nepieciešama Traversa_Jā                                                | 17958<br>693_1  | 1795<br>8693  | Nepieciešama Traversa                 | 1 | Jā                                     | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |

|                                                                                                    |                 |                   |                                                        |   |                                                                  |                    |    |           |   |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------|--------------------|----|-----------|---|---|
| Komutācijas piedziņas defekti_Bojāts mehānisms                                                     | 13464<br>5109_1 | 1346<br>4510<br>9 | Komutācij<br>as<br>piedziņas<br>defekti                | 1 | Bojāts<br>mehānism<br>s                                          | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Atdalītāja izolators bojāts Termiski                                                               | 13465<br>8929_2 | 1346<br>5892<br>9 | Atdalītāja izolators bojāts                            | 2 | Termiski                                                         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| AMKA fāžu vadi bojāti_Jā                                                                           | 13464<br>5650_1 | 1346<br>4565<br>0 | AMKA fāžu vadi bojāti                                  | 1 | Jā                                                               | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 12.<br>00 |   | + |
| Nepieciešams Dubults spirālsaišu sējums_Jā                                                         | 82763<br>529_1  | 8276<br>3529      | Nepiecieša<br>ms<br>Dubults spirālsaišu sējums         | 1 | Jā                                                               | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + |   |
| Atdalītāja lokdzēses defekti_Termiski                                                              | 13466<br>1826_2 | 1346<br>6182<br>6 | Atdalītāja lokdzēses defekti                           | 2 | Termiski                                                         | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Atsaitei: bojāti savienojuma stiprinājumi_Jā                                                       | 13461<br>6689_1 | 1346<br>1668<br>9 | Atsaitei:<br>bojāti<br>savienoju<br>ma<br>stiprinājumi | 1 | Jā                                                               | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Balsts izsvēries_līnijas virzienā_Sagāzes līnijas virzienā >2 metriem no vertikāles (b.taisnošana) | 13460<br>5059_3 | 1346<br>0505<br>9 | Balsts izsvēries_lī<br>nijas<br>virzienā               | 3 | Sagāzes līnijas virzienā >2 metriem no vertikāles (b.taisnošana) | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 31.<br>00 | + | + |
| Atdalītāja operatīvais apzīmējums_Na v atdalītājam, j.sl.                                          | 13464<br>4001_1 | 1346<br>4400<br>1 | Atdalītāja operatīvais apzīmējums                      | 1 | Nav atdalītāja m, j.sl.                                          | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Bandāžas, skavas attālums no pastaba virsotnes_6 - 9 cm attālumā līdz pastaba galam                | 13461<br>3377_2 | 1346<br>1337<br>7 | Bandāžas, skavas attālums no pastaba virsotnes         | 2 | 6 - 9 cm attālumā līdz pastaba galam                             | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Kabeļa aizsargs balstam_Nav aizsargāts                                                             | 10163<br>74_6   | 1016<br>374       | Kabeļa aizsargs balstam                                | 6 | Nav aizsargāts                                                   | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |
| Rūsa_50%                                                                                           | 13472<br>6355_2 | 1347<br>2635<br>5 | Rūsa                                                   | 2 | 50%                                                              | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + | + |



|                                                              |                 |               |                                        |   |                                  |            |    |       |   |   |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|----------------------------------------|---|----------------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Brīdinājuma zīme "1kV elektrotīkls" _Nav                     | 13469<br>9008_2 | 1346<br>99008 | Brīdinājuma zīme "1kV elektrotīkls"    | 2 | Nav                              | Novērojums | Jā | 11.00 |   | + |
| Atsaites: nepieciešamība _Nē                                 | 10161<br>20_2   | 1016<br>120   | Atsaites: nepieciešamība               | 2 | Nē                               | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Atdalītāja kontaktsavienojumi bojāti _Mehāniski              | 13465<br>9133_1 | 1346<br>59133 | Atdalītāja kontaktsavienojumi bojāti   | 1 | Mehāniski                        | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Kāsis/āķis saliekts _Jā, ir slodzes uz izolatoru             | 82764<br>328_2  | 8276<br>4328  | Kāsis/āķis saliekts                    | 2 | Jā, ir slodzes uz izolatoru      | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Plaisas savienojumos _Metinājuma plaisas                     | 13472<br>6321_1 | 1347<br>26321 | Plaisas savienojumos                   | 1 | Metinājuma plaisas               | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Atdalītāja bloķēšanas iekārtas bojātas _Jā                   | 13465<br>3658_1 | 1346<br>53658 | Atdalītāja bloķēšanas iekārtas bojātas | 1 | Jā                               | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Atdalītāja nepieciešamība _Jā                                | 17809<br>28_1   | 1780<br>928   | Atdalītāja nepieciešamība              | 1 | Jā                               | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Spaiļu aizsargs _Bojāts                                      | 64143<br>42_2   | 6414<br>342   | Spaiļu aizsargs                        | 2 | Bojāts                           | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Kāsis/āķis saliekts _Jā, nav slodzes uz izolatoru            | 82764<br>328_3  | 8276<br>4328  | Kāsis/āķis saliekts                    | 3 | Jā, nav slodzes uz izolatoru     | Novērojums | Jā | 31.00 | + | + |
| Atdalītāja kontaktsavienojumi bojāti _Termiski               | 13465<br>9133_2 | 1346<br>59133 | Atdalītāja kontaktsavienojumi bojāti   | 2 | Termiski                         | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Atdalītāja operatīvais apzīmējums _Nepareizs                 | 13464<br>4001_4 | 1346<br>44001 | Atdalītāja operatīvais apzīmējums      | 4 | Nepareizs                        | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Mehāniski bojāts (koka b.) _Atrautas šķēpeles (bez darbības) | 13474<br>3655_2 | 1347<br>43655 | Mehāniski bojāts (koka b.)             | 2 | Atrautas šķēpeles (bez darbības) | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Atdalītāja demontāža _Jā                                     | 17951<br>542_1  | 1795<br>1542  | Atdalītāja demontāža                   | 1 | Jā                               | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Slēdzenes defekti _Jā                                        | 13472<br>6402_1 | 1347<br>26402 | Slēdzenes defekti                      | 1 | Jā                               | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |

|                                                                              |             |           |                                                       |   |                            |            |    |       |   |   |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------------------------------|---|----------------------------|------------|----|-------|---|---|
| Informatīvā zīme "DAL" Nav                                                   | 134640938_1 | 134640938 | Informatīvā zīme "DAL"                                | 1 | Nav                        | Novērojums | Jā | 11.00 |   | + |
| Atdalītāja operatīvais apzīmējums_Nav zemējumslēdzim                         | 13464001_2  | 134644001 | Atdalītāja operatīvais apzīmējums                     | 2 | Nav zemējumslēdzim         | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Dubultsējums_Bojāts                                                          | 5865866_2   | 5865866   | Dubultsējums                                          | 2 | Bojāts                     | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| AMKA drošinātājāķis_Bojāts                                                   | 128520670_2 | 128520670 | AMKA drošinātājāķis                                   | 2 | Bojāts                     | Novērojums | Jā | 11.00 |   | + |
| Zemētājslēdža nažu defekti_Mehāniski                                         | 17943209_1  | 17943209  | Zemētājslēdža nažu defekti                            | 1 | Mehāniski                  | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Komutācijas piedziņas defekti_Bojāts stiprinājums balstā                     | 134645109_2 | 134645109 | Komutācijas piedziņas defekti                         | 2 | Bojāts stiprinājums balstā | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Tapizolators izkritis_Jā                                                     | 134726178_1 | 134726178 | Tapizolators izkritis                                 | 1 | Jā                         | Novērojums | Jā | 31.00 | + |   |
| AMKA nullvada pārrāvums_Jā                                                   | 81567317_1  | 81567317  | AMKA nullvada pārrāvums                               | 1 | Jā                         | Novērojums | Jā | 12.00 |   | + |
| Aizsardzība pret putniem_Bojāta                                              | 86383822_2  | 86383822  | Aizsardzība pret putniem                              | 2 | Bojāta                     | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Brīdinājuma lentas_Bojāts                                                    | 180280449_1 | 180280449 | Brīdinājuma lentas                                    | 1 | Bojāts                     | Novērojums | Jā | 17.00 | + |   |
| Koka brusa, traversa (dzelzceļa, A kat. ceļa pāreja)_Jā (Augsta steidzamība) | 161538019_1 | 161538019 | Koka brusa, traversa (dzelzceļa, A kat. ceļa pāreja)  | 1 | Jā (Augsta steidzamība)    | Novērojums | Jā | 11.00 | + |   |
| Spaiļu aizsargs_Nav                                                          | 6414342_1   | 6414342   | Spaiļu aizsargs                                       | 1 | Nav                        | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |
| Nav uzgriežņa staba pievilkšanai pie betona pamatnes_Jā                      | 134744482_1 | 134744482 | Nav uzgriežņa staba pievilkšana i pie betona pamatnes | 1 | Jā                         | Novērojums | Jā | 11.00 | + | + |

|                                                                                   |                     |                   |                                                   |   |                                        |                    |    |           |   |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------------------------|---|----------------------------------------|--------------------|----|-----------|---|---|
| Komutācijas<br>piedziņas<br>defekti_Nav<br>atbilstošā<br>augstumā                 | 13464<br>5109_<br>4 | 1346<br>4510<br>9 | Komutācij<br>as<br>piedziņas<br>defekti           | 4 | Nav<br>atbilstošā<br>augstumā          | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Brīdinājuma<br>lentas_Nav                                                         | 18028<br>0449_<br>2 | 1802<br>8044<br>9 | Brīdinājum<br>a lentas                            | 2 | Nav                                    | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Bojājuma vietas<br>uzrādītājs_Bojāt<br>s (Augsta)                                 | 13461<br>3913_<br>1 | 1346<br>1391<br>3 | Bojājuma<br>vietas<br>uzrādītājs                  | 1 | Bojāts<br>(Augsta)                     | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + |   |
| Elļas noplūde<br>no kabeļa<br>balstā_Jā                                           | 13476<br>7587_<br>1 | 1347<br>6758<br>7 | Elļas<br>noplūde no<br>kabeļa<br>balstā           | 1 | Jā                                     | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 | + |   |
| Komutācijas<br>piedziņas<br>defekti_Bojāta<br>piedziņas<br>izolācija              | 13464<br>5109_<br>3 | 1346<br>4510<br>9 | Komutācij<br>as<br>piedziņas<br>defekti           | 3 | Bojāta<br>piedziņas<br>izolācija       | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Zemētājslēdža<br>nažu<br>defekti_Termisk<br>i                                     | 17943<br>209_2      | 1794<br>3209      | Zemētājslē<br>dža nažu<br>defekti                 | 2 | Termiski                               | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Kontaktlūpu<br>pamata izolatori<br>bojāti_Jā                                      | 19332<br>411_1      | 1933<br>2411      | Kontaktlūp<br>u pamata<br>izolatori<br>bojāti     | 1 | Jā                                     | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 17.<br>00 | + |   |
| Brīdinājuma<br>zīme "1kV<br>elektrotīkls"_Jā<br>atjauno                           | 13469<br>9008_<br>1 | 1346<br>9900<br>8 | Brīdinājum<br>a zīme<br>"1kV<br>elektrotīkls<br>" | 1 | Jāatjauno                              | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 |   | + |
| Atkārtoto<br>zemējuma<br>kopējā<br>pretestība_10,1-<br>30,0 omi<br>(neatbilstošs) | 14091<br>5924_<br>1 | 1409<br>1592<br>4 | Atkārtoto<br>zemējuma<br>kopējā<br>pretestība     | 1 | 10,1-30,0<br>omi<br>(neatbilst<br>ošs) | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 25.<br>00 |   | + |
| Informatīvā<br>zīme<br>"DAL"_Jāatjau<br>no                                        | 13464<br>0938_<br>2 | 1346<br>4093<br>8 | Informatīv<br>ā zīme<br>"DAL"                     | 2 | Jāatjauno                              | Novē<br>rojum<br>s | Jā | 11.<br>00 |   | + |

## 2. pielikums

### AS “Sadales tīkls” virszemes infrastruktūras objektu ģeogrāfiskais izvietojums pētījuma tvēruma ietvaros (pilns apjoms failā Promoc\_darbs\_Gauce\_2\_pielikums.xls)

#### Vidējā sprieguma punktveida elementu saraksts

| Iecirknis | TO_ID | Iezīme      | ID        | Klase<br>s ID | Klase     | Grupa<br>s ID | Grupa | X           | Y           | X (WGS)     | Y (WGS)     | Iezīme | Izgatavoš<br>anas<br>gads | Pastaba<br>materiāls<br>un veids | Pastaba<br>esamība |
|-----------|-------|-------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|---------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894661 | 600           | VS koka I | 1092          | Koka  | 347807.9727 | 415033.1445 | 57.26539623 | 22.59121764 | 6      | 2018                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894662 | 600           | VS koka I | 1092          | Koka  | 347769.3203 | 415098.7617 | 57.2650613  | 22.59231847 | 5      | 2018                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894663 | 600           | VS koka I | 1092          | Koka  | 347730.7227 | 415164.1445 | 57.26472681 | 22.59341537 | 4      | 2018                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894664 | 600           | VS koka I | 1092          | Koka  | 347692.3203 | 415229.4531 | 57.26439405 | 22.59451096 | 3      | 2018                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894665 | 600           | VS koka I | 1092          | Koka  | 347654.1875 | 415294.2109 | 57.2640636  | 22.5955973  | 2      | 2018                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894666 | 600           | VS koka I | 1092          | Koka  | 347616.1211 | 415358.8203 | 57.26373371 | 22.59668115 | 1      | 2018                      | -                                | BEZ pastabiem      |

#### Vidējā sprieguma līnijveida elementu saraksts

| Iecirknis | TO_ID | Iezīme      | ID        | Tabul<br>as ID | Tabula        | Klases<br>ID | Klase                    | Grupa           | Efektīvais<br>garums, m | X1          | Y1          | X2          | Y2          | Guldīšanas<br>vide                    |
|-----------|-------|-------------|-----------|----------------|---------------|--------------|--------------------------|-----------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------------|
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204774714 | 201            | VS līnijas eļ | 1006         | AS-3x35 20 kV darba spr. | Kaivadu līnijas | 76.10570563             | 347847.8398 | 414968.3164 | 347807.9727 | 415033.1445 | Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894667 | 201            | VS līnijas eļ | 1006         | AS-3x35 20 kV darba spr. | Kaivadu līnijas | 77.33623338             | 347616.1211 | 415358.8203 | 347676.7188 | 415426.9625 | Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894668 | 201            | VS līnijas eļ | 1006         | AS-3x35 20 kV darba spr. | Kaivadu līnijas | 74.88846341             | 347654.1875 | 415294.2109 | 347616.1211 | 415358.8203 | Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894669 | 201            | VS līnijas eļ | 1006         | AS-3x35 20 kV darba spr. | Kaivadu līnijas | 75.15188961             | 347692.3203 | 415229.4531 | 347654.1875 | 415294.2109 | Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894670 | 201            | VS līnijas eļ | 1006         | AS-3x35 20 kV darba spr. | Kaivadu līnijas | 75.76247371             | 347730.7227 | 415164.1445 | 347692.3203 | 415229.4531 | Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894671 | 201            | VS līnijas eļ | 1006         | AS-3x35 20 kV darba spr. | Kaivadu līnijas | 75.92595638             | 347769.3203 | 415098.7617 | 347730.7227 | 415164.1445 | Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |
| Talsi-1   | cbf6g | 33071#E0189 | 204894672 | 201            | VS līnijas eļ | 1006         | AS-3x35 20 kV darba spr. | Kaivadu līnijas | 76.135                  | 347807.9727 | 415033.1445 | 347769.3203 | 415098.7617 | Lauksaimniecībā izmantojama zeme (10) |

#### Zemsprieguma punktveida elementu saraksts

| Iecirknis | TO_ID | Iezīme        | ID      | Klase<br>s ID | Klase          | Grupa<br>s ID | Grupa | X           | Y           | X (WGS)     | Y (WGS)     | Iezīme | Izgatavoš<br>anas<br>gads | Pastaba<br>materiāls<br>un veids | Pastaba<br>esamība |
|-----------|-------|---------------|---------|---------------|----------------|---------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|---------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668800 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349496.5703 | 422961.3828 | 57.28196551 | 22.72210642 | 2      | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668804 | 696           | ZS koka I ar r | 1092          | Koka  | 349474.1055 | 422792.2969 | 57.28173522 | 22.71930947 | 23     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668805 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349474.3086 | 422743.6875 | 57.28172884 | 22.71850333 | 22     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668806 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349478.7109 | 422692.4922 | 57.28173277 | 22.71765392 | 21     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668807 | 651           | ZS koka A      | 1092          | Koka  | 349478.3906 | 422587.9805 | 57.28173915 | 22.71591998 | 19     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668808 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349477.0977 | 422636.3477 | 57.28173573 | 22.71672245 | 20     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668809 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349525.7656 | 422504.0859 | 57.28215054 | 22.71451394 | 17     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668810 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349546.1445 | 422466.7656 | 57.28232709 | 22.71388867 | 16     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668811 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349565.6875 | 422430.5859 | 57.28249646 | 22.71328258 | 15     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668812 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349585.6445 | 422394.9219 | 57.28266964 | 22.71266489 | 14     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668813 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349604.9063 | 422359.0859 | 57.28283654 | 22.71208458 | 13     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668814 | 651           | ZS koka A      | 1092          | Koka  | 349626.8086 | 422323.0039 | 57.28302711 | 22.71147934 | 12     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668815 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349660.3867 | 422302.1094 | 57.28332512 | 22.71112233 | 11     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 7668816 | 650           | ZS koka I      | 1092          | Koka  | 349693.3906 | 422283.2422 | 57.28361831 | 22.71079905 | 10     | 1999                      | -                                | BEZ pastabiem      |

#### Zemsprieguma līnijveida elementu saraksts

| Iecirknis | TO_ID | Iezīme        | ID       | Tabul<br>as ID | Tabula        | Klases<br>ID | Klase        | Grupa            | Efektīvais<br>garums, m | X1          | Y1          | X2          | Y2          | Guldīšanas<br>vide |
|-----------|-------|---------------|----------|----------------|---------------|--------------|--------------|------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10036513 | 203            | ZS līnijas eļ | 1122         | AMKA-3x70-95 | Piekarkabeļu līn | 55.16617325             | 349953.4531 | 422060.6484 | 349974.6445 | 422111.582  |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047942 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 45.39992996             | 349853.8789 | 422237.0156 | 349879.8438 | 422274.2578 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047943 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 43.38217746             | 349879.8438 | 422274.2578 | 349903.6992 | 422310.4922 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047944 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 43.42215982             | 349903.6992 | 422310.4922 | 349928.2656 | 422346.2969 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047945 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 42.98219001             | 349928.2656 | 422346.2969 | 349951.9336 | 422382.1756 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047946 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 43.19825357             | 349951.9336 | 422382.1758 | 349976.1367 | 422417.957  |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047947 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 36.17763858             | 349976.1367 | 422417.957  | 349996.4023 | 422447.957  |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047949 | 203            | ZS līnijas eļ | 1119         | AMKA-3x16+25 | Piekarkabeļu līn | 24.43231849             | 349996.4023 | 422447.9528 | 350020.5391 | 422451.7148 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047953 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 45.6939661              | 349996.4023 | 422447.9528 | 349988.832  | 422492.9883 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047954 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 48.88483113             | 349988.832  | 422492.9883 | 349982.1842 | 422541.4141 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047955 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 40.18676643             | 349982.1484 | 422541.4141 | 349976.9688 | 422581.2656 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047956 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 39.25075048             | 349976.9688 | 422581.2656 | 349972.3047 | 422620.2383 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047974 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 43.15417467             | 349796.3242 | 422225.6289 | 349758.4883 | 422246.3828 |                    |
| Talsi-1   | cd56v | 33071#30609-1 | 10047975 | 203            | ZS līnijas eļ | 1109         | A-4x50       | Kaivadu līnijas  | 38.86067392             | 349758.4883 | 422246.3828 | 349724.7617 | 422265.6875 |                    |

## DJI Mavic 2 Pro RGB sensora tehniskā specifikācija

| Specifications                      |                                                              |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Aircraft</b>                     |                                                              |
| Takeoff Weight                      | 907 g (Mavic 2 Pro); 905 g (Mavic 2 Zoom)                    |
| Dimensions                          | Folded:                                                      |
|                                     | 214×91×84 mm (length×width×height)                           |
|                                     | Unfolded:                                                    |
|                                     | 322×242×84 mm (length×width×height)                          |
| Diagonal Distance                   | 354 mm                                                       |
| Max Ascent Speed                    | 5 m/s (S-mode), 4 m/s (P-mode)                               |
| Max Descent Speed                   | 3 m/s (S-mode), 3 m/s (P-mode)                               |
| Max Speed                           | 72 km/h (S-mode) (near sea level, no wind)                   |
| Max Service Ceiling Above Sea Level | 6000 m                                                       |
| Max Flight Time                     | 31 minutes (at a consistent 25 kph, no wind)                 |
| Max Hovering Time                   | 29 minutes (no wind)                                         |
| Overall Flight Time                 | 25 minutes ( In normal flight, 15% remaining battery level ) |
| Max Flight Distance                 | 18 km (at a consistent 50 kph, no wind)                      |
| Max Wind Speed Resistance           | 29–38 kph                                                    |
| Max Tilt Angle                      | 35° (S-mode, with remote controller), 25° (P-mode)           |
| Max Angular Velocity                | 200°/s                                                       |
| Operating Temperature Range         | -10°C - 40°C                                                 |
| GNSS                                | GPS+GLONASS                                                  |
| Hovering Accuracy Range             | Vertical:                                                    |
|                                     | ±0.1 m (when vision positioning is active)                   |
|                                     | ±0.5 m (with GPS positioning)                                |
|                                     | Horizontal:                                                  |
|                                     | ±0.3 m (when vision positioning is active)                   |
|                                     | ±1.5 m (with GPS positioning)                                |
| Operating Frequency                 | 2.400 - 2.4835 GHz; 5.725 - 5.850 GHz                        |
| Transmission Power (EIRP)           | 2.4 GHz                                                      |
|                                     | FCC: ≤26 dBm; CE: ≤20 dBm; SRRC: ≤20 dBm; MIC: ≤20 dBm       |
|                                     | 5.8 GHz                                                      |
|                                     | FCC: ≤26 dBm; CE: ≤14 dBm; SRRC: ≤26 dBm                     |
| Internal Storage                    | 8 GB                                                         |
| <b>Gimbal</b>                       |                                                              |
| Mechanical Range                    | Tilt: -135 to 45°, Pan: -100 to 100°, Roll: -45 to 45°       |
| Controllable Range                  | Tilt: -90 to 30°, Pan: -75 to 75°                            |
| Stabilization                       | 3-axis (tilt, roll, pan)                                     |
| Max Control Speed (tilt)            | 120°/s                                                       |
| Angular Vibration Range             | ±0.01° (Mavic 2 Pro) ; ±0.005° (Mavic 2 Zoom)                |

| Sensing System          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensing System          | Omnidirectional Obstacle Sensing                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                            |
| FOV                     | Forward: Horizontal: 40°, Vertical: 70°<br>Backward: Horizontal: 60°, Vertical: 77°<br>Downward: Front and Back: 100°, Left and Right: 83°<br>Lateral: Horizontal: 80°, Vertical: 65°                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                            |
| Obstacle Sensing Range  | Forward: Precision Measurement Range: 0.5 - 20 m<br>Detectable Range: 20 - 40 m<br>Effective Sensing Speed: ≤ 14 m/s<br>Backward: Precision Measurement Range: 0.5 - 16 m<br>Detectable Range: 16 - 32 m<br>Effective Sensing Speed: ≤ 12 m/s<br>Upward: Precision Measurement Range: 0.1 - 8 m<br>Downward: Precision Measurement Range: 0.5 - 11 m<br>Detectable Range: 11 - 22 m<br>Sides: Precision Measurement Range: 0.5 - 10 m<br>Effective Sensing Speed: ≤ 8 m/s |                                                                                                                                                                                            |
| Operating Environment   | Surface with clear pattern and adequate lighting (lux >15)<br>Detects diffuse reflective surfaces (>20%) (walls, trees, people, etc.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                            |
| Velocity Range          | ≤31mph (50 kph) at 6.6 ft (2 m) above ground                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                            |
| Altitude Range          | 0.1 - 11 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                            |
| Operating Range         | 0.3 - 50 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                            |
| Camera                  | Mavic 2 Pro                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Mavic 2 Zoom                                                                                                                                                                               |
| Sensor                  | 1" CMOS<br>Effective Pixels: 20 million                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1/2.3" CMOS<br>Effective Pixels: 12 million                                                                                                                                                |
| Lens                    | FOV: approx. 77°<br>35 mm Format Equivalent: 28 mm<br>Aperture: f/2.8–f/11<br>Shooting Range: 1 m to ∞                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | FOV: approx. 83° (24 mm)<br>approx. 48° (48 mm)<br>35 mm Format Equivalent: 24-48 mm<br>Aperture: f/2.8 (24 mm)–f/11 (48 mm)<br>Shooting Range: 0.5 m to ∞                                 |
| ISO Range               | Video: 100-6400<br>Photo: 100-3200 (auto)<br>100-12800 (manual)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Video: 100-3200<br>Photo: 100-1600 (auto)<br>100-3200 (manual)                                                                                                                             |
| Shutter Speed           | Electronic Shutter: 8–1/8000 s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Electronic Shutter: 8–1/8000 s                                                                                                                                                             |
| Still Image Size        | 5472×3648                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4000×3000                                                                                                                                                                                  |
| Still Photography Modes | Single shot<br>Burst shooting: 3/5 frames<br>Auto Exposure Bracketing (AEB): 3/5 bracketed frames at 0.7 EV Bias<br>Interval (JPEG): 2/3/5/7/10/15/20/30/60s<br>RAW: 5/7/10/15/20/30/60s                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Single shot<br>Burst shooting: 3/5/7 frames<br>Auto Exposure Bracketing (AEB): 3/5 bracketed frames at 0.7 EV Bias<br>Interval (JPEG): 2/3/5/7/10/15/20/30/60s<br>RAW: 5/7/10/15/20/30/60s |
| Video Resolution        | 4K: 3840×2160 24/25/30p<br>2.7K: 2688×1512<br>24/25/30/48/50/60p<br>FHD: 1920×1080<br>24/25/30/48/50/60/120p                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 4K: 3840×2160 24/25/30p<br>2.7K: 2688×1512<br>24/25/30/48/50/60p<br>FHD: 1920×1080<br>24/25/30/48/50/60/120p                                                                               |

|                              |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Color Mode                   | Dlog-M (10-bit), support HDR video (HLG 10-bit)                                                                                                                      | D-Cinelike                                                                                                                                                                                                              |
| Max Video Bitrate            | 100 Mbps                                                                                                                                                             | 100 Mbps                                                                                                                                                                                                                |
| Supported File System        | FAT32: ≤ 32 GB<br>exFAT: > 32 GB                                                                                                                                     | FAT32: ≤ 32 GB<br>exFAT: > 32 GB                                                                                                                                                                                        |
| Photo Format                 | JPEG / DNG (RAW)                                                                                                                                                     | JPEG / DNG (RAW)                                                                                                                                                                                                        |
| Video Format                 | MP4 / MOV (MPEG-4 AVC/H.264, HEVC/H.265)                                                                                                                             | MP4 / MOV (MPEG-4 AVC/H.264, HEVC/H.265)                                                                                                                                                                                |
| Supported SD Cards           | Micro SD<br>Supporting Micro SD with capacity up to 128 GB and R/W speed up to UHS-I Speed Grade 3                                                                   | Micro SD<br>Supporting Micro SD with capacity up to 128 GB and R/W speed up to UHS-I Speed Grade 3                                                                                                                      |
| Operating Temperature Range  | -10°C to 40°C                                                                                                                                                        | -10°C to 40°C                                                                                                                                                                                                           |
| HDR                          | Enhanced HDR, 14 EV                                                                                                                                                  | HDR, 13 EV                                                                                                                                                                                                              |
| Hyperlight                   | 8 dB SNR                                                                                                                                                             | 8 dB SNR                                                                                                                                                                                                                |
| Panorama                     | Pano (3×1):<br>4000×6000 (40°×80°)<br>W (3×3):<br>8000×6000 (113°×80°)<br>180° (3×7):<br>8192×2840 (240°×76°)<br>Sphere (3×8+1):<br>8192×4096 (360°×126°, 360°×180°) | Pano (3×1):<br>4000×6000 (41°×93°)<br>W (3×3):<br>8000×6000 (117°×93°)<br>180° (3×7):<br>8192×2840 (249°×87°)<br>Sphere: (3×8+1) 8192×4096 (360°×126°, 360°×180°)<br>Super Resolution: 8000×6000 (24 mm equivalent FOV) |
| Remote Controller            |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                         |
| Operating Frequency          | 2.400 - 2.4835 GHz; 5.725 - 5.850 GHz                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                         |
| Max Transmission Distance    | FCC: 8000 m; CE: 5000 m; SRRC: 5000 m; MIC: 5000 m (unobstructed, free of interference)                                                                              |                                                                                                                                                                                                                         |
| Operating Temperature Range  | 0°C - 40°C                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                         |
| Battery                      | 3950 mAh                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                         |
| Transmission Power (EIRP)    | 2.400 - 2.4835 GHz<br>FCC: ≤26 dBm; CE: ≤20 dBm; SRRC: ≤20 dBm; MIC: ≤20 dBm<br>5.725 - 5.850 GHz<br>FCC: ≤26 dBm; CE: ≤14 dBm; SRRC: ≤26 dBm                        |                                                                                                                                                                                                                         |
| Operating Current/Voltage    | 1800 mA @ 3.83 V                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                         |
| Supported Mobile Device Size | Max length: 160 mm; max thickness: 6.5 – 8.5 mm                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                         |
| Supported USB Port Types     | Lightning, Micro USB (Type-B), USB-C                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                         |
| Charger                      |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                         |
| Input                        | 100-240 V, 50/60 Hz, 1.8 A                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                         |
| Output                       | Main: 17.6 V = 3.41 A or 17.0 V = 3.53 A<br>USB: 5 V = 2 A                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                         |
| Voltage                      | 17.6±0.1 V or 17.0 V±0.1 V                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                         |
| Rated Power                  | 60 W                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                         |

| Intelligent Flight Battery                                        |                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capacity                                                          | 3850 mAh                                                                                                                         |
| Voltage                                                           | 15.4 V                                                                                                                           |
| Max Charging Voltage                                              | 17.6 V                                                                                                                           |
| Battery Type                                                      | LiPo 4S                                                                                                                          |
| Energy                                                            | 59.29 Wh                                                                                                                         |
| Net Weight                                                        | 297 g                                                                                                                            |
| Charging Temperature Range                                        | 5°C - 40°C                                                                                                                       |
| Max Charging Power                                                | 80 W                                                                                                                             |
| APP                                                               |                                                                                                                                  |
| Video Transmission System Name                                    | OcuSync 2.0<br>DJI GO 4                                                                                                          |
| Live View Quality                                                 | Remote Controller: 720p@30fps / 1080p@30fps<br>DJI Goggles: 720p@30fps / 1080p@30fps<br>DJI Goggles RE: 720p@30fps / 1080p@30fps |
| Latency (depending on environmental conditions and mobile device) | 120 - 130 ms                                                                                                                     |
| Required Operating System                                         | iOS 10.0.2 or later<br>Android 4.4 or later                                                                                      |

## Calibrating the Compass

It is recommended that the compass is calibrated in any of the following situations when flying outdoors:

1. Flying at a location farther than 31 miles (50 km) away from the location the drone was last flown.
2. The aircraft has not been flown for more than 30 days.
3. A compass interference warning appears in DJI GO 4 and/or the Aircraft Status Indicators blink alternating red and yellow.



- DO NOT calibrate the compass in locations where magnetic interference may occur, such as close to magnetite deposits or large metallic structures such as parking structures, steel reinforced basements, bridges, cars, or scaffolding.
- DO NOT carry objects (such as cell phones) that contain ferromagnetic materials near the aircraft during calibration.
- It is not necessary to calibrate the compass when flying indoors.

## Calibration Procedure

Choose an open area to carry out the following procedure.

1. Tap the System Status Bar in DJI GO 4, select "Calibrate", and follow the on-screen instructions.
2. Hold the aircraft horizontally and rotate it 360 degrees. The Aircraft Status Indicator will turn solid green.
3. Hold the aircraft vertically, with its nose pointing downward, and rotate it 360 degrees around a vertical axis.
4. If the Aircraft Status Indicator blinks red, the calibration has failed. Change your location and try the calibration procedure again.



LiDAR YellowScan Mapper tehniskā specifikācija

Mapper LiDAR system

|                              |               |                        |                                   |
|------------------------------|---------------|------------------------|-----------------------------------|
| Scanner                      | Livox Horizon | GNSS-Inertial solution | Applanix APX-15 UAV               |
| Wavelength                   | 905 nm        | Weight <sup>(4)</sup>  | 1.5 kg (3.3 lbs) battery included |
| Precision <sup>(1) (3)</sup> | 2 cm          | Size                   | L 14.3 x W 9.5 x H 15.4 cm        |
| Accuracy <sup>(2) (3)</sup>  | 3 cm          | Autonomy               | 1 hour typ.                       |
| Shots per second             | 240 k         | Power consumption      | 19 W                              |
| Echoes per shot              | Up to 2       | Operating temperature  | -20 to +40 °C                     |
| Scanner field of view        | 81.7 °        |                        |                                   |

(1) Precision, also called reproducibility or repeatability, accounts for the variation in successive measurements taken on the same target.

(2) Accuracy is the degree of conformity of a measured position to its actual (true) value.

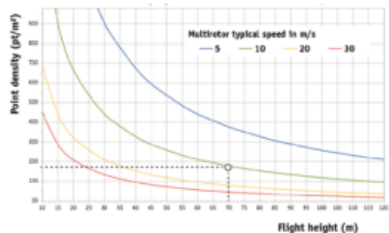
(3) One  $\sigma$  @ 50 m, nadir

(4) Weight battery excluded: 1.3 kg (2.9 lbs)

Camera Module

|            |                        |                       |                             |
|------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Sensor     | APS-C Type Exmor CMOS  | Depth                 | 106.2 mm                    |
| Resolution | 19.8 Mpx               | Weight                | 350 gr (with camera lens)   |
| Storage    | MicroSD card           | Interface with Mapper | Yellowscan accessories port |
| Lens       | Sony SEL-16F28 E-mount | Power                 | Powered by Mapper           |
| Width      | 86.6 mm                | Power consumption     | 2.2 W                       |
| Height     | 78.1 mm                |                       |                             |

Mapper LiDAR system



|              |          |               |
|--------------|----------|---------------|
| FLIGHT SPEED | ALTITUDE | POINT DENSITY |
| 5m/s         | 70m      | 400pts/sqm    |
| FLIGHT SPEED | ALTITUDE | POINT DENSITY |
| 10m/s        | 70m      | 200pts/sqm    |
| FLIGHT SPEED | ALTITUDE | POINT DENSITY |
| 20m/s        | 70m      | 100pts/sqm    |

## DJI Matrice 300RTK tehniskā specifikācija

| Specs              |                                      |                                                                                                                                                                                          |
|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aircraft           | Dimensions                           | Unfolded, propellers excluded, 810×670×430 mm (L×W×H)<br>Folded, propellers included, 430×420×430 mm (L×W×H)                                                                             |
|                    | Diagonal Wheelbase                   | 895 mm                                                                                                                                                                                   |
|                    | Weight (with single downward gimbal) | Approx. 3.6 kg (without batteries)<br>Approx. 6.3 kg (with two TB60 batteries)                                                                                                           |
|                    | Single Gimbal Damper's Max Payload   | 930g                                                                                                                                                                                     |
|                    | Max Takeoff Weight                   | 9 kg                                                                                                                                                                                     |
|                    | Operating Frequency                  | 2.4000-2.4835 GHz<br>5.725-5.850 GHz                                                                                                                                                     |
|                    | EIRP                                 | 2.4000-2.4835 GHz:<br>29.5 dBm (FCC); 18.5dBm (CE)<br>18.5 dBm (SRRC); 18.5dBm (MIC)<br><br>5.725-5.850 GHz:<br>28.5 dBm (FCC); 12.5dBm (CE)<br>28.5 dBm (SRRC)                          |
|                    | Hovering Accuracy (P-mode with GPS)  | Vertical:<br>±0.1 m (Vision System enabled)<br>±0.5 m (GPS enabled)<br>±0.1 m (RTK enabled)                                                                                              |
|                    | RTK Positioning Accuracy             | Horizontal:<br>±0.3 m (Vision System enabled)<br>±1.5 m (GPS enabled)<br>±0.1 m (RTK enabled)<br><br>When RTK enabled and fixed:<br>1 cm+1 ppm (Horizontal)<br>1.5 cm + 1 ppm (Vertical) |
|                    | Max Angular Velocity                 | Pitch: 300°/s, Yaw: 100°/s                                                                                                                                                               |
| Flight Performance | Max Pitch Angle                      | 30° (P-mode, Forward Vision System enabled: 25°)                                                                                                                                         |
|                    | Max Ascent Speed                     | S mode: 6 m/s<br>P mode: 5 m/s                                                                                                                                                           |
|                    | Max Descent Speed (vertical)         | S mode: 5 m/s<br>P mode: 4 m/s                                                                                                                                                           |
|                    | Max Descent Speed (tilt)             | S Mode: 7 m/s                                                                                                                                                                            |
|                    | Max Speed                            | S mode: 23 m/s<br>P mode: 17 m/s                                                                                                                                                         |
|                    | Service Ceiling Above Sea Level      | 5000 m (with 2110 propellers, takeoff weight ≤ 7 kg) / 7000 m (with 2195 propellers, takeoff weight ≤ 7 kg)                                                                              |
|                    | Max Wind Resistance                  | 12 m/s                                                                                                                                                                                   |
|                    | Max Flight Time                      | 55 min                                                                                                                                                                                   |
|                    | Supported DJI Gimbals                | Zenmuse XT2/XT S/Z30/H20/H20T/DJI P1/DJI L1                                                                                                                                              |
|                    | Supported Gimbal Configurations      | Single Downward Gimbal, Dual Downward Gimbals, Single Upward Gimbal, Upward and Downward Gimbals, Triple Gimbals                                                                         |
| Compliance         | Ingress Protection Rating            | IP45                                                                                                                                                                                     |
|                    | GNSS                                 | GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo                                                                                                                                                               |
|                    | Operating Temperature                | -20°C to 50°C (-4°F to 122° F)                                                                                                                                                           |

|                   |                                                                |                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Remote Controller | Operating Frequency                                            | 2.4000-2.4835 GHz<br>5.725-5.850 GHz                                                                                                                                                                                                |
|                   | Max Transmitting Distance (unobstructed, free of interference) | NCC/FCC: 15 km<br>CE/MIC: 8 km<br>SRRC: 8 km                                                                                                                                                                                        |
|                   | EIRP                                                           | 2.4000-2.4835 GHz:<br>29.5 dBm (FCC); 18.5dBm (CE)<br>18.5 dBm (SRRC); 18.5dBm (MIC)                                                                                                                                                |
|                   |                                                                | 5.725-5.850 GHz:<br>28.5 dBm (FCC); 12.5dBm (CE)<br>20.5 dBm (SRRC)                                                                                                                                                                 |
|                   | External battery                                               | Name: WB37 Intelligent Battery<br>Capacity: 4920 mAh<br>Voltage: 7.6V<br>Type: LiPo<br>Energy: 37.39Wh<br>Charging time (using BS60 Intelligent Battery Station): 70 minutes (15°C to 45°C);<br>130 minutes (0°C to 15°C)           |
|                   | Built-in battery                                               | Type: 18650 lithium ion battery (5000 mAh @ 7.2 V)<br>Charging: Use a USB charger with specification of 12V / 2A<br>Rated power: 17 W<br>Charging time: 2 hours and 15 minutes (Using a USB charger with specification of 12V / 2A) |
|                   | Battery Life                                                   | Built-in battery: Approx. 2.5h<br>Built-in battery+External battery: Approx. 4.5h                                                                                                                                                   |
|                   | USB Power Supply                                               | 5 V / 1.5 A                                                                                                                                                                                                                         |
|                   | Operating Temperature                                          | -20°C to 40°C (-4 °F to 104 °F)                                                                                                                                                                                                     |

|               |                        |                                                                                  |
|---------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Vision System | Obstacle Sensing Range | Forward/Backward/Left/Right: 0.7-40m<br>Upward/Downward: 0.6-30m                 |
|               | FOV                    | Forward/Backward/Downward: 65° (H), 50° (V)<br>Left/Right/Upward: 75°(H), 60°(V) |
|               | Operating Environment  | Surfaces with clear patterns and adequate lighting (> 15 lux)                    |

|                             |                        |                                                             |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Infrared ToF Sensing System | Obstacle Sensing Range | 0.1-8m                                                      |
|                             | FOV                    | 30° (±15°)                                                  |
|                             | Operating Environment  | Large, diffuse and reflective obstacles (reflectivity >10%) |

|                                |                             |     |
|--------------------------------|-----------------------------|-----|
| Top and bottom auxiliary light | Effective lighting distance | 5 m |
|--------------------------------|-----------------------------|-----|

|            |            |        |
|------------|------------|--------|
| FPV Camera | Resolution | 960p   |
|            | FOV        | 145°   |
|            | Frame rate | 30 fps |

### Intelligent Flight Battery

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Name                      | TB60                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Capacity                  | 5935 mAh                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Voltage                   | 52.8 V                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Battery Type              | LiPo 12S                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Energy                    | 274 Wh                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Net Weight                | Approx. 1.35 kg                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Operating Temperature     | -4°F to 122°F (-20°C to 50°C)                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Ideal storage temperature | 71.6°F to 86°F (22°C to 30°C)                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Charging Temperature      | -4°F to 104°F (-20°C to 40°C)<br>(When the temperature is lower than 5°C, the self-heating function will be automatically enabled. Charging in a low temperature may shorten the lifetime of the battery)                                                                               |
| Charging time             | Using BS60 Intelligent Battery Station:<br>220V input: 60 minutes (fully charging two TB60 batteries), 30 minutes (charging two TB60 batteries from 20% to 90%)<br>110V input: 70 minutes (fully charging two TB60 batteries), 40 minutes (charging two TB60 batteries from 20% to 90%) |

### BS60 Intelligent Battery Station

|                       |                                                                     |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Dimensions            | 501*403*252mm                                                       |
| Net Weight            | 8.37kg                                                              |
| Maximum Capacity      | TB60 Intelligent Flight Battery × 8<br>WB37 Intelligent Battery × 4 |
| Input                 | 100-120 VAC, 50-60 Hz / 220-240 VAC, 50-60 Hz                       |
| Max. Input Power      | 1070W                                                               |
| Output Power          | 100-120 V: 750 W<br>220-240 V: 992 W                                |
| Operating Temperature | -4°F to 104°F (-20°C to 40°C)                                       |

### Notes

The terms HDMI, HDMI High-Definition Multimedia Interface, HDMI Trade dress and the HDMI Logos are trademarks or registered trademarks of HDMI Licensing Administrator, Inc.



## AS “Sadales tīkls” virszemes infrastruktūras balstu tipi

| balsta<br>numurs | balsta<br>nosaukums | balsta<br>augstums<br>m | balsta<br>materiāls                   | balsta<br>nosaukums                                                                 | balsta<br>numurs | balsta<br>nosaukums | balsta<br>augstums<br>m | balsta<br>materiāls | balsta<br>nosaukums | balsta<br>numurs | balsta<br>nosaukums | balsta<br>augstums<br>m | balsta<br>materiāls                      | balsta<br>nosaukums                                                                 | balsta<br>numurs | balsta<br>nosaukums | balsta<br>augstums<br>m | balsta<br>materiāls |
|------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| EPL<br>balsti    | Koka                | 600                     | VS<br>koka I                          |    |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 616                     | VS<br>koka I ar<br>2 stutēm              |    |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 601                     | VS<br>koka A                          |    |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 617                     | VS<br>koka I ar<br>past. un<br>stuti     |                                                                                     |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 602                     | VS<br>koka V                          |    |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 618                     | VS<br>koka I ar<br>past. un 2<br>st.     |    |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 603                     | VS<br>koka P                          |    |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 620                     | VS<br>koka I ar<br>pastabu               |    |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 604                     | VS<br>koka 3<br>kāju                  |    |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 621                     | VS<br>koka A<br>ar<br>pastabiem          |    |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 605                     | VS<br>koka 4<br>kāju                  |    |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 622                     | VS<br>koka V<br>ar<br>pastabiem          |    |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Dzelzsb<br>etona    | 606                     | VS<br>dzelzbeton<br>a P               |    |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 623                     | VS<br>koka P<br>ar<br>pastabiem          |    |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Metāla              | 608                     | VS<br>metāla                          |   |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 624                     | VS<br>koka 3<br>kāju ar<br>pastabiem     |   |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Dzelzsb<br>etona    | 609                     | VS<br>dzelzbeton<br>a I ar<br>pastabu |  |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 625                     | VS<br>koka 4<br>kāju ar<br>pastabiem     |  |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 615                     | VS<br>koka I ar<br>stuti              |  |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Dzelzsb<br>etona    | 626                     | VS<br>dzelzbeton<br>a I                  |  |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 628                     | VS<br>koka 4<br>kāju P                |  |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 633                     | VS<br>koka P<br>ar st. I. ass<br>virz.   |  |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 629                     | VS<br>koka 5<br>kāju P                |                                                                                     |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 634                     | VS<br>koka P<br>ar p. un st.<br>I. virz. |  |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 631                     | VS<br>koka P<br>ar 1 stuti            |  |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 635                     | VS<br>koka P<br>ar 2 stutēm              |  |                  |                     |                         |                     |
| EPL<br>balsti    | Koka                | 632                     | VS<br>koka P<br>ar past. un<br>1 st.  |  |                  |                     |                         |                     |                     | EPL<br>balsti    | Koka                | 636                     | VS<br>koka P<br>ar past. un<br>2 st.     |                                                                                     |                  |                     |                         |                     |

|            |      |     |    |                               |                                                                                                                                                                         |  |
|------------|------|-----|----|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| EPL balsti | Koka | 637 | VS | VS koka A ar 1 stuti          |                                                                                        |  |
| EPL balsti | Koka | 638 | VS | VS koka A ar past. un 1 stuti |                                                                                        |  |
| EPL balsti | Koka | 639 | VS | VS koka 3 kāju P              |       |  |
| EPL balsti | Koka | 640 | VS | VS koka A ar 1 stuti (TP)     |                                                                                        |  |
| EPL balsti | Koka | 641 | VS | VS koka I ar stuti (TP)       |                                                                                        |  |
| EPL balsti | Koka | 642 | VS | VS koka P ar 1 stuti (TP)     |                                                                                        |  |
| EPL balsti | Koka | 690 | VS | VS koka P ar 2 stutēm (TP)    |                                                                                        |  |
| EPL balsti | Koka | 712 | VS | VS koka I (TP)                |                                                                                        |  |
| EPL balsti | Koka | 713 | VS | VS koka A (TP)                |                                                                                       |  |
| EPL balsti | Koka | 714 | VS | VS koka P (TP)                |                                                                                      |  |
| EPL balsti | Koka | 715 | VS | VS koka 3 kāju (TP)           |   |  |
| EPL balsti | Koka | 716 | VS | VS koka 4 kāju (TP)           |                                                                                      |  |
| EPL balsti | Koka | 650 | ZS | ZS koka I                     |                                                                                      |  |
| EPL balsti | Koka | 651 | ZS | ZS koka A                     |   |  |

|            |               |     |    |                              |                                                                                     |  |
|------------|---------------|-----|----|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--|
| EPL balsti | Dzelzsb etona | 665 | ZS | ZS dzelzb. I ar stuti        |    |  |
| EPL balsti | Dzelzsb etona | 666 | ZS | ZS dz.b. I ar 2 stutēm       |    |  |
| EPL balsti | Koka          | 652 | ZS | ZS koka V                    |                                                                                     |  |
| EPL balsti | Koka          | 653 | ZS | ZS koka P                    |                                                                                     |  |
| EPL balsti | Koka          | 654 | ZS | ZS koka 3 kāju               |    |  |
| EPL balsti | Koka          | 655 | ZS | ZS koka 4 kāju               |                                                                                     |  |
| EPL balsti | Koka          | 656 | ZS | ZS koka A ar stuti           |    |  |
| EPL balsti | Metāla        | 658 | ZS | ZS metāla                    |                                                                                     |  |
| EPL balsti | Dzelzsb etona | 659 | ZS | ZS dzelzsbetona I            |    |  |
| EPL balsti | Dzelzsb etona | 660 | ZS | ZS dzelzsbetona A            |                                                                                     |  |
| EPL balsti | Dzelzsb etona | 661 | ZS | ZS dzelzsbetona V            |                                                                                     |  |
| EPL balsti | Dzelzsb etona | 663 | ZS | ZS dzelzsbetona 3 kāju       |                                                                                     |  |
| EPL balsti | Dzelzsb etona | 664 | ZS | ZS dzelzsbetona I ar pastabu |  |  |
| EPL balsti | Dzelzsb etona | 667 | ZS | ZS dz.b. I ar past un stuti  |                                                                                     |  |

|               |                  |     |    |                                   |                                                                                     |  |
|---------------|------------------|-----|----|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--|
| EPL<br>balsti | Dzelzsb<br>etona | 668 | zs | ZS dz.b. I ar<br>past. un 2<br>st |                                                                                     |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 670 | zs | ZS koka I ar<br>pastabu           |    |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 671 | zs | ZS koka A<br>ar<br>pastabiem      |                                                                                     |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 672 | zs | ZS koka V<br>ar<br>pastabiem      |                                                                                     |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 673 | zs | ZS koka P ar<br>pastabiem         |                                                                                     |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 674 | zs | ZS koka 3<br>kāju ar<br>past.     |    |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 675 | zs | ZS koka 4<br>kāju ar<br>past.     |                                                                                     |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 679 | zs | ZS koka A<br>ar past. un<br>stuti |    |  |
| EPL<br>balsti | Dzelzsb<br>etona | 686 | zs | ZS<br>dzelzsbeton<br>a P          |                                                                                     |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 696 | zs | ZS koka I ar<br>stuti             |  |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 697 | zs | ZS koka I ar<br>2 stutēm          |  |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 698 | zs | ZS koka I ar<br>past. un<br>stuti |  |  |
| EPL<br>balsti | Koka             | 699 | zs | ZS koka I ar<br>past. un 2<br>st. |  |  |



**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.