



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# KÕRGEPIINGELIINIROBOTID JA NENDE KASUTAMISVÕIMALUSED

POWER LINE ROBOTS AND THEIR POTENTIAL APPLICATIONS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane:

Tõnis Teder

Üliõpilaskood:

1554464

Juhendajad:

Ivar Kiitam  
Paul Taklaja

Tallinn, 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Tõnis Teder

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Kõrgepingeliinirobotid ja nende kasutamisevõimalused

*Kuupäev:* 24.05.2019

39 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendajad:* doktorant-nooremteadur Ivar Kiitam, vanemlektor Paul Taklaja

## *Sisu kirjeldus:*

Antud lõputöö eesmärgiks on anda lühiülevaade maailmas arendamises olevatest ja välja arendatud kõrgepingeliinide ülevaatuseks, mõõtmis- ja remonttöödeks kasutatavatest robotitest. Töös kirjeldatud robotid on: LineScout, Expliner, AApe-D, Linebot, korrosiooni avastamise robot, jätkumuhvide kontrollrobot, LineDrone ja Hiina välja arendatud kõrgepingeliinide kontrollimise UAV. Antud lõputöö kirjeldab, kuidas need robotid töötavad ning annab ülevaate, milleks neid robotiteid on võimalik kasutada. Töös tuuakse välja nende robotite plussid ja miinused. Töö koostamiseks koguti infot internetis olevatest digitaalsetest raamatukogudest ja roboti tootjate kodulehtedelt. Kõrgepingeliinide liiniroboti tüübi valimisel tuleks kõige rohkem võtta arvesse roboti tehnoloogilise võimekuse ja hinna suhet. Töös pakutakse välja, missugust antud töös kirjeldatud robotit, oleks mõistlik Eesti elektrivõrgus kasutada keerulisemate mõõtmis- ja remonttööde teostamiseks ning missugust robotit lihtsamateks vaatlustöödeks.

*Märksõnad:* liinirobotid, LineScout, Linebot, UAV, Expliner, LineDrone, AApe-D, kõrgepingeliinid

## ABSTRACT

*Author:* Tõnis Teder

*Type of the work:* Bachelor's thesis

*Title:* Power Line Robots and Their Potential Applications

*Date:* 24.05.2019

39 pages

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisors of the thesis:* Early stage researcher Ivar Kiitam, Senior lecturer Paul Taklaja

*Abstract:*

The aim of this thesis is to provide a brief overview of the robots that are in development and have been developed in the world for the inspection, measurement and repairs of high voltage lines. The robots described in this thesis are: LineScout, Expliner, AApe-D, Linebot, corrosion detection robot, transmission line sleeve inspection robot, LineDrone and transmission line inspection UAV developed in China. This paper provides an overview of how these robots work and what for these robots can be used for. In this thesis the pros and cons of each robot are outlined. To compile the work, information was collected from digital libraries on the internet and from home pages of robot manufacturers. When selecting the type of line robot for high voltage lines, the relationship between the robot's technological capability and price should be taken into account. The work also proposes which robot described in this work would be most suitable for use in Estonia's electricity network for more complex measuring and repair works, and which robot for easier observation work.

*Keywords:* power line robots, LineScout, Linebot, UAV, Expliner, LineDrone, AApe-D, high-voltage power lines.

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Kõrgepingeliinirobotid ja nende kasutamisevõimalused</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Power Line Robots and Their Potential Applications</b>
Üliõpilane:	<b>Tõnis Teder, 155465</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>Bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Ivar Kiitam, Paul Taklaja</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>20.05.2020</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>20.05.2019</b>

/allkirjastatud digitaalselt/

Üliõpilane (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Antud teema on instituudi poolt välja pakutud. See teema on valitud selleks, et uurida maailmas kasutatavaid roboteid, mida saab kasutada kõrgepingeliinide ülevaatuseks, mõõtmis- ja remonttöödeks jms nii, et kõrgepingeliini poleks vaja tööde ajaks välja lülitada. Seda teemat oleks vaja uurida, kuna liinirobotid suurendavad ohutust kõrgepingeliinidega töötamisel, sest siis ei pea töölised otseselt juhtmetega ise kokku puutuma. Tänu liinirobotitega tehtud mõõtmistöödele on võimalik ka vähendada liinide hoolduskulusid ning pikendada liinide eluiga, kuna liinirobotitega tehtud mõõtmis- ja ülevaatustööd aitavad leida liinide kahjustada saanud kohti. Eestis pole liinirobotite rakendamisevõimalusi teadaolevalt veel uuritud.

## 2. Töö eesmärk

Antud töö eesmärgiks on uurida maailmas kasutatavaid liiniroboteid, mida saab kasutada kõrgepingeliinide ülevaatuseks, mõõtmis- ja remonttöödeks jms nii, et kõrgepingeliini poleks vaja tööde ajaks välja lülitada.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Milliseid liiniroboteid on mujal maailmas kasutusel kõrgepingeliinide ülevaatuseks, mõõtmis- ja remonttöödeks?
2. Millised on liinirobotite rakendamise võimalused?
3. Milliseid liiniroboteid võiks tulevikus Eesti tingimustes kasutusele võtta?
4. Millised on liinirobotite kasutamise positiivsed ja negatiivsed küljed?

#### **4. Lähteandmed**

Eesmärkide lahendamiseks on plaanis kasutada andmeid, mis leiduvad interneti vahendusel teadusartiklites ja erialastes ajakirjaartiklites.

#### **5. Uurimismeetodid**

Töö tulemusteni jõudmiseks on plaanis kasutada ja analüüsida internetist ja erinevatest andmebaasidest nagu näiteks IEEEExplorest ja ScienceDirectist leitud kirjandust.

#### **6. Töö struktuur**

1. BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE
2. EESSÕNA
3. SISSEJUHATUS
4. LÜHENDID
5. PÕHIOSA
  - 5.1. LIINIROBOTITE TÜÜBID
  - 5.2. LIINIROBOTITE KARAKTERISTIKUD
  - 5.3. LIINIROBOTITE KASUTAMISVÕIMALUSED
  - 5.4. LIINIROBOTITE KASUTAMISE POSITIIVSED JA NEGATIIVSED KÜLJED
6. KOKKUVÕTE
7. SUMMARY
8. KIRJANDUSE LOETELU

#### **7. Kasutatud kirjanduse allikad**

ScienceDirect, Electricity Today, Emerald Insight, Semantic Scholar, IEEE Xplore

#### **8. Töö etapid ja ajakava**

1. Kirjanduse läbitöötamine (30.04.2019)
2. lähteandmete kogumine (30.04.2019)
3. teoreetilise osa kirjutamine (10.05.2019)
4. järelduste kirjutamine (10.05.2019)
5. kokkuvõtte koostamine (10.05.2019)
6. töö esimene versioon valmis (10.05.2019)
7. juhendajale läbilugemiseks saatmine (12.05.2019)
8. töö lõplik versioon valmis (17.05.2019)

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT .....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1. LIINIROBOTID.....	10
1.1 Probleemid kõrgepingeliinidega .....	10
1.2 Robotite funktsionaalsus .....	11
1.3 Liinirobotite tüübid .....	12
1.3.1 LineScout.....	12
1.3.2 Expliner.....	16
1.3.3 AApe-D .....	20
1.3.4 Linebot.....	21
1.3.5 Korrosiooni avastamise robot .....	23
1.3.6 Jätkumuhvide kontrollrobot.....	27
1.3.7 LineDrone .....	29
1.3.8 Hiina kõrgepingeliinide kontrollimise UAV .....	31
1.4 Robotite võrdlus.....	33
KOKKUVÕTE .....	35
SUMMARY .....	36
KASUTATUD KIRJANDUS .....	38

## EESSÕNA

Antud lõputöö teema on välja pakutud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi nooremteaduri Ivar Kiitami ja vanemlektori Paul Taklaja poolt. Ma valisin selle teema, kuna ma polnud liinirobotitest varem midagi kuulnud ning antud teema tundus huvitav. Töö koostamiseks koguti põhiliselt andmeid internetist. Peamiseks info otsimise andmebaasiks oli IEEE Xplore.

Sooviksin tänada kõiki töö koostamisel otseselt ja kaudselt abiks olnud inimesi!



## SISSEJUHATUS

Tänapäeva ühiskond sõltub üha enam töökindlast energiasüsteemist. Kuna elektrikatkestused põhjustavad tootjatele, turustajatele ja ka elektrienergia tarbijatele olulisi rahalisi kahjusid, on nende ühine huvi vähendada tõrkeid elektriliinide töös. Defektide varajaseks avastamiseks ja hooldustööde ajastamiseks on vaja elektriliine regulaarselt kontrollida. Liinide kontrollimine toimub tavaliselt käsitsi, kas otse liinidel või visuaalselt maapinnalt vaadates, mujal maailmas ka helikopterite abil. Selleks, et liine käsitsi kontrollida, tuleb nad enamasti välja lülitada. Kõik need eelpool nimetatud kontrollimismeetodid on kulukad, aeganõudvad ja ohtlikud. Jalgsi teostavad ülevaatus tavaliselt kaks inimest, kes käivad mastist mastini ja kontrollivad elektriliini. Visuaalne kontroll viiakse läbi binokli ja mõnikord infrapuna ja koroona tuvastamise kaamerate abil. Selline kontrollimismeetod võib olla täpne, kuid ainult elektriliini komponentide pindade puhul, mida on võimalik maapinnalt hästi näha. Visuaalne kontroll on jällegi aeglane, monotoonne ja vähe-informatiivne, nii et mõnikord võivad isegi suuremad defektid märkamata jääda. Viimasel ajal on üha enam tehtud uuringuid kontrollimisprotsessi automatiseerimiseks ja mobiilse roboti väljaarendamiseks, mis võiksid ületada eespool nimetatud puudused. Robotid võiksid muuta kontrollitoiminguid kiiremaks, odavamaks ja usaldusväärsemaks, parandades seeläbi elektrivõrgu toimimise pikaajalist stabiilsust ja töökindlust. Kõige tähtsam on, et liinirobotid aitaksid suurendada töötajate ohutust.

Antud lõputöö eesmärgiks on anda ülevaade maailmas arendamises olevatest ja välja arendatud kõrgepingeliinide ülevaatuses, mõõtmis- ja remonttöödeks kasutatavatest robotitest. Lõputöö annab ka ülevaate, milliseid töid on võimalik nende robotitega teha. Eestis pole varem liinirobotite rakendamise võimalusi uuritud. Lõputöö koostamiseks on kasutatud internetis leiduvatest andmebaasidest saadud artikleid liinirobotitest ning roboti tootjate kodulehtedelt saadud infot. Töös pakutakse ka välja, millist liinirobotit on Eesti kõrgepingeliinidel keeruliste mõõtmis- ning hooldustööde jaoks kõige optimaalsem kasutada.

# 1. LIINIROBOTID

## 1.1 Probleemid kõrgepingeliinidega

Kõrgepingeliini ümbrus on ohtlik keskkond. Faaside vahelised elektrilised potentsiaalide erinevused võivad olla suurusjärgus 100 kV, tekitades elektrivälja tugevuseks liinide läheduses normaalsetes tingimustes 15 kV/cm kohta ja veelgi enam defektide korral. Juhtmete ümber tekkinud magnetvälja tugevus on väga suur, tänu vooludele, mis on suurusjärgus 1000 A, võivad juhi pinnal oleva magnetvälja induksiooni väärtused ulatuda kuni 10 mT. Kõrgepingeliinide ümbrus on ka keeruline keskkond, milles robotitel on raske liikuda. Lihtsamatel elektriliinidel on üks elektrijuhe ühe faasi kohta, kõrgema pingega liinidel võib olla neid isegi 6. Juhtmed kinnitatakse rippisolaatorite külge. Lisaks isolaatoritele võib liinidel olla ka teisi takistusi, nagu näiteks vibratsiooni summuteid, juhtmete vahekaugushoidikuid, jätkumuhve, õhusõidukite hoiatustulesid, klambreid ja linnupeleteid. [1]

Selleks, et robot saaks töötada pingestatunud liinidel, on kasutusele võetud mitmeid elektromagnetväljade mõju vähendavaid tegureid. Pingestatunud liinidel töötava roboti konstrueerimisel on oluline arvestada roboti kahe metallosa vahelise läbilöögi vältimist roboti tundlike osade ja juhtme vahel. See on oluline, sest tundlikesse elektroonilistesse seadmetesse jõudev elektrilahendus võib neid kahjustada. Lisaks tekitavad läbilöögid ka kõrgsageduslikke elektromagnetlaineid, mis võivad häirida elektroonilisi lülitusi. Roboti kahe metallosa vaheliste läbilöögid vältimine on suhteliselt lihtne ja seda on võimalik saavutada, ühendades kõik metallosad roboti metallkarkassiga, nii et ei tekiks potentsiaalide erinevusi. Roboti ja juhtme vahel tekkinud läbilöögi vältimisel tuleb arvestada kahte olukorda. Esimene neist on siis, kui robot on juba juhtmele paigaldatud. Sellisel juhul puutub metallratas kokku juhiga ja robotiga. Teine olukord on siis, kui robot paigaldatakse või eemaldatakse juhtmelt. Sel juhul on läbilöögi esinemine vältimatu, kuid see peab piirduma roboti osadega, mis ei saa läbilöögi tõttu kahjustada. [2]

Elektriliinide rikked esinevad tavaliselt juhtmetel või isolaatoritel. Tuule vibratsioon põhjustab järkjärgult juhtide mehaaniliste kahjustuste tekkimist. Juhtme traadid purunevad, juhtme elektrijuhtivus väheneb ning juhe kuumeneb üle. Teised olulised juhete kahjustavad tegurid on koronaefekt ja korrosioon. Juhtme südamik korrodeerub saastatud keskkonna ja veega kokkupuutumisel. Isolaatorid võivad kahjustada saada mehaanilise vigastuse, ilmastikutingimuste ja korrosiooni tõttu. Kõrgepingeliinide kontrollimise ajal on vaja kontrollida ka liinide ümber olevat taimestikku, liini osade seisukorda ning juhtide ja muude esemete vahelisi vahekaugusi. [1]

## 1.2 Robotite funktsionaalsus

Roboti disain määrab tema funktsionaalsuse. Helikopteriga kontrollimisel sõidetakse kopteriga mööda kõrgepingeliini ja kaamera operaator peab jälgima ja filmima liine tavalise, infrapuna- ja ultraviolettkameraga. Seejärel vaadatakse videomaterjal hoolikalt kohapeal läbi. See on väga kiire kontrollimismeetod, kuid kaamera operaatorile tüütu ning helikopteri suure lennukiiruse tõttu üsna ebatäpne. Seetõttu on liiniroboti automaatikasüsteemi arendamisel pandud rõhk automaatsele elektriliini jälgimisele, automaatsele visuaalsele kontrollile ja elektriliini vahekauguse automaatsele mõõtmisele. Teine probleem, mis tuleb nende süsteemide jaoks lahendada, on ka kvaliteetsete piltide tegemine, mis on väga oluline visuaalse elektriliini jälgimise ja visuaalse kontrolli jaoks. [3]

Sarnased probleemid tuleb lahendada ka arendades välja mehitamata õhusõidukit (UAV) elektriliini kontrollimiseks. Kõige enam kasutatakse vaatluste teostamiseks väikest helikopterit, sest tal on võime kohapeal lennata. UAV peab olema võimeline iseseisvalt mööda kõrgepingeliini liikuma, leidma ja dokumenteerima vigu. Samuti peab see olema võimalikult energiasäästlik ning suutma lennata pikki vahemaid. Selle lähenemisviisiga seotud probleemid on sarnased helikopteri abil teostatava kontrolli probleemidega, kuid veelgi nõudlikumad. Põhiküsimused on positsioonikontroll, automaatne elektriliini jälgimine, takistuste vältimine, kommunikatsioon, piltide tegemine, automaatne rikke tuvastamine ja elektriliini vahekauguste mõõtmine. [1]

Alternatiivne kõrgepingeliinide kontrollimismeetod on ronimisroboti kasutamine. Robot ripub juhtme küljes ja liigub mööda juhet ning peab ületama juhtme küljes olevaid takistusi. Selline liikumisviis nõuab keerulisi mehhanisme. Robotite funktsionaalsus peaks hõlmama iseseisvat liikumist mööda elektrijuhti, automaatset visuaalset kontrolli ja vähemalt poolautonoomset takistuste ületamist. Selle lähenemisviisiga seotud peamised arendamist vajavad osad on seega roboti mehhanismi projekteerimine ja konstrueerimine, juhtme haardesüsteem, maapealne juhtimissüsteem, juhtmetel takistuste avastamine ja tuvastamine, roboti juhtimissüsteem, side, visuaalne kontroll, toide ja elektromagnetiline varjestatus. [1]

Liinirobot võib olla ka selline, et tal on nii ronimisroboti omadused kui ka võime ise lennata. See robot suudaks lennata üle takistuste ja spetsiaalse liikumismehhanismi abil sõita mööda juhet. Liinide kontrollimistööde ajal sõidaks robot mööda juhet kuni takistuseni, siis lendaks robot üle takistuse, maanduks teisele poole ja jätkaks sõitu mööda juhet. Juhtmel sõitmine oleks automatiseeritud, samal ajal kui takistuste ületamine peaks tõenäoliselt toimuma manuaalselt. Mõned probleemid, mida tuleb lahendada, on sarnased kahes eelmises osas kirjeldatud

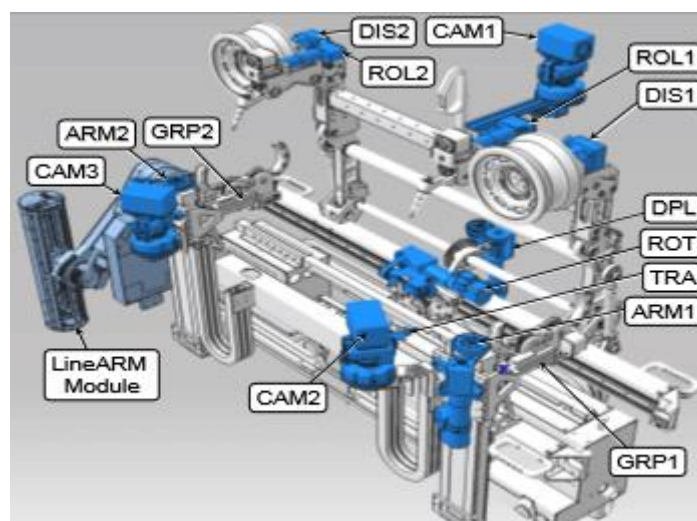
probleemidega. Näiteks roboti toitesüsteem, takistuste avastamine ja tuvastamine ning juhtmel sõitmise mehhanismi väljaarendamine. [1]

## 1.3 Liinirobotite tüübid

### 1.3.1 LineScout

Alates 1998. aastast on Kanadas Hydro-Quebeci uurimisinstituudis aktiivselt tegeletud kõrgepingeliinide hooldusrobotite väljaarendamisega. Alustades lihtsast kaugjuhitavast mootoriseeritud kasti laadsest kärust on projektist välja arenenud kaugjuhitav robot nimega LineScout, mis on olnud kasutusel alates 2006. aastast. Seda on tööle rakendatud Hydro-Quebec TransEnergie võrgu ülekandeliinides. Esiolgu teostati lihtsaid visuaalse kontrollimise ülesandeid. Sellised ülesanded nõudsid vähe kaameraid ja olid väga väärtuslikud liinikomponentide seisundi kohta teabe kogumisel. LineScouti projekti alguses oli eesmärgiks välja töötada robot, mis oleks võimeline töötama äärmuslikes keskkondades ja karmides tingimustes. Tehnoloogia pidi olema ohutu ja usaldusväärne, kuna see pidi töötama Kanada strateegiliselt väga tähtsas elektrivõrgus. LineScout pidi olema kaugjuhitav, mida saaks lõpuks areneda täisautonoomseks sõidukiks. [4]

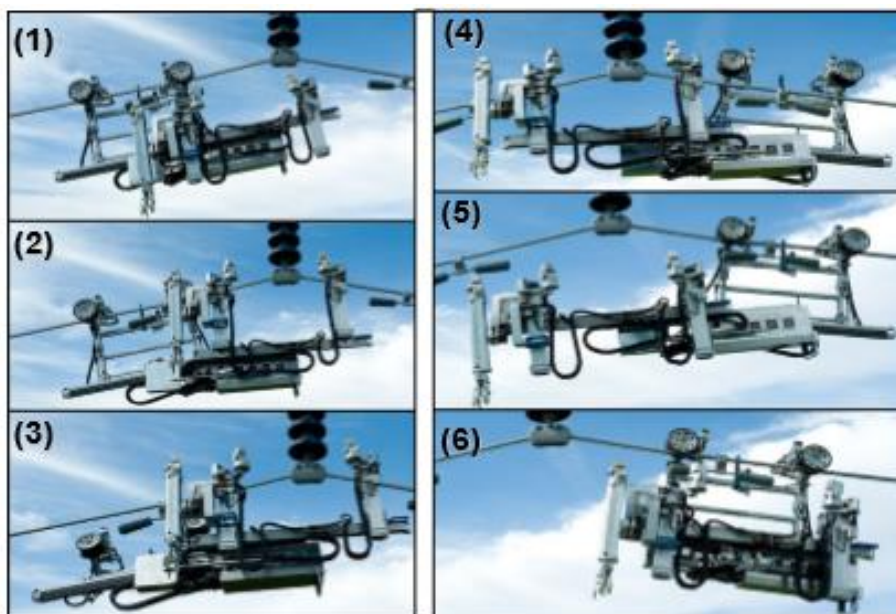
LineScouti liikuv platvorm töötati välja kahe rattalise sõidukina, et optimeerida energiakasutust, kui ta liigub mööda takistustevaba kõrgepingeliini osa. Joonisel 1.1. on kujutatud LineScouti robot, millel on kaks harjadeta alalisvoolumootorit, märgistatud tähistega DIS1 ja DIS2, nad on mõeldud LineScouti liikumiseks. Rataste kõrvale paigaldatakse paar kaitserulli, mille panevad tööle alalisvoolumootorid ROL1 ja ROL2, nende ülesanne on hoida robotit kindlalt juhtme küljes, kui see peatub takistuse juures. [4]



Joonis 1.1. Linescouti roboti mootorid, kaamerad ja moodulid [4]

Joonisel 1.1. on näha ka kolme programmeeritavat kaamerat, mis annavad operaatorile visuaalset tagasisidet. Esimene kaamera (CAM1) on paigaldatud ratta raamile, samas kui teine (CAM2) ja kolmas kaamera (CAM3) on roboti käe raamil. LineARM käe moodul ei pea takistusi ületama. Siiski, kui LineScout on varustatud selle mooduliga, võimaldab see kasutada ka neljandat kaamerat ja erinevaid tööriista mooduleid. [4]

Robotite struktuur, mis võimaldab takistuste ületamist, ehitatakse kolme sõltumatu raami ümber, nad libisevad ja pöörlevad üksteise suhtes: rattad on kinnitatud ratta raamile, käe moodul toetab kahte haaratsit, mis klammerduvad juhtme külge mõlemale poole takistust. Roboti keskmine raam ühendab kahte äärmist raami. Viimane toetab ka suurt osa roboti kaalust, kaasa arvatud akut ja elektroonika kilpi ning kahte alalisvoolumootorit ROT ja TRA, mida kasutatakse raami liigutamiseks. TRA on varustatud elektromagnetilise piduriga, nagu ka ARM1 ja ARM2, mis liigutavad haaratseid GRP1 ja GRP2 ning kontrollivad haaratsite avanemist ja sulgemist. Lõpuks käitab DC-mootor DPL mehhanismi, mis langetab ratta raami ülemist osa. Nende süsteemide kasutamist on näidatud joonisel 1.2. millel on kujutatud riputusklambri ületamist. [4]



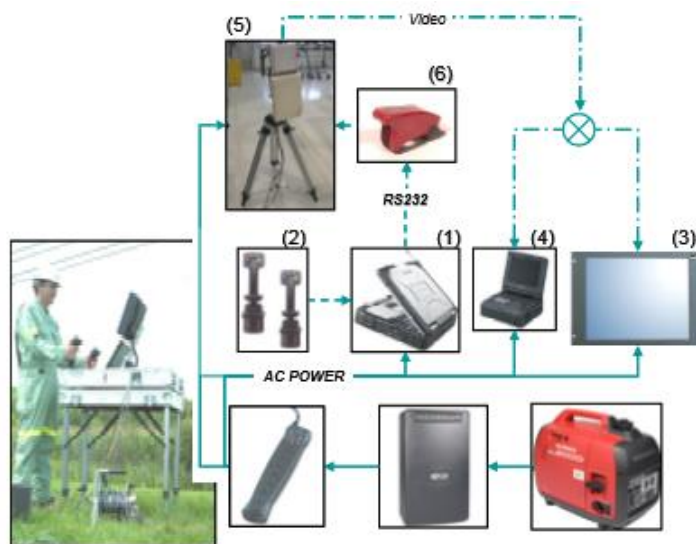
Joonis 1.2. Takistuste ületamine 1) LineScout viib käe mooduli takistuse alt läbi. 2) Haaratsid tõusevad ja haaravad juhtmest kinni. 3) juhtme peal olevad rullikud vabastatakse; rattaid tõstetakse kergelt ja seejärel langetatakse liigutamismehhanismi abil. 4) ülekandmine ja pöördlemine toimub vastupidises suunas. Liikumismehhanism tõstab rattad. 5) Rattad tõstetakse tagasi elektri juhtmele ja rullikud kinnitatakse. Haaratsid avatakse ja haaratsid langetatakse. 6) Käe raam naaseb oma algasendisse ja rullikud avanevad, nii et LineScout saab oma marsruuti jätkata [4]

LineScouti kommunikatsiooniskeem põhineb kahel peamisel süsteemil: robotisse paigaldatud elektroonika ja operaatori kasutatav maapealne juhtimisseade. Roboti energiaallikaks on 51,8 V liitiumaku, millelt saadavat toidet saab pealülitist sisse ja välja lülitada. See pingetase annab

otseselt toite harjadeta mootorile. Kolmes väljundis on erinevaid pinged, mida toodavad DC / DC muundurid: 48 V alalisvoolumootoritele, 12 V juhtimisseadmetele ja 24 V anduritele. [4]

LineScouti aku kestab ligikaudu 5 tundi. Maksimaalne pingetase juhtmes, millel robot võib sõita on 735 kV ning maksimaalne juhete läbiv elektrivool võib olla 1000 A. Juhtme temperatuur ei tohi olla kõrgem kui 95°C. LineScout liikumiskiirus juhtmel on 1 m/s ja maksimaalne juhtme kaldenurk, millel ta on võimeline sõitma, on 30°. Robot suudab sõita juhtmetel, mille läbimõõt on suurem kui 12 mm ja väiksem kui 60 mm. [5]

Maapealne juhtimisseade koosneb vastupidavatest komponentidest, mida on võimalik mahutada kokkupakitavasse kohvrisse, nagu on näidatud joonisel 1.3. See võimaldab LineScouti mugavalt transportida ning on heaks lahenduseks välitööde tegemisel. [4]



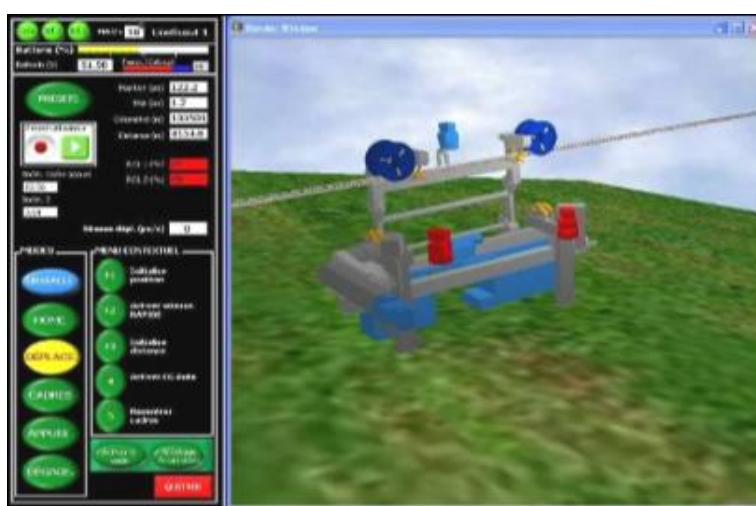
Joonis 1.3. LineScouti maapealne juhtimisseade [4]

Süsteemi keskmeks on puutetundlik mobiilne arvuti, mis töötab Windows XP-s LabVIEW tarkvaral. Sisendina on kasutusel kaks 3-teljelist juhtkangi. Parem juhtkang on mõeldud LineScouti liikumise juhtimiseks ning vasak juhtkang on mõeldud kaamerate juhtimiseks. Video signaalid suunatakse LineScoutist juhtimisseadme videomonitorile videovastuvõtja kaudu ja neid saab arhiveerida MiniDV salvesti abil. Andmesignaale suunatakse LineScoutist juhtimisseadme arvutisse raadiolainetega andmeedastaja kaudu. Hädaseiskamislüliti katkestab andmeside. Kuna LineScouti on võimalik juhtida nelja kilomeetri kauguselt, peab operaator toetuma video tagasisidele. Operaatoril on võimalik valida ükskõik millise kaamera vahel, mis on paigaldatud roboti mõlemale küljele. [4]

Võttes arvesse roboti liigutatavate osade arvu ja LineScoutilt saadud andmete hulka (kodeerijad, peatused, olek jne), võeti kasutusele töö opereerimise (MOS) kontseptsioon, et minimeerida

operaatori töökoormust ja veariski. MOS lubab operaatoril juhtida ainult konkreetseid roboti osi, mis on teostatava tegevusega seotud. Parema juhtkangi teljed on vastavuses mootori või mootoripaariga nii, et LineScouti juhtimine tundub juhile loomulik, tagades sujuvama liikumise. [4]

Nagu on näidatud joonisel 1.4. on peamine graafiline kasutajaliides jagatud kaheks tsooniks: Juhtimisaken (vasakul) ja virtuaalne LineScouti mudel, mida uuendatakse reaajas (paremal). Juhtimisaken on peamine kasutajaliides ja see on kujundatud nii, et puutekraaniga oleks mugav tööd teha. Kuna operaator saab peamise visuaalse tagasiside kaamerate abil, mängib virtuaalse mudeli aken olulist rolli alternatiivse ülevaate pakkumisel. LabVIEW Open GL pakett võimaldab 3D CAD (*computer-aided design*) mudelite laadimist, kuvamist ja animeerimist. Iga mudel laetakse ja pannakse kokku reaajas andurite saadud näitude põhjal kui ka kaldemõõturite ja kaldenurkade näitude järgi. Aktiivsed kaamerad on esile tõstetud punase värviga. [4]



Joonis 1.4. LineScouti graafiline kasutajaliides [4]

Äikeselöögid kõrgepingeliinidesse põhjustavad tihti juhtmete traatide katkemist. Töölised saavad kasutada LineScouti, et teostada parandustöid. LineScouti väljasaatmisega enne remonditööga alustamist on võimalik visuaalselt kontrollida kahjustatud ala ja hinnata ülejäänud juhtme tugevust. Võimalik on teha ka kvaliteetseid pilte remonditöö optimaalseks planeerimiseks. Lahtised traadid hargnevad tihti lahti ja lähenevad teistele komponentidele. See võib omakorda tekitada elektrikaare vähese pingestatud osade vahekauguse tõttu. Kui LineScout jõuab kahjustatud alasse, võetakse kasutusse LineArm moodul. Sellel mehhanismil on vaskklamber, mis on spetsiaalselt ette nähtud erinevate juhtme läbimõõtude jaoks. Klamber kinnitatakse katkiste traatide ümber, et vältida traatide edasist hargnemist. [6]

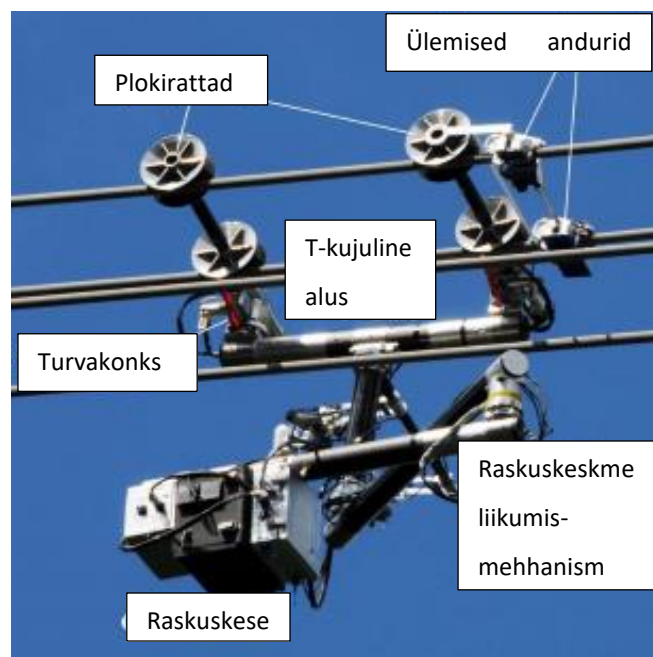
Hydro-Quebeci uurimisinstituudis välja töötatud LineScout liinirobot on üks robotika valdkonna juhtivaid tehnoloogiaid, kuna seda on edukalt kõrgepingeliinidel rakendatud liinide kontrollimiseks

ja hooldamiseks. Töolistelt saadud tagasiside abil arendatakse robotit pidevalt edasi lisades erinevaid andureid ja paremaid kaameraid. [6]

### 1.3.2 Expliner

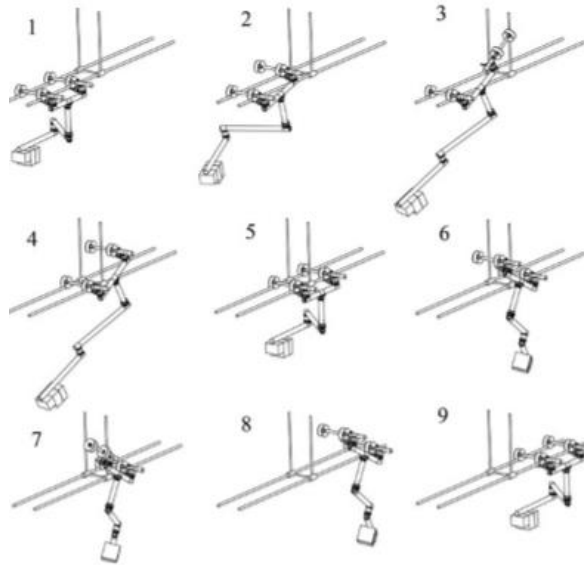
Jaapanis on HiBot nimelise firma poolt välja arendatud Explineri nimeline liinirobot. Expliner töötati välja peamiselt selleks, et kontrollida kõrgepingejuhtmeid. See on võimeline teostama üksikasjalikku ülevaatusi kuni neljas lõhisfaasis (ühtse rühmana kimbus) ja tal on piisavalt mobiilsust, et ületada suuri takistusi, mida enamik eelmisi masinaid pole suutnud ületada. Expliner kaalub 95 kg ja suudab juhtmetel liikuda kiirusega 1,7 km/h. [7]

Expliner kasutab ülekandeliinidel liikumiseks plokirattaid, sellel on süsinikkiust struktuur ja T-kujuline alus (joonis 1.5.). Liigutades oma massikeskme asukohta, kontrollib Expliner aktiivselt oma asendit ja ületab takistused. Nagu on kujutatud joonisel 1.6. ületades riputusklambrit, liigutab Expliner esialgu oma raskuskeskme roboti tagaotsa, tõstes seega esirattad. Seejärel pööratakse eesmised plokirattad väljapoole ja Expliner võib liikuda edasi, kuni esirattad on takistuse ületanud. Seejärel pööratakse need tagasi ja raskuskeskme tuuakse tagasi roboti keskmesse. Sel hetkel on esimesed plokirattad tagasi ülekandeliinidel. Sama protseduuri korratakse tagumiste plokirattastega, liigutades raskuskeskset ettepoole, kuni Expliner ületab riputusklambrit ja jätkab juhtmete kontrollimist. Seega võib Expliner jätkata juhtmete kontrollimist, ilma et kõrgepingemasti juures oleks vaja peatuda. [7]



Joonis 1.5. Expliner robot ja tema komponendid [7]





Joonis 1.6. Expliner robotiga takistuste ületamine [7]

Selleks, et avastada välgulöögi või mingi muu põhjuse tõttu purunenud traate on Explineril kaks kõrgtehnoloogilist kaamerat ja peegli komplekt. [7]

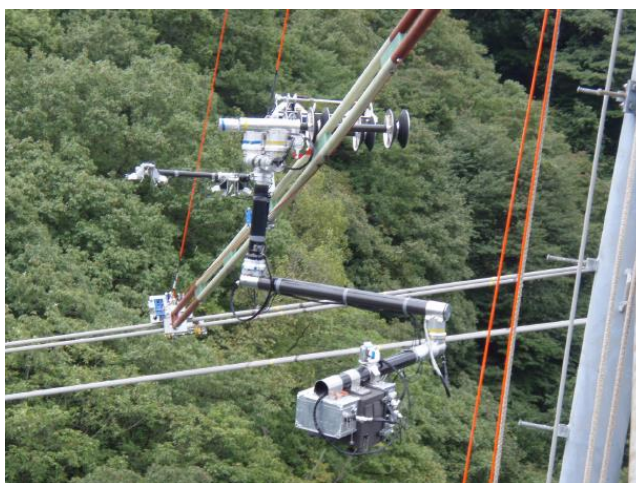
Juhtme terasest südamik hakkab korrodeeruma ilma väliste muutusteta, seega on väga raske korrosiooni avastada isegi suure korrosioonikahjustuse korral. Korrosiooni tagajärjel suureneb juhtme läbimõõt. Juhtme läbimõõdu mõõtmiseks kasutatavate laserandurite abil on võimalik tuvastada läbimõõdu muutused suurusjärgus 0,5 mm, mis on piisav sisemise korrosiooni avastamiseks. Laseranduritega mõõtmine põhineb laserkiirel ja vastuvõtjal, mille vahel on juhe. [7]

Mõlemad andurite tehnoloogiad on koondatud kompaktsesse andurikasti. Expliner kannab nelja sellist andurit, et kontrollida kuni nelja juhet üheaegselt. Andureid tuleb hoida juhtmetele võimalikult lähedal. Takistuste ületamisel tuleb andurid juhtme juurest ajutiselt eemaldada. See kujutab endast suurt väljakutset. Neid juhib üks liikumismehhanism, kuid pöörleb kahel erineval teljel: „T” -struktuuri vertikaalteljel ja süsinikkiust tugevdatud polümeeri teljel. Need kaks liigutust on vajalikud andurite liigutamiseks sisse- või väljapoole, samuti üles- või allapoole, et langeda täpselt juhtme peale. Andurite ühendamiseks või andurite eemaldamiseks on tehtavate liigutuste järjekord erinev. [7]

Lisaks võivad alumised juhtmed horisontaal- ja vertikaalsuunas eraldi liikuda. Seetõttu on anduriüksused ühendatud vastavatele kätele, mis lubavad mõningaid kõrvalekaldeid mõlemas suunas, hoides neid juhtmetega ühenduses. Ülemiste juhtmete andurid on ühendatud plokirataste völli külge ning neid juhitakse hoova mehhanismiga üles- või allapoole. Takistuste ületamisel tõstetakse andurid üles ja pärast takistuse ületamist lastakse tagasi alla juhtmetele. [7]

Explinerit juhitakse traadita süsteemi abil, kus robotil on kaks universaalset antenni ja üks juhtimisantenn. Juhtimisantenni leviala ulatus on vahemikus +/- 30 kraadi, nii et seda on võimalik käsitsi suunata roboti suunas. Operaator saab tagasisidet Explinerilt, kaasa arvatud liikumismehhanismide asukoha andmeid, sensori andmeid ja pardal olevate kaamerate abil saadud pilte. Juhtimisseadmes kuvatakse 3D mudel, mis lihtsustab operaatoril Explineri asendi hoomamist. Roboti edasi liikumiseks peab operaator saatma vaid ühe käsu. [7]

Selle asemel, et tõsta Explinerit ja asetada see otse pinge all olevale kõrgepingeliinile, mis nõuaks väga pikki isoleervardaid, et vähendada õnnetuse riski, tuleb hoopis töös olev liin mastiga ühendada nende vahele paigutatava elektrit mittejuhtiva toru (laadimistoru) abil. Toru üks ots on ankurdatud masti külge, teist otsa tuleb kergelt langetada kevlarist köiega, kuni see puudutab juhet. Seejärel kinnitatakse kinnitusseade tagamaks, et toru ei liiguks paigast. Explineri robot komplekteeritakse maapinnal ja tõstetakse seejärel teise kevlarist köiega laadimistoru peale. Köis ühendatakse lahti. Sellest hetkest alates on Expliner juhtme peal tasakaalus. Kui Expliner jõuab laadimistoru otsa, liigutatakse raskuskese tahapoole, et tõsta esirattad. Seejärel pööratakse mõlemaid plokirattad (ees ja taga) etteantud kalde alla, et rattad oleks juhtmetega kohakuti. Expliner liigub edasi, kuni eesmised rattad on ülekanделиinide kohal ja raskuskese viiakse tagasi roboti keskele. Kui eesmised plokirattad on juhtmetel, liigutatakse raskuskese edasi selleks, et tõsta tagumisi plokirattaid. Rattaid pööratakse uuesti ja Expliner liigub edasi, et teha ruumi tagumistele ratastele. Kui plokirattad on joondatud, liigutatakse raskuskese tagasi keskele, kõik neli plokirattast on juhtmetel ja Expliner on valmis oma tööd alustama. [7]



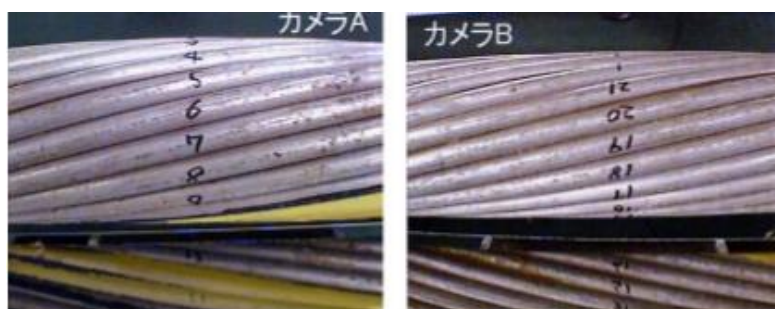
Joonis 1.7. Expliner liikumas laadimistorul [7]

Explineri käsitlemiseks vajalikud osad on tema raamistik, laadimistoru ja vintsimehhanism. Raamistik koosneb metalltorudest, mida kasutatakse Explineri toestamiseks kokku panemise ajal.

Seda on lihtne demonteerida ja transportida. Neid osi võib vedada väikeste veoautode või kaubikutega ning plokirataste, vintside ja laadimistorude paigaldamiseks kulub orienteeruvalt 2,5 tundi. [7]

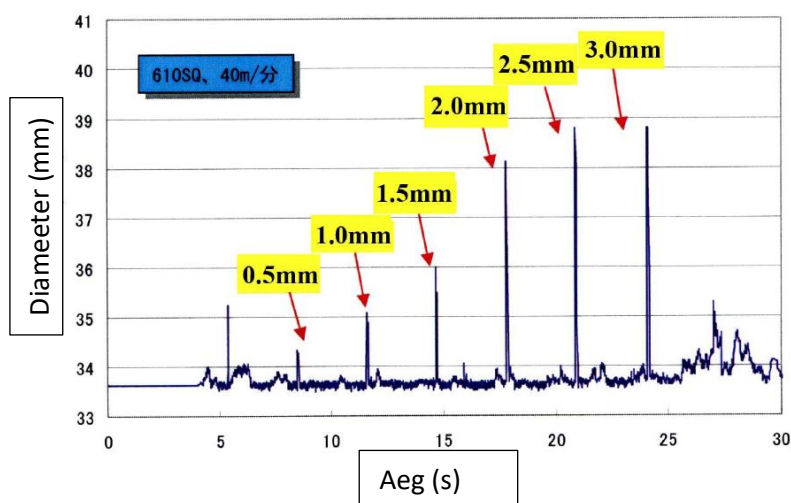
Explinerit on Jaapanis põhjalikult testitud kõrgepingeliinidel, mille pinge on kuni 500 kV. Teste on viidud läbi, et kontrollida Explineri mobiilsust, kaugjuhtimispuldi tööd, sensorisüsteemide toimimist ja täpsust. Roboti juhtimise meeskond peab välja töötama uue töörežiimi, sest see on esimene kord, kui sellist robotit Jaapanis kasutatakse pingestatud liinide kontrollimiseks. [7]

Andurid ja nendega ühendatud kaablid on korralikult varjestatud, et töötada kõrgepingeliinidel. Joonisel 1.8. kujutatud pildid on tehtud töötavatel 500 kV kõrgepingeliinidel. Joonisel 1.8. on kujutatud kaamerate abil kaablite visuaalseks kontrollimiseks saadud pilte. Piltidelt on näha kogu kaabli pinda, ilma pimedate tsoonideta. Pildid on tehtud ilma täiendava valgustuseta, mis tõestab, et looduslik valgus on piisav, et saada detailseid pilte isegi pilvistel päevadel. [7]



Joonis 1.8. Explineriga tehtud pildid kõrgepingeliini juhtmest [7]

Lasermõõtmiste testimiseks paigutati juhtmele kleebised, selleks et juhtmete läbimõõdu muutusi simuleerida. Testi tulemustes olid selgelt eristatavad ka 1 mm suurused juhtme läbimõõdu muutused. [7]



Joonis 1.9. Lasermõõtmise testi tulemused [7]

### 1.3.3 AApe-D

Hiina Teaduste Akadeemia poolt arendati välja robot nimega AApe-D. AApe-D koosneb mobiilsest platvormist ja spetsiaalsetest remondivahenditest, ta on kaugjuhitav robot, mis võib töötada kuni 500 kV pingega elektriliinidel. Spetsiaalse mehaanilise konstruktsiooniga robot võib sõita mööda juhet, ületada teatud takistused, nt. vibratsioonisummuteid ja jätkumuhve ning parandada äikese tõttu vigastada saanud juhtme traate. Hoolduse ajal pannakse robot kõigepealt kahjustatud juhtmele. Maapinnal oleva juhtseadme poolt kaugjuhitav robot läheneb kahjustusele, liikudes mööda juhet ja ületades takistusi. Vigastatud koha juures rakendab robot spetsiaalse hooldustööriista, et vigastatud traati algsesse asendisse tagasi viia ja seejärel kinnitab vigastatud kohale klambri, et vigastatud traat jälle lahti ei hargneks. [8]



Joonis 1.10. AApe-D testimine laboris [8]

AApe-D kasutab ratta-käe hübriidlahendust. Rattakonstruktsiooniga saab robot liikuda pidevalt mööda juhet ning ratta ja liini vaheline hõõrdumine ei kahjusta juhet. Passiivse osa juurde on paigaldatud vedru, mis viib roboti algsendisse peale takistuse ületamist. Kui ratas puutub juhtmel olevat takistust, põhjustab roboti ja takistuse kokkupuude passiivses osas mõningase deformatsiooni, vedrud salvestavad energiat ja roboti keskpunkti on võimalik lühikest vahemaad tõsta. Seejärel võib robot lõpetada takistuste ületamise ja vabastada vedrule salvestatud energia. Roboti käe külge paigaldatud passiivne liigend võib parandada energia tarbimise jaotust ja tagada, et takistuste ületamise ajal suletakse üks paar haaratsirattaid. Haaratsirattad tagavad roboti ohutuse ja suurendavad teatud määral ronimisvõimet. [8]

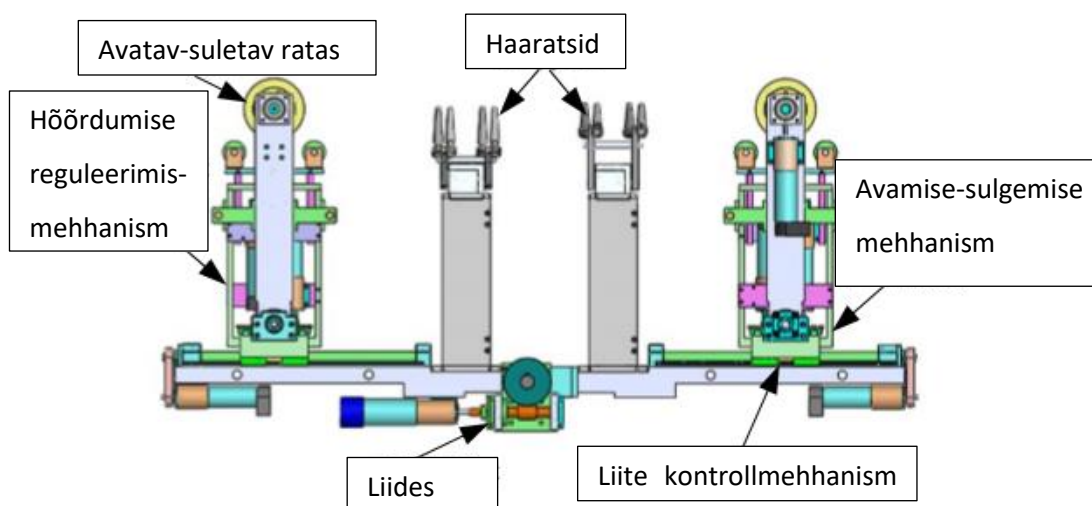
Vigastatud juhtme remonditööde teostamiseks on vaja kahte spetsiaalset tööriista, milleks on vastavalt silmuselaadne osa ja klammerdaja. Alguses viib AApe-D lahti hargnenud traadi tagasi algsesse asendisse silmuse laadse osa abil ja seejärel paigaldatakse juhtmele spetsiaalne klamber, et takistada purunenud traadil uuesti lahti hargnemist. Robotiga tehtava hooldustöö põhieesmärk on säilitada nii parandatud juhtme mehaaniline tugevus kui ka elektrijuhtivus nii, et kahjustatud

kohta ei oleks vaja käsitsi parandada. Töövahendite konstruktsioon eeldab remonditööde tegemist ilma keerulise mehaanilise struktuurita. [8]

AApe-D on laboris testitud. Saadud tulemuste põhjal võib öelda, et AApe-D juhitavus on rahuldav, kuid silmuse mehhanism vajab veel täiendamist. Pildi - ja juhtimiskäsu edastamine roboti ja maapealse juhtimisjaama vahel on usaldusväärne. Arendamist vajab hooldustööriistade disain, autonoomne takistuste identifitseerimine ning roboti autonoomne juhtimissüsteem. [8]

### 1.3.4 Linebot

Hiinas arendati 2015. aastal välja mobiilne liinirobot Linebot, mis suudab kanda mõõteseadmeid ja ületada liinidel olevad takistused. Lineboti üldine konstruktsioon on näidatud joonisel 1.11. Robot koosneb viiest erinevat tüüpi komponendist ja kokku on 9 komponenti, milleks on vastavalt kaks avatavat-suletavat ratast, kaks haaratsit, kaks hõõrdemehhanismi, üks keskmine liides ja kaheosaline juhtimismehhanismi. Roboti keha koosneb kaheseksioonilisest süsteemist, mis ühendatakse liitega roboti keskel. [9]



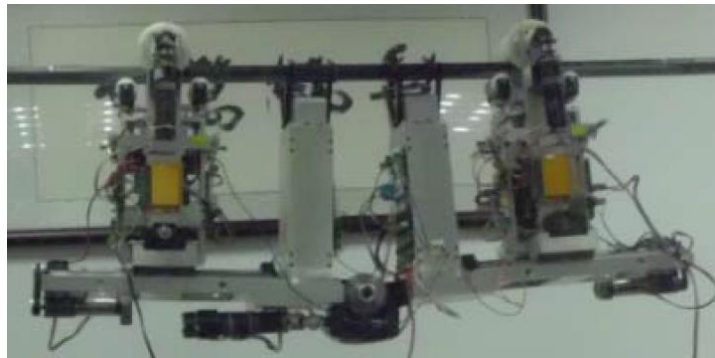
Joonis 1.11. Lineboti konstruktsioon [9]

Iga seksioon koosneb neljast komponendist. Roboti rattad on jagatud kaheks pooleks, mida saab omavahel kokku panna. Avatav-suletav ratas võimaldab robotil liikuda mööda juhet edasi ja tagasi ning seda on võimalik liigutada ka piki roboti keha juhtimismehhanismi abil. Sektsiooni teises otsas kasutatakse uutset haaratsit, mida kasutatakse roboti juhtme küljes hoidmiseks. Hõõrdumise reguleerimismehhanismi kasutatakse selleks, et parandada juhtmel ronimise võimekust. Roboti keskpunktis paiknevat liidest kasutatakse roboti tööulatuse laiendamiseks. [9]

Avatavad ja sulgetavad rattad on roboti põhikomponendid, nad koosnevad ajamikambrist, avamise-sulgemise elemendist ja hõõrdumise reguleerimiselemendist. Ajami akut kasutatakse roboti liigutamiseks. Teine oluline roboti komponent on haarats, mida kasutatakse roboti

manööverdamisvõime parandamiseks. Haaratsi abil võib robot ületada takistusi pidevalt ja liikuda vihmaussi sarnaselt. Vihmaussi sarnane liikumine tähendab, et kõigepealt laseb eesmine haarats end juhtme küljest lahti, seejärel liigub roboti eesmine osa edasi ning peale liikumise lõpetamist võtab eesmine haarats juhtmest taas kinni, siis laseb tagumine haarats end juhtme küljest lahti ja roboti tagaosaga liigub edasi, peale liikumise lõpetamist haarab tagumine haarats jälle juhtmest kinni. Selline liikumine mitte ainult ei toeta roboti massi, vaid aitab ka vähendada haaratsi ja juhtme vahelist hõõrdumist. Seda on võimalik avada või sulgeda paari hammasratta abil, mille energiaallikaks on alalisvoolumootor. Igal haaratsil on kuullaagrid, nii et juhtmega kokkupuutes olevad vardad võivad veereda, see aitab vähendada hõõrdumist haaratsite ja juhtme vahel ning vältida juhtme kahjustamist. Veelgi enam, hädapidurdusseadmeid saab kasutada, et haarata kinni juhtmest, kui haarats on täielikult suletud. Sel moel ei ole robotil võimalik mööda juhet libiseda. [9]

Linebotist on tehtud kaks prototüüpi. Robotite mehhaanilised osad on tehtud alumiiniumist ning seetõttu kaaluvad prototüübid alla 50 kg. Maksimaalne ronimisnurk on robotitel 10 kraadi. Esimese prototüübi liikumiskiirus on 0,5 m/s ja teise prototüübi liikumiskiirus on 0,8 m/s. [9]



Joonis 1.12. Lineboti esimene prototüüp [9]



Joonis 1.13. Lineboti teine prototüüp [9]

Lineboti juhtimissüsteem koosneb maapealsest juhtimissüsteemist ja roboti sisestest juhtimissüsteemidest. Maapealses juhtimissüsteemis on arvuti, pilloothoob ja videomoodul.

Piloothooba saab kasutada Lineboti lihtsamaks juhtimiseks. Lineboti asendi kohta saadakse infot kaamerate ja andurite abil. Pardal asuvates juhtimissüsteemides on ka seadmed roboti monitoorimiseks. [9]

Roboti jõudluse kontrollimiseks viidi läbi mitu katset. Selleks, et uurida Lineboti liikumismehhanismi, juhiti Linebot üle erinevatele v+ahemaadele paigutatud takistuste. Haaratsid avati ja liigutati ettepoole, et ületada takistust, samal ajal kui rattad olid kindlalt juhtmel. Seejärel kinnitati haaratsid juhtme külge ja rattakomplektid avati, seejärel sõideti robotiga edasi. Sellisel alternatiivsel viisil on Lineboti manööverdamisvõime oluliselt paranenud. Linebot'i testimiseks viidi vihmaussi sarnane liikumine läbi väliskeskkonnas. Katse ajal avati ja suleti haaratsid ja rattad vastavalt, kui oli kokkupuude takistusega. Katse tulemused näitasid, et Lineboti saab kasutada takistuse ületamiseks sellisel vihmaussi taolisel liikumisel. Katse tulemustest oli näha, et robot liigub hästi liinidel, mille kaldenurk on alla 10 °. Linebotiga tehtud testide tulemustest võib öelda, et roboti mobiilsust on veel vaja arendada. Tema külge on töötoiminguteks võimalik kinnitada erinevaid mõõteseadmeid. [9]

### **1.3.5 Korrosiooni avastamise robot**

Õhuliinidele paigaldatakse tavaliselt terasalumiiniumjuhtmed. Sisemine terastross tagab soovitud mehaanilise tugevuse ja välised alumiiniumtraadid juhivad voolu. Üheks oluliseks teguriks, mis piirab nende juhtmete kasutamisega, on sisemine korrosioon, mis saab alguse terasest südamikuga katteks oleva tsingikihi kadumise tõttu. Kui see kiht kaob, kulgeb korrosiooniprotsess alumiiniumist traatide ja terasest südamiku vahel kiiresti, kahjustades juhtme terviklikkust. Kuna see korrosioon toimub juhtme sees, ei ole seda võimalik visuaalselt või infrapunakaamerate abil tuvastada, välja arvatud juhul, kui korrosioon on nii suur, et juhtme paisumine on märgatav, kuid selles etapis võib juhtme rike kohe toimuda. [2]

Brasiilia riikliku elektrienergiaameti ja Brasiilia riikliku teadus- ja tehnoloogiaarengu nõukogu poolt on välja arendatud robot just korrosiooni avastamiseks. Roboti üheks oluliseks tunnuseks on selle sadulataoline konstruktsioon, mis hõlbustab selle paigaldamist juhtmele. V-kujuline soon roboti põhjas juhib roboti soovitud asendisse. Paigaldamiseks tõstetakse robot üles tema keskel olevast konksust ja juhatakse ühe külje peal oleva konksu abil juhtmeni. Kui robot lahti lastakse, siis selle andur kinnitub automaatselt juhtme ümber. Need omadused võimaldavad robotit paigaldada pingestatud juhtmele, kasutades selleks paari isoleervarrast. [2]



Joonis 1.14. Korrosioon avastamise robot [2]

Roboti etteotsa ja taha on paigaldatud kaks kaamerat, nii et inspekteerimise ajal on näha otseülekannet juhtmest. See võimaldab visuaalselt kontrollida juhtme pinda ja identifitseerida vigastatud osi. Kaamerad aitavad ka operaatoril robotit juhtida. Esi- ja tagaotsas on ka seadmed takistuste avastamiseks, mis automaatselt peatavad roboti. Roboti ülaosas on universaalne raadioantenn, mida kasutatakse roboti juhtimiseks ja kontrolliandmete edastamiseks. Raadio töötab sagedusega 2,4 GHz ja roboti tegevusraadius on 1 km. Kui raadioside katkeb, peatab robot oma liikumise kuni ühenduse taastumiseni. Andurite näidud edastatakse pidevalt koos roboti asendi infoga. Kui salvestuskäsk on sisse lülitatud, salvestatakse iga asukohta ja mõõteandmete paar juhtarvutisse, genereerides juhtmele andmefaili. [2]

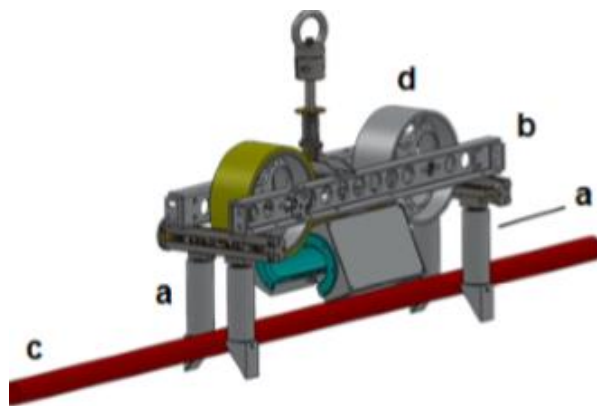
Anduri ava läbimõõt on 40 mm, mis tähendab, et robot ei saa ületada takistusi, mis on sellest suuremad. Seetõttu ei suuda robot ületada jätkumuhve, vibratsioonisummuteid ja isolaatorite kinnitusi. Samuti ei ole võimalik kasutada seda robotit lõhisfaasidega liinidel, kuna ta ei saa ületada juhtme vahekaugushoidikuid. Kontrollisüsteemi rakendamise kohtadeks on lõhisfaasideta liinid, mis töötavad tavaliselt kuni 230 kV pingel. Roboti toiteallikaks on kaks 12 V patareid mahutavusega 7 Ah, mis võimaldavad robotil töötada kuni 6 tundi. Kogemused näitavad, et see lahendus on piisav terve tööpäeva jaoks. Kui videokaamerad on välja lülitatud, suureneb patareide kestvus umbes 20%. Patareid on paigutatud roboti vasakule ja paremale küljele, et tagada selle stabiilsus juhtme peal olles. Juhtimissüsteem jälgib pidevalt aku energia taset, mis võimaldab selle laadimist planeerida. Akut saab laadida, ühendades roboti toiteadapteriga, mis omakorda võib olla ühendatud tavapistikupesaga (100-240 V) või sõiduki pistikupesaga (12 V). [2]

Mootorit toidab pulsilaiusmodulatsiooni ahel, mida juhib roboti tarkvara. Seetõttu robot stardib ja peatub sujuvalt, vältides libisemist oma veorastatel. Kiirust juhib arvutitarkvara, mis võimaldab operaatoril roboti kiirust aeglustada, et hoolikamalt kontrollida kriitilisi juhtme osi. Maksimaalne



horisontaalne kiirus, mida robot suudab saavutada, on 30 meetrit minutis ja maksimaalne ronimisnurk on  $20^\circ$ . Sõltuvalt juhtmest saab liikuda ka suurema nurgaga liinidel. Suurema kui  $20^\circ$  kaldenurgaga juhtmetel opereerimiseks on soovitatav teha mõõtmisi kõrgematest mastidest madalamateni. Robot kaalub 17,8 kg ning maksimaalne liinipinge, mille juures mõõtmisi saab teostada, on 350 kV. [2]

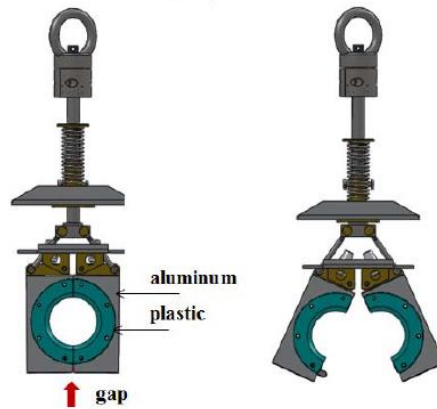
Selleks, et robot ei saaks läbilöögi tõttu kahjustada, paigaldati roboti külgedele kaks paari valtsmetallist silindreid, nii et nad puutuvad juhtmega kokku enne, kui ohtlikud elektrilahendused jõuavad tundlike osadeni. Joonisel 1.15. on kujutatud roboti struktuuri, kus on näha, et silindrid puutuvad kokku juhiga, et vältida läbilööki. [2]



Joonis 1.15. Juhtmega ühendamise seade: (a) valtsmetallist silindrid; (b) roboti osade raam; (c) kõrgepingeliini juhe; (d) metallist rattad [2]

Roboti elektroonika ja pingestatud juhtme vaheline lähedus eeldab mõnede varjestamisprotseduuride rakendamist. Elektrivälja varjestamine saavutatakse varjestatud kaablite abil, paigaldades trükkplaadid metallkarpidesse ja ühendades need roboti raamiga. See on tõhus meetod, sest madala sagedusega elektrivälja eest on suhteliselt lihtne kaitsta. Teisest küljest on madala sagedusega magnetväljade eest väga keeruline kaitsta, kuid nende häiringute indutseerimise võime on madal. [2]

Jooniselt 1.16. on näha sensorit selle juhtme lähedases avatud ja suletud asendis. Juhet ümbritsevasse plastkonstruktsiooni sisestatakse silindriline võre, mida kasutatakse magnetvälja tekitamiseks mööda kontrollitavat juhet. Kui robot põhi on avatud asendis, siis peab silindriline võre olema kaetud metallkarkassiga, et vältida selle ava kaudu lekkivate voolude teket. Sellel metallkonstruktsioonil peab siiski olema väike vahemik, et vältida voolu juhtmist juhtmesse, kuna see vool häiriks sensori poolt mõõdetavat magnetvälja. See vahemik on umbes 1 mm suurune. sadul-pooli mõlemad pooled on omavahel ühendatud varjestatud juhtmetega, mida joonisel ei ole näidatud. Sensor on varustatud ka termomeetriga, mis mõõdab juhtme temperatuuri ja optilise sensoriga, mis tuvastab kas seade on suletud asendis. [2]



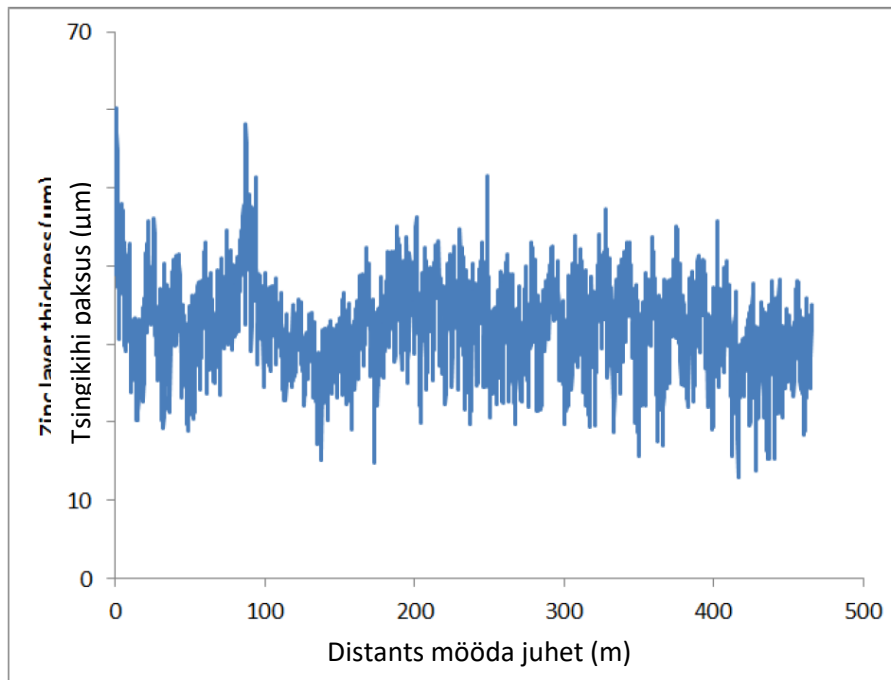
Joonis 1.16. Sensori kaitse suletud ja avatud asendis [2]

Kui robot on juhtmele asetatud, tuleb vähendada korona efekti, kuna ülemäärane korona võib tekitada häireid raadiosides. Kõige rohkem mõjutab robotit raadiosagedusantenni ümber tekkinud korona, mis võib edastada vastuvõtjasse valesignaale. Koroonat suudeti vähendada paigutades roboti siledasse ja ümmargusesse metallkarpi, antenn kaeti suhteliselt paksu kupliga. 2,4 GHz raadiosageduse puhul on raadioühendus immuunne korona mõjule. Seda on kontrollitud mitmetes laboratoorsetes katsetes. [2]

Kui robot on liinil, saab operaator signaali, et sensor on korralikult suletud. Siis võib alustada mõõtmistööd, vajutades juhtimisarvutis "salvestama" režiimi nuppu, seejärel alustab robot liikumist mööda juhet. Joonisel 1.17. on kujutatud roboti taga- ja esikaamerate poolt mõõtmistöde ajal tehtud pildid, kus juhtme pinda on võimalik üksikasjalikult näha. Kui robot liigub, kuvatakse andmed arvuti ekraanil, näidates tsingikihi paksust sõltuvalt kaugusest juhtme algusest. Mõõtmiste faili töödeldakse hiljem, jooniselt 1.18. on näha mõõtmistelt saadud andmete graafik. Sellelt jooniselt on näha, et juhtmele on jäänud märkimisväärne tsingikiht. [2]



Joonis 1.17. Roboti ees- ja tagakaamera poolt salvestatud pilt [2]



Joonis 1.18. Tsingikihi mõõtmise tulemused [2]

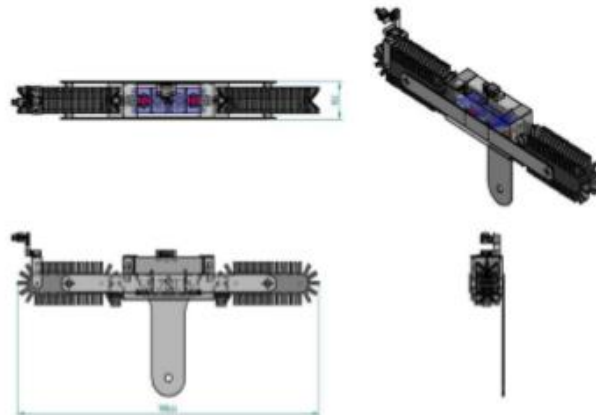
Joonisel 1.18. näidatud mõõtmised tehti 460 m pikkusel liiniosal ja robotil kulus selle vahemaa läbimiseks umbes 15 minutit ja veel 15 minutit, et sõita tagasi. Selle aja jooksul jäid töölised masti otsa ootama roboti tagasitulekut. Kui robot mõõtmiselt tagasi saabus, tõsteti robot edasi järgmisele juhtmele. Seda protsessi korrati ka alumistel juhtmetel. Kolme juhtme kontroll võttis aega ligikaudu 2,5 tundi. [2]

Korrosiooni tuvastamise robot aitab planeerida kõrgepingeliini hooldust, näidates ära korrodeerunud juhtme osad, mida oleks vaja välja vahetada. Selle süsteemi abil kontrollitavad liinid koosnevad ühest juhtmest, kuna robot ei suuda ületada takistusi. Need liinid talitlevad tüüpiliselt nimipingega vahemikus 69 kV kuni 230 kV. Selle robotiga on soovitatav teha mõõtmisi kriitilistes piirkondades asuvatel juhtmetel. Kriitilisteks piirkondadeks on näiteks suured teed, raudteed või tihedalt asustatud alad. Seda robotit kasutab Brasiilia firma Light SESA enda liinide kontrollimiseks. [2]

### 1.3.6 Jätkumuhvide kontrollrobot

Elektriliinide jätkumuhvid ühendavad liini kahte juhset. Samas põhjustavad mõnikord jätkumuhvid ülekandeliini purunemise, sest happevihmad rikuvad ja lagundavad neid. Viimasel ajal on jätkumuhvide amortiseerumine õhureostuse ja kliimamuutuste tõttu kiirenenud. Ülekandeliini purunemine toob kaasa suure majandusliku kahju. Seepärast tuleks muhve regulaarselt kontrollida, et vältida elektrikatkestusi. Korea elektroenergeetika uurimise instituudis arendati välja robot, mis suudab mõõta magnetvälju jätkumuhvil. [10]

Kõrgepingeliinide jätkumuhvide kontrollimise robot koosneb kahest osast, liikuvast osast ja kontrollosast. Liikuv osa viib kontrollosa jätkumuhvini ja ületab liinil olevad takistused. Teiselt poolt paigaldatakse kontrollosa külge magnetid, andurid ja kodeerija, et mõõta muhvi ekstsentrilisust. Liikuv osa ületab sellised takistused nagu vibratsioonisummutid ja juhtmete vahekaugushoidikud ning liigub piki liini, transportides kontrollosa jätkumuhvi poole. Liikuvale osale on kohandatud kaks rööpa mehhanismi, et liikuda mööda suure nurga all olevat kõrgepingeliini, ilma et robot liini pealt maha kukuks isegi, kui tuleb ületada takistusi. [10]



Joonis 1.19. Jätkumuhvide kontrollimise roboti disain [10]

Roboti roomiku keskel on kaks ümarat soont. Sisemise soone eesmärgiks on hoida kinni juhtmest ja välimise soone eesmärk on takistada roboti juhmelt maha kukkumist, suurendades kaabli ja roomiku vahelist hõõrdejõudu. Kaks liikuvat osa on ühendatud kontrollseadme kaudu ja ühendusdetail on tasakaalustamata selleks, et oleks võimalik ületada liinil olevaid takistusi. [10]

Muhvi kontrollseadme kontrollmoodul mõõdab terasest muhvi asendit juhtmel. Kontrollimoodulil on kaks magnetit, üks andur, üks kodeerija ja servomootor. Inspekteerimisosa koosneb püsिमagnetitest, andurist, mis mõõdab jätkumuhvi ristlõiget läbivaid magnetväljade jõujooni. Ka kodeerija on ühendatud, et mõõta kaugust muhvi alguskoordinaadist. Jätkumuhvi ekstsentrilisuse arvutamiseks edastatakse kaugjuhtimispuuldile mõõdetud magnetväljade andmed. Mooduli alla paigaldatud andur mõõdab maksimaalset magnetvälja tugevust. Skaneerimisprotsess toimub kaks korda iga muhvi korral, et suurendada mõõtmiste usaldusväärsust. Magnetväljade mõõtmiseks on robotile paigaldatud andurid, mis aitavad tuvastada muhvi lõppu ning liigutada robotit sujuvalt üle muhvi. Kaks magnetit ja üks andur, mis on tihedalt kinnitatud juhtme ja roboti vahele, takistavad kontrollimisel vibratsiooni tekkimist ning hoiavad kontrollosa püsti. [10]

Kaugjuhtimise tarkvara juhib iga kontrollisüsteemi moodulit ja kontrollib kogu süsteemi. Peamiselt teostab kontrollier regulaarseid kontrollitöid, nagu näiteks mootori juhtimine ja sisendkontroll. Digitaalsel sisendmoodulil on sisendfilter, et blokeerida müra. Analoo-digitaal konverter mõõdab

magnetvälja tugevust iga 1 mm järel. Samuti salvestab mikrokontroller kodeerija signaali ja kontrollib servomootorit, et liigutada kontrollmoodulit üles- ja allapoole. Kasutajaliidese programm näitab roboti seisukorda ning roboti tegevust, nagu edasi-tagasi liikumine ja andmevahetuskontroll. [10]

Antud jätkumuhvi kontrollrobot on välja töötatud koos roomikumehhanismi ja magnetitega. Robot suudab ületada mitmeid takistusi, et kontrollida jätkumuhve ülekandeliinil. Kaamera aitab visuaalselt kontrollida juhtme seisukorda. Tasakaalu probleemide tõttu ei ole võimalik seda robotit kasutada lõhisfaasidega kõrgepingeliinidel. [10]

### **1.3.7 LineDrone**

UAV-l on suur potentsiaal kõrgepingeliinide kontrollimiseks, kuna see suurendab maapealse meeskonna ligipääsu liinidele. Suurim raskus lennukite kasutamisel on maandumisradade leidmine. UAV, mis on võimeline maanduma nagu näiteks helikopter ja mis on sama efektiivne kui lennuk, kõrvaldab selle probleemi ilma lennupikkust vähendamata. [11]

UAV abil kõrgepingeliinide kontrollimisega on tegeletud juba 1980ndate lõpust alates, kuid alles viimasel kümnendil on tehtud UAV-ga põhjalikke uuringud ning arendatud välja tehnoloogiaid, mida oleks võimalik elektrivõrkudes kasutada. Nüüd on võimalik teha väga kõrge kvaliteetiga pilte elektriliinidest ja nende ümbrusest palju madalamate kuludega. UAV-d pole veel kasutatud juhtmetele väga lähedaste või isegi juhtmega kontaktis olevate ülesannete sooritamiseks, näiteks testimiseks või liinide remonditöödeks. Selliseid ülesandeid, mida tavaliselt teevad kvalifitseeritud töölised, on ka viimase kümne aasta jooksul läbi viidud liinidele riputatavate robotitega. Robotid peavad olema paigaldatud liinile järgides standardseid hooldusprotseduure. [11]

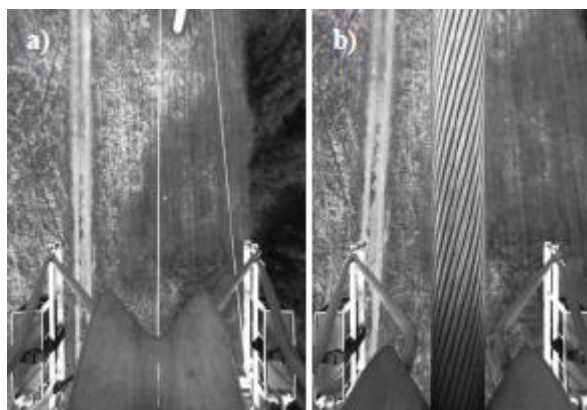
Kui UAV-l oleks võimalik kanda raskusi ning suudaks liinil maanduda ohutult ja efektiivselt, siis see võiks muuta mitmeid kõrge väärtusega kontroll- ja hooldustöid palju tõhusamaks. Selle saavutamiseks tegeleb „LineDrone” ulatuslik UAV projekt, mis algatati Hydro-Quebeci uurimisinstituudis. See robot oleks võimeline tooma elektriliinile kuni 5 kg nii mõõte- kui ka remondiseadmeid. Kui robot on juhtmele maandunud, siis UAV lihtsalt sõidab töö tegemiseks mööda liini. Esmane eesmärk on mõõta galvaanilise kaitse taset elektriliini terastrossidel. See annab infot juhtme järelejäänud eluea kohta, need andmed parandavad remonditööde planeerimist. [11]

Oma ülesannet täites tuleb mehitamata õhusõidukil lennata väga lähedal elektriliinile. Kuigi kvalifitseeritud piloot võiks seda suuta, võivad töötingimused selle sageli muuta teostamatuks. Tavalisel töökaugusel 30 m ja enam, on raske hinnata roboti asendit elektriliini suhtes, et tagada

ohutus ja tõhus töö. Tuuleiilid kujutavad piloodile täiendavat väljakutset. Lisaks sellele, UAV juhtimiseks sobivad kohad, võivad olla ligipääsmatud. Praktikas vajab piloot seega mõningast abi ülesannete usaldusväärseks täitmiseks. Piloodi abistamiseks kasutatakse kaamerat ja LiDAR (*Light Detection and Ranging*) süsteemi, mis annab ülevaate UAV-i asukohast liini suhtes. Seda kasutatakse positsioonipõhises visuaalses kontrollis, mis aitab joondada õhusõiduki juhtmega kohakuti. Piloodil on võimalik kontrollida UAV kõrgust ja asukohta ning samuti protseduuride alustamist. [11]

Ilma koormuseta kaalub UAV 14 kg, tema mõõtmeteks on 1,12 × 1,12 × 0,63 m (laius, sügavus ja kõrgus). Robot peab suutma asetada seadmeid elektriliinile. Robot peab olema võimeline paigaldama mõõteseadme teras-alumiiniumjuhtmega liinile nimipingega 315 kuni 735 kV. Sellise pingega juures on juhtmete läbimõõt 19 kuni 35 mm. Seega ei olnud vaja välja töötada haaratsit, mis sobiks sellest suurema diameetriga liini jaoks. Selle asemel loodi multifunktsionaalne maandumissüsteem. See koosneb kahest jalast ja rattakomplektist. Jalad kannavad patareisid ja moodustavad leetri laadse kuju, et aidata hoida sõidukit õiges asendis maandumise lõppfaasis. *Pixhawk*i autopilooti kasutatakse madalalendude lennujuhtimisseadmena ning see hoiab sõiduki lennu ajal stabiilsena. Lennurežiimis tugineb roboti navigatsioonisüsteem ainult inertsiilandurile ja baromeetrile. Kompassi ei kasutata, kuna selle kasutamine juhtmete lähedal oleks ebausaldusväärne. Nvidia Tegra TX1 arvuti toimib lennujuhtimisseadmena ja täidab otseselt maandumisega seotud ülesandeid. [11]

Kaamerasüsteem koosneb monokulaarsest kaamerast ja LiDAR-ist, mis on järgalt kinnitatud roboti esiotsa. Süsteemi lihtsustamiseks ja kergemaks muutmiseks ei kasutata kaamera stabilisaatorit. Nii kaamera kui ka LiDARI optika on allapoole suunatud. [11]



Joonis 1.20. Robotiga tehtud pildid 10 m kõrguselt (a) ja peale maandumist (b) [11]

Kuna kaamerapildilt võib olla näha mitu elektriliini, et alustada maandumist õigele liinile, valib kaaspiloot esmalt maapealse juhtimisarvuti ekraanilt õige liini. See käivitab kujutise töötlemise, mis

tuvastab ja jälgib elektriliini ning arvutab roboti asukoha juhtme suhtes. Piloot sõidab robotiga juhtme lähedale, samas kui kaaspiloot jälgib maandumist telemeetria- ja videosignaalide kontrollimise teel. Kui sõiduk on juhtmega ühenduses, lülitab piloot mootorid välja. Vajaduse korral võib piloot liigutada UAV-d juhtmel ees- või tahapoole mootoriga rataste abil. Lõpuks kontrollib juhtimisarvuti tarkvara mõõtmisseadmega saadud tulemusi. [11]

Valgustustingimused mõjutavad kaamera ja LiDAR-i poolt tehtud elektriliini mõõtmisi. Toiteliinile lähemal muutub juhtme paksus raskesti mõõdetavaks. Esiteks, kuna osa juhtmest võib tunduda heledam ja varjutatud osa tumedam, alahinnatakse juhtme paksust. Teiseks, elektriliini välimus erineb tegelikkusest kui üksikud traadid muutuvad nähtavaks. Juhtme lähedal tehtud LiDAR-i mõõtmised on usaldusväärsemad, kuid tugev päikesevalgus võib ajutiselt häirida kaugemalt tehtud mõõtmisi, piirates seega selle roboti kasutatavust. [11]

See süsteem on veel testimise järgus ning arendamist vajab maandumissüsteem, kui tuleb maanduda keerukamatele liinidele. Tegeletakse uute mõõteseadmete väljaarendamisega, et oleks võimalik teha vajalike mõõtmisi võrguhaldajate jaoks. [11]

### **1.3.8 Hiina kõrgepingeliinide kontrollimise UAV**

Hiinas on välja arendatud lennukilaadne mehitamata õhusõiduk (UAV), et lihtsustada kõrgepingeliinide visuaalset ülevaatamist. UAV -põhine kontrollisüsteem on peamiselt kolme liiki rakenduste jaoks:

- 1) see võib kontrollida liinikoridori, et saada teavet koridorides olevate hoonete ja taimestiku kohta ning anda ülekandeliinide haldajatele kasulikku teavet.
- 2) Seda saab kasutada ülekandeliinide koridoride kohta info kogumiseks peale loodusõnnetust, nagu näiteks üleujutused, tormid, maavärinad jne. See võib anda töötajatele kiiresti pilte ja videoid kahjustatud rajatistest. Antud info on äärmiselt kasulik parandustööde kiireks teostamiseks.
- 3) See võib aidata võrgukujundajatel leida sobivaid asukohti alajaamade ja liinikoridoride projekteerimiseks. Kaameraga süsteem võimaldab teha geograafilisi pilte suurtest piirkondadest ja anda projekteerijatele infot maapinna reljeefide kohta. [12]

UAV -põhine kontrollisüsteem koosneb mehitamata fikseeritud tiibadega õhusõidukist, mitmest kontrollvahendist, traadita sidesüsteemist ja maapealsest juhtimissüsteemist. UAV -d kasutatakse lennuplatvormina, mis kannab inspeksioonivahendeid, et teha pilte ja videoid. Inspeksioonivahendid hõlmavad enda alla kõrgresolutsiooniga kaameraid ja videokaamerat. Liinide ja mastide kohta saab põhiteabe tehtud piltide abil. Kaamera pildistab automaatsel režiimil. Pilte saab teha fikseeritud asukohas või fikseeritud ajahetkel. Traadita sidesüsteem on reaalajas

ühenduses UAV ja juhtimissüsteemi vahel. Juhtimissüsteemi ja UAV vahel edastatakse seire- ja kontrollandmeid. Kui andmeedastuse ühenduse signaal on nõrk, jätkab õhusõiduk ise lendamist GPS-i järgi. Piltide edastamise ühendus vajab suurt andmemahutu. Sideühenduse kaudu kuvatakse reaajas tehtavad videod juhtimisarvuti ekraanil. Üldjuhul on maksimaalne lubatud kaugus juhtimisarvuti ja UAV vahel alla 30 km. Juhtimisarvuti funktsiooniks on teabe kuvamine ja kaugseire. UAV suudab kanda kuni 20 kg raskust. Maksimaalne lennukestvus on ligikaudu 3 tundi. Robotit saab juhtida käsitsi, osaliselt autonoomselt või täiesti autonoomselt. UAV tõuseb lendu väikeste rakettmootorite abil ja maandub langevarjuga. [12]



Joonis 1.21. UAV õhku tõusmas [12]

2011. aastal viidi läbi Shandongis, Hiinas viis UAV-l põhinevat kõrgepingeliinide kontrolli. Kontrollitud ülekandeliinide pikkus oli 200 km. UAV teostas kontroll-lende 200 m, 150 m ja 100 m kõrgusel. Reaajas edastati juhtimisarvutile 720 p resolutsiooniga videoid ja 1080 p resolutsiooniga videod salvestati pardale. Videomaterjalidest on selgelt näha, et kõrgepingeliinide mastid on selgelt kontrollitavad. UAV-ga teostatud vaatlustööd aitavad anda kiiret ülevaadet kõrgepingeliinide seisukorrast. [12]



Joonis 1.22. UAV poolt salvestatud pilt kõrgepingeliinimastist [12]



## 1.4 Robotite võrdlus

Antud töös kirjeldatud robotitel on erinevad tehnilised andmed on välja toodud tabelis 1.1. Tabelist 1.1. on näha, et kõige kiiremini suudab ronivatest robotitest juhtmel liikuda LineScout. Kõige kauem suudab töötada jaapanlaste Expliner. Kõige suurem juhtme kaldenurk, millel robot võib liikuda, on 30°. Sellise kaldenurga all võivad liikuda LineScout ja Expliner. Ronivatest robotitest on kõige suurem tegevusraadius LineScoutil, seda on koguni 4 km. UAV-dest on suurim tegevusraadius Hiina kõrgepingeliinide kontrollimise UAV-l. Suurim pingetaluvus on LineScouti ja LineDrone nimelistel robotitel. Tabeli 1.1. andmeid võrreldes võib öelda, et tehnoloogiliselt on kõige arenenum Hydro-Quebeci uurimisinstituudis Kanadas välja arendatud LineScouti robot.

Tabel 1.1. Robotite tehnilised andmed [2] [5] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]

Roboti tüüp	Kiirus (km/h)	Kaal (kg)	Aku kestvus (h)	Tegevusraadius (km)	Maksimaalne pingetase (kV)	Maksimaalne ronimisnurk (°)
LineScout	3,6	112	5	4	735	30
Expliner	1,7	95	8	0,2	500	30
AApe-D	-	-	-	-	500	25
Linebot	2,9	45	-	-	500	10
Korrosiooni avastamise robot	1,8	18	6	1	350	20
Jätkumuhvide kontrollrobot	-	-	-	-	350	-
LineDrone	-	14	-	-	735	-
Hiina kõrgepingeliinide kontrollimise UAV	-	20	3	30	-	-

Kuna Eestis on kõrgepingeliinide maksimaalseks nimipingeaks 330 kV, siis sobivad Eesti kõrgepingeliinidel töötama kõik tabelis 1.1. välja toodud robotid. Arvestades robotite tehnilisi andmeid, kasutamisevõimalusi ja lõhisfaasidel ronimise võimekust on Eesti kõrgepingeliinidel keeruliste mõõtmis- ning hooldustööde jaoks kõige optimaalsem kasutada LineScouti robotit. LineScoutiga on võimalik näha kvaliteetset pilti juhtme seisukorrast, teha infrapunakaameraga vaatlusi, kontrollida jätkumuhvide elektritakistust ning ajutiselt remontida juhtme purunenud traate. Vaatlustööde jaoks on mõistlik kasutada hiinlaste kõrgepingeliinide kontrollimise UAV-d. Sellele UAV-le on tavalisele kaamerale lisaks võimalik kinnitada infrapuna- ja UV-kaameraid, et avastada koroonat. Selle UAV suureks plussiks on see, et seda on võimalik kasutada täiesti autonoomselt. Roboti valimisel tuleks arvesse võtta roboti tehnoloogilise taseme ja hinna suhet.

## KOKKUVÕTE

Kaasaegsed elektrivõrgud on kahtlemata kriitilise tähtsusega iga riigi jaoks. Nad on nii suur investeering kui ka elutähtis ressurss iga kodaniku jaoks. Praegu teostatakse kõrgepingeliinide ülevaatusi jalgsi patrullides või helikopteriga, see aga on ohtlik ning töömahukas töötajatele ning kallis võrguhaldajatele. Kulude ning ohtude vähendamiseks on arendatud välja erinevaid liiniroboteid. Antud töö annab ülevaate mujal maailmas arendamises olevatest ja välja arendatud liinirobotitest. Liinirobotite arendustöö võtab väga palju aega ja raha ning paljud projektid on selle tõttu seisma jäänud. Kõrgepingeliinide liiniroboti tüübi valimisel tuleks kõige rohkem võtta arvesse roboti tehnoloogilise võimekuse ja hinna suhet. Suurima osa roboti lõpphinnast moodustavad tavaliselt arenduskulud. Roboti tehnoloogilise võimekuse määrajateks on tööde kvaliteedi, kiiruse, autonoomsuse ja universaalsuse kombinatsioon.

Antud tööst võib järeldada, et ainult lendaval robotil on tõenäoliselt väikseim tehnoloogiline tase ja hind. Lendava robotiga on võimalik teha vaatlustöid, mis annavad kiire ülevaate kõrgepingeliinide seisukorrast. Kuigi lendav robot on universaalne ja kergesti konstrueeritav, on tal siiski vähene autonoomia ning madal tehtavate tööde kvaliteet, kuna kaamera pilt ei ole tihti stabiilne ning tööde teostatavus sõltub suuresti ilmastikuoludest.

Ronimisrobotil on jällegi väga kõrged arenduskulud, kuid robot on palju autonoomsem ja võib pakkuda paremat tööde kvaliteeti. Ronimisrobot suudab teha väga kvaliteetseid vaatlus- ja mõõtmistöid. Võimalik on teha ka hooldustöid nagu näiteks juhtme lahti hargnenud traatide klambriga kinnitamine. Ronimisroboti raami külge on võimalik monteerida erinevaid mõõteseadeldisi.

Arenduskulud on suured ka lendava ronimisfunktsiooniga roboti puhul, mis tõenäoliselt ei oleks takistuste ületamisel nii autonoomne kui ronimisrobot. Lendav ronimisrobot on väga unikaalne, kuna ta on suuteline tegema nii vaatlustöid liini kohal kui ka mõõtmistöid liinil. Lendava ronimisfunktsiooniga robotid on siiski veel algelised ning vajavad edasiarendamist. Kõige enam vajab arendamist roboti maandumissüsteem.

Arvestades robotite tehnilisi andmeid ja kasutamisevõimalusi on Eesti kõrgepingeliinidel keeruliste mõõtmis- ning hooldustööde jaoks olemasolevatest variantidest kõige sobilikum kasutada LineScouti, sellega on võimalik näha kvaliteetset pilti juhtme seisukorrast, teha infrapunakaameraga vaatlusi, kontrollida jätkumuhvide elektritakistust ning ajutiselt remontida juhtme purunenud traate. Vaatlustööde jaoks on mõistlik kasutada hiinlaste kõrgepingeliinide kontrollimise UAV-d, kuna sellele on võimalik paigutada erinevaid kaameraid ning see UAV suudab töötada täiesti autonoomselt.

## SUMMARY

Modern power transmission networks are undoubtedly critical for all countries. They are both a big investment and a critical resource for every citizen. At present, high voltage power line inspections are carried out on foot patrols or by helicopter, which is dangerous for workers and expensive for network operators. In order to reduce costs and risks, different line robots are being developed. This work provides an overview of line robots that are in development and ultimately developed elsewhere in the world. Research on line robots takes very much time and money, and many projects are discontinued because of it. When selecting the type of linerobot for high voltage lines, the relationship between the technological level and the price of the robot should be taken into account for the most part. The biggest part of the robot's final price is usually development costs. The technological level of the robot is determined by a combination of the quality, speed, autonomy and universality of the potential applications.

From this thesis, it can be concluded that a flying robot is likely to have the lowest technological level and price. With a flying robot, observations can be made that provide a quick overview of the condition of high voltage lines. Although the flying robot is universal and easy to construct, it still has a low quality of work and a low degree of autonomy, because the camera is often not stable and the feasibility of the work depends largely on weather conditions.

A climbing robot has very high development costs, but the robot is much more autonomous and can provide better quality of work. The climbing robot can do very high quality observation and measurement work. It is also possible to perform maintenance tasks, such as placing clamp on loose strands in the power line conductor. Different measuring devices can be mounted on the climbing robot's frame.

The development costs are also high for a robot with a flying-climbing feature, which probably wouldn't be as autonomous as a climbing robot when crossing obstacles. The flying-climbing robot is very unique because it is able to perform both observation work over the line and measurement work on the line. However, robots with a flying-climbing function are still rather primitive and need to be developed. Furthermore, the landing system of the robots needs to be improved.

Considering the technical specifications and potential applications of robots, LineScout is the most suitable robot for complex measuring and maintenance work on high-voltage lines in Estonia, providing high-quality images of the condition of the power lines, performing observations with the infrared camera, inspecting the electrical resistance of the splices and temporarily repairing the broken wire strands. For observation work, it is sensible to use the Chinese UAV for checking high-

voltage lines, as it is possible to place different cameras onto the UAV and this UAV can operate fully autonomously.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] J. Katrasnik, F. Pernus ja B. Likar, „A Climbing-Flying Robot,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.intechopen.com/books/climbing-and-walking-robots/a-climbing-flying-robot-for-power-line-inspection>.
- [2] C. F. Barbosa ja F. E. Nallin, „Corrosion detection robot for energized power lines,” *Conference on Applied Robotics for the Power Industry*, 2014.
- [3] J. Katrasnik, F. Pernus ja B. Likar, „A Survey of Mobile Robots for Distribution Power Line Inspection,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4., kd. 25, nr 5, pp. 485-493, 4. detsember 2009.
- [4] N. Pouliot, P. Latulippe ja S. Montambault, „Reliable and intuitive teleoperation of LineScout: a mobile robot for live transmission line maintenance,” *Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009.
- [5] S. Montambault, „LineScout A Robot for Inspecting Live Transmission Lines,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.hydroquebec.com/innovation/en/pdf/2010G080-02A\\_LineScout.pdf](http://www.hydroquebec.com/innovation/en/pdf/2010G080-02A_LineScout.pdf).
- [6] N. Pouliot ja S. Montambault, „LineScout Technology: From inspection to robotic maintenance on live transmission power lines,” *Conference on Robotics and Automation*, 2009.
- [7] P. Debenest ja M. Guarnieri, „Expliner — From prototype towards a practical robot for inspection of high-voltage lines,” *Conference on Applied Robotics for the Power Industry*, 2010.
- [8] Y. Song, H. Wang, Y. Jiang ja L. Ling, „AApe-D: A novel power transmission line maintenance robot for broken strand repair,” *Conference on Applied Robotics for the Power Industry*, 2012.
- [9] S. Wei, C. Wang, Q. Zhou ja B. Deng, „Design and validation of a novel robot for power lines inspection,” *Conference on Information and Automation*, 2015.
- [10] J.-K. Lee, N.-J. Jung ja B.-H. Cho, „Development of Transmission Line Sleeve Inspection Robot,” *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, kd. 5, nr 10, pp. 1953-1957, oktoober 2011.

- [11] F. Mirallès, P. Hamelin, G. Lambert ja S. Lavoie, „LineDrone Technology: Landing an Unmanned Aerial Vehicle on a Power Line,” *Conference on Robotics and Automation*, 2018.
- [12] G. Dong, X. Chen, B. Wang ja J. Zhang, „Inspecting transmission lines with an unmanned fixed-wings aircraft,” *Conference on Applied Robotics for the Power Industry*, 2012.
- [13] „ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics - IEEE,” IEEE, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://robots.ieee.org/robots/expliner/>. [Kasutatud 23. mai 2019].
- [14] P. Debenest, M. Guarnieri, K. Takita, E. F. Fukushima, S. Hirose, K. Tamura, A. Kimura, H. Kubokawa, N. Iwama ja F. Shiga, „Expliner - Robot for inspection of transmission lines,” *International Conference on Robotics and Automation*, 2008.