EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Kert Roosileht

ENERGIAHALDUS NUTIVÕRKUDES MOBIILSETE ROBOTITE ABIL

ENERGY MANAGEMENT IN SMART GRIDS USING MOBILE ROBOTS

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: professor Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2024

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Kert Roosileht		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Energiahaldus nutivõrkudes mobiilsete robotite abil			
Lehekülgi: 40	Jooniseid: 7	Tabeleid: 0	Lisasid: 0

Õppetool: Energiakasutus

ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika

4.17. Energeetikaalased uuringud

T140 Energeetika

Juhendaja: professor Andres Annuk, *PhD*

Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool, Tartu, 2024

Arenevate energiajaotustehnoloogiate maastiku valguses, mida iseloomustab elektrienergia tarbijate kasvav nõudlus tõhususe ja jätkusuutlikkuse järele, käsitleb käesolev lõputöö mobiilsete robotite integreerimise võimalusi nutivõrgu infrastruktuuri energiahaldusprotsessidesse. Nutivõrk kui elektrienergia tootmise, jaotamise ja tarbimise optimeerimiseks loodud tark elektrivõrk võimaldab efektiivset ressursside kasutamist, kaasates endaga ulatuslikult taastuvenergiasüsteeme ja viies ühiskonda lähemale jätkusuutlikule tulevikule. Üleminek traditsiooniliselt elektrivõrgult 21. sajandile kohasele nutivõrgule omab olulist tähtsust lahendamaks konventsionaalse elektrivõrguga kaasnevaid takistusi. Mehitamata õhusõidukite ja maapealsete autonoomsete masinate näol mobiilsed robotid võimaldavad nutivõrgus tõhustada nii järelvalvet kui ka hooldustoiminguid, aidates seeläbi kaasa võrgu vastupidavamale toimimisele.

Töös antakse alustuseks kirjandusallikate põhjal ülevaade nutivõrkude tähtsusest ja toimimispõhimõtetest. Seejärel uuritakse mobiilsete robotite võimalikku rolli nutivõrgu keskkonnas, keskendudes robotite potentsiaalsetele rakendusvaldkondadele ja võrku integreerimise tehnilistele kaalutlustele. Lõpetuseks pakutakse välja laiapõhjaline strateegiaettepanek energiahalduseks nutivõrgus mobiilsete robotite abil, mis hõlmab aspekte nagu reaalajas võrguseadmete jälgimine, ennetav hooldus, nõudlusele reageerimine ja taastuvenergiasüsteemide integreerimine.

Märksõnad: nutivõrk, elektrivõrk, mobiilne robot, energiahaldus, taastuvenergia

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Higher Education Thesis	
Author: Kert Roosileht		Curriculum: Engineering	
Title: Energy management in smart grids using mobile robots			
Pages: 40	Figures: 7	Tables: 0	Appendixes: 0

Chair: Energy Application Engineering

Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering

4.17. Energetic Research

T140 Energy research

Supervisor: professor Andres Annuk, *PhD*

Place and date: Estonian University of Life Sciences, Tartu, 2024

The following thesis addresses possibilities of integrating mobile robots into the energy management processes of smart grid infrastructure. It's done in the context of the evolving energy distribution landscape and it's characterized by the increasing demand for efficient and sustainable electrical energy for consumers. Smart grid, as an intelligent electrical network designed for optimizing the production, distribution and consumption of electricity, enables efficient resource utilization by extensively incorporating renewable energy systems and thereby bringing society closer to a sustainable future. Transition from a traditional electrical grid to a smart grid that is suitable for modern applications holds significant importance in overcoming the obstacles associated with conventional electrical grids. In the form of unmanned aerial vehicles and ground-based autonomous vehicles, mobile robots facilitate the enhancement of both surveillance and maintenance operations within smart grids, thereby contributing to the network's increased resilience.

The thesis begins with covering the importance and working principles of smart grid based on literature sources. Subsequently, it explores the potential role of mobile robots in the smart grid environment, focusing on their potential application areas and technical aspects of integration. Finally, a comprehensive strategy for energy management in smart grids using mobile robots is presented, including aspects such as real-time monitoring, preventive maintenance, demand response and integration of renewable energy systems.

Keywords: smart grid, electrical grid, mobile robot, energy management, renewable energy

SISUKORD

SISSEJUHATUS 5
1. NUTIVÕRGUD JA ENERGIAHALDUSSÜSTEEMID 6
1.1. Nutivõrkude tähtsus 6
1.2. Energiahaldussüsteemid nutivõrkudes 8
1.3. SCADA-põhised energiahaldussüsteemid 9
1.4. Standardse elektrivõrgu murekohtade parandamise strateegiad 9
2. MOBIILSED ROBOTID NUTIVÕRKUDES 11
2.1. Mobiilsete robotite roll nutivõrkudes 11
2.2. Tehnilised aspektid robotite integreerimisel võrku 12
2.2.1. Mobiilsussüsteemid 12
2.2.2. Peamised liikumisviisid 13
2.2.3. GPS süsteemide ja sensorite kasutamine 17
2.2.4. Robotite toitesüsteemid 18
2.2.5. Robotite hooldusstrateegiad 20
2.3. Veatuvastus ja hooldus võrguseadmetes 21
2.3.1. Elektriedastusliinid 21
2.3.2. Taastuvenergiasüsteemid 24
2.4. Energiaülekande seire 26
3. STRATEEGIA MOBIILSETE ROBOTITE INTEGREERIMISEKS NUTIVÕRGU ENERGIAHALDUSESSE 27
3.1. Strateegia eesmärk 27
3.2. Reaalajas võrgu seiramine ja andmete kogumine ning ennetav hooldus 28
3.3. Nõudlusega kohanemine ja koormuse tasakaalustamine 30
3.4. Energia salvestamine ja taastuvenergiaallikate integreerimine 31
3.5. Strateegia rakendamise sammud, selle kasulikkus ja tulevane uurimistöö 32
KOKKUVÕTE 34
KASUTATUD KIRJANDUS 35
LIHTLITSENTS 40

SISSEJUHATUS

Kuna nõudlus tõhusa ja usaldusväärse energiajaotuse järele on kasvutrendis, siis sellest tulenevalt on ka uuenduslikud energiahalduse meetodid nii elektrienergia tootjate kui ka tarbijate perspektiivist muutunud ajaga üha olulisemaks. Vajadustega kohanemiseks on tarvis silmitsi seista kaasaegsete ja innovaatiliste lahenduste välja töötamisega ning nende integreerimisega elektrivõrkudesse. Traditsionaalse võrgu tehnilisi seadmeid ja toimimispõhimõtted ümber kujundades on võimalik üle minna intelligentsemale elektrivõrgule ehk nutivõrgule, mis rakendab inimtöötajate abistamiseks mõeldud mobiilseid autonoomseid roboteid nii võrgu järelvalve- kui ka hooldusprotsessides.

Käesoleva lõputöö eesmärk on anda kirjandusallikate põhjal ülevaade nutivõrkudest ja nendes esinevatest energiahaldussüsteemidest. Samuti uuritakse töös mobiilsete robotite konkreetseid rakendusvõimalusi, mis hõlmab nii elektriliinide kui ka taastuvenergiaallikate süsteemide kontrollimist ja hooldamist. Lisaks käsitletakse töös erinevaid tehnilisi kaalutlusvaldkondi robotite integreerimiseks võrgusüsteemidesse.

Autori lõppeesmärgiks on töös varasematele uurimistöödele tuginedes välja pakkuda laiapõhjaline strateegiaettepanek, mis käsitleks erinevate võrgukomponentide nagu mobiilsete robotite, nutikate energiaarvestite ja tsentraliseeritud juhtimissüsteemi omavahelist koostööd nutivõrgus. Pakutud strateegia võiks parandada võrgus jälgimisvõimalusi, läbiviidavaid hooldusprotseduure, nõudlusele reageerimise meetodeid ja taastuvenergiasüsteemide integreerimist. Strateegia elluviimine looks usaldusväärse ja säästliku energiahaldusmeetodi nii tootjate kui ka tarbijate jaoks ning paneks aluse stabiilsemale ja turvalisemale nutivõrgu infrastruktuurile.

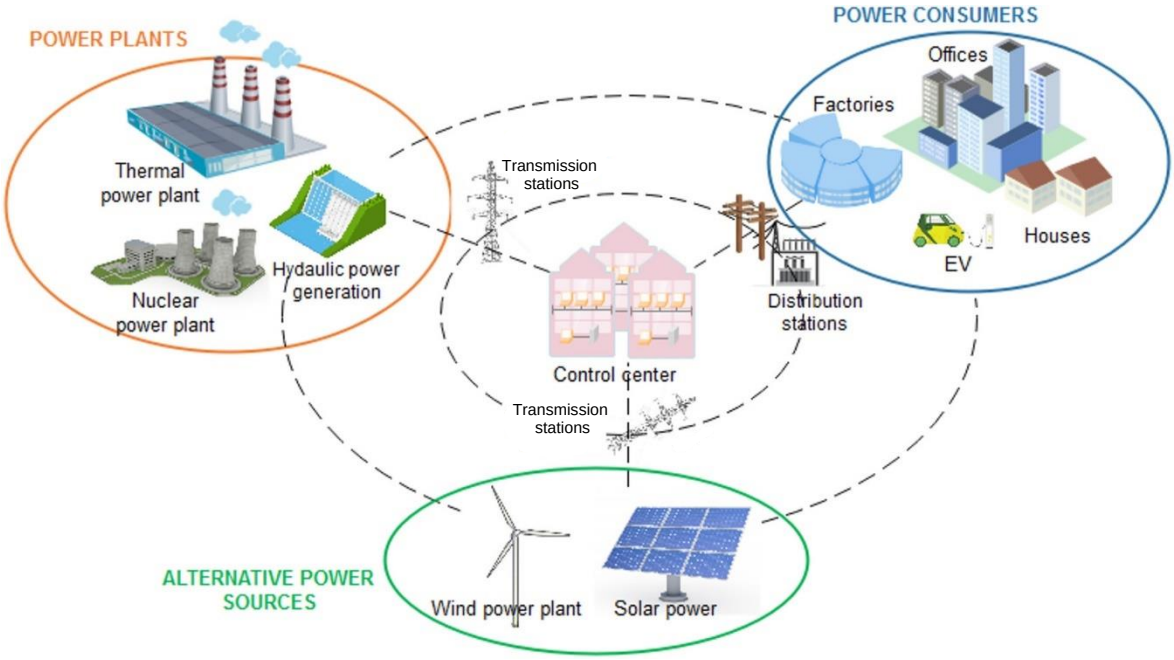
1. NUTIVÕRGUD JA ENERGIAHALDUSSÜSTEEMID

1.1. Nutivõrkude tähtsus

Hoogsalt arenevate elektrijaotussüsteemide dünaamiliselt muutuva nõudluse tagamiseks on tähtis olemasolevate ressursside optimeerimine intelligentsete tehnoloogiate nagu nutivõrkude abil. Intelligentne elektrienergia jaotusvõrk ehk nutivõrk kaasab endaga progressiivseid tehnoloogiaid, et täiustada elektrisüsteemide haldust ja monitoorimist. Lisaks energia tootmisele ja jaotamisele suudab nutivõrk kohaneda kasutaja tegevuse ja tarbimiskäitumisega. Nutivõrgud hõlmavad endas uuenduslikke süsteemisiseseid seadmeid ja teenuseid, et tagada süsteemis korrapärane kommunikatsioon, juhtimine ja enesediagnostika. [1]

Nutivõrgud peegeldavad arenenud elektrijaotussüsteeme, mis rakendavad erinevaid informatsiooni ja kommunikatsiooni tehnoloogiaid kogu protsessi vältel, alates elektrienergia tootmisest kuni selle jõudmisest lõpptarbijani. Selliste võrkude peamiseks ülesandeks on automaatselt reguleerida ja tasakaalustada elektri tootmist, tarbimist ja jaotamist, mis omakorda võimaldab süsteemiga integreerida mitmeid komponente nagu taastuvenergiaallikaid ja energiasalvestusseadmeid. [2]

Nutivõrgu süsteemistiku moodustavad mitmed erinevad komponendid nagu traditsionaalsed elektrijaamad, alternatiivsed taastuvad energiaallikad ja elektrienergia tarbijad. Süsteemis on kõik komponendid omavahel tihedalt seotud ning süsteemi tuumaks on juhtimiskeskus, mille tööülesandeks on seirata ja reguleerida energiavoo liikumist. Efektiivse energiavoo liikumise tagamiseks esinevad süsteemis ka elektrienergia edastus- ja jaotusjaamad. Selline tööpõhimõte lihtsustab elektrienergia tõhusat tootmist, jaotamist ja kasutamist võrgus. Lõpptarbijatele nagu tootmisüksustele ja kodumajapidamistele on tagatud usaldusväärne ja jätkusuutlik energiavarustus. (Joonis 1)



Joonis 1. Nutivõrgu süsteemi komponendid ja selle toimimispõhimõte. [2]

Nutivõrgu oluliseks iseloomujooneks on veel kahesuunaline reaalajas jälgitav kommunikatsioon, mis paneb elektrikatkestuse korral aluse kiiremale võrguteenuse taastamisele. Kuigi nutivõrgud kasutavad automatiseerimiseks ja kahesuunalise elektrienergia voo jälgimiseks digitaalseid andureid, nutikaid mõõtmistehnikaid ja arvesteid ning intelligentseid juhtimissüsteeme, siis on need samal ajal ka küllaltki haavatavad küberrünnakutele. Nimelt on ründajatel võimalik ligi pääseda kaitstud andmetele ja sisestada valeinfot võrgu mõõtmistesse, mida olemasolevad praktikad ei ole suutelised koheselt avastama. [2]

Andmerünnakute ja elektrikatkestuste ohu piiramiseks kasutab nutivõrk detsentraliseeritud lähenemist. Selle asemel, et tugineda ühele suurele elektritootmise rajatisele, koosneb nutivõrk suurest hulgast väiksematest hajutatud tootmisüksustest. Eelmainitud ohtude esinemisel tagab nutivõrgu iseseisvalt taastuv loomus kiiresti ja automaatselt süsteemi isolatsiooni vigasest liinist ning seejärel ümberlülituse mõnele teisele parasjagu toimivale toiteallikale. Selline ohu vältimise korraldus nõuab nutivõrkude juhtimiskeskustes tarkade lülitusseadmete nagu digitaalsete energiahaldussüsteemide kasutamist. [2]

1.2. Energiahaldussüsteemid nutivõrkudes

Rahvusvaheline Elektrotehnika Komisjon määratleb standardis IEC 61970 energiahaldussüsteemi (inglise keeles *energy management system*, edaspidi EMS) arvutisüsteemina. Nimetatud arvutisüsteem sisaldab endas tarkvaraplatvormi, mille rakendused pakuvad vajalikku funktsionaalsust elektritootmise ja -ülekande rajatiste tõhusaks toimimiseks. EMS-i peamiseks eesmärgiks nutivõrgus on minimaliseerida energiakadusid ja tagada piisav energiavarustuse turvalisus võimalikult väikeste kulutustega. EMS-id on kasutusel nii elektrivõrkude jaotussüsteemides kui ka kodumajapidamistes. [3]

Elektrivõrkude jaotussüsteemides tagab EMS erinevate energiaallikate optimaalse jaotuse tarbijate vahel, integreerides protsessi jätkusuutlike taastuvaid energiaallikaid nii, et kogu operatsiooni vältel oleks pidevalt tagatud võrgu turvaline toimimine. Lisaks suudab see jälgida, juhtida ja optimeerida elektrienergia edastus-, jaotus- ja tootmisseadmeid [2]. Eksisteerib kolm erinevat EMS-i struktuuri, milleks on tsentraliseeritud, detsentraliseeritud ja hierarhiline struktuur. Tsentraliseeritud EMS baseerub ühele kesksele juhtimiskeskusele, kuid seisab silmitsi väljakutsetega nagu arvutuslik koormus ja „ühe punkti viga“. Ühe punkti veaks nimetatakse situatsiooni, kus üksiku süsteemi elemendi rike võib põhjustada kogu süsteemi tõrke. Vastupidiselt eelnevale kasutab detsentraliseeritud EMS hajutatud autonoomseid juhtimissüsteeme, mis aitab vähendada riske ühe punkti vea tekkimiseks. Hierarhiline EMS-i struktuur on aga üles ehitatud detsentraliseeritud mudelile, jagades süsteemi mitmeteks eritasandilisteks juhtimispunktideks, kus igale punktile on määratud oma kindel ülesanne. Hierarhilise EMS-i puhul võib kergesti tekkida olukord, kus ülemistel tasanditel esinevad sidevead võivad põhjustada häiringuid süsteemi energiaülekandes [4].

Kodumajapidamistes on EMS sageli ühendatud hooneautomaatikaga. See on oluline osa koduse energia tarbimise jälgimisel ja tarbija kaasamisel energiasäästlike harjumustega. Traditsiooniliselt vajasid EMS-id spetsialiseeritud tööriistu ja manuaalset seadistamist, kuid tänapäevased tehnoloogilised edusammud võimaldavad üksikasjalikku kodumasina või mõne muu elektroonikaseadme tasemel andmete kogumist. Mitmesuguste sensorite laialdane kättesaadavus võimaldab EMS-idel koguda mitmekülgset teavet koduse keskkonna ehk temperatuuri ja valgustuse kohta. EMS-i integreerituna pakuvad sensorid täiendavat asjakohast teavet koduse keskkonna kohta ja seeläbi suurendavad kütte, jahutuse ja valguskasutuse tõhusust. [5]

1.3. SCADA-põhised energiahaldussüsteemid

Energiahaldussüsteemide tarkvarasid on olemas mitmeid, kuid nendest kõige tuntumaks ja levinumaks on SCADA- (inglise keeles *supervisory control and data acquisition*) põhised süsteemid. [6]

SCADA juhtimis- ja visualiseerimissüsteem on kriitiline komponent tagamaks võrgu efektiivse juhtimise ja jälgimise. Seda kasutatakse tarkvara ja seadmete näol andmete hankimiseks ja käskude edastamiseks, hõlbustades reaalajas võrgu jälgimist, automatiseeritud käskude genereerimist ning toimivat suhtlust operaatorite ja süsteemi vahel. Lisaks koguvad SCADA süsteemid teavet seadmete oleku kohta, viivad läbi analüüse ja annavad hoiatusi kriitiliste rikete kohta. SCADA sisaldab tavaliselt endas elemente nagu HMI (inglise keeles *human-machine interface*) ehk graafilist kasutajaliidest, kontrollereid ja sisend-väljundseadmeid. SCADA süsteemide haldamiseks on eriti oluline süsteemi tarkvaraline komponent, mille arendamiseks ja rakendamiseks kasutatakse erinevaid meetodeid alates lihtsamatest loogikapõhistest lähenemisviisidest kuni täiustatud tehisintellekti-põhiste meetoditeni. [6]

1.4. Standardse elektrivõrgu murekohtade parandamise strateegiad

Standardsed energiahaldusmeetodid ja elektrivõrgud seisavad silmitsi arvukate väljakutsetega elektrisüsteemide muutuval maastikul. Kui elektrivõrgustik rajati algselt hajutatud süsteemina, siis kaasaegne tehnoloogia areng on soosinud traditsionaalsete võrkude üleminekut ühendatud võrkudele ehk infrastruktuuridele, mis koosnevad kodude, ettevõtete ja tööstuste energiavarustuse tagamise eesmärgil mitmetest erinevatest energiaallikatest. Säärased ühendatud elektrivõrgud on suunatud parandama kulutõhusust, usaldusväärsust ja ohutust. Ent kuna sõltuvus digitaalsest majandusest aina süveneb, siis nõuavad tarbijad võrgult üha suuremat usaldusväärsust ning seda eriti keeruliste ilmastikuolude ja turvariskide korral. [7]

Elektrienergia edastus- ja jaotussüsteemid mängivad olulist rolli taastuvate ressursside rakendamisel ja tõhusa energia transpordi tagamisel. Hajutatud energiaressursside (inglise keeles *distributed energy resources*, edaspidi DER) ja hajutatud võrkude integreerimine traditsionaalsetesse võrkudesse võib suurendada võrkude tulemuslikkust ja tasakaalustada pakkumise ja nõudluse ebavõrdsust. Siiski nõuab DER metoodika ja ebaühtlaselt muutuva võrgukasutuse tarnekindluse tagamine intelligentset, kaasaegset ja vastupidavat võrku. Ilmastikunähtuste ja turvaohtude sagenemise ja tõsiduse tõttu on võrgu vastupidavus viimasel ajal jõudnud tähelepanu keskmesse, mistõttu on oluline nende väljakutsetega toimetulekuks ajakohastada seadmete projekteerimist ja inseneripraktikaid. Tõhusamate ja paindlikumate energiahaldusmeetodite väljatöötamiseks on mainitud väljakutsete adresseerimine ja lahendamine hädavajalik ettevõtmine. [7]

Standardsete energiahaldusvõrkude väljakutsete valguses kujutavad kriitilist takistust veel manuaalsed elektrivõrgu hooldustoimingud. Traditsionaalsetes võrkudes tehtavad manuaalsed hooldusoperatsioonid võivad olla mahukad, ebaefektiivsed ja kujutada märkimisväärset ohtu töötaja tervisele ja elule. Operatsioone viiakse üldjuhul läbi elektrijaamadest kaugel asuvates kohtades elektripostide ja -liinide lähedal, mis nõuab hooldustoimingu ajaks piirkonnas elektrikatkestuse esiletoomist ning mis omakorda takistab energiaülekande tõhusust. Kuna vajadused kvaliteetse energiaülekande ja kaasaegse automatiseerimise järele kasvavad, siis ilmnevad üha enam erinevused manuaalsete hooldusmeetodite ja tänapäevaste võrgustandardite vahel. Seetõttu kerkib kriitilise strateegiana esile manuaalsete toimingute asendamine automatiseeritud lahendustega nagu pingestatud kaablite hooldamiseks või inspekteerimiseks mõeldud mobiilsete robotite kasutamine. Sellised robotid pakuksid võrguhalduses mitmeid olulisi praktilisi eeliseid, sealhulgas suurendatud töötõhusust ja töötajate ohutust. [8]

2. MOBIILSED ROBOTID NUTIVÕRKUDES

2.1. Mobiilsete robotite roll nutivõrkudes

Mobiilne robootika on tempokalt kujunenud üheks tähtsaks ja kasvavaks teadusliku uurimistöö valdkonnaks, mis pakub võimalusi efektiivselt asendada inimeste kaasamist erinevates praktilistes valdkondades. Mobiilsed robotid on võimelised liikuma mitmekesistes keskkondades ning nad suudavad töötada iseseisvalt, sõltumata vahetust inimese välisest sekkumisest. [9]

Nutivõrkudes võib pidevalt tekkida mõni ootamatu olukord. Need võrgud on tundlikud erinevatele õnnetustele ja riketele ning ohtude ettenägemiseks ei ole loodud usaldusväärseid meetodeid [10]. Näiteks kuuluvad potentsiaalsesse riskigruppi elektriliinid, mille kontrollimiseks ja võimalike probleemide tuvastamiseks on tarvis visuaalselt liinide tööseisundit hinnata. Kui liinide manuaalne inspekteerimine on tänapäeval endiselt kõige levinum kontrollmeetod, siis on alternatiivina hakatud selleks kasutama rullikute abil maanduskaabli peal liikuvaid ja kaamerasüsteemidega varustatud roboteid [11]. Ühtlasi on intelligentsete kontrollrobotite kasutuselevõtt ilmsiks saanud energiatööstuse alajaamades. Selliste robotite funktsioone täiustatakse järk-järgult ning nad jäljendavad manuaalseid kontrolltegevusi. Nende eeliseks manuaalsete jälgimisprotsesside ees on näiteks alajaamas tulekahju tuvastamise võimekus lühikese aja jooksul. Samuti ei ole need niivõrd tundlikud välistele kliimateguritele, kui manuaalseid operatsioone läbi viivad töötajad [12].

Nutivõrgud loodi päikese- ja tuuleenergia allikatest elektritootmise edenemise tulemusena ja nende absoluutseks eesmärgiks on saavutada tõhus jõuülekanne [13]. Päikeseenergia on tuntud ka kui rikkalik taastuvenergiaallikas. Päikesepaneelide optimaalset jõudlust mõjutab tolmu kogunemine paneelide peale. Nimelt vähendab tolmu kogunemine paneelidele langeva päikesekiirguse hulka, mis omakorda taandab paneeli võimsust ja süsteemi üldist jõudlust. Manuaalsed paneelide puhastamise meetodid on aga kulukad, veemahukad ja ohustavad töötajaid. Seetõttu on näiteks uuringus [14] välja pakutud lahendus mobiilsele robotsüsteemile, mis suudaks vett kasutamata hooldada iseseisvalt päikesepaneelide mooduleid.

Ühtlasi on viimasel ajal märkimisväärselt kasvanud elektritootmine tuuleturbiinide abil. Kuna turbiine on arendatud ajaga aina rohkem tõhusamaks, siis samal ajal on ka näha kasvavat trendi suuremate labadega turbiinide poole, mis võivad ulatuda kuni 80 meetrini. Hoolimata labade vastupidavusest ja korrosioonikindlusest esineb neil sellegipoolest aegajalt pragunemist ja delaminatsiooni. Üheks võimalikuks defektide tuvastamise viisiks on mehitamata õhusõidukite kasutamine visuaalseteks inspektsioonideks, kuid need ei ole võimelised läbi viima hooldustöid. Vastukajana on märgata märkimisväärset huvi ronimisrobotite vastu nii akadeemilises kui ka ettevõttesektoris. Sellised ronimisrobotid suudaksid rakendada erinevaid inspektsioonimeetmeid ja läbi viia hooldustöid. Kuigi neid ei ole veel laialdaselt rakendatud, liigub üha suurem hulk algatusi selle visiooni elluviimise suunas. [15]

Tänapäeva nutikate võrkude edenemisel on veel kesksel kohal autonoomsed maapealsed sõidukid (inglise keeles *assistive autonmous ground vehicles*, edaspidi AGV). Üheks oluliseks AGV rakendusalaks on võrgusisene järelvalve. Varustades selliseid roboteid kaameratega, mikrofonidega ja erinevate anduritega, saavad need tõhusalt jälgida mitmeid asukohti võrgus. Robotite mobiilsus võimaldab kaugjuhtimist ja juurdepääsu raskesti ligipääsetavatele aladele, pakkudes kulutõhusat asendust suure hulga jälgimisseadmete paigaldamisele. Lisaks võivad AGV-d, mis toimivad liikuvate platvormidena, aidata võrguinsenere transportida konkreetsetesse muul viisil raskesti ligipääsetavatesse paikadesse. Kasutades teekonna planeerimise algoritme, navigeerivad AGV-d lähtepositsioonist soovitud sihtkohta ehk näiteks vigaste võrgusüsteemide lähedusse. [10]

2.2. Tehnilised aspektid robotite integreerimisel võrku

2.2.1. Mobiilsussüsteemid

Robotite autonoomsust iseloomustab nende kompetents teha ülesande täitmiseks parasjagu sobivaid toiminguid. Roboti üheks kõige olulisemaks osaks on juhtimissüsteem, mis koordineerib robotis kõikide alamsüsteemide korrektset integreerimist. Mobiilse robootika põhilised mobiilsussüsteemid hõlmavad lisaks juhtimisele veel liikumist, tajumist ja navigeerimist. [9]

Mobiilsete robotite peamine takistus on nende võime edukalt liikuda. Need on sageli mõeldud liikuma kontrollitud aladel nagu tehastes või kaubanduskeskustes, kuid võivad teatud olukordades sattuda ka töötamise ajal ohtlikesse või äärmuslikesse keskkondadesse. Liikumissüsteem on oluline element roboti arendamisel, mis sõltub tehnilistest kriteeriumitest nagu manööverdavusest, juhitavusest, stabiilsusest ja läbitava maastiku tingimustest. [9]

Robot saavutab oma autonoomsuse siis, kui tal on võime iseseisvalt vajalike ülesannete täitmiseks otsuseid vastu võtta. Informatsiooni hankimine enda ümbruskonna ja tehnilise oleku kohta on autonoomse mobiilse roboti jaoks tähtis. See saavutatakse tajumissüsteemi ehk andurite kaudu, mis koguvad pidevalt analüüsimiseks andmeid. Andurid võimaldavad robotil kogutud andmeid töödeldes muu hulgas määrata ka oma asukohta ning tuvastada ja kaardistada objekte. [9]

Pärast ümbritseva keskkonna ja eesmärkide mõistmist peab roboti tunnetuslik juhtimissüsteem kavandama ja ellu viima määratud eesmärkide saavutamiseks vajalikud meetmed. Juhtimissüsteem vastutab otsuste tegemise ja täitmise eest, kasutades selleks andurite poolt kogutud andmeid. Lisaks eelnevale koordineerib tunnetuslik juhtimissüsteem tajumissüsteemist tulnud sisendandmeid, et planeerida tõhusat roboti liikumisteekonda. [9]

Roboti disaini alus peitub selle navigeerimisvõimalustes. Navigeerimissüsteem lubab robotil läbida nii teadaolevaid kui ka tundmatuid piirkondi ja jõuda eelnevalt kindlaks määratud sihtkohtadesse. Selle saavutamiseks tugineb navigeerimissüsteem teistele protsessidele, mis koguvad andurite andmeid, määravad roboti positsiooni, võtavad vastu otsuseid ja viivad läbi soovitud mehaanilisi liigutusi. [9]

2.2.2. Peamised liikumisviisid

Autonoomse liikumisvõimega mobiilsed robotid mängivad olulist rolli erinevates rakendustes nii struktureeritud kui ka struktureerimata keskkondades. Praktilises kontekstis leidub mitmesuguseid eri tüüpi roboteid, mis jagunevad liikumisviiside järgi ja mille hulka kuuluvad ratastega robotid, jalgadel liikuvad robotid ja mehitamata õhusõidukid. [16]

Rataste kasutamine on üks enim levinuimaid meetodeid nii mobiilsetele robootikasüsteemidele kui ka mehitatud sõidukitele liikumisvõime loomiseks. Rattad pakuvad oma lihtsa mehaanilise disaini kohta üsnagi tähelepanuväärset tõhusust. Erinevalt teistest liikumismeetoditest ei ole tasakaalu tagamine ratasrobotite disainimisel esmatähtis tehniline katsumus, kuna hoolikas planeerimine tagab üldjuhul kõikide rataste pideva kontakti maapinnaga. Tasakaaluprobleemidega toimetuleku asemel keskendub ratastega robotite uurimis- ja arendustegevus tavaliselt eelkõige veojõu, stabiilsuse ja manööverdusvõime parandamisele. Uuringute ja arendamise käigus hinnatakse, kas roboti rataste seadistus suudab tagada piisava tõhususe erinevatel maastikel, säilitades samaaegselt täpse kontrolli roboti kiiruse ja liikumistrajektoori üle [16]. Joonisel on kujutatud näide nutivõrgu alajaama inspekteerivast ratastel liikuvast robotist (joonis 2).

Joonis 2. Nutivõrgu alajaama inspekteeriv ratastel liikuv robot. [17]

Jalgadel liikuvad robotid aga eristuvad oma isikupäraste liikumisomaduste poolest. Olenemata pinnase kvaliteedist suudavad sellised robotid navigeerida keerulistes keskkondades. Neil on võime ületada erinevaid takistusi nagu augud ja järsud kallakud eeldusel, et nende sammuulatus on suurem, kui ületatava takistuse laius. Roboti korrapärase jalgade liikuvuse saavutamine toob aga esile mitmeid väljakutseid ja seda eriti energiatarbimise ja mehaanilise keerukuse osas. Nimelt on roboti jalgadel tavaliselt liigendite tõttu arvukalt vabadusastmeid ja seetõttu peavad jalad toetama ja liigutama roboti enda massi, muutes roboti disaini ja toimimise raskendatuks. Vaatamata nimetatud väljakutsetele pakuvad jalgade abil liikuvad robotid unikaalset manööverdusvõimet mitmetes erinevate omadustega keskkondades [16]. Joonisel on näha neljal jalal liikuvat mobiilset robotit „ANYmal“ läbimas ebaühtlast maastikku (joonis 3).

Joonis 3. Jalgadel liikuv mobiilne robot ANYmal. [18]

Mehitamata õhusõidukid (inglise keeles *unmanned aerial vehicles*, edaspidi UAV), mida nimetatakse ka droonideks või kaugjuhitavateks õhusõidukiteks, on viimase kahe kümnendi vältel saanud erinevates sektorites laialdast rakendust just nende erakordse liikumisvõime ja kulutõhususe tõttu. Algselt ja ka tänapäeval peamiselt militaarsetes tegevustes pilootriskide maandamiseks kasutatavad UAV-d on läbinud märkimisväärseid edusamme ja

arenguprotsesse, mille tulemuseks on vähenenud tootmiskulud ja kompaktsem tehnika. Väiksemad UAV-d, mille mass jääb alla 25 kg, on muutunud avalikkusele tsiviil- ja kaubanduslikes rakendustes üha enam kättesaadavamaks. Rakenduste laia spektri hulka mahuvad näiteks ilmaseire, metsatulekahjude tuvastamine, liikluskorraldus, kaubavedu ning otsingu- ja päästeoperatsioonid. UAV-d jagunevad üldjoontes fikseeritud tiibadega õhusõidukiteks ja multirootoriteks ning mõlemal esinevad oma eelised ja piirangud. Nimelt suudavad fikseeritud tiibadega õhusõidukid arendada suuremaid kiiruseid ning omavad suuremat kandevõimet, kuid vajavad lendamiseks ja õhus püsimiseks pidevat edasiliikumist, muutes need ebasobilikuks statsionaarsete ülesannete nagu objektide lähiinspektsioonide jaoks. Seevastu on multirootoritel parem manööverdusvõime, mis võimaldab neil hõlpsasti liikuda igas suunas ning hõljuda fikseeritult ühe koha peal. Eelnevast järeldades sõltub UAV tüübi valik konkreetsest rakenduse liigist [19]. Nutivõrkudes pakuvad UAV-d näiteks olulisi eeliseid nii rutiinsete kui ka kiireloomuliste elektriliinide kontrolltoimingute läbiviimiseks. Nimelt võivad inimtöötajate antud visuaalsed hinnangud liinidele osutuda subjektiivseks ja lõppkokkuvõttes kulukaks protsessiks. UAV-de kasutuselevõtt võib potentsiaalselt vähendada kulusid ja vajadust mehitatud patrulli järele [20]. Joonis demonstreerib angaarist väljunud ja elektrivõrgu inspektsiooniks valmisolevat multirootor-stiilis UAV-d (joonis 4).

Joonis 4. Võrgu inspektsiooniks valmisolev multirootor-stiilis UAV. [21]

2.2.3. GPS süsteemide ja sensorite kasutamine

Mobiilseid roboteid kasutatakse üha enam ebatasastel maastikel ning nad peavad keerulisi ülesandeid täites läbima aina suuremaid alasid. Planeeritud ülesannete õnnestumine eeldab aga täiustatud navigatsioonisüsteemide kasutamist ning see on tihedalt seotud roboti võimega iseseisvalt enda asukohta määrata. Väliskeskkonna rakenduste jaoks kasutatakse robotitel peamiselt globaalse positsioneerimissüsteemi (inglise keeles *global positioning system*, edaspidi GPS) -põhist asukoha määramist [22]. Lisaks GPS-i kogutud andmetele kasutatakse robotites täpsemaks positsioneerimiseks ja asendi määramiseks ka täiendavaid seadmeid nagu sensoreid [23].

GPS on töökindel navigatsioonisüsteem, mis sobib kasutamiseks olenemata ilmastiku- või ajatingimustest. GPS-süsteeme rakendatakse erinevates tööstusharudes nagu ehituses, geodeesias, keskkonnaseires, põllumajanduses ja lennunduses. Nõudlus GPS-tehnoloogiate järele on nimetatud sektorites pidevas kasvutrendis [24]. Mobiilse robootika üks põhilisi väljakutseid on sõiduki täpne positsioneerimine ning selle valguses kujutab GPS endast kasulikku tehnoloogiat väliskeskkonnas autonoomseks navigeerimiseks [25].

Autonoomse mobiilse roboti GPS-süsteemi põhimõte on järgmine: roboti GPS-moodul võrdleb reaalajas oma hetkelist asukohta soovitud sihtkoha koordinaatidega, võimaldades robotil iseseisvalt liikuda määratud asukohta. Vajadusel saab robot liikumisprotsessi korrata, et navigeerida end tööülesannete täitmiseks järgmisesse määratud asukohta. Selline võimalus lubab robotil täita konkreetseid ülesandeid ilma inimese juhendamiseta. [24]

Robotitesse paigaldatud GPS-seadmed suudavad optimaalsetes tingimustes määrata roboti asukoha vähem kui 1-meetrise täpsusega. Kuid asukoha määramine ainuüksi GPS-i abil ei pruugi igas olukorras või rakendusvaldkonnas alati otstarbekas olla. Nimelt võivad ilmneda mitmed probleemid roboti täpse asukoha määramisel näiteks linnakeskkonnas või selle läheduses, kus esinevad kõrghooned. Lähedal asuvad hooned, puud või veekogud põhjustavad signaali peegeldumist ning levimist mitme erineva teekonna kaudu, mis toob esile signaali halvenemise. GPS-i häiringu korral võivad positsioneerimisvead ulatuda kuni mitmekümne meetrini. See probleem muudab roboti hetkelise asukoha täpse määramise ainuüksi GPS-seadmete kasutamisel keeruliseks. [26]

GPS-süsteemi väljakutsete leevendamiseks on uuring [27] välja pakkunud asukoha ja asendi määramise meetodi, mis kirjeldab mobiilsetes robotites lisaks GPS-ile täiendavate sensoreite kasutamist kaamerate näol. Uuring käsitleb autonoomseid navigeerimis- ja modelleerimisülesandeid. Töös on välja pakutud lahendus mobiilse roboti disainile, mille ülesandeks on navigeerida kindlaksmääratud asukohtade vahel ja jäädvustada valitud hoonetest ja takistustest 3D-skanneeringuid ja pilte. Roboti teekonna planeerimise süsteem kasutab määratud algus- ja sihtpunkte usaldusväärse liikumistrajektoori loomiseks. Igasse järgnevasse sihtpunkti jõudes kasutab robot oma andureid ümbritsevast keskkonnast skanneeringute ja kujutiste hankimiseks ning edastab need modelleerimissüsteemi. Seejärel liidab modelleerimissüsteem uued andmed olemasolevasse osamudelisse, laiendades järk-järgult selle ulatust kuni täieliku mudeli valmimiseni. Vaadete planeerimise süsteem määrab seejärel robotile järgmise parima andmete kogumise koha ja protsess kordub. Operatsiooni jälgimiseks on sellisele positsioneerimismeetodile välja pakutud ka kasutajaliides, mis annab operaatorile tervikliku ülevaate roboti asukohast ja selle tegevustest.

2.2.4. Robotite toitesüsteemid

Tööstuslikud statsionaarsed robotid töötavad tavaliselt fikseeritud asukohtades, kus on tagatud pidev juurdepääs toiteallikale. Seevastu peavad aga autonoomsed mobiilsed robotid toetuma parasjagu pardal olevatele toiteallikatele, mille energiamahutavus on sageli piiratud. Seetõttu on limiteeritud ka mobiilsete robotite efektiivne tööaeg. Kaasaskantavad mobiilsed energiaallikad tähendavad üldjuhul ka kõrgemaid esialgseid roboti ülesseadmise kulusid. Kuid kuna mobiilsete robotite järgi on nõudlus suur, siis on tähtis kasutada kulutõhusaid ja otstarbekaid lahendusi transporditavate toitesüsteemide näol. [28]

Tänapäeval kasutavad autonoomsed mobiilsed robotid peamise toiteallikana tavaliselt akusid, sisepõlemismootoreid või kütuseelemente. Teadusuuringud on seni lähemalt vaadelnud enamasti kahte lähenemisviisi mobiilse roboti tööaja pikendamiseks, milledeks on tarkvarapõhine toitehaldus ja riistvarapõhised lahendused. Tarkvarapõhised lahendused on pälvinud suurt tähelepanu, kuid need kipuvad olema rohkem spetsiifilised üksikutele robotimudelitele ja neid on keeruline liigitada erinevat tüüpi mobiilsete robotite vahel. Lisaks nõuavad need lahendused tihtipeale kompromisse kulutõhususe ja funktsionaalsuse vahel, mille tulemuseks on roboti arenduskulude minimaalne vähenemine. Teisest küljest hõlmavad riistvaraga seotud lahendused mitmeid tehnikaid nagu toiteallikate täiendamist ja optimeerimist või hübriidenergia süsteemide kasutamist. Eelnevad meetodid pakuksid suurt potentsiaali robotite kestvuse suurendamiseks ja energiavarustuse kulude vähendamiseks. [28]

Mitmeid mobiilsete robotite toiteallikaid analüüsinud uuring [29] vaatles peamiselt erinevaid robotites kasutatavaid akutehnoloogiaid, kuid võttis arvesse ja hindas ka teisi alternatiivseid energiaallikaid. Uuring arvestas kõige optimaalsema mobiilse roboti akutehnoloogia väljaselgitamiseks näiteks järgmiseid tegureid:

- Eeldatav läbitav distants ja maastiku keerukus;
- Nõutud liikumiskiirus ja kiirendus;
- Liigutatava koorma mass;
- Nõutud opereerimisaeg laadimistsüklite vahel;
- Võimalus vahetada akusid töötsüklite vahel;
- Aku dimensioonid ja mass.

Antud energiatarbimist käsitlenud uuring leidis, et kõige energianõudlikumaid protsesse viisid läbi roboti arvutus-, andur- ja kommunikatsioonisüsteemid. Autonoomse mobiilse roboti sõiduenergia ehk veojõu arendamine ja juhtimisülesannete läbiviimine moodustas väikese osa kogu energiatarbimise hulgast. Erinevate akutüüpide analüüsist selgus, et kõige optimaalsema lahendusena kerkis esile fosfaati sisaldav liitiumioon akutehnoloogia $LiFePO_4$. Nimetatud tüübi eelisteks teiste akude ees on kõrge energiatihedus ja head ohutusomadused. Roboti massi ja selle elektroonikakomponentide toiteks vajalikku võimuse suhet arvesse võttes on võimalik sellise akutüübi elementidest kokku panna soovitud energiahulga ja pingeväärtusega akupakke.

2.2.5. Robotite hooldusstrateegiad

Mobiilse roboti töökindluse taseme hindamine ja saavutamine on mitmete omavahel seotud muutujate tõttu keeruline protsess. Roboti madal töökindlus võib põhjustada kõrgeid hoolduskulusid, ohutusriske ja ebamugavusi töö läbiviimises. Sellest tulenevalt on jõudluse ja kvaliteedi tagamine robotsüsteemides hädavajalik. [30]

Teadustöös [31] uuriti mitme-roboti süsteemide hooldusstrateegiaid. Sealhulgas pakuti välja optimaalne lähenemisviis tõrketaluvuse ja suurema jõudluse tagamiseks. Määratud optimaalne strateegia sisaldas kombinatsiooni ennetavast- ja vajaduspõhisest hooldusest. Strateegia kohaselt viiakse vajaduspõhist hooldust läbi alles siis, kui robotites esineb mõni süsteemitõrge. Töös rakendatud simulatsioonikatsed näitasid mainitud strateegia tõhusust eelkõige juhtudel, kui robotites esinevate tõrgete arv kasvas eksponentsiaalselt.

Teine mobiilsete robotite hooldusstrateegiaid vaadelnud eksperiment [32] järeldas, et robotsüsteemide hooldusintervallide määramisel ja hooldustegevuste korraldamisel on oluline läbi viia hooldusanalüüs. Eksperimendis kasutati andmete kogumiseks neljarattalist mobiilset robotit. Robotsüsteemi remondiandmeid koguti 7480 töötunni vältel ning selle aja jooksul esines robotis 117 riket. Salvestatud tõrked ja läbi viidud hooldustoimingud aitasid analüüsida järgmise remondini kuluvat aega. Lisaks soovitab uuring selliste hooldusanalüüside potentsiaalset kasutamist sarnaste robotsüsteemide töökindluse ja hooldatavuse omaduste ennustamiseks, aidates robotitootjatel süsteemi kavandamist ja toimimist täiustada.

2.3. Veatuvastus ja hooldus võrguseadmetes

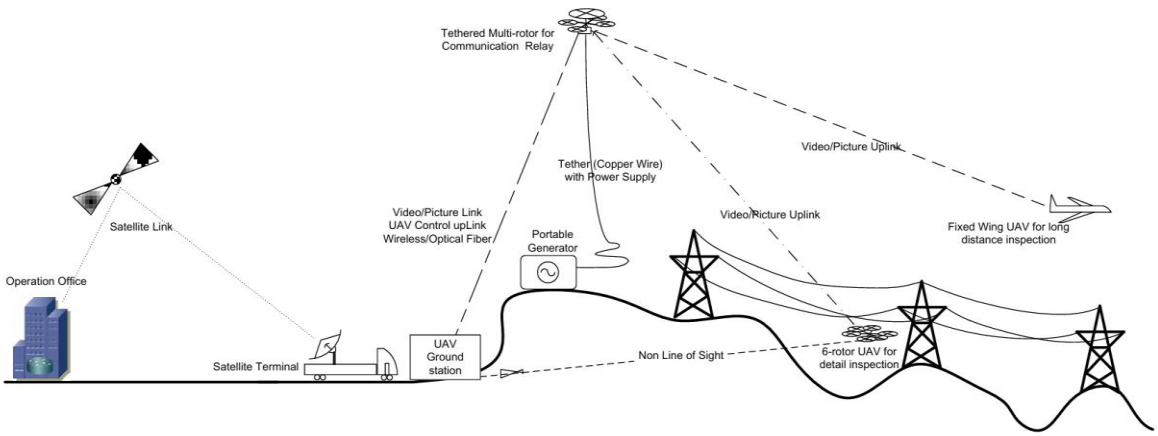
2.3.1. Elektriedastusliinid

Meie ühiskonna sõltuvus katkematust elektrist pidevalt suureneb. Elektrienergia tootjate, turustajate ja tarbijate rahalisi kulutusi tuleb ilmtingimata võimalikult madalal hoida ning seetõttu on oluline vähendada rikete esinemist nutivõrkude elektriedastusliinides [33]. Elektriedastusliinid on tihtipeale vastuvõtlikud karmidele keskkonnatingimustele nagu temperatuurikõikumised, niiskus ja liigne taimestiku kasv. Nimetatud keskkonnatingimuste eiramine võib põhjustada suureulatuslike elektrikatkestusi või isegi metsatulekahjusid [11]. Seepärast on tähtis läbi viia liinide regulaarset ülevaatust defektide kiireks tuvastamiseks ja hooldustegevuste efektiivseks planeerimiseks [33].

Senised praktikates kasutatavad klassikalised elektriliinide kontrollimise meetodid on näiteks inspektsioon mehitatud liikuva patrulli või helikopteri abil. Mehitatud patrullid uurivad liine visuaalselt, kasutades selleks binokleid ja infrapuna kaameraid. Olenemata antud kontrollmeetodi täpsusest võib see lõppkokkuvõttes osutuda aeglaseks ja subjektiivseks tegevuseks. Nimelt võivad patrullil jääda märkamatuks defektid elektriliinidel, mis pole maapinnalt vaadates kergesti nähtavad. Seevastu on helikopteri abil liinide kontrollimine küll kiirem meetod, kuid võib kujuneda suhteliselt kulukaks ja ebatäpseks protsessiks. Eelnimetatud piirangute kontekstis tõuseb esile autonoomsete mobiilsete robotite kasutamise olulisus elektriedastusliinide inspekteerimiseks. Mobiilsed robotid, nii mehitamata õhusõidukite kui ronimisrobotite vormis, pakuksid praeguste meetoditega võrreldes perspektiivikat potentsiaali kiiremaks, täpsemaks ja majanduslikult otstarbekamaks liinide kontrollimiseks. [33]

Teadusuuring [11] tutvustab meetodit elektriliinide autonoomseks kontrollimiseks, kasutades selleks maanduskaabli peal liikuvat kaabliinspektsiooni robotit CIR (inglise keeles *cable inspection robot*). Robot on varustatud laserskanneerimise seadmega LiDAR (inglise keeles *color infrared light detection and ranging*), mis mõõdab roboti ja inspekteeritava objekti vahelist kaugust ning lubab koguda kolmedimensioonilisi andmeid. Meetodi abil analüüsitud andmeid saab kasutada vigaste kaabliosade tuvastamiseks. Uuringus pakuti välja kaheetapiline kontrollprotsess, mis sisaldas liinide eelkontrolli vigade leidmiseks ning järelkontrolli vigaste osade üksikasjalikumaks diagnoosimiseks.

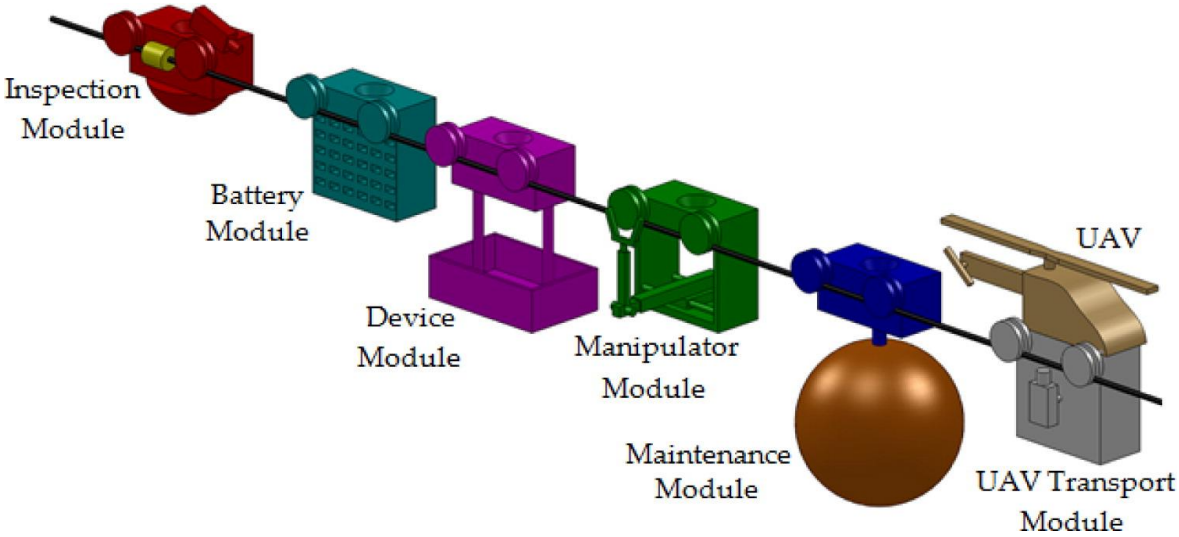
Alternatiivne uuring [34] on kirjeldanud nutivõrkude areneval ajastul kasvavat huvi mehitamata õhusõidukite kasutamise vastu elektriliinide kontrollimisel. Uurimistöö on välja pakkunud lähenemisviisi, kus kasutatakse korraga mitut erinevat tüüpi UAV-d. Iga UAV tüüp täidab sellises kontrollprotsessis kindlat rolli. Strateegiaga integreeritud side- ja juhtimissüsteemid optimeerivad signaaliedastuse kvaliteeti ja kaugust. Joonis (joonis 5) illustreerib liiniinspektsioonis UAV-süsteemide kasutuselevõttu koos side- ja juhtimislahendustega. Toimingu käigus kasutatakse kolme tüüpi autonoomset UAV-d: üks pikamaa eelkontrolliks, teine lühimaa detailseks inspektsiooniks jaoks ja kolmas neist toimib sideühenduse võimendina. Pikamaa eelkontrolli teostab fikseeritud tiibadega õhusõiduk, mis jälgib elektrimastide, -liinide ja isolaatorite üldist seisukorda. Seejärel viiakse läbi lähivaatus liinidefektide tuvastamiseks multirootor tüüpi UAV abil, millel esineb võimekus aeglasemalt lennata ja ühe koha peal õhus liikumatult püsida. Sideühenduse võimendina toimiv kolmas UAV on samuti multirootor, kuid see on piiramatu õhus püsimise tagamiseks ühendatud maapinnalt kuni 100-meetrise toitekaabliga. Sidevõimendi kasutamise vajalikkus protsessis põhineb sellel, et geograafilistest takistustest tuleneva visuaalse otsenähtavuse (inglise keeles *visual line of sight*) puudumisel maapealse juhtimisjaama ja inspektsiooni teostava õhusõiduki vahel võivad sageli tekkida mitmesugused signaalihäired.



Joonis 5. Uuringu poolt välja pakutud lahendus liiniinspektsiooni teostamiseks, kasutades samaaegselt mitut tüüpi UAV-süsteemi. [34]

Hoolimata teoreetiliste ja eksperimentaalsete uuringute edusammudest elektriliinide hooldamiseks kasutatavate isetoimivate lahenduste väljatöötamisel esinevad praktikas endiselt murekohad, mis on seotud robotite stabiilsuse, võimekuse ja autonoomsusega. Inimtöötajate abistamiseks või asendamiseks on antud valdkonnas välja pakutud lahendusi alates 20. sajandi lõpust. [35]

Uurimistöö [35] on välja käinud modulaarse ja autonoomse robotlahenduse kõrgpinge elektriliinide kontrollimiseks ja hooldamiseks. Süsteem koosneb kompaktsetest moodulitest, millest igaühel on oma kindel funktsioon (joonis 6). Üks neist on UAV-d kaasas kandev moodul. Modulaarne disain võimaldab luua moodulitest ülesandepõhiseid konfiguratsioone. Näiteks saab mobiilse robotiga kaasas olev UAV transportida vastavaid mooduleid üle keeruliste takistuste nagu elektrimastide ja signaalvalgustite. Lisaks on UAV funktsiooniks veel üksikasjalike piltide tegemine. Parasjagu süsteemi kaasatud moodulid saavad täita mitmesuguseid ülesandeid, mille hulka kuuluvad liinide ülevaatus ja hooldamine. Moodulsüsteemiga mobiilse roboti lähenemisviisi eesmärgiks on anda kinnitust, et rohkete funktsioonidega täidetud üksainus robot oleks oma suuruse ja kaalu tõttu ebapraktiline.

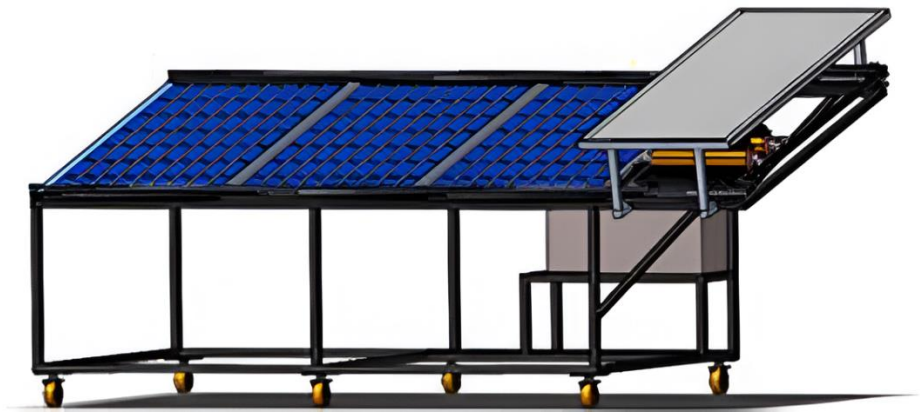


Joonis 6. Modulaarse liiniinspektsiooniks ja -hooldamiseks mõeldud robotsüsteemi osad. [35]

2.3.2. Taastuvenergiasüsteemid

Päikeseenergiasse investeerimine on paljudes arenenud riikides järjepidevalt suurenenud. Päikesepaneelides olevad fotogalvaanilised (inglise keeles *photovoltaic*, PV) elemendid muundavad päikesevalguse elektrienergiaks ja nende tõhusust mõjutavateks teguriteks võivad olla, temperatuur, varjutus ja tolmu kogunemine. Ilma regulaarse hooldamiseta võib tolm vähendada paneelide efektiivsust 10 kuni 40 protsendi võrra. Traditsioonilised manuaalsed hooldusmeetodid on aga töömahukad ja nõuavad palju vett. Need kujutavad ka endast ohutusriske, kuna hooldustoiminguid teostavatel töötajatel on tihtitpeale vajalik kõrgetel konstruktsioonidel ronida. [14]

Uuring [14] on demonstreerinud PV-paneelide puhastamiseks ja kahjustuste tuvastamiseks mõeldud mobiilse robotsüsteemi (joonis 7) disaini ja tööpõhimõtet. Süsteemi teeb mobiilseks see, et seda on võimalik teisaldada ühest asukohast teise. Roboti juhtimisarhitektuur on spetsiaalselt kohandatud hoonete katustel asuvate PV-paneelide puhastamiseks. Robotis kasutatakse süsteemi üldiseks halduseks mikrokontrollerit Arduino Mega ning interneti kaudu kaugjuhtimiseks mikroarvutit Raspberry Pi. Paneelidelt tolmu ja muu mustuse eemaldamiseks, kusjuures selleks vett kasutamata, on robotile lisatud põhja alla mikrofiibrist harjad. Paneelidel liikumine toimub rihmratastega mehhanismi abil. Tööprotsessi ajal järgib mobiilne robot varasemalt ette antud puhastusrada. Protseduuri käigus on operaatoritel võimalik roboti tegevust otseülekandes jälgida. Lisaks on robotil võime iseseisvalt naaseda laadimiseks dokkimisjaama ning eelseadistatud ajakavade alusel alustada puhastustöid.



Joonis 7. Uuringu pakutud lahendus PV-paneelide puhastamiseks ja kontrollimiseks. [14]

Süsinikuvaba taastuvenergia tootmiseks loodud tuuleturbiinid vajavad analoogselt päikesepaneelidele regulaarset hooldust. Peamised tuuleturbiine mõjutavad keskkonnategurid on jää, tolm ja UV-kiirgus. Kõik nimetatud tegurid võivad tuuleturbiinide jõudlust märkimisväärselt vähendada. Tavapäraselt hooldatakse neid manuaalselt inimtöötajate poolt, kes kasutavad selleks kraanasid või trosse. Ohutuse ja töö efektiivsuse suurendamiseks püütakse ka selles valdkonnas hooldus- ja kontrolltoimingute jaoks välja töötada mobiilseid roboteid, mis vähendaksid inimeste sekkumise vajadust ohtlikes tingimustes. [36]

Tuuleturbiinide süsteemide hooldustöid läbiviivale mobiilsele ronimisrobotile on teadusuuring [36] välja pakkunud disaini ning arendusprotsessi. Nimelt oli selle töö peamiseks eesmärgiks luua robotsüsteem, mis suudaks autonoomselt tuuleturbiini masti küljes liikuda ning seda inspekteerida. Roboti disain koosneb kolmest põhikomponendist, milleks on sõidumehhanism, haardemehhanism ja kere. Sõidumehhanism hõlbustab roboti vertikaalset liikumist mööda koonuselist tuuleturbiini masti, kasutades selleks nelja suure pöördemomendiga alalisvoolumootorit. Kergekaaluline alumiiniumist valmistatud kere hoiustab elektroonikat ja haardemehhanismi, millest viimane rakendab masti pinnal haarde säilitamiseks samm-mootoreid ja terastrossi. Kirjeldatud disain võimaldab robotil kohaneda erinevat läbimõõtu tuuleturbiinide süsteemide mastidega ja tagab mobiilsuse põhjalikuks masti kontrollimiseks. Uuringus viidi läbi ka jõuanalüüs, mille tulemustest võib järeldada, et roboti tööprotsessi ajal (ka kehvades ilmastikutingimustes) on tagatud selle stabiilsus ja funktsionaalsus.

Kuigi katses ei käsitletud konkreetselt turbiini puhastamist vaid pigem liikumis- ja ronimisviisi, siis võivad vastavalt töö autorite seisukohale tulevased roboti versioonid sisaldada täiendavaid seadmeid. Järgmiseks disaini arenguetapiks oleks autorite sõnul seda tüüpi mobiilsele robotile puhastusmehhanismi lisamine. [36]

2.4. Energiaülekande seire

Ühiskonnas kasvava energiatarbimisega kaasneb ka ebaseadusliku elektritarbimise suurenemine, mis võib jaotussüsteeme liigselt koormata. Illegaalse elektritarbimise juhtumite tuvastamine seab lisakohustusi energiavarustuse ettevõtetele kogu maailmas. Näiteks on Türgi energeetika ja loodusvarade minister rõhutanud, et illegaalne elektritarbimine moodustab 19% riigi kogutarbimisest. Sarnased probleemid esinevad ka teistes piirkondades, kus tehakse jõupingutusi tõhusate ebaseadusliku elektrikasutuse kaugtuvastusmeetodite väljatöötamiseks. [37]

Madalpinge toitesüsteemides edastatakse elektrienergiat alajaamadest lõpptarbijateni. Kui rääkida elektrienergia jaotamisest, siis esineb selle käigus kahte tüüpi kadusid. Tehnilisteks kadudeks nimetatakse elektrienergia vältimatut muundumist soojusenergiaks, mis tuleneb elektriliini takistusest. Mittetehnilised kaod on aga seotud elektri ebaseadusliku kasutamisega [38]. Elektrienergiat on süsteemis ebaseaduslikult võimalik kasutada mitmel erineval moel. Peamiseks illegaalseks tarbimise meetodiks on energiaarvesti rikkumine või selle töö häirimine [39].

Lahendusena on teadusartiklis [37] välja pakutud süsteem ebaseadusliku elektrikasutuse tuvastamiseks, kasutades selleks elektriahelas andureid, nutikaid arvestid ja mobiilseid roboteid. Süsteem sisaldab elektriedastuskeskuses põhienergiaarvestit (inglise keeles *main energy meter*, edaspidi MEM) ja nutikaid arvesteid (inglise keeles *terminal smart meter*, edaspidi TSM) lõpptarbijate juures. MEM mõõdab kogu edastatud energiahulka ning TSM-id mõõdavad lõpptarbijate individuaalset tarbimist. MEM-i ja TSM-i näitude erinevused viitavad võimalikule ebaseaduslikult elektrikasutamisele. TSM-idel on võime käsu peale vool sisse ja välja lülitada ning kui MEM tuvastab TSM-ide väljalülitumisel endiselt voolutugevust, siis saab illegaalne energiakasutus konkreetsel liinil kinnitust.

Mobiilsete robotite roll pakutud strateegia juures on ebaseadusliku elektrikasutuse täpsem lokaliseerimine. Kuigi TSM-id suudavad tuvastada tarbimises anomaaliaid, ei saa nad füüsiliselt kontrollida ega põhjalikult tuvastada ebaseadusliku tarbimise asukohta. Nimelt ei pruugi elektrivargus ilmtingimata esineda lõpptarbija juures vaid hoopis mõnes muus asukohas liinil. Kaamerate ja sensoritega varustatud mobiilne robot pakuks oma füüsilise kohalolekuga kinnitust sellele, kus kohas rikkumine täpselt aset leiab. [37]

3. STRATEEGIA MOBIILSETE ROBOTITE INTEGREERIMISEKS NUTIVÕRGU ENERGIAHALDUSESSE

3.1. Strateegia eesmärk

Tuginedes kirjanduse ülevaates kogutud andmetele ja välja toodud varasematele uuringutele saab väita, et mobiilsete robotite integreerimine nutivõrgu energiahaldusesse on tähtis ja uuenduslik samm võrgu kaasaegsemaks muutmisel. Mobiilsete robotite rakendamine võrguhaldusesse parandaks eeldatavasti oluliselt energia jaotamise ja tarbimise tõhusust, töökindlust ja jätkusuutlikkust. Maapealsete masinate ja mehitamata õhusõidukite kujul robotid pakuksid võrgutaristule mitmesuguseid kontrolli- ja hooldusvõimalusi, lihtsustades elektriliinide, alajaamade ja taastuvenergiasüsteemide haldamist. Anduritega varustatud robotid ja nutikad energiaarvestid koguksid andmeid võrgu jõudluse ja keskkonnatingimuste kohta, võimaldades läbi viia ennetavat hooldust ja kiiret reageerimist võimalikele probleemidele.

Käesolevas lõputöös on autor varasematele uuringutele tuginedes lahendusettepanekuna välja käinud laiapõhjalise energiahaldamise strateegia nutivõrgus. Pakutud strateegia loob ettekujutuse sellest, kuidas erinevad võrgukomponendid nagu mobiilsed robotid, nutikad energiaarvestid, kodumajapidamistes leiduvad kaugjuhitavad seadeldised ning tsentraliseeritud juhtimissüsteem koos tarkvaraplatvormiga võiksid omavahel nutivõrgus koostööd teha. Nimetatud komponentide panuseid omavahel koordineerides on strateegia eesmärgiks täiustada võrgu reaalajas jälgimist, prognoositavat hooldust, nõudlusele reageerimist ja taastuvenergiaallikate integreerimist. Eesmärgipõhiselt analüüsitud strateegia võiks seeläbi luua usaldusväärse, säästliku ja targa energiahaldusmeetodi nutivõrgus nii elektritootjate- kui ka tarbijate perspektiivist vaadates. Lisaks paneks see aluse vastupidavale ja kohanemisvõimelisele elektrivõrgule, mis suudaks pikaajaliselt toime tulla ka tulevaste põlvkondade energiavajadustega.

3.2. Reaalajas võrgu seiramine ja andmete kogumine ning ennetav hooldus

Kavandatava strateegia tuumaks on mobiilsed robotid. Mobiilsete robotite peamisteks tööülesanneteks on inimtöötajate abistamine reaalajas nutivõrgu inspektsiooni korraldamisel, andmete kogumisel ja ennetava hooldustöö teostamisel. Võrguseire ja andmete kogumine hõlmavad endas nii mehitamata õhusõidukite kui ka maapealsete robotite kasutamist. Energiatarbimise hulga kohta koguvad kahesuunalisi andmeid kodudesse ja tööstushoonetesse paigutatud statsionaarsed nutikad energiaarvestid.

Elektriülekandeliinide ja -mastide regulaarset kontrolli teostavad strateegia kohaselt õhu kaudu mehitamata õhusõidukid ehk droonid. Seireülesannetesse on kaasatud nii autonoomsed fikseeritud tiibadega droonid kui ka manuaalselt kaugjuhitavad multirootorid. Mõlemal tüübil on nutivõrgu seireprotsessis erinev, kuid üksteist toetav ja oluline roll. Mitmete kaameratega varustatud fikseeritud tiibadega autonoomsed droonid lendavad mööda eelnevalt defineeritud marsruuti ning teostavad peamiselt kauglende. Kuigi need pakuvad eelkõige ülevaadet elektriliinide seisukorrast, võib nende lennuteekonda aegajalt suunata ka üle elektritootmisüksuste ja alajaamade. Droonidele paigaldatud kõrge eraldusvõimega kaamerate abil jäädvustatakse võrguseadmetest detailseid kaadreid. Termokaameratega tuvastatakse temperatuuri kõikumisi, mis võivad viidata võimalikele riketele või ebatõhusatele seadmetele. Kauglennul avastatud rikkeid ja potentsiaalseid võrguhäiringuid võib vastavalt vajadusele lähemalt kontrollida multirootor tüüpi drooniga, mida kaugjuhitakse võrgutöötajate poolt manuaalselt. Multirootori kohapeal hõljumise võimekus lubab läbi viia põhjalikku lähiinspektsiooni ning aitab hooldustöid paremini planeerida. Samuti võib uuringu [11] näitel lisada multirootorile LiDAR-tehnoloogiat kasutava kaamera, mis võimaldab ümbritsevast keskkonnast detailsete kolmedimensiooniliste mudelite loomist. Reaalne seireolukord näeks välja nii, et kauglennul märgatud võimalik oht elektriliinidele näiteks langenud puude või liigse taimestiku kasvu näol fikseeritakse asukohapõhiselt. Seejärel juhitakse muul viisil raskesti ligipääsetavale sündmuspaigale multirootor, mis salvestab lähivaatusel täiendavaid pilte, videoid ja vastavalt olukorrale ka 3D-skanneeringuid. Kogutud materjali põhjal saab hooldusmeeskond ohu likvideerimiseks välja töötada optimaalse tööplaani.

Kirjanduse ülevaates välja toodud praktiline eksperiment [34] on tõestanud, et mitut tüüpi mehitamata õhusõidukite kasutamine omab märgatavat eelist täielikult manuaalse liiniinspektsiooni ees ning paneb aluse kiirematele ja tõhusamatele seiretoimingutele.

Mobiilsed robotid pakuvad ulatuslikult võimalusi elektriliinide inspekteerimiseks. Ent siiski on senised varasemad eksperimendid ja uuringud robotite liinihoolduse valdkonnas näidanud, et nende kasutamine võib hooldustööde raames olla piiratud või pakutud lahendusi on tegelikus olukorras keeruline ellu viia. Seega on strateegia kohaselt vajalik kuni tehnoloogia arenemiseni jätkata inimtöötajate kaasamist ennetavatesse ja vajaduspõhistesse elektriliinide hooldustoimingutesse.

Nutivõrgu elektrialajaamades kasutatakse välja pakutud strateegia järgi jaama seiramiseks ja hooldamiseks ratastel liikuvaid autonoomseid mobiilseid roboteid. Maapealsed mobiilsed robotid tegutseksid inimtöötajate kõrval abilistena. Abistavad robotid on alajaama jälgimise ja väikesemahuliste hooldustööde läbiviimise võimekuse tagamiseks varustatud andurite ja mehaaniliste robotkätega. Selline lähenemine vähendaks inimeste sekkumise vajadust alajaama seireprotsessidesse ja hooldustoimingutesse. Robotite mobiilsuse tõttu on tagatud võrgu pidev jälgimine, mis vähendab vajadust suure hulga statsionaarsete jälgimisseadmete paigaldamiseks piirkonnas.

Mehaanilised robotkäed on maapealsetele mobiilsetele robotitele lisatud täpsust nõudvate ülesannete täitmiseks. Neid on võimalik vastavalt vajadusele programmeerida ja kohandada spetsiaalsete tööriistade kasutamiseks. Näitena võiksid robotkäed üldistatud kontekstis alajaama seadmete polte pingutada või väiksemaid komponente asendada. Samuti looks robotkäe kasutamine võimekuse nii elektrit juhtivate kui ka isoleeritud osade puhastamiseks, tagades inimtöötajatele suurenenud ohutuse. Uurimistöö [40] on läbi simulatsiooni- ja välikatsete kinnitanud kahe robotkäe kasutamise edukust mobiilsetel robotitel. Nimetatud töö autorite sõnul demonstreerib pakutud meetod robotite intelligentsust ning on inseneripraktikas võrdlemisi kasulik lahendus.

Käesolevas töös varasemalt mainitud uuring [10] on rõhutanud inimesi abistavate maapealsete robotite mitmekülgsust ja tõhusust nutivõrkudes ning seda eelkõige kontroll- ja hooldusprotsessides. Maa peal liikuvad mobiilsed robotid on võimelised tulemuslikult alajaamades navigeerima, vältides takistusi ja pääsedes ligi aladele, mis võivad inimestele ohtu kujutada. Lisaks võimaldab nende pidev kohalolek reaalajas mitmekülgseid andmeid koguda. Sellise strateegia rakendamine tõstaks uuringu alusel märkimisväärselt elektrialajaamade automatiseerimise, töötõhususe ja ohutuse taset ning aitaks kaasa vastupidavamale nutivõrgu infrastruktuuri loomisele.

Elektritaristu töökindluse suurendamise kontekstis on nutivõrkudes andmete kogumiseks nutikate energiaarvestite kasutuselevõtt oluline strateegia. Energiahalduse metoodika ettepaneku raames on käesoleva töö autor otsustanud strateegiasse integreerida eksperimentaalse uuringu [41] näitel GSM telekommunikatsiooni standardit kasutavad nutikad energiaarvestid. Nutikad energiaarvestid on arenenud energiamõõtmisseadmed, mis edendavad kahepoolset andmeedastust tarbijate ja kommunaalteenuste pakkujate vahel. Nende ülesandeks on reaalajas jälgida ja juhtida energiatarbimist [41]. Mobiilside kommunikatsiooni kasutades saavad arvestid mugavalt interneti kaudu edastada tarbimisandmeid teenusepakkujale. Elektrienergia kahesuunalise mõõtmise võimekus muudab need sobilikuks tarbijate jaoks, kes lisaks võrgust energia tarbimisele seda ise ka näiteks PV-paneelide abil toodavad. Veebipõhine andmeedastus aitaks teenusepakkujatel optimeerida võrguhaldust ja vähendada tegevuskulusid, kuna arvestite näitude lugemine on automatiseeritud. Ühtlasi aitaks uuringu [37] põhjal järeldades nutikate arvestite kasutuselevõtt tuvastada illegaalset energiatarbimist ja täiustada energiavõrgu üldist turvalisust. Nimelt jälgivad arvestid kõrvalekaldeid energiakasutuses, tuvastavad ebaseadusliku ligipääsukatse elektrienergiale ning teavitavad sellest nutivõrgu juhtimiskeskusele.

3.3. Nõudlusega kohanemine ja koormuse tasakaalustamine

Strateegia järgi on elektrienergia tarbijate nõudlusega kohanemiseks tarvis integreerida nutivõrgu energiahaldusesse algoritm, mis analüüsib nutikatelt arvestitelt kogutud andmeid. Algoritm aitaks dünaamiliselt optimeerida energiatarbimist ja tasakaalustada võrgukoormuse jaotust. Algoritm ehitatakse üles SCADA-põhilisele energiahaldussüsteemi tarkvarale, mida rakendatakse nutivõrgu tsentraliseeritud juhtimiskeskuses. SCADA süsteem on nutivõrgu seadmetega integreeritav ning selle kaudu on võimalik teostada energiavoo juhtimist [6].

SCADA-põhise energiahaldussüsteemi võimekus analüüsida kogutud andmeid elektrienergia tarbimise kohta võimaldaks nutivõrku täpsemalt jälgida ja juhtida [6]. Strateegias mängivad olulist rolli kodumajapidamistes olevad nutikad seadeldised, mille hulka võivad kuuluda kliima- ja kütteseadmed, elektriautode laadijad ja veeboilerid. Need seadmed suhtlevad pakutud meetodi kohaselt kirjeldatud algoritmiga, et tõhustada tarbimist tipptundide ajal, mil nõudlus on kõige suurem. Algoritmi abil juhitakse näiteks kliima- ja kütteseadmete temperatuuri, elektriautode laadimistsükleid tipptunni välistele aegadele ja veeboilerite kütteprotsesside intensiivsust – kõik see võiks kaasa aidata koormuse tasakaalustamisele ja võrgu stabiilsusele.

3.4. Energia salvestamine ja taastuvenergiaallikate integreerimine

Taastuvenergiasüsteemid on nutivõrgu lahutamatu osa. Need kujutavad endast PV-paneelide ja tuuleturbiinide näol säästvaid energiaallikaid, mis võitlevad kliimamuutusega ja on võimelised reageerima muutuvatele energiatööstuse tehnoloogiatele [42]. Seetõttu on vajalik käesolevasse energiahalduse strateegiasse koondada ka nende süsteemide abil toodetud üleliigse energia salvestusmeetod. Samuti nõuavad taastuvenergiasüsteemid perioodilist hooldust, mida on võimalik läbi viia autonoomsete lahenduste rakendamisel, mille hulgas on ka töös varasemalt kirjeldatud lahendused.

Strateegiaga on kaasatud varasema teadustöö [43] eeskujul kirjeldatud energia salvestamise lahendus. Uuring soovitab küll mitut erinevat võtet nutivõrgus üleliigse energia hoiustamiseks, kuid parasjagu käsitletava lahendusettepaneku raames on neist kõige optimaalsem valik kogukonna energia salvestamise kontseptsioon. Uuringu autorite sõnul tähendab kogukonna kontseptsioon seda, et elamurajoonide madalpinge toitepunktidesse paigaldatakse akude näol väikesemahulised energiasalvestid. Salvestid võimaldavad hoiustada näiteks PV-paneelidega toodetud üleliigset elektrienergiat ning suure võrgukoormuse korral seda kogukonnas paiknevatele tarbijatele uuesti kasutamiseks edastada. Ühtlasi on akuseade võimeline haldama võrgus esinevaid pingeväätuste kõikumisi. Nimelt suudab see vastavalt vajadusele neelata või vabastada energiat, mis aitab säilitada stabiilset pingetaset ja tagada tarbijatele ühtlase kvaliteediga elektrienergiat.

Päikeseenergia süsteemide hooldamise valdkonnas on autor integreerinud PV-paneelide puhastamiseks loodud mobiilse robotsüsteemi. Nimelt on välja pakutud strateegiasse rakendatud eelnevalt kirjanduse ülevaates mainitud lahendus [14] autonoomse robotsüsteemi kujul, mida on selle mobiilsuse tõttu vajadusel mugav ühelt päikesepaneelilt teisele liigutada. Konkreetne mobiilne robotsüsteem koos laadimisdokiga on vajalik lahendus automatiseerimaks PV-paneelide puhastamist nutivõrgus, et säilitada paneelide efektiivne elektrienergia tootlikkus.

Tuuleturbiinide hooldamise strateegia väljapakkumisel on samuti tähtis protsessi kaasata automatiseeritud lahendusi mobiilsete robotite näol. Sarnaselt teaduslikus töös [44] kirjeldatud näitele hõlmab käesolevas lõputöös pakutud tuuleturbiinide hooldamise strateegia endas mitmest robotist koosneva süsteemi kasutuselevõttu. See konkreetne roboti tüüp on varustatud tööstusliku robotkäega ning on arendatud hõõrdepõhist mehhanismi kasutades tuuleturbiini laba külge haakuma. Mobiilsele robotile lisatud robotkäsi lubab sellel läbi viia mitmeid turbiini hooldustoiminguid nagu puhastamine, pinnasekahjustuste parandamine ning mittepurustavat kontrolli (inglise keeles *non destructive testing* ehk NDT). Lahenduse puuduseks on see, et seda tüüpi robot tuleb inimtöötajale poolt manuaalselt turbiini laba külge paigaldada. Strateegiasse on ka viidatud teadustöö baasil kaasatud multirootor tüüpi droonid, mis teostavad esmast tuuleturbiini kahjustuste tuvastamist ning suunavad hooldusroboteid konkreetsete veaasukohtade juurde.

3.5. Strateegia rakendamise sammud, selle kasulikkus ja tulevane uurimistöö

Kavandatud mobiilseid roboteid hõlmav energiahaldusstrateegia nutivõrgus sisaldab endas selle ellurakendamiseks mitmeid erinevaid põhietappe. Strateegia algab olemasoleva võrguinfrastruktuuri põhjaliku hindamisega. Hindamisele järgneb nutikate energiaarvestite ja mobiilsete robotite integreerimine võrgu töösse. Paralleelselt nende integreerimisega töötatakse välja nõudlusele reageerimise algoritm, mis kohandatakse võrgu spetsiifiliste vajaduste järgi. Seejärel käivitatakse valitud nutivõrgu piirkonnas pilootprogramm, mis kinnitaks enne strateegia järkjärgulisemat laiendamist selle kasulikkust.

Mobiilsete robotite integreerimine nutivõrgu energiahaldusesse sümboliseerib progressiivset lähenemisviisi, mille eesmärgiks on suurendada võrgu töökindlust, optimeerida energia kasutamist ja edendada jätkusuutlikkust. Võrguseisakute ja elektrikatkestuste ohtude vähendamiseks rakendatakse reaalajas jälgimiseks ja andmete kogumiseks anduritega varustatud mobiilseid roboteid, mis aitavad kaasa ennetava hoolduse läbiviimisele ja kiirele reageerimisele võimalike probleemide korral. Lisaks võimaldab strateegia tasakaalustada elektrienergia tarbimise koormust tipptundide ajal. Selleks on tarvis strateegiaga kaasata nõudlusele reageerimise algoritm. Algoritmist saavad madalamate energiakulude näol peamist kasu tarbijad, kelle kodumajapidamistes olevate seadmete tarbimismustrit on võimalik kohandada vastavalt energiahindade kõikumisele. Taastuvate energiaallikate laialdane integreerimine ja nende autonoomne hooldamine mobiilsete robotite abil aitab kaasa süsihappegaasi heitkoguste vähendamisele. Välja pakutud strateegia tähtsaks omaduseks on veel selle kohanemisvõime. Nimelt võimaldab kavandatud strateegia uute tehnoloogiate ilmnemisel ja nutivõrgu infrastruktuuri laienemisel vastavad muudatused ilma olulise elektrivõrgu korrigeerimiseta vastu võtta.

Käesoleva töö autori hinnangul võiks tulevane üürimistöö selles valdkonnas käsitleda tehisintellekti integreerimist energiahaldust läbiviivate mobiilsete robotite süsteemidesse. Näiteks võiks robotite treenimine stiimulõppe kaudu parandada nende võimet hallata ja jälgida nutivõrku seadmeid dünaamiliselt muutuvas võrgukeskkonnas. Andmepõhist tõenäosusele tuginevat masinõpet jätkusuutlikus nutivõrgus uurinud teadustöö [45] on kirjeldanud, kuidas stiimulõpe lubab robotitel läbi simulatsioonikatsete õppida ülesannete läbiviimiseks optimaalsete strateegiate tarvitusele võtmist. Varasemalt treeningute käigus omandatud kogemus võimaldaks neil uuringu sõnul paremini kohaneda ettearvamatute situatsioonidega nutivõrgus.

KOKKUVÕTE

Mobiilsete robotite integreerimine nutivõrgu energiahaldussüsteemidesse pakub ümberkujundavat lähenemist traditsionaalsetele energiajaotuse ja -tarbimisega seotud väljakutsetele. Käesoleva lõputöö struktuur koosneb kirjanduse ülevaatest ning välja pakutud strateegiast, mis tutvustab mobiilsete robotite ja elektrivõrgu seadmete nagu nutikate energiaarvestite ja tarkvarapõhise juhtimissüsteemi omavahelise koostöö võimalusi.

Kirjanduse ülevaate jaotises on uuritud mobiilsete robotite integreerimise potentsiaali nutivõrgu infrastruktuuri energiahaldusprotsessidesse, käsitledes kasvavat vajadust tõhusa ja jätkusuutliku elektrienergia järele. Kirjeldatud on nutivõrgu olulisust ja selle tööpõhimõtteid. Samuti on töös uuritud mobiilsete robotite rakendusvaldkondi nutivõrkudes ning vaadeldud robotite tehnilisi aspekte. Olulisemad rakendusvaldkonnad on näiteks elektriliinide, päikesepaneelide ja tuuleturbiinide kontrollimine ning nende autonoomne hooldamine. Tehnilised aspektid hõlmavad endas robotite juhtimis- ja liikumissüsteeme, sensorite vajalikkust, toiteallikad ja hooldusstrateegiaid.

Lahendusettepanekuna on töös esitatud terviklik strateegia mobiilsete robotite kasutamiseks nutivõrgu energiahalduses. Strateegiaga käsitletavateks valdkondadeks on reaalajas võrgu jälgimine, andmete kogumine, ennetav hooldus, nõudlusele reageerimine ja taastuvenergiasüsteemide integreerimine. Strateegia koostamisel tuginetud varasemate uuringute põhjal võib järeldada, et strateegia rakendamine võimaldaks nutivõrkudel saavutada suuremat efektiivsust ja töökindlust.

Lõputöö autor on töös esile tõstnud mehitamata õhusõidukite ja maismaal liikuvate autonoomsete sõidukite näol olevate mobiilsete robotite olulisuse järelvalve- ja hooldustoimingute täiustamisel nutivõrgus. Sellised robotid suurendavad reaalajas võrgusüsteemide jälgimise, ennetava hoolduse ning probleemidele kiire reageerimise abil võrgu vastupidavust. Robotite võime erinevates keskkondades iseseisvalt töötada muudab need väärtuslikeks ressurssideks kaasaegses energiamajanduses. Kokkuvõtteks võimaldaks mobiilseid roboteid kaasav nutivõrk elektrienergia- ja tööjõuressursse paremini kokku hoida.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Moreno Escobar, J.J., Morales Matamoros, O., Tejeida Padilla, R., Lina Reyes, I. Quintana Espinosa, H.** (2021). A Comprehensive Review on Smart Grids: Challenges and Opportunities. [e-ajakiri] https://www.mdpi.com/1424-8220/21/21/6978 (29. 04. 2024).

2. **Meliani, M., Barkany, A.E., Abbassi, I.E., Darcherif, A.M., Mahmoudi. M.** (2021). Energy management in the smart grid: State-of-the-art and future trends. [e-ajakiri] https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/18479790211032920 (29. 04. 2024).

3. **Muhammad, F.Z., Elhoussin, E., Mohamed, B.** (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. [e-ajakiri] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918306676#b0320 (29. 04. 2024).

4. **Rathor, S.K., Saxena, D.** (2020). Energy management system for smart grid: An overview and key issues. [e-ajakiri] https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.4883 (30. 04. 2024).

5. **Aman, S., Simmhan, Y., Prasanna, V.K.** (2013). Energy management systems: state of the art and emerging trends. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6400447 (30. 04. 2024).

6. **Dumitru, C.-D., Gligor, A.** (2012). SCADA Based Software for Renewable Energy Management System. [e-ajakiri] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212567112001505 (01. 05. 2024).

7. **Tan, D., Novosel, D.** (2017). Energy challenge, power electronics & systems (PEAS) technology and grid modernization. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7947993#citations (02. 05. 2024).

8. **Jiang, W., Zuo, G., Zou, D.H., Li, H., Yan, J.J., Ye, G.C.** (2020). Autonomous Behavior Intelligence Control of Self-Evolution Mobile Robot for High-Voltage Transmission Line in Complex Smart Grid. [e-ajakiri] https://www.hindawi.com/journals/complexity/2020/8843178/ (03. 05. 2024).

9. **Rubio, F., Valero, F., Llopis-Albert, C.** (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. [e-ajakiri] https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1729881419839596#sec-3 (05. 05. 2024).

10. **Arutselvan, K., Vijayakumari, A.** (2015). Assistive Autonomous Ground Vehicles in Smart Grid. [e-ajakiri] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017315003217 (07. 05. 2024).

11. **Qin, X., Wu, G., Lei, J., Fan, F., Ye, X., Mei, Q.** (2018). A Novel Method of Autonomous Inspection for Transmission Line based on Cable Inspection Robot LiDAR Data. [e-ajakiri] https://www.mdpi.com/1424-8220/18/2/596#sec2-sensors-18-00596 (07. 05. 2024).

12. **Zhang, T., Dai, J.** (2021). Electric Power Intelligent Inspection Robot: a Review. [e-ajakiri] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1750/1/012023/meta (07. 05. 2024).

13. **Abdulkadir, A.A., Al-Turjman, F.** (2018). Smart-grid and solar energy harvesting in the IoT era: An overview. [e-ajakiri] https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cpe.4896?casa_token=lfMckr_1yt0AAAAA%3AJbjOvfL-90W8FyYVFjHusOYjjWz4chvF3OJ2eLcHuz4AbZCGkKHtKb811wAEpZq0jd4XJNMUJr9oLCc (08. 05. 2024).

14. **Nattharith, P., Kosum, T.** (2022). Development of Mobile Robot System for Monitoring and Cleaning of Solar Panels. [e-ajakiri] https://gmsarnjournal.com/home/wp-content/uploads/2021/10/vol16no3-11.pdf (08. 05. 2024).

15. **Bogue, R.** (2019). Climbing robots: recent research and emerging applications. [e-ajakiri] https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IR-08-2019-0154/full/html (08. 05. 2024).

16. Introduction to Mobile Robot Control. (2014). **Tzafestas. S.G.** [on-line] ebrary, lk 10-12 (09. 05. 2024).

17. China Southern Power Grid Shenzhen Power Supply Bureau Obtains the License for the 5G Smart Demo Project. [e-artikkel] https://www.5gdna.org/page108?article_id=163&_l=en (09. 05. 2024).

18. **Dario Bellicoso, C. Bjelonic, M., Wellhausen, L., Holtmann, K., Günther, F., Tranzatto, M., Fankhauser, P., Hutter, M.** (2018). Advances in real-world applications for legged robots. [e-ajakiri] https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rob.21839 (09. 05. 2024).

19. **Zeng, Y., Zhang, R., Lim, T.J.** (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7470933 (09. 05. 2024).
20. **Toth, J., Gilpin-Jackson, A.** (2010). Smart view for a smart grid — Unmanned Aerial Vehicles for transmission lines. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5624465 (09. 05. 2024).
21. **Langåker, H.-A., Kjerkreit, H., Syversen, C.L., Moore, R.J., Holhjem, Ø.H., Jensen, I., Morrison, A., Transeth, A.A., Kvien, O., Berg, G. Olsen, T.A., Hatlestad, A., Negård, T., Broch, R., Johnsen, J.E.** (2021). An autonomous drone-based system for inspection of electrical substations. [e-ajakiri] https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/17298814211002973 (09. 05. 2024).
22. **Reina, G., Vargas, A., Nagatani, K., Yoshida, K.** (2007). Adaptive Kalman Filtering for GPS-based Mobile Robot Localization. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4381270 (11. 05. 2024).
23. **Panigrahi, P.K., Bisoy, S.K.** (2022). Localization strategies for autonomous mobile robots: A review. [e-ajakiri] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157821000550#b0030 (11. 05. 2024).
24. **Choi, H.-S., Park, O.-D., Kim, H.-S.** (2005). Autonomous mobile robot using GPS. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1528242 (11. 05. 2024).
25. Mobile robot positioning: Sensors and techniques. (1997). **Borenstein, J., Everett, H.R., Feng, L., Wehe, D.** [on-line] ebrary, lk 231-249 (11. 05. 2024).
26. **Saito, T., Kuroda, Y.** (2013). Mobile robot localization using multiple observations based on place recognition and GPS. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6630776 (11. 05. 2024).
27. **Georgiev, A., Allen P.K.** (2004). Localization methods for a mobile robot in urban environments. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1339385 (11. 05. 2024).
28. **Farooq, M.U., Eizad, A., Bae, H.-K.** (2023). Power solutions for autonomous mobile robots: A survey. [e-ajakiri] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889022001749 (11. 05. 2024).

29. **Mikołajczyk, T., Mikołajewski, D., Kłodowski, A., Łukaszewicz, A., Mikołajewska, E., Paczkowski, T., Macko, M., Skornia, M.** (2023). Energy Sources of Mobile Robot Power Systems: A Systematic Review and Comparison of Efficiency. [e-ajakiri] https://www.mdpi.com/2076-3417/13/13/7547 (12. 05. 2024).
30. Mission reliability estimation of mobile robot system. (2016). **Tsarouhas, P.H., Fourlas, G.K.** [on-line] ebrary, lk 220–228 (12. 05. 2024).
31. **Hoshino, S., Seki, H., Ota, J.** (2011). Optimal maintenance strategy in fault-tolerant multi-robot systems. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/document/6094528 (12. 05. 2024).
32. **Tsarouhas, P.H., Fourlas, G.K.** (2015). Maintainability analysis of mobile robot. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7382951 (12. 05. 2024).
33. **Katrasnik, J., Pernus, F., Likar, B.** (2010). A Survey of Mobile Robots for Distribution Power Line Inspection. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/document/5345712 (12. 05. 2024).
34. **Deng, C., Wang, S., Huang, Z., Tan, Z., Liu, J.** (2014). Unmanned Aerial Vehicles for Power Line Inspection: A Cooperative Way in Platforms and Communications. [e-ajakiri] https://www.jocm.us/uploadfile/2014/0918/20140918110959273.pdf (13. 05. 2024).
35. **Gonçalves, R.S., Carvalho, J.C.M.** (2013). Review and Latest Trends in Mobile Robots Used on Power Transmission Lines. [e-ajakiri] https://journals.sagepub.com/doi/full/10.5772/56791 (14. 05. 2024).
36. **Liu, J.-H., Padrigalan, K.** (2021). Design and Development of a Climbing Robot for Wind Turbine Maintenance. [e-ajakiri] https://www.mdpi.com/2076-3417/11/5/2328 (15. 05. 2024).
37**. Byambasuren, B.-e., Kim, D., Oyun-Erdene, M., Bold, C., Yura, J.** (2016). Inspection Robot Based Mobile Sensing and Power Line Tracking for Smart Grid. [e-ajakiri] https://www.mdpi.com/1424-8220/16/2/250 (15. 05. 2024).
38. **Rengaraju, P., Pandian, S.R., Lung, C.-H.** (2014). Communication networks and non-technical energy loss control system for smart grid networks. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6873828 (16. 05. 2024).
39. Extended smart meters-based remote detection method for illegal electricity usage. (2013). **Bat-Erdene, B., Lee, B., Kim, M.-Y., Ahn, T.H.** [on-line] ebrary, lk 1332-1343 (15. 05. 2024).

40. **Jiang, W., Yan, Y., Yu, L., Peng, M., Li, H., Chen, W.** (2019). Research on dual-arm coordination motion control strategy for power cable mobile robot. [e-ajakiri] https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0142331218822717 (21. 05. 2024).
41. **Arif, A., Al-Hussain, M., Al-Mutairi, N., Al-Ammar, E., Khan, Y., Malik, N.** (2013). Experimental study and design of smart energy meter for the smart grid. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6529714 (22. 05. 2024).
42. **Phuangpornpitak, N., Tia, S.** (2013). Opportunities and Challenges of Integrating Renewable Energy in Smart Grid System. [e-ajakiri] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213009995 (22. 05. 2024).
43. **Roberts, B.P., Sandberg, C.** (2011). The Role of Energy Storage in Development of Smart Grids. [e-ajakiri] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5768106 (23. 05. 2024).
44. **Franko, J., Du, S., Kallweit, S., Duelberg, E., Engemann, H.** (2020). Design of a Multi-Robot System for Wind Turbine Maintenance. [e-ajakiri] https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2552 (23. 05. 2024).
45. **Ahmad, T., Madonski, R., Zhang, D., Huang, C., Mujeeb, A.** (2022). Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm. [e-ajakiri] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000569 (24. 05. 2024).

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Kert Roosileht,

(sünniaeg 23/08/1998)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Energiahaldus nutivõrkudes mobiilsete robotite abil“, mille juhendaja on professor Andres Annuk, *PhD*,
   1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
   1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
   1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Kert Roosileht

/allkirjastatud digitaalselt/

Tartu, 29.05.2024

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk 29.05.2024

_____ _____

/allkirjastatud digitaalselt/ (*kuupäev*)