EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Emili Õun

RAUDNIKKELAKUDE KASUTUSVÕIMALUSTE UURIMINE VÕRGUÜHENDUSETA ELEKTRISÜSTEEMIDES

INVESTIGATION OF THE POSSIBLE USE OF NICKEL-IRON BATTERIES IN OFF-GRID ELECTRICAL SYSTEMS

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: professor Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2023

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Emili Õun		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Raudnikkelakude kasutusvõimaluste uurimine võrguühenduseta elektrisüsteemides			
Lehekülgi: 50	Jooniseid: 21	Tabeleid: 3	Lisasid: 2
Osakond/õppetool: Energiakasutuse õppetool 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: Tartu, 2023			

Võrguühenduseta ehk *off-grid* elektrisüsteemid on muutumas üha populaarsemaks seoses laialdase taastuvenergiaallikate kasutuselevõtuga ning sellest tuleneva elektritootmise detsentraliseerimisega. *Off-grid* süsteemis on väga oluline osa salvestusseadmetel, et tagada katkematu stabiilne elektrivarustus. Täna kasutatakse laialdaselt pliiakusid nende madala hinna ja lihtsa kättesaadavuse tõttu. Nende puudusteks on aga madal erienergia, lühike eluiga ja kehv jõudlus äärmistel temperatuuridel.

Antud magistritöös on alternatiivse lahendusena uuritud raudnikkelakude kasutamist võrguühenduseta elektrisüsteemides. Töö eesmärk oli hinnata raudnikkelakude eeliseid ja puudusi, mida hinnatakse läbi erinevate parameetrite. Selleks kasutati 137 ruutmeetrise eramu-prosumeri aastaseid tarbimis- ja tootmisandmeid 2,5 kW-selt päikesepargilt ning 3,5 kW-selt tuulegeneraatorilt. Tootmisandmed skaleeriti 70/30 suhtega tuuleenergia kasuks. Seejärel leiti vajalik energiareserv arvestades toodanguta perioode. Sobivust hinnati võrdluses teiste laialdaselt kasutatavate akutüüpidega nagu plii-, liitium-ioon- ja nikkel-kaadmiumakud.

Töö käigus selgus, et uuritud eramu pikima toodanguta perioodi energiavajaduse katteks on vaja ca 3700 Ah akupanka, kui aku klemmipinge on 24 V. Raudnikkelaku kasuteguriga on see 4400...5445 ampertunnine akupank. Raudnikkelaku on võrreldes teiste laialdaselt kasutatavate akutüüpidega madalate energeetiliste näitajatega. Raudnikkelaku eelisteks on pikk eluiga, väike ökoloogiline jalajälg, suur temperatuuri ning suur tühjenemissügavus.

Märksõnad: raudnikkelakud, *off-grid*, salvestusseadmed, taastuvenergiaallikad

Estonian University of Life Sciences
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014

Abstract of Master's Thesis

Author: Emili Õun

Curriculum: Energy Application Engineering

Title:Investigation of The Possible Use of Nickel-Iron Batteries In Off-Grid Electrical Systems

Pages: 50	Figures: 21	Tables: 3	Appendixes: 2

Chair: Chair of 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: Tartu, 2023

Off-grid electrical systems are gaining popularity due to the increasing use of renewable energy sources and the resulting decentralisation of electricity production. In such systems, storage devices ensure an uninterrupted and stable power supply. Lead-acid batteries are widely used today due to their low cost and easy availability. However, they have disadvantages, such as low energy density, short lifetime, and poor performance at extreme temperatures.

This master's thesis investigates using nickel-iron batteries in off-grid systems as an alternative. The research aims to evaluate the suitability of Ni-Fe batteries. To achieve this, annual consumption data of a 137 square meter private house and annual production data from a 2.5 kW solar park and a 3.5 kW wind generator were used. The production data was scaled to 70/30 in favor of wind power. Then, the necessary energy reserve was found considering periods without production. The compatibility of Ni-Fe batteries was evaluated compared to other widely used battery types, such as lead-acid, lithium-ion, and nickel-cadmium batteries. The research revealed that to cover the energy needs for the longest non-production period of the investigated residence with a terminal voltage of 24 V, a battery bank of approximately 4400...5445 Ah is required. Compared to other widely used battery types, Ni-Fe batteries have low energy indicators. However, they have several advantages, such as a long lifespan, a small ecological footprint, and large depth of discharge and tolerance of high temperatures.

Key words: nickel-iron batteries, *off-grid*, storage devices, renewable energy sources

SISUKORD

SISSEJUHATUS 6
1. RAUDNIKKELAKUD 8
1.1. Elektrokeemilised salvestusseadmed 8
1.1.1. Primaarsed ja sekundaarsed elektrokeemilised salvestusseadmed 8
1.1.2. Läbivooluelement 9
1.1.3. Korduvlaetavad elektriakud 10
1.2. Raudnikkelakude tööpõhimõte 12
1.3. Raudnikkelakude ehitus 15
1.4. Raudnikkelakude elektrokeemilised karakteristikud 18
2. VÕRGUÜHENDUSETA ELEKTRISÜSTEEM 21
2.1. Elektrijaam 21
2.2. Inverterid 23
2.3. Salvestusseadmed 25
2.4. Varutoiteallikas 26
2.5. Tarbija 27
3. MATERJAL JA METOODIKA 29
3.1. Töö lähteandmetega 29
3.1.1. Ülevaade tarbimisest 29
3.1.2. Ülevaade tootmisest 31
3.1.3. Tootmisandmete võrdlus tarbimisandmetega 33
3.2. Salvesti sobivuse hindamise metoodika 36
3.2.1. Energiareservi leidmine ööpäevase keskmise tootmise ja tarbimise järgi 36
3.2.2. Energiareservi leidmine toodanguta perioodile 38
3.2.3. Akude isetühjenemise, tühjenemissügavuse ja kasuteguriga arvestamine 39
4. TULEMUSTE ANALÜÜS JA JÄRELDUSED 41
4.1. Raudnikkelakude võrdlus teiste akutüüpidega 41
4.2. Kulutsükkel 43
4.3. Keskkonnamõju 45
KOKKUVÕTE 47
KASUTATUD KIRJANDUS 49
LISAD 51

Lisa 1. Lähteandmetena kasutatud märtsikuu tarbimis- ja skaleeritud tootmisandmed, vajalik reserv ja salvesti mahutatavus 52
Lisa 2. Lähteandmetena kasutatud juunikuu tarbimis- ja skaleeritud tootmisandmed, vajalik reserv ja salvesti mahutatavus 54
Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta 56

SISSEJUHATUS

Taastuvenergiaallikate laialdasema kasutusele tulekuga on viimasel kümnendil populaarseks muutunud tarbimiskohas elektri tootmine, s.t tootevtarbijad ehk prosumerid. Kui tootmine ületab tarbimist, on üle jäänud elektrienergiat võimalik jaotusvõrku müüa või salvestada statsionaarsesse salvestusseadmesse ning kasutada seda ajal, kui tootmine on väiksem kui tarbimine. Salvestite kasutamisel saab oluliselt vähendada elektritarbimist võrgust või koguni olla sõltumatu sellest. Viimasel juhul on tegemist võrguühenduseta ehk *off-grid* elektrisüsteemiga.

Võrguühenduseta elektrisüsteemid on atraktiivsed lahendused hajaasustusega piirkondades, kus elektrivõrguga liitumine on kulukas või kus liitumine on olemas, kuid elektrikvaliteet on madal. Võrguühenduseta süsteemi plussiks on ka sõltumatus võrguettevõtjatest ning jätkusuutlikum eluviis vähendades suuri investeeringuid võrguettevõtete poolt maapiirkondades, kus liitumiste rajamine on lisaks kulukusele ka teatava keskkonnamõjuga. Võrguühenduseta süsteemid toetuvad energia salvestamise lahendustele, et tagada elektrivarustus ka juhul kui tootmine puudub või on ebapiisav tarbimise katmiseks. Täna kasutatakse salvestitena enim plii-happeakusid ja viimastel aastatel ka liitium-ioonakusid. Pliiakud on siiani odavaim lahendus elektrienergia salvestamiseks, kuid nende puudusteks on madal erienergia, lühike eluiga ja kehv jõudlus äärmistel temperatuuridel. Liitium-ioonakusid iseloomustavad väga head energeetilised näitajad, kuid nende kasutust piirab kõrge hind ning erinevate toormaterjalide kaevandamisest tingitud sotsiaalsed- ja keskkonnaga seotud probleemid. Sellest lähtuvalt on kasvanud huvi keskkonnasõbralikema ja pikema elueaga akutehnoloogiate vastu.

Üheks alternatiivseks tehnoloogiaks on raudnikkelakud, mis on koos pliiakudega üks vanimaid akutüüpe ning mida iseloomustab vastupidavus, töökindlus ja pikk eluiga. Raudnikkelakusid ei kasutata täna laialdaselt võrguühenduseta elektrisüsteemides ning nende võimalikke eeliseid ja puudusi sellises süsteemis ei ole ulatuslikult uuritud.

Antud magistritöö eesmärk on uurida raudnikkelakude võimalikke kasutusvõimalusi võrguühenduseta elektrisüsteemides hinnates nende sobivust statsionaarse salvestusseadmena kodumajapidamises. Töö käigus koguti lähteandmed taastuvenergiaallikate tootmisandmetest ja kodumajapidamise tarbimisandmetest, et hinnata vajaliku akupanga salvestusmahutavust. Töös võrreldi raudnikkelakusid teiste laialdaselt kasutatavate akutüüpidega, hinnati võrguühenduseta süsteemi iseärasusi ning raudnikkelakude sobivust antud süsteemi.

Töö on jaotatud neljaks peatükiks. Esimene peatükk kirjeldab raudnikkelakude tööpõhimõtet, ehitust ja elektrokeemilisi karakteristikuid. Teine peatükk annab ülevaate võrguühenduseta elektrisüsteemide komponentidest. Kolmas peatükk keskendub materjali ja metoodika kirjeldusele andes ülevaate lähteandmetena kasutatud tootmis- ja tarbimisandmetest, nende omavahelisest võrdlemisest ning salvesti sobivuse hindamise metoodikast. Neljandas peatükis on esitatud raudnikkelaku sobivuse hindamise analüüs. Analüüs koosneb raudnikkelakude võrdlusest teiste akutehnoloogiatega, kulutsükli hindamisest ja keskkonnamõju ülevaatest.

Töö käigus teostatud arvutused ning lähteandmetest koostatud graafilised joonised on koostatud Microsoft Exceli keskkonnas. Arvutustulemused ning lähteandmed on esitatud töö lisades.

1. RAUDNIKKELAKUD

1.1. Elektrokeemilised salvestusseadmed

1.1.1. Primaarsed ja sekundaarsed elektrokeemilised salvestusseadmed

Elektrokeemilised salvestusseadmed jagatakse primaarseteks ehk mittelaetavateks ja sekundaarseteks ehk korduvlaetavateks. Primaarseid salvestusseadmeid ei ole võimalik lihtsalt või tõhusalt elektriliselt laadida ning seetõttu pärast tühjenemist neid enam ei kasutata. Primaarne salvestusseade on tavaliselt odav, kerge toiteallikas, mida kasutatakse kaasaskantavate elektroonika- ja elektriseadmete, valgustuse, fotoseadmete, mänguasjade, mäluvarunduse ja paljude muude rakenduste jaoks. Primaarsete vooluallikate eelisteks on hea säilivusaeg, kõrge erienergia madala kuni mõõduka tühjenemise korral, vähene hooldusvajadus ja kasutusmugavus. Kuigi suuri suure võimsusega primaarseid vooluallikaid kasutatakse sõjalistes rakendustes, signaalimisel, ooterežiimil jne, on valdav enamus primaarakudest tuttavad üheelemendilised silindrilised ja lamedad nööbikujulised patareid või mitmeelemendilised akud, mis kasutavad neid komponentelemente. [18]

Sekundaarseid elektrokeemilisi salvestusseadmeid ehk elektriakusid saab pärast tühjenemist elektriliselt laadida nende kasutamiseelsesse seisundisse juhtides neist läbi elektrivoolu tühjenemisvoolule vastupidises suunas. Elektriakusid iseloomustavad lisaks nende korduvlaaditavusele suur erivõimsus, kõrge tühjenemiskiirus, lamedad tühjenemiskõverad ja hea jõudlus madalatel temperatuuridel. Erivõimsus näitab akuelemendi võimsust massiühiku kohta. Nende erienergia on tavaliselt madalam ja laetuse säilivus lühem kui primaarsetel elektrokeemilistel salvestusseadmetel. Erienergia näitab energiahulka mahuühiku või massi kohta. [18]

Kõik elektrokeemilised salvestusseadmed koosnevad kolmest põhikomponendist: positiivne elektrood ehk katood, negatiive elektrood ehk anood ja elektrolüüt. Igal elektroodil on elektrolüüdis iseloomulik potentsiaal ja pinge. Kogu elemendi pinge on võrdne katoodi ja anoodi potentsiaalide vahega. Ühe elemendi pinge ei ületa üldisel 2 V, kuid elementide jadamisi

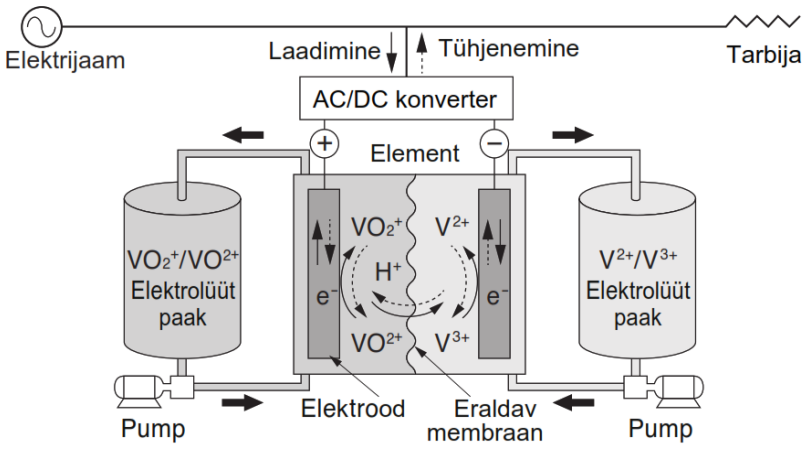
ühendamisel on võimalik saada peaaegu ükskõik mis soovitud pinge. Akude tavalisemad nimipinged on 12 V, 24 V ja 48 V. [5]

Aku tühjenemisel toimuvad elektrokeemilised reaktsioonid on kombineeritud redoksreaktsioonid. Elektronid liiguvad katoodilt anoodile. Katood väheneb anoodi oksüdeerumisel vabanevate elektronide neeldumise kaudu. Sekundaarsete elektrokeemiliste salvestusseadmete puhul pööratakse elektronide voog laadimise ajal vastupidiseks, kus tehniliselt on posiitivseks elektroodiks anood ning negatiivseks elektroodiks katood. Sarnane protsess esineb ka elektrolüüsil ning galvaniseerimisel. [5]

1.1.2. Läbivooluelement

Läbivooluelement (inglise keeles *Redox Flow Battery*) on keemiline elektrienergia sarvestusseade, mis töötati esmalt välja USA Riiklik Aeronautika- ja Kosmosevalitsus (lühidalt NASA) 1970. aastate energiakriisi ajal. Erinevalt tradistsioonilistest elektrokeemilistest salvestusseadmetest kasutab läbivooluelement redokspaare, mida hoitakse sõltumatutes välistes mahutites ja ühendatakse ainult siis, kui on vaja toidet läbi energia muundamise elemendi. [22]

Läbivooluelement koosneb elemendist endast, kus redoksreaktsioon aset leiab, positiivsest ja negatiivsest elektrolüüdipaagist, milles hoitakse aktiivlahust, pumpadest ja torustikest, mis tsirkuleerivad elektrolüüti paakidest redoksreaktsiooni elementi. Viimane on ühendatud vahelduvvoolu süsteemiga DC/AC konverteri kaudu. Vanaadium-redoks läbivooluelemendi ehitust ja tööpõhimõtet kirjeldab joonis 1.1. [24]



Joonis 1.1. Läbivooluelemendi ehitus ja tööpõhimõte [24]

Läbivooluelementi on aastakümneid arendatud suuremahuliste rakenduste jaoks ning mõnda neist arendustest on edukalt demonstreeritud megavatisel skaalal. Siiski ei ole ükski praegustest süsteemidest laialdast kasutust leidnud peamiselt läbivooluelemendi madala erienergia ja seeläbi energia ühiku salvestamise kõrge hinna tõttu. [21]

Põhilised läbivooluelementakude tüübid on vanaadium-redoks akud, polüsulfiid-bromiid akud ja tsink-broom akud. Kõigil neil on sama tööpõhimõte, kus kaks elektrolüüti pumbatakse akuelementide kogumikku, seal toimub elektrokeemiline reaktsioon, mille tulemusena vabaneb elektrienergia. [9]

1.1.3. Korduvlaetavad elektriakud

Korduvlaetavad elektriakud koosnevad akuelementidest, millest igaüks koosneb kahest elektrolüüti sukeldatud elektroodist ning need võivad energiat salvestada ja välja anda elektrokeemiliste pöörduvate reaktsioonide kaudu. Reaktsioonide käigus oksüdeeritakse anood ehk negatiivne elektrood, mis loovutab elektrone ning katood ehk positiivne elektrood redutseeritakse võttes elektrone vastu elemendi klemmidega ühendatud välise vooluahela kaudu. Elektriakusid eristatakse materjali järgi, millest on valmistatud elektroodid ja elektrolüüdid, järgmiselt: plii-, leelis-, metall-õhk-, kõrgetemperatuurilised ja liitium-ioonakud. [19]

Vanim elektriaku tüüp on pliiaku (happeaku), mis leiutati 1859. aastal. Seda akutüüpi kasutatakse laidaldaselt sõidukite ja paatide mootorite käivitamiseks ning paljudes taastuvenergiaallikate juurde kuuluvates akupankades. Pliiakusid iseloomustab suur impulssvõimsus ja madalad tootmiskulud. Laetud olekus koosneb aku pliist (Pb) ja pliioksiidist (PbO_2), mis on 37%-ses väävelhappelahuses (H_2SO_4). Laadimata olekus toodetakse nii anoodil kui ka katoodil pliisulfaati ($PbSO_4$) ning elektrolüüt muutub veeks. [19]

Leelisakude alla kuuluvad peamiselt elektriakud, mis kasutavad elektrolüüdina leelise (peamiselt kaalium- või naatriumhüdroksiidi) vesilahust. Elektroodide materjalid reageerivad leeliseliste elektrolüütidega vähem kui happeliste elektrolüütidega. Leeliselise elektrülüüdi mehhanism hõlmab ainult hapniku või hüdroksüülioonide transporti ühelt elektroodilt teisele, seega elektrolüüdi koostis ega kontsentratsioon ei muutu laadimise ja tühjenemise ajal nagu pliiakul. Leelisakude alla kuuluvad põhiliselt nikkel-kaadmium-, raudnikkel-, hõbeoksiid-, nikkel-tsink-, vesinikelektrood- ja tsink-mangaanoksiid-akud. [18]

Metall-õhk akusid võib pidada kütuseelemendi eritüübiks, mis kaustavad kütuse asemel metalli ja oksüdeerijana õhku. Anoodiks on sellises akus tavaliselt suure erienergiaga metallid nagu liitium (Li), alumiinium (Al) või tsink (Zn), katood on valmistatud poorsest süsinikust või metallvõrgust, mis on võimeline neelama õhust hapnikku (O_2). Kuigi liitium-õhu teoreetiline erienergia on kõrge (mõnedel andmetel 11 140 Wh/kg), on tegemist tuleohtlikku lahendusega liitiumi ja niiske õhku kõrge reaktsioonivõime tõttu. Tsink-õhk aku on ainus tehniliselt teostatav näide metall-õhk akudest, mis pakub suurt erienergiat (650 Wh/kg). Töötemperatuuri vahemik on sellisel akul -20 kuni 50 °C ning isetühjenemise kiirus on väga madal. Siiski on sellist tüüpi akut keeruline laadida ning sellel on piiratud laadimistsüklite arv. Tsink-õhk aku kasutegur jääb 50% juurde. [19]

Kõrgetemperatuurilised akud koosnevad sulatatud naatriumanoodi materjalist, beeta-alumiiniumoksiidi tahkest elektrolüüdist ja katoodreagendiks on naatrium-väävel (NaS) või naatrium-nikkel-kloriid (NaNiCl). Naatrium-väävelakud on valmistatud odavatest materjalidest ja suure erienergiaga (150-345 kWh/m^3). Nende ühe laadimistsükli kasutegur on 89-92% ja neil on suur lubatud laadimistsüklite arv (1500-5000 tsüklit). Naatrim-väävelaku peamisteks puudusteks on tootmismaterjalide söövitavus ja pideva soojussisendi nõue 300-350 °C, et säilitada elektrolüüdi sulanud olekut. Kõrge temperatuur omakorda suurendab elektroodi materjalide tuleohtlikkust. [19]

Liitium-ioonakud on laialdaseimalt kasutatav akutüüp selle erienergia ning kasuteguri suuruse tõttu. Liitium-ioonakud koosnevad elementidest, mis kasutavad positiivse ja negatiivse elektroodi materjalidena liitiumi interkalatsiooniühendeid. Aku tsükli ajal vahetuvad liitiumioonid (Li^-) positiivse ja negatiivse elektroodi vahel. Positiivse elektroodi materjal on tavaliselt kihilise struktuuriga metalloksiid, näiteks liitiumkoobaltoksiid ($LiCoO_2$), või tunnelistruktuuriga materjal nagu liitiummangaanoksiid ($LiMn_2O_4$) alumiiniumfooliumi voolukollektoril. Negatiivse elektroodi materjal on tavaliselt grafiitne süsinik, samuti kihiline materjal, vasest voolukollektoril. Laadimis- ja tühjendusprotsessis sisestatakse või eraldatakse liitiumioonid aktiivsete materjalide aatomikihtide vahele jäävast ruumist. Liitium-ioonakude puuduseks on liigtühjenemise (alla 2V) ja ülelaadimise destruktiivne mõju, mistõttu paigaldatakse liigtühjenemise ja ülelaadimise vältimiseks neile eraldi kaitseseadmed. [18]

1.2. Raudnikkelakude tööpõhimõte

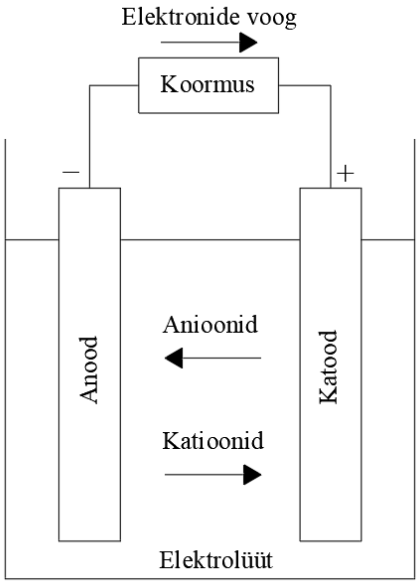
Aku on seade, mis muundab selle aktiivsetes materjalides sisalduva keemilise energia elektrienergiaks elektrokeemilise oksüdatsiooni-reduktsiooni protsessi abil. Korduvlaetava süsteemi puhul laaditakse aku uuesti protsessi vastupidises järjekorras. Viimane tähendab elektronide ülekandmist ühelt materjalilt teisele elektriahela kaudu. Mitteelektrokeemilises redoksreaktsioonis, nagu roostetamine või põlemine, toimub elektronide ülekanne otse ja kaasatakse ainult soojust. Kuna aku muundab keemilise energia elektrokeemiliselt elektrienergiaks, ei allu see, nagu sisepõlemis- või soojusmootorid, termodünaamika teisest seadusest tulenevatele Carnot' tsükli piirangutele, s.t see ei koosne pöörduvatest protsessidest nagu isotermiline paisumine, adiabaatiline paisumine, isotermiline kokkusurumine ja adiabaatiline kokkusurumine. Seetõttu on akudel suurem energia muundamise efektiivsus. [18]

Akude põhiline elektrokeemiline üksus on element. Aku võib koosneda ühest või mitmest elemendist, mis on ühendatud jadamisi või paralleelselt, olenevalt soovitud väljundpingest ja -võimsusest. 12-voldine aku koosneb tavaliselt kuuest, 24-voldine aku kaheteistkümnest ja 48-voldine aku kahekümne neljast 2-voldisest akuelemendist [18]

Akuelement koosneb kolmest põhikomponendist:

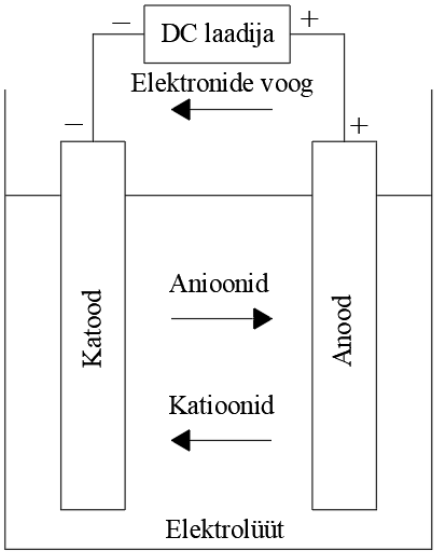
1. Negatiivne elektrood ehk anood – redutseeriv elektrood, mis loovutab elektrone välisesse vooluringi ja oksüdeerub elektrokeemilise reaktsiooni käigus.
2. Positiivne elektrood ehk katood – oksüdeeriv elektrood, mis võtab vastu elektrone välisahelast ja redutseerub elektrokeemilise reaktsiooni käigus.
3. Elektrolüüt – vahend ioonide ülekandmiseks akuelemendi sees anoodi ja katoodi vahel. Elektrolüüt on tavaliselt vedelik, näiteks vesi või muu ioone juhtiv lahus sooladest, hapetest või leelistest. [18]

Akuelemendi tühjenemisprotsess on kirjeldatud joonisel 1.2. Kui elelement on ühendatud koormusega, liiguvad elektronid anoodilt katoodile, kus elektronid võetakse vastu ja katoodmaterjali kogus väheneb. Vooluring on terviklik elektrolüüdis anioonide ehk negatiivsete ioonide ja katioonide ehk positiivsete ioonide vooluga anoodile ja katoodile. [18]



Joonis 1.2. Elektrokeemilised protsessid akuelemendi tühjenemisel [18]

Korduvlaetava aku või salvestuselemendi laadimise ajal pööratakse voolu voog ümber, s.t positiivsel elektroodil toimub oksüdatsioon ja negatiivsel elektroodil redutseerumine. Seega nüüd on positiivne elektrood anood ja negatiivne elektrood katood. Akuelemendi laadimisprotsessi kirjeldab joonis 1.3. [18]



Joonis 1.3. Elektrokeemilised protsessid akuelemendi laadimisel [18]

Raudnikkelakude elektrolüüdiks on 30%-ne kaaliumhüdroksiidi (KOH) vesilahus (70% H_2O). Lahusele lisatakse väike kogus liitiumhüdroksiidi (LiOH), mis parandab raudnikkelelementide jõudlust ja vähendab elektrolüüdi karboniseerumist. Tühjenemisel on raud (Fe) negatiivne elektrood ehk anood ja nikkeloksiidhüdroksiid (NiOOH) positiivne elektrood ehk katood. Tühjenemisprotsessil liiguvad elektronid anoodilt katoodile. Katoodil neeldub vesi (H_2O) ja eralduvad hüdroksiidioonid (OH^-), et muuta NiOOH nikkeldihüdroksiidiks ($Ni(OH)_2$). Samal ajal on anoodil absorbeeritud hüdroksiidioonid. Raud muutub kahes etapis rauddihüdroksiidiks ($Fe(OH)_2$) ja rauddihüdroksiidist raudoksiidhüdroksiidiks (FeOOH). Katoodi tühjenemisel kasutatakse ära vesi. Hüdroksiidioone kasutatakse laengu transportimiseks anoodilt katoodile läbi elektrolüüdi. [1]

Raudnikkelaku keemilised reaktsioonid kahes etapis tühjenemisel on: [1]

$$Fe + 2NiOOH + 2H_2O \xrightarrow{tühjenemine} 2Ni(OH)_2 + Fe(OH)_2 \quad (1.1.)$$

$$NiOOH + Fe(OH)_2 \xrightarrow{tühjenemine} Ni(OH)_2 + FeOOH \quad (1.2.)$$

Aku laadimisel on ülaltoodud reaktsioonid vastupidised ja vesi (H_2O) taastatakse. [1]

Lisaks põhireaktsioonidele toimuvad raudnikkelakudes kõrvalprotsessid. Kui akuelement on täielikult laetud ja toiteallikas on endiselt ühendatud akuga, toimub ülelaadimine, mille

tagajärjel vabanevad gaasid. Laadimisel on raud (Fe) positiivne elektrood ehk katood ja nikkeloksiidhüdroksiid (NiOOH) on negatiivne elektrood ehk anood. Kui anood on laadimisprotsessi käigus täielikult nikkeloksiidhüdroksiid ja toimub endiselt vabade elektronide voog elektritoite tõttu, siis hakkab toimuma vee elektrolüüs. Hüdroksiidioonid (OH^-) reageerivad, moodustades hapniku (O_2) ja vee (H_2O) vabastades anoodil elektrone

$$4OH^- \rightarrow O2 + 2H2O + 4e^-. \quad (1.3.)$$

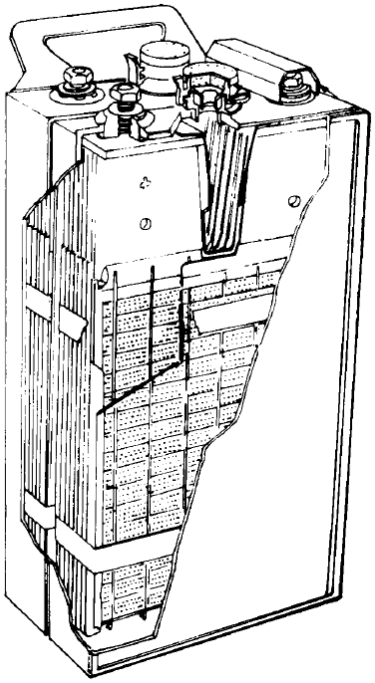
Hapnik (O_2) eraldub elemendist gaasina. Elektronid liiguvad anoodi klemmidelt katoodi klemmidele. Elektronid reageerivad hüdrooniumi ioonidega (H_3O^+) moodustades vee (H_2O) ja vesiniku (H_2)

$$2H3O^+ + 2e^- \rightarrow 2H2 + 2H2O \quad (1.4.)$$

Vesinik lahkub elemendist gaasina. Hüdrooniumi ioon ja hüdroksiidioon pärinevad vee autoprotolüüsist. Reaktsioon on pöördumatu, kuna vesi tabitakse ära. [1]

1.3. Raudnikkelakude ehitus

Raudnikkelakude aktiivsed materjalid on täidetud nikkelplaadiga perforeeritud terastorudesse või taskutesse. Torud kinnitatakse soovitud mõõtmetega plaatidele ja monteeritakse elementideks põimides positiivsed ja negatiivsed plaadid. Elemendi kest on valmistatud nikeldatud lehtterasest. Elemente saab kokku ühendada akudeks vormitud nailonümbistesse või kinnitades puidust lõksudele. Terasest korpused võivad olla isoleeritud plastikust või kummist kattega. Raudnikkelaku ehitus on näidatud joonisel 1.4. [18]



Joonis 1.4. Raudnikkelaku lõige [18]

Anoodi aktiivse materjali saamiseks lahustatakse puhas raud väävelhappes. Saadud $FeSO_4$ kristalliseeritakse, kuivatatakse ja kuumutatakse 800-900°C kraadi juures Fe_2O_3-ks. Seejärel pestakse materjalilt sulfaad, kuivatatakse ja redutseeritakse osaliselt vesinikus. Saadud materjal (Fe_3O_4 ja Fe) oksüdeeritakse osaliselt, kuivatatakse, jahvatatakse ja segatakse. Aku eluea pikendamiseks lisatakse väikestes kogustes väävlit, FeS ja HgO, mis toimivad aktivaatoritena, vähendades gaasi eraldumist ja parandades juhtivust. Anoodivoolukollektori valmistamiseks perforeeritakse ja nikeldatakse terasribad või -lint. Pärast kuivatamist ja kuumutamist vormitakse riba umbes 13 mm laiuseks ja 7,6 mm pikkuseks taskuks. Üks ots jäetakse lahti ja täidetakse raua aktiivmaterjaliga. Peale täitmist surutakse negatiivse elektroodi jaoks taskud kokku ja surutakse nikeldatud terasraami avadesse. [18]

Positiivne aktiivne materjal koosneb vaheldumisi nikkelhüdroksiidi kihtidest ja niklihelvestest. Kõrge puhtusastmega niklipulber lahustatakse väävelhappes. Tekkinud vesinikku kasutatakse raua aktiivse materjali valmistamiseks. Saadud lahuse happesus reguleeritakse pH 3-4-ni ja filtreeritakse, et eemaldada raud(III) ja muud lahustamatud materjalid. Vajadusel võib lahust täiendavalt puhastada, et eemaldada raua ja vase jäljed. Nikkelelektroodi jõudluse parandamiseks võib lisada 1,5% koobaltsulfaati. Nikkelsulfaadi lahus pihustatakse kuuma 25...50%-sesse naatriumhüdroksiidi lahusesse. Saadud segu filtreeritakse, pestakse, kuivatatakse, purustatakse ja sõelutakse. Spetsiaalsed niklihelbed saadakse roostevabale

terasele nikli ja vase kihtide kordamööda elektrosadestamisel. Saadud elektroplaat eemaldatakse ja lõigatakse ruutudeks. Vask lahustatakse kuumas väävelhappes ja järelejäänud niklihelbed pestakse vasest puhtaks ning kuivatatakse madalal temperatuuril, et vältida nikkeloksiidi moodustumist. Nagu negatiivse elektroodi puhul, algab positiivse elektroodi kokkupanek perforeeritud teraslindiga, mis on nikeldatud ja kuumutatud. Lint on keritud lukustatud õmblusega torudesse. Toru läbimõõt on tavaliselt 6,3 mm. Torud on täidetud nikkelhüdroksiidi ja niklihelveste vahelduvate kihtidega. Et vältida õmbluse avanemist laadimis- ja tühjenemisprotsessi ajal, asetatakse torude ümber rõngad ühtlaselt 1 cm intervalliga. Torud on suletud ja kokkusurutud otsad on lukustatud nikeldatud terasest võreraami sisse. Positiivseid elektroode saab teha ka taskuplaadi konstruktsioonis nagu negatiivseid elektroode. [18]

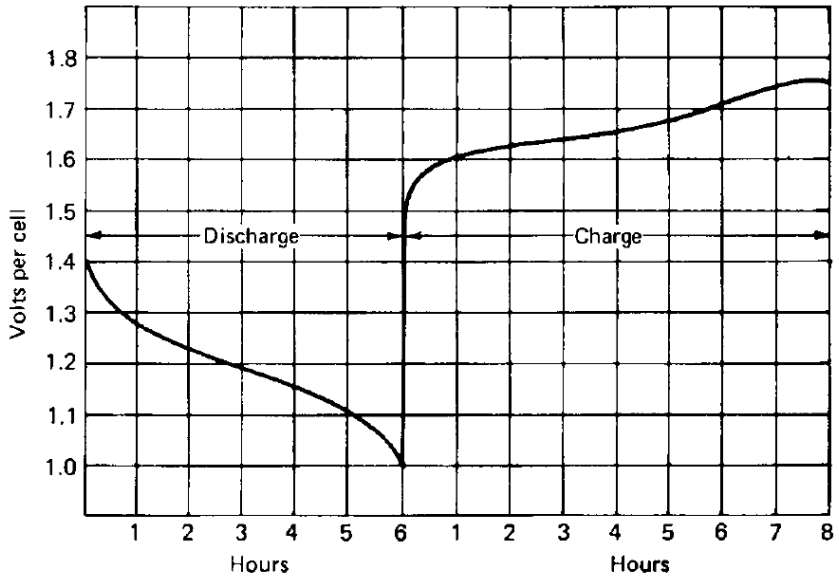
Torude ja taskuplaatide konfiguratsioon ja suurus määravad iga nendest moodustatava plaadi mahutavuse. Plaadid monteeritakse elektroodideks vastavalt soovitavatele mahtuvusnõuetele. Iga plaadirühm monteeritakse poltidega klemmiposti ja valitud plaate, sõltuvalt mahtuvusest, terasvarda külge, mis läbib plaatide ülaosas asuvat võret. Positiivsete ja negatiivsete elektrootplaatide rühmad on omavahel ühendatud, et moodustada element. Üks element sisaldab tavaliselt ühte või mitut negatiivset plaati rohkem kui positiivset. Positiivsed ja negatiivsed elektroodplaadid on eraldatud kummist või plastikust tihvtidega. [18]

Elektrolüüdiks on 30%-ne kaaliumhüdroksiidi lahus, millele on lisatud 50 g/L liitiumhüdroksiidi. Asenduselektrolüüdi koostis, mis kompenseerib õhutuskorgist pihustamisest tulenevaid kadusid, on osaliselt söövitav ja sisaldab ligikaudu 25 g/L liitiumhüdroksiidi. Aeg-ajalt asendatakse elektrolüüt täielikult, et suurendada aku jõudlust. Uus elektrolüüt on umbes 30% kaaliumhüdroksiidi vesilahus, millele lisatakse 15 g/L liitiumhüdroksiidi. Liitiumhüdroksiid parandab akuelementide mahtuvust ja vähendab mahutavuse kaotamist tsükli käigus. Samuti aeglustab liitiumhüdroksiid hapniku eraldumist. Liitium vähendab ka karbonaadi sisaldust elektrolüüdis ning positiivse aktiivse materjali turset, kuid suurendab elektrolüüdi takistust. Vahetult pärast laengu tekkimist algab raudelektroodil vesiniku eraldumine, mis eeldatavasti aitab neutraliseerida raua passiveerumist leeliselises lahuses. [18]

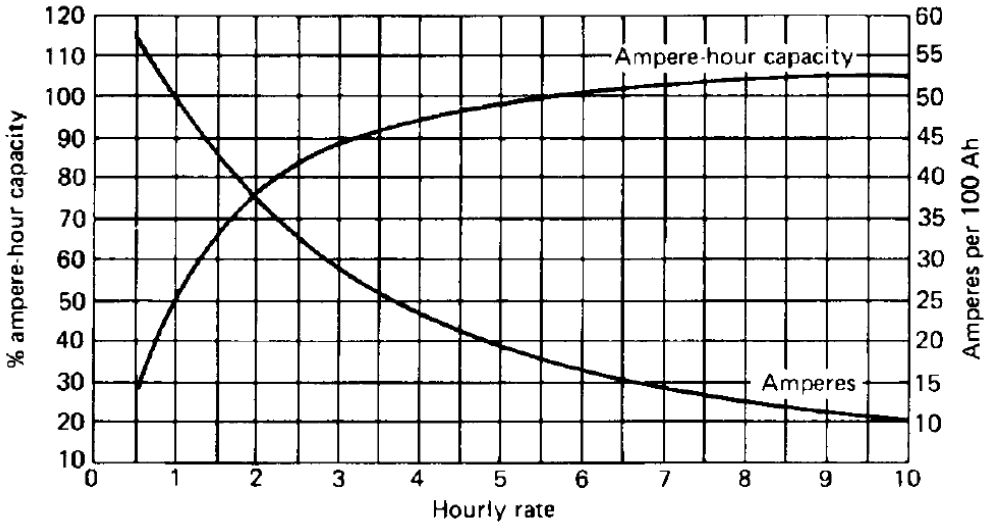
1.4. Raudnikkelakude elektrokeemilised karakteristikud

Raudnikkelakud on üldiselt mehaaniliselt vastupidavad ning ohutud kasutada. Need pakuvad konkurentsi nikkelkaadmium- (Ni-Cd), liitiumraudfosfaat- ($LiFePO_4$) ja kõrgekvaliteetsete pliiakude tehnoloogiate kõrval. Raudnikkelaku elementide nimipinge on 1,2 V ja neil on suhteliselt lai tööpingevahemik 1,0 kuni 1,7 V. Raudnikkelakusid ei mõjuta ülelaadimine ja täielik tühjenemine, neid võib tühjendada 0 voldini ilma, et see akut oluliselt kahjustaks. Nende kasutegur on aga madalam kui paljude teiste akutehnoloogiate puhul. Ilma elektrolüüdi vahetamiseta on aku eluiga 20 aastat või 3000 tühjenemis-laadimistsüklit. Raudnikkelakude jõudlus langeb madalatel temperatuuridel, kuid töötavad hästi kõrgematel temperatuuridel, isegi kuni 50°C. Raudnikkelakud on ohutumad ja keskkonnasõbralikumad kui plii- ja nikkelkaadmiumakud, kuna nende aktiivsed osad, raud ja nikkel, ei ole niivõrd mürgised kui plii ja kaadmium. [1]

Raudnikkelakudel on mõõdukas erivõimsus, erienergia ja tühjenemine. Neid ei soovitata kasutada suure võimsusega rakendustes nagu näiteks mootori käivitamisel, kuna aku kõrge sisetakistus alandab klemmide pinget märkimisväärselt. Joonisel 1.5. on esitatud raudnikkelaku laadimise-tühjenemise kõver ja joonisel 1.6. mahtuvuse ja tühjenemise suhe. [18]

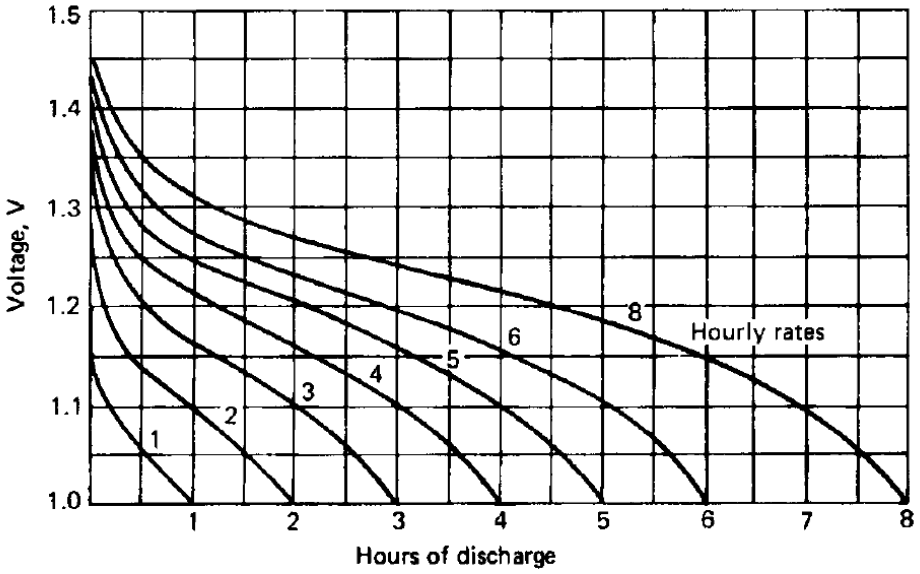


Joonis 1.5. Raudnikkelaku laadimise-tühjenemise kõver. *Volts per cell* – volte akuelemendi kohta; *Discharge* – tühjenemine; *Charge* – laadimine; *Hours* – tunnid [18]



Joonis 1.6. Raudnikkelaku mahutavuse sõltuvus tühjenemisest 25°C ja lõpp-pinge 1,0 V juures. *% ampere-hour capacity* – mahtuvus amper-tundide %; *Amperes per 100 Ah* – amprid 100 amper-tunni kohta; *Hourly rate* – tunnid; *Ampere-hour capacity* – amper-tund mahtuvus; *Amperes* – amprid [18]

Raudnikkelaku võib tühjeneda mis tahes voolukiirusega. Kõige parem on tühjenemine (tarbimine) 1 kuni 8 tunni jooksul. Joonisel 1.7. on esitatud tühjenemiskõverad erinevatel tühjenemiskiirustel 25°C juures. [18]



Joonis 1.7. Raudnikkelaku tühjenemiskõverad erinevatel tühjenemiskiirustel. *Voltage, V* – klemmipinge voltides; *Hours of discharge* – tühjenemise aeg tundides; *Hourly rates* – tunnid [18]

Nagu eelnevalt mainitud langeb raudnikkelakude jõudlus madalatel temperatuuridel. Selle põhjuseks on raudelektroodi üldine passiivsus ja reaktsiooni vaheühendi, raudoksiidi lahustuvus. Madalatel temperatuuridel aitab elektrolüüdi suurem takistus ja viskoossus koos aeglasema nikkelelektroodi kinemaatikaga kaasa võimsuse vähenemisele. Temperatuuridel üle 50°C kiireneb positiivse nikkelelektroodi isetühjenemine. Samuti võib raua suurenenud lahustuvus kõrgel temperatuuril ebasoodsalt mõjutada nikkelelektroodi tööd, lisades lahustuva raua nikkelhüdroksiidi kristallvõresse. Akut kasutatakse harva temperatuuridel alla -15°C. [18]

Raudnikkelakut iseloomustab suhteliselt kiire isetühjenemine. 25°C juures kaotab akuelement esimese kümne päevaga 15% oma mahust ja edasi 20-40% kuus. Madalamatel temperatuuridel on isetühjenemise kiirus väiksem, näiteks 0°C juures on kaod poole väiksemad kui 25°C juures. [18]

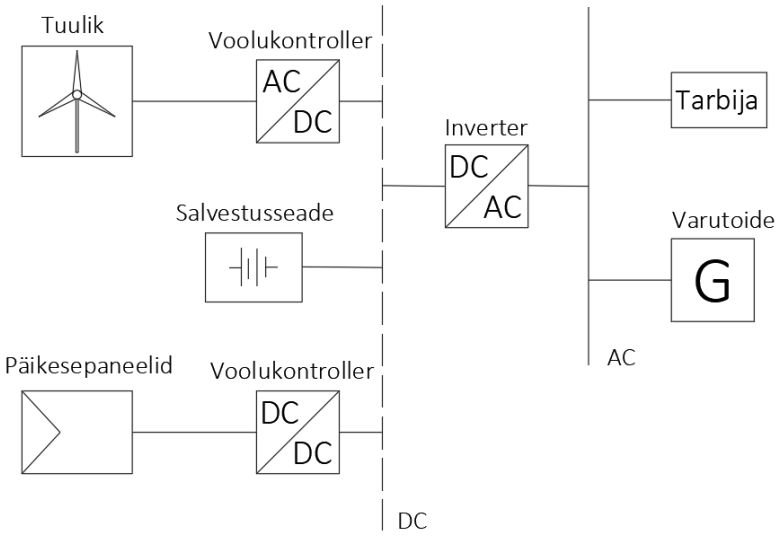
Akusid võib laadida erinevate skeemide abil. Kuni laadimisvool ei tekita liigset õhutuskorgist pihustuvat gaaside eraldumist ega temperatuuri tõusu (üle 45°C), võib kasutada mis tahes voolutugevust. Liigne gaasistumine nõuab vee sagedasemat lisamist. Täieliku laadimise tagamiseks peaks ampertunni sisend andma 25...40% rohkem kui eelmine tühjenemine. Soovitatav laadimiskiirus on tavaliselt vahemikus 15...20 A 100 Ah aku mahutavuse kohta. See määr tagastaks võimsuse 6 – 8 tunni jooksul. Igaõhtune laadimine pärast aku kasutamist (tsükliline laadimine) on tavaline protseduur raudnikkelakudel. Akusid saab tilklaadida, et hoida neid hädaolukorras täisvõimsusel. 0,004...0,006 A/Ah aku tilklaadimiskiirus ületab sisemise isetühjenemise ja hoiab aku täislaadituna. Pärast hädatühjendust on vaja eraldi laadimist. [18]

2. VÕRGUÜHENDUSETA ELEKTRISÜSTEEM

2.1. Elektrijaam

Võrguühenduseta ehk *off-grid* elektrisüsteem on sõltumatu elektrivarustussüsteem, millel puudub ühendus elektrivõrguga. *Off-grid* süsteemi eelduseks on kohapealne elektrienergia tootmine ja tarbimine. [23]

Võimalikku lahendust väikesele võrguühenduseta elektrisüsteemile iseloomustab joonis 2.1.



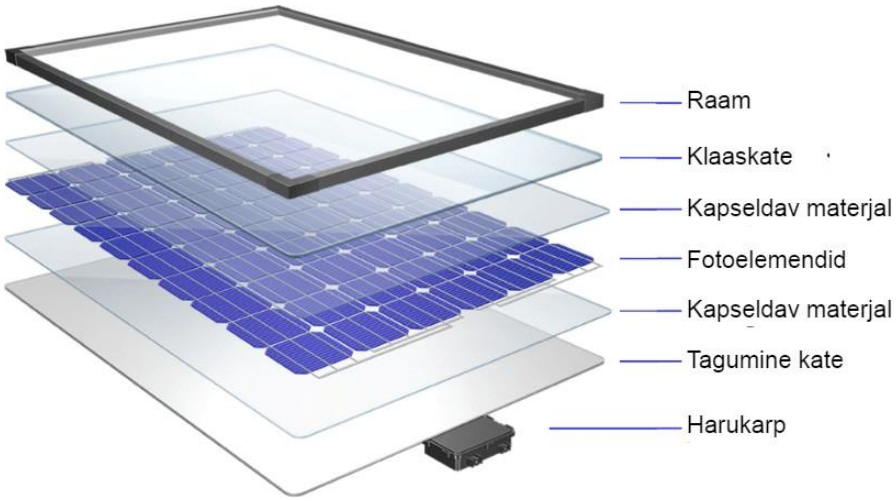
Joonis 2.1. Võimalik võrguühenduseta elektrisüsteemi lahendus [12, 27]

Väikesemahulist elektrienergia tootmist nimetatakse mikrotootmiseks. Mikrotootmisseadmeteks kvalifitseeruvad ühefaasilised tootmisseadmed nimivõimsusega kuni 3,68 kW ja kolmefaasilised tootmisseadmed nimivõimsusega kuni 11 kW. Mikrotootmisseadme alla kuuluvad ka mitmest seadmest koosnevad elektripaigaldised, mille koguvõimsus ei ületa eelnimetatud suurusi. Enamjaolt kuuluvad mikrotootmise alla hoonetele paigaldatavad päikesepaneelid ning väiksemad elektrituulikud. Üldiselt kasutatakse neid taastuvenergiaallikaid olemasoleva elektrisüsteemi toetamiseks, s.t soodsa ilmaga kohapealset elektritootmist tarbimiseks või elektrivõrku müümiseks. Nii toimides on võimalik olulisel

määral vähendada elektriarveid ja, kui elektrivõrgu tiputarbimine langeb kokku soodsa ilmaga või toetatakse sel ajal hoone tarbimist salvestusseadmetega, vähendades koormust võrgule ja parandades elektrikvaliteeti. [10]

Mikrotootmise üks lihtsamaid väljendusi on hoonele paigaldatud päikesepaneelid. Päikesepaneelid koosnevad fotogalvaanilistest elementidest, mis muundavad sellele langevate footonite energia elektrienergiaks kasutades nähtavat valgust elektronide tootmiseks. Fotogalvaanilised elemendid koosnevad pooljuhtmaterjalidest, nagu räni, mida kasutatakse elektri tootmiseks. Tüüpilisel elemendil on kaks ränikihti, mille vahel toimub elektronide voog, tekitades elektrivoolu, mis saab elemendist väljuda läbi metallkontakti. Fotogalvaanilised elemendid ühendadakse raammooduliga, et saada päikesepaneel. Päikesepaneele katab klaas, mis laseb valgust läbi ja samas kaitseb pooljuhtplaati. Päikesepaneele saab ühendada jadamisi ja paralleelselt. [15]

Tüüpilise päikesepaneeli ehitus on toodud joonisel 2.2.

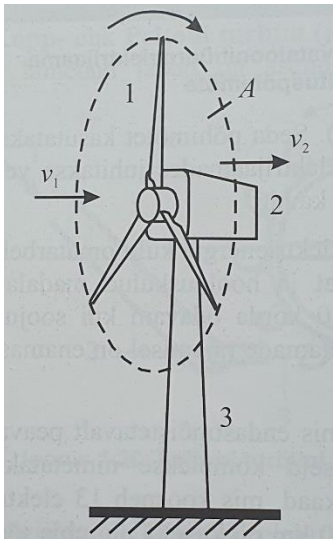


Joonis 2.2. Päikesepaneeli ehitus [4]

Väikeses võrguühenduseta elektrisüsteemis on vähem kasutusel elektrituulikud. Tuuleelektrijaamas kasutatakse üht või mitut tuuleturbiini, mis muundavad tuule kineetilise energia mehaaniliseks pöörlemisenergiaks. Tuuleturbiini põhiosadeks on tiivik, gondel, ja mast. Tiivik koosneb omakorda tiibadest, nabast, võllist ja tiibade pöörlemismehhanismist. Gondlis asub tiiviku võlli laagerdus, gondli pööramismehhanism, reduktor ja elektrigeneraator koos abiseadmetega. Gondel ja tiivik toetuvad mastile. Tiivikul on tavaliselt kolm tiiba, millede tipu liikumiskiirus on 6...8 korda suurem tuule kiirusest. Tuuleturbiini nimipöörlemiskiirus jääb

vahemikku 20...40 1/min. Tuule saadav võimsus tiiviku pöörlemispindalal on võrdeline tuule kiiruse kuubiga. [17]

Tuuliku ehitust kirjeldab lihtsustatult joonis 2.3.



Joonis 2.3. Tuuliku ehitus: 1 – tiivik, 2 – gondel, 3 – mast [16]

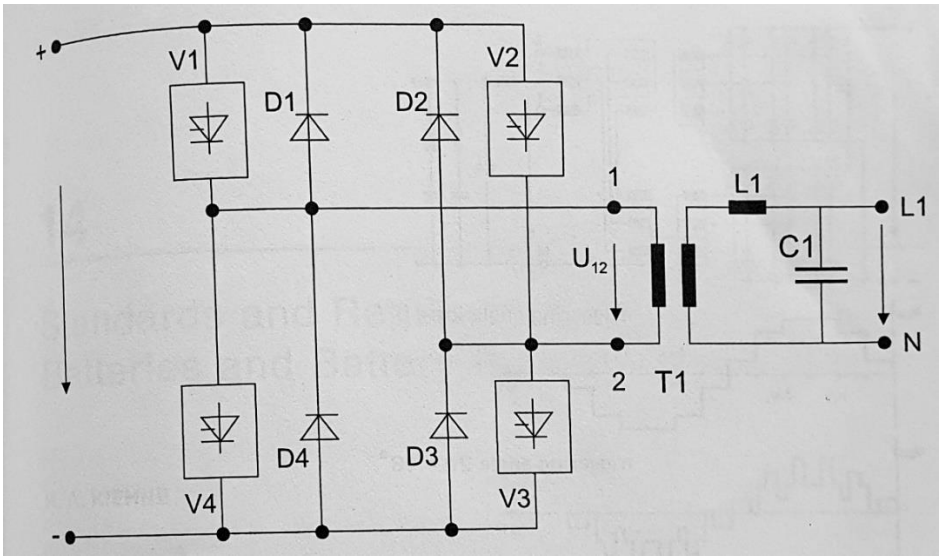
Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon defineerib väiketuulikut kogukõrgusega kuni 30 m. Väiketuulikute rahvusvaheline standard IEC 61400-2 klassifitseerib väiketuulikuks tuulegeneraatori võimsuse kuni 75 kW. [11]

Võrguühenduseta süsteemi planeerimise suureks väljakutseks on vajaminev energia ja toodetav energia on ajas muutuv. Tootmisseadmete planeerimisel *off-grid* süsteemi tuleb arvestada süsteemi suurusega, süsteemi võimekuse vähenemisega ajas, seadmete omavahelise ühildumisega ning keskkonna muutustega nagu varjud, tuule ligipääs ja temperatuur. [25]

2.2. Inverterid

Taastuvenergiaallikatest toodetud elektrienergia jõuab tarbijani enamasti läbi alalditest, akudest ja inverteritest koosneva süsteemide abil. Inverterit kasutatakse alalispinge vahelduvpingeks muundamiseks. Kolmefaasilise süsteemi puhul, kuhu on ühendatud PV-paneelid ja salvestusseadmed kasutatakse peamiselt hübriidinvertereid, mis annab võimaluse üleliigne toodetud elektrienergia salvestada või võrku müüa. [16]

Oma paidlikkuse poolest kasutatakse *off-grid* süsteemides kahefaasiliste sildahelatega ehk täissild invertereid. Sellised inverterid kasutavad reguleeritava pingega isekommuteerivaid muundureid. Kahefaasilise sildahelaga inverteri elektriline skeem on toodud joonisel 2.4. [16]



Joonis 2.4. Kahefaasilise sidlahelaga inverteri elektriskeem [16]

Ventiilide V1 ja V3 avanemisel on trafo T1 klemmide 1 ja 2 vahel positiivne pinge, ventiilide V2 ja V4 avanemisel tekib seal aga negatiivne pinge. Nimetatud „ventiilid“ koosnevad igaüks peamiselt türistorist ja türistoriga nullimisseadmest – nii saab nihkerežiimi või juhtivusrežiimi juhtida vastavate lubatavate impulssidega. Väljundpinge amplituudi juhitakse impulsi laiusmodulatsiooni abil. Harmooniline või ruutlaine võrdluspinge, millel on sama põhivõnkesagedus kui väljundpinge ja muutuv amplituud, valimiteks võetakse impulsi sageduse ja konstantse amplituudi pingelang. Türistoride ajamimpulss võetakse ristumiskohtadelt, mille tulemuseks on impulss-väljundpinge. Koormusvool võib nullpinge perioodidel liikuda üle taastusdioodide (D1 – D4). Kui positiivne poollaine on blokeeritud ventiil V1 juures, võib vool liikuda üle V3, D4 või T1. [16]

Trafo T1 eraldab galvaaniliselt aku ja tarbija ning seda saab täiendavalt kasutada pinge kohandamiseks. Trafo taga olev filter muudab inverteri impulss-väljundpinge siinusekujuliseks pingeks. Võib kasutada odavamaid madalpääsfiltreid (L1, C1) või ribapääsfiltreid. [16]

Suuremates *off-grid* elektrisüsteemides võib kasutada ka kolmefaasilisi sildahelaga invertereid. Kolmanda ahela lisamine ühefaasilisele inverterile annab kuue-impulsilise kolmefaasilise inverteri. Näiteks 12-impulsiline kolmefaasiline inverter koosneb kahest kolmefaasilisest kuue-

impulsilisest osamuundurist, mis annavad 12-impulsilise väljundpinge. Kolmefaasilise sildahelaga inverteri peamine eelis on see, et filtreid saab palju väiksemaks muuta ning saavutada dünaamilisem pingeregulatsioon väiksemate kadudega. [16]

2.3. Salvestusseadmed

Võrguühenduseta elektrisüsteemis on oluline koht salvestusseadmetel, eriti kuna sellises süsteemis ei toimu üleliigse elektrienergia võrku müümist ega sealt puudujääva elektrienergia ostmist. *Off-grid* süsteemides on põhiliseks elektrienergia salvestustehnoloogiaks elektrokeemilised salvestid. Sobiva salvesti valikul peetakse põhiliselt silmas selle hinda, mahutavust ning täielike laadimis- ja tühjenemistsüklite arvu. [9]

Akude üheks põhiliseks parameetriks on laengumahutavus, mis tavaliselt esitatakse ampertundides (Ah). Laengumahutavus saadakse tühjenemisvoolu ja -aja korrutamisel, kusjuures arvestatakse aku tühjenemist miinimumklemmipingeni. Aku mahutavust iseloomustab Peukerti valem: [9]

$$C_t = C_{t,N} \cdot \left(\frac{t}{t_N}\right)^{k-1}, \tag{2.1.}$$

kus C_t on aku mahutavus valitud tühjenemisajal t, Ah;

$C_{t,N}$ – nimimahutavus nimitühjenemisajal t_N;

k – Peukerti konstant, mis sõltub akutüübist.

Valem 2.1. näitab, et aku efektiivne mahutavus kahaneb mittelineaarselt koormuse kasvuga. Aku mahutavust mõjutavad ka järgmised tegurid:

1) mõõtmed – mida suurem on aku ruumala, seda suurem on elektroodide pindala ja seeläbi mahutavus,
2) temperatuur – madalamatel temperatuuridel väheneb aku tühjendamismahutavus,
3) miinimumpinge – paljudel akutüüpidel võib koormamine alla miinimumpinge põhjustada aku riknemise,
4) tühjenemisvool – mida rohkem akut koormata, seda väiksemaks muutub mahutavus,

5) kasutusaeg – aku kasutamine vähendab ajas tema laadimis-tühjenemisvoolu tugevusi. [9]

Võrguühenduseta elektrisüsteemis on akude jaoks tingimused keerulised, pidevalt toimub tühjakslaadimine. Süsteemis on oluline suur laadimistsüklite arv. [25]

2.4. Varutoiteallikas

Võrguühenduseta süsteemides on katkematu elektritoite tagamisel olulisel kohal varutoiteallikas. Varutoiteallikas ei tohiks sõltuda ilmastikuoludest ning peaks olema valmis elektrit tootma igal ajal. Samuti peab silmas pidama, et varutoiteallikat oleks kerge ja kiire kasutada ning et selle võimsus vastaks hoone põhilistele elektri koormusgraafikule. Üldiselt kasutatakse nii majapidamistes kui ka suurema tarbimisvõimsustega tööstustes varutoiteallikana kohtkindlaid generaatoreid. [20]

Generaatori valikul on oluline arvestada nii maksimaalse tarbimisvõimsusega kui ka väikese varuga, mis arvestab tulevikus võimalikke lisanduvaid tarbijaid. Generaatori nimivõimsuse valikul tuleb lisaks arvestada käivitusvooludega ning koormamise võimekusega, s.t et generaatorit ei saa kohe peale käivitamist nimivõimsuseni koormata. Peale käivitamist on generaator suuteline vastu võtma ca 50-70% nimivõimsusest, ülejäänud koormus tuleb juurde lülitada samm-sammult. Generaatori maksimaalne võimsus ületab nimivõimsust 10% ning maksimaalse võimsusega võib töötada 1 tund 12 töötunni kohta. [20]

Generaator tuleks valida ühefaasiline, kui kõik tarbijad on ühefaasilised ja kolmefaasiline kui esineb kolmefaasilisi tarbijaid. Kolmefaasilise generaatori puhul peab tähelepanu pöörama faaside sümmeetrilisele koormatavusele. [20]

Varugeneraatoreid pakutakse peamiselt bensiini-, diisli- või gaasikütusega. Suurem osa varutoiteallikaid on diiselgeneraatorid. Generaatori puhul peab kindlasti arvestama sobivate paigaldustingimustega, s.t generaatorile peab olema tagatud piisav ventilatsioon ning välitingimustes peab kindlasti valima suletud ehitusega generaatori. Oluliseks aspektiks paigalduskoha valikul on ka tekkiv müra. Müra vähendamiseks on võimalik soetada

mürasummutava korpusega generaatoreid. Kui katkematu toide on kriitilise tähtsusega, näiteks talvistel miinuskraadidel elekterkütte puhul, siis tuleb arvestada automaatkäivitusega. [20]

Väiksemates süsteemides kasutatakse peamiselt õhkjahutusega generaatoreid, suurtes süsteemides aga vedelikjahutusega, digitaalse pingekontrolliga statsionaarseid generaatoreid. Generaatoreid saab kasutada nii puudujääva energia katteks kui ka näiteks. akupanga ette laadimiseks. [25]

2.5. Tarbija

Võrguühenduseta elektrisüsteemis on üks olulisemaid aspekte elektrisüsteemi projekteerimisel ning seadmete valikul koormus. Koormust saab hinnata hetkeliselt, s.t võimsusena, ning ajas, s.t energiana. Esimene on oluline kogu süsteemi projeteerimisel, põhiliselt sobivate kaabli ristlõigete ja kaitseseadmete valikul, teine on oluline tootmisseadmete ja salvestusseadmete suuruse valikul. Tuleb ka arvestada, et elektritarbijate mingil hetkel tarbitav võimsus on alati väiksem kui nende paigaldatud võimsus. Oluline on arvestada siinkohal samaaegsustegurit, mis arvestab, et kõiki elektritarviteid ei lülitata samaaegselt sisse, kasutustegurit, mis arvestab tarvitite tööaega, ning maksimumtegurit, mis arvestab tarvititega, mis ei tööta pidevalt täisvõimsusel. Nimetatud tegureid korrutades saame nõudlusteguri, mille kaudu saab arvutada arvutusliku võimsuse. Neid tegureid saab aga kasutada vaid juhul kui on teada kõigi elektritarvitite nimivõimsused. Läbi nõudeteguri ja tarvitite nimivõimsuste summa saab leida arvutusliku võimsuse järgmiselt: [17]

$$P_a = k_n \cdot \sum_{i=1}^{n} P_n, \tag{2.2.}$$

kus k_n on nõudlustegur;

P_n – tarviti nimivõimsus, kW.

Nõudlustegur avaldub järgmiselt: [17]

$$k_n = k_s \cdot k_k \cdot k_m, \tag{2.3.}$$

kus k_s on samaaegsustegur;

k_k – kasutustegur;

k_m – maksimumtegur.

Kui kõigi elektritarvitite nimivõimsused pole teada, saab elamu arvutuslikku võimsust hinnata järgmise valemiga [17]

$$P_a = pA + P_0, \tag{2.3.}$$

kus A on elamu kasulik pind, m^2;

p – elektrifitseerituse taset iseloomustav erivõimsus, kW/m^2;

P_0 – hoone liiki iseloomustav lisavõimsus, kW.

Kui on teada hetkeline koormus hoone elektrisüsteemis, saab arvestada energiavajadust ning läbi selle hinnata vajaminevaid tootmisseadmete nimivõimsuseid, kaablire ristlõikeid ja kaitseseadmeid. Süsteemi projekteerimisel tuleb järgida faaside sümmeetrilisust, et varugeneraatori võrgus käivitamine toimuks probleemideta [20].

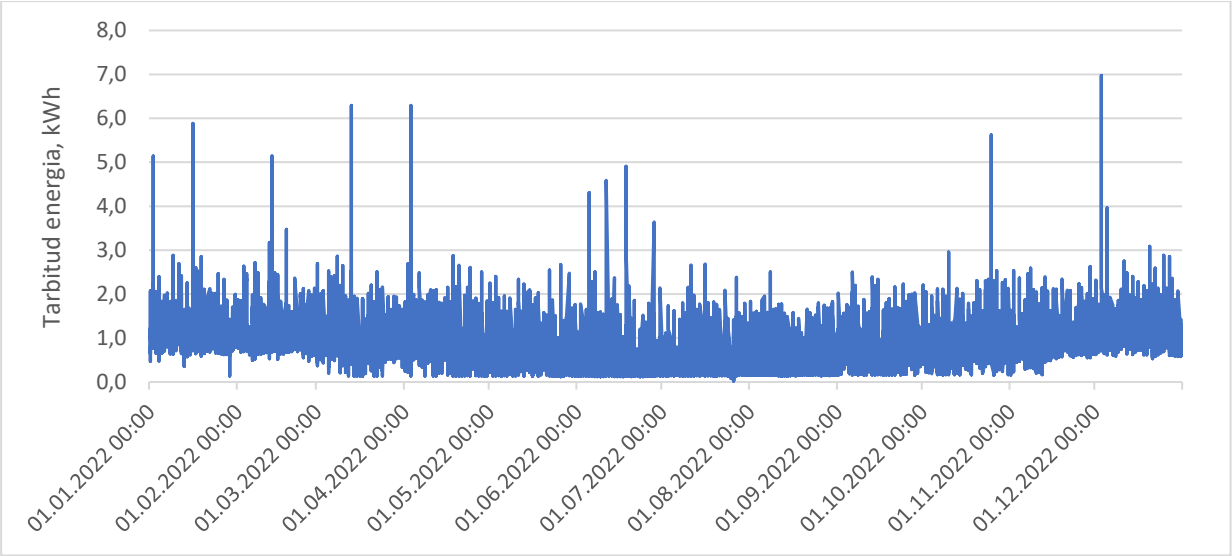
3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1. Töö lähteandmetega

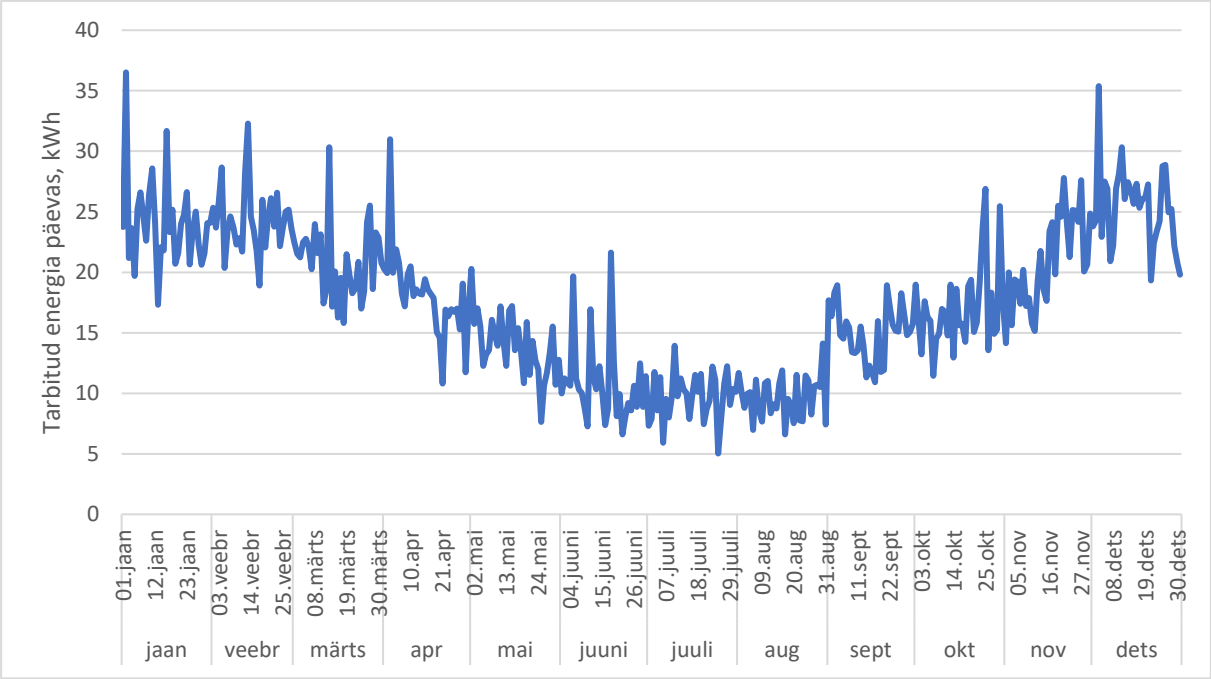
3.1.1. Ülevaade tarbimisest

Võrguühenduseta elektrisüsteemi rajamisel on väga oluline tootmis- ning salvestusseadmete dimensioneerimine. Antud töös on põhiline rõhk sobiva salvestusseadme valikul võrguühenduseta süsteemi. Töös on lähtutud süsteemist, mille põhiline elektritootmine toimub läbi PV paneelide ning tuulegeneraatori. Tarbimise lähteandmetena on töös kasutatud autori enda 137 m^2-se eramu 2022 aasta tarbimisandmeid.

Joonisel 3.1. on esitatud kogu lähteandmetena saadud eramu tunnipõhine elektritarbimine ning joonisel 3.2. päevane elektritarbimine aasta jooksul.

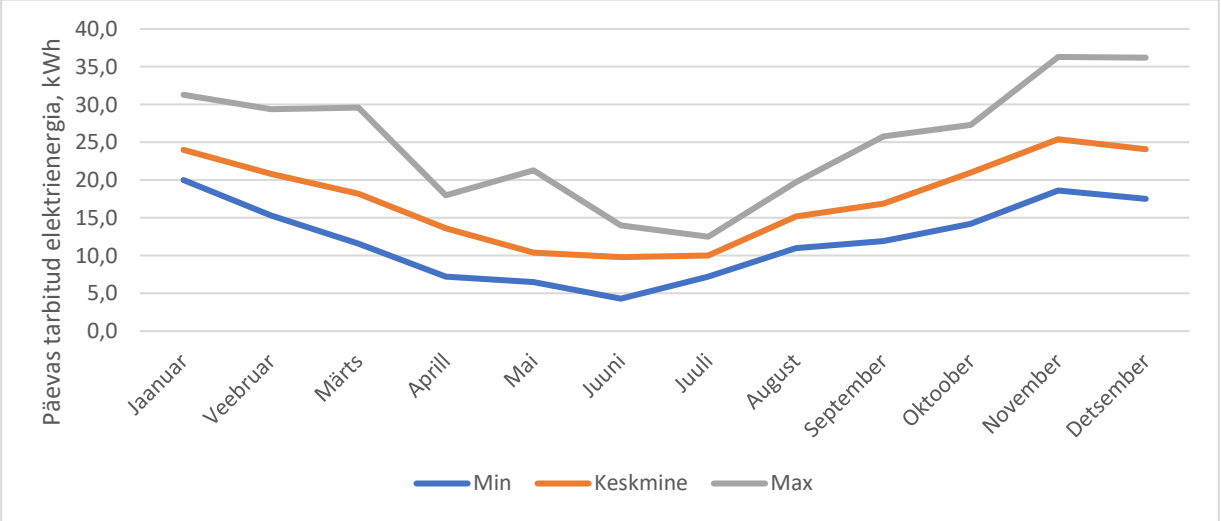


Joonis 3.1. Eramu tunnipõhine elektritarbimine perioodil 01.01.2022 kuni 31.12.2022 Kose alevikus, Harjumaal



Joonis 3.2. Eramu päevapõhine elektritarbimine perioodil 01.01.2022 kuni 31.12.2022 Kose alevikus, Harjumaal

Elamu aastane tarbimine oli kokku 6366 kWh. Põhilised tarbijad olid maasoojuspump, elektrikerisega saun ja erinevad köögiseadmed. Tiputarbimine tunnis oli 7 kWh ning päevas 36,3 kWh. Keskmine päevane tarbimine kogu perioodi jooksul aastas oli 17,5 kWh, mis moodustab 48% päevasest tiputarbimisest. Minimaalne päevane tarbimine kogu perioodil oli 4,3 kWh, mis on 25% päevasest keskmisest tarbimisest. Joonis 3.3. kirjeldab päevast tipu-, keskmist- ja minimaalset tarbimist aasta jooksul kuude lõikes.

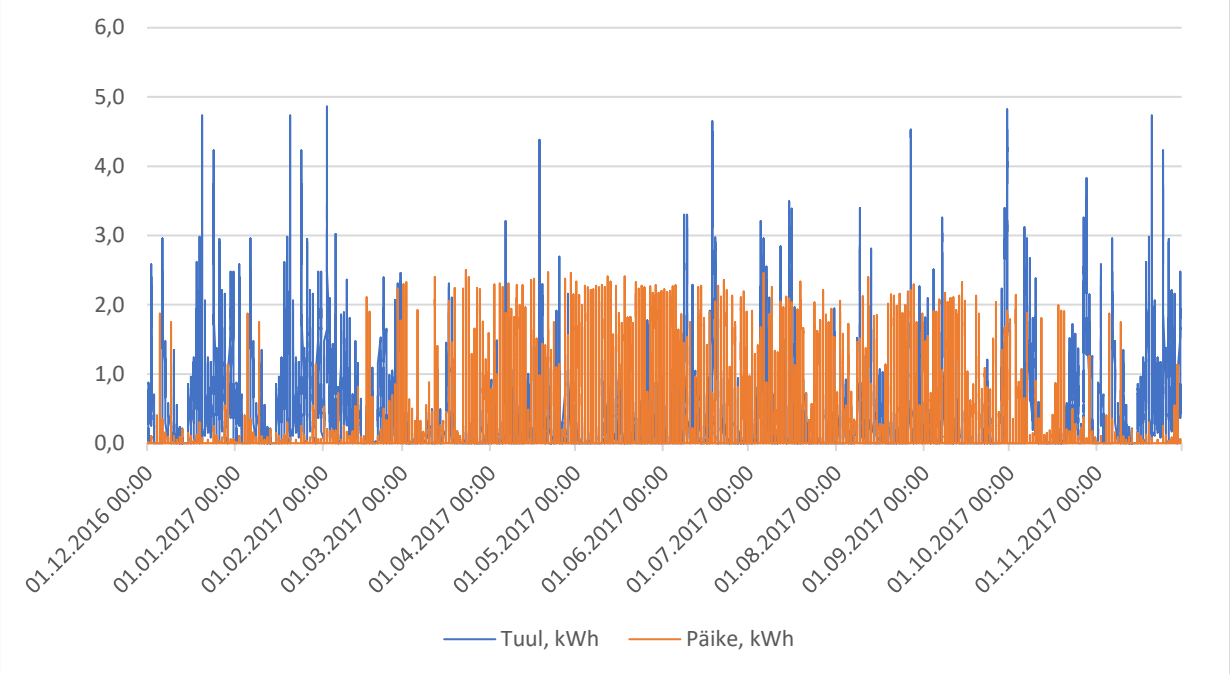


Joonis 3.3. Päevane tipu-, keskmine- ja miinimumtarbimine kuude lõikes aasta jooksul

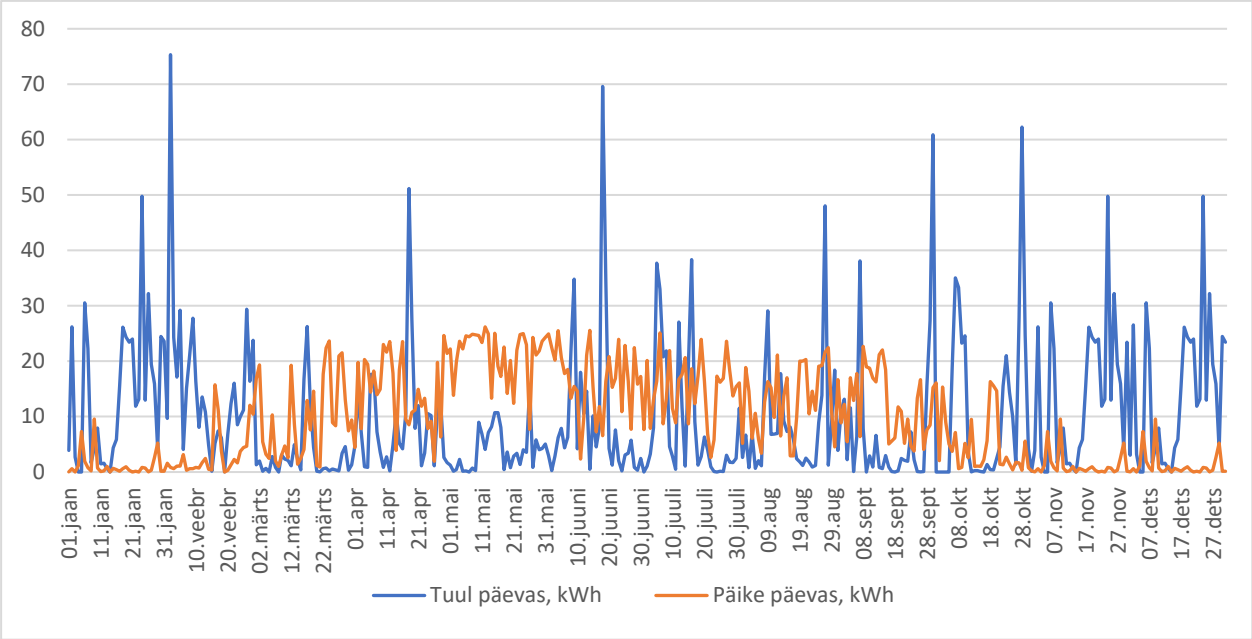
Näeme, et minimaalsete, maksimaalsete ja keskmiste väärtuste muutused kuude lõikes on sarnased. Samuti loeme jooniselt 3.3. välja, et minimaalne talvine tarbimine on samas suurusjärgus või isegi suurem suvisest tiputarbimisest.

3.1.2. Ülevaade tootmisest

Tootmise lähteandmetena on töös kasutatud professor Andres Annukilt saadud 2,5 kW-se päikesepargi ning Maaülikooli Tehnikamaja katusel asuva 3,5 kW-se tuuliku tootmisandmeid aastast 2017. Joonistel 3.4. ja 3.5. on esitatud lähteandmetena saadud elektritootmise andmed tunni ja päeva kohta.



Joonis 3.4. 2,5 kW-se päikesepargi ja 3,5 kW-se tuulegeneraatori tunnipõhised tootmisandmed ajavahemikul 01.12.2016 kuni 30.11.2017



Joonis 3.5. 2,5 kW-se päikesepargi ja 3,5 kW-se tuulegeneraatori tootmisandmed päeva kohta ajavahemikul 01.12.2016 kuni 30.11.2017

Aastane tuuleenergia toodang on 3573,5 kWh ning päikeseenergia toodang 2560,6 kWh. Kokku oli uuritud perioodil aastane toodang seega 6134,1 kWh. Minimaalne toodang tunnis ja ka päevas oli 0 kWh. Keskmine päevane tuuleenergia toodang oli 10 kWh ja keskmine päevane päikeseenergia toodang oli 9,5 kWh. Maksimaalne päevane tuuleenergia toodang oli 75,3 kWh ja päikeseenergial 26,2 kWh.

Toodang kokku oli keskmiselt 76,2 kWh, maksimaalselt 19,3 kWh ja minimaalselt 0 kWh päevas.

Tuulegeneraatori andmete põhjal on leitud ka tuuliku võimsustegur järgmise valemiga: [2, 3]

$$C_F = \frac{E_{keskmine}}{E_{max}} = \frac{0,4}{3,5} = 0,11, \qquad (3.1.)$$

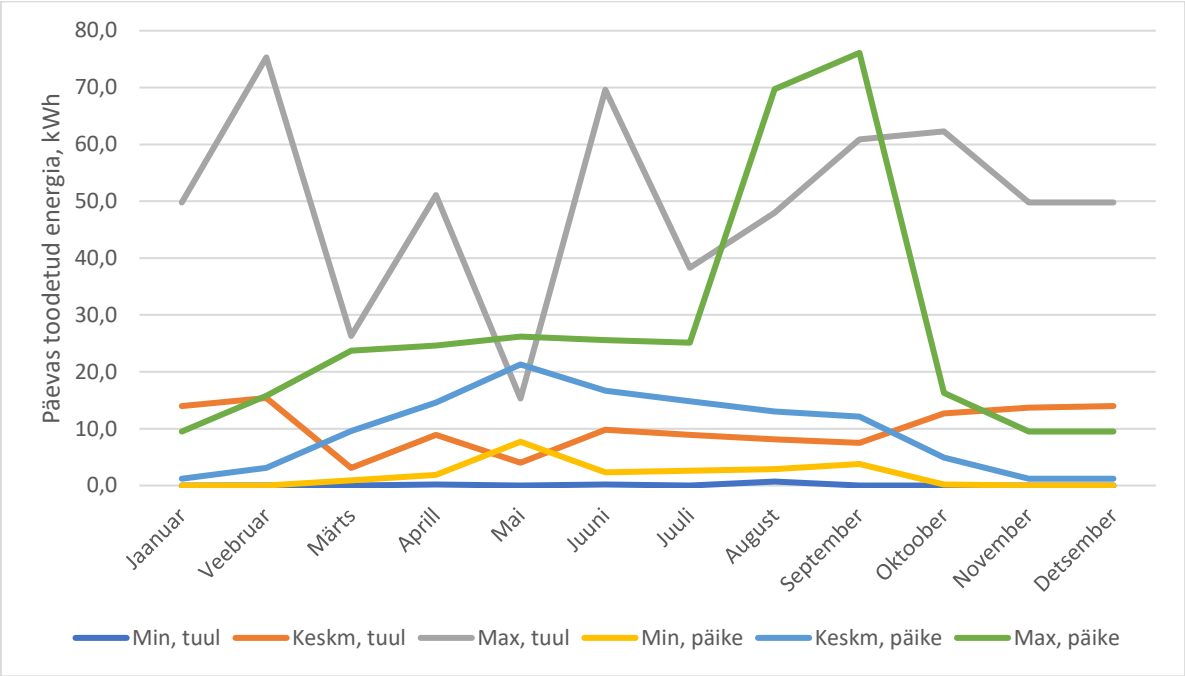
kus C_F on tuuliku võimsustegur;

$E_{keskmine}$ – keskmine toodetud energia tunnis, kWh;

E_{max} – tuuliku maksimaale toodetav energia tunnis, kWh.

Näeme, et uuritud tuulegeneraatori võimsustegur viitab tuuletingimustele sisemaal. [2, 3]

Joonis 3.6. kirjeldab lähteandmetena kasutatud päikesepargi ja tuulegeneraatori päevast maksimaalse, minimaalse ja keskmise toodetud energia muutust kuude lõikes.



Joonis 3.6. 2,5 kW-se päikesepargi ja 3,5 kW-se tuulegeneraatori päevane maksimum-, keskmine ja minimaalne toodetud energia aasta jooksul kuude lõikes.

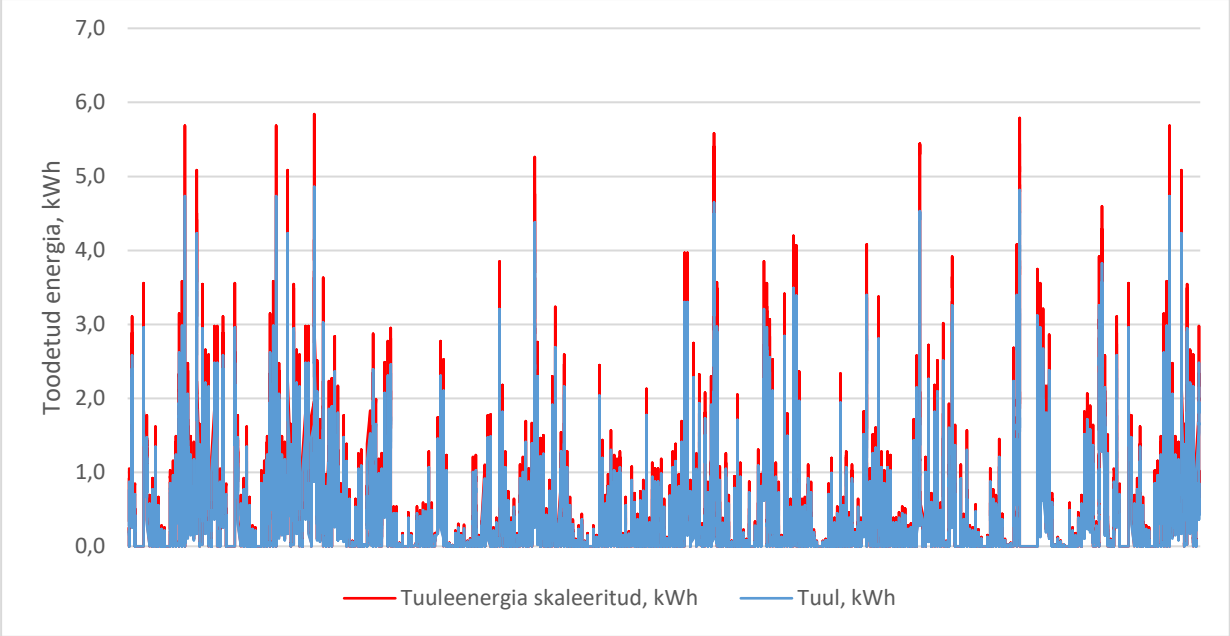
Näeme, et suurimate muutustega on tootmise maksimaalsed väärtused, päikeseenergia puhul jääb tiputootmine hilissuve ja sügise alguse perioodi, tuuleenergia puhul on maksimaalväärtused läbi aasta väga muutlikud, suuremad maksimaalväärtused jäävad sügis- ja talvekuudele.

3.1.3. Tootmisandmete võrdlus tarbimisandmetega

Lähteandmetena saadud tootmisandmed ei ole võrdsed tarbimisandmetega. Et viia tootmisandmed vastavusse tarbimisandmetega on kasutatud tootmisandmete skaleerimist. Viimane tagab, et taastuvenergiaallikatest toodetud energia koguhulk ühtib tarbitud energiaga, arvestades konkreetse energiaallika tootmiskõveraga. Kasutatud skaleerimismeetod võtab arvesse tuulegeneraatori ja päikeseelektrijaama tootmisvõimsusi ning nende osakaalu aastases

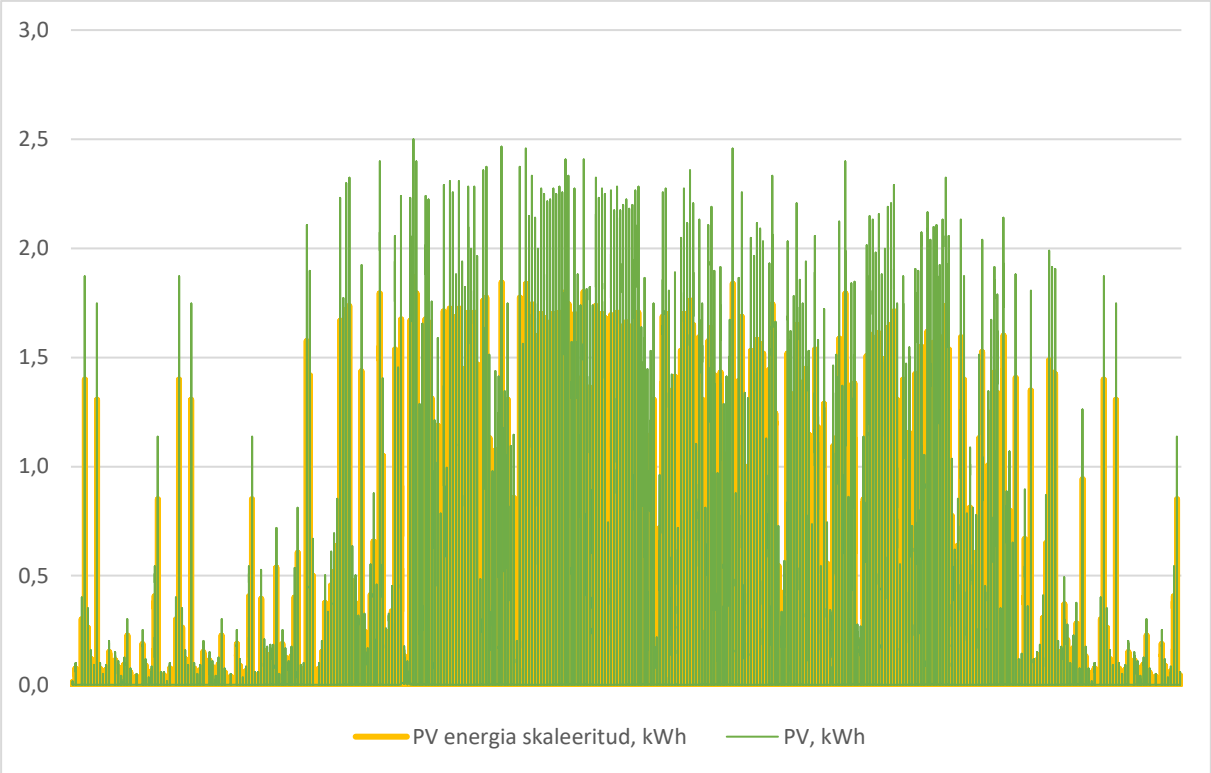
energiajaotuses – antud töös valitud 70/30 suhe tuuleenergia kasuks. Tootmisandmeid skaleerimise abil kohandades on saavutatud tuule- ja päikeseenergia proportsionaalne esitus kogu energiavarustuses, mis vastab soovitud energiasegude suhtele. [2, 3]

Tootmisandmete skaleerimisel kasutati 1,04-kordset tootmisenergiat, et tagada aastane tootmisenergia võrdsus tarbimisenergiaga. Skaleeritud tootsmisenergiate summa oli 6379,5 kWh, mida on 13,3 kWh rohkem kui tarbimisenergia summa. Tootmisandmeid skaleerides vastavalt 70/30 suhtele tuuleenergia kasuks tuli arvestulikuks tuuliku nimivõimsuseks 6 kW ja päikesepargi koguvõimsuseks 2 kW, mida on hinnatud tiputoomise järgi. Skaleeritud tuuleenergia väärtused võrdluses lähteandmetena saadud tegelike tuuleenergia väärtustega on esitatud joonisel 3.7.



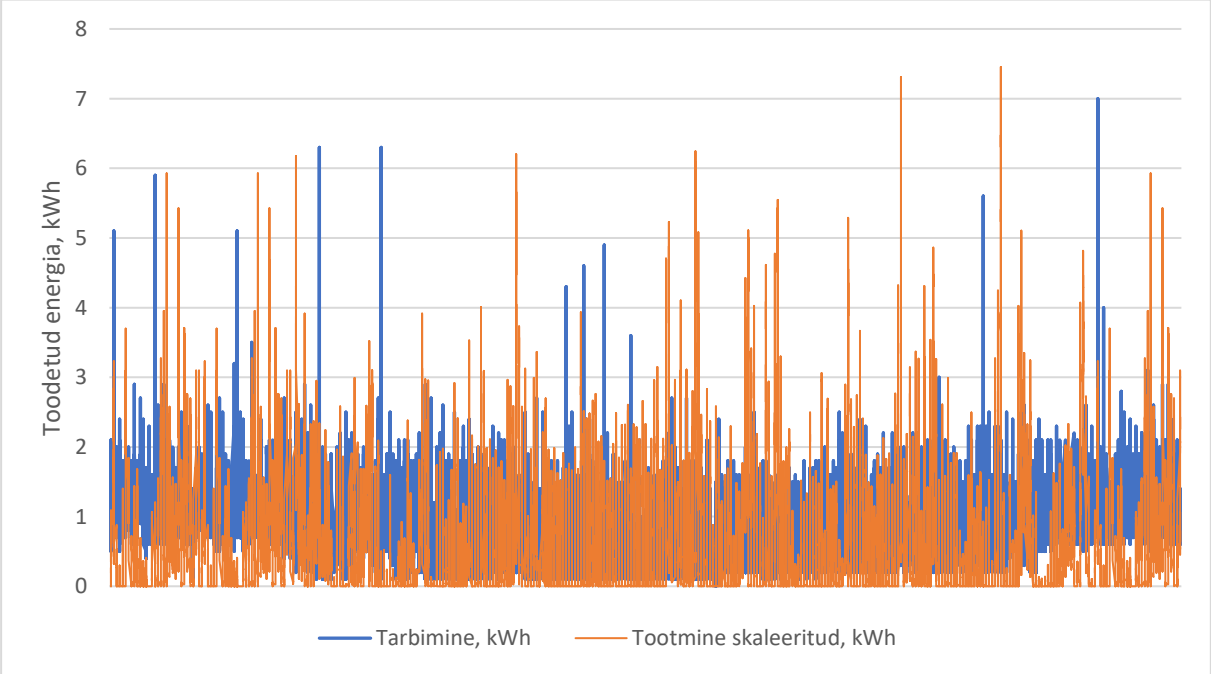
Joonis 3.7. Skaleeritud tuulegeneraatori tunnipõhiste tootmisandmete erinevus tegelikest tootmisandmetest

Samasugune võrdlus päikesepargi tootmisandmetega on esitatud joonisel 3.8.



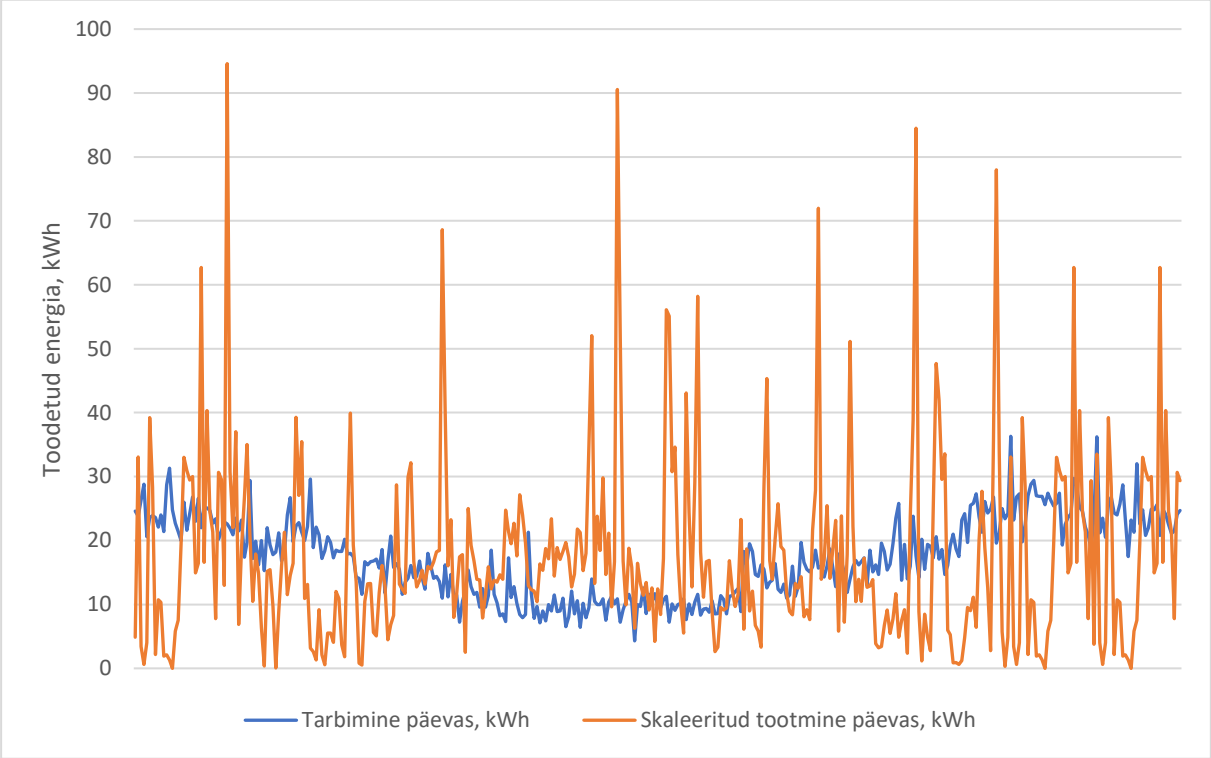
Joonis 3.8. Skaleeritud päikesepargi tunnipõhiste tootmisandmete erinevus tegelikest tootmisandmetest

Skaleeritud tootmisandmed võrrelduna tarbimisandmetega on esitatud joonisel 3.9.



Joonis 3.9. Skaleeritud tootmisandmed võrdluses tarbimisandmetega

Näeme, et andmeid skaleerides 70/30 tuuliku kasuks ja järgides tuuliku ja päikesepargi tootmiskõveraid, saame ühtlasema energiajaotuse aasta jooksul. Võrguühenduseta süsteemis on ette nähtud, et vähese tootmisega päevad kompenseeritakse akude ja varugeneraatoriga. Tootmis- ja tarbimisandmete päevapõhine võrdlus on joonisel 3.10.



Joonis 3.10. Päevapõhised skaleeritud tootmisandmed võrdluses tarbimisandmetega

Päevapõhistest andmetest näeme, et skaleeritud tootmisandmete kõvera väärtused on suuremad, mille tulemusel on parem tarbimise kattuvus väiksema tootmisenergiaga päevadel. Nii on saadud lähteandmed sobiva salvesti mahutavuse leidmiseks võrguühenduseta süsteemile.

3.2. Salvesti sobivuse hindamise metoodika

3.2.1. Energiareservi leidmine ööpäevase keskmise tootmise ja tarbimise järgi

Salvesti sobivuse hindamisel on esmalt vaja hinnata vajalikku energiareservi suurust. Lihtsaim viis vajalikku energiareservi leidmiseks on kasutada keskmist tunnis tarbitud ta toodetud elektri

vahet. Seejärel summeeritakse vahed tingimusel, kui tarbimine ületab tootmist. Summeerimise valem oleks järgmine: [9]

$$E_{g,i} \leq E_{c,i} \rightarrow E_{res} = \sum_{i=1}^{n} E_{res,i} = \sum_{i=1}^{n} \left(E_{c,i} - E_{g,i}\right), \quad (3.2.)$$

kus $E_{res,i}$ on tunnis *i* vajalik ressurss, kWh;

E_{res} – päevane keskmine vajalik reserv, kWh;

$E_{g,i}$ – on tunnis *i* toodetud elektrienergia, kWh;

n – on 24 tundi (ööpäevas);

$E_{c,i}$ – elektri tarbimine tunnis *i*, kW.

Nii on võimalik leida salvestamisvajadus keskmise toodangu puudujäägi järgi.

Vajalikud energiareservid on leitud suurima ja vähima elektritoodangutega kuudele – juuni ja märts. Arvutustes on kasutatud eelnevates peatükkides kirjeldatud skaleeritud tootmisandmeid suhtega 70/30 tuuleenergia kasuks. Arvutustulemused on esitatud lisades 1 ja 2. On leitud, et vajaminev energiareserv märtsis on 279,06 kWh ning juunis -347,04 kWh. Päevane suurim vajalik energiareserv on märtsis 26,43 kWh ning juunis 2,8 kWh. Negatiivne väärtus tähendab energia ülejääki.

Vajalik energiareserv on aku mahutavus, mis tuleb konverteerida amper-tundidesse järgmiselt:

$$C = \frac{E_{res}}{U_a}, \quad (3.3.)$$

kus C vajalik aku mahutavus, Ah;

E_{res} – päevane keskmine vajalik reserv, Wh;

U_a – aku klemmipinge, V.

Seega märtsis suurima päevase energiareservi tagamiseks on vaja 1108 Ah mahutavusega energiasalvestust. Akupanga suuruse hindamisel tuleb arvestada ka konkreetse akutüübi kasutegurit ning tühjenemissügavust. Näiteks raudnikkelakude puhul on saadaval 80...100% salvestatud energiast, kuid näiteks sügavtühjendustsükliga pliiakude puhul saab kasutada umbes poolt, kuna edasine tühjendamine kahjustab akut. [6, 15]

3.2.2. Energiareservi leidmine toodanguta perioodile

Kui on leitud vajalik energiareserv keskmise ööpäevase tootmise ja tarbimise järgi, siis on hea lisaks leida energiareserv toodanguta perioodide jaoks, kuna leitav väärtus võib suuresti erineda esialgsest hinnatavast energiareservist. Toodanguta perioodide jaoks energiareservi leidmine toimub järgmiselt: [9]

1. tootmisandmetest tuleb leida suurim toodanguta periood. Tavaliselt kasutatakse tootmisandmeid pikema perioodi vältel;
2. Seejärel saab töö- ja puhkepäevade tarbimisandmete alusel leida vajalik energiareserv tootmiseta päevadele. Näiteks kui vaatleme tootmiseta nädalat ehk seitset päeva, oleks valem järgmine:

$$E_{res,k} = 5 \cdot E_{c,tööpäev} + 2 \cdot E_{c,puhkepäev}, \quad (3.4.)$$

kus $E_{res,k}$ on vajalik energiareserv tootmiseta päevadele, kWh;

$E_{c,tööpäev}$ – keskmine tööpäeva tarbimine, kWh;

$E_{c,puhkepäev}$ – keskmine puhkepäeva tarbimine, kWh.

Toodanguta perioodi on vaadeldud antud töös lähteandmetena saadud perioodi, s.t üks aasta. Toodanguta perioodiks on arvestatud päevad, mille tootmine jääb alla 25% päevasest tarbimisenergiast. Sellise kriteeriumiga on leitud viis toodanguta päeva. Järgmisena on leitud suurima toodanguta perioodi töö- ja puhkepäevade arv ning aasta keskmise tööpäeva ja puhkepäeva tarbimisenergiad. Toodanguta perioodil oli 3 tööpäeva ja 2 puhkepäeva. Aasta keskmine tööpäeva tarbimine 17,4 kWh ja puhkepäeva tarbimine 17,6 kWh. Kuna tööpäeva ja puhkepäeva keskmised päevased tarbimisandmed ei erine palju, on toodanguta perioodi energiareservi leidmiseks kasutatud keskmist puhkepäeva tarbimist, kus toodanguta päevade arv on korrutatud puhkepäeva tarbimisenergiaga.

$$E_{res,k} = 5 \cdot E_{c,puhkepäev} = 5 \cdot 17{,}6 = 88\ kWh.$$

Toodanguta perioodi katteks, kasutades valemit 3.3, on vaja 3666,7 Ah-st salvestit. Samuti tuleb siinkohal arvestada kasuteguriga, mis on sõltuvalt akutüübist erinev.

3.2.3. Akude isetühjenemise, tühjenemissügavuse ja kasuteguriga arvestamine

Aku mahutavuse leidmisel võrguühenduseta elektrüsüsteemi on oluline arvestada lisaks konkreetsele akutüübile iseloomulike isetühjenemise määra, tühjenemissügavuse ning kasuteguriga.

Akude isetühjenemine tähendab positiivse ja/või negatiivse elektroodi laengu järk-järgulist kadumist, kui aku ei ole salvestamas või tühjenemas avatud vooluringis. Üheks isetühjenemise põhjuseks on oksudatsiooniastme vähenemine positiivses elektroodis, näiteks raudnikkelakudes hapniku kadu nikkelhüdroksiidi elektroodides. Isetühjenemist võivad põhjustada ka akus toimuvad sekundaarsed reaktsioonid, kui need on termodünaamiliste andmete kohaselt vastava elektroodi tasakaalupotentsiaalil. Seejärel moodustavad sekundaarne reaktsioon ja tühjenemisreaktsioon segapotentsiaali, mille tulemusena kaks elektrokeemilist reaktsiooni kompenseerivad üksteist ja tagajärjeks on järk-järguline tühjenemine. [16]

Laialdasemalt tuntakse isetühjenemise all aga salvestatud elektrihulga iseeneslikku vähenemist aku pikemaajalisel ladustamisel. See sõltub suuresti keskkonnatingimustest, kus akut hoitakse ning akutüübist. Sellist tüüpi isetühjenemise puhul suureneb aja jooksul akuelemendi sisetakistus. Akudesse salvestatud elektrihulga vähenemisega seotud isetühjenemine erineb suuresti sõltuvalt aku tüübist 0,5...20% vahel aastas. Tuleb tähele panna, et elektrokeemiline isetühjenemise, mida on kirjeldatud eelpool, väärtused on oluliselt väiksemad. [16]

Võrguühenduseta elektrisüsteemis tuleb arvestada isetühjenemisega vähenemist juhul, kui aku peab täislaetuna seisma pikema perioodi jooksul. Viimane olukord eeldaks aga tootmise ja tarbimise 100%-list kattuvust või akupanga osalist reservis hoidmist.

Tühjenemissügavus (inglise keeles *Depth of Discharge* või *DoD*) on väärtusnäitaja, mis iseloomustab maksimaalset võimalikku kasutatavat energiat, mida saab akust tarbida ilma akut kahjustamata ja mis on seotud kogu energiaga, mida saab sellesse akusse salvestada ja mida tavaliselt väljendatakse protsentides. [7]

$$DoD = \frac{C_d}{C} \cdot 100\%, \quad (3.5.)$$

kus C_d on tarbitud energia, Ah;

C – maksimaalne akusse salvestatav energia (mahutavus), Ah.

Tühjenemissügavus on võrguühenduseta süsteemidesse salvestite valikul oluline parameeter, kuna see näitab, kui palju akusse salvestatud energiast on korraga saadaval tarbimiseks. Näiteks akude puhul, mille tühjenemissügavus on 50%, saab korraga kasutada vaid pool aku mahutavusest. Seetõttu võib väiksema tühjenemissügavusega akude puhul vaja olla suurema mahutavusega akusid, et täita tarbija energiavajadusi.

Lisaks isetühjenemisele ja tühjenemissügavusele tuleb arvestada ka aku kasuteguriga. Aku kasutegur on kasutatava energia väljundi ja laadimisel salvestatud energia suhe. See näitab, kui tõhusalt muundab aku salvestatud energia kasutatavaks elektrienergiaks. Mida suurem on kasutegur, seda väiksema mahutavusega akut võime kasutada. [5]

Seega võrguühenduseta elektrisüsteemis tuleb lisaks vajaminemale energiareservile arvestada tühjenemissügavuse ja kasuteguriga. Isetühjenemisega tuleb arvestada, kui akusid hoiustatakse hilisemaks kasutamiseks. Eelnevalt on leitud töö lähteandmetena saadud eramu tarbeks vajaminev energiareserv 88 kWh ehk 3666,7 Ah. Sõltuvalt akutüübist tuleb arvestada sellele väärtusele juurde aku kasutegur ja tühjenemissügavus.

4. TULEMUSTE ANALÜÜS JA JÄRELDUSED

4.1. Raudnikkelakude võrdlus teiste akutüüpidega

Lisades 1 ja 2 toodud arvutustulemustest näeme, et suurima ja väikeima tootmisega kuudel on vajalik salvestusmahutavus kohati väga suur. Veel suurem on salvestusvajadus, kui arvestada toodanguta perioodidega. Leidsime käesoleva töö jaotises 3.2., et tootanguta perioodideks vajamineva mahutavuse ca 3700 Ah.

Raudnikkelakude sobivuse hindamist on viidud antud töös läbi võrdluse teiste levinud kasutatud akudega, s.t plii-, liitium-ioon ja nikkel-kaadmium akudega. Nimetatud akude põhiparameetrid ja kaasnevad kulud on koondatud tabelisse 4.1.

Tabel 4.1. Akude põhiparameetrid [6, 15]

Parameeter	**Pliiaku**	**Li-Ion**	**NiCd**	**Ni-Fe**
Kasutegur, %	70...82	85...98	60...70	65...80
Isetühjenemine, %/päevas	0,033...0,3	0,1...0,3	0,067...0,6	0,3...0,5
Tühjenemissügavus, %	50...80	80...90	70...90	90...100
Eluiga, tsüklit	100...2t	1t...11t	800...3,5t	2t...5t
Eeldatav eluiga, aastad	3...20	5...15	5...20	20...25
Erienergia, Wh/kg	30...50	75...200	50...75	20...45
Erivõimsus, W/kg	75...300	150...315	150...300	65...90
Töötemperatuur, °C	5...35	-40...85	-20...50	-20...50

Arvestades toodanguta perioodiks vajaliku salvestamismahutavus 3666,7 Ah, akutüüpide kasuteguri ja tühjenemissügavusega, oleks pliiaku puhul vaja 5192...7150 Ah, liitium-ioonaku puhul 4114...5060 Ah, nikkel-kaadmiumakude puhul 5244...6674 Ah ja raudnikkelakude puhul 4400...5445 Ah akupanka. Tootmiseta perioodidel võib arvestada ka isetühjenemist, mis

raudnikkelaku 0,5%-se tühjenemisega päevas tähendab 28,2 Ah ning tooganguta perioodil, mis kestab 5 päeva võib isetühjenemine olla kuni 141 Ah.

Raudnikkelaku tehnilised parameetrid on sarnased nikkel-kaadmium aku omadega. Raudnikkelaku kasutegur jääb samasse vahemikku laialdaselt kodumajapidamistes elektrienergia salvestina kasutatava pliiaku kasuteguriga. Nii raudnikkelakusid kui ka nikkel-kaadmium akusid iseloomustab suhteliselt suur isetühjenemise määr. Samas, võrguühenduseta elektrisüsteemis on salvestusseadmed pidevas töös – kas salvestamas või tühjenemas, seega ei oma isetühjenemise määr *off-grid* süsteemis sama suurt rolli kui mõnes teises rakenduses, kus aku peab täis laetuna seisma pikema perioodi vältel.

Raudnikkelaku põhiline tehniline eelis teiste elektrokeemiliste salvestusseadmete ees on selle pikk eluiga. Veel üheks plussiks pliiaku ees on lai töötemperatuuri vahemik, s.t aku jaoks pole miinuskraadide juures vaja luua eraldi tingimusi (näiteks küttega ruumi). Viimane on oluline parameeter pikkade külmade perioodidega piirkondades. Lisaks taluvad raudnikkelakud ülelaadimist ja -tühjenemist mõjutamata aku mahutavust. Sel põhjusel ei vaja raudnikkelakudega *off-grid* süsteemid voolukontrollereid taastuvenergiaallikatele nagu seda vajavad pliiakud ja liitium-ioonakud. Raudnikkelakud on ka väiksema hooldamisvajadusega kui pliiakud, kuna neil on väiksem risk sulfatsiooniks. Ni-Fe akude tootmine ja kasutamine on ka keskkonnasõbralikum kui pliiakude kasutamine, kuna need ei sisalda mürgiseid raskemetalle, ja ohutumad kasutada, kuna neil on väiksem kalduvus ülekuumenemisele ning seega on nad ka vähem tuleohtlikkud. [13]

Raudnikkelakude suurimateks miinusteks on madalad energeetilised näitajad. Erienergia jääb pliiakudega samasse vahemikku, erivõimsus ja erienergia on aga kordades väiksem võrreldes teiste akutehnoloogiatega. Üldiselt on tegemist kasutajale oluliste parameetritega, kuna sama koguse elektrienergia salvestamiseks on raudnikkelakude puhul vaja oluliselt rohkem aku elemente ning seega on kogu akupanga mass suurem. Kasutades erienergia väärtusi tabelis 4.1. võime hinnata vajaliku akupanga massi 24 V juures 88 kWh salvestamiseks. Pliiakudest akupanga mass jääks vahemikku 1760...2933 kg, liitium-ioonakude mass vahemikku 440...1173 kg, nikkel-kaadmiumakude mass vahemikku 1173...1760 kg ning raudnikkelakude mass vahemikku 1955...4400 kg. Näeme, et raudnikkelakud on sama mahutavuse juures massilt suuremad kui teistest akutüüpidest akupangad. Samas on siinkohal oluline konkreetse akutüübi ehitus ning elementide arv akus, mis võib akupanga massi oluliselt mõjutada. Võrguühenduseta

süsteemidele mõeldud salvestusseadmed on statsionaarsed, seega ei ole akupanga mass niivõrd oluline, kui mõnedes mobiilsema rakendusega süsteemides.

Kuigi raudnikkelakude tehnoloogia on võrreldes nikkel-kaadmiumi- ja liitium-ioonakudega võrreldes odav, on pliiakude tootmine endiselt odavam ning kuna nende energeetilised näitajad on paremad ja pliiakude materjalid on suures ulatuses taaskasutatavad, on need kindlasti atraktiivsemad valikud väikeste ja keskmiste majapidamiste jaoks.

4.2. Kulutsükkel

Salvestite üks tasuvuse hindamise meetod on elukulutsükli hindamise meetod, kus arvestatakse kõikvõimalike muutuv- ja püsikuludega, mis võivad tekkida etteantud ajaperioodi jooksul. Viimased väärtused arvestatakse ümber nüüdisväärtustesse ning seeläbi on võimalik erinevaid tehnoloogiaid otseselt omavahel võrrelda. Salvestite kulutsükli hindamisel võetakse arvesse kolme liiki kulusid: süsteemikulud, ehituskulud ning käidu- ja hoolduskulud. Süsteemikuludesse arvestatakse kogu süsteem salvesti ja võrgu vahel, s.t kõik muundurid, juhtimissüsteemi osad, toitesüsteem, elektrilised ühendused, ohuandurid jms. Ehituskulude alla arvestatakse kõik ehitamisega seonduvad kulud, sh materjal, projekteerimine, kinnistuga seonduvad kulud, ehitusload, keskkonnamõjude hindamised, juurdesõiduteed jms. Käidu- ja hoolduskulude alla läheb aastane püsikulu, mida tuleb arvesse võtta salvesti kasutamise käigus. [9]

Erinevate akutüüpide eeldatav kulu on esitatud tabelis 4.2.

Tabel 4.2. Erinevate akutüüpide eeldatav majanduslik kulu [9, 13]

Parameeter	Pliiaku	Li-Ion	NiCd	Ni-Fe
Kulu ühikvõimsuse kohta, $/kW	80...400	100...200	400...600	500...1000
Kulu energiamahutavuse kohta, $/kWh	150...250	200...300	600...800	500...1500
Ehituskulud, $/kWh	250...500	300...600	350...700	350...700
Süsteemikulud, $/kW	50...150	50...200	100...200	100...200
Käidu- ja hoolduskulud aastas, $/kWh	0,05...0,10	0,05...0,15	0,10...0,15	0,05...0,10

Tabelist 4.2. näeme, et madalaimate kogukuludega kilovatt-tunni kohta on pliiakud ja liitium-ioonakud. Madalaimate käidu- ja hoolduskuludega on plii- ja raudnikkelakud. Raudnikkelakude puhul tuleb aga arvestada, et täna on nende puhul tegemist nišitehnoloogiaga, mis tähendab väiksemat nõudlust ja seeläbi kõrgemat hinda. Samuti on tegemist raskema akupangaga, mis suurendab transpordikulusid.

Raudnikkelakudel on aga potentsiaal olla odavam tehnoloogia. Tabelis 4.3. on esitatud erinevate akutüüpide põhiliste toormaterjalide turuhind seisuga mai 2023.

Tabel 4.3. Akutüüpide põhilised toormaterjalid ja nende turuhind seisuga mai 2023 [26]

Aku tüüp	**Toormaterjal**	**Ühiku hind, $/kg**	**Kogus akuelemendis, kg/kWh**	**Tooraine maksumus, $**
Pliiaku	Plii	2,08	0,5...1,5	1,04...3,12
Li-Ion	Liitium	32,2	0,15...0,3	4,83...9,66
	Koobalt	30,18	0,1...0,3	3,02...9,05
	Grafiit	0,88	0,05...0,15	0,04...0,13
NiCd	Nikkel	21,03	0,05...0,15	1,05
	Kaadmium	4,76	0,15...0,35	0,71...1,67
Ni-Fe	Nikkel	21,03	0,3...0,5	6,3...10,5
	Raud	0,10	0,1...0,3	0,01...0,03

Tabelist näeme, et põhitoorainete hind kWh kohta on pliiakul kuni 3,12 USD, liitium-ioonakul kuni 18,8 USD, nikkel-kaadmiumakul kuni 2,72 USD ja raudnikkelakul kuni 10,53 USD. Põhiline raudnikkelaku hind koosneb nikli suurest kogusest akuelemendis. Kui arvestada ainult täna saadaolevate akutüüpidega, pliiaku, liitium-ioonaku ja raudnikkelakuga, siis raudnikkelaku on konkurentsivõimeline, kuid toorained on siiski kallimad kui pliiakul sama kWh saamiseks.

4.3. Keskkonnamõju

Akude valikul on oluline hinnata ka akutüübi keskkonnamõju. Viimane võib sõltuda mitmetest asjaoludest näiteks kasutatud materjalidest, tootmisprotsessi iseärasustest, utiliseerimismeetoditest jms.

Happeakude puhul on suurima keskkonnamõjuga plii, mis on mürgine raskemetall ja võib põhjustada olulisi terviseprobleeme. Plii võib saastada pinnast, õhku ja põhjavett ning püsida keskkonnas mitu aastat. Pliireostus võib esineda aku eluea kõigil etappidel, alates tootmisest kuni utiliseerimiseni. Plii puhul on tegemist ka taastumatu loodusvaraga ning selle kaevandamisel on märkimisväärne keskkonnamõju, sh metsade hävitamine, pinnase erosioon ja elupaikade hävitamine. Pliiakudes kasutatav plii võetakse sageli ringlusesse, kuid antud protsessil on omakorda keskkonnamõju suure energiatarbe ja saasteainete eraldumise näol. Siiski on pliiakud ümbertöödeldavad vähemalt 90% ulatuses, mis on nende suureks eeliseks. Lisaks sisaldavad pliiakud väävelhapet, mis võib põhjustada pinnase ja põhjavee hapestumist, kui seda ei käsitleta ja utiliseerita korrektselt. Pliiakude eluiga on lühike ning seetõttu tuleb neid perioodiliselt välja vahetada, vanadest akudest, mis ei jõua taaskasutusse, saavad ohtlikud jäätmed. [8]

Liitium-ioonakude tootmisprotsess hõlmab liitiumi, koobalti, nikli ja mangaani kaevandamist ja rafineerimist. Kaevandamine võib avaldada suurt keskkonna- ja sotsiaalset mõju, sh metsade hävitamist, veereostust ja inimõiguste rikkumisi. Liitium-ioonakude tootmisprotsess on energiamahukas, akud sisaldavad mürgiseid ühendeid nagu liitiumkoobaltoksiid, mis on kõrgetel temperatuuridel tuleohtlik. Liitium-ioonakude probleemiks on ka vähene taaskasutatavus. Väärismaterjalid nagu liitium, koobalt ja nikkel on taaskasutatavad, kuid kogu aku ümbertöötlemise protsent jääb 50...70 vahele. [6]

Nikkel-kaadmiumakude puhul on probleemiks kaadmium, mis on mürgine metall ja võib allaneelamisel või sissehingamisel põhjustada mitmeid terviseprobleeme, sh neerukahjustusi ja hingamisprobleeme. Kaadmiumi keskkonda sattumine võib saastada pinnast, veeallikaid ja ohustada metsloomade ja inimeste elu. Nikkel-kaadmiumakude tootmine on energiamahukas, toorainete kaevandamine võib avaldada suurt keskkonna- ja sotsiaalset mõju. Kuna nikkel-kaadmiumakude energeetilised näitajad on madalamad kui liitium-ioonakudel, s.t sama energiahulga tootmiseks on vaja rohkem toormaterjale, on nikkel-kaadmiumakude tootmine

suure keskkonnamõjuga. Nikkel-kaadmiumakude probleemiks on sarnaselt liitium-ioonakudele ka suhteliselt madal ümbertöötlemise protsent – 40...70%. Alates 2006. aastast on Euroopa Liidus oluliselt piiratud kaadmiumi kasutamine akudes, nikkel-kaadmiumakude tootmine on vastavalt direktiivile 2006/66/EC oluliselt piiratud läbi lubatud kaadmiumi koguse. [14]

Raudnikkelakudel on võrreldes eelnimetatud akutüüpidega suhteliselt väike keskkonnamõju. Nendes kasutatavad materjalid on vähemürgised, mis teeb nad inimeste tervisele ja keskkonnale vähem kahjulikuks. Raua puhul on tegemist mittemürgise metalliga ning nikli puhul on tegemist vähem toksilise metalliga kui plii. Lisaks on raudnikkelakudel pikk aluiga, mis vähendab vajadust sagedaste väljavahetamiste järele, vähendades seeläbi tekkivate jäätmete hulka. Raudnikkelakude taaskasutamise määr on tavaliselt üle 90%, mis teeb need veelgi keskkonnasõbralikumaks. [1]

KOKKUVÕTE

Magistritöö „Raudnikkelakude kasutusvõimaluste uurimine võrguühenduseta elektrisüsteemides“ eesmärgiks oli uurida ja hinnata võimalikku raudnikkelakude rakendust võrguühenduseta süsteemides.

Töö teoreetiline osa andis ülevaate raudnikkelakude positsioonist elektrokeemiliste salvestusseadmete klassifikatsioonis, nende tööpõhimõttest, ehitusest ja elektrokeemilistest karakteristikutest. Samuti kirjeldati teoreetilises osas võrguühenduseta ehk *off-grid* elektrisüsteemi läbi selle komponentide: tootmisseadmed, inverterid, savestid, varutoiteallikad ja tarbijad.

Töös kasutati 137-ruutmeetrise elamu aastaseid tarbimisandmeid, mis andsid hinnangulise ülevaate aastasest tarbimise muutumisest, maksimaalsetest ja minimaalsetest väärtustest. Samuti kasutati lähteandmetena 2,5-kilovatise päikesepargi ning 3,5-kilovatise tuulegeneraatori aastaseid tootmisandmeid, et hinnata tootmisvõimsuse muutumist aasta jooksul. Tootmisandmed skaleeriti suhtega 70/30 tuuleenergia kasuks ning saadud tulemustega koos tarbimisandmetega leiti vajalik energiareserv ööpäevase keskmise tootmise ja tarbimise järgi ning toodanguta perioodi järgi. Toodanguta perioodile vajalik energiareserv oli 88 kWh ning selle alusel leiti vajalik akupanga mahutavus ca 3700 Ah. Arvestades raudnikkelakude kasutegurit ja tühjenemissügavust oleks tarvis 4400...5445 Ah akupanka.

Magistritöö analüütilises osas võrreldi raudnikkelakude tehnilisi parameetreid teiste laialdaselt kasutatavate akutüüpidega. Täna kasutatakse taastuvenergiaallikatega peamiselt plii- ja liitium-ioonakusid, millel on mitmeid eeliseid raudnikkelakude ees. Põhilisteks raudnikkelakude puudusteks plii- ja liitium-ioonakude ees on madalad energeetilised näitajad ja sellest tulenev suur akupanga mass ning suhteliselt suur isetühjenemine. Lisaks on raudnikkelakude tootjaid turul vähe ning tehnoloogia areng aeglane, mistõttu on nende hind kõrgem. Raudnikkelakude eelisteks teiste kasutatavate akutüüpide ees on pikem eluiga nii tsüklites kui ka aastates ning suur tühjenemise ja laadimise taluvuspiir. Viimane eelis on atraktiivne just võrguühenduseta elektrisüsteemides, kus akud on pidevas töös ning võib esineda palju ülelaadimist ning -

tühjenemist. Suur isetühjenemine ei mõjuta oluliselt raudnikkelakude kasutusvõimalust *off-grid* süsteemides, kuna akud on pidevas salvestamis- või tühjenemisprotsessis.

Töös toodi välja ka raudnikkelakude kulutsükli võrdlus teiste akutüüpidega ning keskkonnamõju hindamine. Raudnikkelakude kulud ühikvõimsuse ja energiamahutavuse kohta on võrreldes teiste turul olevate tehnoloogiatega kõrge ning kuna täna on nende puhul tegemist peamiselt nišitootega, siis on ka ehituskulud kõrgemad. Töös on ka leitud, et raudnikkelakude põhilised toormaterjalid raud ja nikkel on keskkonnasõbralikud materjalide mittemürgisuse ja akude taaskasutuse määra tõttu. Lisaks on raua ja nikli puhul tegemist odavamate toormaterjalidega kui liitium-ioonakudes kasutatavad liitium ja koobalt. Vastavalt 2023 mai turunamdetele on liitium-ioonakude põhitoorainete hind kWh kohta on kuni 18,8 USD, raudnikkelakudel kuni 10,53 USD. Raudnikkelakude põhitoormaterjalid on aga kallimad kui pliiakudel, mille maksumus kWh kohta on 3,12 USD.

Töö eesmärk uurida võimalikke kasutusvõimalusi võrguühenduseta elektrisüsteemides sai täidetud ning töö käigus selgus mitmeid eeliseid antud alternatiivse salvestusvõimaluse kasutuselevõtus. Samas tuleb tõdeda, et täna on raudnikkelakude turg piiratud nende vähese kasutamise tõttu ning laialdane raudnikkelakude kasutuselevõtt võrguühenduseta või ka võrku ühendatud süsteemides on lähitulevikus vähetõenäoline. Siiski on autori hinnangul raudnikkelakude tehnoloogias suur potentsiaal vähendamaks taastuvenergiaallikate kasutuselevõtuga seotud salvestusseadmete levimisega seotud ökoloogilist jalajälge ning akutehnoloogia ohutumaks ning jätkusuutlikumaks muutmisel.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] **Adelmann, P., Luerßen, C., Walsh, T. M.** (2015). Use of Ni-Fe Batteries in Solar PV Systems. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.

[2] **Annuk, A., Allik, A., Fadejev, J., Hovi, M., Hõimoja, H., Jasinskas, A., Jõgi, E., Kalder, J., Kurnitski, J., Lill, H., Märss, M.** (2017). Optimal Wind/Solar Energy Mix For Residential Net Zero-Energy Buildings. 8th International Scientific Conference Rural Development 2017. ISSN 1822-3230.

[3] **Annuk, A., Allik, A., Hovi, M., Härm, M., Jasinskas, A., Jõgi, E., Lill, H., Kalder, J., Pihlap, H., Trashchenkov, S.** Augmentation of Self-Consumption of Electricity by Using Boilers and Batteries for Residential Buildings. 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. Paris, France, Oct. 14-17, 2018.

[4] **Arabach, J. R.** (2019). Development of a c-Si Photovoltaic Module for Desert Climates. Thesis for Doctoral. University of Antofagasta.

[5] **Barak, M., Dickinson, T., Falk, U., Sudworth, J. L., Thrisk, H. R., Tye, F. L.** (1980). Electrochemical Power Sources. Primary and secondary batteries. The Institution of Electrical Engineers, London and New York. Lk 2; 345.

[6] **Baumann, M., Braun, J., Peters, J. F., Zimmermann, B., Weil, M.** (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Jaanuar 2017.

[7] **Cabeza, L. F.** (2022). Encyclopedia of Energy Storage. Volume 1. Analogy Between Thermal, Mechanical, and Electrical Energy Storage Systems. Lk 315-328.

[8] **Cooper, S., McKenna, E., McManus, M., Thomson, M.** (2013). Economic and environmental impact of lead-acid batteries in grid-connected domestic PV systems. Applied Energy Journal. Aprill 2013.

[9] **Drovtar, I., Hõimoja, H., Link, S., Rosin, A.** (2015). Energiasalvestid ja -salvestustehnoloogiad. Tallinna Tehnikaülikool. Elektrotehnika instituut. Lk 69; 79-81; 126-127.

[10] Eesti Elektritööstuse Liit. Mikrotootmine. [*on-line*] http://www.elektriliit.ee/mikrotootmine (26.03.2023).

[11] **Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon.** Mis on väiketuulik? [*on-line*] https://vana.tuuleenergia.ee/vaiketuulikud/mis-on-vaiketuulik/ (26.03.2023).

[12] **Elmasides, C., Kosmadakis, Y.** (2021). A Sizing Method for PV-Battery-Generator Systems for Off-Grid Applications Based on The LCOE. Energies 14(7):1988.

[13] **Helwig, A.** (2013). Long-life nickel iron battery functionality / cost comparison for peak demand SWER network voltage support application. Conference: 2013 Australasian Universities Power Engineering Conference.

[14] **Jain, A., Jeyaseelan, C., Khurana, P., Kumar, D., Thatai, S.** (2020). Rechargeable Batteries: History, Progress and Applications. Chapter 9: Ni-Cd Batteries.

[15] **Khamisani, A. A.** (2018). Design Methodology of Off-Grid PV Solar Powered Systems. Eastern Illinois University.

[16] **Kiehne, H. A.** (2003). Battery Technology Handbook. Marcel Dekker, Inc: New York, USA. Lk 46-48; 332-334.

[17] **Kilter, J., Meldorf, M., Tammoja, H., Treufeldt, Ü.** (2007). Jaotusvõrgud. Tallinna Tehnikaülikool. Lk 40-41; 144.

[18] **Linden, D., Reddy, T. B.** (2002). Handbook of batteries. McGraw-Hill Handbooks. Lk 1.3-1.9; 7.3-7.21; 25.1-25.13.

[19] **Nikolaidis, P., Poullikkas, A.** (2017). A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability. Journal of Power Technologies no 97.

[20] OÜ Varutoide. Mõningad soovitused, mida silmas pidada elektrigeneraatorit valides. [*on-line*] https://elektrigeneraatorid.ee/diiselgeneraatorid/generaatori-valimine (28.03.2023).

[21] **Pan, F., Wang, Q.** (2015). Redox Species of Redox Flow Batteries: A Review. National University of Singapore. Department of Materials Science and Engineering. Molecules journal 20-19711.

[22] **Perry, M. L., Weber, A. Z.** (2016). Advanced Redox-Flow Batteries: A Perspective. Journal of The Electrochemical Society, 163.

[23] **Pinn, M., Pinn, R.** (2012). Elekter päikesest ja tuulest. Tallinn: MTÜ Kolm Kobrast. Lk 156.

[24] **Shigematsu, T.** (2011). Redox Flow Battery for Energy Storage. Sei Technical Review. No 73. October 2011.

[25] **Särk, J.** (2018). Võrguvaba (off-grid) lahendused väikemajapidamistele. Elektrilevi OÜ. Esitlus.

[26] Trading Economics. (2023). Markets. Commodities. [*on-line*] https://tradingeconomics.com/commodities (25.05.2023)

[27] **Wu, B., Yaramasu, V.** (2017). Power Electronics for High-Power Wind Energy Conversion Systems. Encyclopedia of Sustainable Technologies. Lk 37-49.

LISAD

Lisa 1. Lähteandmetena kasutatud märtsikuu tarbimis- ja skaleeritud tootmisandmed, vajalik reserv ja salvesti mahutatavus

Päev	Tarbimine, kWh	Tootmine päike, kWh	Tootmine tuul, kWh	Tootmine kokku, kWh	Keskmine päevas vajalik reserv, kWh	Päevas vajalik mahutavus, Ah
1.	20	9,27	1,66	10,92	9,08	378,33
2.	22,2	10,66	2,48	13,15	9,05	377,08
3.	29,6	3,01	0,16	3,17	26,43	1101,25
4.	18,9	1,78	0,83	2,61	16,29	678,75
5.	22,1	1,34	0,00	1,34	20,76	865,00
6.	20,9	5,68	3,50	9,18	11,72	488,33
7.	17,2	1,09	1,04	2,13	15,07	627,92
8.	18,4	0,57	0,00	0,57	17,83	742,92
9.	20,6	1,66	3,85	5,50	15,1	629,17
10.	19,7	2,59	2,94	5,53	14,17	590,42
11.	17,3	1,42	2,64	4,06	13,24	551,67
12.	18,5	10,63	1,39	12,02	6,48	270,00
13.	18,3	4,77	6,14	10,91	7,39	307,92
14.	18,3	0,79	2,86	3,65	14,65	610,42
15.	20,2	1,36	0,45	1,81	18,39	766,25
16.	17,9	2,24	20,94	23,19	-5,29	-220,42
17.	18	7,11	32,81	39,92	-21,92	-913,33
18.	17,5	4,19	15,10	19,29	-1,79	-74,58
19.	14,3	8,05	5,49	13,55	0,75	31,25
20.	14,1	0,66	0,17	0,83	13,27	552,92
21.	11,6	0,50	0,03	0,53	11,07	461,25
22.	16,7	9,71	0,75	10,46	6,24	260,00
23.	16,2	12,32	0,93	13,25	2,95	122,92
24.	16,7	13,04	0,25	13,29	3,41	142,08
25.	16,8	4,93	0,71	5,64	11,16	465,00

Päev	Tarbimine, kWh	Tootmine päike, kWh	Tootmine tuul, kWh	Tootmine kokku, kWh	Keskmine päevas vajalik reserv, kWh	Päevas vajalik mahutavus, Ah
26.	17,1	4,60	0,45	5,05	12,05	502,08
27.	15,7	11,55	0,26	11,81	3,89	162,08
28.	18,6	11,87	4,24	16,11	2,49	103,75
29.	11,8	7,17	5,72	12,89	-1,09	-45,42
30.	16,8	4,09	0,37	4,47	12,33	513,75
31.	20,7	5,18	1,63	6,81	13,89	578,75
Kokku	**562,7**	**163,83**	**119,79**	**283,64**	**279,06**	**11627,5**

Lisa 2. Lähteandmetena kasutatud juunikuu tarbimis- ja skaleeritud tootmisandmed, vajalik reserv ja salvesti mahutatavus

Päev	Tarbimine, kWh	Tootmine päike, kWh	Tootmine tuul, kWh	Toomine kokku, kWh	Keskmine päevas vajalik reserv, kWh	Päevas vajalik mahutavus, Ah
1.	8,0	13,74	3,71	17,46	-9,46	-393,97
2.	12,1	12,36	0,35	12,71	-0,61	-25,342
3.	8,5	11,12	3,61	14,73	-6,23	-259,56
4.	10,6	14,07	7,75	21,82	-11,22	-467,48
5.	6,4	11,39	9,84	21,23	-14,83	-618,08
6.	10,2	9,79	5,48	15,27	-5,07	-211,21
7.	7,9	10,20	7,80	18,00	-10,10	-421,01
8.	9,5	7,35	27,33	34,68	-25,18	-1049,3
9.	14,0	8,52	43,53	52,05	-38,05	-1585,62
10.	10,5	8,04	5,26	13,30	-2,80	-116,61
11.	10,0	1,29	22,50	23,80	-13,80	-574,81
12.	10,0	5,37	13,09	18,46	-8,46	-352,37
13.	10,9	11,60	18,20	29,80	-18,90	-787,58
14.	7,5	14,09	0,61	14,71	-7,21	-300,27
15.	10,4	8,45	12,70	21,15	-10,75	-447,916
16.	11,3	3,99	5,64	9,63	1,67	69,59
17.	10,1	6,51	10,16	16,68	-6,58	-273,98
18.	10,9	3,62	86,93	90,56	-79,66	-3319,06
19.	7,2	9,03	43,02	52,05	-44,85	-1868,84
20.	9,2	11,47	5,34	16,81	-7,61	-317,078
21.	10,5	8,41	1,52	9,93	0,57	23,57
22.	11,6	9,30	9,51	18,81	-7,21	-300,39
23.	10,4	13,20	2,56	15,76	-5,36	-223,46
24.	4,3	5,99	0,27	6,26	-1,96	-81,67
25.	10	12,58	3,87	16,45	-6,45	-268,89

Päev	Tarbimine, kWh	Tootmine päike, kWh	Tootmine tuul, kWh	Toomine kokku, kWh	Keskmine päevas vajalik reserv, kWh	Päevas vajalik mahutavus, Ah
26.	9,7	9,06	4,19	13,25	-3,55	-147,85
27.	12,6	4,26	7,16	11,42	1,18	49,12
28.	8,6	12,35	1,07	13,42	-4,82	-200,97
29.	11,6	8,73	0,40	9,13	2,47	102,88
30.	10,4	9,51	3,10	12,60	-2,20	-91,84
Kokku:	294,9	275,41	366,53	641,94	-347,04	-14460

Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Emili Õun,

sünniaeg 23.11.1997,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Raudnikkelakude kasutusvõimaluste uurimine võrguühenduseta elektrisüsteemides,

mille juhendaja on Andres Annuk,

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 Emili Õun

(*allkirjastatud digitaalselt*)

Tartu, 02.06.2023

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk

(*allkirjastatud digitaalselt*) 02.06.2023