

TALLINNA TEHNICAÜLIKOO
Infotehnoloogia teaduskond

Martha Läänemägi IABB223078
Eva Sõmmer IABB223115

**TÖÖSTUSLIKE AKUSÜSTEEMIDE
LISAMINE NING STATISTIKA KOGUMINE
JA VISUALISEERIMINE VIRTUAALSE
ELEKTRIJAAMA
SIMULATSIOONIRAKENDUSE NÄITEL**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Kristina Murtazin
Magistrikraad

Tallinn 2025

Autorideklaratsioon

Kinnitame, et oleme koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autorid: Martha Läänemägi, Eva Sõmmer

20.05.2025

Annotatsioon

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on integreerida tööstuslikud akuenergia energiasalvestussüsteemid virtuaalse elektrijaama simulatsioonirakendusse, et pakkuda kasutajatele realistlikumat ülevaadet elektrisüsteemi tööpõhimõtetest. Lisaks arendatakse välja statistikaleht, mis visualiseerib simulatsiooni ajal kogutud andmeid ning muudab kasutajakogemuse informatiivsemaks ja õppimist toetavamaks.

Energiaspektori digitaliseerumine ja taastuenergia kasvav osakaal toovad kaasa vajaduse paindlike ja kasutajasõbralike tööriistade järele, mis võimaldavad keeruliste energiaprotsesside mõistmist. Varasemalt arendatud simulatsiooni piiranguks oli akusüsteemide puudumine, mis vähendas simulatsiooni realistlikkust. Samuti ei olnud rakenduses statistilist kokkuvõtet, mis piiras kasutaja võimalusi tulemuste hindamisel ja järelduste tegemisel.

Antud probleemi lahendamiseks otsustasid autorid laiendada olemasolevat veebirakendust, lisades sinna energiasalvestussüsteemi ja statistikavaate, mis kajastab simulatsiooni toimimist nii tehnilisest kui ka visuaalsest küljest. Töö käigus keskenduti kasutajasõbralikkusele, süsteemi loogilisele terviklikkusele ning andmete tõhusale esitamisele.

Bakalaureusetöö viidi läbi koostöös ettevõttega Enefit AS. Arenduse käigus pöörati tähelepanu sellele, et loodud lahendus vastaks nii ettevõtte sisemistele vajadustele kui ka hariduslikule eesmärgile. Simulatsioonirakendusse lisatud tööstuslikud akusüsteemid ja statistikaleht toetavad kasutaja õppimist ning aitavad mõista energia salvestamise ja jaotamisega seotud põhimõtteid.

Bakalaureusetöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 35 leheküljel, seitset peatükki, 29 joonist ning nelja tabelit.

Abstract

Configuring industrial battery systems and collecting and visualizing statistics in the virtual power plant simulation application

The aim of this bachelor's thesis is to integrate industrial battery energy storage systems into a virtual power plant simulation application to provide users with a more realistic understanding of how an electrical system operates. In addition, a statistics page will be developed to visualize the data collected during the simulation, making the user experience more informative.

The digitalization of the energy sector and the increasing share of renewable energy create a growing need for flexible and user-friendly tools that help users understand complex energy processes. One of the limitations of the existing simulation was the lack of battery systems, which reduced the overall realism. Furthermore, the application did not provide a statistical summary, limiting the user's ability to evaluate results and draw conclusions.

To address these shortcomings, the authors decided to extend the existing web application by adding energy storage system logic and a data view that reflects the system's operation from both technical and visual perspectives. The development focused on user-friendliness, logical system coherence, and efficient data presentation.

The bachelor's thesis was carried out in collaboration with the company Enefit AS. During the development process, attention was paid to ensuring that the solution met both the internal needs of the company and educational objectives. The added storage system module and statistics page enhance the user's learning experience and support understanding of energy storage and distribution principles.

This thesis is written in Estonian and consists of 35 pages, 7 chapters, 29 figures, and four tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

VPP	<i>Virtual Power Plant</i> , virtuaalne elektrijaam
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i> , akuenergia salvestussüsteem
MW	Megavatt
MWh	Megavatt-tund
UX	<i>User experience</i> , kasutajakogemus
UI	<i>User interface</i> , kasutajaliides
Hz	Herts
<i>user story</i>	kasutajalugu
<i>grid</i>	ruudustik
<i>drag and drop</i>	lohistamine ja asetamine
<i>downtime</i>	seisak töös
<i>refinement</i>	rafineerimine, täpsustamine
<i>issue</i>	ülesanne
<i>draft pull request</i>	mustand tõmbetaotlus
<i>pull request</i>	tõmbetaotlus
<i>merge</i>	harude ühendamine
<i>ad hoc</i> testimine	Mitteametlik ja struktureerimata testimisviis
OOP	<i>Object Oriented Programming</i> , Objektorienteeritud programmeerimine

Sisukord

1 Sissejuhatus	11
1.1 Probleem	11
1.2 Eesmärk	12
1.3 Töö struktuur.....	13
2 Varasema kirjanduse ülevaade	14
2.1 Virtuaalne elektriiaam	14
2.2 Akusüsteemid	15
2.2.1 Akusüsteemide eelised.....	16
2.2.2 Akusüsteemide puudused.....	16
2.3 Statistika kogumine ja visualiseerimine	17
3 Metoodika.....	19
3.1 Objekti kirjeldus.....	19
3.2 Kasutatud tehnoloogiad	20
3.3 Tööprotsessi kirjeldus.....	20
3.3.1 Arendusprotsess ettevõttes.....	20
3.3.2 Individuaalne töökorraldus	21
4 Nõuded	23
4.1 Olemasoleva lahenduse analüüs ja võrdlus	23
4.2 Funktsionaalsed nõuded	24
4.3 Mittefunktsionaalsed nõuded.....	25
4.4 Kasutajajuhud	26
5 Tulemused	28
5.1 Prototüüp ja disain.....	28
5.1.1 Akusüsteemide disain	28
5.1.2 Statistikalche prototüüp	28
5.2 Rakenduse arhitektuur	31
5.3 Valminud funktsionaalsused.....	32
5.3.1 Akusüsteemid	32
5.3.2 Statistikalche ja andmete salvestus	35

5.4 Testid	42
5.4.1 <i>Ad hoc</i> test: akusüsteemide käitumine	43
5.4.2 <i>Ad hoc</i> test: statistikaleht	44
6 Analüüs ja järeldused	45
6.1 Hinnang	45
6.2 Lahenduse vastavus nõuetele	46
6.3 Rakenduse analüüs	47
6.4 Äriline kasulikkus	47
6.5 Võimalused edasiarendusteks	48
6.6 Teostatud tööde logi ja meeskondlik hinnang	48
6.6.1 Eva Sõmmer teostatud tööde logid.....	48
6.6.2 Martha Läänemägi teostatud tööde logid.....	50
7 Kokkuvõte	52
Kasutatud kirjandus	53
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	55
Lisa 2 – Eneseanalüüs Eva Sõmmer	56
Lisa 3 – Eneseanalüüs Martha Läänemägi	58

Jooniste loetelu

Joonis 1. Virtuaalse elektriijaama tööpõhimõte ja komponentide seosed elektrivõrguga [4].....	15
Joonis 2. Elektritarbimise nihutamine akuenergia salvestussüsteemi abil [10].	16
Joonis 3. GitHub'i projekti Kanban tahvel.	21
Joonis 4. Next Kraftwerke poolt loodud VPP simulatsioon [19].	24
Joonis 5. Esimene disainiversioon, kus kogu vajalik teave on ühel ekraanil.	29
Joonis 6. Süsteemi üldine energiatasakaalu ja sageduse ülevaade.	29
Joonis 7. Varade individuaalsete andmete vaade.	30
Joonis 8. Vara käitumist ajas kujutav graafik individuaalsete andmete vaates.	31
Joonis 9. Akusüsteemide lisamine mängu redigeerimisvaates.	32
Joonis 10. Aku redigeerimisvaade, kus on sisestatud vale väärtus.....	33
Joonis 11. Aku oleku muutmise funktsioon.	34
Joonis 12. Tarbimisvõimsuse arvutamise funktsioon, kus on näha akusüsteemi panust vastavalt režiimile.	34
Joonis 13. Akusüsteemide laetavuse taseme muutmine ja akuikooni sisu muutumine vastavalt laetavuse tasemele.	35
Joonis 14. Iga ajaühiku kohta salvestatavad andmed.....	36
Joonis 15. Statistika, mida kogutakse iga vara kohta.....	37
Joonis 16. Statistika, mida kogutakse iga aku kohta.....	37
Joonis 17. Erinevate mängutasemete graafikute võrdlus.	38
Joonis 18. Simulatsiooni süsteemi üldinfo statistikalehe esimene vaade, tase „Raske“. 38	
Joonis 19. Simulatsiooni süsteemi üldinfo statistikalehe teine vaade, tase „Raske“ 39	
Joonis 20. Simulatsiooni individuaalsete varade statistikalehe esimene vaade, tase „Raske“ 39	
Joonis 21. Simulatsiooni individuaalsete varade statistikalehe teine vaade, tase, „Raske“..... 39	
Joonis 22. Simulatsiooni individuaalsete varade graafikute esimene vaade, tase „Raske“. 40	

Joonis 23. Simulatsiooni individuaalsete varade graafikute teine vaade, tase „Raske“.	40
Joonis 24. Simulatsiooni süsteemi üldinfo statistikalehe esimene vaade, tase „Lihtne“.	40
Joonis 25. Simulatsiooni süsteemi üldinfo statistikalehe teine vaade, tase „Lihtne“.	41
Joonis 26. Simulatsiooni individuaalsete varade statistikalehe esimene vaade, tase „Lihtne“.	41
Joonis 27. Simulatsiooni individuaalsete varade statistikalehe teine vaade, tase „Lihtne“.	41
Joonis 28. Simulatsiooni individuaalsete varade graafikute esimene vaade, tase „Lihtne“.	42
Joonis 29. Simulatsiooni individuaalsete varade graafikute teine vaade, tase „Lihtne“.	42

Tabelite loetelu

Tabel 1. <i>Ad hoc</i> testijuhtumid akusüsteemide käitumise kohta.....	43
Tabel 2. <i>Ad hoc</i> testijuhtumid statistikalehe kohta.	44
Tabel 3. Eva Sõmmmer teostatud tööde logi.....	48
Tabel 4. Martha Läänemägi teostatud tööde logi.	50

1 Sissejuhatus

Tänapäevases energiasüsteemis on kasvav vajadus paindlikkuse, jätkusuutlikkuse ja tõhusa energiahaldusele järele, eriti taastuvenergia osakaalu suurenemise tõttu. Virtuaalsed elektrijaamad pakuvad selleks olulist lahendust, võimaldades erinevate tootmis-, tarbimis- ja salvestusseadmete koordineeritud juhtimist. Üheks keskseks komponendiks sellistes süsteemides on akupõhised energia salvestussüsteemid, mis võimaldavad energiavõrgu tasakaalustamist ja sageduse stabiliseerimist.

Käesolev bakalaureusetöö keskendub tööstuslike akusüsteemide integreerimisele virtuaalse elektrijaama simulatsioonirakendusse, mille eesmärk on pakkuda realistlikumat ülevaadet elektrisüsteemi töös ning parandada õppimist ja kasutajakogemust. Lisaks akumoodulile arendatakse välja statistikaleht, mis võimaldab simulatsiooni ajal kogutud andmete visuaalset ja struktureeritud esitlust.

1.1 Probleem

Paljud energeetika valdkonna töötajad ei puutu igapäevaselt kokku energiaturu mehhanismidega, ning seega võib jääda arusaamatuks, kuidas toimub süsteemi balansseerimine ning milline on virtuaalse elektrijaama roll selles protsessis. Ettevõttes kasutatav tegelik virtuaalse elektrijaama-lahendus on piiratud ligipääsuga tööriist, mille kasutamine eeldab spetsiifilisi eriteadmisi ning ei ole mõeldud üldiseks tutvumiseks ega õppimiseks. Parema arusaamise ja õppimise toetamiseks loodi meeskonnaprojekti raames simulatsioonirakendus, mis võimaldab kasutajal mõista elektrituru toimimise loogikat läbi praktilise kogemuse.

Kuigi eelmisel semestril alustatud meeskonnaprojekt andis kasutajale algelise ülevaate süsteemi toimimisest, ei olnud see realistlik simulatsioon elektriturul toimuva kohta. Rakendusest puudus akusüsteemide loogika, mis on reaalses virtuaalsete elektrijaamade lahendustes keske tähendusega. Eelkõige süsteemi balansseerimiseks ning paindlikuks energiavarude haldamiseks. Akusüsteemide puudumine tähendas, et kasutaja pidi toetuma ainult elektrit tootvatele ja tarbivate üksustele, ilma võimaluseta salvestada või

vabastada energiat vastavalt olukorrale. Akusüsteemide lisamisel tekib kasutajal võimalus mõista paremini, kuidas energia salvestamine toetab võrgu stabiilsust ning energiauhtimist virtuaalses elektrijaamas, pakkudes realistlikumat kogemust.

Lisaks akusüsteemide puudumisele oli simulatsioonist puudu ka kogutud andmete põhjal selge ja kokkuvõtlik ülevaade. Olemasolev rakendus ei võimaldanud kasutajal jälgida, millised olid simulatsiooni tulemused ning millised järeldused võiks neist teha. Kuna andmeid ei talletatud rakenduse töö käigus, puudus ka võimalus neid hiljem analüüsida ja järeldusi teha. See vähendas simulatsiooni kasutusväärtust õppimise ja planeerimise optimeerimise eesmärgil.

Antud bakalaureusetöö eesmärk on muuta olemasolev simulatsioonirakendus realistlikumaks, lisades tööstuslike akusüsteemide loogika ning luues selge, andmepõhise statistilise kokkuvõtte simulatsiooni käigus kogutud teabest.

1.2 Eesmärk

Projekti eesmärk on arendada edasi meeskonnaprojektis alustatud virtuaalse elektrijaama veebirakendus, järgides ettevõtte ja tooteomaniku esitatud tellimust.

Esimesest iteratsioonist oli puudu elektriturul balansseerimisel tähtsal kohal olev akusüsteem, ilma milleta ei ole arendatud veebirakendus realistlik ning ei annaks kasutajale head ülevaadet virtuaalse elektrijaama tööst. Võttes see arvesse seati eesmärgiks lisada simulatsioonirakendusse akusüsteemide loogika, pidades silmas akusüsteemide peamisi omadusi ning luua uuele elemendile ülejäänud rakendusega kooskõlas olev disain.

Lisaks sellele on soov luua kasutajasõbralik ja kokkuvõttev statistikalehekülg simulatsiooni ajal kogutud andmete jaoks. Selleks on vaja lisada puuduolev andmete salvestamise funktsioon rakenduse töötamise ajal ning hiljem kogutud informatsiooni kuvada ühes kohas. Lehekülg peaks andma selge ülevaate toimimusest, olema struktureeritud ja mugav kasutada.

1.3 Töö struktuur

Käesolev bakalaureusetöö on jaotatud seitsmesse põhilisse peatükki. Esimene peatükk on sissejuhatus, mis avab töö tausta, sõnastab probleemi, seab eesmärgid ja tutvustab töö ülesehitust. Teine peatükk annab ülevaate varasemast kirjandusest, selgitades olulisi mõisteid nagu virtuaalne elektrijaam ja akusüsteemid. Detailsemalt tuuakse välja ka akusüsteemide eelised ja puudused. Samuti sõnastatakse lahti andmete kogumise ja visualiseerimise eesmärk ja olulisus simulatsioonirakendustes.

Kolmandas peatükis käsitletakse metoodikat – kirjeldatakse projekti objekti, kasutatud tehnoloogiaid ning tööprotsessi.

Neljas peatükk keskendub nõuete analüüsile, sealhulgas olemasolevate lahenduste ülevaatele, funktsionaalsetele ja mittefunktsionaalsetele nõuetele ning kasutajalugudele. Viiendas peatükis esitletakse töö tulemusi.

Kuuendas peatükis toimub tehtud töö analüüs – põhjendatakse tehnilisi valikuid, esitatakse tööde logid ja hinnatakse projekti teostusprotsessi. Viimane peatükk on kokkuvõte ning sellele järgnevad kasutatud allikad ja lisad.

2 Varasema kirjanduse ülevaade

Käesolev peatükk annab ülevaade töö teemaga seotud olulisematest mõistetest ja varasematest uurimustest, et luua selge arusaam virtuaalsete elektrijaamade, akupõhiste salvestussüsteemide ja statistika visualiseerimise taustast. Kirjanduse ülevaade aitab selgitada, miks need komponendid on olulised ning kuidas nad toetavad elektrivõrgu tasakaalu, energiasäästlikust ja kasutaja õppimisvõimalusi simulatsioonis. Samuti loob aluse bakalaureusetöö tehniliste ja disainiliste valikute põhjendamiseks.

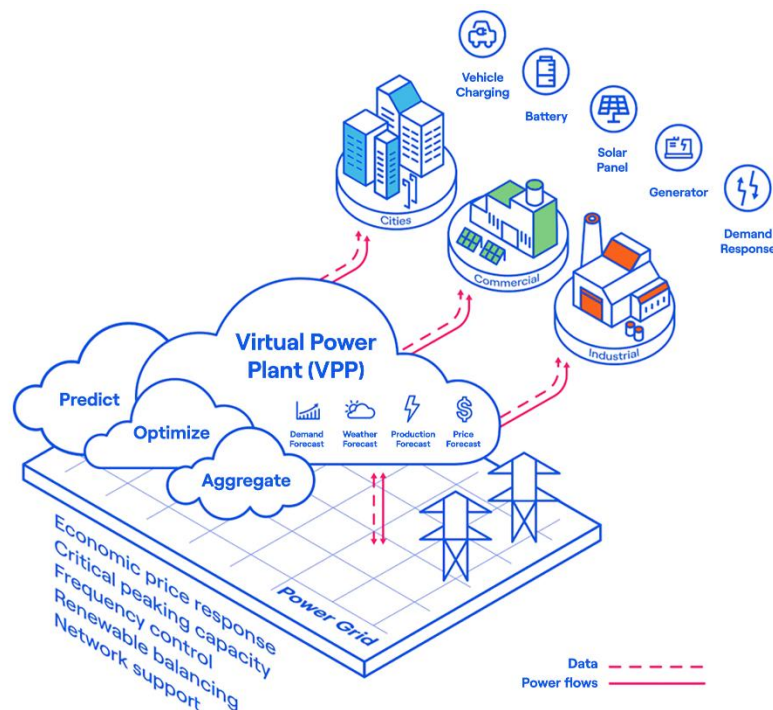
2.1 Virtuaalne elektrijaam

Virtuaalne elektrijaam ehk VPP (*Virtual Power Plant*) on energiahaldussüsteem, mis ühendab ja haldab energiaallikaid – nagu energiatootjad ja -tarbijad ning energiasalvestusseadmed – üheks üksuseks. VPP kasutatakse elektrivõrgu sageduse ja stabiilsuse tagamiseks, võimaldades energiatootmist ja -tarbimist koordineerida ning ressursse ja tulu optimeerida (Joonis 1). Selleks kasutatakse välja töötatud algoritme ning reaajas andmekogumist ja -analüütikat, et prognoosida energiatootmist ja -tarbimist [1].

VPP pakuvad mitmesuguseid eeliseid, et toetada kaasaegset ja jätkusuutliku energiaajagamist [1]. VPP võimaldab kiiret reageerimist nõudluse kõikumistele ja aitab seeläbi säilitada tasakaalu, vähendades energiakadu ja suurendades kogu süsteemi efektiivsust. See aitab kaasa kulude vähendamisele nii tootjate kui ka tarbijate jaoks. Näiteks suudab süsteem talletada liigset energiat madala nõudluse ajal, vabastada talletatud energia või lisada lisavõimust tipptarbimise perioodidel. Lisaks sellele hõlbustab VPP taastuvaenergiaallikate integreerimist olemasolevasse elektrivõrku. Tänu ressursside agregatsioonile suudetakse kompenseerida ühe energiaallika ebastabiilsust teise tootmisega või varem akusüsteemidesse salvestatud energia kasutamisega, vähendades nii vajadust fossiilkütusel põhineva elektrienergia järgi [2].

VPP arendamise ja kasutuselevõtu juures on oluline vastav simulatsioonirakendus, et vähendada riske ja testida algoritme. Simulatsioonirakendus annab võimaluse välja töötada keerulisi juhtimisalgoritme ning testida töörežiime ja stsenaariume, et tuvastada kitsaskohad ning optimeerib süsteemi toimimise enne reaalsesse infrastruktuuri

paigaldamist [3]. Samuti võimaldab see edasist innovatsiooni VPP alal ja loob realistliku keskkonna töötajatele ja huvilistele, et virtuaalse elektriijaamaga lähemalt tutvuda.



Joonis 1. Virtuaalse elektriijaama tööpõhimõte ja komponentide seosed elektrivõrguga [4].

2.2 Akusüsteemid

Akuenergia salvestamise süsteemid koguvad toodetud elektrienergiat ning salvestavad selle laetavatesse akudesse. Kui energianõudluse ja energiatootmise vahel on ebatasakaal, saab seda lahendada akudest energia mahalaadimise või laadimisega [5].

Võrgu mastaabis akud on võimelised tasakaalustama võrku, suunates minimaalse tarbimisega perioodidel toodetud energiat tipp perioodidele, kus energia tarbimine on kõrge [6]. Samuti reguleerida võrgu sagedust, reageerides kiiresti energia tootmise või tarbimise puudujääkidele ning pakkudes vajaminevat võimsust [5].

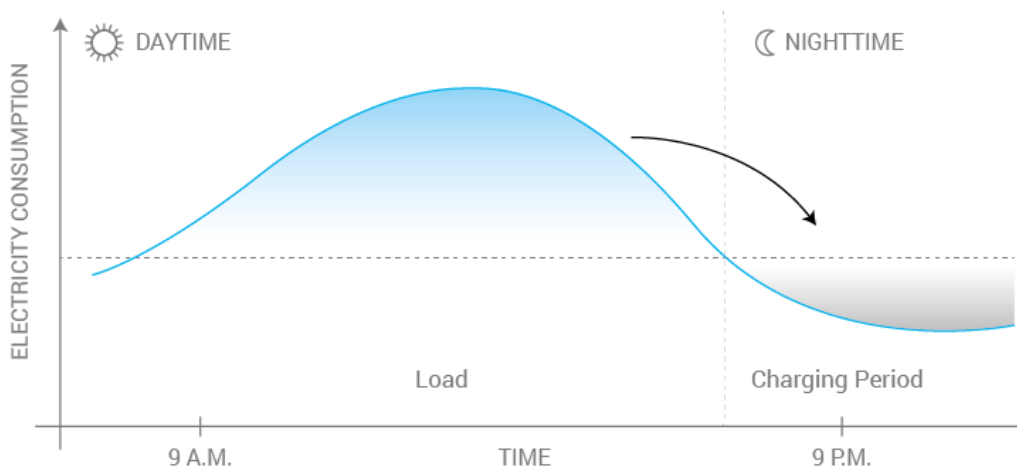
Olulisemad BESSi (*Battery Energy Storage System*) näitajad on võimsus, energia mahtuvus ja laetavuse tase. Võimsust mõõdetakse peamiselt megavattides (MW). Võimsus näitab palju energiat suudab aku korraga võrku anda või sealt võtta. Energia mahtuvust mõõdetakse megavatt-tundides (MWh). Aku mahtuvus määrab kui suurt kogust energiat saab aku tervikuna salvestada. Laetavuse taset väljendatakse protsentides, mis näitab kui palju on võimalik akust energiat maha laadida või juurde laadida [5].

2.2.1 Akusüsteemide eelised

BESSil on oluline roll elektrisüsteemis, mis suudab rohkem integreerida taastuvenergiat ja muuta selle tootmist paindlikumaks [7]. Päikese -ja tuuleenergia tootmine on vahelduv, mis põhjustab perioode, kus energiat toodetakse liiga palju või liiga vähe. Akude abil on võimalik võtta üleliigne taastuvenergia ja salvestada see hilisemaks kasutamiseks. Akusid on võimalik kasutada reservvõimsusena voolu katkemisel ja kindlustada pidev energiavarustus [8].

Taastuvenergia osakaalu elektrivõrgus kasvamisel muutub energia salvestamine järjest olulisemaks. BESS võimaldab salvestada üleliigse taastuvenergia ning kasutada seda siis, kui nõudlus ja elektri hind on kõrgemad. See vähendab vajadust toetuda fossiilkütustel põhinevale tootmisele ning suurendab võrgu stabiilsust. Kui ühendada BESS virtuaalsesse elektrijaama (VPP), on võimalik saada osa võrguteenuste, nagu sageduse reguleerimise pakkumisel ning maksimeerida tulu läbi arbitraaži. Selline lahendus võimaldab klientidel vähendada energia nõudluse tipphetkedel tarbimist (ingl. *load shifting*) (Joonis 2) ja seeläbi säästa elektriarvetes [9].

LOAD SHIFTING WITH BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM



Joonis 2. Elektritarbimise nihutamine akuenergia salvestussüsteemi abil [10].

2.2.2 Akusüsteemide puudused

BESSide peamiseks puuduseks on nende hind ja suur esialgne investeering [11]. Kuigi akude hinnad on langenud, siis on hakanud tõusma akude tootmiseks kasutatavate

mineraalide, eriti liitiumi, hinnad [12]. Probleemiks on akude eluiga. Aku jõudlus väheneb iga laadimis- ja tühjendamistsükliga, mille tulemusel kasvab sisetakistus ning väheneb salvestusmaht. Aku eluea jooksul võib nende kasutegur märgatavalt langeda, mis mõjutab nii süsteemi töökindlust kui ka investeeringu tasuvust. Aku töökindlust mõjutavad oluliselt ka temperatuuritingimused: liiga kõrge või liiga madal temperatuur kiirendab aku kulumist ja võib äärmuslikel juhtudel põhjustada tulekahju. Just ülekuumenemine on üks peamisi riske liitiumioonakude kasutamisel, eriti kui puudub korralik jahutussüsteem või akud on halvasti hooldatud [13].

Lisaks tehnilistele puudustele on aktuaalsed ka keskkonnavalased mured. Akude tootmine vajab haruldasi ja energiakulukaid materjale, nagu liitium, koobalt ja nikkel, mille kaevandamine tekitab ökoloogilist jalajälge. Suuremahulised BESSid, mis on ühendatud elektrivõrku, toovad kaasa täiendavaid küber- ja kommunikatsiooniriske – süsteemid peavad olema kaitstud pahatahtlike rünnete eest, mis võivad mõjutada mitte ainult aku tööd, vaid ka kogu võrgu stabiilsust [13].

2.3 Statistika kogumine ja visualiseerimine

Statistika kogumine ja visualiseerimine on suure tähtsusega igasuguste süsteemide jälgimisel ja juhtimisel. Kuna VPP toimimine tugineb reaajas andmetel ja väljatöötatud algoritmidel ning selle efektiivsus on paljugi seotud andmete kogumise, analüüsimise ja kuvamisega. Seetõttu on väga oluline selge ja kasutajasõbralik andmete visualiseerimine [14].

Väiksemamahulistest veebirakendustes on erinevaid viise andmebaasilahendusteks. Üks võimalus on lokaalne andmebaasilahendus (ingl. *LocalStorage*). See on brauseripõhine salvestuslahendus, mis võimaldab andmeid talletada lokaalselt ja püsivalt kasutades võtme-väärtusepõhist lahendust ning andmed jäävad alles ka peale brauseri sulgemist [15]. Antud VPP rakenduse puhul on see piisav, et simulatsioonitulemusi salvestada ja kuvada.

Simulatsiooni ajal kogutud andmete kuvamine on VPP oluline osa, kuna see võimaldab kasutajal saada tagasisidet simulatsiooni käigus tehtud otsuste toimivuse kohta ning annab vajaliku info arusaadavalt ja kompaktselt edasi. Hea kasutajaliides peaks olema lihtne ja intuitiivne. Tulemused ja neile vastavad graafikud on loogiliselt struktureeritud,

sest nii saab kasutaja kiirelt ja mugavalt tagasiside, et teha vajalikud järeldused edasisteks tegevusteks. Graafikud ning kasutusel olevad värvipaletid peaksid olema kooskõlas ülejäänud programmiga, et kasutajal tekiks seos, kust tulemused saadi. Kihiline andmete esitus võimaldab kasutajal valida, millisel tasemel andmeid vaadata. See aitab muuta esialgse vaate selgemaks ning ei tekita liigset infomüra [16], [17].

Seega ongi UX (*User Experience*) ja UI (*User Interface*) seisukohast andmete visualiseerimise ja kasutajaliidese disaini põhieesmärk muuta keerukad süsteemi andmed arusaadavaks ja lihtsasti tõlgendatavaks. Näiteks HOMER Energy simulatsioonitarkvara kasutajaliidese uuendamisel keskenduti ka paljuskord just sellele, kuidas muuta info kasutajale lihtsasti vastuvõetavaks ja pakkuda head kasutajakogemust. Disaineri väljatöötatud põhimõtted – arusaadav andmete visualiseerimine, interaktiivne lähenemine, sidus värvipalett ja ligipääsetav disain, parandavad simulatsioonirakenduse kasutajamugavust, säilitades kõik vajaliku info ja brändikuvandi [18].

3 Metoodika

Siin peatükis kirjeldatakse objekti ning tuuakse välja kasutatud tehnoloogiad. Samuti antakse ülevaade tööprotsessist.

3.1 Objekti kirjeldus

Esialgse projekti käigus töötati välja Enefiti töötajatel mõeldud lihtne rakendus, mis aitab tutvuda virtuaalse elektrijaama ning elektrisüsteemi tasakaalustamise põhimõtetega. Rakendus hõlmas endas mängulauda, kus on tootjad, tarbijad, infotahvlid, sageduse näidik ja ilma komponent. Tootjaid on kolme erinevat tüüpi: päikesepark, tuulepark, fossiilkütuse jaam. Tarbijaid on kahte erinevat tüüpi: majapidamised, tehas. Infotahvleid on kaks, millest üks summeerib hetkelist tootmist ja teine hetkelist tarbimist. Infotahvlite juures kuvatakse hoiatavaid märguandeid, kui tootmine või tarbimine on liiga kõrge või madal. Sageduse näidikul kuvatakse hetke sagedus hertsides vahemikus 49.0 kuni 51.0 Hz. Ilma komponent koosneb päikese- ja tuuletugevuse näidikutest, mida väljendatakse protsentides.

Bakalaureusetöö raames lisati rakendusele tööstuslikud akuenergia salvestussüsteemid, mis käituvad nii tarbijana kui ka tootjana. Samuti lisati uus simulatsiooni statistikat ja andmeid koondav leht, mis kuvatakse peale mängu lõppu. Leht on jaotatud kaheks: terve süsteemi ning individuaalsete elementide andmed, statistika ja graafikud.

Bakalaureusetöö raames jagati viieliikmeline meeskond kaheks kahe- ja kolmeliikmeliseks rühmaks, kes keskendusid erinevatele kasutajalugudele. Sõltumata sellest, et toimus rühmadeks jagunemine töötati siiski ühtse meeskonnana projekti arendamisel. Antud uurimistöö keskendub kahele aspektile. Rakendusele tööstuslike akuenergia salvestussüsteemide lisamisele ning nende tausta ja eesmärgi uurimisele. Rakendusele andmeid ja statistikat kuvava ning visualiseeriva lehe loomisele ning UX/UI disaini parimate praktikate uurimisele.

3.2 Kasutatud tehnoloogiad

Bakalaureusetöö raames jätkati nende tarkvaraliste tööriistade ja arenduspraktikate kasutamist, mis olid varem edukalt kasutusele võetud meeskonnaprojekti käigus.

Rakendus arendati kasutades Vue.js raamistikku Microsoft Visual Studio keskkonnas. See pakub paindlikke lahendusi ning võimaldab luua kasutajasõbraliku ja funktsionaalse kasutajaliidese. Projekti arendamisel kasutati veebiarenduses levinud keeli: TypeScript'i ja JavaScript'i loogika ja funktsionaalsuse loomiseks, HTML'i kasutajaliidese struktuuri määratlemiseks ning CSS'i visuaalse kujunduse rakendamiseks.

Rakenduse lähtekood hallati GitHub'i versioonihaldusplatvormil, mis võimaldas sujuvalt koostööd teha ning arendusprotsessi mugavalt dokumenteerida. GitHub'i kasutati nii koodi haldamiseks kui ka tööülesannete struktureerimiseks. GitHub võimaldas ülesandeid kategoriseerida, prioriseerida ning jälgida nende edenemist kogu projekti vältel.

UX/UI esialgse kontseptsiooni visualiseerimiseks kasutati Figma disainitarkvara, mille abil on võimalik kujundada selge ja arusaadav prototüüp. Tänu sellele suudeti juba varajases faasis koguda tagasisidet ning teha vajalikke kohandusi enne tegeliku arendusega alustamist.

Bakalaureusetöö kirjutamisel kasutati abivahendina ChatGPT keelemudelit. Seda kasutati eelkõige õigekirja ja keelelise korrektsuse kontrollimiseks, et tagada teksti selgus. Lisaks kasutati ChatGPT-d programmeerimisprobleemide lahendamisel, mis aitas kiirendada arendusprotsessi.

3.3 Tööprotsessi kirjeldus

Antud alampeatükk annab ülevaate bakalaureusetöö raames kasutatud arendusmetoodikast, arendusprotsessist ettevõttes ja individuaalsest tööprotsessist.

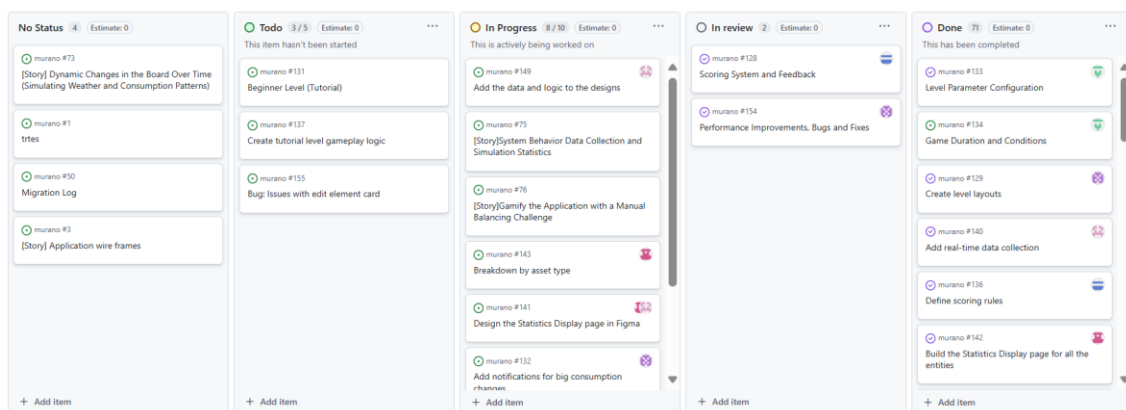
3.3.1 Arendusprotsess ettevõttes

Projekti tiim töötas ettevõttes 2 päeva nädalas 2024. aasta oktoobrist 2025. aasta maini. Igale tiimiliikmele oli määratud isiklik mentor.

Arendusprotsessis lähtuti Kanban metoodika põhimõtetest. Kanban kasutab visuaalset tööriista, Kanban tahvlit, kus tööülesanded liiguvad läbi erinevate etappide: „teha“, „töös“, „läbivaatamisel“, „valmis“. Igal etapil võib olla seatud piirang, kui palju tööülesandeid võib korraga selles etapis olla. Selle eesmärk on ennetada ülesannete kuhjumist ja tagada sujuv töövoog. Kanbani peamiseks eelisteks on töö selgus ja läbipaistvus: kõik tööülesanded, nende hetkeseis ja vastutajad on kõigile nähtavad. Samuti toetab see paremat töövoogu ja paindlikumat töökorraldust. Erinevalt Scrumist, mis kasutab ajaliselt piiritletud sprinte ja kindlaid rolle, on Kanbanis pidev töövoog [19].

Iga tööpäev algas hommikuse püstjalakoosolekuga, mis kestis umbes 5 minutit. Koosolekul rääkis iga tiimiliige, mis sai eelmine päev tehtud, mida teeb täna ning kas ja millised probleemid on esinenud.

Uued tööülesanded loodi tooteomaniku koostatud kasutajalugude (ingl. *user stories*) põhjal. Iga kasutajalugu keskendus ühe suurema tarkvarafunktsiooni kirjeldamisele. Peale kasutajalooga tutvumist koostasid tudengid tööülesanded (*issues*), mis olid vajalikud kasutajaloo täitmiseks. *Refinement*’il esitleti mentoritele koostatud *issue*’d. Vajadusel viidi sisse parandused ning seejärel kanti need GitHub’i projekti Kanban tahvlile „teha“ kategooriasse (Joonis 3). Sealt sai iga tiimiliige valida endale sobiva tööülesande.



Joonis 3. GitHub'i projekti Kanban tahvel.

3.3.2 Individuaalne töökorraldus

Koostatud tööülesanded olid mõeldud lahendamiseks individuaalselt. Peale alustamist muudeti *issue* kategooriasse „töös“, määrati end vastutavaks ning alustati arendustööd.

Iga *issue* arendati eraldi harus (ingl. *branch*), mis lingiti GitHub'is vastava *issue*'ga. Probleemide ilmnemisel sai võtta ühendust enda mentoriga või konsulteerida tiimiga.

Peale arendustöö valmimist koostati GitHub'is *draft pull request* ning teised tiimiliikmed lisati ülevaatajate nimekirja. Kui vähemalt kaks teist tiimiliiget kiitsid töö heaks, lisati nimekirja mentorid ning avati *pull request*. Juhul kui kummaski etapis esitati muudatusettepanekuid või kommentaare pidi esmalt need lahendama. Peale vähemalt kahe mentori heakskiitu *merge*'ti *issue* haru *main* harusse. Peale seda olid uued arendused teistele kättesaadavad ja tiimiliige sai oma uue *issue* valida.

4 Nõuded

Selles peatükis kirjeldatakse autorite koostatud rakenduse nõuded ja esitletakse olemasoleva lahenduse analüüsi. Nõuded jagunevad funktsionaalseteks ja mittefunktsionaalseteks ning põhinevad tooteomaniku sisendil. Lisaks on välja toodud kasutajajuhud, mis aitavad mõista nõudeid kasutaja vaatenurgast.

4.1 Olemasoleva lahenduse analüüs ja võrdlus

Rakenduse arendamisel võeti eeskujuks Next Kraftwerke poolt loodud VPP simulatsioon. Antud simulatsioonis hallatakse erinevaid tootmis- ja tarbimisallikaid eesmärgiga hoida energiavõrk tasakaalus ning vältida energiakatkestusi. Kasutaja peab reageerima dünaamilistele koormuse muutustele ning tegema juhtimisotsuseid reaajas (Joonis 4) [20].

Next Kraftwerke simulatsioonis on mitmeid ühiseid elemente projekti käigus arendatud rakendusega, sealhulgas sageduse graafik, taastuvate energiaallikate osakaalu info, tootmis- ja tarbimisallikad ning võimalus juhtida enamikku tarbimisallikatest. Lisaks arvestab simulatsioon muutuvate ilmingimustega.

Erinevalt arendatud rakendusest on Next Kraftwerke simulatsioonis olemas võimalus automaatseks võrgu tasakaalustamiseks, kus kasutaja ei pea ise käsitsi sekkuma. Samuti on disain realistlikum ning iga tootmisüksuse kohta on lisatud eraldi avatavad infotahvlid. Simulatsiooni kasutamine on lihtne ning ei ole liialt keerukas. Automaatse balansseerimise funktsioon annab kasutajale lisandväärtust.

Siiski esineb ka puudusi: simulatsioon ei anna kasutajale elektrikatkestuse hoiatusi, ilmastikutingimuste muutused on raskesti märgatavad ning tarbimisallikaid pole võimalik juhtida. Lisaks puudub võimalus analüüsida süsteemis toimunud muutusi peale simulatsiooni lõppu, mis piirab kasutajale tagasisidet ja õpikogemust.



Joonis 4. Next Kraftwerke poolt loodud VPP simulatsioon [20].

4.2 Funktsionaalsed nõuded

Akusüsteemi funktsionaalsed nõuded:

- Kasutaja saab lisada *grid*'ile akusüsteemi, kasutades *drag and drop* loogikat.
- Peale akusüsteemi lisamist ühendub see automaatselt VPP võrguga.
- Akusüsteemil on kolm olekut: „ootel“, „laeb“ ja „tühjeneb“. Aku olekut saab muuta nupu abil ning aku panustab võrku vastavalt oma olekule.
- Akusüsteemil on konfigureeritavad väljad: maksimaalne laetusmaht, laadimis- ja tühjenemiskiirus.
- Aku laetustaset visualiseerib dünaamiline disain: laadimisel täitub tühi akuikoon punasest roheliseks ning tühjenedes vastupidiselt.
- Kui aku saavutab maksimaalse laetustaseme või tühjeneb täielikult, siis läheb see automaatselt olekusse „ootel“.

Statistikalehe funktsionaalsed nõuded

- Süsteem peab koguma andmeid reaajas, sidudes need vastava ajaühikuga. Salvestatavad andmed hõlmavad: süsteemi kogutoodangut ja -tarbimist, iga tootmis- ja tarbimisallika individuaalseid andmed, akusalvestuse tsükleid ja seisakute statistika.

- Simulatsiooni lõppedes peab olema võimalik avada statistikaleht, mis visualiseerib ja kuvab kogutud andmeid.
- Statistikaleht koosneb kahest vaatest. Esimesel on tootmise, tarbimise ja süsteemi andmeid ning käitumist koondav informatsioon. Teisel lehel on iga tarbija tüübi, tootja tüübi ja akusalvestuse andmete detailne ülevaade.
- Esimesel statistikalehel peab olema näha graafik toodetud ja tarbitud energia kohta, sagedust visualiseeriv graafik iga tarbija ja tootja tüübi panust visualiseeriv graafik.
- Teisel vaatel on iga tootja tüübi, tarbija tüübi ja akusalvestuse detailne ülevaade. Näha on toodetud või tarbitud kogused, keskmine tootmis- või tarbimiskiirus ajaühiku kohta, maksimaalne ja minimaalne tootmis- või tarbimisväärtus ja seisakute osakaal.

4.3 Mittefunktsionaalsed nõuded

Akusüsteemi mittefunktsionaalsed nõuded

- Kasutajaliides peab olema lihtsasti vastuvõetav ja ühtlustatud ülejäänud rakendusega.
- Vale või vastuoluline sisend (nt negatiivne laadimiskiirus) peab olema tuvastatud ja kasutajale tuleb kuvada vastav veateade.

Statistikalehe mittefunktsionaalsed nõuded

- Andmete kogumine peab olema katkematu kogu simulatsiooni vältel. Välja arvatud juhul kui kasutaja tutvub simulatsiooni tutvustava infoga või redigeerib mängu.
- Kõik graafikud peavad olema dünaamilised ja kasutajasõbralikud ning ühilduma ülejäänud rakendusega.

4.4 Kasutajajuhud

Kasutajajuhude eesmärk on kirjeldada süsteemi olulisi funktsionaalsusi kasutaja vaatenurgast. Kasutusjuht keskendub konkreetsele eesmärgile või ülesandele, mida kasutaja saab süsteemis täita. Kasutajajuhtudes on välja toodud eesmärk, eeltingimused, kirjeldus, võimalikud erandid ja oodatav tulemus.

Akusüsteemidega seotud kasutajajuht

Nimetus: Tööstusliku akusüsteemi lisamine ja seadistamine võrgu tasakaalustamiseks

Tegutseja: Kasutaja

Eesmärk:

Lisada *gridile* akusüsteem ja seadistada see kas laadimis- või tühjenemisrežiimi, et osaleda elektrivõrgu sageduse tasakaalustamises.

Eeltingimused:

- Süsteem on käivitatud ja kasutaja näeb *gridi* ning redigeerimisvaadet.
- Aku üksus on saadaval lisamiseks.
- VPP võrgu simulatsioon töötab.

Kirjeldus:

Kasutaja lohistab aku *gridile*, kasutades *drag and drop* funktsionaalsust. Aku ühendub automaatselt VPP võrku. Akule on antud algsed mahutavus, laadimis- ja tühjenemiskiiruse väärtused. Aku lisamisel on tema režiim „ootel“. Kasutaja saab avada aku seadistuspaneeli, kus on võimalik muuta mahutavus, laadimis- ja tühjenemiskiirust. Kasutaja saab käsitsi muuta aku olekut. Aku staatust visualiseeritakse rakenduses ning süsteem käitub vastavalt määratud tingimustele, näiteks liigub aku täitumisel või tühjenemisel ootel-režiimi.

Erandid:

- Kui aku saavutab maksimaalsele laetustaseme, lülitub aku automaatselt ootel-režiimi.
- Kui aku tühjeneb miinimumtasemele, lülitub aku automaatselt ootel-režiimi.

- Kui kasutaja sisestab seadistustes väärtused väljaspool lubatud vahemikku, kuvatakse kasutajale vastav veateade.

Tulemus:

Aku on edukalt lisatud, konfigureeritud ning see osaleb aktiivselt võrgu tasakaalustamises määratud seadistustele.

Statistikalehega seotud kasutajajuht

Nimetus: Simulatsiooni käigus kogutud energiakäitumise andmete visualiseerimine

Tegutseja: Kasutaja

Eesmärk:

Vaadata ja analüüsida simulatsiooni jooksul kogutud andmeid tootmise, tarbimise ja varade töö kohta, et hinnata süsteemi efektiivsust ja töökindlust.

Eeltingimused:

- Simulatsioon on lõpule viidud.
- Süsteem on kogunud kogu vajaliku andmestiku.
- Kasutajal on ligipääs statistikalehele.

Kirjeldus:

Simulatsiooni ajal kogub süsteem reaajas andmeid kõigi tootmis- ja tarbimisallikate kohta. Simulatsiooni lõppedes avab kasutaja statistikalehe, kus kuvatakse ülevaade kogu süsteemi tootmisest ja tarbimisest, detailne jaotus erinevate vara tüübi ja üksiku vara tüübi kaupa, visuaalsed graafikud, ning ka info rikete või seiskumiste kohta.

Tulemus:

Kasutaja saab detailse ülevaate simulatsiooni jooksul toimunud tootmisest, tarbimisest, tööseisakutest ja energiabilansist nii kogu süsteemi kui ka üksikute varade lõikes.

5 Tulemused

Selles peatükis antakse ülevaade loodud rakenduse arendusprotsessi tulemustest, sealhulgas prototüübist ja disainist, rakenduse arhitektuurist, valminud funktsionaalsustest, koodi struktuurist ning teostatud testidest.

5.1 Prototüüp ja disain

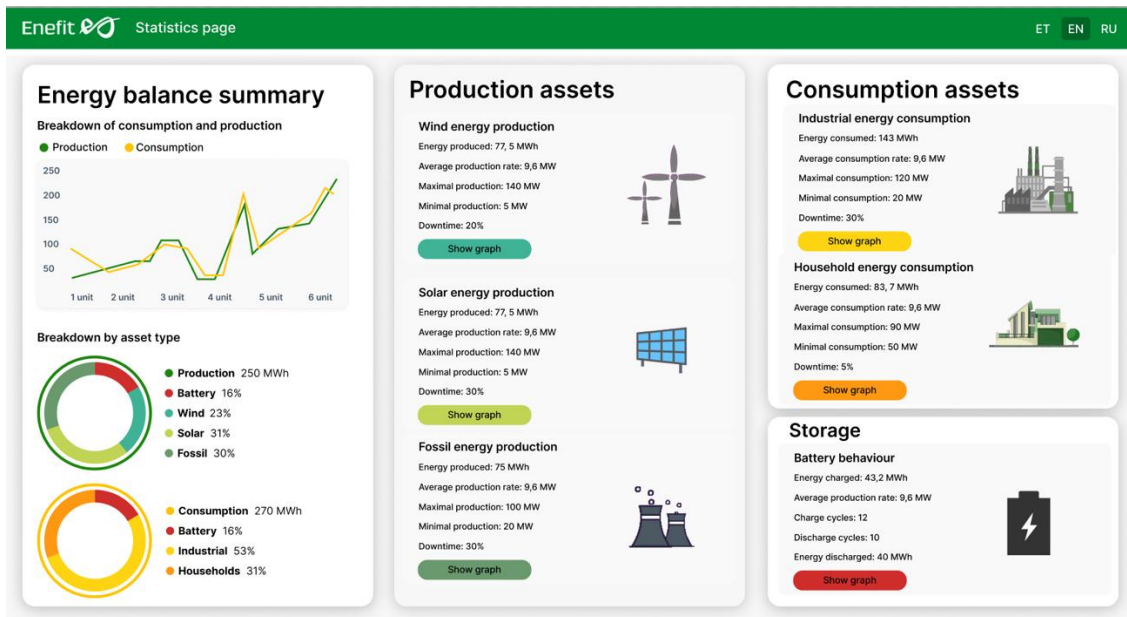
5.1.1 Akusüsteemide disain

Akusüsteemide kaardi disaini jaoks kasutati olemasolevat elemendikaardi kujundust, et tagada ühtne stiil. Aku ikoon valiti LottieFiles keskkonnast, kus valiku tegemisel võeti arvesse nii funktsionaalseid nõuded kui ka ikooni sobivus rakenduse üldise stiiliga. Akuiכון on dünaamiline ning muutub vastavalt laetavuse tasemele, võimaldades kasutajal kiirelt ja intuiitiivselt hinnata akusüsteemide hetkeseisundit [21]. Selline visuaalne lahendus parandab kasutajamugavust, vähendades vajadust andmete eraldi avamise ja detailse lugemise järele.

5.1.2 Statistikalhe prototüüp

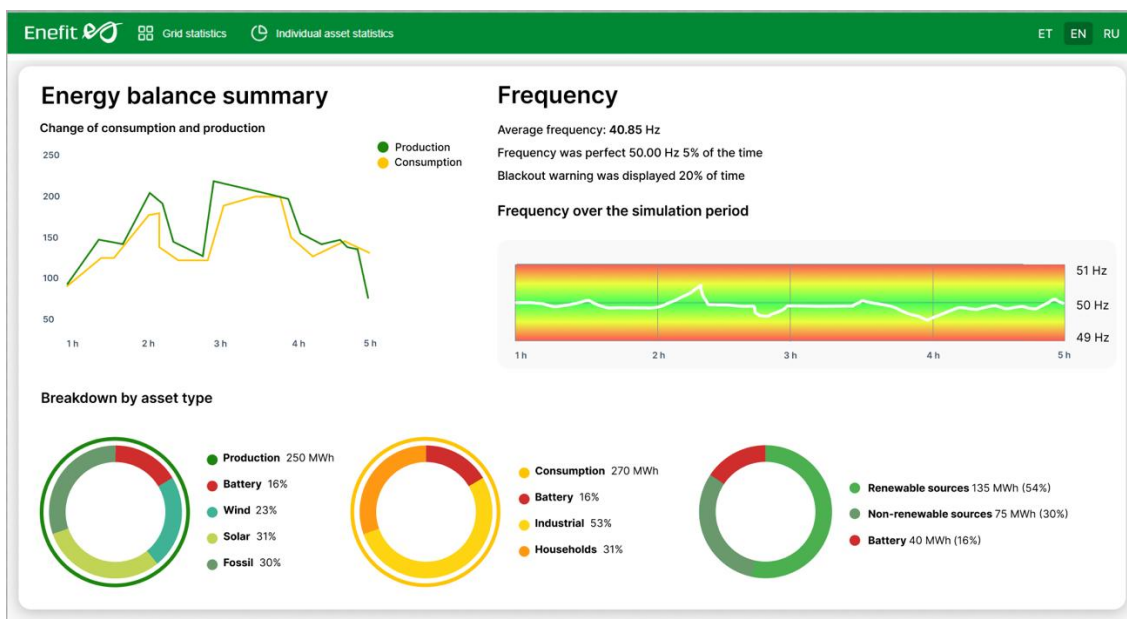
Statistikalhe kasutajaliidese prototüübi loomiseks kasutati disainitööriista Figma, kuna ka ülejäänud rakenduse eelnev disainiplaneering oli tehtud sama tööriistaga. Protsessi käigus töötati välja kaks erinevat kujundusversiooni, mille eesmärk oli toetada kasutaja lihtsat ja intuiitiivset ligipääsu energiastatistikale ning süsteemi toimivusele.

Esimene disainiversioon koondas kogu vajaliku teabe ühele ekraanile (Joonis 5). Süsteemi üldvaate osas tootmise ja tarbimise ülevaade ning varapõhised tarbimise ja tootmise jaotused. Üksikute varade detailvaadetes oli välja toodud varade tüüpide põhiselt detailsemad andmed. Selle lahenduse eeliseks oli koondatud info ja võimalus saada kiirelt terviklik ülevaade kogu süsteemist ilma vaateid vahetamata. Samas muutus ekraan visuaalselt tihedaks ning suure andmemahu korral raskendas see vajaliku teabe leidmist ja andmete analüüsimist.

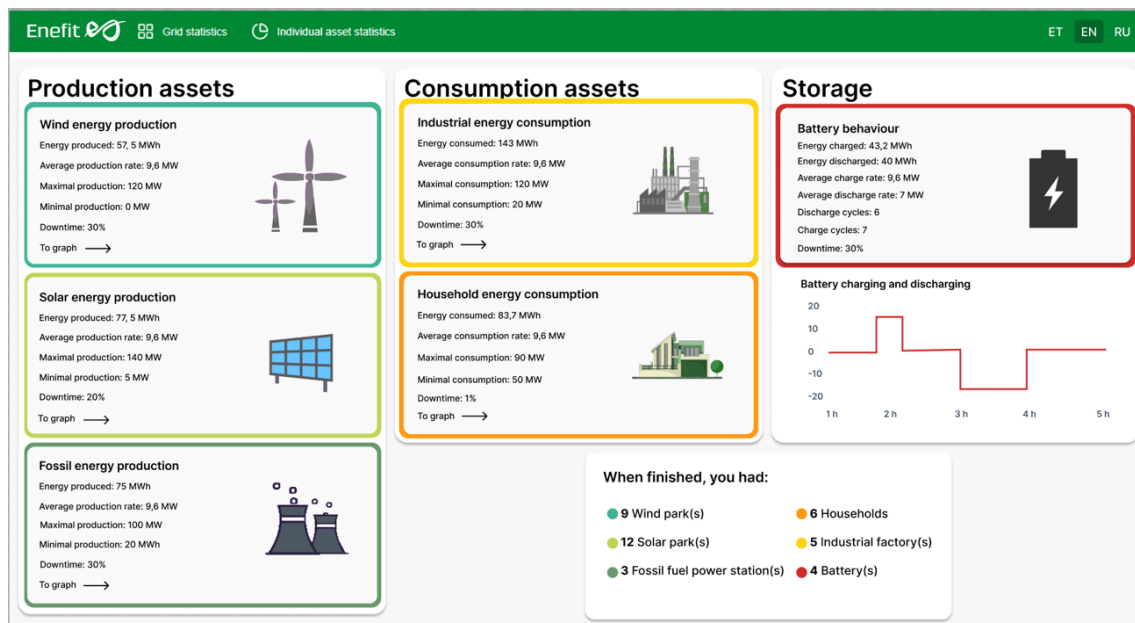


Joonis 5. Esimene disainiversioon, kus kogu vajalik teave on ühel ekraanil.

Teine disainiversioon eraldas süsteemi üldinfo ja individuaalsete varade detailinfo eraldi vaadetele. Kasutaja alustab süsteemi üldisest energiatasakaalu ja sageduse ülevaatest (Joonis 6), kust on võimalik edasi liikuda varade individuaalsete andmete vaateni (Joonis 7). Selline jaotus võimaldas lihtsamat navigeerimist, vähendas visuaalset koormust ning parandas kasutuskogemust, kuna kasutaja sai keskenduda konkreetsele andmekihile korraga.



Joonis 6. Süsteemi üldine energiatasakaalu ja sageduse ülevaade.

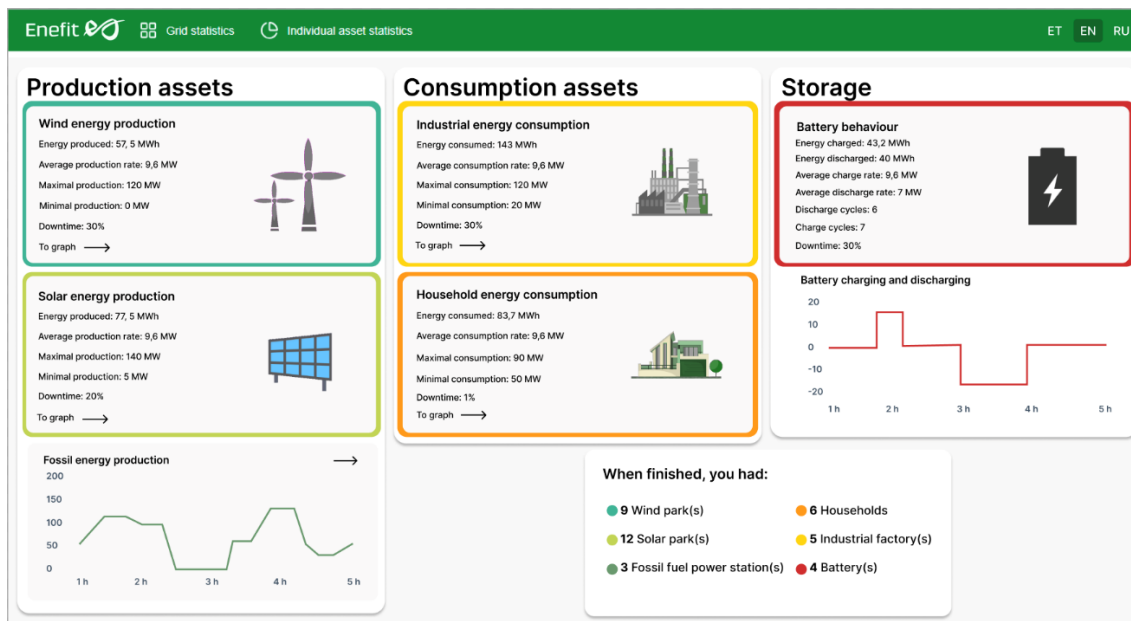


Joonis 7. Varade individuaalsete andmete vaade.

Pärast mõlema prototüübi võrdlemist otsustati valida teine, vaateid eraldav versioon. Selle kasuks on kasutajasõbralikum ülesehitus, parem loetavus ning selgem struktuur.

Statistikalehe prototüübi disainimisel pöörati tähelepanu visuaalsele selgusele, järjepidevusele ja loetavusele. Kujunduses kasutati minimalistlikku ja modulaarset ülesehitust, kus iga teabeplokk oli selgelt eraldatud ning toetatud visuaalsete ikoonide ja graafiliste elementidega. Olulisem teave esitati suurema kirjastiiliga või paksema kirjatüübiga, et tähtsamad andmed eristuksid kiiresti ülejäänud sisust.

Individuaalsete varade vaates esitatakse esmalt iga vara detailsemad andmed (näiteks tootmisvõimsus, tarbimine, maksimaalsed ja minimaalsed väärtused), mille järel on kasutajal võimalus avada vara käitumist ajas kujutav graafik (Joonis 8). Selline ülesehitus võimaldab kasutajal esmalt tutvuda põhiteabega ning seejärel süveneda vara käitumisse.



Joonis 8. Vara käitumist ajas kujutatav graafik individuaalsete andmete vaates.

Värvilahendus valiti selliselt, et see toetaks informatsiooni kiiret mõistmist ning aitaks kasutajal erinevaid andmetüüpe ja vaateid hõlpsasti eristada. Igat individuaalset vara (näiteks tuulepargid, majapidamised, akusalvestid) esindas kindel värv. Samuti olid kogutootmise ja -tarbimise andmed kindlate värvidega. Sageduse muutumist ajas visualiseeriti graafikuga, mille stiil järgib simulatsiooni ajal kuvatava sageduse graafiku visuaalset ülesehitust, säilitades nii kasutajaliideses visuaalse ühtsuse.

Graafikute ja skeemide puhul kasutati kontrastseid värvikombinatsioone, et näiteks tootmise ja tarbimise trendijooned oleksid selgelt eristatavad. Ringdiagrammides jaotati erinevad varad ja tarbijagrupid kindlatesse värvitoonidesse, järgides läbivad loogilist süsteemi kogu kasutajaliideses ulatuses. Disainis kasutati ka samu ikoone, mis olid varde tähistusena kasutusel simulatsiooni ajal, et tugevdada kasutajale äratuntavust ja järjepidevust erinevate vaadete vahel.

5.2 Rakenduse arhitektuur

Rakenduse arhitektuur tugineb moodulipõhisel ülesehitusel ning on loodud kasutades Vue.js raamistikku. Süsteem on jaotatud loogilisteks mooduliteks, mis toetavad komponentidel põhinevat arendusviisi ning võimaldavad arendustööd struktureerida selgete vastutusvaldkondade järgi. Koodi ülesehitus eristab kasutajaliideses komponente, lehti, marsruutimisloogikat ja andmehaldust. Iga moodul täidab kindlat rolli ja suhtleb

teiste moodulitega määratletud liidest kaudu, mis tagab süsteemi parema hallatavuse, testitavuse ja laiendatavuse [22].

Projektis kasutatakse Pinia olekuhaldusraamistikku, mis võimaldab rakenduses tsentraliseeritud andmehaldust. Selle abil on võimalik jagada olekut ja andmeid erinevate komponentide vahel ilma keerulise andmepäringute ahelata, vähendades seeläbi süsteemi keerukust [23].

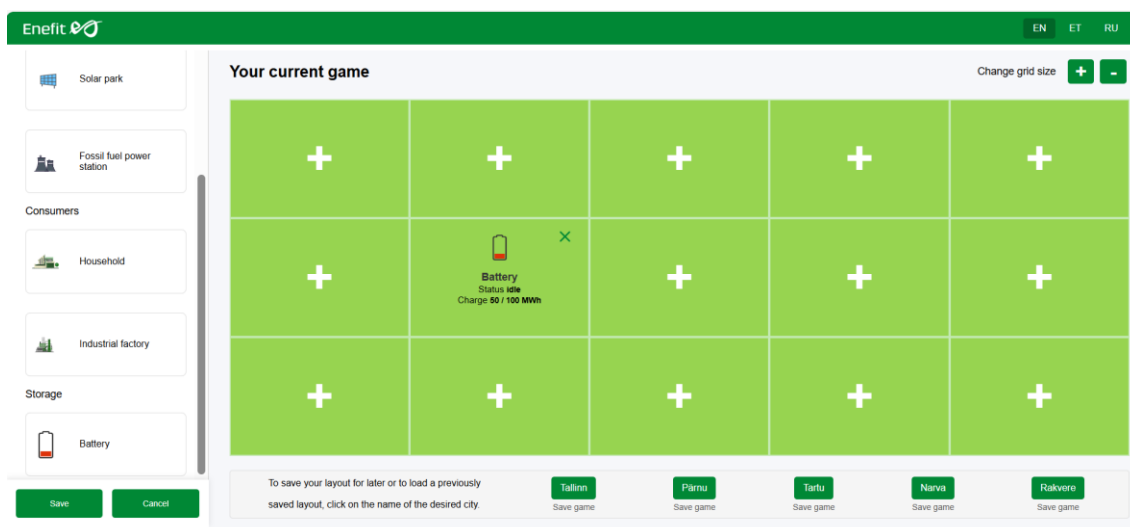
Kuigi rakendus ei kasuta rangelt klassikalist objektorienteeritud programmeerimisstiili, on arhitektuuris selgelt tajutavad OOPi (*Object Oriented Programming*) põhimõtted. Komponentid toimivad kui iseseisvad objektid, neil on oma andmed ja visuaalne esitus ning need on kujutatud viisil, mis võimaldab neid taaskasutada. Selline lähenemine järgib klassikalisi objektorienteeritud põhimõtteid nagu kapseldatus, taaskasutatavus ja eraldatus [24]. See toetab moodulipõhise arenduse eesmärki: luua süsteem, mis on selgepiiriline, hästi struktureeritud ja arendajale paindlikult hallatav [25].

5.3 Valminud funktsionaalsused

Antud alapeatükis tuuakse välja bakalaureusetöö käigus valminud funktsionaalsused.

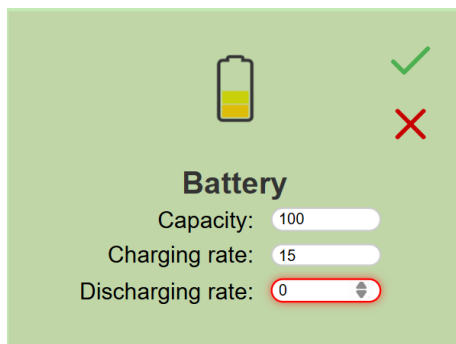
5.3.1 Akusüsteemid

Akusüsteemide lisamise funktsioon võimaldab kasutajal kasutada võrgu sageduse tasakaalustamiseks akusüsteeme. Akusüsteeme saab lisada mängu redigeerimisvaates (Joonis 9).



Joonis 9. Akusüsteemide lisamine mängu redigeerimisvaates.

Igal akul on kolm numbrilist parameetrit: mahutavus (MWh), laadimiskiirus (MW), tühjenemise kiirus (MW). Neid väärtuseid saab muuda redigeerimisvaates, mis on igal elemendikaardil individuaalselt kättesaadav. Kui sisestada lahtrisse vale või mittesobiv väärtus, kuvatakse sisendkasti ümber punane äär, et juhtida kasutaja tähelepanu veale (Joonis 10). Sellisel juhul ei ole võimalik muudatusi salvestada. Kui väärtused on sobivad ja salvestamine toimub edukalt, sulgub redigeerimisvaade automaatselt ning elemendikaart kuvatakse koos uute väärtustega.



The screenshot shows a configuration window titled "Battery" with a light green background. At the top left is a battery icon with a yellow level indicator. At the top right are a green checkmark and a red 'X' icon. Below the title, there are three input fields: "Capacity:" with the value "100", "Charging rate:" with the value "15", and "Discharging rate:" with the value "0". The "Discharging rate" input field is highlighted with a red border, indicating an invalid entry.

Joonis 10. Aku redigeerimisvaade, kus on sisestatud vale väärtus.

Akusüsteemil on kolm olekut: „ootel“, „laeb“, „tühjeneb“. Olekuid saab vahetada nupu abil (Joonis 11):

- Olekus „laeb“ suureneb aku mahutavus vastavalt määratud laadimiskiirusele.
- Olekus „tühjeneb“ väheneb aku mahutavus vastavalt määratud tühjenemiskiirusele.
- Olekus „ootel“ aku mahutavus ei muutu.

```

function toggleBatteryStatus(batteryId: number) {
  const battery = chosenBatteries.value.find(b => b.id === batteryId);
  if (!battery) return;
  battery.status =
    battery.status === BatteryStatus.Idle
      ? BatteryStatus.Charging
      : battery.status === BatteryStatus.Charging
        ? BatteryStatus.Discharging
        : BatteryStatus.Idle;
}
function setBatteryStatus(batteryId: number, newStatus: BatteryStatus) {
  const battery = chosenBatteries.value.find(b => b.id === batteryId);
  if (!battery) return;
  battery.status = newStatus;
}

```

Joonis 11. Aku oleku muutmise funktsioon.

Üks simuleeritud tund on seadistatud vastavalt mängu parameetritele. Näiteks juhul, kui 12,5 sekundit vastab ühele tunnile, toimub aku täituvuse muutus iga 12,5 sekundi järel. Muutus sõltub aktiivsest režiimist („laadimine“ või „tühjenemine“) ning kasutaja määratud võimsusväärtustest (Joonis 12). Selle aja jooksul suureneb või väheneb aku laetavus vastavalt ning vastav energiakogus (MWh) salvestatakse või vabastatakse.

```

const calculateTotalCurrentConsumption = computed(() => {
  const elementConsumption = chosenElements.value
    .filter(el => !el.isProducer)
    .reduce((total, el) => total +
      ensureNumber(el.currentConsumption), 0);

  const batteryConsumption = batteryStore.chosenBatteries
    .filter(battery => battery.status ===
      BatteryStatus.Charging)
    .reduce((total, battery) => total +
      ensureNumber(battery.chargeRate), 0);

  return elementConsumption + batteryConsumption;
});

```

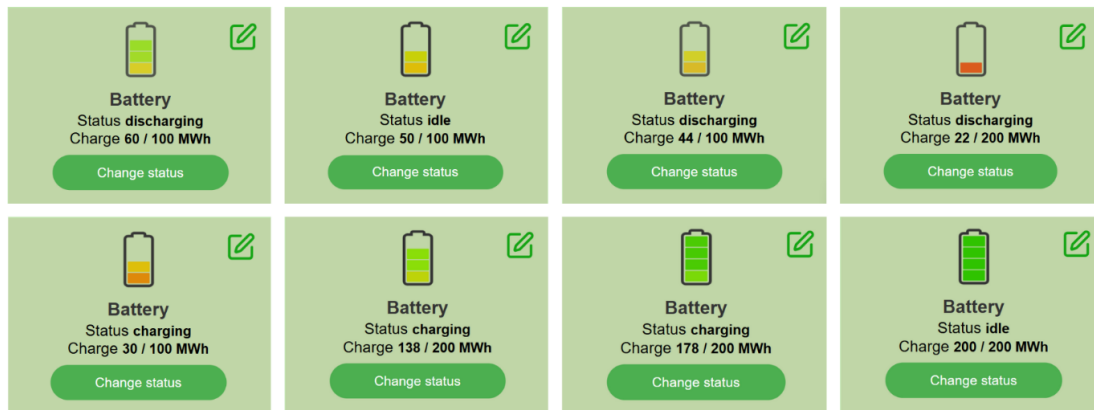
Joonis 12. Tarbimisvõimsuse arvutamise funktsioon, kus on näha akusüsteemi panust vastavalt režiimile.

Akusüsteemi ikoon peegeldab visuaalselt aku laetavuse taset ja muutub vastavalt režiimile ja täituvusele (Joonis 13).

- Olekus „laeb“ täitub akuikooni sisu alt ülespoole, värvid muutuvad punasest kollaseks ja seejärel rohelisteks.

- Olekus „tühjeneb“ tühjeneb akuikooni sisu ülalt alla, värvid muutuvad rohelisest kollaseks ja seejärel punaseks.

Animatsiooni üksikud kaadrid on dünaamiliselt seotud aku tegeliku laetustasemega, võimaldades kasutajal kiirest ja visuaalselt tajuda aku seisundit reaajas.



Joonis 13. Akusüsteemide laetavuse taseme muutmine ja akuikooni sisu muutumine vastavalt laetavuse tasemele.

5.3.2 Statistikaleht ja andmete salvestus

Statistikalehe funktsionaalsus toetub andmehaldussüsteemile, mis kogub kogu simulatsiooni vältel andmeid erinevate energiavoogude ja süsteemi seisundite kohta ning salvestab need. See moodul rakendav Pinia *store*'i ning töötab koos elementide ja akude andmeallikatega. Statistikaleht võimaldab kasutajal saada pärast simulatsiooni lõppu põhjaliku ja visuaalselt arusaadava ülevaate kogu süsteemi käitumisest. Statistika kogumine ja kuvamine toetav mänguõppesse lõimitud süsteemmõtlemise arendamist, võimaldades analüüsida oma tegevuste ja otsuste mõju energiavõrgu tasakaalule.

Simulatsiooni käivitamisel alustatakse automaatselt kõigi oluliste energiavoogude jälgimist kindla ajaintervalli kaupa. Lisaks on defineeritud simuleeritud tunni väärtus, mis võimaldab normaliseerida arvutusi ning tulemusi teisendada megavatt-tundideks. Iga ajaühiku kohta salvestatakse järgmised andmed (Joonis 14):

- Hetke kogutootmine ja tarbimine (MW);
- Hetke sagedus (Hz);
- Kumulatiivne tootmine ja tarbimine (MWh)

- Aku olekud ja väärtused – iga aku hetke laetus, laadimis- ja tühjenemismäärad ning olek;
- Iga valitud vara hetkeseis – sealhulgas nimi, tüüp, kas on aktiivne, tootmis- või tarbimisväärtus ning nende maksimaalsed ja minimaalsed väärtused;
- Statistika iga vara kohta – sisaldab aktiivse oleku määra, kogutoodangut või -tarbimist ning maksimaalseid ja minimaalseid tootmis- või tarbimisväärtuseid.

```
export interface ISimulationState {
  tick: number;
  totalProductionMW: number;
  totalConsumptionMW: number;
  frequency: number;
  cumulativeProductionMWh: number;
  cumulativeConsumptionMWh: number;
  assets: IIndividualElementState[];
  batteries: IBatteryState[];
}
```

Joonis 14. Iga ajaühiku kohta salvestatavad andmed.

Kõik need andmed salvestatakse massiivi, mille iga element vastab ühele hetkeseisundile simulatsiooni jooksul. Massiivis hoitakse ka akude hetkeseisud ning vara objektide koondinfot.

Sageduse järgimiseks on lisatud loendurid, mis suurenevad, kui sagedus on ideaalne või ohtlikul piiril. See võimaldab anda kasutajale tagasisidet, kui stabiilne oli süsteem.

Iga vara kohta, mida kasutaja simulatsioonis valib hoitakse paralleelselt detailset statistikat objektis, mis sisaldab (Joonis 15):

- vara tüüpi, nime ja id;
- aktiivse oleku määra;
- vara hetke toodangut või -tarbimist (MW);
- maksimaalseid ja minimaalseid tootmis- või tarbimisvõimsuseid (MW).

```

export interface IIndividualElementState {
  id: number;
  name: string;
  type: string;
  isProducer: boolean;
  isActive: boolean;
  value: number;
  min: number;
  max: number;
}

```

Joonis 15. Statistika, mida kogutakse iga vara kohta.

Iga akusüsteemi kohta, mida kasutaja simulatsioonis valib hoitakse paralleelselt detailset statistikat objektis, mis sisaldab (Joonis 16):

- aku nime ja id;
- hetke režiimi;
- aku laetavuse taset ja mahutavust(MWh);
- laadimis- ja tühjenemiskiiruseid (MW).

```

export interface IBatteryState {
  id: number;
  name: string;
  status: string;
  currentCharge: number;
  chargeRate: number;
  dischargeRate: number;
  capacity: number;
}

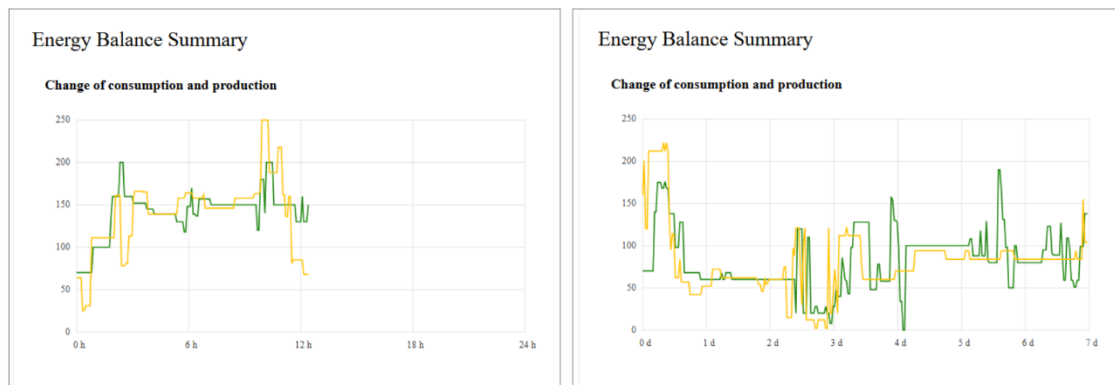
```

Joonis 16. Statistika, mida kogutakse iga aku kohta.

Nende andmete põhjal arvutatakse kumulatiivsed väärtused, nagu kogutarbimine ja kogutootmine, samuti tüüpiline statistika, aktiivse oleku määr, tarbimise ja tootmise logid. See võimaldab statistikavaates kuvada mitte ainult süsteemi üldandmeid, vaid ka vara-põhist statistikat. Tarbimise ja tootmise logide põhjal genereeritakse ka individuaalsed graafikud.

Graafikud on dünaamilised ning kohanduvad vastavalt valitud mängutasemele. Kui mängu alguses valitakse tase „Lihtne“ (24 tundi), jaotatakse graafiku x-telg neljaks intervalliks, millest igaüks esindab kuute tundi. Tasemel „Keskmine“ (3 päeva), „Raske“

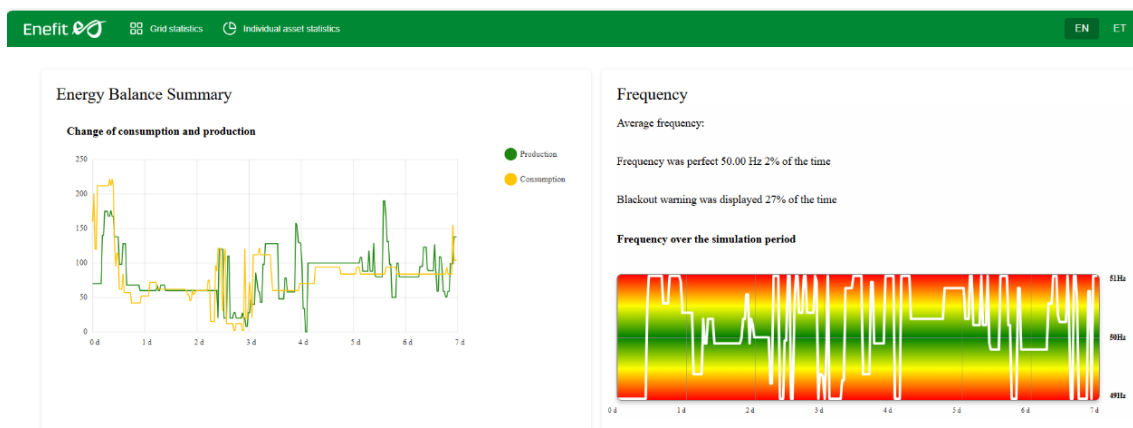
(7 päeva) ning „Ekspert“ ja „Kohanda mäng“ (14 päeva). Sel juhul on x-telg jaotatud päevade kaupa (Joonis 17).



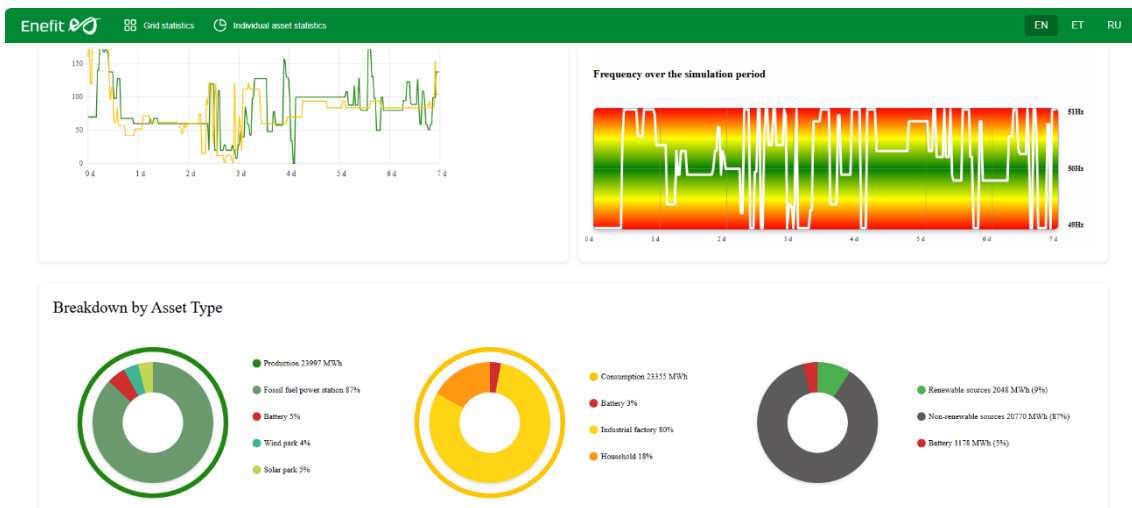
Joonis 17. Erinevate mängutasemete graafikute võrdlus.

Graafiku y-telje väärtused määratakse dünaamiliselt vastavalt kogutud andmete maksimaalse tootmis- või tarbimisväärtusele ning ümardatakse lähima 50 ühikuni. Näiteks, kui maksimaalne väärtus on 160 MW, kuvatakse y-teljel suurima väärtusena 200 MW. Akusüsteemide puhul arvutatakse y-telje ulatus vastavalt laadimis- ja tühjenemiskiiruste absoluutväärtustele. Telg on sümmeetriline ümber nulli, kus positiivse suuna y-teljel on maksimaalseks väärtuseks leitud positiivne absoluutväärtus, negatiivses suunas on miinimumiks negatiivne absoluutväärtus.

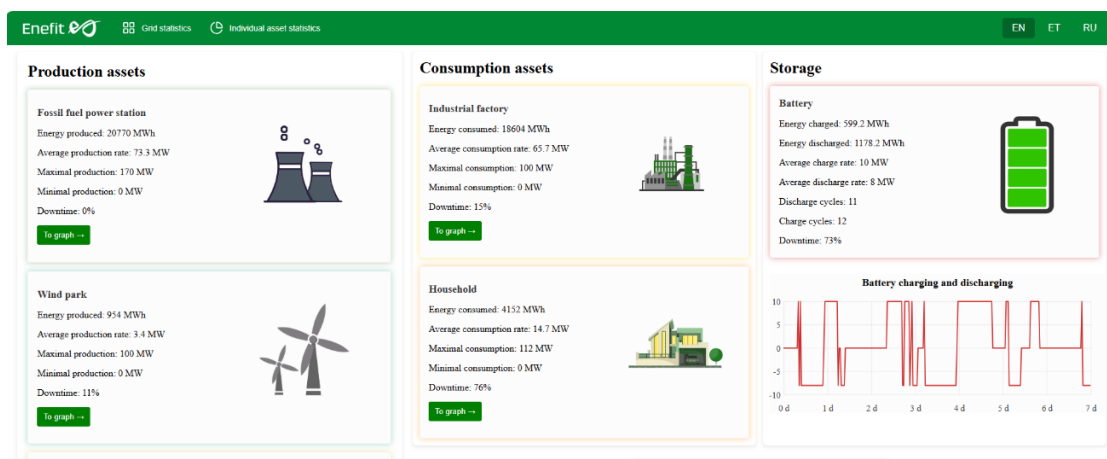
Statistikavaatesse saab liikuda peale simulatsiooni lõppu. Statistikavaate disain on loodud vastavalt 5.1.2 peatükis kirjeldatud prototüübile. Valminud lahendus on näha Joonis 18 – Joonis 29.



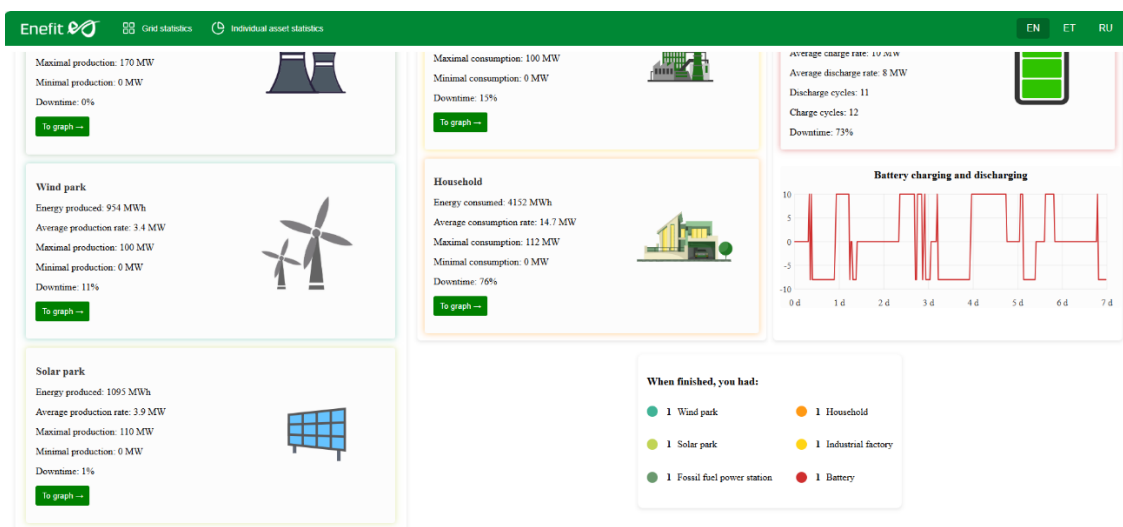
Joonis 18. Simulatsiooni süsteemi üldinfo statistikalehe esimene vaade, tase „Raske“.



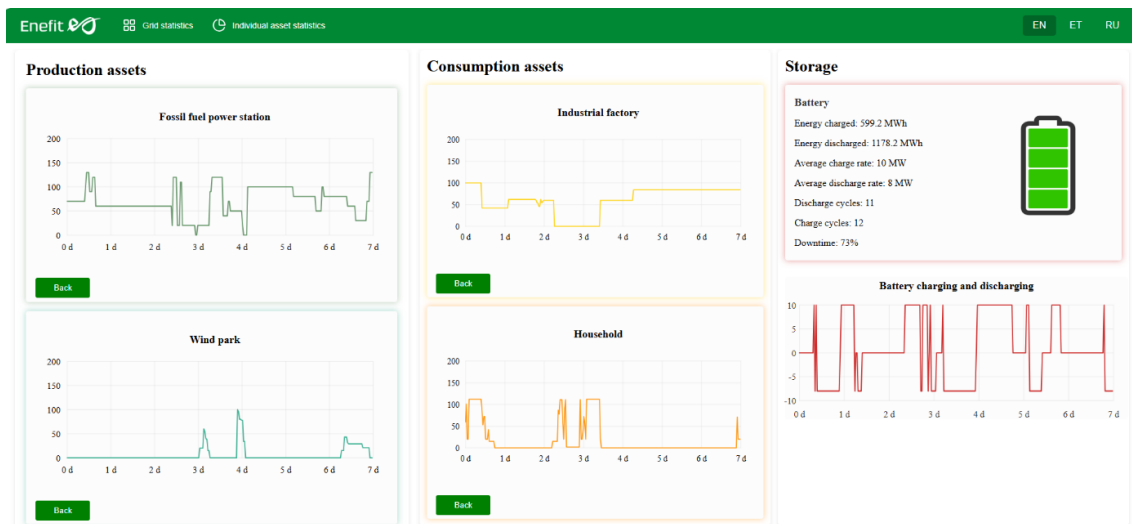
Joonis 19. Simulatsiooni süsteemi üldinfo statistikalehe teine vaade, tase „Raske“.



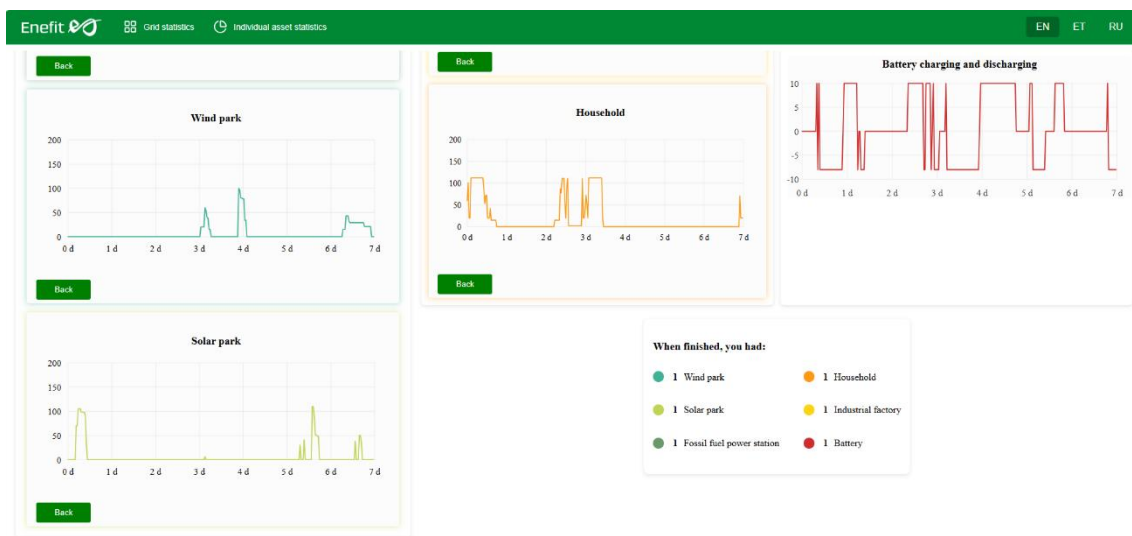
Joonis 20. Simulatsiooni individuaalsete varade statistikalehe esimene vaade, tase „Raske“.



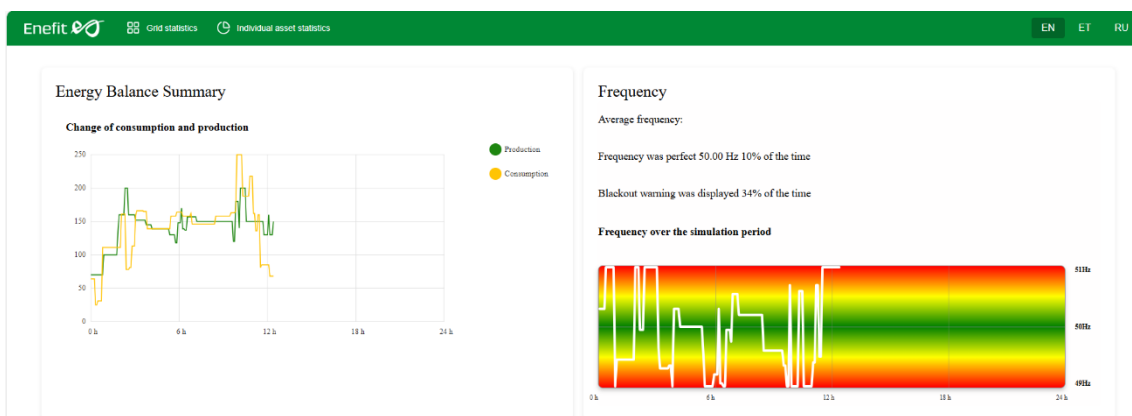
Joonis 21. Simulatsiooni individuaalsete varade statistikalehe teine vaade, tase „Raske“.



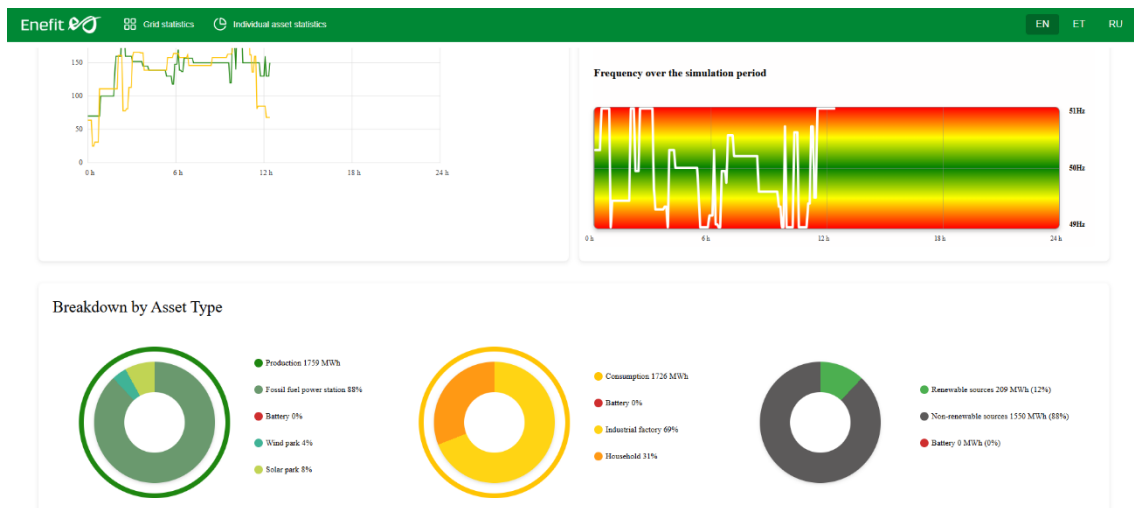
Joonis 22. Simulatsiooni individuaalsete varade graafikute esimene vaade, tase „Raske“.



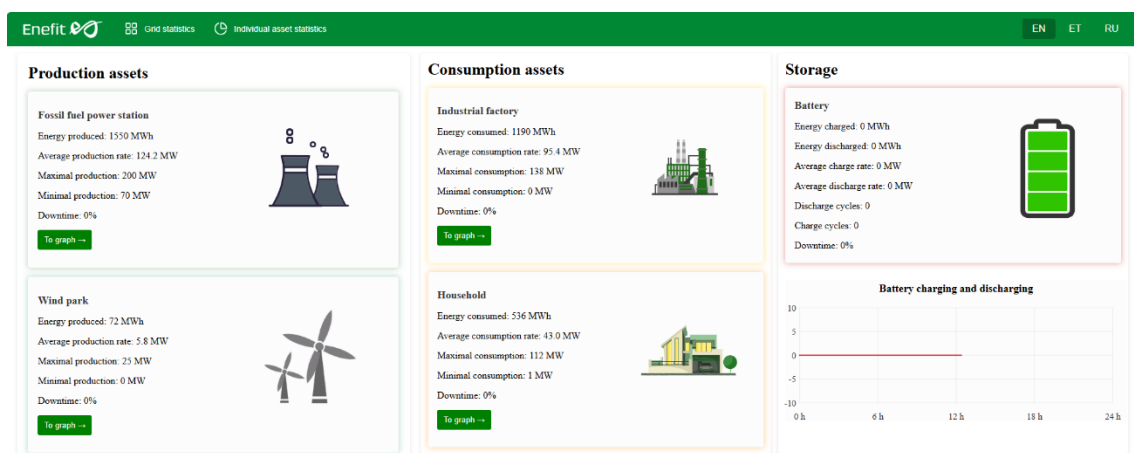
Joonis 23. Simulatsiooni individuaalsete varade graafikute teine vaade, tase „Raske“.



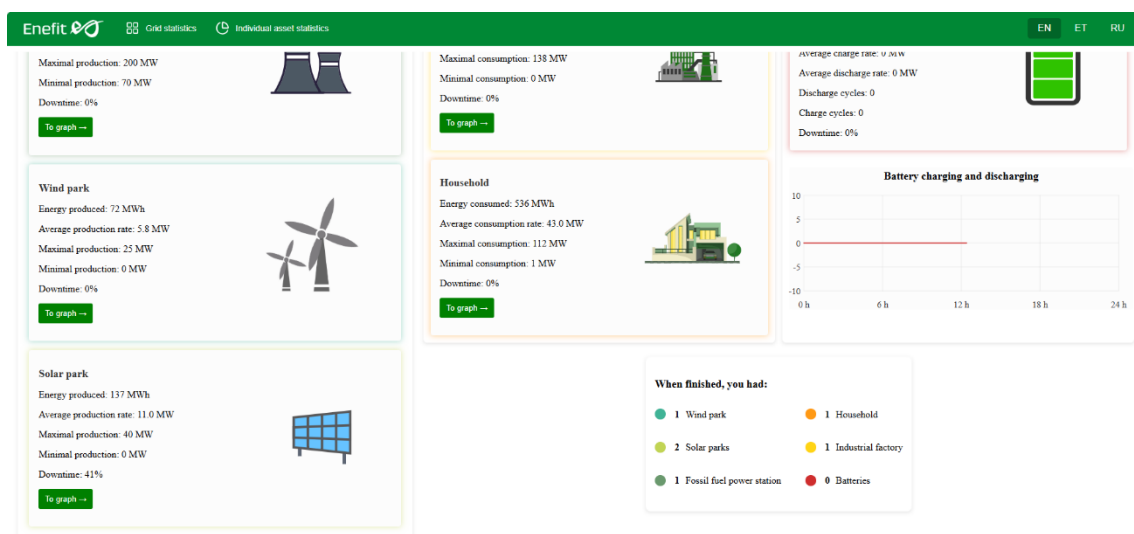
Joonis 24. Simulatsiooni süsteemi üldinfo statistikalehe esimene vaade, tase „Lihtne“.



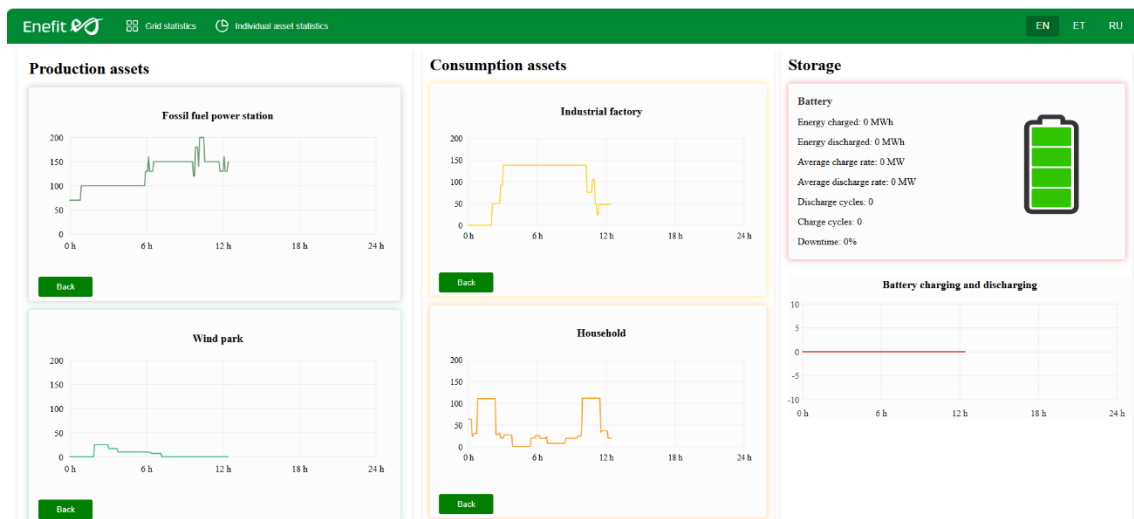
Joonis 25. Simulatsiooni süsteemi üldinfo statistikalehe teine vaade, tase „Lihtne“.



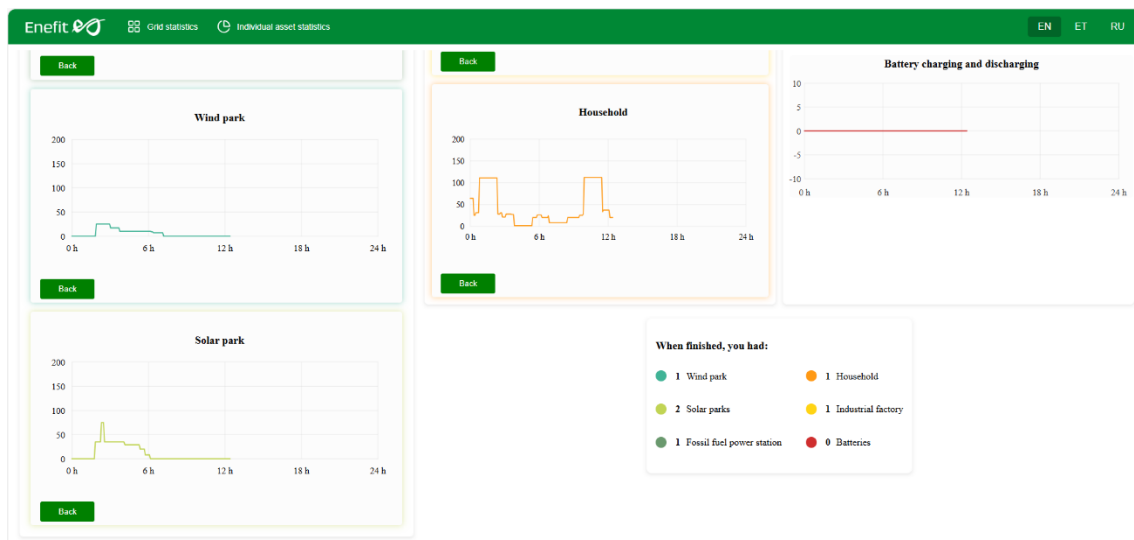
Joonis 26. Simulatsiooni individuaalsete varade statistikalehe esimene vaade, tase „Lihtne“.



Joonis 27. Simulatsiooni individuaalsete varade statistikalehe teine vaade, tase „Lihtne“.



Joonis 28. Simulatsiooni individuaalsete varade graafikute esimene vaade, tase „Lihtne“.



Joonis 29. Simulatsiooni individuaalsete varade graafikute teine vaade, tase „Lihtne“.

5.4 Testid

Arendusprotsessi käigus ei koostatud formaalseid testjuhtumeid ega testplaani. Selle asemel kasutati *ad hoc* testimist, mis võimaldas kiirelt hinnata, kas süsteemi peamised funktsionaalsused, nagu akusüsteemide lisamine ja statistika kuvamine, toimivad ootuspäraselt.

Ad hoc testimine on mitteametlik ja struktureerimata tarkvaratestimise meetod, kus testijad uurivad rakendust ilma eelnevalt määratud testplaanita, tuginedes oma intuitsioonile ja kogemustele, et tuvastada defekte, mida formaalsed testid võivad mitte

avastada [26]. Selline lähenemine oli sobiv, arvestades projekti olemust, kus suur osa loogikast on visuaalne, interaktiivne ning dünaamiline.

Ad hoc testimine toimus iteratiivselt kogu arendusperioodi vältel ning keskendus eelkõige kahe funktsionaalsuse testimisele: akusüsteemide käitumine simulatsioonis ning statistikalehel kuvatavate andmete vastavus simulatsiooni tegelikule loogikale. Simulatsiooni jooksul kogutud andmete täpsust kontrolliti, kasutades brauseri *LocalStorage*'i vaadet, mis võimaldas reaajas jälgida, milliseid väärtusi süsteem salvestab ning kuidas need statistikavaatesse jõuavad.

Lisaks viidi pärast iga *issue* valmimist ning enne *pull request* 'i tegemist manuaalselt läbi regressioonitestid, et kontrollida, kas uued muudatused ei ole mõjutanud negatiivselt olemasolevat funktsionaalsust. See aitas säilitada süsteemi stabiilsust kogu arendusprotsessi vältel.

5.4.1 *Ad hoc* test: akusüsteemide käitumine

Eesmärk: Kontrollida aku lisamist võrku, konfiguratsioonivõimalusi, olekute muutumist ja visuaalset tagasisidet. Tabel 1 näitab *ad hoc* testjuhtumeid akusüsteemide käitumise kohta.

Tabel 1. *Ad hoc* testijuhtumid akusüsteemide käitumise kohta.

Tegevus	Tulemus
Aku lisatakse <i>grid</i> 'ile lohistamisega	Aku ilmub võrku olekus „ootel“
Avatakse aku redigeerimisvaade	Kuvatakse sisendiväljad
Sisestatakse sobimatu väärtus	Sisendvälja ääris muutub punaseks, salvestada ei saa
Sisestatakse sobivad väärtused ja salvestatakse	Muutused rakenduvad, andmed uuendavad, vaade sulgub
Olek muudetakse „laeb“, „tühjeneb“, „ootel“	Ikoon reageerib, mahutavus muutub vastavalt olekule, aku tühjenemis- või laadimiskiirus lisatakse süsteemi

Tegevus	Tulemus
Aku tühjeneb nullini või täitub maksimumini	Aku läheb automaatselt olekusse „ootel“

5.4.2 *Ad hoc* test: statistikaleht

Eesmärk: Kontrollida, kas simulatsiooni jooksul kogutud andmed kuvatakse statistikalehel õigesti ning toetavad kasutaja analüüsi. Tabel 2 näitab *ad hoc* testjuhtumeid statistikalehe kohta.

Tabel 2. *Ad hoc* testijuhtumid statistikalehe kohta.

Tegevus	Tulemus
Simulatsioon lõppeb	Link statistikalehele kuvatakse
Sisenetakse statistikalehele	Avaneb süsteemi statistikat kuvav üldvaade
Kontrollitakse üldiseid tootmis- ja tarbimisgraafikuid	Kuva vastab simulatsioonile, väärtused on korrektsed
Kontrollitakse sageduse graafikut	Kuva vastab simulatsioonile, väärtused on korrektsed
Avatakse individuaalsete varade statistikalehele	Kuvatakse iga vara klassi detailseid andmeid, õige ikoon salvestuse andmeid ja tsükleid
Avatakse individuaalse vara graafik	Graafik vastab simulatsioonile

6 Analüüs ja järeldused

Selles peatükis antakse projektile hinnang, analüüsitakse rakendust ja selle vastavust nõuetele, tuuakse välja äriplane kasulikkus, kirjeldatakse võimalusi edasiarendusteks ning tuuakse välja tiimiliikmete logid.

6.1 Hinnang

Autorite hinnangul täidab valminud arendus püstitatud eesmärgid ning parandab varasema simulatsioonirakenduse realismi ja kasutusväärtust. Projekti käigus lisati rakendusse akusüsteemide loogika, mis võimaldab simuleerida energia salvestamist ja väljastamist vastavalt süsteemi vajadustele. See täiendus aitab paremini mõista virtuaalse elektrijaama toimimist, eelkõige süsteemi balansseerimise ja paindliku energiakasutuse kontekstis.

Lisaks loodi uus statistikavaade, mis koondab simulatsiooni käigus kogutud andmed selgesse ja struktureeritud vormi. Varasemalt puudus kasutajal võimalus vaadata tulemuste kokkuvõtet ega hinnata süsteemi käitumist tagantjärele. Andmete salvestamine ja hilisem visualiseerimine parandavad oluliselt rakenduse õppimis- ja planeerimisväärtust. Statistikaleht sisaldab tootmise, tarbimise ja sageduse ülevaateid ning võimaldab vaadelda individuaalsete varade panust süsteemi töösse.

Autorite arvates on loodud lahenduse kasutajaliides visuaalselt selge ja loogiliselt struktureeritud. Värvilahendused ning ikoonide kasutus toetavad informatsiooni kiiret mõistmist ja võimaldavad eristada erinevaid süsteemi komponente. Individuaalsete varade vaates võimaldab kasutajaliides esmalt tutvuda vara detailsete andmetega ning seejärel avada tema käitumist ajas kujutava graafiku, mis tugevdab interaktiivsust.

Kuigi rakendus on saavutanud töö eesmärgi ja arendatud funktsionaalsus toetab paremat kasutajakogemust, näevad autorid võimalusi edasisteks arendusteks.

6.2 Lahenduse vastavus nõuetele

Valminud lahendus vastab seatud funktsionaalsetele ja mittefunktsionaalsetele nõuetele. Arenduse käigus pöörati tähelepanu sellele, et kõik uued lisatavad komponendid lõimitaks loogiliselt ja visuaalselt olemasolevasse süsteemi ning toetaksid virtuaalse elektri jaama simulatsiooni eesmärki.

Funktsionaalsete nõuete kohaselt pidi kasutajal olema võimalus lisada simulatsiooni *grid*’ile akusüsteem, konfigureerida selle tehnilisi näitajaid ning muuta selle režiimi. Nimetatud funktsionaalsused said edukalt realiseeritud: akusüsteemi saab paigutada *grid*’ile lohistamise teel, see ühendub automaatselt võrku ning kasutaja saab redigeerida maksimaalset mahutavust, laadimiskiirust ja tühjenemiskiirust. Aku töörežiimi saab nupu abil vahetada kolme oleku vahel: „laeb“, „tühjeneb“ ja „ootel“. Lisaks lisati loogika, mille alusel aku liigub „ootel“ olekusse, kui täituvus saavutab maksimaalse või minimaalse piiri. Visuaalse tagasiside nõue täideti samuti – akusüsteemi olek ja laetuse tase on kuvatud dünaamilise animatsiooniga, mis peegeldab aku seisundit värvide ja täituvuse muutumise kaudu.

Statistikalehe arendamisel lähtuti nõuetest, mille kohaselt peab simulatsiooni lõppedes avanema leht, kus on näha süsteemi üldised ja varaspetsiifilised energiakasutuse näitajad. Simulatsiooni ajal kogutakse andmeid tootmise, tarbimise, salvestuse ja sageduse kohta. Statistikaleht kuvab need andmed kahes vaates. Üldvaates tuuakse välja süsteemi kogutoodang, -tarbimine, sageduse muutus ning energiabilanss. Detailvaates saab vaadata iga vara tüübi ning üksiku vara statistikat, sealhulgas keskmisi, maksimaalseid ja minimaalseid väärtusi, samuti seiskumise osakaalu.

Mittefunktsionaalsetest nõuetest lähtuvalt pöörati tähelepanu kasutajaliidese ühtsusele, lihtsasti mõistetavale kujundusele ning süsteemi töökindlusele. Kõik uued elemendid järgivad olemasolevat visuaalset stiili ning kasutavad samu ikoone ja sobivaid värve.

Kokkuvõttes võib hinnata, et valminud lahendus täidab seatud nõudeid sisuliselt ja funktsionaalselt. Arendatud funktsionaalsused tugevdavad simulatsioonirakenduse õpetlikkust, pakuvad kasutajale sisukat visuaalset tagasisidet ning toetavad süsteemi üldist kasutavust ja eesmärgipärast rakendamist.

6.3 Rakenduse analüüs

Simulatsioonirakenduse varasem versioon võimaldas kasutajal lisada ja eemaldada tootmis- ning tarbimisüksuseid, nende väärtuseid muuta ning vaadelda selle mõju süsteemi sagedusele. Kuigi see andis esmase ettekujutuse võrgu tasakaalustamisest, puudus kasutajal võimalus kasutada energiasalvestust. Samuti ei võimaldanud eelmine versioon analüüsida tehtud otsuste tagajärgi ja muutuseid süsteemis pärast simulatsiooni lõppu.

Tööstuslike akusüsteemide lisamine muutis simulatsiooni palju sisukamaks. Aku võimaldab mitte ainult salvestada ja vabastada energiat vastavalt võrgu olukorrale, vaid teha seda ka kasutaja määratud tingimuste alusel. Statistikaleht annab kasutajale ülevaate süsteemi tootmise, tarbimise, sageduse ja salvestuse käitumisest, mis loob võimaluse peegeldada tehtud otsuseid ja mõista nende mõju.

Võrreldes valminud lahendust Next Kraftwerke virtuaalse elektriijaama simulatsiooniga, pakub arendatud rakendus kasutajale suuremat kontrolli ning toetab analüüsi ka pärast simulatsiooni lõppu. Next Kraftwerke lahendus on visuaalselt realistlik ja professionaalne, kuid fookus on pigem sujuval süsteemil, kus on võimalik panna optimeerimine toimuma automaatselt [20]. Valminud rakendus on mängulisem ja selle tugevus seisneb kasutaja vastutuse ja juhtimisrolli rõhutamises – iga tegevus omab mõõdetavat tagajärge, mis on visualiseeritav ja arusaadav.

6.4 Äriline kasulikkus

Arendatud simulatsioonirakendusel on äriiline kasulikkus eelkõige Enefitile sisekoolituse ja teadlikkuse tõstmise vahendina. Salvestustehnoloogiad ja virtuaalsed elektriijaamad on järjest olulisem osa kaasaegsest energiahaldusest. Tööstuslike akusüsteemide ning statistikavaate lisamine muudab rakenduse sisuliselt tugevamaks õppimis- ja selgitusvahendiks, mida saab kasutada teema tutvustamisel töötajatele, partneritele või klientidele. Lahendusel on potentsiaal ka laiemaks rakendamiseks, näiteks koostöök haridusasutustega või ettevõtte tööandjabrändi toetamiseks, võimaldades keerulisi energiasüsteeme visualiseerida arusaadaval ja kaasahaaraval viisil.

6.5 Võimalused edasiarendusteks

Valminud lahendus loob tugeva aluse edasisteks arendusteks. Üheks loogiliseks suunaks on andmete salvestamine andmebaasi, mis võimaldaks simulatsioonide tulemusi säilitada ja omavahel võrrelda. Samuti saaks lisada automaatse balansseerimise ning reaalsetel andmetel põhinevaid stsenaariume, et tõsta simulatsiooni vastavust reaalsusele. Üks võimalus selleks oleks aastaegade ning ilmamuutuste realistlikum integreerimine. Lisaks on võimalik luua õppimist toetavaid funktsioone, nagu hinnangute andmine simulatsiooni tulemustele või samm-sammulised ülesanded koos tagasisidega.

6.6 Teostatud tööde logi ja meeskondlik hinnang

Meeskonna liikmed hindavad üksteise panuse võrdseks. Mõlemad tegelesid *task*'ide ja nõuete välja töötamisega, prototüübi disainimisega ja tarkvaraarendusega, aidates kaasa rakenduse edukale valmimisele. Koostöö sujus hästi ning tööjaotus oli võrdne. Perioodil 20.01–18.05 töötati igal nädalal vähemalt 14 tundi inimese kohta.

6.6.1 Eva Sõmmer teostatud tööde logid

Tabel 3 kirjeldab Eva Sõmmeri tööd nädalate kaupa, alates 20.01.2025 kuni 18.05.2025.

Tabel 3. Eva Sõmmer teostatud tööde logi.

Nädal	Kirjeldus
20.01 – 26.01	Uute <i>story</i> 'ide analüüsimine, koodi korrastamine
27.01 – 02.02	Varasemalt kirjutatud koodis vigade leidmine ja parandamine
03.02 – 09.02	Uute <i>task</i> 'ide koostamine akusüsteemide lisamiseks, tegevuse planeerimine
10.02 – 16.02	Varasemalt kirjutatud koodi ühtlustamine ja parandamine
17.02 – 23.02	Akusüsteemidele režiimipõhise käitumise funktsionaalsuse lisamine, automaatse laadimise/tühjenemise lõppemise lisamine

Nädal	Kirjeldus
24.02 – 02.03	Akusüsteemide ühendamine süsteemi, akusüsteemide kategoriseerimine tarbijana/tootjana vastavalt režiimile
03.03 – 9.03	Akusüsteemide ikooni käitumise konfigureerimine vastavalt laetuse tasemele ja režiimile
10.03 – 16.03	Akusüsteemide ikooni käitumise konfigureerimine vastavalt laetuse tasemele, uute muudatustega enda töö kooskõlla viimine, akusüsteemide lisamine redigeerimisvaatesse
17.03 – 23.03	Soovitatud muudatuste sisse viimine koodi, PR enda harule, uute funktsioonide demo, uute statistikalehe <i>task</i> 'ide koostamine
24.03 – 30.03	Statistikalehe esimese prototüübi koostamine
31.03 – 06.04	Statistikalehe teise prototüübi koostamine, analüüs ja sobivuse kinnitamine
07.04 – 13.04	Andmeobjektide struktuuri jaoks liideste defineerimine, andmeid koguva ja haldava mooduli loomine
14.04 – 20.04	Andmeid koguva ja haldava mooduli loomise lõpetamine, andmete kogumise automaatse alustamise ja lõpetamise funktsionaalsuse lisamine
21.04 – 27.04	Uute muudatustega kooskõlla viimine, PR enda harule, üldvaate disaini ühendamine kogutud andmetega - tootmise ja tarbimise balansi graafik, kumulatiivse tootmise ja tarbimise jaotuse graafikud varapõhiselt
28.04 – 04.05	Üldvaate disaini ühendamine – kumulatiivse tootmise jaotuvuse graafik energia liigi põhiselt, sageduse graafik, perfektse sageduse osakaalu lisamine, elektrikatkestuse ohu kestvuse osakaalu lisamine
05.05 – 11.05	Detailvaate disaini ühendamine – varapõhised andmed ja graafikud, salvestuse andmed ja graafik
12.05 – 18.05	Detailvaate disaini ühendamine loogikaga – elementide statistika kokkuvõta, PR enda harule

6.6.2 Martha Läänemägi teostatud tööde logid

Tabel 4 kirjeldab Martha Läänemägi tööd nädalate kaupa, alates 20.01.2025 kuni 18.05.2025.

Tabel 4. Martha Läänemägi teostatud tööde logi.

Nädal	Kirjeldus
20.01 – 26.01	Uute <i>story</i> 'ide analüüsimine ja uute <i>issue</i> 'de planeerimine
27.01 – 02.02	Akusüsteemide loogika uurimine ja esmane planeerimine
03.02 – 09.02	Konfliktide lahendamine
10.02 – 16.02	Akusüsteemide loogika arenduse alustamine – akusüsteemi lisamine. Määratletud on mahutavus, laadimis- ja tühjenduskiirus ning olekud. Aku kuvatakse kasutajaliideses ning olekuid saab muuta
17.02 – 23.02	Akusüsteemide esimese <i>issue</i> arendamine, konfliktide lahendamine
24.02 – 02.03	Akusüsteemide esimese <i>issue</i> lõpetamine ja soovitud muudatuste läbiviimine
03.03 – 9.03	Akusüsteemide konfigureeritavuse planeerimine, konfliktide lahendamine
10.03 – 16.03	Akusüsteemide konfigureeritavuse arendamine - lisada kasutajaliidesesse võimalus muuta akusüsteemi parameetreid: mahutavus, laadimiskiirus ja tühjenemiskiirus. Muudetud väärtused peavad kajastuma aku tööloogikas reaalajas. Konfliktide lahendamine ja tiimiliikmete abistamine
17.03 – 23.03	Akusüsteemide lõplik lisamine <i>main</i> harusse, uute funktsioonide demo, uute statistikalehe <i>task</i> 'ide koostamine ja <i>refinement</i>
24.03 – 30.03	Statistikalehe algse prototüübi loomine
31.03 – 06.04	Andmete kogumise võimaluste uurimine ja analüüsimine

Nädal	Kirjeldus
07.04 – 13.04	Kogu simulatsiooni statistikalehe arenduse alustamine vastavalt Figmale – lehekülje paigutuse ja komponentide ülesehituse realiseerimine vastavalt kujundusfailile
14.04 – 20.04	Kogu simulatsiooni statistikalehe arenduse jätkamine – graafikute disainimine ja lisamine. Soovitatud muudatuste läbiviimine
21.04 – 27.04	Individuaalsete varade statistikalehe arenduse alustamine
28.04 – 04.05	Individuaalsete varade statistikalehe arenduse jätkamine – graafikute disainimine ja lisamine.
05.05 – 11.05	Individuaalsete varade statistikalehe arenduse lõpetamine, soovitude lisamine ja konfliktide lahendamine.
12.05 – 18.05	Viimaste viimistluste läbiviimine

7 Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli täiendada varasemat virtuaalse elektrijaama simulatsioonirakendust, et muuta see realistlikumaks ja õpetlikumaks. Töö käigus lahendati kaks olulist puudujääki: esiteks puudus rakenduses akusüsteemide loogika, mis on kaasaegsetes energiasüsteemides keskse tähtsusega võrgu tasakaalustamisel ja paindliku energiahalduse võimaldamisel; teiseks puudus mehhanism, mis võimaldaks simulatsiooni tulemusi salvestada ja neid kasutajale visuaalselt ning struktureeritult esitada.

Töö raames arendati välja funktsionaalne akusüsteemide mudel, mis võimaldab energia salvestamist ja väljastamist vastavalt süsteemi vajadustele. Selle tulemusena saavad kasutajad paremini mõista energijuhtimise ja võrgu stabiliseerimise põhimõtteid virtuaalse elektrijaama kontekstis. Samuti loodi simulatsioonirakendusse statistikaleht, mis kuvab simulatsiooni käigus tekkinud andmeid. Rakendusse lisatud andmesalvestusloogika võimaldab mõõdetud väärtusi jooksvalt talletada ning esitada need graafilisel ja struktureeritud kujul. Kasutajasõbralik statistikaleht suurendab simulatsiooni kasutusväärtust, võimaldades tulemuste analüüsi, võrdlemist ning toetades seeläbi õppimist.

Tarkvaraarenduses tugineti varasemast meeskonnaprojektist saadud kogemustele ning kasutati samu tööriistu ja praktikaid, mis olid end eelnevalt tõestanud. Rakendus arendati Vue.js raamistikus Microsoft Visual Studio keskkonnas. Kogu lähtekood hallati GitHub'i platvormil, mis võimaldas sujuvat koostööd ja arendusprotsessi läbipaistvat dokumenteerimist.

Valminud töö täitis seatud eesmärgid edukalt. VPP simulatsioonirakenduse täiendused parandasid selle kvaliteeti ning lähendasid rakenduse toimimise loogikat reaalsele energiasüsteemile. Arendatud lahendused tõstsid kasutajakogemuse taset ja suurendasid simulatsiooni rakendatavust õppekeskkonnana.

Kasutatud kirjandus

- [1] S. Abdelkader, J. Amissah, ja O. Abdel-Rahim, „Virtual power plants: an in-depth analysis of their advancements and importance as crucial players in modern power systems“, *Energy, Sustainability and Society* 2024 14:1, kd 14, nr 1, lk 1–21, aug 2024, doi: 10.1186/S13705-024-00483-Y.
- [2] B. Goia, T. Cioara, ja I. Anghel, „Virtual Power Plant Optimization in Smart Grids: A Narrative Review“, *Future Internet* 2022, Vol. 14, Page 128, kd 14, nr 5, lk 128, apr 2022, doi: 10.3390/FI14050128.
- [3] R. G. Sargent, „Verification and validation of simulation models“, *Proceedings - Winter Simulation Conference*, lk 166–183, 2010, doi: 10.1109/WSC.2010.5679166.
- [4] „What is a VPP? | Enel North America“. Kasutatud: 5. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.enelnorthamerica.com/insights/blogs/what-is-a-vpp>
- [5] „Battery Energy Storage System (BESS) | The Ultimate Guide“. Kasutatud: 29. märts 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.edina.eu/power/battery-energy-storage-system-bess>
- [6] T. Bowen, I. Chernyakhovskiy, ja P. Denholm, „Grid-Scale Battery Storage: Frequently Asked Questions“. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: www.greeningthegrid.org
- [7] „Energy storage systems can now be integrated with the Fusebox virtual power plant platform - Fusebox“. Kasutatud: 1. aprill 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://fusebox.energy/energy-storage-systems-can-now-be-integrated-with-the-fusebox-virtual-power-plant-platform/>
- [8] „What is Battery Energy Storage System (BESS) and how it works“. Kasutatud: 31. märts 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/what-is-battery-energy-storage>
- [9] W. S. W. Abdullah, M. Osman, M. Z. A. A. Kadir, ja R. Verayiah, „Battery energy storage system (BESS) design for peak demand reduction, energy arbitrage and grid ancillary services“, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, kd 11, nr 1, lk 398–408, märts 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp398-408.
- [10] „What is Peak Shaving and How Does it Work? | EnSmart Power | UPS & ESS | Power Conversion and Energy Storage Systems“. Kasutatud: 5. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.ensmartpower.com/company/news/detail/what-is-peak-shaving-and-how-does-it-work/>
- [11] „The Complete Guide to Energy Storage Systems: Advantages, Disadvantages, and Future Trends“. Kasutatud: 1. aprill 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.acebattery.com/blogs/the-complete-guide-to-energy-storage-systems-advantages-disadvantages-and-future-trends>
- [12] „Energy storage - IEA“. Kasutatud: 1. aprill 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>

- [13] S. Nazaralizadeh, P. Banerjee, A. K. Srivastava, ja P. Famouri, „Battery Energy Storage Systems: A Review of Energy Management Systems and Health Metrics“, 1. märts 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/en17051250.
- [14] Z. Mao, H. Huang, ja K. Davis, „W4IPS: A Web-based Interactive Power System Simulation Environment For Power System Security Analysis“.
- [15] „Window: localStorage property - Web APIs | MDN“. Kasutatud: 1. aprill 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Window/localStorage>
- [16] „User-centered power network visualizations empower digital twins | News center | ABB“. Kasutatud: 1. aprill 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://new.abb.com/news/detail/31578/user-centered-power-network-visualizations-empower-digital-twins>
- [17] „Data Visualization: Elevating UX Design Through Advanced Chart and Graph Techniques | by Jonmidas | Medium“. Kasutatud: 19. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://jonmidas27.medium.com/data-visualization-elevating-ux-design-through-advanced-chart-and-graph-techniques-118360d7a5d3>
- [18] „UI Design for Energy Simulation. The Challenge | by Kelly Dern | Medium“. Kasutatud: 1. aprill 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://medium.com/@kellyleigh/ui-design-for-energy-simulation-edda8982e1c>
- [19] „Kanban“. Kasutatud: 26. aprill 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.atlassian.com/agile/kanban>
- [20] „Manage the Virtual Power Plant and prevent a blackout!“ Kasutatud: 5. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.next-kraftwerke.com/virtual-power-plant-vpp-simulation?lang=en>
- [21] „Free Battery Charging animation Animation by Furba Gurung | LottieFiles“. Kasutatud: 13. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://lottiefiles.com/free-animation/battery-charging-animation-NworvCDw9Z>
- [22] B. Abazher, „Modular Architecture Software Development“. Kasutatud: 6. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://triare.net/insights/modular-architecture-software/>
- [23] M. Mosti, „Vue Basics: Pinia State Management“. Kasutatud: 6. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.telerik.com/blogs/vue-basics-pinia-state-management>
- [24] „Master the OOP 4 Principles for Efficient Programming“. Kasutatud: 6. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://blog.kodezi.com/master-the-oop-4-principles-for-efficient-programming/>
- [25] „Modular software architecture – improves scalability“. Kasutatud: 6. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://selleo.com/blog/how-does-modular-software-architecture-improve-scalability?>
- [26] „The Complete Guide to Ad hoc Testing | BrowserStack“. Kasutatud: 1. mai 2025. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.browserstack.com/guide/adhoc-testing>

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Autorid Martha Läänemägi ja Eva Sõmmmer

1. Annavad Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose “Tööstuslike akusüsteemide lisamine ning statistika kogumine ja visualiseerimine virtuaalse elektriijaama simulatsioonirakenduse näitel“, mille juhendaja on Kristina Murtazin
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Autorid on teadlikud, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autoritele.
3. Autorid kinnitavad, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

20.05.2025

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Lisa 2 – Eneseanalüüs Eva Sõmmer

Bakalaureusetöö raames panustasin aktiivselt nii akusüsteemide lisamisse kui ka statistikalehe arendamisse, keskendudes andmete kogumisele ja töötlemisele. Lisaks osalesin kasutajaliidese prototüübi kujundamisel.

Minu peamised tööülesanded olid järgmised:

- Akusüsteemi loogika ühendamine ülejäänud rakendusega: rakendasin akusüsteemide toimeloogika vastavalt nende režiimidele. Näiteks juhul kui aku on režiimis „laeb“, liigitatakse see süsteemis tarbijaks ning tema laadimiskiirus lisatakse kogutarbimisele ja. Kui aku on täis või tühi, peatud laadimine või tühjenemine automaatselt.
- Akuikooni dünaamiline visualiseerimine: sidusin aku laetavuse tasemed visuaalsete ikoonikaadritega. Iga defineeritud laetavuse vahemik vastab kindlale animatsioonikaadrite vahemikule, mis võimaldab ikooni abil visuaalselt kajastada aku täituvuse ja režiimi muutust reaajas.
- Figma prototüübi koostamine: töötasin välja statistikavaate esialgse ja lõpliku kujundusversiooni, osaledes disainiprotsessis koos tiimikaaslasega. Loodud prototüübi põhjal kujundati edasine statistikavaate kasutajaliides.
- Andmete kogumine statistikalehe jaoks: struktureerisin simulatsiooniandmete kogumise, luues uued andmestruktuurid kogutavate andmete jaoks ning arendasin eraldi andmete haldusüksuse, mis salvestab simulatsiooniandmeid igal ajahetkel. Arvutustes lähtutakse mängutasemest ja simuleeritud tunni kestvusest ning teisendatakse hetkevõimsused (MW) energiaks (MWh).
- Statistikalehe andmete ja disaini sidumine: sidusin kogutud andmed statistikavaate graafikute ja andmeväljadega, lisades komponentidele loogika, mis filtreerib ja kuvab andmeid vastavalt vara tüübile. Arendasin graafikute dünaamilise x- ja y-telje skaleerimise, et visualiseerimine oleks kohanduv mängutaseme ja maksimaalse tootmis- või tarbimisväärtuste põhjal.

Kõige mahukamaks tööks kujunes andmete kogumise ja disainiga sidumise arendus. Kuna andmestruktuurid ja loogika tuli luua täiesti nullist, siis pidi palju kohanema uute muudatustega ja oma plaane ümber tegema. Töö oli siiski minu jaoks huvitav ning pakkus mitmeid väljakutseid. Puutusin esimest korda kokku andmete töötlemisega graafiku jaoks ning dünaamiliste telgede loomisega. Samuti oli uus kogemus akuikooni animatsiooni kaadrite juhtimine ning energieetika valdkonna mõistetega tutvumine.

Töö käigus paranes minu arusaam andmete struktureerimisest, süsteemise loogika ülesehitamisest ja sellest, kuidas muuta tehniline info visuaalselt arusaadavaks. Sain kogemuse ka kasutajaliidese disainimisest ning prototüübi koostamisest.

Kokkuvõttes oli projekt arendav ja praktiline kogemus, mis aitas mul arendada enda oskuseid nii tarkvaraarenduses kui ka tiimitöös.

Lisa 3 – Eneseanalüüs Martha Läänemägi

Bakalaureusetöö raames panustasin nii akusüsteemide integreerimisse kui ka statistikalehe arendamisse, töötades kasutajaliidese kujunduse, selle arenduse ning uute funktsionaalsuste loomisega.

Minu peamised ülesanded olid järgmised:

- Akusüsteemi lisamine rakendusse – lisasin rakendusse akusüsteemid ning töötasin välja nende tööloogika (mahutavus, laadimis- ja tühjenemiskiirus, olekud). Lisaks võimaldasin akude esialgset visualiseerimist pealehel ja oleku muutmist kasutajaliidese.
- Akusüsteemi konfigureerimise võimaluse loomine – arendasin funktsionaalsuse, mis võimaldab kasutajal muuta aku parameetreid (nt mahutavus, laadimiskiirus, tühjenemiskiirus), tagades, et need muudatused kajastuvad ka süsteemi loogikas ja toimimises.
- Figma prototüübi koostamine – osalesin statistikavaate visuaalse prototüübi loomises koostöös tiimikaaslasega. Loodud prototüüp oli aluseks edasisele arendustööle.
- Statistikalehe kasutajaliidese arendamine – realiseerisin statistikavaate mõlemad versioonid Figma prototüübi alusel, keskendudes paigutusele, graafikutele ja visuaalsele selgusele. Kujundasid kasutajaliidese nii, et see toetaks hilisemat andmete integreerimist. Pöörasin tähelepanu ka paigutuse kohandatavusele erinevatel ekraanisuurustel, et tagada informatsiooni selgus.

Statistikalehe ja graafikute loomine osutus tehniliselt kõige keerukamaks, kuna otsustasin need nullist üles ehitada kasutades CSS'i, TypeScript'i ja HTML'i. Valdkond oli mulle uus, mistõttu nõudis see palju katsetamist ja süvenemist, kuid pakkus samas väärtuslikku

kogemust kasutajaliidese arenduses. Lisaks arendusoskuste täiendamisele andis projekt mulle ka väärtusliku võimaluse tutvuda energeetika valdkonnaga.

Töö käigus paranes oluliselt minu arusaam komponentide struktuurist, stiilide rakendamisest ning interaktiivsete graafiliste elementide loomisest. Disainipoolega tegelemine pakkus mulle kõige enam huvi, kuna see võimaldas mul ühendada visuaalse loovuse ja arendusoskused. Kuigi statistikavaate arendamine hõlmas ka andmete töötlemise ja salvestamise loogika loomist, jäi minu fookus eelkõige kasutajaliidese arendusele.

Kokkuvõttes pakkus projekt mitmekesist kogemust, võimaldades mul rakendada olemasolevaid oskusi ja arendada edasi nii tehnilist kui ka disainilist mõtlemist.