TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

ATV70LT

Kairi Tänav

MIKROVÕRKUDE MODELLEERIMISTARKVARA METOODILISE JUHENDI JA LABORATOORSETE TÖÖDE VÄLJATÖÖTAMINE

Magistritöö

Instituudi direktor ..... prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja ..... van. teadur Argo Rosin

Lõpetaja ..... Kairi Tänav

Tallinn 2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsentseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 18.01.2016.a. ..... Kairi Tänav

ATV70LT

Mikrovõrkude modelleerimistarkvara metoodilise juhendi ja laboratoorsete tööde väljatöötamine

Kairi Tänav, üliõpilaskood 092814AAAMM, 2015. 108 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, elektriajamite ja elektrivarustuse õppetool

Töö juhendaja: vanemteadur Argo Rosin

Võtmesõnad: Taastuvenergeetika, elektri tarkvõrk, mikrotootmine, võrguühenduseta süsteemid, võrguühendusega süsteemid, päikesepaneelid, päikeseenergia, tuulegeneraatorid, tuuleenergia, energiasalvestid, muundurid, generaatorid, simulatsiooniprogramm

Referaat:

Lõputöö on 108 lehel, sisaldab 3 tabelit, 5 valemit ja 90 joonist.

Lõputöö eesmärk on uurida mikrotootmise olemust, tootlikust ja tasuvust Eesti väikemajapidamises läbi simulatsiooniprogrammi.

Esmalt annan ülevaate taastuvenergeetikast, mikrotootmisest ja elektri tarkvõrgu olemusest ning mastaabist. Toon välja põhilised tootmisallikad, milleks on päikeseenergia ja tuuleenergia. Neljandas peatükis tutvustan lähemalt simulatsiooniprogrammi *HOMER Legacy* ja töötan välja mikrovõrkude optimeerimistarkvara metoodilise juhendi. Viiendas peatükis koostan tuginedes tutvustatud simulatsiooniprogrammile laboratoorse juhendi, ning kolm ülesannet, mille lahenduskäik on näha lõputöö lisas.

Ülesannete lahendamisel selgus, et taastuvenergia mikrotootmine Eesti kliimas on kulukas ja kvaliteetse võrguühenduse olemasolul majanduslikult harva tasuv. Mikrotootmine on pigem alternatiiv, kui võrguühendus ei ole kättesaadav või esineb palju katkestusi. Taastuvenergia tootmisel eelistada päikesepaneele.

Lõputöö eripäraks on simulatsiooniprogrammi kasutamine ja metoodilise juhendi väljatöötamine.

Töös lahendatud ülesanded:

1. Teemakohase kirjanduse kogumine
2. Võõrkeelsete allikate tõlkimine
3. Tarkvõrkudest ja taastuvenergeetikast ülevaate andmine
4. Simulatsiooniprogrammi uurimine, andmete käitlus ja näite koostamine
5. Metoodilise juhendi ja kolme laboratoorse töö koostamine
6. Kokkuvõtte tegemine

ATV70LT

Составление методического пособия и пособия для лабораторных работ к программному обеспечению по моделированию микропроизводства.

Каири Тянав, студенческий код 092814AAAMM, 2015. 108 стр.

ТАЛЛИННСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет энергетики

Институт электротехники, кафедра электрического привода и электрического оборудования

Руководитель работы: старший научный сотрудник Argo Rosin

Ключевые слова: Энергетика на возобновляемых источниках, умная электрическая сеть, микропроизводство, системы неподключенные к сети, системы подключенные к сети, солнечные панели, солнечная энергия, энергия ветра, аккумуляторы энергии, преобразователи, генераторы, симуляционная программа.

Реферат:

В дипломной работе 108 страниц, 3 таблиц, 5 иллюстраций и 90 рисунков

Целью дипломной работы является изучутние микропроизводства в маленких хозяйствах Эстонии, его производительности и окупаемости, с помощью компьютерной симуляции.

В третьей главе даю обзор наличия и масштаба использования энергетики на возобнавляемых ресурсах, микропроизводства и умной электрической сети. Показываю основные источники - солнечная энергия и энергия ветра. В четвёртой главе знакомлю ближе с симуляционной программой *HOMER Legacy* и вырабатываю методическое пособие по оптимизации микросетей. В пятой главе вырабатываю методическое пособие для лабораторных работ основываясь на симуляционной программе, а также три задания, ход решения которых виден в приложении к

дипломной работе.

В процессе решения заданий выясняется, что микропроизводство с использование возобновляемых источников в Эстонском климате затратно и при наличие качественного подключения к сети экономически невыгодно. Микропроизводство, скорее альтернатива в случае плохого сетевого соединения и большого количества отключений электростнабжения.

Уникальность дипломной работы заключается в использовании симуляционной программы и выработке методических пособий.

Задания выполнененные в процессе написания работы

1. Сбор литературы по тематике дипломной работы
2. Перевод иноязычных источников
3. Предоставление обзора по умным сетям и энергетике возобновляемых источников
4. Исследование симуляционной программы и анализ данных
5. Проведение и подготовка методического материала и трёх лабораторных работ
6. Подготовка резюме

ATV70LT

Development of methodological guide and laboratory works for microgrid modelling software

Kairi Tänav, student code 092814AAAMM, 2015. 108 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Drives and Electricity Supply

Tutor of the work: assistant senior research scientist Argo Rosin

Key words: Renewable energy, smart grid, micro-generation, off-grid, on-grid, solar panels, solar energy, wind turbine, wind energy, energy supply, inverters, generators, simulation program

Summary:

The thesis has 108 pages, which includes 3 tables, 5 formulas and 90 diagrams.

The objective of the thesis is to explore the micro production, productivity and profitability of a small household in Estonia through a simulation program.

The third chapter gives an overview of renewable energy, micro-production and the nature and scope on smart grid. The main sources - solar and wind energ, are pointed out. In the fourth chapter a simulation program HOMER Legacy is described and a methodological guide is developed. The fifth chapter introduces instruction for laboratory tasks which are based on the simulation program, as well as three assignments, for which the solutions can be found in the annex to the thesis work.

In the process of solving the tasks it appeared that in Estonian climate micro-generation of renewable energy is expensive and not economically viable if there are high-quality grid connections. Micro production is rather an alternative for the unavailable network connections or frequent interruptions.

The thesis can be characterized by the use of simulation and the development of a methodological guide.

Tasks resolved in the work:

1. Collection of relevant literature
2. Translation of foreign- language sources
3. Giving overview of smart grids and renewable energy
4. Study of simulation software and data analysis
5. Preparation and execution of methodological material and three laboratory works
6. Making Summarization

SISUKORD

SISUKORD 9
MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE 12
1. EESSÕNA 13
2. SISSEJUHATUS 14
3. TAASTUVENERGEETIKA JA ELEKTRI TARKVÕRGUD 16
3.1. Mikrotootmine 16
3.1.1. Võrguühenduseta ehk *OFF-GRID* lahendus 17
3.1.2. Võrguühendusega ehk *ON-GRID* lahendus 17
3.2. Energiaallikad 19
3.2.1. Päikesepaneelid 19
3.2.2. Tuulikud 23
3.3. Tarkvõrk 27
3.3.1. Tarkvõrgu olemus ja mastaabid 28
3.3.2. Tarkvõrgu teolised 29
3.3.3. Olulisemad teolised 31
3.3.4. Alajaamad ja vahemaad 32
4. MIKROVÕRGU OPTIMEERIMISTARKVARA METOODILINE JUHEND 34
4.1. Programmi kirjeldus ja tööpõhimõte 35
4.1.1. Ülesande püstitus 36
4.1.2. Skeemi koostamine 36
4.1.3. Koormus(t)e andmete sisestamine 38
4.1.4. Energiaallikate ja -salvestite andmete sisestamine 39
4.1.5. Ressursside andmete sisestamine 41
4.1.6. Tarkvaralised enesekontrolli võimalused ja veateadete analüüs 42
4.1.7. Optimeerimistulemuste eelanalüüs 45
4.1.8. Optimeerimise tundlikkuse jaoks muutujate lisamine 47
4.1.9. Tulemuste analüüs 48
5. LABORITÖÖDE JUHENDI KOOSTAMINE 50
5.1. Teoreetilised alused 50
5.1.1. Koormus 50
5.1.2. Soojuskoormus 52
5.1.3. Päikeseenergia 52
5.1.4. Tuuleenergia 53

5.1.5. Salvestid 55
5.1.6. Muundurid 56
5.1.7. Generaator 57
5.1.8. Elektrolüüser 59
5.1.9. Võrguühendus 60
5.2. Laboritööde juhendid 62
5.2.1. Töö nr. 1: Energiasalvestita mikrovõrk 62
5.2.2. Töö nr. 2: Energiasalvestiga mikrovõrk 63
5.2.3. Töö nr. 3: Kahe energiasalvestiga mikrovõrk 64
6. KOKKUVÕTE 65
KASUTATUD KIRJANDUS 67
LISAD 71
Laboritöö „ENERGIASALVESTITA MIKROVÕRK“ 72
L 1.1 Lähteülesanne 74
L1.2 Modelleeritud skeemi lühikirjeldus 74
L1.3 Andmete hankimine ja sisestamine 75
L1.3.1 Koormus 75
L1.3.2 Päikeseenergia 76
L1.3.2 Tuuleenergia 78
L1.3.3 Muundurid 79
L1.3.4 Võrguühendus 80
L1.4. Optimeerimistulemuste võrdlus 81
L1 5 Järeldus 82
Laboritöö „ENERGIASALVESTIGA MIKROVÕRK“ 85
L 2.1 Lähteülesanne 87
L2.2 Modelleeritud skeemi lühikirjeldus 87
L2.3 Andmete hankimine ja sisestamine 88
L2.3.1 Koormus 88
L2.3.2 Päikeseenergia 89
L2.3.3 Salvestid 90
L2.3.4 Muundurid 91
L2.3.5 Generaator 92
L2.4. Optimeerimistulemuste võrdlus 93
L2 5 Järeldus 94
Laboritöö „KAHE ENERGIASALVESTIGA MIKROVÕRK“ 96
L 3.1 Lähteülesanne 98
L3.2 Modelleeritud skeemi lühikirjeldus 98

L3.3 Andmete hankimine ja sisestamine 99
L3.3.1 Päikeseenergia 100
L3.3.2 Salvestid 102
L3.3.3 Muundurid 102
L3.4. Generaatorid 103
L3.5. Elektrolüüser 105
L3.6. Optimeerimistulemuste võrdlus 107
L3 7 Järeldus 107

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2016

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Kairi Tänav, üliõpilaskood 092814AAAMM

Magistritöö teema: Mikrovõrkude modelleerimistarkvara metoodilise juhendi ja laboratoorsete tööde väljatöötamine

Ülesanne: Koostada magistriastme üliõpilastele mikrovõrkude modelleerimistarkvara metoodiline juhend ja töötada välja laboratoorsed tööd kolmele eri tüüpi mikrovõrgu lahendusele.

Lähteandmed:
1. Tarkvara kasutusjuhend
2. Veebipõhised võõrkeelsed materjalid
3. Andmebaaside Scopus ja IEEExplore materjalid

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:
1. Anda ülevaade tarkvõrkudest ja taastuvenergeetikast
2. Koostada mikrovõrkude modelleerimistarkvarale Homer Legacy metoodiline juhend
3. Koostada energiasalvestite ja tarbimise juhtimise õppeainete individuaalõppe jaoks laboratoorsete tööde juhend, mis sisaldab ülevaadet teoreetilistest alustest ja mikrovõrkude põhilistest komponentidest
4. Aine lektori jaoks töötada välja laboritööde näidisaruanded

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 18.01.2016.

Juhendaja: Ülesande vastu võtnud:

Vanemteadur A. Rosin ..... Üliõpilane K. Tänav .....

1. EESSÕNA

Kõige raskemaks osaks magistriõppe lõputöö tegemisel kujunes teema valik. Ei soovinud, et mu lõputöö oleks lihtsalt töölt võetud välisvõrkude projekteerimise projekt, millele saab kaaned ümber pandud, ära kaitstud ja siis riiulile tolmu koguma jäetud. Tahtsin, et teema pakuks huvi ja töö kirjutamine laiendaks silmaringi, ning et sellest oleks reaalselt kellelegi kasu.

Ühtlasi soovin tänada juhendajat järjekindluse ja kannatlikkuse eest.

2. SISSEJUHATUS

Maailma kasvav energiavajadus, vähenevad fossiilkütuste varud ja mure energiajulgeoleku pärast on sundinud riike välja töötama toetusmehhanisme alternatiivsete energiaallikate kasutusele võtmiseks ja arendamiseks. Seetõttu on viimastel aastatel ulatuslikult suurenenud huvi taastuvenergia vastu. Tuleviku energia jätkusuutlikkus sõltub suuresti sellest, kuidas taastuvenergia probleemiga tegeletakse lähemate aastakümnete jooksul. Oluline roll saab selles olema ka paljudel väikestel turule sisenevatel erasektori teenusepakkujatel. Turu jagatud lähenemine võimaldab osaleda elektritootmisel ka kodanikel.

Magistritöö sisu on jaotatud peatükkideks, kus esmalt on arutatud teemade üle, nagu taastuvenergeetika, mikrotootmine ja tarkvõrgud. Teisalt on koostatud magistriastme üliõpilastele mikrovõrkude modelleerimistarkvara metoodiline juhend ja töötatud välja laboratoorsed tööd kolmele eri tüüpi mikrovõrgu lahendusele, kus uuritakse mikrotootmise hinna ja kvaliteedi suhet Eesti kliimas võrguühenduseta ning –ühendusega süsteemis koos salvestiga ja ilma.

Ajalooliselt on jaotusvõrgul olnud elektrisüsteemides väga väike roll. Paljud jaotusvõrkude haldajad on kasutusse võtnud haldusskeemid, mille eesmärgiks on suurte tarbijate väljalülitamine tipp-tarbimise või hädaolukorra ajal. Selliste süsteemide kontrollitavus ei ole kahjuks osutunud piisavaks. Jaotusvõrkude vähene kaasamine energiajaotuse kontrollimiseks on eelkõige tingitud tehnilistest takistustest tarbijatega suhtlemisel. Targad võrgud on üks kulu-efektiivne tehnoloogia, mis on võimeline neid takistusi ületama, võimaldades tarbijatel jaotusüsteemiga suhelda ja seega aktiivselt osaleda süsteemi opereerimisel. [2]

Mikrovõrkude rajamine Eesti majapidamises on samuti lapsekingades. Selleks on mitmeid põhjuseid. Eesti väike pindala ja võrdlemisi tasane pinnareljeef, mille tõttu on võrguenergia kättesaadavus, võrreldes taastuvenergia süsteemide väljaehitamisega, odavam ja lihtsam. Teadmatus, millist taastuvenergia allikat kasutada, ning kas see on piisav ja turvaline, tagamaks aastaringne kvaliteetne elektrienergia.

Olukord on teine, kui võrguühenduse rajamine on mingitel põhjustel võimatu, või on võrguühendus olemas, aga asukoht on madalpinge liini lõpus ning katkestused tihedad. Põhjuseks võib olla ka taastuvenergia kasutamine kui põhimõte.

Leidmaks lahenduse, mis vastab tarbija vajadustele ja oleks majanduslikult kõige odavam, on mõistlik kasutada simulatsiooniprogrammi. Näiteks lõputöös kasutatav tavakasutajale tasuta kättesaadavat simulatsiooniprogramm *HOMER Legacy*. Antud programmi saab sisestada isiklikud kodutarbimise tulemused, elukoha päikese- ja tuuleenergia andmed ning seadmete hinnad, mida soovitakse kasutada. Programm analüüsib andmeid ja pakub välja lahendused, mis vastavad energiatarbimisele ja on kõige tasuvamad. Eraldi on välja toodud kWh hinnad, süsteemi keskkonnasõbralikkus ning ennustatav eluiga ja hoolduskulud. Väljastatud andmete põhjal saab teha järeldusi koostatud mikrosüsteemi hinna ja kvaliteedi suhte kohta.

Minule teadaolevatel andmetel ei ole kirjeldatud modelleerimistarkvara enne lõputöödes uuritud ja juhendit koostatud.

Vastust ootab küsimus, kas mikrotootmine ja taastuvenergia Eesti kliimas tasub end ära. Ning kas üldse liituda võrguettevõttega või on võimalik aastaringselt elektrienergiat ise toota nii, et sellest piisaks kogu majapidamisele.

3. TAASTUVENERGEETIKA JA ELEKTRI TARKVÕRGUD

Taastuva energia kasutamine kasvas oluliselt pärast esimest suurt naftakriisi seitsmekümnendate lõpus. Sel ajal olid majanduslikud tegurid kõige olulisemad, mistõttu huvi taastuva energia vastu vähenes kui nafta hind langes. Praegune huvi kasv taastuvenergia suhtes on ajendatud vajadusest vähendada fossiilkütuste poolt põhjustatud suurt keskkonnamõju. Suuremahuline energiavarustus on kahtlemata praeguse aja üks suurimaid väljakutseid.

Kuigi enamikes energiasüsteemides on peamine energiaallikas – kütus – manipuleeritav, ei kehti see päikese- ja tuuleenergia puhul. Peamisteks probleemideks nende energiaallikate puhul on hind ja kättesaadavus. Erinevalt tavalistest elektriallikatest ei saa taastuvate energiaallikate väljundvõimsust kontrollida. Ööpäevased ja hooajalised mõjud ning piiratud prognoositavus ei suuda tagada pidevat tootlikkust. Juhtimisautomaatika on üks võtmetegureid taastuvenergia süsteemide loomisel.

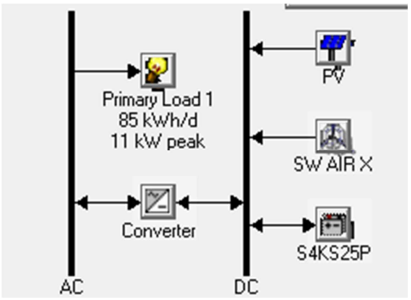
Päikese- ja tuuleenergia tootmisjaamad teevad läbi suuri muutusi dünaamika, mittelineaarsuste ja ebakindlus-väljakutsete osas, mis nõuavad tõhusaks lahendamiseks arenenud kontrollistrateegiaid. Tõhusamate automaatikasüsteemide kasutamine mitte ainult ei suurendaks tootlikkust, vaid tõstaks päikse- ja tuuleenergial töötavate jaamade töötundide arvu ja seega vähendaks toodetud kilovatt-tunni (kWh) hinda. [1]

3.1. Mikrotootmine

Kodused elektrijaamad on väga erinevad. Lihtsamad süsteemid koosnevad vaid energiaallikast ja küttekehast või võrguinverterist. Keerulisemad süsteemid võivad koosneda väga paljudest komponentidest ja seadistavate parameetrite arv võib ulatuda mitmesajani. Suures plaanis võib koduseid elektrijaamu jaotada kaheks: võrguühenduseta- ja võrguühendusega lahendus.

3.1.1. Võrguühenduseta ehk *OFF-GRID* lahendus

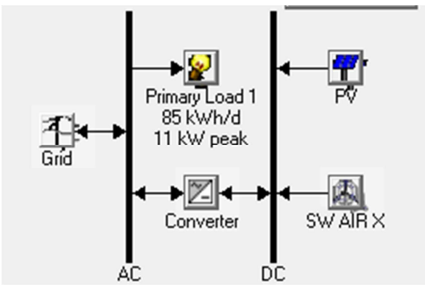
Võrguühenduseta süsteemid on sõltumatud ja neil puudub ühendus üldise elektrivõrguga (joonis 3.1). Kuna taastuvenergiaallikate elektri tootmine on väga kõikuv, sest sõltub tuulest ja päikesest, ning energia tootmine ja tarbimine on tavaliselt ajaliselt nihkes ehk päeval päikesepatareidega toodetud energiat kasutatakse öösel ja pimedatel õhtutundidel valgustamiseks, vajavad sellises süsteemid energiasalvestit, milleks tavaliselt on akupank. Need süsteemid on praegu maailmas kõige levinumad.[8]



Joonis 3.1. Võrguühenduseta süsteemi skeem

3.1.2. Võrguühendusega ehk *ON-GRID* lahendus

Elektrivõrguga ühendatud süsteemid jagunevad salvestiga ja salvestita süsteemideks. Salvestiga süsteem koosneb energiaallikast nagu tuulik või PV-paneelid ja võrguinverterist, salvesti ülesandeid täidab elektrivõrk, kuhu läheb toodetud energia, mida majapidamine ise ära ei kasuta (joonis 3.2). Sellisel juhul peab koduelektrijaam olema registreeritud ametliku elektritootjana. Kui oma elektritootmine ei suuda vajadusi katta, võetakse elektrit juurde elektrivõrgust. Kui tootmine on tarbimisest suurem, müüakse toodetud elekter elektrikaubandusega tegelevale ettevõttele.[8]

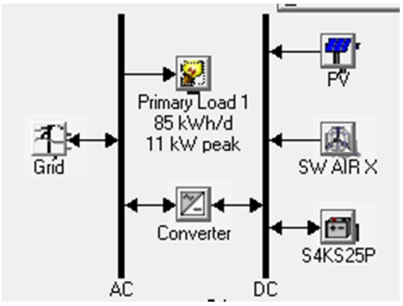


Joonis 3.2. Võrguühendusega salvestita süsteemi skeem

Kui elektrivõrguga ei saa mingil põhjusel elektrimüügi lepingut sõlmida, siis kasutatakse kogu omatoodetud elekter ära kohapeal. Kui tavatarbimine ei suuda kõike toodetavat ära kulutada, salvestatakse omatoodetud elektri ülejääk akupanka või alternatiivse soojusena paaki, mida köetakse elektriküttekehaga. [8]

Kui tootmine on ikka suurem, lastakse ületoodetud elekter võrku, kuid tasu selle eest ei saada, mis tegelikult ei ole võrgulepinguga lubatud. Puuduv energia aga võetakse võrgust. Sellise süsteemi kasutamise põhjuseks on asjaolu, et elektritootjana registreerimine on Eestis ikka veel pikk, tülikas ja bürokraatlik protsess. Lihtsustatud korras saavad võrguga liituda mikrotootjad võimsusega 11 kW ehk 16 A ühe faasi kohta. Kõigepealt tuleb taotleda kohalikult võrguettevõttelt (Elektrilevi, Imatra) tehnilisi tingimusi. Võrguettevõtte kodulehel on nimekiri võrguinverteritest, mis on saanud heakskiidu ja mille kasutamisel ei tohiks probleeme olla. Kui paigaldatavad seadmed on sobivad, teeb võrguettevõte liitumispakkumise ja sõlmitakse liitumisleping võrguga liitumiseks elektritootjana. [8]

Selliste lihtsate süsteemide puuduseks on, et need ei taga elektrivarustust võrguelektri katkemise korral. Kui energia varustamise katkematus on oluline või elektrikatkestused sagedased, lisatakse *on-grid* süsteemile varutoite ehk UPS-süsteem, mis koosneb akupangast ega pea olema nii mahukas nagu *off-grid* süsteemide korral, ning akulaadijast-inverterist (joonis 3.3). Komponentide poolest sarnaneb see hübriidsüsteemiga, ainult toimimisloogika on teine.[8]



Joonis 3.3. Võrguühendusega salvestiga süsteemi skeem

Kuna liitumine elektritootjana on keeruline ja mõningatel juhtudel lausa võimatu või põhjendamatult kallis, on kasutusel ka variant, kus võrguühendusega elamusse ehitatakse välja täismõõduline *off-grid* energiasüsteem ja võrguelektrit kasutatakse vaid siis, kui omatoodetud elektrist väheks jääb. Sellist süsteemi nimetatakse hübriidsüsteemiks ja see on

kombinatsioon *off-grid* ja *on-grid* süsteemist. Sellist süsteemi saab kasutada ka halva kvaliteediga võrguühenduse korral. Kvaliteetse energia tagab inverter. Võrguelektrit kasutatakse vaid akude laadimiseks. [8]

Kuna selliste alternatiivenergiasüsteemide väljaehitamine on kulukas ja tasuvus kaheldav, siis on vaja enne seadmete soetamist teha põhjalik uuring, ning võimalusel projekt. Sageli hakatakse oma energiasüsteemi planeerima põhjusel, et elektrivõrguga liitumine pikema vahemaa tõttu ampripõhisest liitumistasust väljas on suhteliselt kallis või liitumine lausa võimatu. Tuleb teha selgeks, milleks on alternatiivenergiasüsteemi vaja ja arvutada välja, kui suur on majapidamise aastane elektritarbimine. Milline on aastaringne keskmine tuulekiirus ja päikeseenergia hulk. Millised on majanduslikud võimalused ja seadmete hinnad ning hoolduskulud.

Kõige lihtsam on kogutud andmed sisestada simulatsiooniprogrammi, mis teeb vastavad arvutused süsteemi tasuvuse ja toodetava energiahulga kohta.

Üheks selliseks simulatsiooniprogrammiks on *HOMER Legacy*. HOMER´i prooviprogramm on kasutajale tasuta ja võimaldab sisestada andmeid kodutarbimise ning ilmastiku ressursside kohta. Analüüsib erinevaid energiatootmissüsteeme ja annab veateateid, kui süsteem ei saa toimida või vajab täiendamist. Süsteemist lähemalt peatükkides 4 ja 5.

3.2. Energiaallikad

Tuule- ja päikeseenergia on oma populaarsuselt suurimad, mille põhjuseks on ressursside kättesaadavus.

3.2.1. Päikesepaneelid

PV (*photovoltaic*)- paneelide tööpõhimõte seisneb pooljuhtide fotoelektriliste omaduste kasutamises, muundades päikeseenergia elektrienergiaks. PV-paneelid on töökindlamaid taastuvenergia allikaid, kuna neil puuduvad liikuvad osad. Nende hooldekulud on väikesed. PV-paneelid kujutavad endast omavahel ühendatud PV-elemente (*cells*), mis on asetatud ühe metallraami sisse ja kaetud peegeldust vähendava pinnatöötlusega klaasiga. Seetõttu peab eriti

talvel nende puhastamisel ettevaatlik olema. Klaasi purunemisel satub niiskus elementide vahele ja rikub elektrilised ühendused. On olemas ka ilma raamita seeriaid, mida saab kasutada vastavalt paneeli kasutusotstarbele katuse- või fassaadilahendustes. [8]

Joonis 3.4. Päikesepaneelid ja nende kinnitamine [38] [39]

Suurem osa PV-materjalist on räni, kas amorfne (*a-Si*), polü(multi)kristall (*poly(mc)-Si*) või monokristalliline räni (*c-Si*). Sellest tulenevalt on turul eri liiki elektrienergiat tootvaid päikesepaneele: mono-, multi- ja polükristallilised PV-paneelid. [8]

Omaette rühma moodustavad sadestatud kilega päikesepaneelid, mille puhul on kasutatud eri tehnoloogiaid (*DdTe*, *CIGS*, *DSC*, orgaanilised ja amorfse räni baasil). Need paneelid on väiksema kasuteguriga, kuid odavamad. [8]

Räni tüübist sõltub päikesepaneeli hind ja efektiivsus: *thin film* on odavam, kuid väheefektiivsem. Kristallilisest ränist päikesepaneelide kasutegur on suurem, aga räni puhastusprotsessist tulenevalt kallim. [8]

Üks päikesepaneele iseloomustavaid suurusi on efektiivsus, mis näitab, mitu protsenti paneelidele langevast päikeseenergiast muutub elektrienergiaks. Tuleb eristada elemendi ja paneeli efektiivsust. Elementide efektiivsus on 13-20 protsenti. Kasutajat huvitab rohkem paneeli efektiivsus, mis on mõnevõrra väiksem, kuna kogu paneeli pind ei ole elementidega kaetud, lisanduvad valguskaod klaasis, elektrilised kaod laminaadisiseses vooluringis ja dioodides. Mida efektiivsem paneel, seda väiksema pinna peab katma vajaliku energiakoguse saamiseks. [8]

Elektrienergiat tootvate päikesepaneelide eriliigid on järgmised:

- Monokristallilised päikesepaneelid on kõige efektiivsemad, kuid tootmise teeb kulukaks paneelis kasutatud suurte kristallidena toodetud räni. Hiljem lõigatakse kristallid väiksemateks tükkideks, millest valmib üks element (*cell*). Metallribadest elektrijuhid laotatakse üle elemendi, et püüda elemendist vabanevaid elektrone. Selliste paneelide efektiivsus jääb vahemikku 11-18 protsenti.

- Polükristallilised päikesepaneelid on väiksema kasuteguriga, kuid veidi odavamad. Polükristallilistes päikesepaneelides kasutatakse suurt hulka väikeseid ränikristalle sisaldavaid elemente. Polükristallilise paneeli kasutegur on umbes 15 %. [8]

Viimasel ajal on erinevus polü- ja monokristalliliste paneelide hinnas ja kasuteguris vähenenud ning üht teisele eelistada pole võimalik – kõik sõltub konkreetsest paneelist. [8]

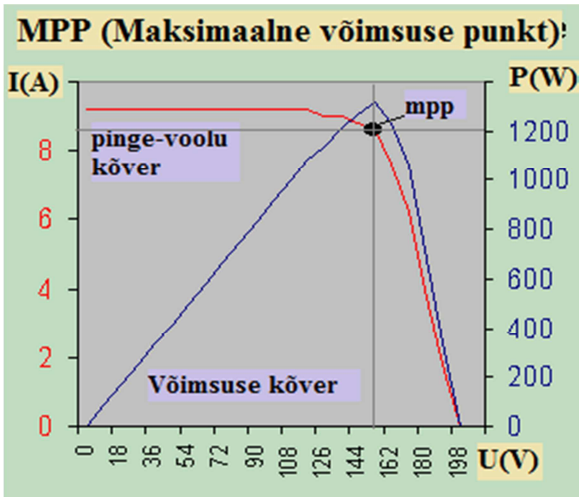
Amorfse kilega päikesepaneele toodetakse kristallilistest paneelidest erinevalt. Neil pole kristallilist struktuuri ning kile kantakse otse erinevatele materjalidele. Amorfse kile peamised eelised on madal tootmiskulu ja kasutamise mitmekülgsus. Kilepaneelide suur puudus on nende kasutegur, mis praegu saada olevate päikesepaneelide hulgas jääb vahemikku 3-11 protsenti. *Thin film* paneelide puhul on võimsusühiku hind madalaim ja neid kasutatakse päikeseenergiaküllaste piirkondade suurtes päikeseelektrijaamades suurtel pindadel. [8]

Majapidamises kasutatavate päikesepaneelide võimsus jääb vahemikku 20-260 W. Suuremate võimsuste saamiseks moodustatakse mitmest päikesepaneelist päikesepatarei jada. Paneeli olulisemad andmed on võimsus, pinge ja väljastatav voolutugevus.

Päikesepaneeli elektrilisi parameetreid iseloomustatakse voltamper karakteristiku ehk I-V kõvera kaudu. Päikesepaneeli tehnilistes andmetes on näha mitme parameetri puhul lisatähist *mpp* (*maximum power point*). *Mpp* on maksimaalne punkt I-V (voolu-pinge) kõveras, kus kõvera ühes otsas on lühis (I) ja teises otsas avatud ahel (U). Praktikas näeks see välja nii, et kui me päikesepaneeli avatud ahelale hakkame sujuvalt rakendama koormust ja samal ajal mõõdame pinget ja voolu, siis *mpp* on punkt, kus I x V on maksimaalne P. Näiteks 36 päikesepatarei elemendiga mono- ja polükristall päikesepaneelidel on *mpp* vahemikus 15-18

V. Mida madalam on paneelide temperatuur, seda kõrgem on pinge U, ja mida suurem on päikesekiirgus, seda suurem on vool I (joonis 3.5). [8]

Päikesepaneeli *mpp* punkti oskab määrata *MPPT* kontroller (*Maximum power point tracker*).



Joonis 3.5. Päikesepaneeli voltamper karakteristik

Paneelide valikul on veel kaks kriteeriumi:

- Võimsus ruutmeetri kohta (W/m^2) näitab, mitu vatti energiat üks m^2 paneeli pinda toodab. Üldiselt jäävad need väärtused 100-150 W/m^2 vahele. Suurematel ja monokristallilistel paneelidel on erivõisus parem.
- Ühe vati maksumus ehk mitu eurot tuleb ühe W päikeseelektri eest maksta. Kohalikus kaubanduses jäävad hinnad vahemikku 1,2 – 2 eurot/W. [8]

Kõige lihtsam on kinnitada paneelid hoone lõunapoolsele viilkatusele. Eestis on optimaalne aasta lõikes maksimaalse energiakoguse andev paneelide paigaldusnurk maapinna suhtes 40 kraadi. Kui soovitakse süsteemi efektiivsust tõsta, on võimalusel mõistlik muuta nende nurka, suvekuudel on soovitav nurk 30-40 kraadi. Talvekuudel, novembrist veebruarini on mõistlik tõsta paneeli 90-kraadise nurga alla (tootlikus suureneb u 7 protsenti). [8]

Suurendamaks PV-paneelide võimsust, on võimalik kasutada päikese jälgimisseadet (Solar Tracker), mis liigutab moodulit vastavalt päikese liikumisele. Jälgijad jagatakse ühe- ja

kaheteljelisteks, neist viimased jälgivad päikese teekonda täpsemalt ja suurendavad paneelide aastast tootlikkust meie laiuskraadil kuni 40 protsenti, tootlikkuse tõus on aasta lõikes erinev. Samas on jälgijate hinnad seoses PV-paneelide hindade langemisega jõudnud samasse suurusjärku. Selle asemel, et kasutada *trackarit*, on lisaenergia saamiseks lihtsam lisada paneele, kusjuures nii tõuseb oluliselt süsteemi töökindlus, kuna puuduvad liikuvad osad.[8]

3.2.2. Tuulikud

Tuulikud jagunevad mehaanilise konstruktsiooni järgi kaheks:

- Horisontaalvõllil paiknevate tiivikutega ehk klassikaline (*HAWT – Horisontal Axis Wind Turbine*) (joonis 3.6)
- Vertikaalvõlliga nn. rootortuulik (*VAWT – Vertical Axis Wind Turbine*) (joonis 3.6).

Horisontaalvõlliga tuulikud jaotatakse tuulde pööramise järgi veel:

- Allatuult – generaator eespool
- Vastutuult – tiivik eespool
- Passiivsed – tuulde pööramine toimub tuule jõul
- Aktiivsed – tuulde pööratakse juhitava ajamiga [8]

Lihtsam lahendus töötab tuulelipu põhimõttel – sabaosa stabilisaator hoiab tuuliku tiiviku tuules ja piisava tuulekiiruse juures hakkab tiivik pöörlema. Aktiivse tuulde pööramisega elektroonilise tuuleotsingu süsteemiga tuulikud (alates 3 kW) tagavad töötamisel stabiilsema käigu ja seega suurema toodetava energiahulga. Rootortuuliku puhul on tegemist veelgi lihtsama lahendusega – tööorgan on avatud ükskõik millises suunas puhuvale tuulele ja tööle hakkavad nad piisava tuuletugevuse puhul. Samas ei võimalda selline konstruktsioon neid tuulest välja keerata, nõudes tugevamat konstruktsiooni ja pidureid. [8]

Joonis 3.6. Horisontaalne ja vertikaalne tuulik [40] [36]

Tuulikutel kasutatakse peamiselt vahelduvvoolu tootvaid generaatoreid. Väiketuulikute puhul tavaliselt otse tuulikust tulevat voolu ei kasutata - pinge kõigub väga suures ulatuses. Et seda stabiilsena hoida, on lihtsaima lahendusena enne tarbijat ühendatud kontroller, millel on kaks ülesannet: piirata tugeva tuule korral tuuliku pöördeid ja kontrollida tarbimisse mineva pinge ning voolu parameetreid. Päikesepaneelidele mõeldud kontrollerid tuulikutele ei sobi, sest neil puudub võimalus energia ületootmise korral tuulikut pidurdada. Väiksemate tuulikute (kuni 1 kW) kontrollerid väljastavad tavaliselt akupanga laadimiseks vajalikku 12, 24 või 48 VDC pinget, suurematel tuulikutel võivad olla eraldi seadmed tuuliku juhtimiseks (pidurdamine, pööramine, avariiseiskamine), ning inverterid, mis toodavad võrguga ühilduvat 230 VAC pinget. Viimasel ajal on sarnaselt PV MPPT kontrolleritele saadaval ka tuulikutele mõeldud MPPT kontrollerid, mis võimaldavad tuulikul töötada parimas režiimis ja lubavad kuni 30 protsenti suuremat tootlikkust, võrreldes tavaliste kontrolleritega. [8] [24]

Kuna tuulikule antav tuuleenergia on tuulekiirusest kuupsõltuv ehk lihtsamalt öeldes on suure, üle 20 m/s tuule kiiruse korral tegemist tuuliku nominaalvõimsusest oluliselt suuremate võimsustega, tuleb tuulikuid purunemise ning akude ülelaadimise vältimiseks pidurdada. Tuulikute võimsuse (ja pöörete) piiramiseks on mitu lahendust. Kõige lihtsam on see, kui kontroller lisab pinge tõustes tuulikule lisakoormuse ehk *dump load´i*, mis tarvitab osa tuuliku toodetud võimsusest ja langetab pinget. Täiuslikematel mudelitel toimub lisakoormuse lisamine PWM modulatsiooniga. Mõnda liiki tuulikute konstruktsioon, kus tuuliku võlli telg on masti telje suhtes nihutatud, võimaldab neil tugeva tuule korral tuulest välja pöörata.

Suurematel, alates 3 kW, võidakse kasutada ka tiiviku labade pööramist ümber oma telje, muutmaks labade seadenurka. [8] [24]

Kui tuul on heitlik, on ebaühtlane ka energia tootmine. Sõltumatute süsteemide puhul on lahenduseks energia salvestamine akupatareides ja hilisem või samaaegne kasutamine alalisvoolu tarbijates, soovi korral saab inverteri abil selle muuta tavaliselt nn valgustusvooluks 230 V, 50 Hz. Energiat on võimalik salvestada akumulatsioonipaagis sooja veena. Võrguühendusega süsteemide puhul toodetakse energia ülejääk võrku ning kasutatakse võrgu virtuaalse energiasalvestina. [8]

Sõltumatusse süsteemi tuuliku soetamist võib kaaluda siis, kui võrguühenduse loomine ei ole võimalik või on liiga kulukas ja majapidamist kasutatakse ka sügisel ja talvel. Kõige tasuvam on tuulik piirkondades, kus aasta keskmine tuulekiirus on üle 5 m/s. Majapidamisse valitava tuuliku võimsus sõltub sellest, kui suur on energiavajadus ja kui palju tuuliku asukohas tuult on. Energiavajadust pole raske hinnata – see sõltub elektriseadmete (kodumasinate) energiatarbimisest ja kasutamissagedusest. [24]

Tuuliku püstitamisel on oluline tuuliku mast, mis võib maksta üle poole tuuliku hinnast. Põhimõtteliselt võib mastid jagada kaheks: vabalt seisvateks ja vantide abil püsti seisvateks mastideks. Kõige lihtsam ja odavam on vantidel seisev torumast. Kuid selline mast nõuab suurt vaba pinda. Vabalt seisvate mastide valik on lai, alates lihtsast puitpostist kuni keerukate hüdrauliliselt langetavate mastideni.[8] [24]

Suuremate, üle 5 kW tuulikute mastide püstitamine võib olla tõsine probleem juhul, kui kraanaga ligipääs on raskendatud või võimatu, samuti üksikud metsatalud, kus metsade keskel olev mast peaks olema suhteliselt kõrgel (30 – 40 m).

Kõik tootjad annavad oma tuulikute kohta võimsuskarakteristiku andmed (ingl k *power curve*). Kui suur on teatud tuulekiiruse juures võimsus. Seda ei tasu väga tõsiselt võtta, sest selle koostamiseks puuduvad üldkasutatavad ühised standardid ja tootjad soovivad oma tuulikuid ikka paremast küljest näidata. Paljud tootjad lisavad tarbijaile rohkem huvi pakkuva info oma seadmete energiatootlikkuse, mitte võimsuse kohta. Kui on teada, milline on tuuliku asukohas aasta keskmine tuulekiirus, saab arvutada, kui palju tuulikust energiat saab.

Ligikaudseid andmeid tuule kohta saab lähimast ilmajaamast, oluliselt täpsema tulemuseaga oma ilmajaama kasutades. [8]

Tuule võimsuse arvutamisel võetakse tuulekiirus astmel kolm (V^3). Sellest järeldub, et nõrga tuulega (1 – 3 m/s) on generaatori võimsus väga väike. Nõrga tuulega ei saavuta tuulegeneraator ka akude laadimiseks vajalikku pinget ning seega võrdub tootlikkus nulliga. Kõige parem on, kui tuulegeneraator alustab pöörlemist alates tuulekiirusest 3 – 3,5 m/s, nii ei kulutata rootori laagreid kasutult. [8]

Tiiviku labade arv ei muuda otseselt tuulegeneraatori võimsust, toimides pigem käigukastina – mida rohkem labasid, seda suurem jõud ja väiksem pöörlemiskiirus. Väikese tuulekiirusega paikades võib paremat tootlikkust saavutada viie ja enama labaga tiivik. Optimaalsed on kolme labaga tiivikud nii väikese kui ka suurte tuulegeneraatorite puhul. Kui tiivik on generaatori suhtes väikese pindalaga, jääk tootlikkus madalaks. Kui tiiviku pindala on liiga suur, siis ei suuda lihtsama ehitusega generaator tormituulega tiivikut ballastkoormuse abil piisavalt pidurdada ja generaator võib puruneda. [8]

Tuulegeneraatori võimsuse arvutamiseks erinevatel tuulekiirustel saab kasutada järgnevat valemit:

$$P = \tfrac{1}{2}\, p \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \qquad (3.1)$$

kus P – tuulegeneraatori võimsus vattides W

p – õhu tihedus normaaltingimustes (p= 1.226 kg/m^3)

A – tiiviku pindala m^2

V – tuule kiirus m/s

C_p – kasutegur.

Kasutegur C_p väärtus on piiratud *Betzi* limiidiga, mis on 59% (C_p= 0,59). *Betzi* seadus tõestab, et teoreetiliselt on kuni 59 % tuuleenergiast võimalik muundada kasulikuks pöörlemiseks. Praktikas tuleb arvestada igasuguste muude kaasnevate kadudega: labade aerodünaamikast tulenevad kaod, elektritootmise kaod, turbulents. [8]

Teades piirkonna aastast keskmist tuulekiirust, ei saa kasutada valemit (3.1) aastase toodangu arvutamisel, sest sel juhul ei arvestata tuule sagedusjaotusega. Tulemuseks saaks tegelikkusest oluliselt väiksema aastase toodangu. Õige oleks arvutada aastast toodangut peamistel tuulekiirustel (3-15 m/s) eraldi, korrutades see ajaga, mitu tundi aastas on vastavat tuulekiirust esinenud, ja saadud tulemused summeerida. [8]

Kui puuduvad tuulekiiruste esinemise ajalised andmed aasta lõikes, on võimalik ligikaudsete arvutuste tegemiseks kasutada *Rayleigh´*i jaotust, mis on kaheparameetrilise *Weibulli* jaotuse erijuhtum. Kogu Põhja-Euroopa ulatuses on tuultele avatud kohtades *Rayleigh´*i jaotuse keskmiseks väärtuseks 2 (Eestis rannikul ja saartel 2,1 mandril 1,9). [8]

Tuulegeneraatori aastase toodangu arvutamise valem, arvestades *Rayleigh´*i jaotust, on järgnev:

$$Wh_{aastas} = \tfrac{1}{2}\, p \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot 8760 \cdot \text{Rayleigh´i jaotise väärtus} \qquad (3.2)$$

kus $\tfrac{1}{2}\, p$ – õhu tihedus 1,226 kg/m^3/2= 0,613
A – tiiviku pindala ehk 3,14 (tiiviku diameeter/2)^2
V^3 – piirkonna keskmine tuule kiirus kuubis
C_p – tuulegeneraatori kasutegur
8760 on tundide arv aastas [8]

3.3. Tarkvõrk

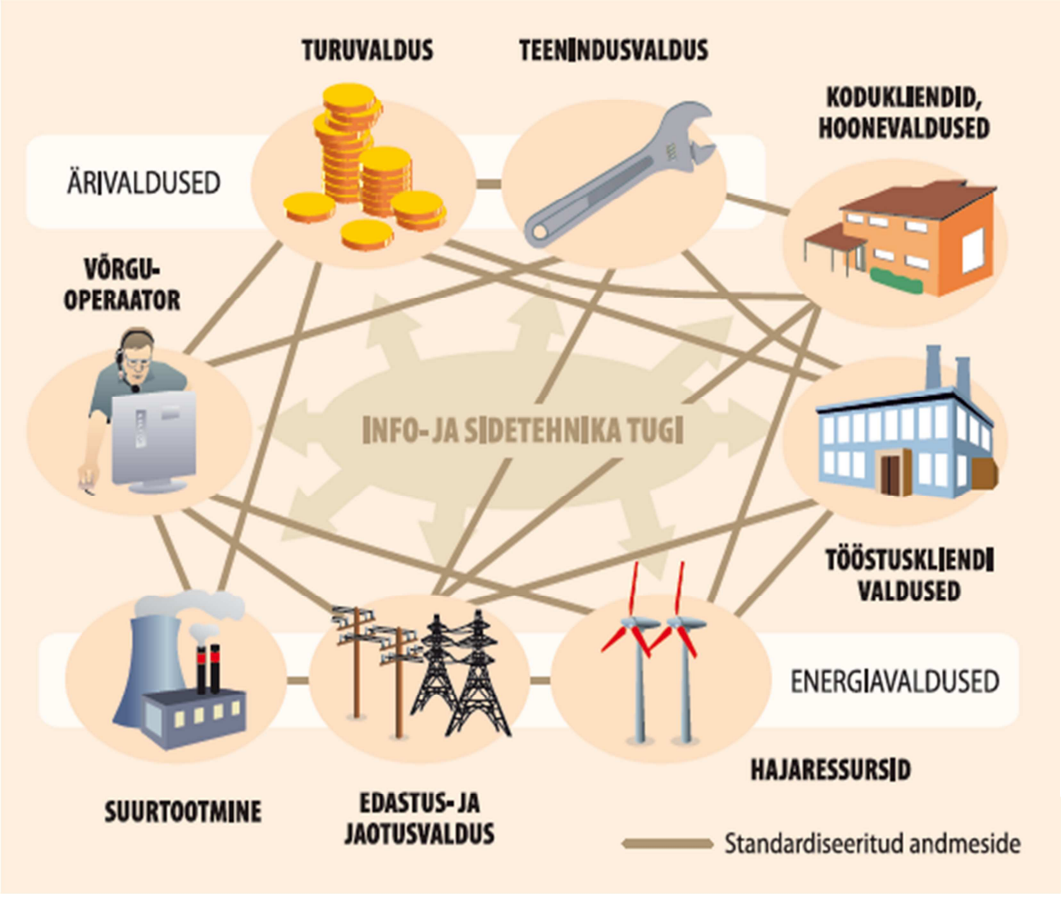
Tarkvõrk (inglise *smart grid*) on elektrivõrk, mis kasutab moodsat tarkvara ja sidetehnikat tarkvõrgus olevate osalejate vaheliseks teabevahetuseks.

Tarkvõrgus osalejad võivad olla elektritootjad, -edastajad, -arveldajad, -tarbijad ja seadmeteenindajad. Osalejad seotakse elektri- ja andmesidevõrgu kaudu ühtsesse süsteemi, tagades nende kõigi vahel kahesuunalise digitaalse andmeside ning kahesuunalise energiavoo. Lihtsustatult mõeldakse elektri tarkvõrgu all elektri tootmise ja jaotamise automaatikasüsteemi. [2]

Tarkvõrgus saab rakendada ulatuslikku energia hajatootmist, optimeerida energiakasutust, vähendada kulusid ning suurendada töökindlust ja energia ostu-müügitehingute läbipaistvust. Kõik see toimub eeldusel, et massiline infotehnoloogia rakendamine ei too kaasa täiendavaid riske. [2]

3.3.1. Tarkvõrgu olemus ja mastaabid

Tarkvõrgu olemust võib selgitada põhimõttemudeli alusel (Joonis 3.7). Siinkohal on kirjeldatud *CENELEC´i* standardi järgi koostatud Euroopa tarkvõrgu põhimõttemudelit.



Joonis 3.7. Euroopa tarkvõrgu põhimõttemudel [2]

See näitab ja kirjeldab peamiste huvirühmade ning ettevõtete vastatikust sidusust. Tarkvõrk toimib avatud turu põhimõttel, kus turuosalised saavad digitaalsete andmesidekanalite kaudu infot süsteemi võimsusbilansi järgi kujuneva energiahinna kohta ja kohandavad vastavalt

sellele oma käitumismudelit. Selline huvidest lähtuv käitumine on kasulik kogu süsteemile, stabiliseerides nii energia turuhinda kui ka võimsusbilanssi. [2]

Moodsas ühiskonnas on elekter kasutuses igas tehases, ettevõttes, äri- ja büroohoones, kodu- ja talumajapidamises, seega võib eeldada, et tarkvõrgu mudel haarab kogu meie elutegevust. Jagunedes erinevateks valdusteks nagu elektri tootmine, edastamine, jaotamine, salvestamine, juhtimine, muundamine, teenindamine ja turustamine. Kliendivaldus on jaotatud kolme ossa ja eraldi on välja toodud tööstusklientide ning hajaressursside valdamised, vaadeldes elektri edastus- ja jaotusvõrke ühtse tervikuna (Joonis 3.7). [2]

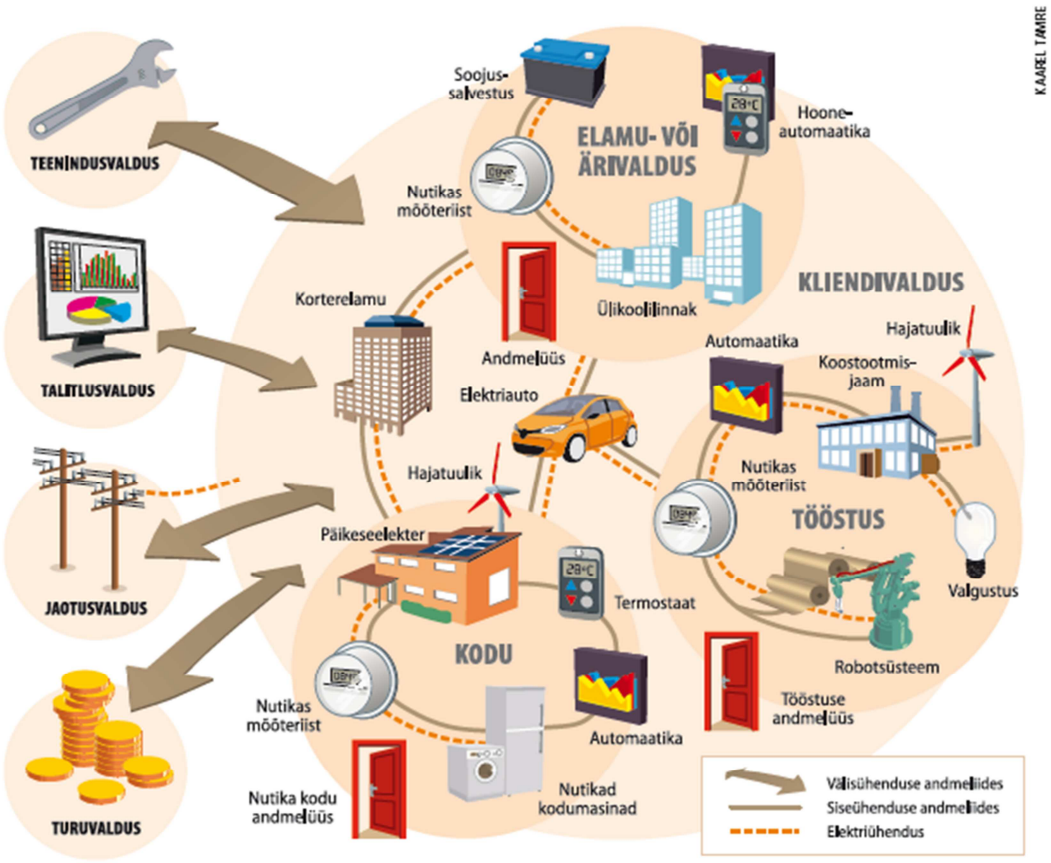
Tarkvõrk võib hõlmata kogu riiki või selle osi, või laiuda üle mitme kontinendi. Koosneda kas üksikust majapidamisest, ettevõttest, külast, mandrist või ükskõik millisest energeetiliselt või geograafiliselt iseseisvast majandusüksusest. Sõltuvalt ulatusest on tarkvõrgul vastavad nimed alates mikrovõrgust kuni supervõrguni välja. [2]

3.3.2. Tarkvõrgu teolised

Tarkvõrgu kõikides valdustes tegutsevad firmad, inimesed kui ka automaadid, kes võtavad vastu otsuseid energia tootmise, tarbimise, energiavoogude reguleerimise, ostu-müügi, teenuste ja paljude muude toimingute kohta. Neid tegutsejaid nimetatakse ühise nimetajaga - teolised. Tarkvõrgu olulisi, eri funktsiooniga teolisi, on kokku ligikaudu 50. Mõned kliendivalduse teolised on näidatud joonisel 3.8.

Arukalt toimivat ja iseseisvalt otsuseid vastu võtvat automaati nimetatakse tänapäeval intelligentseks elektroonikaseadmeks või intelligentseks agendiks. Viimane jälgib pidevalt oma andurite ja andmesidekanalite kaudu keskkonda (näiteks elektrivõrku ja selle tehnilisi näitajaid, nagu pinget, voolu, võimsust jne) ning turuvalduses kujunevat hinda. Intelligentne agent esindab oma valdajat, näiteks majaomanikku, ja tema energiakasutusega seotud soove, mis on vastava programmi näol salvestatud agendi mällu. Keskkonnaolude, näiteks elektri turuhinna muutumisel, võtab agent vastu otsuse energiatarbimise jätkamise, katkestamise või reguleerimise kohta. Seega saab agenti rakendada energiatarbimise ja sellega seotud kulude optimeerimiseks. Intelligentse agendi funktsioonid sõltuvad sellest, missuguse objektiga on see seotud. Agent võib esindada maja- või korteriomanikku, kuuluda võrgust energiat laadiva

elektriauto juurde jne. Seega kuuluvad agendid paljude tarkvõrgu teoliste juurde ja on nende esindajad võrguga suhtlemisel. [2]



Joonis 3.8. Kliendivaldus ja teolised [2]

Moodne kodumajapidamine hõlmab üha enam nutikaid kodumasinaid, mille kasutusaegu ning talitlusviise saab eelnevalt programmeerida. Nende juhtseadmed ehk intelligentsed agendid hakkavad tulevikus arvestama tarkvõrgust saadavaid signaale, mis iseloomustavad nii võrgu lubatavaid piirkoormusi kui ka elektri reaalahinda võrgus. Nii saavad nutikad masinad optimeerida omaniku energiakulusid ja toetada oma tegevusega elektrivõrgu talitlust. [1]

Koduõuele üles seatud elektrituulik või maja katusele paigutatud päikesepaneel võib toota elektrit kohapeal tarbimiseks, salvestamiseks akudesse või elektrivõrku. Viimasel juhul läheb see üldisesse kasutusse ning toodetud elektri eest arveldatakse vastavalt elektrituru hinnale.

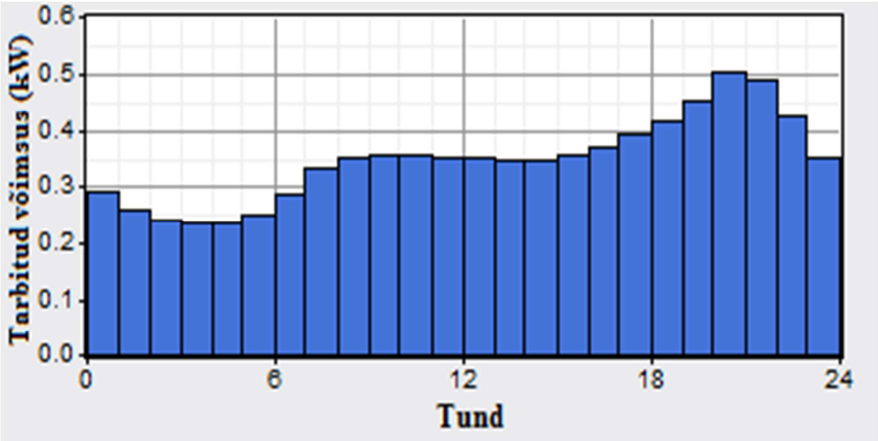
3.3.3. Olulisemad teolised

Kliendivalduse puhul on oluline rääkida elektriküttest, mis hõlmab otseküttesüsteeme, kuhu kuuluvad nii põrandaküttekaablid, elektriradiaatorid, -konvektorid, -kerised, infrapunakiirgurid kui ka elektritoitega soojuspumbad. Kuna hoonete konstruktsioon on küllalt suure soojusmahtuvusega ning vajadusel võib hoonesse lisada spetsiaalselt valmistatud soojussalvesteid, saab elekterküttekoormust kasutada tarkvõrgus paindlikult. Koormus ühendatakse võrku elektritarbimise miinimumi ajal ning lülitatakse tippkoormuse ajaks välja. Energia ja kulutuste optimeerimise nimel tulevad üha enam kasutusse ka soojussalvestitega külmutus- ja kliimaseadmed. [2]

Oluliseks tarkvõrkude komponendiks peetakse veel elektriautot või ka hübriidautot, mis tulevikus peaks üha enam välja vahetama sisepõlemismootoriga auto. Tarkvõrgu seisukohalt tulevad arvesse need elektriautod, mis lülitatakse elektrivõrku perioodiliti. Kuna autode summaarne energiatarbimine moodustab umbes kolmandiku moodsa ühiskonna energia kogutarbimisest, siis oodatakse ka elektriautode suurt mõju tuleviku elektrivarustussüsteemile. 100 000 elektriauto mõju elektrisüsteemile võiks võrrelda 200 megavatise tippkoormus-elektrijaamaga. Umbes nii suur võiks olla ka Eestis igapaevaselt kasutatavate elektriautode arv. Elektriauto abil saaks siluda koormuse lohkusid ja tippusid. Akude laadimine toimuks öösiti, mil elektrivõrgu koormus on väike. Lühiajaliste koormustippude korral võiksid elektriautod töötada ka generaatoritena ning turuhinda alla suruda. Selleks tuleb luua ka elektriauto toimimiseks vajalik infrastruktuur ning energiaarveldus- ja maksesüsteem. [2]

Kõik kliendivaldusesse kuuluvad osavaldused või üksikseadmed ja masinad on varustatud tarkmõõteriistadega, mis mõõdavad nii aktiiv- ja reaktiivvõimsust kui ka summaarset või perioodilist energiatarvet, analüüsivad, prognoosivad või optimeerivad energiatarbimist, andes omanikule energiatarbimise kohta teavet ja soovitusi edaspidiseks toimimiseks. Tarkmõõteriistal on kahepoolne andmesidesüsteem, mis võimaldab saada näiteks perioodiliselt energiahinnainfot ning saata energiamüüjale andmeid tarbitud energia kohta. Info, mida tarkmõõteriistadega kogutakse, on palju mahukam kui seni igakuiselt saadav teave tarbija summaarse energiatarbimise kohta. [2]

Nutika kodu energiamõõteriistade hulka kuuluvad elektri-, gaasi-, soojuse-, veehulga- ja muud tarkmõõteriistad, mis võimaldavad mõõta ning salvestada nii võimsuse kui ka energiatarbe ajadiagramme. Energiasüsteemi tarkmõõteriistad moodustavad koos andmesidesüsteemiga moodsa raalmõõtmiste taristu. Üks võimalik koduse elektritarbimise ööpäevadiagramm on näidatud joonisel 3.9. [2]



Joonis 3.9. Kodune ööpäevane elektritarbimine

Registreeritud on minuti keskmine võimsus. Privaatsuse seisukohalt on oluline teada, et koormusdiagramm annab üsna palju teavet kliendi elutegevuse ja tarbimisharjumuste kohta. Seega annab tarkmõõteriistade kasutamine võimaluse kliendi jälgimiseks ning toob endaga kaasa riske. Need on probleemid, mis vajavad lahendamist koos tarkvõrkude küberturve tagamisega. [2]

3.3.4. Alajaamad ja vahemaad

Elektrivõrkude moderniseerimise üks pakilisemaid ülesandeid on uue aparatuuri ja tarkmõõtesüsteemide rakendamine alajaamades. See puudutab nii edastusvõrgu kui ka jaotusvõrgu alajaamu. Mõõte- ja juhtimisinfo edastamiseks kasutatakse tarkvõrgu standardile IEC 61850 vastavat digitaalset andmesidet. Kuna elektrivõrk laiub väga suurel territooriumil ja vahemaad selle eri osade vahel võivad ulatuda tuhandetesse kilomeetritesse, siis on kiiretoimeliste mõõtmiste korral kriitilised suurused andmeedastuskiirus ja mõõtmiste sünkroonsus. Viimane tagatakse tänu satelliitsidele ja ülitäpsetele aatomikelladele. [2]

Elektri tarkvõrkude puhul võimaldab globaalne positsioneerimissüsteem luua võrkude automaatse geograafilise infosüsteemi (GIS), mis salvestab kõik võrgus toimuvad sündmused koos toimumise asukoha geograafiliste koordinaatidega. Nii muutub oluliselt lihtsamaks ka kliendikutsete või rikete teenindamine. Täna on vaga raske ennustada, missugused on elektrivarustus ja tarkvõrgud paarikümne aasta pärast. Igal juhul on oluline nende arengusse panustatud tarkus ehk intellektuaalne ressurss, mistõttu tarkvõrke võib käsitleda ka energiavaldkonna lähiaastakümnete moodsa tehnoloogia platsdarmina. [2]

4. MIKROVÕRGU OPTIMEERIMISTARKVARA METOODILINE JUHEND

Juhend tutvustab simulatsiooniprogrammi läbi koostatud näite. Esiteks tuleb valida energiasüsteemi mudeli sisendid, mida soovitakse, et programm analüüsiks. Sisestada vajalik informatsioon (parameetrid, kulu, ressursside kättesaadavus, ilmastiku andmed jne.), et programm saaks simuleerida antud süsteemi, koostades nimekirja võimalikest süsteemi mudelitest ja reastab need kulu efektiivsuse järgi järjekorda. Saadud tulemusi saab vaadata ka erinevate graafikute ja tabelitena, mis aitavad võrrelda ning hinnata süsteemide majanduslikke ja tehnilisi väärtusi. Lisaks saab teostada tundlikkuse analüüsi, mis aitab uurida erinevate muutuvate faktorite mõju. Näiteks ressursside saadavust ja majanduslikke mõjusid.

Tegemist on mikroenergia optimeerimisprogrammiga, mis lihtsustab süsteemi hindamist nii võrku kui võrgust lahti ühendatud elektrisüsteemi erinevatele rakendustele. Planeerides energiasüsteemi, tuleb teha mitmeid otsuseid võrgu konfiguratsiooni kohta. Mis komponente on mõttekas kaasata süsteemi. Kui palju ja kui suured ning võimsad peaksid olema komponendid, mida süsteemis kasutatakse.

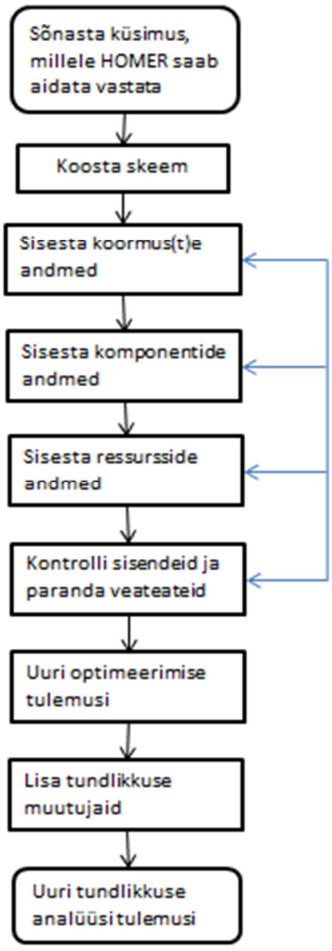
Suur arv erinevaid tehnoloogilisi valikuid ning nende maksumus ja energiaressursside saadavus muudab valiku keeruliseks. Optimeerimise ja tundlikkuse analüüsi algoritmid muudavad paljude energiasüsteemi konfiguratsioonide hindamise lihtsamaks.

Programm simuleerib süsteemi tööd, arvutades energia tootmise ja tarbimise tasakaalu iga tunni kohta aastas, sh arvutab süsteemi kuuluvate seadmete vahelised energiavood. Süsteemide jaoks, mis sisaldavad akusid või kütusega töötavaid generaatoreid, otsustab programm iga tunni kohta, kuidas juhtida generaatoreid ja millal tuleks laadida või tühjendada akusid.

Süsteem sooritab energia bilansi kalkulatsioonid iga süsteemi sätte kohta, mida on soovitud võrrelda, ja otsustab, kas need sätted on võimalikud. Näiteks, kas etteantud sätted tagavad elektri nõudluse tingimustes, mis on ette antud, ning ennustab süsteemi paigaldamis- ja opereerimiskulud projekti eluaja jooksul. Süsteemi kalkulatsioonid sisaldavad kulusid nagu kapitali-, asendus-, opereerimis-, kütuse ja intressikulud. Peale kõigi võimalike süsteemi konfiguratsioonide simuleerimist, võimaldab tarkvara väljastada loendi, mis on järjestatud nüüdisväärtuse kulu järgi (*NPC – Net Present Cost või Lifecycle cost*), mille abil saab võrrelda süsteemi ülesehituse valikuid. [28]

4.1. Programmi kirjeldus ja tööpõhimõte

Näite illustreerimiseks on see esitatud plokkskeemina (joonis 4.1), kus iga tehtav samm on eraldi välja toodud.



Joonis 4.1. Simulatsiooniprogrammi lahenduskäigu plokkskeem

4.1.1. Ülesande püstitus

Esimese sammuna tuleb sõnastada küsimus, millele programmi abil vastust otsitakse. Programm suudab leida vastused paljudele tehnilistele ja majanduslikele küsimustele, sh nendele, mis puudutavad energiasüsteemide disaini.

Näited küsimustest, millele programm saab vastata:

- Kas on tasuv lisada süsteemis olevale diiselgeneraatorile tuulikut?
- Kui palju peaks diiselkütuse hind tõusma, et päikesepatareid tasuksid end ära?
- Kas valitud disain peab vastu kasvavale elektrinõudlusele?
- Kas on tasuv paigaldada mikroturbiini, et toota elektrit ja soojust võrku ühendatud hoonele?

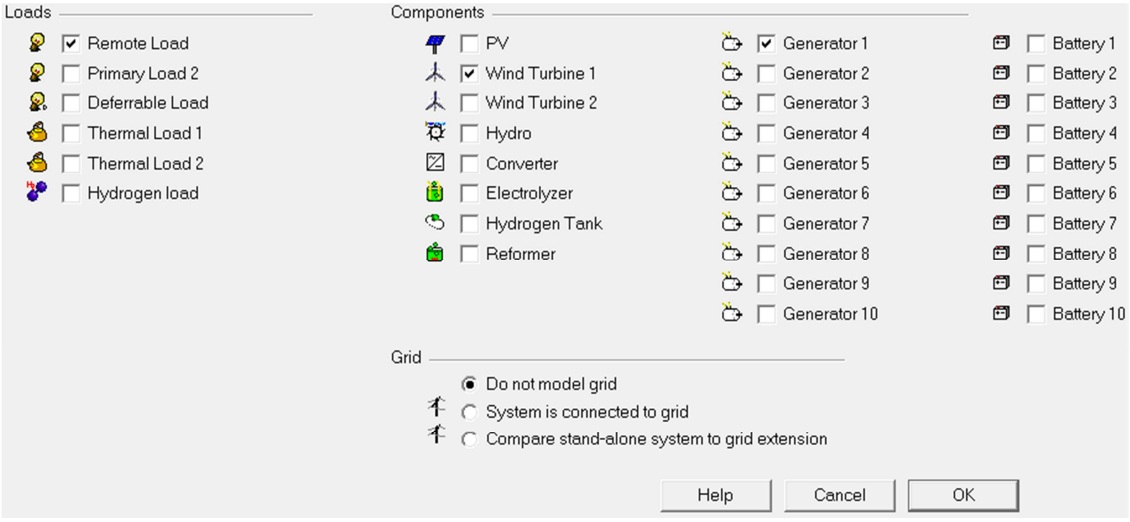
Kui diiselgeneraator toidab väikseid koormuseid kauges piirkonnas ja tahetakse kasutada simuleerimisprogrammi, et teada saada, kas on mõistlik lisada sellisele süsteemile tuulik. Siis küsimus, mida tuleb esitada, et saada programmilt vastust on: „Kuidas mõjutavad muutused keskmises tuule kiiruses ja kütuse hinnas tuule generaatorite lisamise võimalustele, ainult diisli süsteemi?“. [28]

4.1.2. Skeemi koostamine

Teine oluline samm on skeemi koostamine. Skeemi koostamine on oluline etapp töös, kuna peab kujutama endast kõiki tehnoloogilisi valikuid, mida soovitakse programmi abil analüüsida. Seega algne skeem võib sisaldada komponente, mis ei ole optimeeritud.

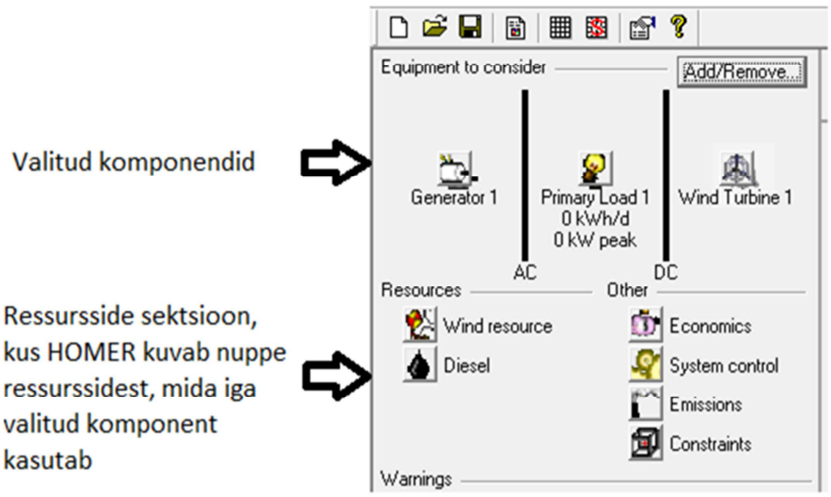
Vaadeldavas näiteülesandes optimeerib programm süsteemi, mis sisaldab tuuleturbiinide ja diiselgeneraatorite kombinatsiooni. Esitatud näite puhul kasutatakse peamiselt programmi pakutavaid algandmeid. Õigete tulemuste saamiseks tuleb igal konkreetsel juhul kasutada täpseid objekti asukohale ja iseärasustele vastavaid andmeid. Näiteks tuuliku kasutamisel tuule suunda, kiirust jne.

Järgnevalt on välja toodud, kuidas lisada erinevaid komponente tööskeemile. Selleks tuleb tööakna vasakus servas oleval väljal „*equipment to consider*“ vajutada *Add/Remove* nuppu (joonis 4.3), et valida komponente, mida soovitakse skeemi analüüsimiseks lisada. Nupule vajutusega avaneb komponentide valiku aken kus iga komponendi valikut saab kinnitada *OK* nupule vajutades (joonis 4.2).



Joonis 4.2. Komponentide nimistu

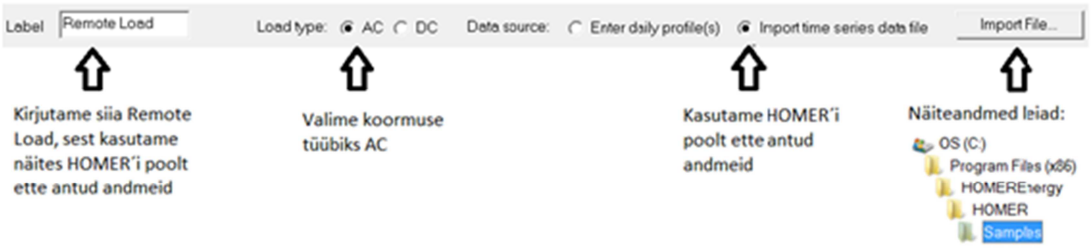
Tehtud valikud kajastuvad tööaknas alltoodud joonisel esitatud väljal.



Joonis 4.3. Sisendite ja ressursside tööskeem

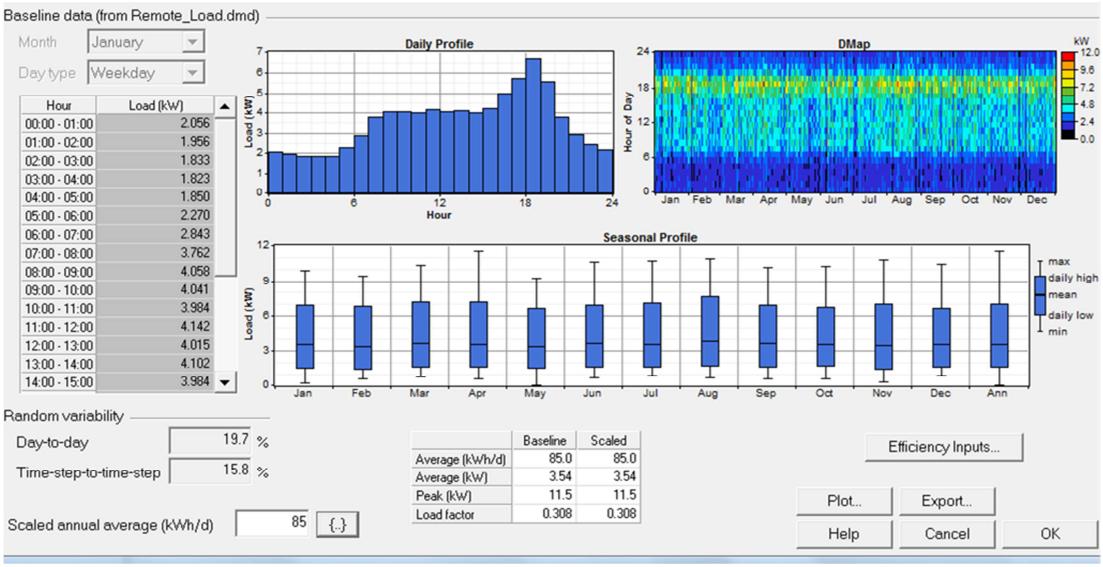
4.1.3. Koormus(t)e andmete sisestamine

Kolmas oluline samm optimeerimisülesande lahendamisel on koormuse andmete sisestamine ja olemasolevate näiteandmete kasutamine. Näiteandmete sisestamiseks tuleb vajutada komponentide aknas *Primary Load 1* ikoonile ning valida näitekoormusfail (joonis 4.4), mis kirjeldab elektrilist nõudlust, mida uuritav süsteem peab pakkuma.



Joonis 4.4. Näitekoormuste andmete sisestamine

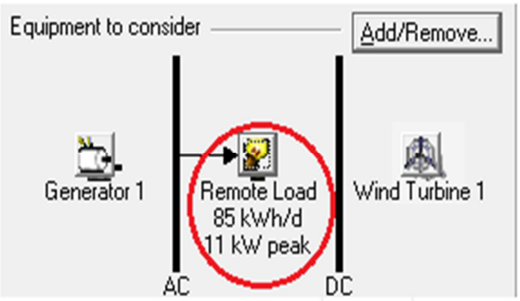
Programm väljastab sisestatud andmete põhjal erinevaid tabeleid ja graafikuid, mis kirjeldavad energia tasakaalu ühe ööpäeva kohta (*Daily Profile*), kuude lõikes terve aasta kohta (*Sessional Profile*) ja iga tunni kohta aastas (*DMap*) (joonis 4.5). [28]



Joonis 4.5. Majapidamise koormusgraafikud

Kui koormusandmed on sisestatud kas aegrea kujul või muul võimalikul viisil, siis saab valikuid *OK*-nupule vajutades kinnitada ning naasta tööaknasse. Komponentide aknas on näha muudatus (joonis 4.6), mis väljendub koormuse suunalise noole tekkimises AC lati ja

koormuse vahel. Noole suund näitab ka energiavoo suunda. Samuti on skeemil ära märgitud „*Remote Load*“, mille sai sisestada eelmises punktis.

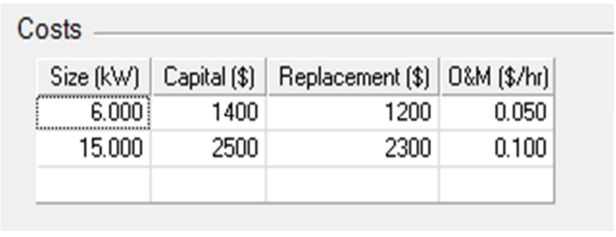


Joonis 4.6. Sisendite tööskeem

4.1.4. Energiaallikate ja -salvestite andmete sisestamine

Komponentide (energiaallikate ja –salvestite) seadistamisakendes defineeritavad andmed kirjeldavad tehnoloogilisi valikuid, komponentide hindu, suurust ja arvu, mida programm simulatsioonis kasutab. Järgnevalt on kirjeldatud, kuidas sisestada kuluinfot diiselgeneraatoritele ja tuuleturbiinidele.

Vajutades komponentide aknas ikoonile „*Generator* 1“, saab sisestada generaatori andmed (joonis 4.7). Näidiseks on valitud kaks generaatorit suurustega 6 kW ja 15 kW. Hinnad vastavalt 1200 dollarit ja 2300 dollarit. Sellele on lisatud ka eeldatav summa, mis läheb generaatorite paigaldamiseks. Generaatorite asendamine uuega (*Replacement*) on tõenäoliselt odavam. Lõpuks tuleb lisada opereerimis- ja hoolduskulud (*O&M*), mis ei sisalda generaatori töötamiseks vajamineva kütte kulusid, sest need kalkuleeritakse eraldi (pt. 4.1.5).

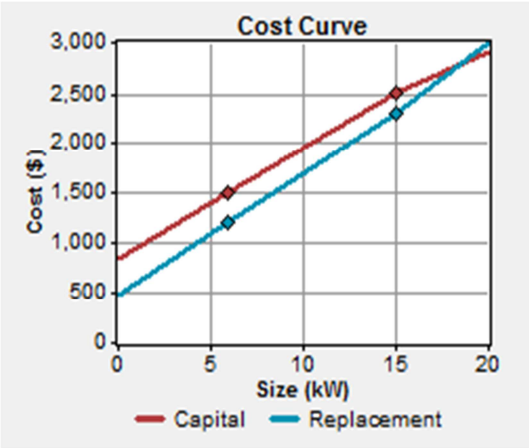

Costs

Size (kW)	Capital ($)	Replacement ($)	O&M ($/hr)
6.000	1400	1200	0.050
15.000	2500	2300	0.100

Joonis 4.7. Generaatori prognoositav kulu

Programm näitab kasutatavaks rahaühikuks dollar, kuid kui sisestada kõik väärtused eurodes, siis ei ole sellel sisulist vahet.

Simuleeritav kulukõver on lineaarne (joonis 4.8), sest programm eeldab, et generaatori kulu ja suurus on lineaarselt seotud. Lisades kulutabelisse rohkem ridu, kus suurem generaator maksab vähem, saad täpsema, mittelineaarset mustrit järgiva kulukõvera.

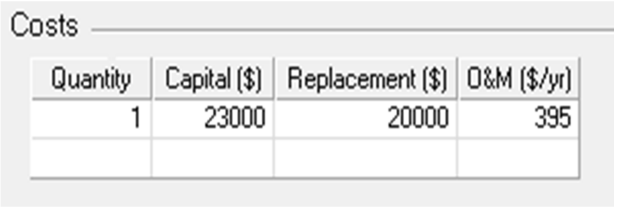


Joonis 4.8. Generaatori kulukõver

Programm kasutab kulutabeli andmeid, et analüüsida, kui palju mõjutab generaatori paigaldamine, opereerimine ja hooldamine kogu energiasüsteemi maksumust. Muudatuste kinnitamiseks ja tööaknasse naasmiseks tuleb vajutada nupule *OK*.

Vajutades komponentide aknas ikoonile *Wind Turbine 1*

saab sisestada tuuliku andmed (joonis 4.9). Edasi tuleb tuulikute nimekirjast valida sobiv tuulik, milleks käesoleval juhul on 7,5 kW tuulik *BWC Excel-R*. Kui nimekirjas ei ole soovitud tuulikut, saab sisestada sobiva tuuliku andmed ise. Järgnevalt tuleb sisestada ka kulutabelisse vajalikud andmed. Andmete sisestamise kinnitamine ja naasmine tööaknasse toimub sarnaselt varasemale *OK* nupule vajutades. [28]


Costs

Quantity	Capital ($)	Replacement ($)	O&M ($/yr)
1	23000	20000	395

Joonis 4.9. Tuuliku prognoositav kulu

4.1.5. Ressursside andmete sisestamine

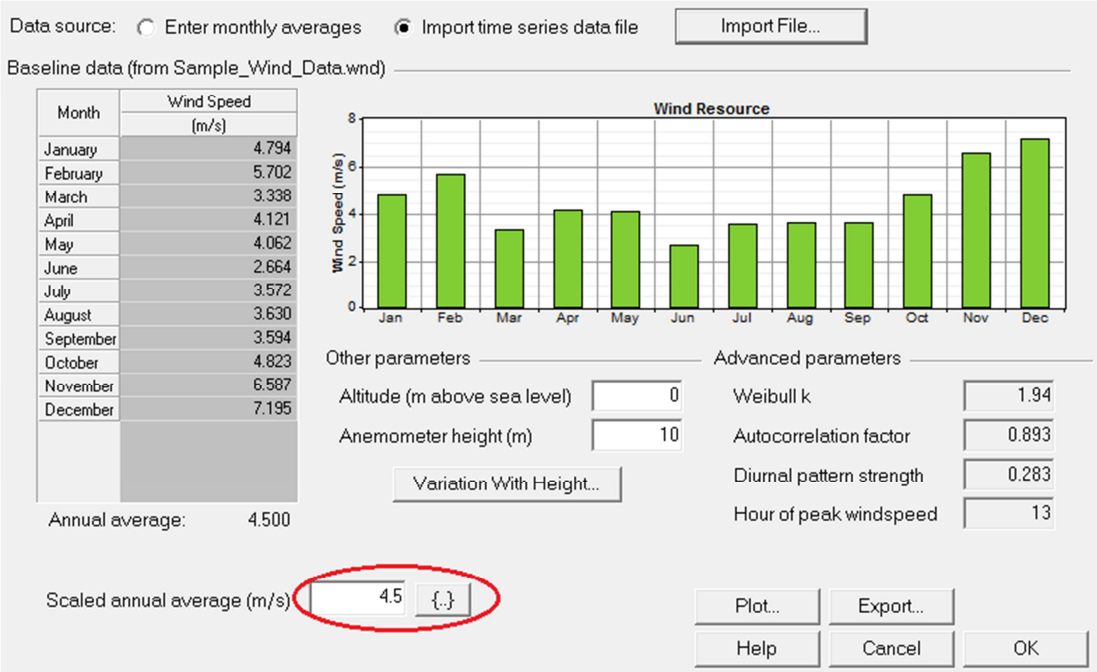
Viies samm optimeerimisülesande lahendamisel on ressursside andmete sisestamine. Näiteks päikesekiirguse, tuule, hüdro(energia) ja kütuse andmed aasta kohta.

Käesolevaga on kirjeldatud, kuidas defineerida ressursside sisendeid tuule ja kütuse kohta. Programm simuleerib etteantud kahte komponenti: tuulikut ja diiselgeneraatorit. Päikese, tuule- ja hüdroressursside kohta saab informatsiooni sisestada otse vastavasse aknasse (kuude keskmised väärtused), või koostada õiges formaadis .wnd fail (andmed iga tunni kohta eraldi).

Vajutades ressursside aknas (joonis 5.3) ikoonile *Wind resource* , saab sisestada tuuliku ressursside andmed. Valides ressursside aknas võimalus *Import time series data file* (joonis 4.10), saab sisestada programmi poolt ette antud tuulekiiruse näitefail.

Joonis 4.10. Tuuleressursside sisestamine

Määrates skaleerimisfaktori (tuulekiiruse keskmine väärtus aastas) tundlikkuse muutuja (joonis 4.11), on võimalik vaadata, mis efekti annavad kõrgemad või madalamad tuulekiirused süsteemi disaini võimalikkusele. Ehk, kas suurema ja väiksema tuulega on võimalik sellist süsteemi koostada.



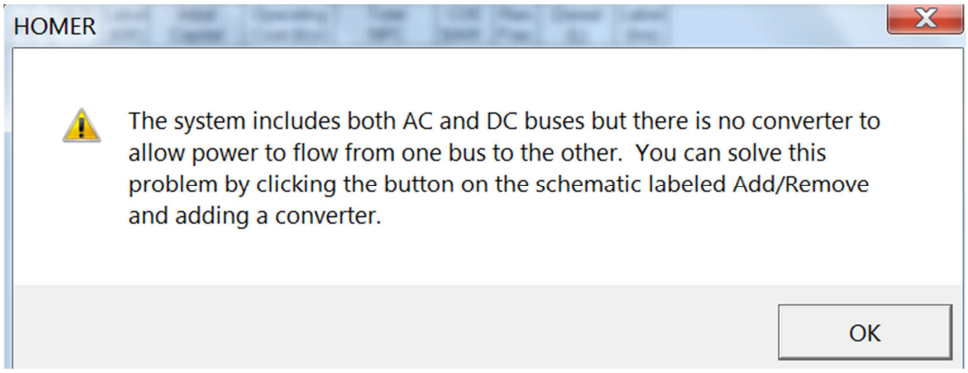
Joonis 4.11. Tuuleenergia ressursside andmed

Järgnevalt tuleb määrata anemomeetri (anemomeeter - mõõteriist, mida kasutatakse tuule kiiruse mõõtmiseks) kõrguseks 30 meetrit, mis tähendab, et tuule kiiruse andmete kogumise kõrguseks on määratud 30 meetrit. Muudatus kinnitatakse nupuga *OK* ja liigutakse edasi ressursside aknas ikoonile *Diesel*. Avaneb aken, kuhu tuleb lisada diiselkütuse hind ja kinnitada tegevus nupuga *OK*. [28]

4.1.6. Tarkvaralised enesekontrolli võimalused ja veateadete analüüs

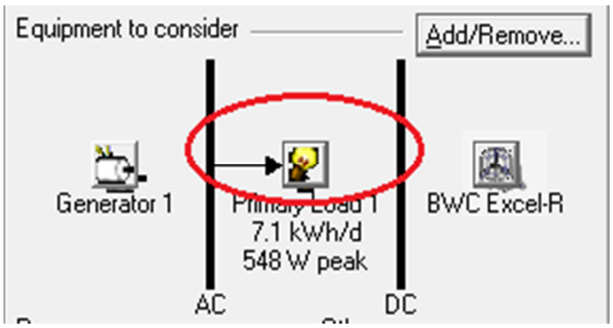
Simulatsiooniprogramm kontrollib mitmeid väärtusi, mis on sisestatud komponentide (*equipment to consider*) ja ressursside (*Resources*) (ehk sisendite) akendesse, et vaadata, kas need on tehniliselt võimalikud. Või hoiatab, kui näiteks ressursside sisendite andmed on jäänud sisestamata. Kui programm märkab, et sisestatud väärtused ei ole võimalikud/reaalsed või puuduvad, kuvab ta veateate tööakna paremasse osasse ressursside sektsiooni alla *Warnings*.

Näiteks kuvab programm veateate, mis soovitab, et süsteemi skeemi hulka peaks kuuluma ka muundur (joonis 4.12). Muundur on seade, mis muudab vahelduvvoolu alalisvooluks (alaldi), alalisvoolu vahelduvvooluks (inverter, vaheldi) või mõlemat. Veateate sisu detailseks kuvamiseks tuleb vajutada ikoonile *Warning* .



Joonis 4.12. Veateade

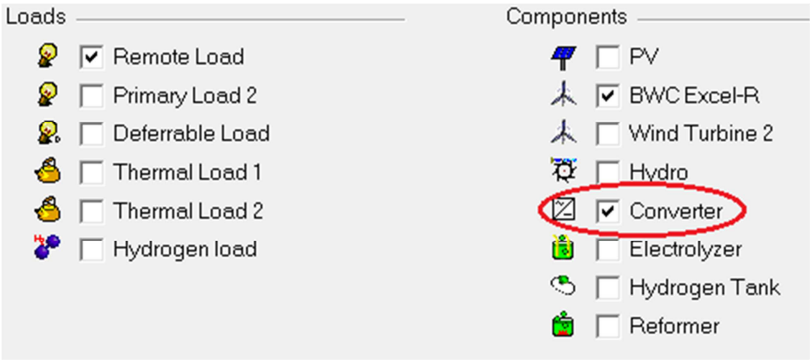
Hoiatused annavad teada, et sisendis võib olla üks või mitu viga. Need probleemid ei pruugi simulatsiooniprogrammi tööd takistada, kuid võivad viidata, et süsteemi skeemis on viga. Vaadeldaval skeemil (joonis 4.13) on näha et alalisvoolu lati ja koormuse vahel ei ole noolt.



Joonis 4.13. Sisendite tööskeem

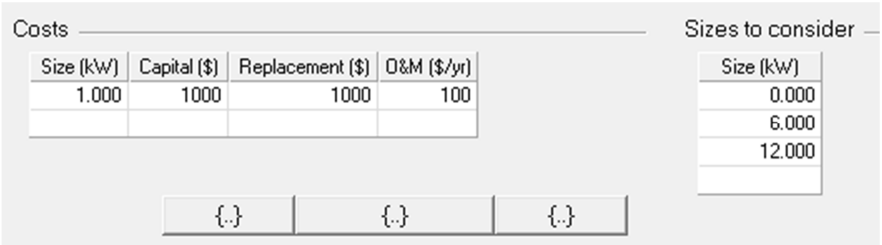
See tähendab, et alalisvoolu latil asuv energiaallikas ei toida vahelduvvoolu latil olevat koormust. Hoiatusteade annab märku, et muunduri lisamine süsteemi parandab selle probleemi. Selleks tuleb avada komponentide aken ja lisada skeemi puuduv muundur (joonis

4.14). Edasi tuleb valitud komponentide töölehel vajutada sinna lisandunud *Converter* ikoonile ja sisestada muunduri andmed (joonis 4.15).



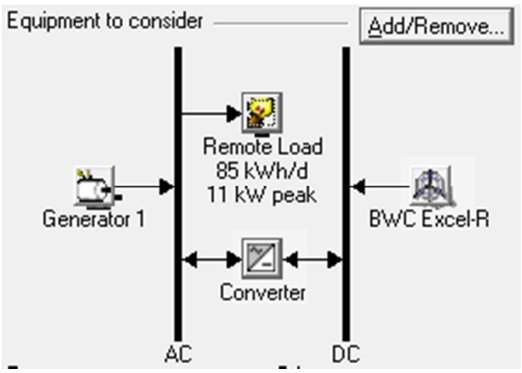
Joonis 4.14. Komponentide nimistu

Näites on muunduri sisendite tabelisse ühe kilovati kohta käivad andmed, ning programm simuleerida süsteemi, mille muunduri parameetrid on suurusega 0 kW, 6 kW ja 12 kW.



Joonis 4.15. Muunduri sisendite andmed

Kuna tarbimise tippkoormus on 11,5 kW (joonis 4.5 *Peak*), võib eeldada, et 12 kW-ne muundur vastab koormusele, kus tuuleturbiin pakub enamuse toitest. Määrates 6 kW-se muunduri, on võimalik vaadata, kas väiksema ja odavama muunduri kasutamine on kuluefektiivne. Peale muudatuste kinnitamist on näha, et alalisvoolu siinil olev tuulik toidab vahelduvvoolu siinil olevat koormust (joonis 4.16).



Joonis 4.16. Sisendite tööskeem

Vajutades menüüst ikoonile *Search Space* on võimalik näha kõiki sisestatud suurusi (tabel 4.1), mida programm peab analüüsima. Analüüsitavaid suurusi on võimalik muuta ka selles tabelis. [28]

Tabel 4.1. Analüüsitavad sisendid

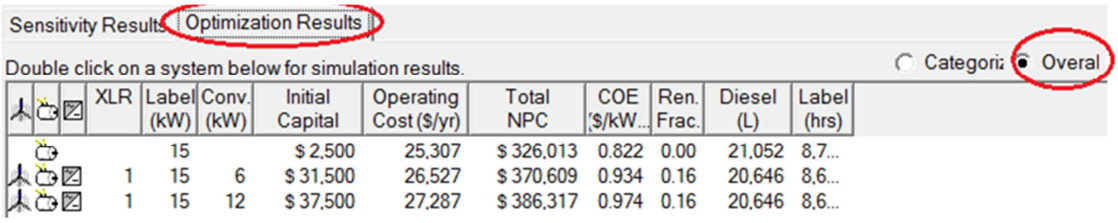
	XLR (Quantity)	Label (kW)	Converter (kW)
1	0	6.00	0.00
2	1	15.00	6.00
3			12.00
4			
5			

4.1.7. Optimeerimistulemuste eelanalüüs

Programm simuleerib süsteemi konfiguratsioone kõigi komponentide kombinatsioonina, mis sisestati komponentide sisenditesse, välistades tulemustest kõik, mis ei ole süsteemi konfiguratsiooniga võimalikud. Ehk need, mis ei vasta täielikult antud koormusele, saadaolevatele ressurssidele või mis piiraks seda, mida oleme ette andnud.

Simulatsiooni käivitamiseks tuleb vajutada ikooni *Calculate* Calculate .

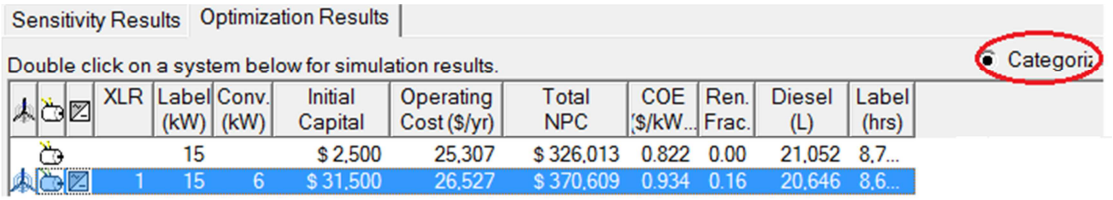
Kui programm on lõpetanud simuleerimise, tuleb valida tabeli ülevalt servast *Optimizatsion Results* ja *Overall* (joonis 4.17), et näha kõiki võimalikke konfiguratsioone. Tulemused on reastatud kulutõhususe (*Total NPC*) järgi.



	XLR	Label (kW)	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kW...	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
		15		$ 2,500	25,307	$ 326,013	0.822	0.00	21,052	8,7...
	1	15	6	$ 31,500	26,527	$ 370,609	0.934	0.16	20,646	8,6...
	1	15	12	$ 37,500	27,287	$ 386,317	0.974	0.16	20,646	8,6...

Joonis 4.17. Optimeerimise tulemused

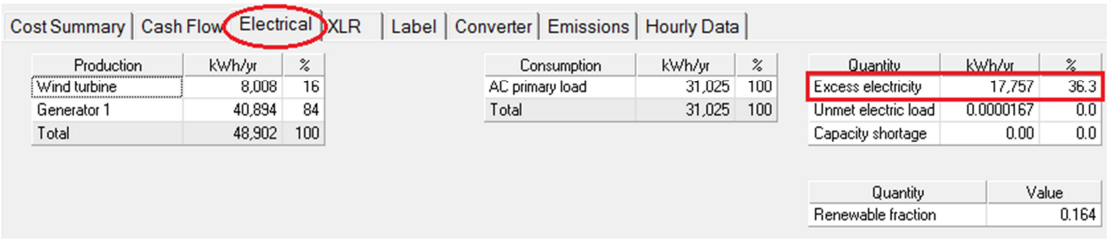
Valides tabelist *Catagorized*, reastatakse iga disainitud süsteemi kõige kuluefektiivsemad variandid (joonis 4.18). Et näha täpsemaid arvutusi, tuleb teha topeltklõps vastaval real ning avada aken *Simulatsion Results*.



	XLR	Label (kW)	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kW...	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
		15		$ 2,500	25,307	$ 326,013	0.822	0.00	21,052	8,7...
	1	15	6	$ 31,500	26,527	$ 370,609	0.934	0.16	20,646	8,6...

Joonis 4.18. Optimeerimisetulemuse kuluefektiivseimad konfiguratsioonid

Simulatsiooni tulemuste aknas on võimalik vaadata mitmeid tehnilisi ja majanduslikke detaile iga süsteemi konfiguratsiooni kohta, mida programm simuleerib. Valides simulatsiooni tulemuste aknas *Electrical*, on näha, et 36 % kogu elektrienergiast, mis toodetakse, on üleliigne elekter (joonis 4.19). Ehk energia, mida ei kasutata ning läheb seetõttu raisku. Selle vältimiseks tuleks kaaluda aku lisamist süsteemi või energia edasi müümise võimalusi. [28]



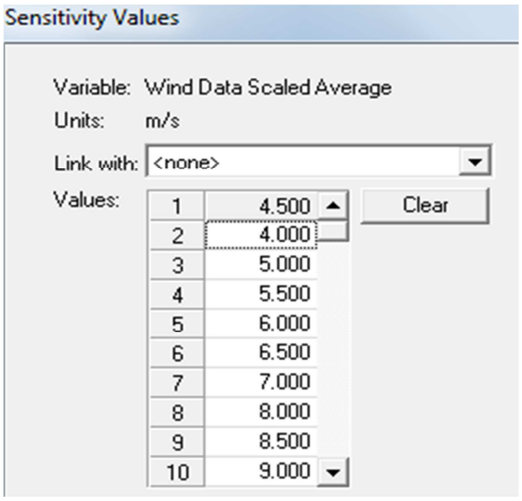
Joonis 4.19. Simulatsioonitulemuste tehnilised detailid

4.1.8. Optimeerimise tundlikkuse jaoks muutujate lisamine

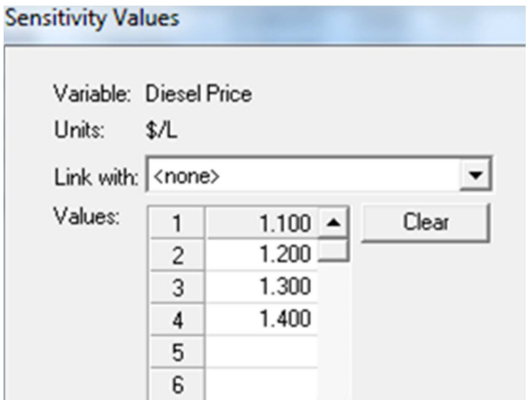
See alalõik kirjeldab, kuidas sisestada tundlikkuse väärtuseid nii tuule kiiruse skaleeritud aastase keskmise kohta kui ka diisli hinna kohta, et teostada nende muutujate detailsem analüüs ehk tundlikkuse analüüs. See võimaldab uurida, kuidas aasta keskmise tuule kiiruse ja diisli hinna muutujad mõjutavad süsteemi optimaalset ülesehitust. Ehk analüüs näitab aastase keskmise tuule kiiruse ja diisli hinna ulatuse, kus süsteemi oleks mõistlik lisada veel näiteks üks tuulik.

Et tundlikkuse muutujaid lisada, tuleb esmalt vajutada ressursside aknas (joonis 4.3) ikoonile *Wind resource* , et avada tuuliku ressursside andmete aken. Vajutades *Scaled annual average* taga olevale tundlikkuse määramise ikoonile saab lisada keskmise tuulekiiruse tabelisse näiteks väärtused 4st 9ni (joonis 4.20). Nüüd simuleerib programm kõiki süsteemi konfiguratsioone eraldi nende kümne ette antud tundlikkuse näitajaga.

Sama saab korrata diisliga, vajutades ressursside aknas (joonis 4.3) ikoonile *Diesel* . Järgnevalt tuleb avada akna *Price* kõrval olev tundlikkuse määramise aken ja sisestada tabelisse tundlikkuse väärtused näiteks 1.100 – 1.400 (joonis 4.21).



Joonis 4.20. Keskmise tuulekiiruse tundlikkuse näitajad

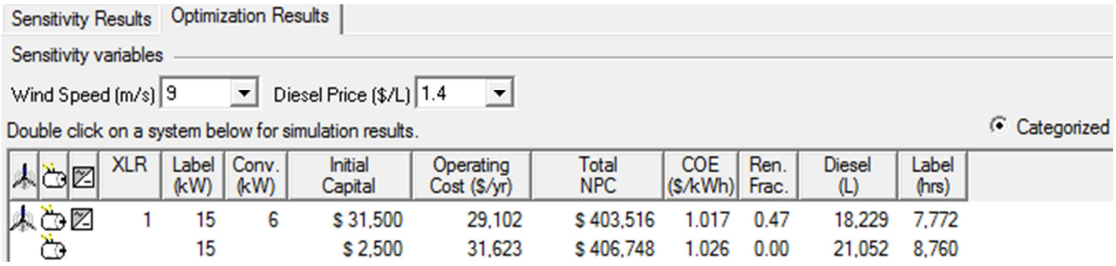


Joonis 4.21. Kütusehinna tundlikkuse näitajad

4.1.9. Tulemuste analüüs

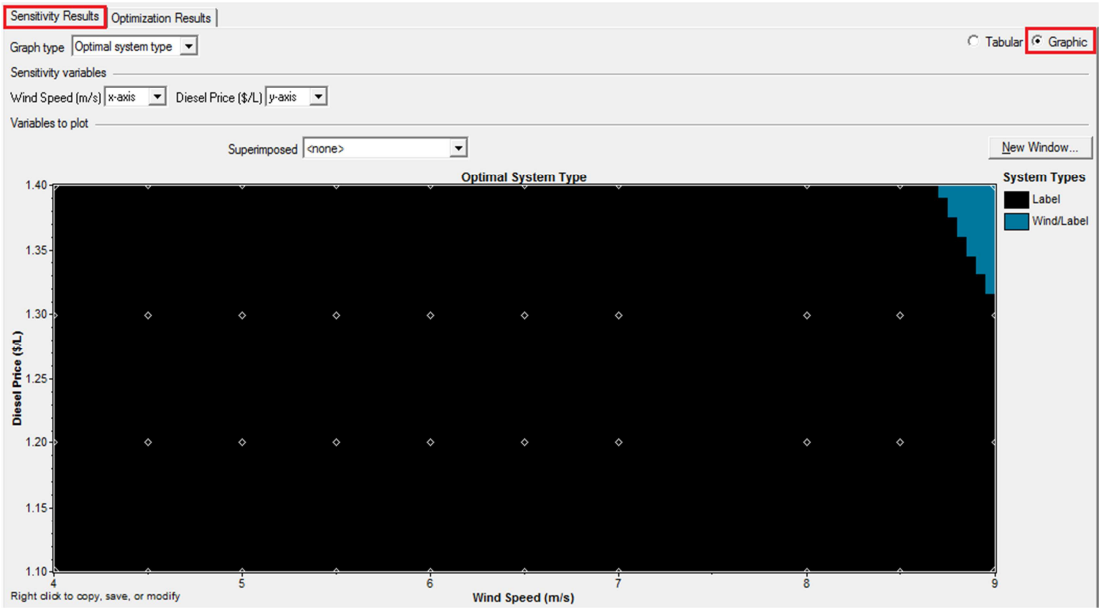
See alalõik kirjeldab, kuidas vaadata ja tõlgendada tulemusi, et teada saada, millistel tingimustel on näiteks tuule/diisli süsteem rohkem kuluefektiivsem, kui ainult diisli süsteem.

Simulatsiooni käivitamiseks tuleb vajutada ikoonile *Calculate*. Simulatsiooni lõppedes programm kuvab tuule kiiruse ja diisli hinna tundlikkuse muutujad, kus on võimalik näha, et kui aastane keskmine tuule kiirus on 9 m/s ja diiselkütuse hind 1,4 $/l , siis tuul/diisel süsteem on optimaalseim tüüp sisestatud andmetega, olles kuluefektiivseim (joonis 4.22). Muutes tuule kiiruse ja diiselkütuse väärtusi, saab vaadata, kuidas muutused mõjutavad optimaalset süsteemi tüüpi.



Joonis 4.22. Optimeerimise tulemused muudetavate tundlikkuse muutujatega

Valides tabelist *Sensitivity Results* ja sealt *Graphic*, saab näha graafikut valitud süsteemi analüüsist (joonis 4.23).



Joonis 4.23. Valitud optimaalse süsteemi graafik

Optimaalse süsteemi tüübi (OST) graafikul on samaaegselt võimalik näha eelnevalt sisestatud tuule kiirusi ja kütuse hindu. Graafikult on võimalik näha, et optimaalne süsteemi disain oleneb nii kütuse hinnast kui ka aastasest keskmisest tuule kiirusest.

5. LABORITÖÖDE JUHENDI KOOSTAMINE

5.1. Teoreetilised alused

Juhendis on välja toodud iga sisendi kohta käiv informatsioon ja kuidas seda informatsiooni kasutada, et simuleeritavad väljundid oleksid õiged ning õigesti analüüsitavad. Esiteks tuleb valida sisendid, mida soovime, et programm analüüsiks. Lisame vajaliku informatsiooni (parameetrid, kulu, ressursside kättesaadavus, ilmastikuandmed jne.), et programm saaks simuleerida antud süsteemi, koostades nimekirja võimalikest süsteemi mudelitest ja sorteerib need kulu efektiivsuse järgi järjekorda. Vajadusel lisada tundlikkuse analüüsimiseks erinevaid muutuvaid faktoreid. Näiteks ressursside hind ja muutlik ilm, mille alusel saab hinnata süsteemi tasuvust muutuvate sisendite korral.

5.1.1. Koormus

Koormusi võib valida ühe või mitu. Võimalus on kasutada programmi poolt pakutavat näitekoormusfaili, või sisestada reaalsed kodutarbimise tulemused. Andmete saamiseks on mitu võimalust. Kasutades uuritava majapidamise aastase tarbimise andmeid, või võtta andmed OÜ Elektrilevi koduleheküljelt https://www.elektrilevi.ee/tyypkoormusgraafikud[12].

Tüüpkoormusgraafiku (TKG) kasutamisel ühetariifse tarbimise korral tuleb leida konkreetse tarbija tarbimine tundide lõikes (C_{tund}), ning korrutada kalendrikuu mõõdetud või prognoositud tarbimine vastava TKG tunniteguriga järgmise valemi alusel:

$$C_{tund} \cdot = T_h \cdot C_{kuu} \quad (5.1)$$

Kus T_h - TKG konkreetse päeva konkreetne tunnitegur;

C_{kuu} - konkreetses kuus tarbijale müüdud elektrienergia kogus. [12]

Kahetariifse tarbimise korral tuleb leida konkreetse tarbija tarbimine tundide lõikes vastavalt mõõdetud või prognoositud päevatariifi koguse ja öötariifi koguse suhtes. Selleks

korrigeeritakse vastavat päevatariifi TKG tegurite summa võrdseks 1-ga ja öötariifi tegurite summa võrdseks 1-ga ühetaolise teguri võrra. [12]

Tarbimine päevatariifiga tundide lõikes ($C_{tund\text{-}päev}$) arvutatakse kalendrikuu päevatariifiga koguse korrutamisel TKG teguri ja korrigeeritava teguriga järgmise valemi alusel:

$$C_{tund\text{-}päev} = T_h / \Sigma T_{h\text{-}päev} \cdot C_{kuu\text{-}päev} \quad (5.2)$$

Ning tarbimine öötariifiga tundide lõikes ($C_{tund\text{-}öö}$) arvutatakse kalendrikuu öötariifiga koguse korrutamisel TKG teguri ja korrigeeritava teguriga jagamise valemi alusel:

$$C_{tund\text{-}öö} = T_h / \Sigma T_{h\text{-}öö} \cdot C_{kuu\text{-}öö} \quad (5.3)$$

kus T_h - TKG konkreetse päeva konkreetne tunnitegur

$\Sigma T_{h\text{-}päev}$ - päevatariifsele ajale jäävate tunnitegurite (T_h) summa

$\Sigma T_{h\text{-}öö}$ - öötariifsele ajale jäävate tunnitegurite (T_h) summa

$C_{kuu\text{-}päev}$ - konkreetses kuus tarbijale müüdava päevase tariifiga elektrienergia kogus

$C_{kuu\text{-}öö}$ - konkreetses kuus tarbijale müüdava öise tariifiga elektrienergia kogus. [12]

Tunnitarbimine arvutatakse ja esitatakse kWh-des. Näiteks tarbitakse aprillis kokku 250 kWh, siis 1. aprilli esimese tunni tarbimiseks arvutatakse tüüpkoormusgraafiku järgi 250 · 0,001209269=0,302 kWh. [12]

Kodutarbimise koormused võib valida vastavalt oma tarbimisele.

Valides igakuise tarbimise suuruse ja korrutades seda tüüpkoormusgraafikus antud koefitsentidega saame tarbimise andmed iga tunni kohta aastas. [12]

Edasi tuleb koostada tunnitarbimiste *.text* fail, et programm vastavaid andmeid kasutada saaks. Programm väljastab sisestatud andmete põhjal erinevaid tabeleid ja graafikuid, mis kirjeldavad energia tasakaalu ühe ööpäeva kohta (*Daily Profile*), kuude lõikes terve aasta kohta (*Sessional Profile*) ja iga sisestatud 8760 tunni kohta aastas (*DMap*).

5.1.2. Soojuskoormus

Soojuskoormus on nõudlus soojusenergia järgi. Tavamajapidamises võib seda soojust vaja minna näiteks ruumi kütmiseks ja vee soojendamiseks. See soojuskoormus võib olla boilerist, generaatorist või ülejäävast elektrist, mille jääkenergiat saab kasutada. Et generaator annaks soojuskoormust jääksoojusest, peab määrama mitte-null väärtuse selle generaatori soojuse taaskasutuse suhtes. Programm peab soojuskoormuse andmist vähemtähtsaks kui elektrikoormust.

5.1.3. Päikeseenergia

Päikesepaneeli sisendite lehel tuleb lisada vajalikud andmed, mida soovitakse, et programm analüüsiks. Määrates 1 kWh suuruse päikesepaneeli hinna, arvutab programm ise lähtuvalt sisestatud andmetele paneelide hinna (soovides täpsemat tulemust, võib lisada päikesepaneelide hinnad ka näiteks 2 kWh ja 3 kWh korral).

Edasi tuleb sisestada päikesepaneeli võimsused vastavalt soovile. Kindlasti tuleb lisada suurus 0,000 kW, mille tulemusena programm saab kaaluda, kas päikesepaneel on üldse vajalik.

Kollektorid paigaldatakse lõuna suunal Eesti tingimustes 40 – 60 kraadise nurga all. Päikeseküttesüsteem toimib arvestuslikult 30 aastat. Süsteem on täisautomaatne. Ekspluatatsioonikuludes tuleb arvestada pumba ja automaatika töös hoidmise kuludega. Arvestada tuleb umbes 7 euroga aastas ühe paneeli kohta. [21]

Näiteks *Solarworld Sunmodule plus SW250 poly* päikesepaneeli eluiga on 25+ aastat (25 aastaga langeb tootlikus ~85% peale) ja 250W päikesepaneeli hind 170€ + km. Päikesepaneeli paigaldamine trapetsprofiilplekile maksab umbes 25-30€. [17]

Päikesepaneeli ressursside lehel tuleb sisestada analüüsitav (meie puhul Eesti) asukoht ja andmed päikeseenergia kohta. Päikesekiirguse intensiivsus ja kestvus sõltub laiuskraadist. Kõige lihtsam on sisestada andmed tabelisse käsitsi. Andmed leiab näiteks internetilehekülgelt http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php [10] või allolevast tabelist 5.1.

Tabel 5.1. Eesti ilmastiku mitme aasta keskmised andmed [9]

Kuu	Aktinomeetriline ressurss [kWh/m^2]	Päikeseline aeg [tund]	Päikeselisel ajal maapinnale langev soojusvoog [W/m^2]
Jaanuar	13,2	30,5	432,8
Veebruar	31,58	60,5	522,0
Märts	78,2	127,5	613,3
Aprill	111,2	183	607,7
Mai	152,5	269	566,9
Juuni	172	292,5	588,0
Juuli	163	278,5	585,3
August	125,9	231	545,0
September	75	150	500,0
Oktoober	35,22	87	404,8
November	12,75	31,5	404,8
Detsember	7,75	21	369,0

5.1.4. Tuuleenergia

Tuulikute sisendite lehel on suur valik tuulikuid mille vahel valida. Kui nimekirjas ei ole soovitud tuulikut, saab selle ise sisestada. Kui valida programmi poolt pakutav tuulik, saab detailide lehelt näha, milline on tuuliku töötsoon ja väljund.

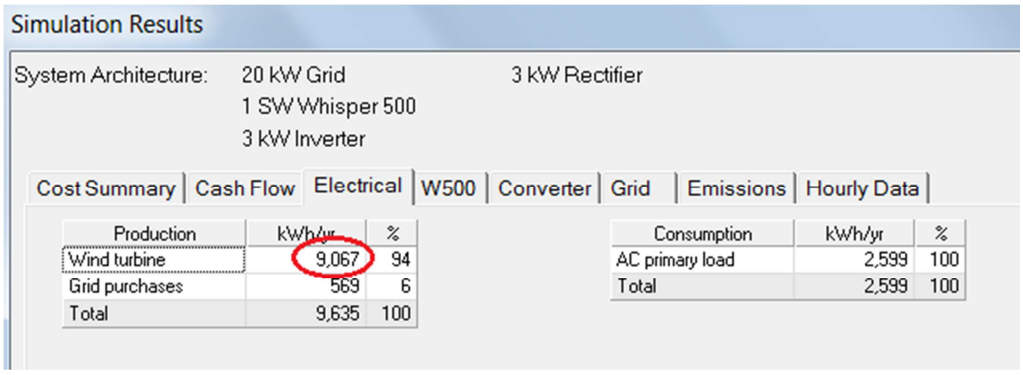
Märkides kulutabelisse ühe tuuliku andmed, arvutab programm ise, lähtuvalt sisestatud andmetele vajadusel mitme tuuliku kulu.

Väiketuulikute hooldamine on väga erinev. On tuulikuid, mille esimest hooldust peab tootja vajalikuks 20 aasta pärast, samas vajavad väikesaartel tugevates tuultes töötavate tuulikute laagrid ja mastiharjad väljavahetamist kahe-kolme aasta tagant. Kuigi pealtnäha on tuulikud lihtsa konstruktsiooniga ning neil on vähe liikuvaid osi, vajavad keerukad ja kuluvad sõlmed hooldust. [8]

Info kulutabelisse leiab vastava tuuliku kodulehelt. Enamike väiketuulikute hinnad koos mastiga jäävad 19 000 – 30 000 euro vahemiku, nende asendamine on samuti kulukas [18] [23]. Iga-aastased hooldus- ja operatiivkulud on umbes € 0,018/kWh kohta (http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-wind_power.pdf) [11].

Üldreegel on, et mida võimsam, seda kallim, kuid mitte alati. Lihtsa konstruktsiooniga 5 kW tuulik võib olla oluliselt odavam viimistletud ja tehnoloogiat täis 3 kW tuulikust. Kui püsivalt tugeva tuulega asukohas annab lihtsa konstruktsiooniga võimas tuulik rohkem elektrit (aga võib ka kiiremini laguneda), siis muutliku ja vaiksema tuulega asukohas võib kallim 3 kW tuulik lõppkokkuvõttes rohkem energiat toota, sest käivitub väiksema tuulega ning hoiab ennast paremini tuules. [8]

Valitud tuuliku aastase toodetava energiahulga suuruse saab leida, kui sisestada simulatsiooniprogrammi koduleheküljе http://www.weather-and-climate.com/average-monthly-Wind-speed,Tallinn,Estonia [13] või koduleheküljе http://www.weatheronline.co.uk/weather/maps/city?LANG=en&PLZ=_____&PLZN=_____&WMO=26038&CONT=euro&R=0&LEVEL=162&REGION=0004&LAND=ED&MOD=tab&ART=PRE&NOREGION=0&FMM=1&FYY=2013&LMM=12&LYY=2013 [22] poolt väljastatud tuulekiiruse andmed ressursside tabelisse (joonis 4.11) ja arvutada välja valitud tuuliku poolt toodetava energia kogus aastas.



Joonis 5.1. Tuuliku poolt toodetud elektrienergia aastas

See võimaldab vastavalt koormuste andmetele arvutada iga-aastane hooldus- ja operatiivkulu valitud tuulikule.

Väiketarbimise puhul võiks programm analüüsida mitte ühegi või ühe tuuliku kasutamist. Tabelis saab muuta tuuliku eluiga aastates ja masti kõrgust meetrites.

5.1.5. Salvestid

Sõltumatute süsteemide korral salvestatakse paneelidelt, tuulikult jne. tulev elektrienergia akudesse. Turul on nii metall-hübriid (MeH) kui liitium-ioon (Li-Ion) akud, mis võimaldavad pakkuda rohkem energiat väiksemasse ja kergemasse kesta, kuid siiani on plii-happeakude hinna ja salvestatava energia suhe parim. [8]

Koduses elektrijaamas tuleb kasutada süvatsükliakusid, kuna taluvad pikaajalist väikese vooluga tühjaks laadimist ja võivad pikemat aega lubatud tühjenemise piiril seista. Kõiki süvatühjenemisakud ei ole sobivad *off-grid* süsteemides kasutamiseks. UPS akudel, mis on mõeldud varutoiteks elektrikatkestuse korral, on lubatud küll 100-protsendiline tühjendamine, kuid laadimistsüklite arv jääb 300 ja 500 vahele, mis tähendab, et akud muutuvad pideval laadimisel-tühjenemisel kasutuks paari aastaga. [21]

Tavakasutuses on odavamate püsitoiteakude kasutusiga 2-6 aastat, parematel akudel 9-20 aastat. Selle ajaga väheneb akupanga energiamahtuvus 30-50 protsenti. Kui akude mahtuvus väheneb kriitilise piirini, tuleb akupank tervikuna välja vahetada, sest uusi akusid sinna lisada ei saa. Põhimõtteliselt on võimalik kasutada kahte paralleelset akupanka, kasutades ja laadises neid kordamööda. Sellisel moel on võimalik vana akupanga ressurss täielikult ära kasutada. [21]

HOMER´is on salvestite sisendite lehel valik erinevaid salvesteid. Detailide lehel on täiendav informatsioon programmi poolt pakutavate salvestite kohta. Saab valida antud salvestite vahel, või lisada sobiva salvesti andmed manuaalselt.

Andmed maksumuse kohta leiab salvesti koduleheküljelt või edasimüüjatelt. Näiteks *Hoppecke* hinnad on välja toodud BioTechx Energy Internatsional koduleheküljel http://www.biotechx.com/index.php?Section=Section&type=Product&cat=117&offset=3 [14]. Hoolduskulud aastas on umbes 20 eurot.

Sizes to consider aknasse tuleb sisestada akude arv, mida programm analüüsiks.

5.1.6. Muundurid

Kuna taastuvenergiaallikate toodetava voolu ja pinge parameetrid ei vasta kasutustingimustele ning kõiguvad väga suurtes piirides, ei saa nende toodetud voolu üldjuhul otse tarbimiseks kasutada. Võrguühendusega süsteemide puhul kasutatakse tavaliselt otse energiaallikaga ühendatud võrguinverterit, mis muundab toodetud elektri võrgule sobivate parameetritega elektrivooluks.

Võrgutoiteta lahenduse korral kasutatakse toodetud energiat akude laadimiseks ja tarbijate toiteks. Selleks on vaja laadimiskontrollereid. Laadimiskontrolleri põhiparameeter on maksimaalne voolutugevus, mida antud kontroller talub.

Kui süsteemi töökindluse huvides on lisatud sisepõlemismootoriga generaator, mida kasutatakse akude tühjenemise korral või siis, kui sõltumatu süsteemi puhul vajatakse inverteri antavast suuremat võimsust, on kasulik generaatori töötamisel täis laadida ka akud. Akude kasutusea huvides on mõistlik kasutada elektroonilist laadijat, mille laadimisvool ei sõltu laadija sisendpingest ja mis suudab valida akude laadimiseks kõige sobilikuma režiimi ning väldib ülelaadimist. [21]

Kuigi majapidamises on võimalik kasutada ainult 12/24V alalisvoolu, läheb enamasti tarvis ka 230V vahelduvvoolu. Siin tuleb appi DC-AC inverterid.[21]

Muunduri sisendite lehel tuleb lisada vajalikud andmed, mida soovime, et programm analüüsiks. Määrates 1 kW suuruse muunduri hinna, arvutab programm ise lähtuvalt sisestatud andmetele erinevate sisestatud muundurite hinnad (soovides täpsemat tulemust, võib lisada hinnad ka 2 kW ja 3 kW jne korral). Edasi tuleb sisestada võimsused vastavalt soovile.

Muunduri eluiga on arvestuslikult 25 aastat. Hoolduskulud on nullilähedased. Lähtuvalt sellest, pole ülesannetes vaja nendega arvestada.

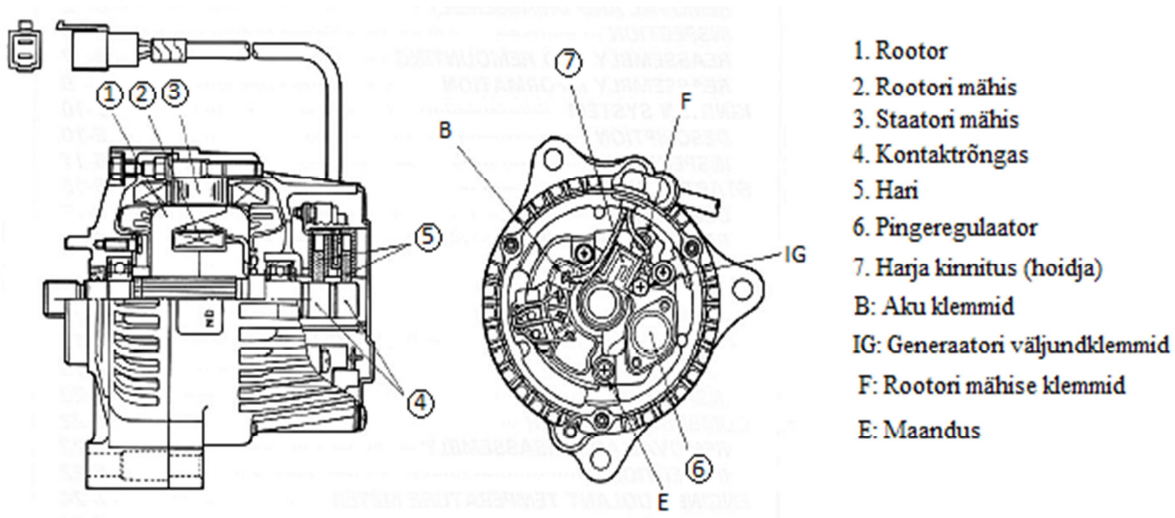
Tabelis 5.2. on näited hindadest mida harjutuses kasutada:

Tabel 5.2. Muundurite hinnad [21]

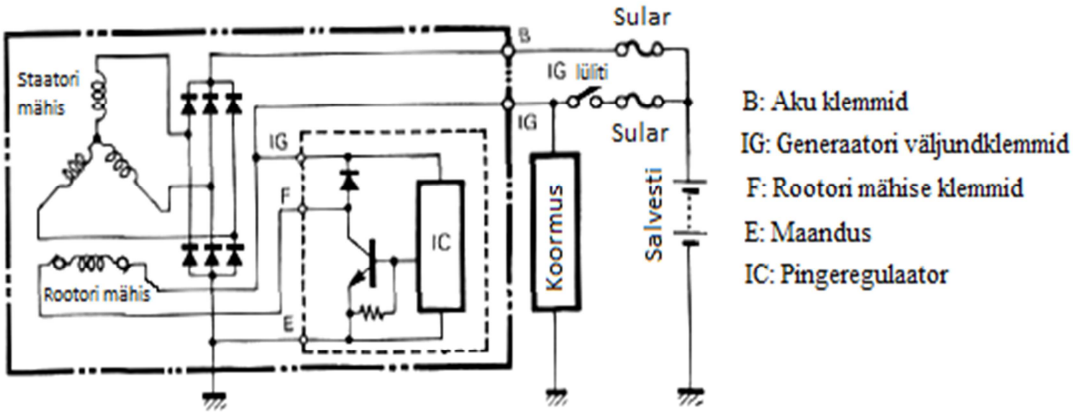
Võimsus [kW]	Hind [euro]
3	860
4,2	1100
5,5	1250
10	2000
15	2400
17	2600

5.1.7. Generaator

Generaatorit kasutatakse enamasti energiasüsteemide varutoitena, sest pole mõistlik projekteerida süsteemi, kus taastuvenergia igal juhul kataks kogu energiavajaduse. Võrguühendusega süsteemides kasutatakse varutoite generaatoreid seal, kus elektri puudumine võib põhjustada suuri kahjustusi või võrguelekter on vahelduva iseloomuga.



Joonis 5.2. Generaatori põhimõtteskeem [30]



Joonis 5.3. Generaatori elektrilise ühenduse skeem [30]

Ülalpool (joonis 5.2 ja joonis 5.3) on kujutatud generaatori põhimõtteskeemi ja elektrilise ühenduse skeemi. Kaks harja juhivad voolu läbi kahe kontaktrõnga rootorile paigaldatud mähisesse. Staatori mähised on paigaldatud lamineeritud südamikku mis moodustab osa generaatori korpusest. Alaldi „sild“, mis on ühendatud staatori mähistega sisaldab kuute dioodi ja muudab staatori vahelduvpinge alalispingeks, mis jõuab generaatori väljundklemmidesse [30].

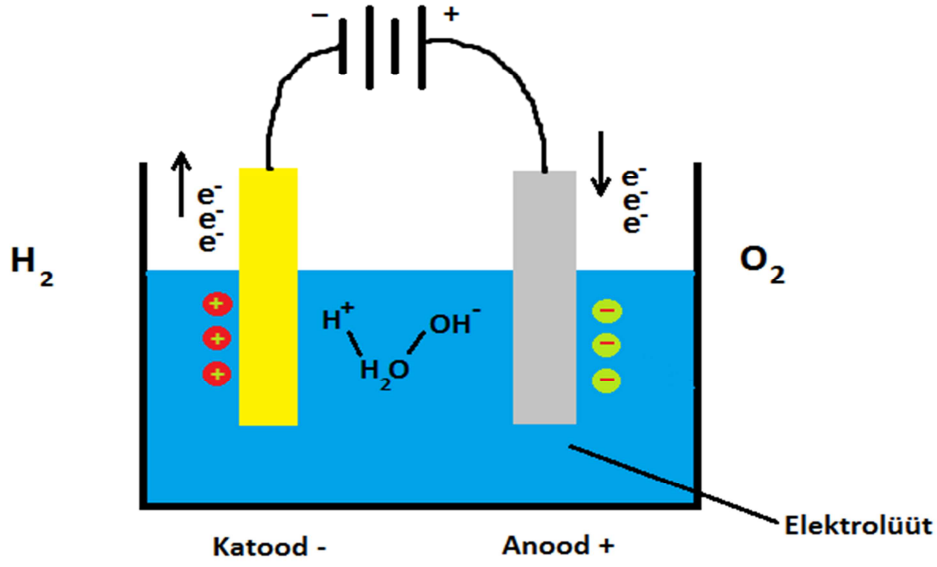
Programmis saab valida erinevate generaatorite vahel, mis saavad oma energia näiteks diiselkütusest, etanoolist, metanoolist, gaasist, biogaasist, vesinikust jne. Kui kütuseliigi valik on tehtud, tuleb sisestada generaatori ning tarbitava kütuse hind, eluiga ja generaatorite võimsused, mille vahel programm peab valima. Erinevate generaatorite hinnad leiab internetist.

Kapitali- ja hoolduskulud puhul on oluline, millise kütusega generaatorit kasutatakse. Näiteks diiselgeneraatori hoolduskulu on € 0,004 – € 0,009 kWh kohta, ning vesinikgeneraatori hoolduskulu on € 0,006 – € 0,013 kWh kohta. (http://www.facilitiesnet.com/powercommunication/article/Onsite-Options-Facility-Management-Power-Communication-Feature--1679#) [15].

Kapitali- ja hoolduskulud tuleb märkida generaatori tööaja iga tunni kohta, kasutades programmi poolt antud andmeid generaatori töötundide kohta.

5.1.8. Elektrolüüser

Elektrolüüsiks nimetatakse protsessi (joonis 5.2), kus ioniseeritud aines, näiteks destilleeritud vees, toimuvad alalisvoolu läbijuhtimisel elektroodidel (katoodil ja anoodil) reaktsioonid ning koostisosad eralduvad (H^+ ja O^-). Elektrilüüsi võtmeprotsessiks on aatomite ja ioonide pidev vahetamine, see tähendab et ühel elektroodil antakse pidevalt lahusesse elektrone (e^-), tekitades nõnda ioone lahuses olevatest aatomitest, ning teisel elektroodil eemaldatakse lahuses olevatelt ioonidelt sama arv elektrone (e^-), tekitades juurde aatomeid (H_2 ja O_2). Kui tekkinud produktid on elektrolüüdist erinevas agregaatolekus, saabki nad eraldada. Näiteks destilleeritud vee elektrolüüsi puhul on produktid (vesinik ja hapnik) gaasilised ning tõusevad lahuse kohale, kust need siis mujale juhtida saab. Elektrolüüti sukeldatud elektroodidele potentsiaali rakendamisel hakkavad elektroodid tõmbama vastaslaenguga ioone. Positiivselt laetud katioonid liiguvad elektrone lahusesse andva katoodi poole ning negatiivselt laetud anioonid liiguvad positiivselt laetud anoodi poole. Elektroodidel võetakse ioone vastavalt ära või antakse juurde. Aatomid, mis annavad elektrone ära või võtavad juurde, lähevad ioonidena lahusesse ning ioonid, mis saavad elektrone juurde või annavad ära, kaotavad laengu ning eralduvad elektrolüüdist (joonis 5.2). [32]



Joonis 5.4. Elektrolüüsi põhimõtteskeem

Kuidas saada vajaminevat energiat protsessi jaoks, saab valida programmist. Lisaks läheb suuremate vesiniku koguste hoiustamiseks vaja mahutit ja vesinikuga töötavat generaatorit.

Lisada tabelitesse seadmete maksumus, hoolduskulu, eluiga ja efektiivsus, ning suurused mida soovid, et programm analüüsiks. Seadmete sisestatavad andmed on järgmised :

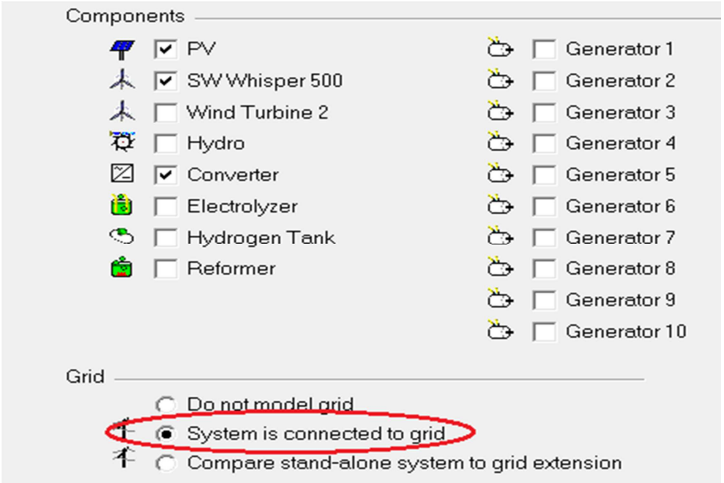
- Elektrolüüseri eluiga on 10 aastat, 1.200 kW elektrolüüseri maksumus on 1200 eurot ja aastased hoolduskulud 30 eurot.
- Mahuti eluiga on 30 aastat, 1 kg mahuti hind 80 eurot.
- Vesinikgeneraatori eluiga on 15000 töötundi, 1.200 kW generaatori hind on 1650 eurot ja hoolduskulud 0,1 eurot töötunni kohta. [27]

Elektrolüüsimise teel energia salvestamine ja selle kasutamine hiljem on efektiivsem kui energia salvestamine lihtsalt akudesse, sest energiakaod on oluliselt väiksemad. [25]

5.1.9. Võrguühendus

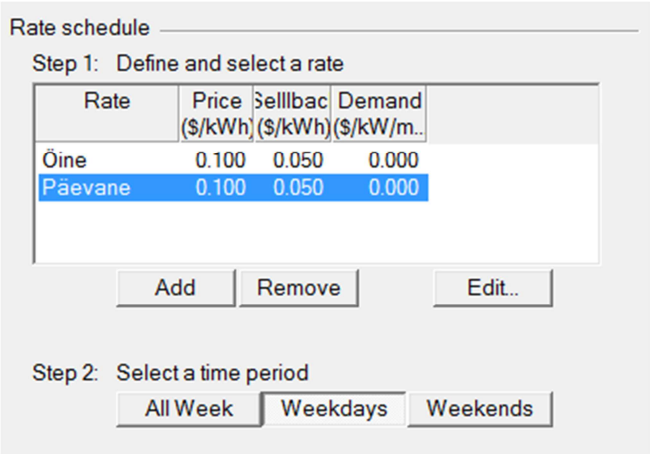
Elektrivõrguga ühendatud süsteem võimaldab majapidamises toodetava ja ülejääva energia võrku tagasi müüa ning vastupidi, kui energiast väheks jääb, katab elektrivõrk puuduva osa.

Selleks tuleb komponentide nimistu aknas valida süsteemi ühendus võrguga (joonis 5.5).



Joonis 5.5. Komponentide nimistu

Võrgu sisendite lehel saab määrata kuni 16 erinevat energia ostu- ja müügihinda. Kui süsteemi lihtsustada, saab sisestada kaks energia ostu- ja müügihinda (joonis 5.6). Üks öö ja teine päevase tariifi järgi.



Joonis 5.6. Elektrihinna graafik

Energia ostuhinna võib määrata isikliku kodutarbimise põhjal. Müügihinnad leiab AS Elering koduleheküljelt www.elering.ee või Nord Pool Spot koduleheküljelt http://www.nordpoolspot.com/. [16, 20]

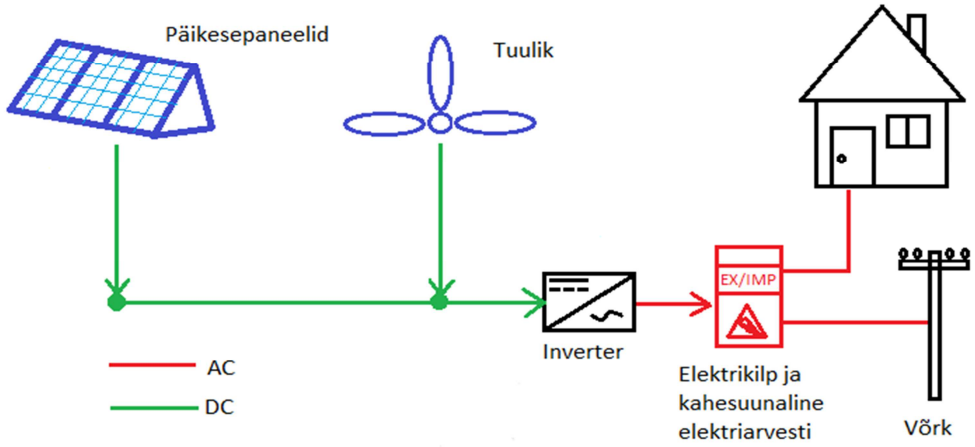
Võrgu määramine annab ülevaate, kas olemasoleva võrgu puhul on mõistlik kasutada majapidamises ka näiteks taastuvenergiaallikaid.

5.2. Laboritööde juhendid

5.2.1. Töö nr. 1: Energiasalvestita mikrovõrk

Töö eesmärk:

Analüüsida Eesti kliimas tuuliku ja päikesepaneelide (katusele saab paigaldada maksimaalselt 20 x 250 W paneeli) majandusliku tasuvust väikemajapidamises, arvestusega, et ülejääv energia müüakse olemas olevasse võrku tagasi.



Joonis 5.7. Fiktiivse elektrivõrgu põhimõtteskeem

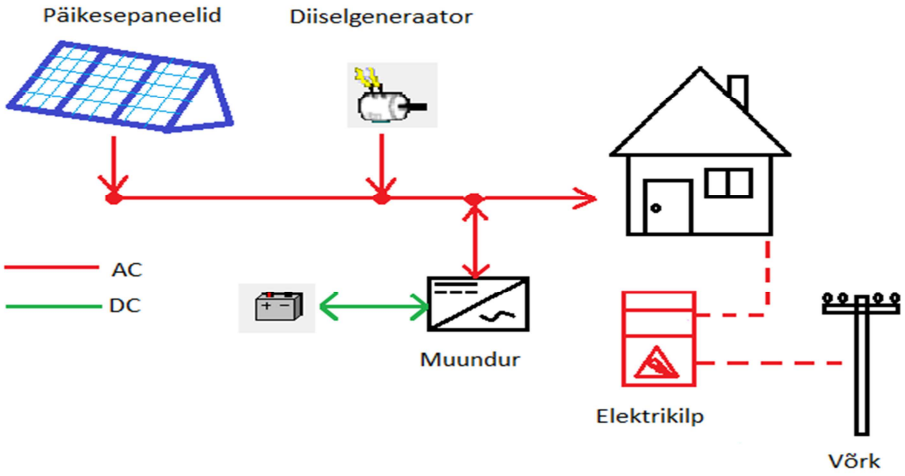
Töö käik:

1. Tutvuda laboratoorse töö teoreetiliste alustega (kasutusjuhend ja metoodiline juhend).
2. Tutvuda simulatsiooniprogrammiga
3. Sisestada koormuste, komponentide ja ressursside andmed, mille saad juhendist, internetist või valid simulatsiooniprogrammi poolt pakutavaid näitefaile.
4. Võrrelda programmi poolt väljastatud optimeerimise tulemusi.
5. Valida kuluefektiivseim variant.
6. Koostada aruanne, mis sisaldab:
    - Tiitelleht
    - Modelleeritud skeemi lühikirjeldus
    - Andmete hankimise ja sisestamise kirjeldus
    - Optimeerimistulemuste võrdlus
    - Järeldus

5.2.2. Töö nr. 2: Energiasalvestiga mikrovõrk

Töö eesmärk:

Eestis, Harjumaal asub elektrita majapidamine, milles soovitakse elada sees aastaringselt. Tutvu simulatsiooniprogrammiga ja analüüsi kui suur peaks olema võrguühenduse rajamise kapitali kulu, et taastuvenergiaallika ja generaatori kasutamine oleks majanduslikult tasuv. Millistel tingimustel on salvesti kasutamine otstarbekas? Kuidas kütuse hind mõjutab valikuid?



Joonis 5.8. Fiktiivse elektrivõrgu põhimõtteskeem

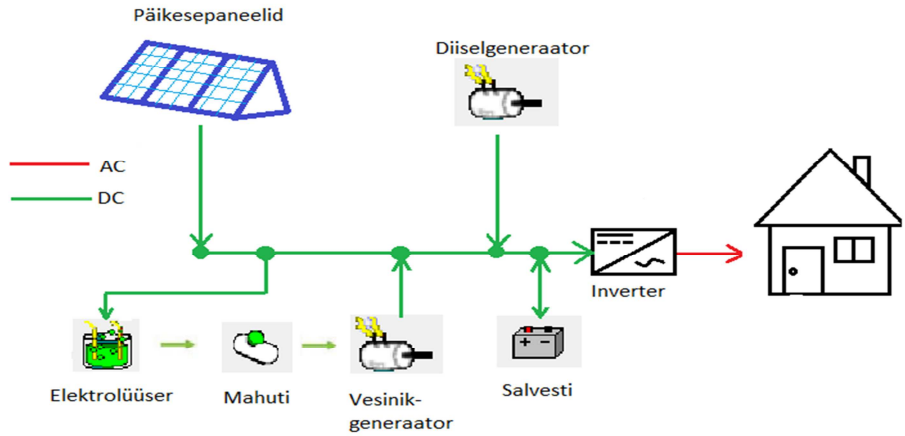
Töö käik:

1. Tutvuda laboratoorse töö teoreetiliste alustega (kasutusjuhend ja metoodiline juhend).
2. Tutvuda simulatsiooniprogrammiga
3. Sisestada koormuste, komponentide ja ressursside andmed, mille saad juhendist, internetist või valid simulatsiooniprogrammi poolt pakutavaid näitefaile.
4. Võrrelda programmi poolt väljastatud optimeerimise tulemusi.
5. Valida kuluefektiivseim variant.
6. Koostada aruanne, mis sisaldab:
    - Tiitelleht
    - Modelleeritud skeemi lühikirjeldus
    - Andmete hankimise ja sisestamise kirjeldus
    - Optimeerimistulemuste võrdlus
    - Järeldus

5.2.3. Töö nr. 3: Kahe energiasalvestiga mikrovõrk

Töö eesmärk:

Keskmise ööpäevase elektritarbimisega väiketalus on võimalik elektrivõrgu toite puudumisel luua autonoomne elektriga varustussüsteem, mis koosneb päikesepaneelidest (katusele saab paigaldada maksimaalselt 20 x 250 W paneeli), diiselgeneraatorist, hüdrolüüserist ja vesinikul töötavast elektrigeneraatorist. Tutvuda simulatsiooniprogrammiga ja analüüsida, kas kõikide komponentide kasutamine süsteemis on majanduslikult otstarbekas? Või kasutada antud komponentide erinevaid konfiguratsioone? Kui jah, siis milliseid? Kas salvesti kasutamine on otstarbekas?



Joonis 5.9. Fiktiivse elektrivõrgu põhimõtteskeem

Töö programm:

1. Tutvuda laboratoorse töö teoreetiliste alustega (kasutusjuhend ja metoodiline juhend).
2. Tutvuda simulatsiooniprogrammiga
3. Sisestada koormuste, komponentide ja ressursside andmed, mille saad juhendist, internetist või valid simulatsiooniprogrammi poolt pakutavaid näitefaile.
4. Võrrelda programmi poolt väljastatud optimeerimise tulemusi.
5. Valida kuluefektiivseim variant.
6. Koostada aruanne, mis sisaldab:
    - Tiitelleht
    - Modelleeritud skeemi lühikirjeldus
    - Andmete hankimise ja sisestamise kirjeldus
    - Optimeerimistulemuste võrdlus
    - Järeldus

6. KOKKUVÕTE

Mikrotootmine on Eesti majapidamises kiirelt arenev alternatiiv võrgutoitele, sest pidev tehnoloogia arendamine ja odavnemine, sh kasuteguri paranemine on muutnud energia tootmise majanduslikult tasuvamaks. Kodused elektrijaamad on erinevad. Suures plaanis on need jagatud võrguühenduseta ja võrguühendusega tootmiseks. Võrguühenduseta süsteemil puudub ühendus elektrivõrguga ja kuna taastuvenergiaallikatest elektri tootmine on väga kõikuv, vajavad sellised süsteemid energiasalvestit. Võrguühendusega süsteemil võib salvesti ära jätta, sest salvesti ülesandeid täidab elektrivõrk, millest saab vajadusel energiat juurde osta, ning kui majapidamine toodab rohkem energiat kui suudab ise kasutada, siis see võrku müüa. Eelnevast sh mikrotootmise kasvust tulenevalt on kasvav nõudlus seda liiki lahenduste optimeerimiseks ja optimeerimise alase praktika järele. Lisaks eelnevale toetab praktiliste ülesannete ja harjutuste laialdasemat integreerimist õppesse ka TTÜ struktuurireform.

Sellest tulenevalt on käesoleva töö raames õppeainete energiasalvestid (AAV0180) ja energiatarbimise juhtimine (AAV0170) jaoks väljatöötatud mikrovõrkude modelleerimise metoodiline juhend ja optimeerimise näidisülesanded. Õppemetoodiline juhend on väljatöötatud maailmas laialt levinud tarkvarale *HOMER Legacy*. Näidisülesanded kujutavad endast laboritöid kolme tüüpilise mikrovõrgu nagu energiasalvestita, energiasalvestiga ning energiasalvestitega lahenduste jaoks.

Laboritööde käigus määrab üliõpilane sõltuvalt etteantud tingimustest, milline mikrovõrgu lahendus on kodumajapidamises, äri- ja teenindussektoris või tööstuses kõige kuluoptimaalsem. Näiteks, kui taastuvenergia kasutamine on põhimõte omaette, siis kõige kasulikum on kasutada võrguühendusele lisaks päikesepaneele. Kui lähtuda ainult majanduslikust tasuvusest, siis hakkavad rolli mängima erinevad faktorid nagu kaugus olemasolevast võrgust, liitumistasud ja isegi läbisaamine ümbritsevate kinnistute naabritega, ning valla poliitikast. Ka sellest kui naaber ei luba oma kinnistule elektrikaablit ja vald ei kehtesta sundvõõrandamist, siis võib elektriliitumise saamine võtta aega mitmeid aastaid.

Viimane oluline osa lõputööst oli õppejõule näidisaruannete koostamine, mis aitavad tõhustada õpet seetõttu, et võimaldavad lihtsustatud viisil kontrollida lähteülesandes seatud eesmärkide täitmist. Lisaks oli väljatöötatud laboritöödel ka teaduslik aspekt, nimelt

analüüsida erinevate mikrovõrkude kulutõhusust. Näiteks, üks kulutõhusamaid süsteeme, kui võrguühendust ei ole, koosneb päikesepaneelidest, diiselgeneraatorist ning salvestist. Kus salvestil on täita kaks olulist ülesannet. Salvestada energiat ja ühtlustada generaatori tööd. Generaatori sujuv töö alandab märgatavalt kütusekulusid, ning on majanduslikult odavaim alternatiiv võrguühendusele ka siis, kui diiselkütuse hind tõuseb. Ülesannetest selgus ka, et tuulikute kasutamine mikrotootmises ei ole tasuv, kui arvestada Eesti keskmise tuulekiirusega kuude lõikes. Lisaks tuulikute kõrgele hinnale, on nende kasutamiseks vaja suuremat maaala, ning arvestada tuleb suuremate hoolduskuludega, kui näiteks päikesepaneelidel. Tuulikute liikuvad osad kipuvad purunema, ning vaja on arvestada remondikuludega ja sellest tulenevalt ka ajaga, millal tuulik on tööst väljas. Seega on tuulik hea alternatiiv näiteks saartel ja rannikualadel, kus aastane keskmine tuulekiirus on üle 5 m/s.

Kokkuvõtvalt käesoleva lõputöö koostamine arendas nii õppemetoodiliste materjalide kui ka elektrivarustuse optimeerimise alaseid oskusi.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Artikkel Harjukliima koduleheküljelt www.harjukliima.ee/download/paikesekyte.pdf - Tabel 1. Vaadatud 05.05.2015 a
2. Lehtla, T. Tulevik- otsapidi tarkvõrkude küljes //Horisont (2012) 2 lk. 32....36
3. M.Garcia-Sanz, C.H. Houpis, Wind Energy Systems: Control Engineering Design – Boca-Raton, FL Taylor, Francis, 2011
4. E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio, D. Martinez, Control Solar Energy Systems – Berlin, Springer Veriag, 2010
5. European Wind Energy Association, Wind Energy Scenarios for 2030 - EWEA Raport, august 2015
6. A. Rosin, I. Drovtar, S. Link, H. Hõimoja, H. Mõlder, T. Möller, Tarbimise juhtimine: Suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks – Tallinn, Elering toimetused, 2014
7. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, üheteistkümnenda konverentsi kogumik, TEUK XI – Eesti, Tartu, Eesti Maaülikool, 2009 – 67 – 72 lk.
8. M. Pinn, R. Pinn, M. Pinn, Elekter päikesest ja tuulest – Eesti, MTÜ Kolm Kobrast, 2012
9. Essee E.F.Camacho, T Samad, M. Garcia-Sanz, I.Hiskens – Control for Renewable Energy and Smart Grids
10. PIGIS kodulehekülg http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php. Vaadatud 06.05.2015 a
11. International Renewable Energy Agency ettekanne interneti leheküljelt http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-wind_power.pdf Vaadatud 06.05.2015 a
12. OÜ Elektrilevi kodulehekülg https://www.elektrilevi.ee/tyypkoormusgraafikud. Vaadatud 06.05.2015 a

13. World Weather and Climate Information kodulehekülg https://weather-and-climate.com/average-monthly-Wind-speed,Tallinn,Estonia. Vaadatud 06.05.2015 a

14. BioTechx Energy Internatsional kodulehekülg http://www.biotechx.com/index.php?Section=Section&type=Product&cat=117&offset=3. Vaadatud 10.06.2015 a

15. TradePress kodulehekülg http://www.facilitiesnet.com/powercommunication/article/Onsite-Options-Facility-Management-Power-Communication-Feature--1679#. Vaadatud 07.08.2015 a

16. AS Elering kodulehekülg http://www.elering.ee. Vaadatud 10.06.2015 a

17. SolarWorld kodulehekülg http://www.solarworld.de/en/products/products/solar-modules/sunmodule-plus/. Vaadatud 10.06.2015 a

18. Alternative Energy kodulehekülg https://www.altestore.com/store/Alternative-Energy-Products/Bergey-Wind-Turbines/Bergey-Excel-R48-75Kw-48Vdc-Wind-Turbine/p208/. Vaadatud 15.08.2015 a

19. Eesti Elektritööstuse Liidu kodulehekülg http://elektriliit.ee/taastuvenergeetika-riikidevahelises-koost%C3%B6%C3%B6s. Vaadatud 10.06.2015 a

20. Nord Pool Spot kodulehekülg http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/?view=table. Vaadatud 10.07.2015 a

21. Taastuvenergia OÜ kodulehekülg http://www.taastuvenergia.ee/. Vaadatud 11.06.2015 a

22. Weather Online Ltd. Kodulehekülg http://www.weatheronline.co.uk/weather/maps/city?LANG=en&PLZ=____&PLZN=____&WMO=26038&CONT=euro&R=0&LEVEL=162&REGION=0004&LAND=ED&MOD=tab&ART=PRE&NOREGION=0&FMM=1&FYY=2013&LMM=12&LYY=2013. Vaadatud 11.06.2015 a

23. Bakeri OÜ http://bakeri.ee/toode.asp?id=7&click=2. Vaadatud 15.05.2015 a

24. MTÜ EKKU kodulehekülg http://www.iluskodu.ee/energia/artiklid/vtuulikud.php. Vaadatud 23.10.2015 a

25. Neste Eesti AS kodulehekõlg - http://www.nesteoil.ee. Vaadatud 23.05.2015 a

26. Tuuleenergia Assotsiatsiooni kodulehekülg http://www.tuuleenergia.ee/category/eesti/vaiketuulikud/. Vaadatud 05.05.2015 a

27. AGO Fuel Cells kodulehekülg http://www.agofuelcells.com/fuel_cells.html. Vaadatud 05.05.2015 a

28. HOMER Energy LLC kodulehekülg http://www.homerenergy.com/. Vaadatud 05.05.2015 a

29. Electrical Installation Wiki kodulehekülg - http://www.electrical-installation.org/enwiki/Protection_of_a_LV_generator_set_and_the_downstream_circuits-. Vaadatud 05.10.2015 a

30. WP-Forge & WordPress kodulehekülg - http://automotivewiringdiagrams.net/tag/96-gsxr-1100-electrical-wiring-diagram. Vaadatud 05.10.2015 a

31. WeiKu Integrating Global Trade Leads kodulehekülg - http://www.weiku.com/products/15002619/10kw_wind_power_generator_for_single_family_Hummer_10kw_wind_generator.html. Vaadatud 07.09.2015 a

32. YouTube kodulehekülg - https://www.youtube.com/results?q=electrolyzer. Vaadatud 05.05.2015 a

33. Wikipedia kodulehekülg - https://et.wikipedia.org/wiki/Elektrol%C3%BC%C3%BCs. Vaadatud 23.10.2015 a

34. AS Merco ettevõttele kuuluva kaubamärgi kodulehekülg - https://www.stokker.ee/. Vaadatud 23.10.2015 a

35. AS Elektrihind kodulehekülg - http://elektrihind.ee/.Vaadatud 05.05.2015 a

36. Baltic Green Energy OÜ kodulehekülg - http://bge.ee/. Vaadatud 05.05.2015 a

37. Solardyne, LLC kodulehekülg - http://www.solardyne.com/whis175higvo.html. Vaadatud 06.05.2015 a

38. Solarest OÜ kodulehekülg - http://solarest.eu/tood-1. Vaadatud 10.05.2015 a

39. Ekspress Meedia AS-ile kuuluv internetilehekülg - http://www.delfi.ee/teemalehed/paikesepaneel. Vaadatud 05.07.2015 a

40. Autoheld OÜ - http://climatecet.onepagefree.com/. Vaadatud 05.07.2015 a

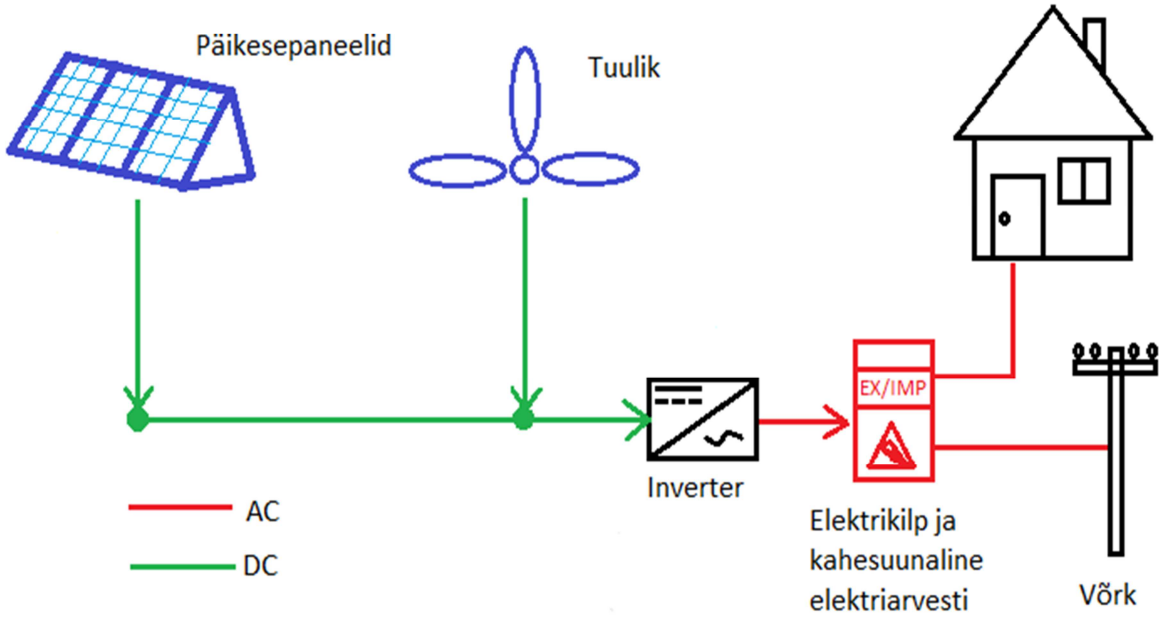
LISAD

Laboritöö „ENERGIASALVESTITA MIKROVÕRK“

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektrotehnika instituut

Laboratoorne töö nr.1			
Energiasalvestita mikrovõrk			
Üliõpilane:		Õppejõud:	
		Mõõdetud:	
		Esitatud:	



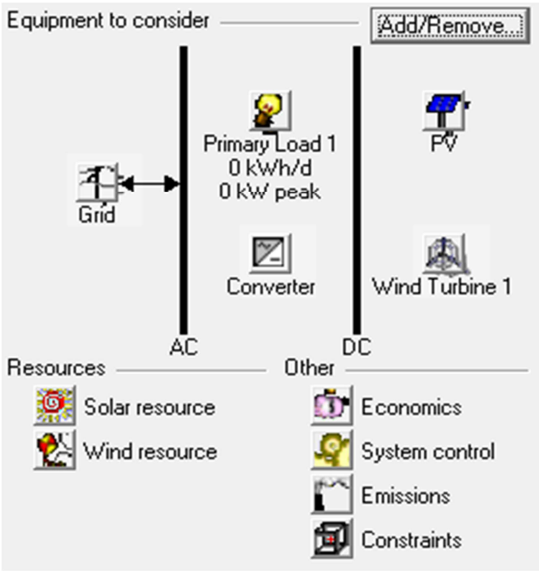
Joonis L1.1. Fiktiivse elektrivõrgu põhimõtteskeem

Tallinn 2015

L 1.1 Lähteülesanne

Analüüsin Eesti kliimas tuuliku ja päikesepaneelide (katusele saab paigaldada maksimaalselt 20 x 250 W paneeli) majandusliku tasuvust väikemajapidamises, arvestusega, et ülejääv energia müüakse olemas olevasse võrku tagasi.

L1.2 Modelleeritud skeemi lühikirjeldus



Joonis L1.2 Sisendite ja ressursside tööskeem

Skeemil on AC- ja DC-siinile ülesehitatud päikesepaneelide ja tuulikuga lahendus, mis on ühendatud võrku (Joonis L0.0).

Optimeeritav skeem kujutab endast kõiki tehnoloogilisi valikuid, mida tahame uurida. See tähendab, algne skeem võib sisaldada tehnoloogilisi valikuid, mis pole majanduslikult põhjendatud .

L1.3 Andmete hankimine ja sisestamine

Valinud programmi poolt pakutavast nimekirjast soovitud komponendid, tekib nendest töölehele sisendite skeem ja ressursside loetelu, mida antud komponendid kasutavad.

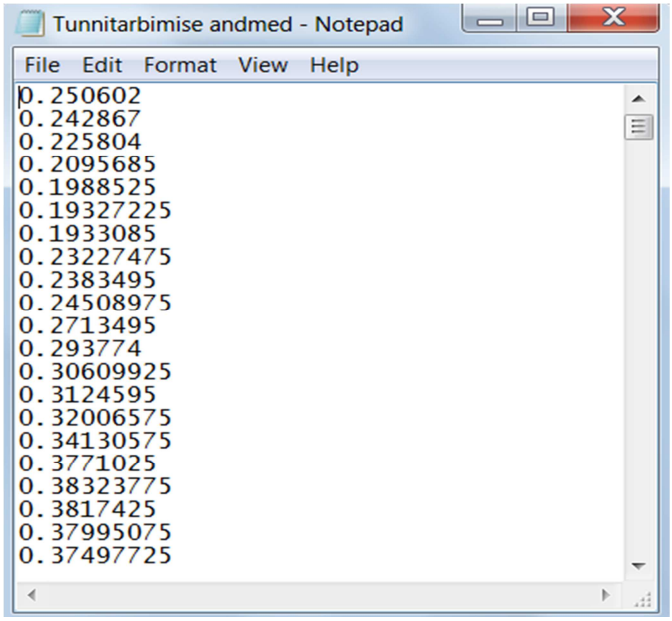
L1.3.1 Koormus

Andmed kodutarbimise kohta võtan AS Elektrilevi koduleheküljelt https://www.elektrilevi.ee/tyypkoormusgraafikud [12].

Tunnitarbimise arvutan ja esitan kWh-des. Näiteks tarbitakse aprillis kokku 250 kWh, siis 1. aprilli esimese tunni tarbimiseks on tüüpkoormusgraafiku järgi 250 · 0,001209269 = 0,302 kWh.

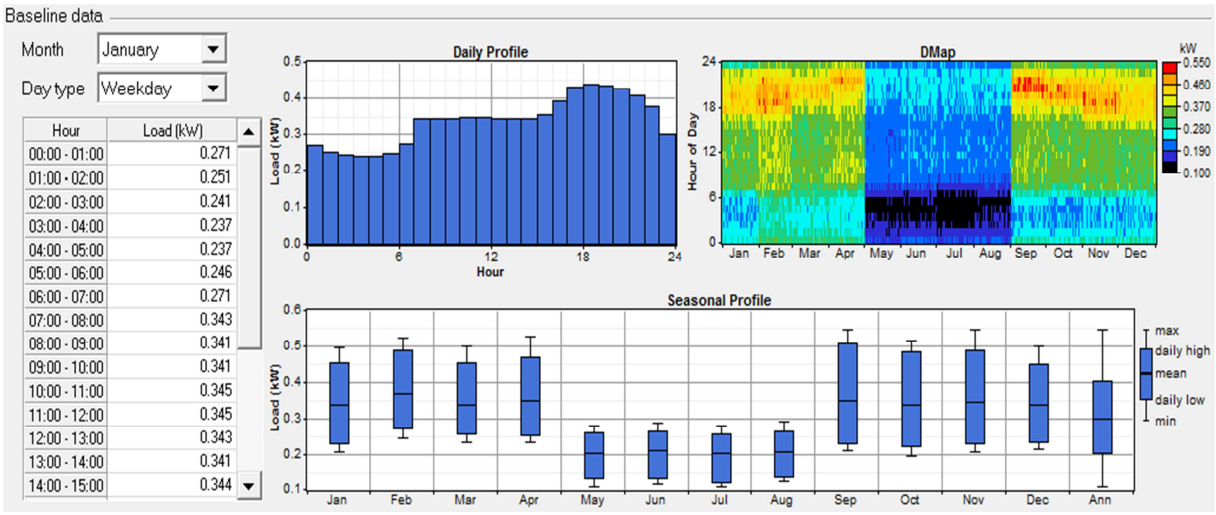
Kuna majapidamises sai arvestatud , et talvel tarbitakse rohkem kui suvel, siis korrutasin suvekuude (mai-august) näidud 150 kWh-ga ja ülejäänud kuude näidud 250 kWh-ga.

Et programm saaks vastavaid andmeid kasutada, koostan tunnitarbimise *.text* faili, kuhu kopeerin terve aasta ehk 8760 tunni andmed.



Joonis L1.3 Tunnitarbimine *text*-failina

Programm väljastab sisestatud andmete põhjal erinevaid tabeleid ja graafikuid, mis kirjeldavad energia tarbimist ühe ööpäeva kohta (*Daily Profile*), kuude lõikes terve aasta kohta (*Sessional Profile*) ja iga sisestatud 8760 tunni kohta aastas (*DMap*).



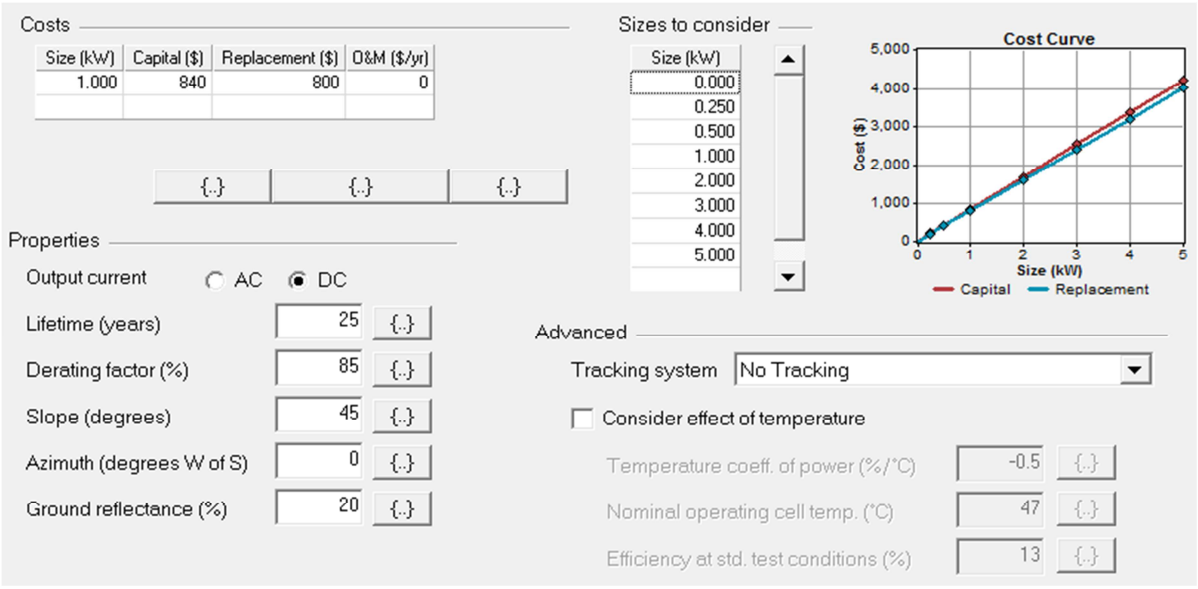
Joonis L1.4 Majapidamise koormusgraafikud

Sisestatud andmete põhjal on koormuseks väikemajapidamine, mille keskmine tarbimine on 7,1 kWh päevas. Maksimaalne koormus on 548 W ja keskmine koormus umbes 300 W.

L1.3.2 Päikeseenergia

Päikesepaneeli sisendite lehel lisan analüüsiks vajalikud andmed. Andmed sain metoodilisest juhendist.

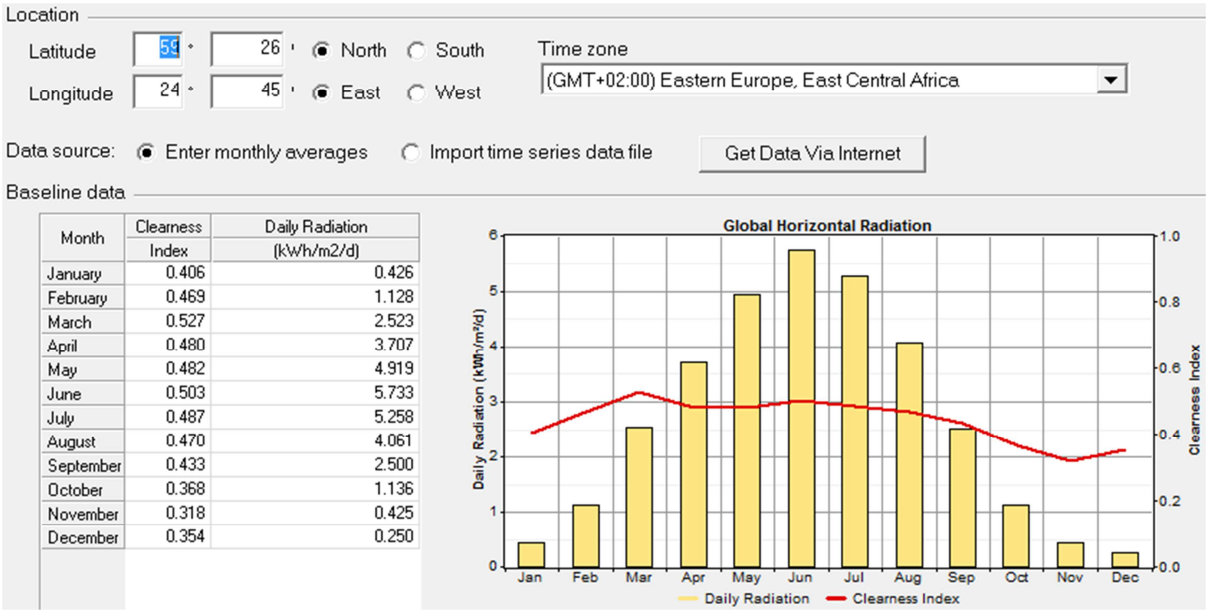
Võimsused, mille vahel soovin, et programm valiku teeks, jäävad vahemikku 0,0...5 kW.



Joonis L1.5 Päikesepaneeli sisendite andmed

Päikesepaneeli ressursside lehel sisestan analüüsitava (meie puhul Eesti) asukoha ja andmed päikeseenergia kohta. Päikesekiirguse intensiivsus ja kestvus sõltub laiuskraadist.

Andmed võtan metoodilises juhendis olevast tabelist. Jagades aktinomeetrilise ressursi kWh/m^2 päevade arvuga antud kuus.

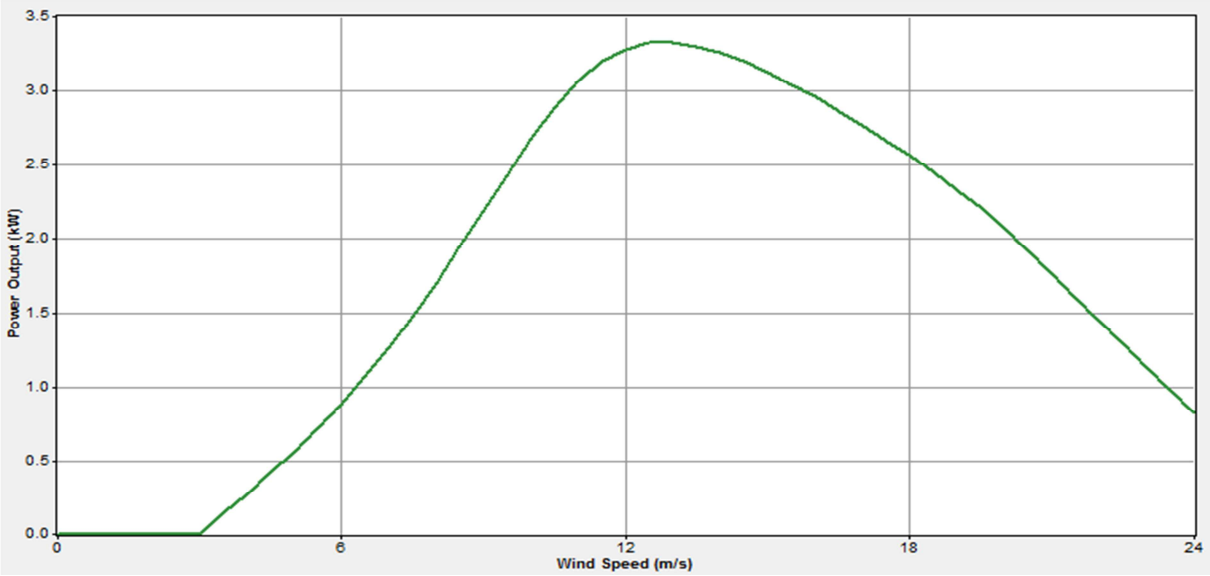


Joonis L1.6 Päikeseenergia ressursside andmed

L1.3.2 Tuuleenergia

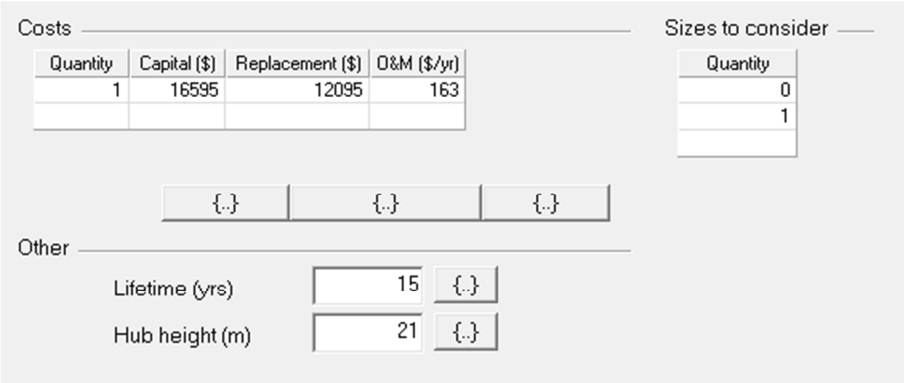
Tuulikute sisendite lehel on suur valik tuulikuid mille vahel valida.

Mina valin 3 kW tuuliku *SW Whisper 500* mis hakkab tootma energiat juba 3,5 m/s tuule korral ja saavutab tipu 12 m/s tuule korral.



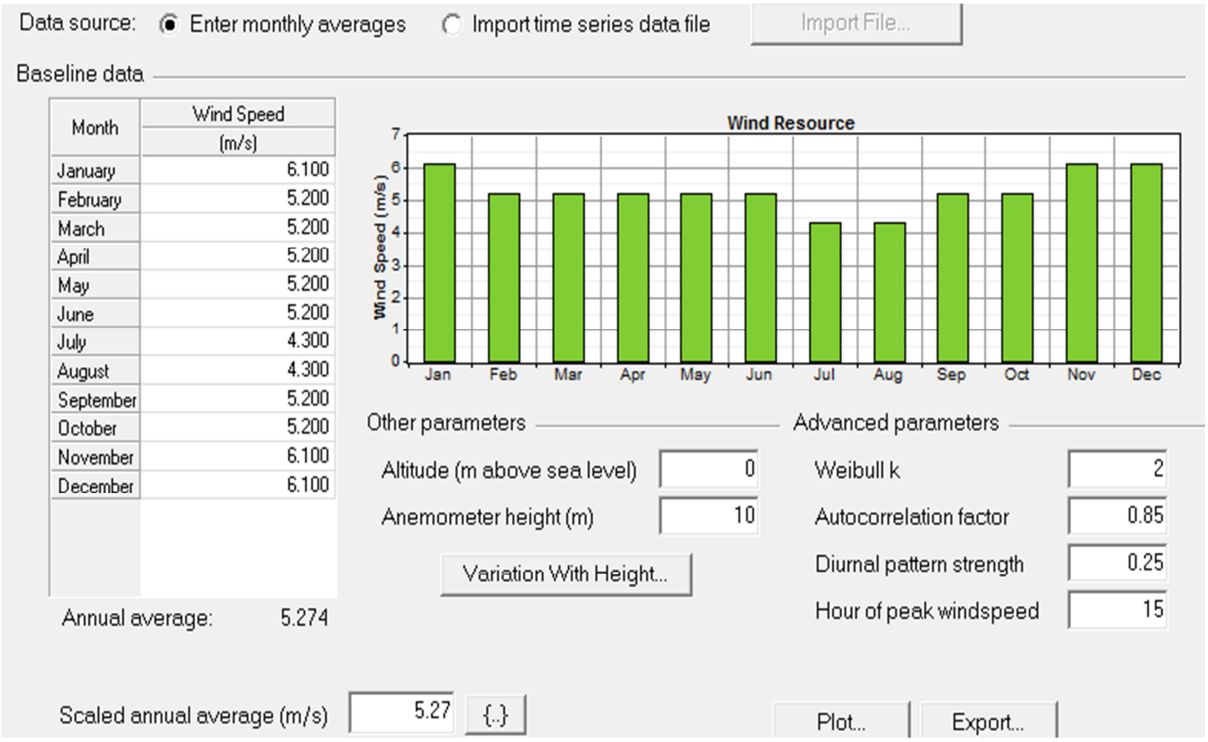
Joonis L1.7 Tuuliku töökõver

Tuulegeneraatori ja masti hinnad koos paigaldusega leian interneti leheküljelt http://www.solardyne.com/whis175higvo.html [37]. Hooldus- ja operatiivkulu arvutan vastavalt metoodilesele juhendile. Tuulikute arv mille vahel programm peab valiku tegema on 0 ja 1.



Joonis L1.8 Tuuliku sisendite andmed

Tuule ressursside lehel sisestan analüüsitava asukoha (minu puhul Harjumaa) keskmise tuule kiiruse andmed kuude lõikes. Andmed leian koduleheküljelt http://www.weather-and-climate.com/average-monthly-Wind-speed,Tallinn,Estonia [13].

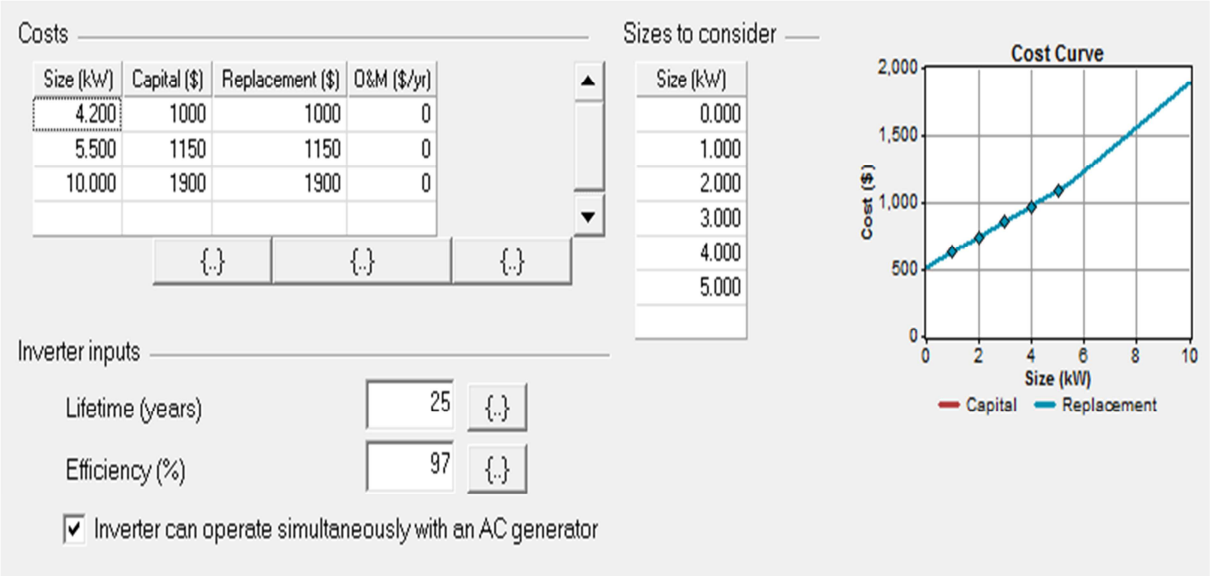


Joonis L1.9 Tuuliku ressursside andmed

L1.3.3 Muundurid

Muundur muudab vahelduvvoolu alalisvooluks (alaldi), alalisvoolu vahelduvvooluks (inverter, vaheldi) või mõlemat.

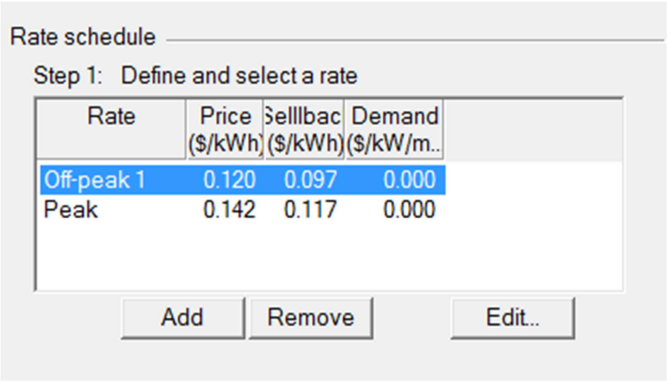
Vastavad muundurite hinnad saan metoodilisest juhendist. Lähtuvalt juhendist jätan hoolduskulud arvestamata. Muunduri suurused valin vahemikus 0,0 kW – 5,0 kW.



Joonis L1.10 Muunduri sisendite andmed

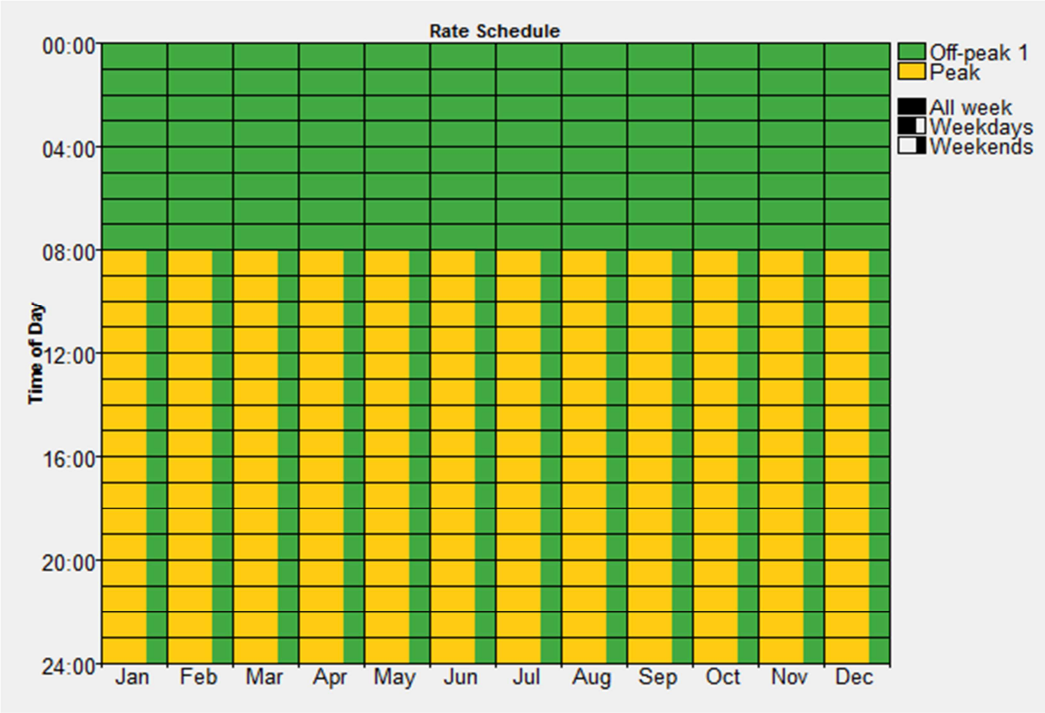
L1.3.4 Võrguühendus

Võrguühenduse sisendite aknas sisestan oma kahetariifse kodutarbimise andmed. Elektrienergia müügihinnad leian AS Elering koduleheküljelt www.elering.ee [16].



Joonis L1.11 Elektrienergia maksumuse andmed

Kõrvalolevasse tabelisse märgin energia maksumuse kellaajaliselt.



Joonis L1.12 Elektrienergia maksumus kellaajaliselt

L1.4. Optimeerimistulemuste võrdlus

Kui kõik vajalikud andmed on olemas, saab programm antud sisendite põhjal arvutada kõige kuluefektiivsema võimaluse. Programm väljastab eraldi iga võimaliku variandi odavaima lahenduse. Minu tulemused on järgmised:

PV (kW)	W500	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kW...	Ren. Frac.
5.00		4	1000	$ 5,177	-235	$ 2,175	0.065	0.77
			1000	$ 0	359	$ 4,585	0.138	0.00
5.00	1	5	1000	$ 21,887	-677	$ 13,232	0.398	0.97
	1	3	1000	$ 17,457	-123	$ 15,881	0.478	0.94

Joonis L1.13. Optimeerimistulemuste andmed

Tulemustest on näha, et kuluka tuulegeneraatori paigaldamine ei tasu ennast ära. Päikesepaneelid aga küll. 5 kW päikesepaneelide paigaldamisel võib aastas tagasi teenida umbes 200 eurot.

				PV (kW)	W500	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kW...	Ren. Frac.
				5.00		4	1000	$ 5,177	-235	$ 2,175	0.065	0.77
				5.00		5	1000	$ 5,292	-240	$ 2,230	0.067	0.77
				5.00		3	1000	$ 5,062	-201	$ 2,494	0.075	0.77
				4.00		3	1000	$ 4,222	-117	$ 2,724	0.082	0.72
				4.00		4	1000	$ 4,337	-125	$ 2,741	0.083	0.72
				4.00		5	1000	$ 4,452	-125	$ 2,857	0.086	0.72
				4.00		2	1000	$ 4,106	-67	$ 3,249	0.098	0.72
				3.00		3	1000	$ 3,382	-10	$ 3,258	0.098	0.65
				3.00		2	1000	$ 3,266	4	$ 3,317	0.100	0.65
				3.00		4	1000	$ 3,497	-10	$ 3,374	0.102	0.65
				5.00		2	1000	$ 4,946	-120	$ 3,418	0.103	0.77
				3.00		5	1000	$ 3,612	-10	$ 3,489	0.105	0.65
				2.00		2	1000	$ 2,426	106	$ 3,787	0.114	0.55
				2.00		3	1000	$ 2,542	106	$ 3,903	0.117	0.55
				2.00		4	1000	$ 2,657	106	$ 4,018	0.121	0.55
				2.00		1	1000	$ 2,311	135	$ 4,041	0.122	0.55
				2.00		5	1000	$ 2,772	106	$ 4,134	0.124	0.55
				3.00		1	1000	$ 3,151	87	$ 4,266	0.128	0.65
				1.00		1	1000	$ 1,471	225	$ 4,348	0.131	0.35
				1.00		2	1000	$ 1,586	225	$ 4,464	0.134	0.35
				1.00		3	1000	$ 1,702	225	$ 4,579	0.138	0.35
							1000	$ 0	359	$ 4,585	0.138	0.00

Joonis L1.14. Optimeerimistulemuste andmed

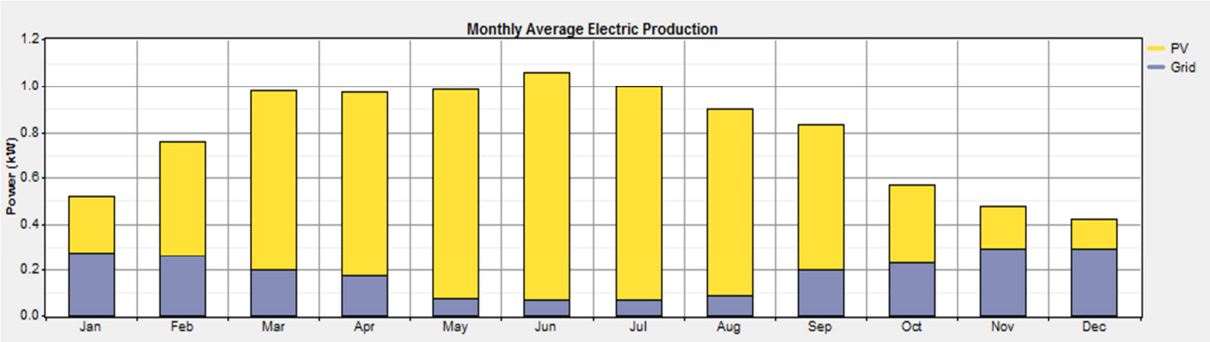
Jooniselt L1.14 on näha, et juba 1 kW paneelide paigaldamine tasub end ära. 1 kW päikesepaneel raha tagasi ei teeni, kuid aastane elektrienergia tasu võib olla umbes 100 eurot väiksem, ehk kWh hind tuleb umbes 0,13 eurot.

L1 5 Järeldus

Päikesepaneelide paigaldamine üle 1 kW tasub end ära. Kas siis lihtsalt selleks, et elektrikatkestuse ajal oleks majapidamises hädavajalikele kodumasinatele energia, või et selle pealt ka kasumit teenida.

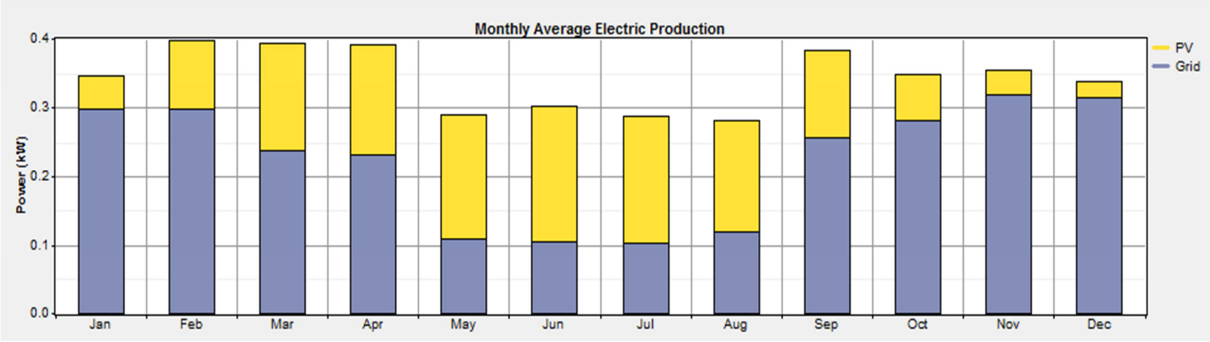
Umbes 7 kWh tarbimisega päevas on 5 kW päikesepaneelide ja võrguenergia tarbimise suhe aastas joonisel L1.15.

Kogu süsteemi soetamise kulu on umbes 5200 eurot. Iga-aastane energiakulu on umbes -235 eurot, ehk süsteem teenib raha tagasi. Süsteemi kogu elutsükli hinnaks (Total NPC) on umbes 2200 eurot, mis teeb kWh hinnaks (Levelized COE) 0,065 eurot.



Joonis L1.15. Elektritarbimine 5 kW päikesepaneelidega

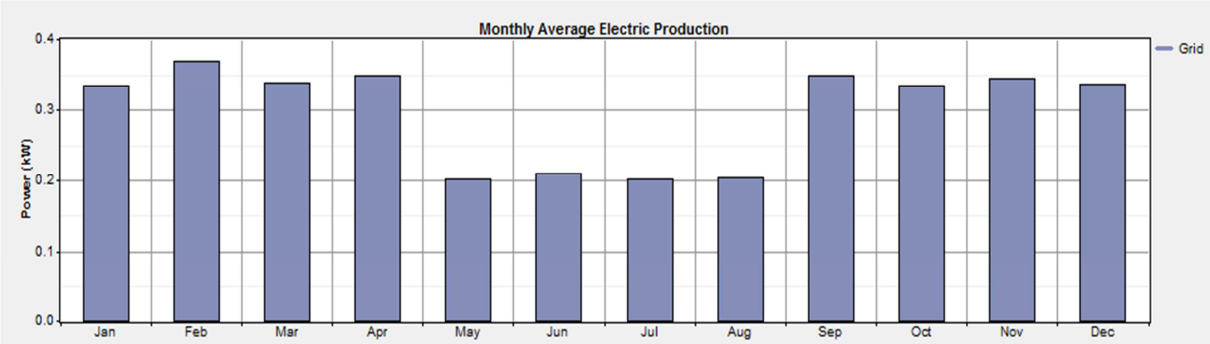
Umbes 7 kWh tarbimisega päevas on 1 kW päikesepaneelide ja võrguenergia tarbimise suhe aastas järgmine:



Joonis L1.16. Elektritarbimine 1 kW päikesepaneelidega

Kogu süsteemi soetamise kulu on umbes 1500 eurot. Iga-aastane energiakulu on umbes 225 eurot. Süsteemi kogu elutsükli hinnaks (Total NPC) on umbes 4400 eurot, mis teeb kWh hinnaks (Levelized COE) 0,131 eurot.

Umbes 7 kWh tarbimisega päevas ainult võrgust, on tulemused järgmised :



Joonis L1.17. Elektritarbimine võrgust

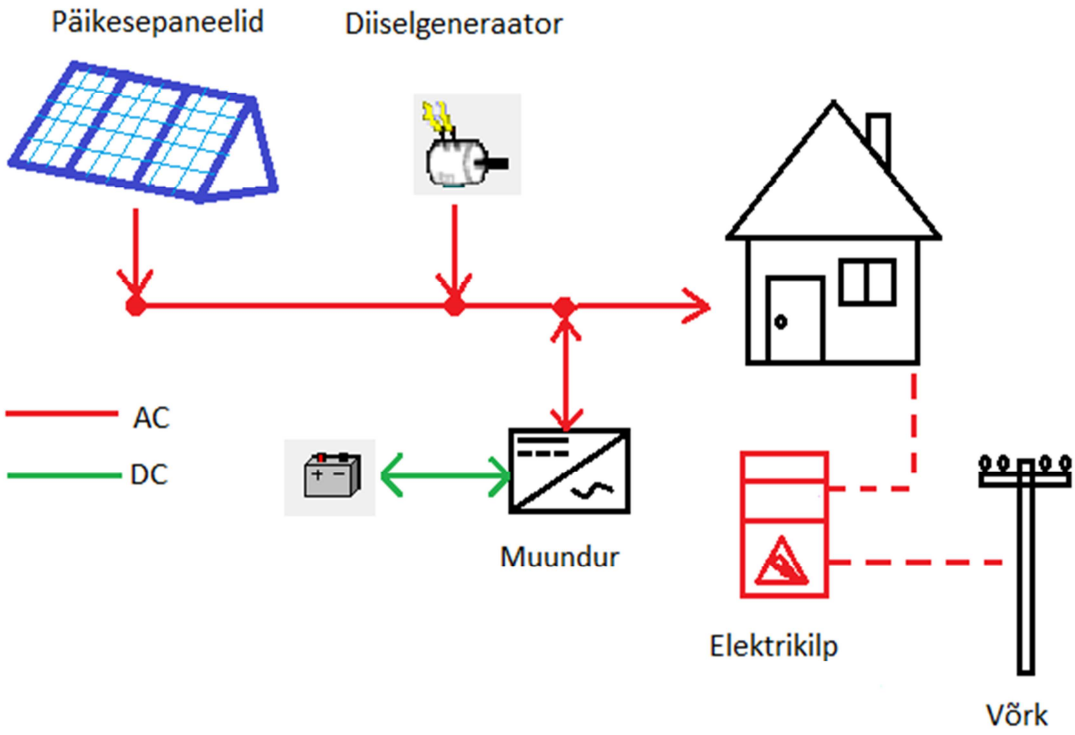
Kogu süsteemi on juba olemas olev. Iga-aastane energiakulu on umbes 360 eurot. Süsteemi kogu elutsükli hinnaks (arvestatud on võrreldava taastuvenergia aparatuuri elutsükliga) (Total NPC) on umbes 4600 eurot, mis teeb kWh hinnaks (Livelized COE) 0,138 eurot.

Laboritöö „ENERGIASALVESTIGA MIKROVÕRK“

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektrotehnika instituut

Laboritöö nr.2			
Energiasalvestiga mikrovõrk			
Üliõpilane:		Õppejõud:	
		Mõõdetud:	
		Esitatud:	



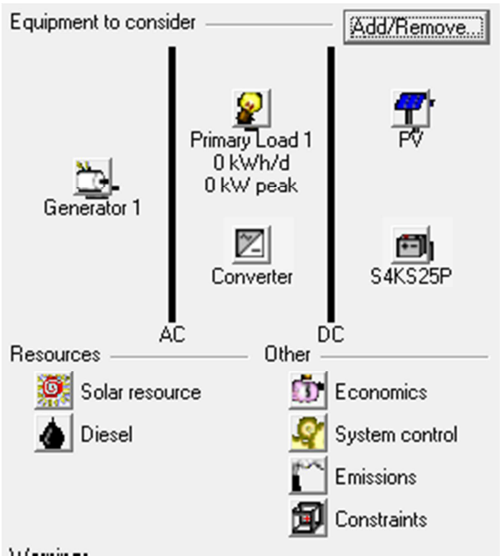
Joonis L2.1 Fiktiivse elektrivõrgu põhimõtteskeem

Tallinn 2015

L 2.1 Lähteülesanne

Eestis, Harjumaal asub elektrita majapidamine, milles soovitakse elada sees aastaringselt. Tutvun simulatsiooniprogrammiga ja analüüsin kui suur peaks olema võrguühenduse rajamise kapitali kulu, et taastuvenergiaallika ja generaatori kasutamine oleks majanduslikult tasuv. Millistel tingimustel on salvesti kasutamine otstarbekas? Kuidas kütuse hind mõjutab valikuid?

L2.2 Modelleeritud skeemi lühikirjeldus



Joonis L2.2. Sisendite ja ressursside tööskeem

Skeemil on AC- ja DC-siinile ülesehitatud generaatori, päikesepaneelide ja salvestitega lahendus (Joonis L2.2).

Optimeeritav skeem kujutab endast kõiki tehnoloogilisi valikuid, mida tahame uurida. See tähendab, algne skeem võib sisaldada tehnoloogilisi valikuid, mis pole majanduslikult põhjendatud .

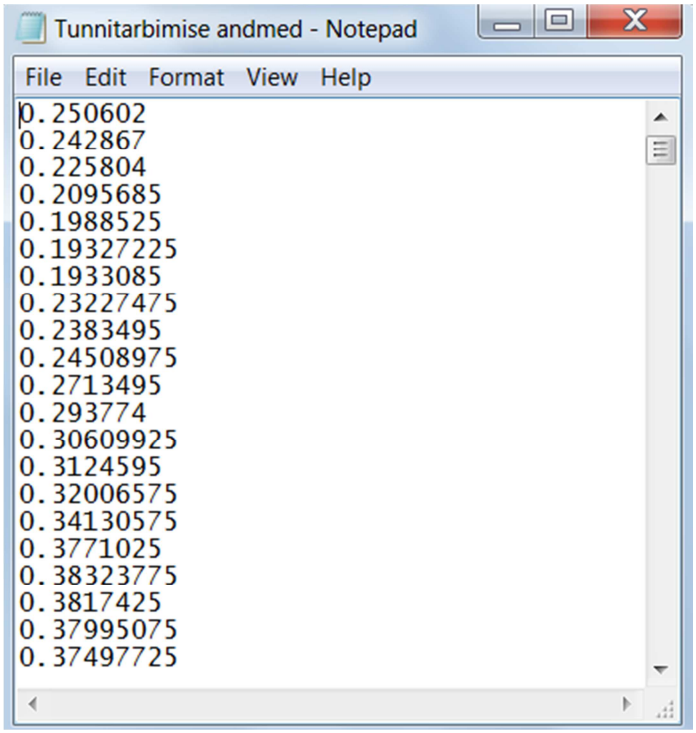
L2.3 Andmete hankimine ja sisestamine

Valinud programmi poolt pakutavast nimekirjast soovitud komponendid, tekib nendest töölehele sisendite skeem ja ressursside loetelu, mida antud komponendid kasutavad.

L2.3.1 Koormus

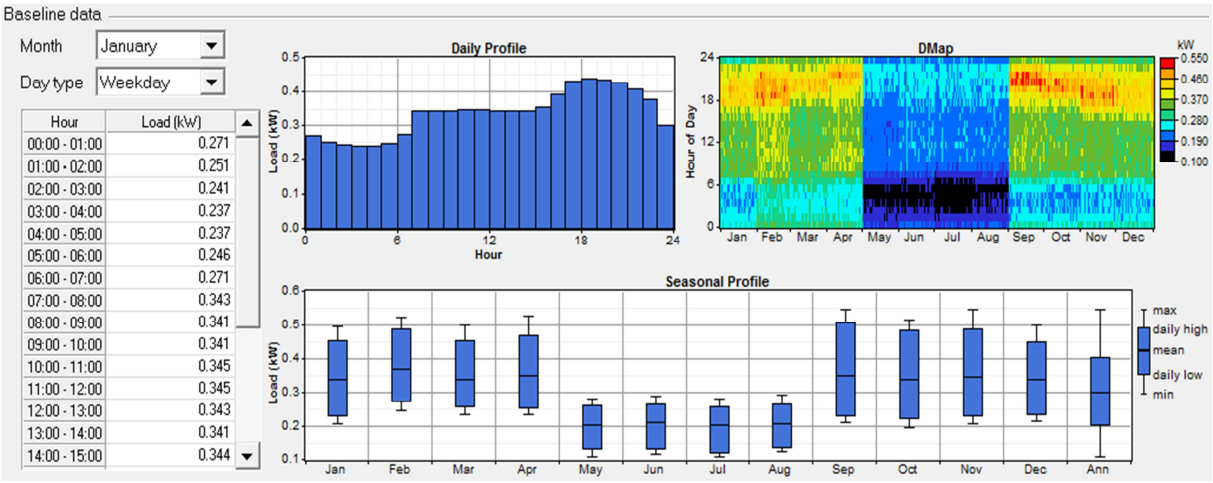
Andmed kodutarbimise kohta võtan AS Elektrilevi koduleheküljelt https://www.elektrilevi.ee/tyypkoormusgraafikud [12].

Tunnitarbimise arvutan ja esitan kWh-des. Näiteks tarbitakse aprillis kokku 250 kWh, siis 1. aprilli esimese tunni tarbimiseks on tüüpkoormusgraafiku järgi 250 · 0,001209269 = 0,302 kWh.Kuna majapidamises sai arvestatud, et talvel tarbitakse rohkem kui suvel, siis korrutasin suvekuude (mai-august) näidud 150 kWh-ga ja ülejäänud kuude näidud 250 kWh-ga. Et programm saaks vastavaid andmeid kasutada, koostan tunnitarbimise *.text* faili, kuhu kopeerin terve aasta ehk 8760 tunni andmed.



Joonis L2.3. Tunnitarbimine *text*-failina

Programm väljastab sisestatud andmete põhjal erinevaid tabeleid ja graafikuid, mis kirjeldavad energia tarbimist ühe ööpäeva kohta (*Daily Profile*), kuude lõikes terve aasta kohta (*Sessional Profile*) ja iga sisestatud 8760 tunni kohta aastas (*DMap*).

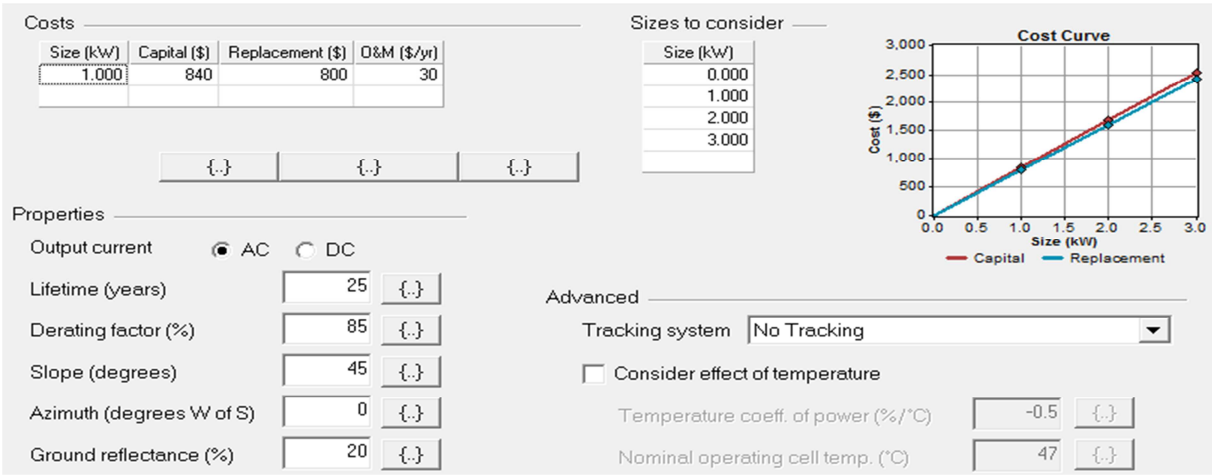


Joonis L2.4. Majapidamise koormusgraafikud

Sisestatud andmete põhjal on koormuseks väikemajapidamine, mille keskmine tarbimine on 7,1 kWh päevas. Maksimaalne koormus on 548 W ja keskmine koormus umbes 300 W.

L2.3.2 Päikeseenergia

Päikesepaneeli sisendite lehel tuleb lisada analüüsiks vajalikud andmed. Andmed sain metoodilisest juhendist.

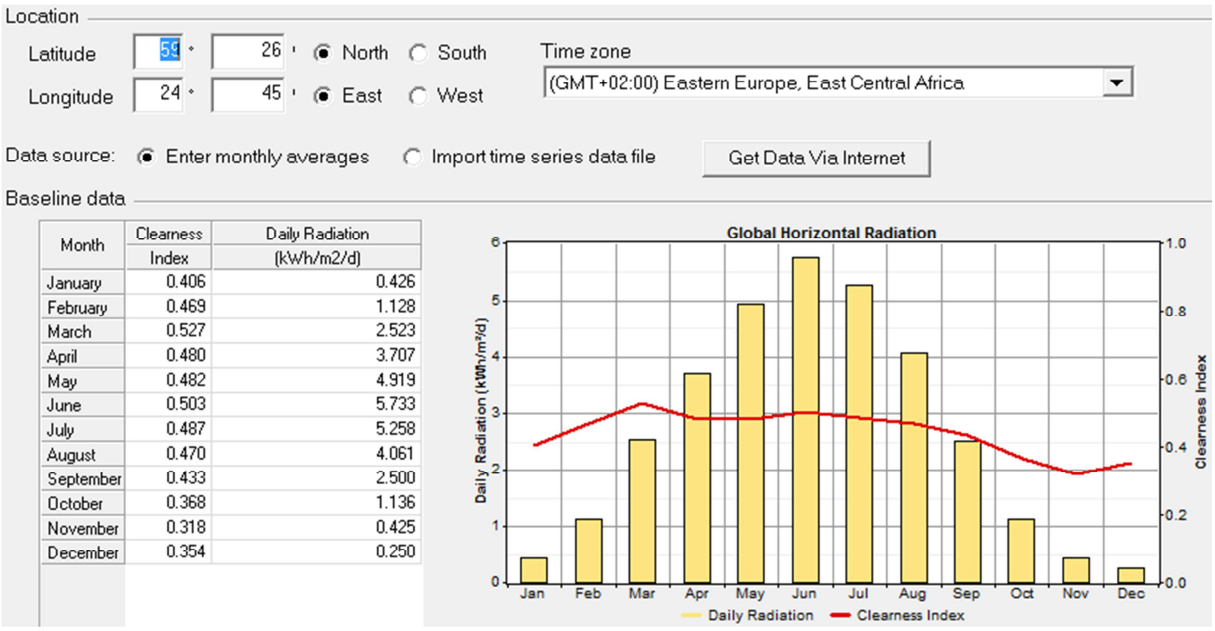


Joonis L2.5. Päikesepaneeli sisendite andmed

Võimsused, mille vahel soovin, et programm valiku teeks, jäävad vahemikku 0,0...3 kW.

Päikesepaneeli ressursside lehel sisestan analüüsitava (meie puhul Eesti) asukoha ja andmed päikeseenergia kohta. Päikesekiirguse intensiivsus ja kestvus sõltub laiuskraadist.

Andmed võtan metoodilises juhendis olevast tabelist. Jagades aktinomeetrilise ressursi kWh/m^2 päevade arvuga antud kuus.



Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m2/d)
January	0.406	0.426
February	0.469	1.128
March	0.527	2.523
April	0.480	3.707
May	0.482	4.919
June	0.503	5.733
July	0.487	5.258
August	0.470	4.061
September	0.433	2.500
October	0.368	1.136
November	0.318	0.425
December	0.354	0.250

Joonis L2.6. Päikeseenergia ressursside andmed

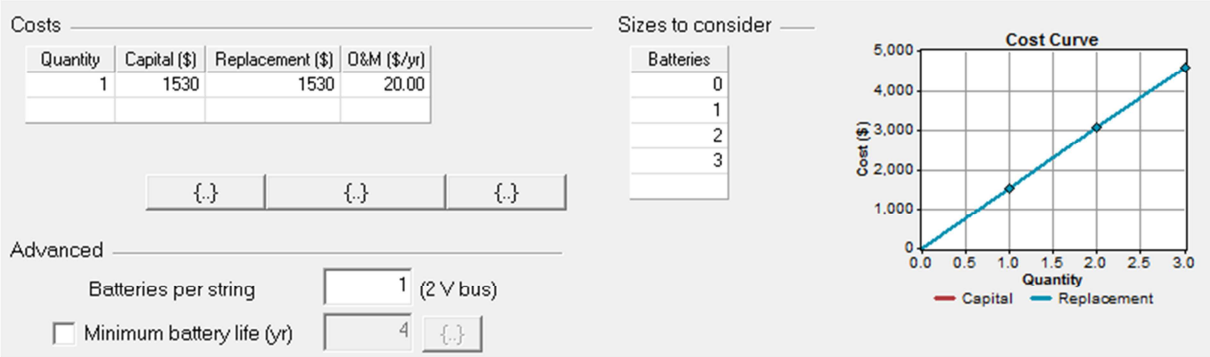
L2.3.3 Salvestid

Kuna süsteemis on päikesepaneel, siis on valikut tehes tähtis, et tegemist oleks *deep-cycle* märkega salvestiga. Tuleb tagada, et süsteem töötab akusid kahjustamata öösel pikalt salvestite peal.

Seetõttu valisin programmi poolt pakutava salvesti *Hoppecke 24 OpzS 3000*, mille hinnaks on *Biotechx Energy Internationa* koduleheküljal 1530 eurot (http://www.biotechx.com/index.php?Section=Section&type=Product&cat=117&offset=3) [14].

Programm analüüsib, kas salvesti kasutamine on majanduslikult mõistlik, kui lisan tabelisse *Size to consider* arvväärtuse null.

Lähtuvalt metoodilisest juhendist märgin aastaseks hoolduskuluks 20 eurot.

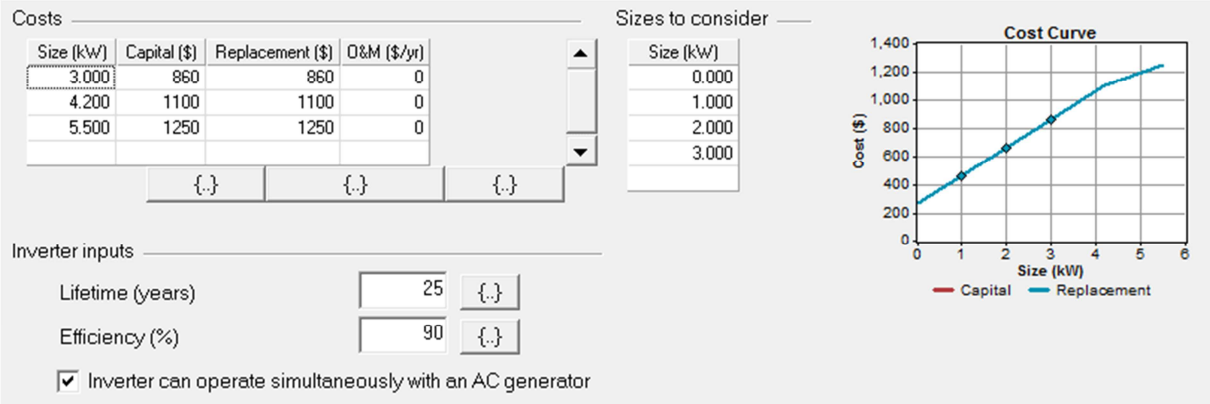


Joonis L2.7 Salvesti sisendite andmed

L2.3.4 Muundurid

Muundur muudab vahelduvvoolu alalisvooluks (alaldi), alalisvoolu vahelduvvooluks (inverter, vaheldi) või mõlemat.

Vastavad muundurite hinnad saan metoodilisest juhendist. Lähtuvalt juhendist jätan hoolduskulud arvestamata. Muunduri suurused valin vahemikus 0,0 kW – 3,0 kW.



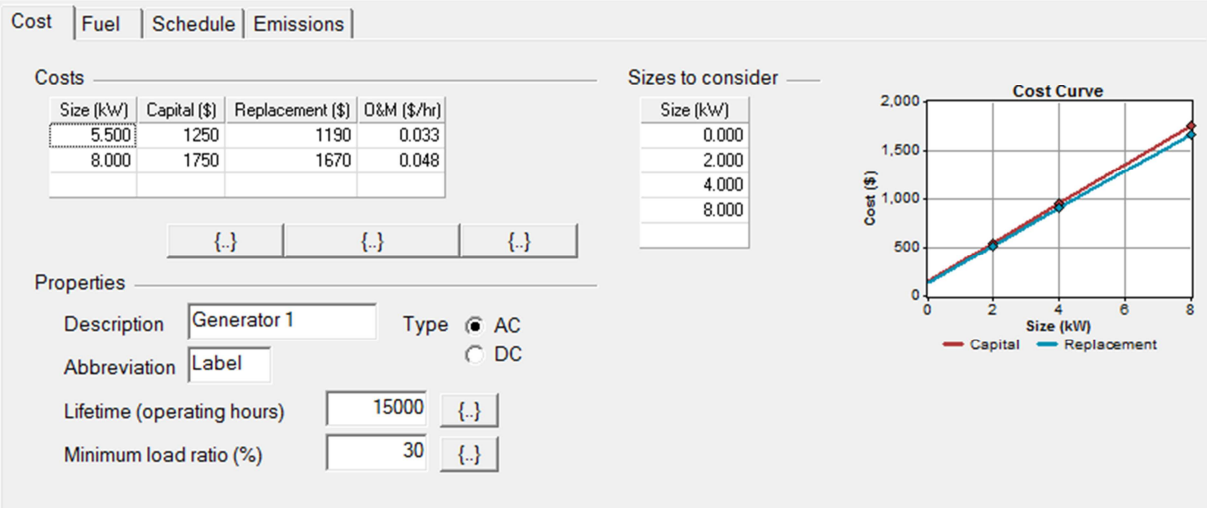
Joonis L2.8. Muunduri sisendite andmed

L2.3.5 Generaator

Informatsiooni generaatorite kohta leian internetist. Näitks AS Mecro koduleheküljelt http://www.stokker.ee/generaatorid/kerged-generaatorid/g:7810/ [34].

Generaatori hinnale lisan ka mõningad lisakulud, nagu transport ja näiteks majapidamises vastava ruumi ettevalmistamine, ühendused. Maksumuse alla ei arvestata kütuse kulu.

Generaatori kapitali- ja hoolduskulud arvutasin tuginedes metoodilise juhendi infole. Kui diiselgeneraatori kapitali- ja hoolduskulu kWh kohta on keskmiselt 0,006 eurot, siis selleks et saada hoolduskulu ühe töötunni kohta korrutan keskmise hoolduskulu generaatori võimusega läbi.

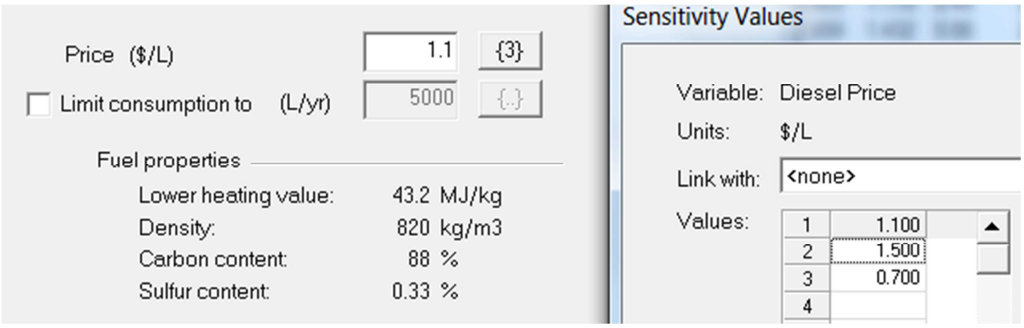


Joonis L2.9. Generaatori sisendite andmed

Samast aknast valin ka kütuseliigi, milleks on diisel.

Töölehe ressursside aknas sisestan diiselkütuse hinna 1,1 eurot liitri kohta, mille sain OÜ Neste Eesti koduleheküljelt http://www.nesteoil.ee/ [33].

Et vastata küsimusele, kas diiselkütuse hinna muutumine mõjutab süsteemi valikuid, lisan kaks tundlikkuse muutujat.



Joonis L2.10. Generaatori ressursside ja tundlikkuse muutujate andmed

L2.4. Optimeerimistulemuste võrdlus

Kui kõik vajalikud andmed on olemas, saab programm antud sisendite põhjal arvutada kõige kuluefektiivsema võimaluse. Programm väljastab eraldi iga võimaliku variandi odavaima lahenduse. Minu tulemused on järgmised:

Kui diiselkütuse hind on 0,7 €/l.

Diesel Price ($/L) 0.7

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	Label (kW)	H3000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
3	2	2	2	$ 6,790	623	$ 14,757	0.444	0.70	454	708
	2	1	2	$ 2,740	1,357	$ 20,088	0.605	0.00	1,275	2,412
3	2			$ 3,070	1,997	$ 28,598	0.861	0.45	2,006	6,469
	2			$ 550	2,591	$ 33,672	1.014	0.00	2,716	8,760

Joonis L2.11. Optimeerimise tulemus diiselkütuse hinnaga 0,7 €/l

Kui diiselkütuse hind on 1,1 €/l.

Diesel Price ($/L) 1.1

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	Label (kW)	H3000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
3	2	2	2	$ 6,790	805	$ 17,080	0.514	0.70	454	708
	2	2	2	$ 4,270	1,740	$ 26,518	0.798	0.00	1,212	1,871
3	2			$ 3,070	2,799	$ 38,853	1.170	0.45	2,006	6,469
	2			$ 550	3,677	$ 47,559	1.432	0.00	2,716	8,760

Joonis L2.12. Optimeerimise tulemus diiselkütuse hinnaga 1,1 €/l

Kui diiselkütuse hind on 1,5 €/l

Diesel Price ($/L) 1.5

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	Label (kW)	H3000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
3	2	2	2	$ 6,790	987	$ 19,403	0.584	0.70	454	708
	2	2	2	$ 4,270	2,225	$ 32,717	0.985	0.00	1,212	1,871
3	2			$ 3,070	3,601	$ 49,108	1.478	0.45	2,006	6,469
	2			$ 550	4,764	$ 61,446	1.850	0.00	2,716	8,760

Joonis L2.13. Optimeerimise tulemus diiselkütuse hinnaga 1,5 €/l

Diiselgeneraatorist ja salvestist koosnevale kombinatsioonile on programm pidanud majanduslikult tasuvamaks lahendust, mille puhul investeeritakse vähem salvestitesse ja rohkem kütusesse. Kuid juba diiselkütuse hinna 0,4 €/l tõusu puhul on mõistlikum investeerida salvesti(te)sse.

Diesel ($/L)	PV (kW)	Label (kW)	H3000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kW...	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
1.100	3	2	2	2	$ 6,790	805	$ 17,080	0.514	0.70	454	708
1.500	3	2	2	2	$ 6,790	987	$ 19,403	0.584	0.70	454	708
0.700	3	2	2	2	$ 6,790	623	$ 14,757	0.444	0.70	454	708

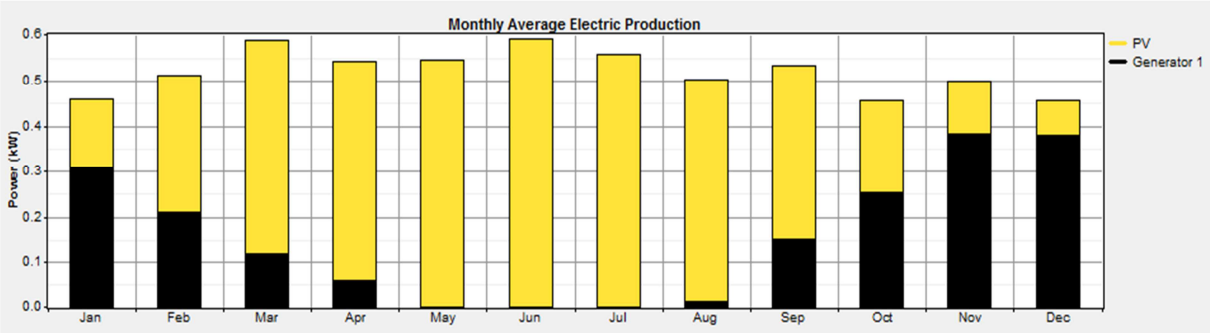
Joonis L2.14. Optimeerimistulemuse tundlikkuse muutujate võrdlus

Jooniselt L2.14 on näha, et diiselkütuse hinna muutus peale käidukulu midagi ei muuda.

L2 5 Järeldus

Kõige kuluefektiivsem on päikesepaneelidest, diiselgeneraatorist ja salvestitest koosnev konfiguratsioon.

Salvesti olemasolu omab suurt tähtsust, sest see mitte ainult ei salvesta päikesepaneelide toodetud energiat, vaid tagab ka diiselgeneraatori sujuva töö. Diiselgeneraatori sujuv töö aitab kokku hoida kütusekulusid.



Joonis L2.15. Kuu keskmine elektri tootmise graafik

Diiselkütuse hinna kõikumine ei mõjuta kuluefektiivseima lahenduse konfiguratsiooni.

Kogu süsteemi soetamise kulu on umbes 6800 eurot. Iga-aastane kütuse- ja hoolduskulu on umbes 800 eurot. Süsteemi kogu elutsükli hinnaks (Total NPC) on umbes 17000 eurot, mis teeb kWh hinnaks (Levelized COE) 0,505 eurot. Lisaks tuleks investeerida vajamineva abiruumi rajamiseks kuhu diiselgeneraator, muundur ja salvesti paigaldada. Arvestama peab ka võimalusega, et seadmete eluiga on lubatust lühem.

Vaadates AS Elektrilevi hinnakirja, siis 16 A liitumise tasu on ca 2300 eurot, kui majapidamine asub võrgust vähemalt 400 meetri kaugusel. Odavaim kWh hind on 0,412 eurot (http://www.elektrihind.ee/paketid) [35]. Kui päevane keskmine tarbimine on 7,1 kWh siis aastane elektrikulu oleks umbes 1070 eurot.

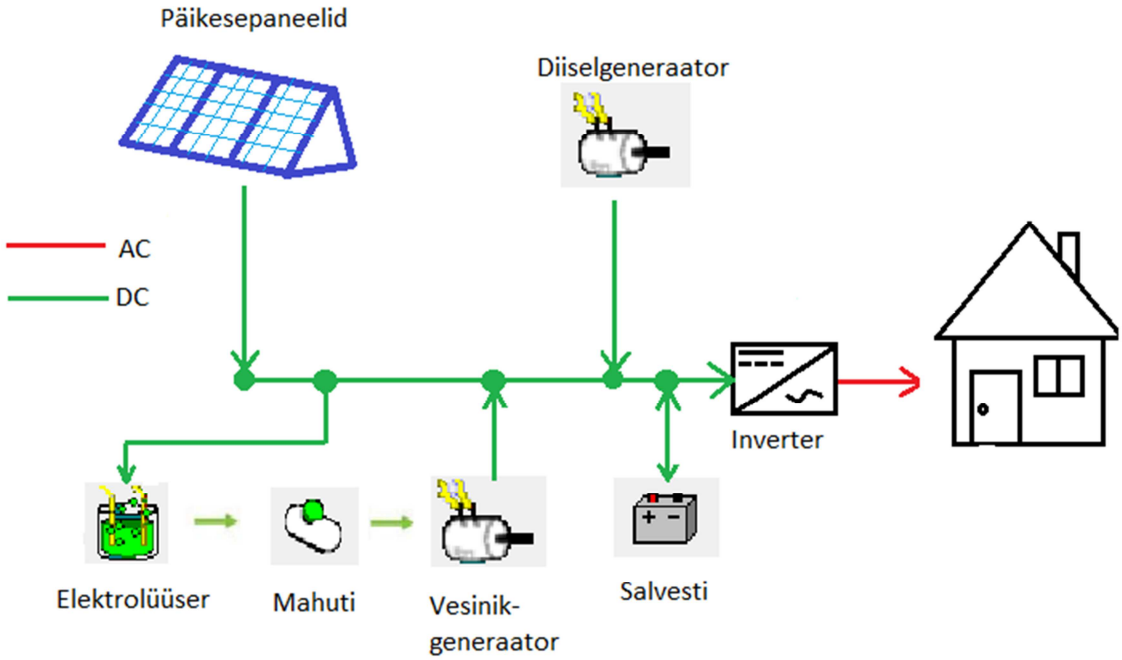
Seega, kui kinnistu asub olemasolevale elektrivõrgule lähedal ja puudub vajalik ruum seadmete hoidmiseks, siis majanduslikult otstarbekam on liituda olemasoleva võrguga ja mitte investeerida abihoone rajamisse ja kallisse tehnikasse, mida võibolla peab sagedamini ümber vahetama, kui tootja omalt poolt lubab. Soovi korral võib kaaluda paari päikesepaneeli paigaldamist.

Laboritöö „KAHE ENERGIASALVESTIGA MIKROVÕRK“

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektrotehnika instituut

Laboratoorne töö nr.3			
Kahe energiasalvestiga mikrovõrk			
Üliõpilane:		Õppejõud:	
		Mõõdetud:	
		Esitatud:	



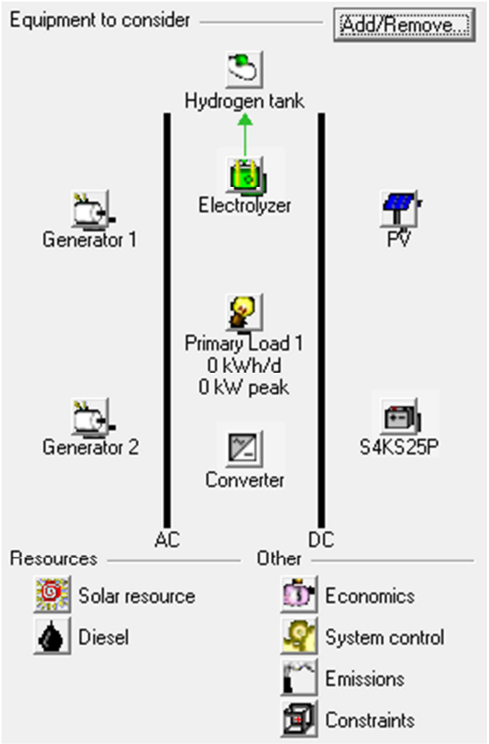
Joonis 3.1. Fiktiivse elektrivõrgu põhimõtteskeem

Tallinn 2015

L 3.1 Lähteülesanne

Keskmise ööpäevase elektritarbega väiketalus on võimalik elektrivõrgu toite puudumisel luua autonoomne elektriga varustussüsteem, mis koosneb päikesepaneelidest (katusele saab paigaldada maksimaalselt 20 x 250 W paneeli), diiselgeneraatorist, hüdrolüüserist ja vesinikgeneraatorist. Tutvun simulatsiooniprogrammiga ja analüüsin, kas kõikide komponentide kasutamine süsteemis on majanduslikult otstarbekas? Või kasutada komponentide erinevaid konfiguratsioone? Kas salvesti kasutamine on otstarbekas?
Leian kuluefektiivseima lahenduse.

L3.2 Modelleeritud skeemi lühikirjeldus



Joonis L3.2. Sisendite ja ressursside tööskeem

Skeemil on AC- ja DC-siinile ülesehitatud diiselgeneraatori, päikesepaneelide, hüdrolüüseri, vesinikgeneraatori ja salvestitega lahendus (Joonis L3.2)

Optimeeritav skeem kujutab endast kõiki tehnoloogilisi valikuid, mida tahame uurida. See tähendab, algne skeem võib sisaldada tehnoloogilisi valikuid, mis pole majanduslikult põhjendatud .

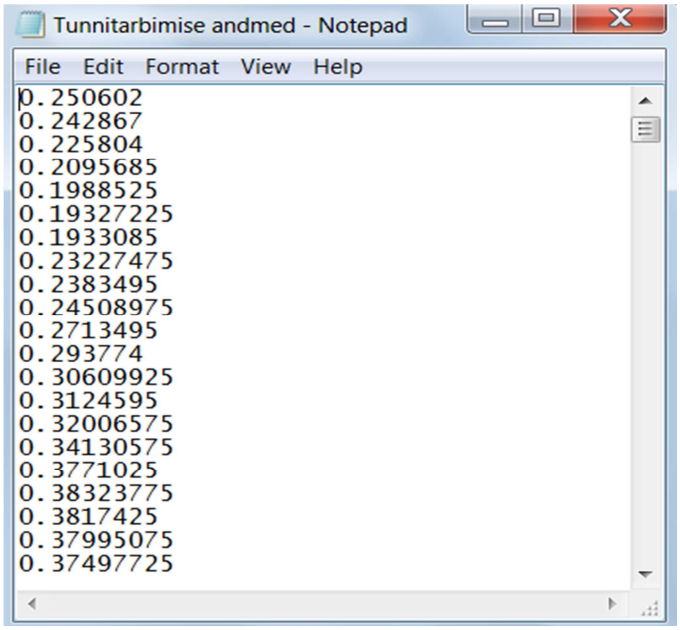
L3.3 Andmete hankimine ja sisestamine

Valinud programmi poolt pakutavast nimekirjast soovitud komponendid, tekib nendest töölehele sisendite skeem ja ressursside loetelu, mida antud komponendid kasutavad.

Andmed kodutarbimise kohta võtan AS Elektrilevi koduleheküljelt https://www.elektrilevi.ee/tyypkoormusgraafikud [12]. Tunnitarbimise arvutan ja esitan kWh-des. Näiteks tarbitakse aprillis kokku 250 kWh, siis 1. aprilli esimese tunni tarbimiseks on tüüpkoormusgraafiku järgi 250 · 0,001209269 = 0,302 kWh.

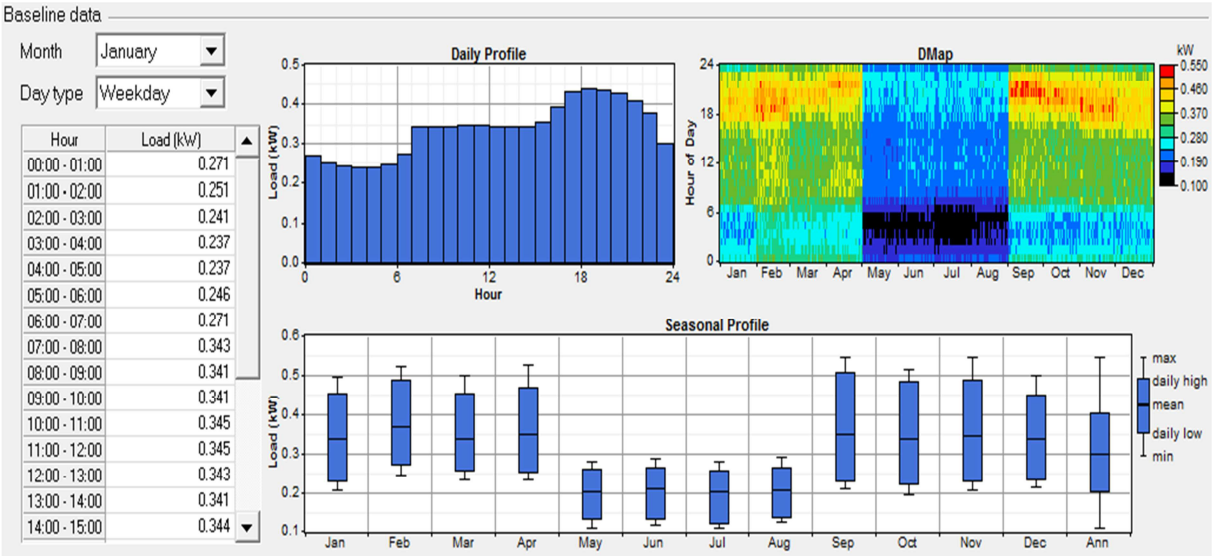
Kuna majapidamises sai arvestatud , et talvel tarbitakse rohkem kui suvel, siis korrutasin suvekuude (mai-august) näidud 150 kWh-ga ja ülejäänud kuude näidud 250 kWh-ga.

Et programm saaks vastavaid andmeid kasutada, koostan tunnitarbimise *.text* faili, kuhu kopeerin terve aasta ehk 8760 tunni andmed.



Joonis L3.3. Tunnitarbimine *text*-failina

Programm väljastab sisestatud andmete põhjal erinevaid tabeleid ja graafikuid, mis kirjeldavad energia tarbimist ühe ööpäeva kohta (*Daily Profile*), kuude lõikes terve aasta kohta (*Sessional Profile*) ja iga sisestatud 8760 tunni kohta aastas (*DMap*).



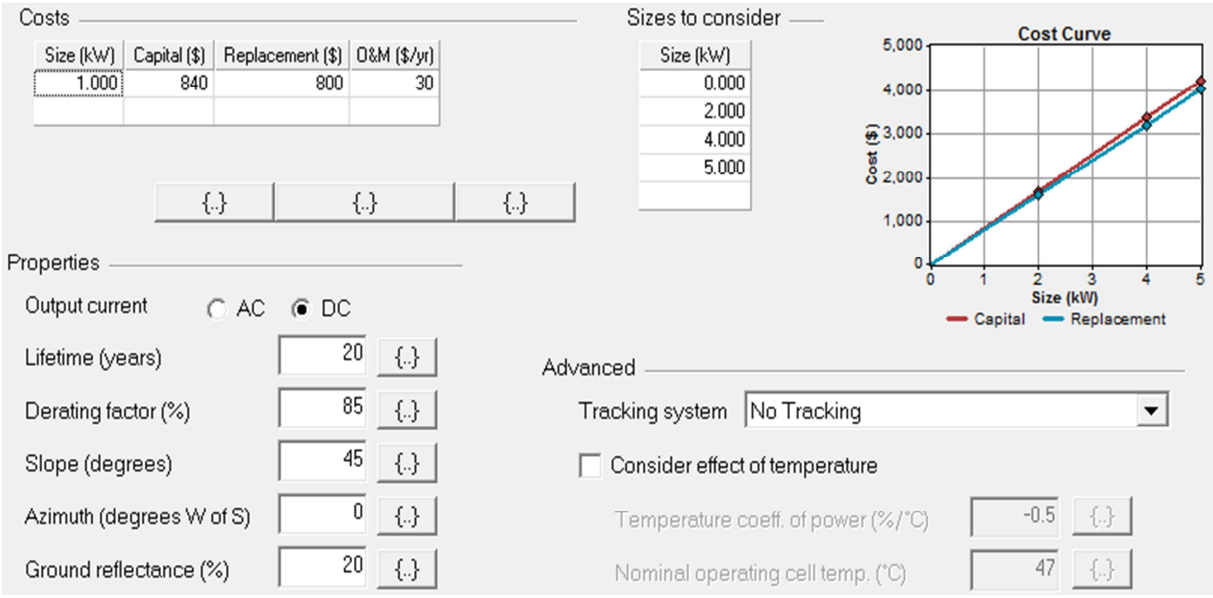
Joonis L3.4. Majapidamise koormusgraafikud

Sisestatud andmete põhjal on koormuseks väikemajapidamine, mille keskmine tarbimine on 7,1 kWh päevas. Maksimaalne koormus on 548 W ja keskmine koormus umbes 300 W.

L3.3.1 Päikeseenergia

Päikesepaneeli sisendite lehel tuleb lisada analüüsiks vajalikud andmed. Andmed sain metoodilisest juhendist.

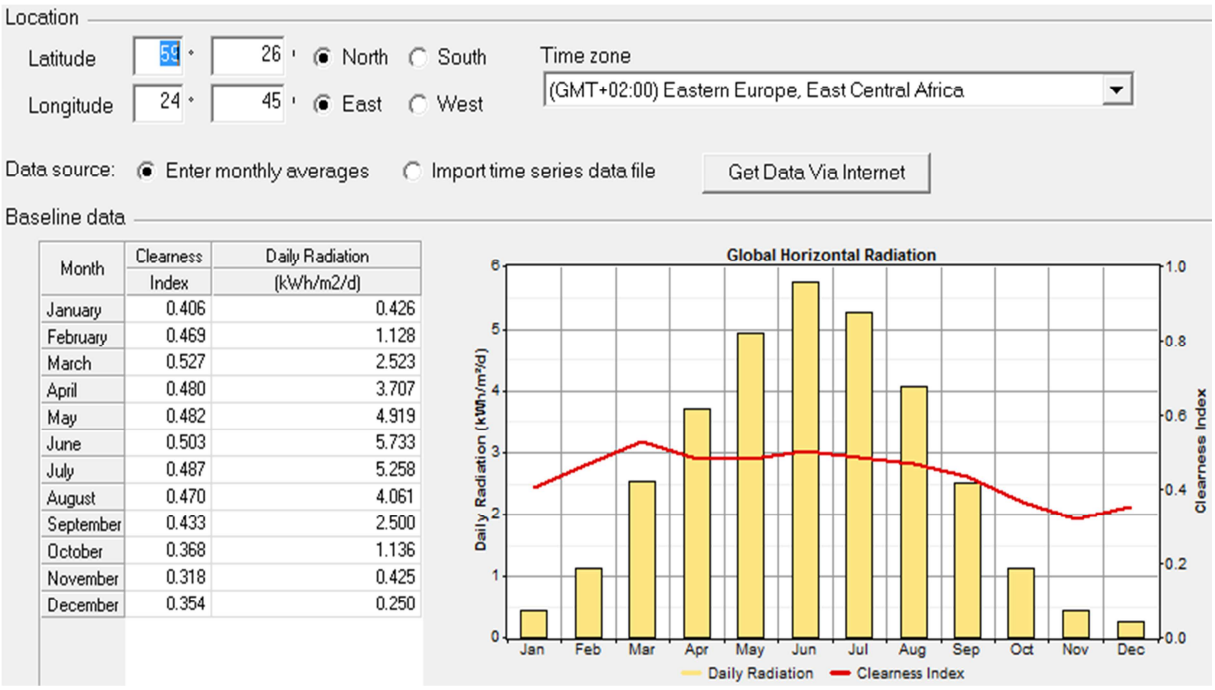
Võimsused, mille vahel soovin, et programm valiku teeks, jäävad vahemikku 0,0...4 kW.



Joonis L3.6. Päikesepaneeli sisendite andmed

Päikesepaneeli ressursside lehel sisestan analüüsitava (meie puhul Eesti) asukoha ja andmed päikeseenergia kohta. Päikesekiirguse intensiivsus ja kestvus sõltub laiuskraadist.

Andmed võtan metoodilises juhendis olevast tabelist. Jagades aktinomeetrilise ressursi kWh/m^2 päevade arvuga antud kuus.



Joonis L3.7. Päikeseenergia ressursside andmed

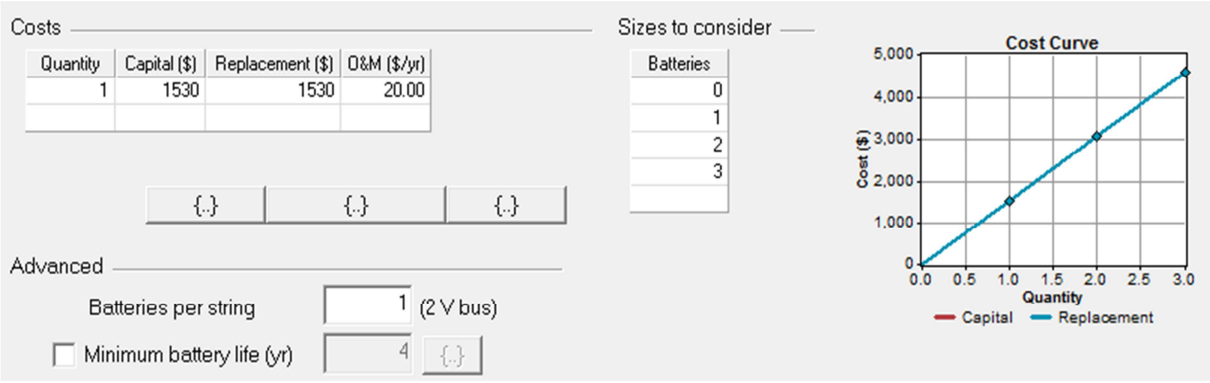
L3.3.2 Salvestid

Kuna süsteemis on päikesepaneel, siis on valikut tehes tähtis, et tegemist oleks *deep-cycle* märkega salvestiga. Tuleb tagada, et süsteem töötab akusid kahjustamata öösel pikalt salvestite peal.

Seetõttu valisin programmi poolt pakutava salvesti *Hoppecke 24 OpzS 3000*, mille hinnaks on *Biotechx Energy Internationa* koduleheküljel 1530 eurot (http://www.biotechx.com/index.php?Section=Section&type=Product&cat=117&offset=3) [14].

Programm analüüsib, kas salvesti kasutamine on majanduslikult mõistlik, kui lisan tabelisse *Size to consider* arvväärtuse null.

Lähtuvalt metoodilisest juhendist märgin aastaseks hoolduskuluks 20 eurot.

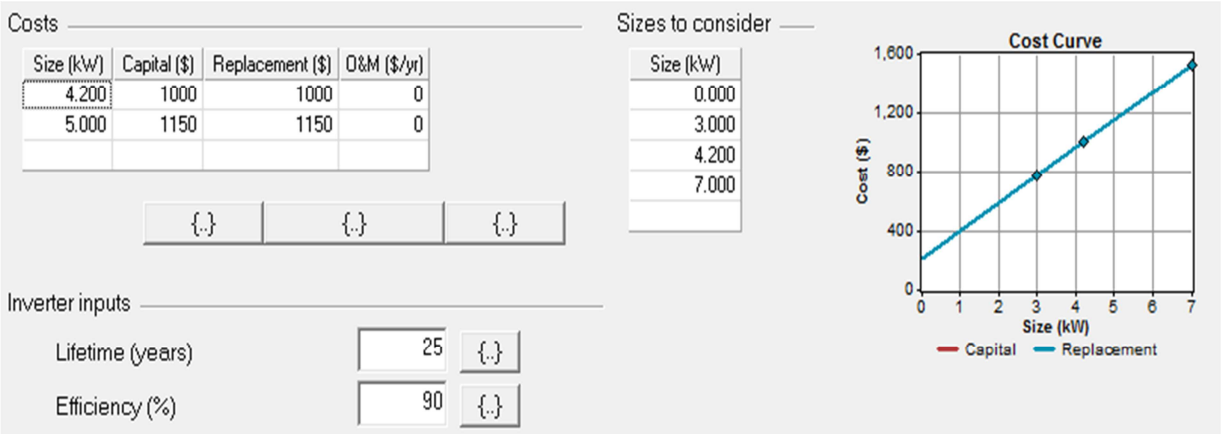


Joonis L3.8. Salvesti sisendite andmed

L3.3.3 Muundurid

Muundur muudab vahelduvvoolu alalisvooluks (alaldi), alalisvoolu vahelduvvooluks (inverter, vaheldi) või mõlemat.

Vastavad muundurite hinnad saan juhendist. Hoolduskuluks märkisin nulli. Muunduri suurused, mille vahel programm peab valima on 0,0 kW-st 7,0 kW-ni.



Joonis L3.9 Muunduri sisendite andmed

L3.4. Generaatorid

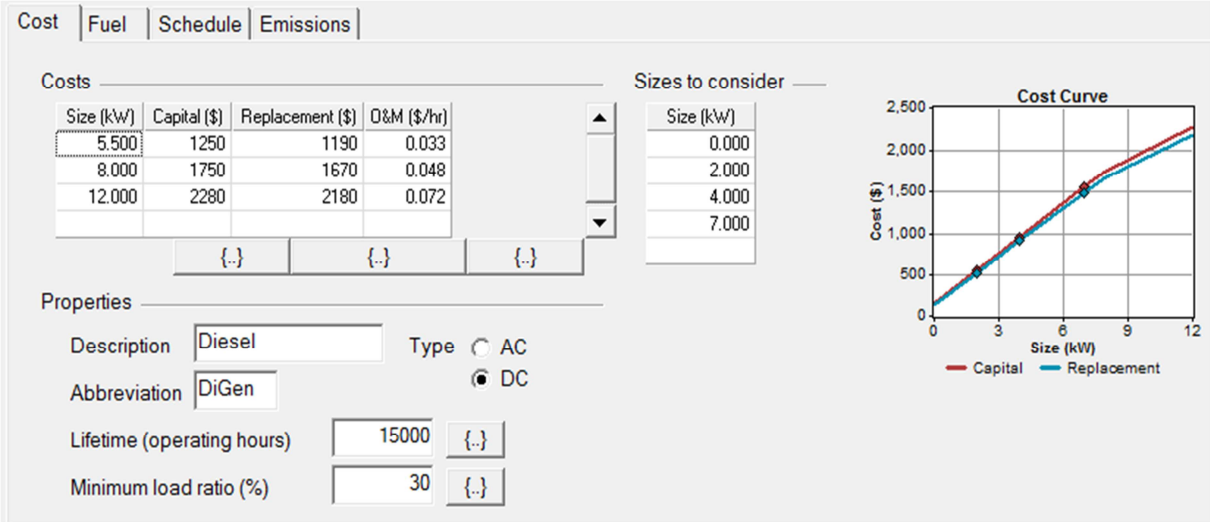
Informatsiooni generaatorite kohta leian metoodilisest juhendist ja internetist. Näiteks AS Mecro koduleheküljelt http://www.stokker.ee/generaatorid/kerged-generaatorid/g:7810/ [34].

Süsteemis on kaks generaatorit. Üks diiselkütusel töötav generaator ja teine vesinikuga töötav generaator.

Generaatorite hinnale lisan ka mõningad lisakulud, nagu transport ja näiteks majapidamises vastava ruumi ettevalmistamine, ühendused. Maksumuse alla ei arvestata kütuse kulu.

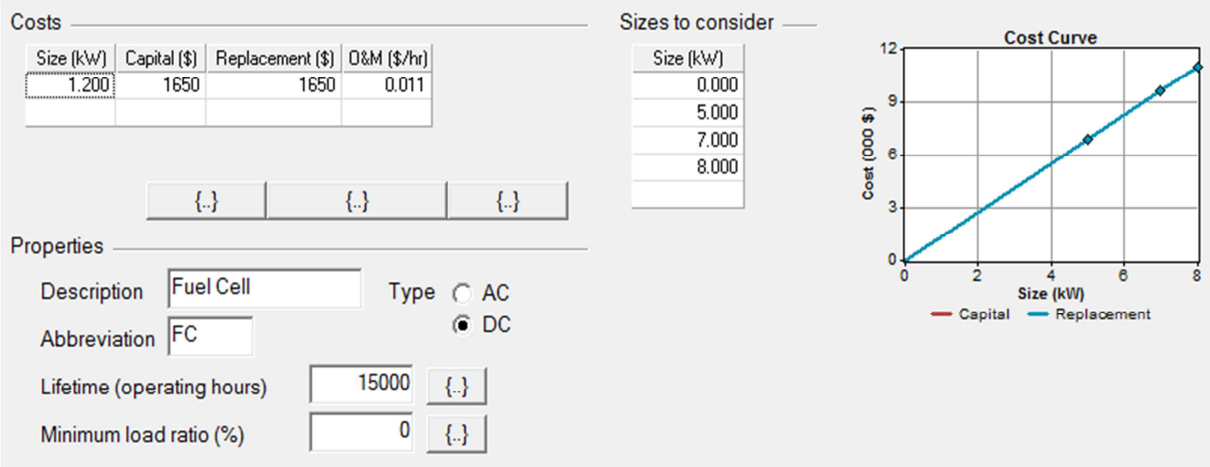
Generaatorite kapitali- ja hoolduskulud arvutasin tuginedes metoodilise juhendi infole. Diiselgeneraatori kapitali- ja hoolduskulu kWh kohta on keskmiselt 0,006 eurot ja vesinikgeneraatoril 0,009 eurot, siis selleks et saada hoolduskulu ühe töötunni kohta korrutan keskmise hoolduskulu generaatori võimusega läbi.

Diiselgeneraatori puhul on andmed järgmised:



Joonis L3.10. Diiselgeneraatori sisendite andmed

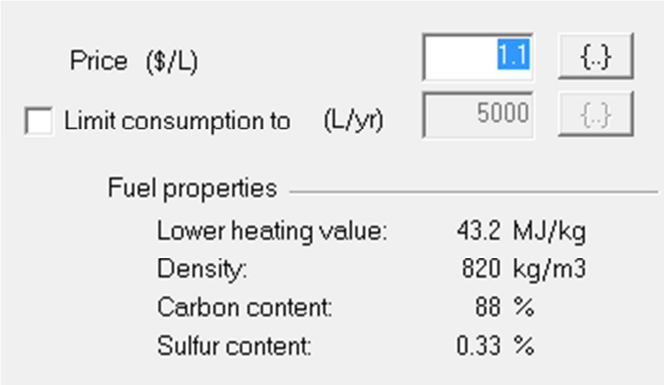
Vesinikgeneraatori puhul on andmed järgmised:



Joonis L3.11. Vesinikgeneraatori sisendite andmed

Mõlema generaatori puhul määran ka kütuseliigi. Diiselgeneraatoril diiselkütus ja vesinikgeneraatoril vesinikkütus (*Stored hydrogen fuel*).

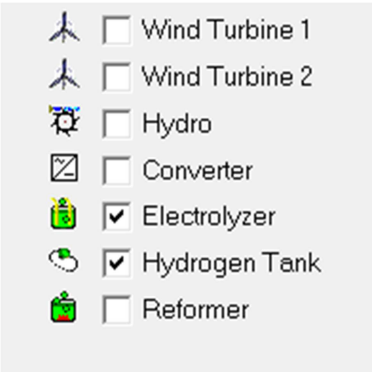
Töölehe ressursside aknas sisestan diiselkütuse hinna 1,1 eurot liitri kohta, mille sain OÜ Neste Eesti koduleheküljelt http://www.nesteoil.ee/ [33].



Joonis L3.12. Diiselgeneraatori ressursside andmed

L3.5. Elektrolüüser

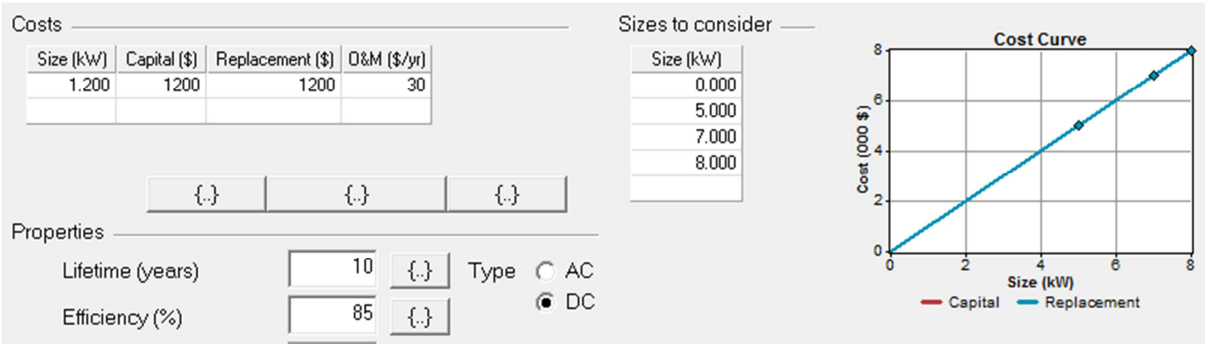
Kuidas saada vajaminevat energiat protsessi jaoks, valin programmist. Selleks lisan sisendite tööskeemile elektrolüüseri ja vesiniku mahuti, mille valin komponentide nimistust.



Joonis L3.13. Elektrolüüser ja mahuti komponentide nimistus

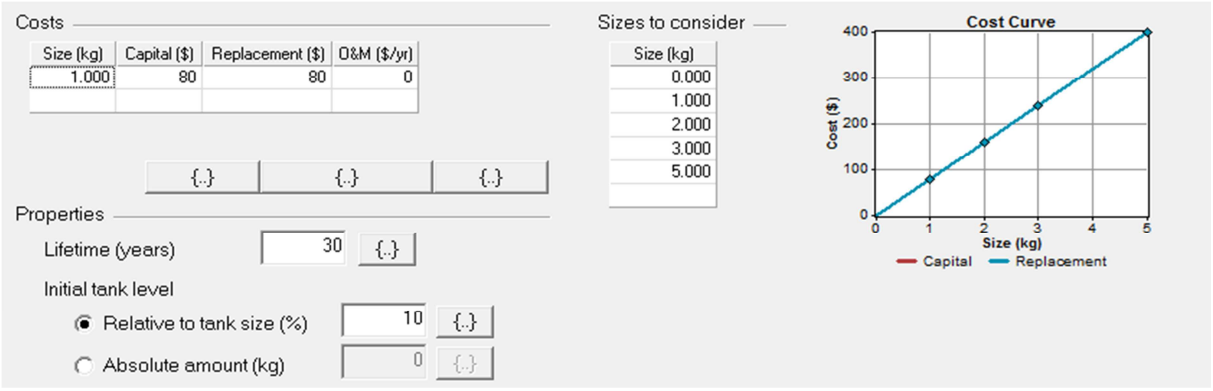
Lisan tabelitesse (joonis L3.11 ja joonis L3.12) seadmete maksumuse, hoolduskulud, eluea ja efektiivsuse, ning suurused mida soovid, et programm analüüsiks. Vastavad andmed võtan metoodilisest juhendist.

Elektrolüüseri puhul on sisendite andmed järgmised :



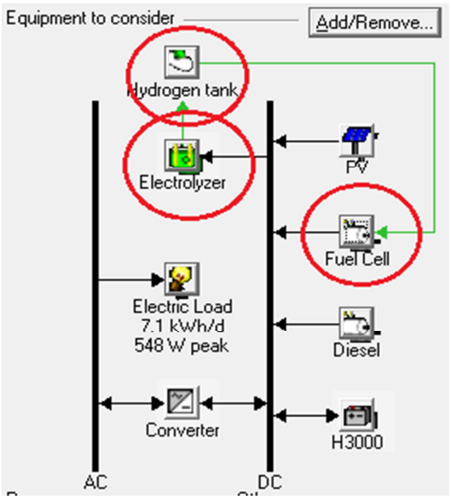
Joonis L3.14. Elektrolüüseri sisendite andmed

Programm analüüsib ka mahuti vajalikkust vesiniku hoiustamiseks etteantud tarbimise korral. Mahuti sisendandmed on järgmised:



Joonis L3.15. Mahuti sisendite andmed

Kui mahuti ja elektrolüüseri andmed on sisestatud, ühendab programm automaatselt need eelnevalt sisestatud vesinikgeneraatoriga.



Joonis L3.16. Elektrolüüser, mahuti ja vesinikgeneraator sisendite tööskeemil

L3.6. Optimeerimistulemuste võrdlus

Kui kõik vajalikud andmed on olemas, saab programm antud sisendite põhjal arvutada kõige kuluefektiivsema võimaluse. Programm väljastab eraldi iga võimaliku variandi odavaima lahenduse. Minu tulemused on järgmised:

	PV (kW)	FC (kW)	DiGen (kW)	H3000	Conv. (kW)	Elec. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kW...	Ren. Frac.	Capacity Shorta..	Diesel (L)	FC (hrs)	DiGen (hrs)
	4		2	2	3.0		$ 7,745	806	$ 18,044	0.543	0.83	0.00	435		1,4...
			2	1	3.0		$ 2,855	2,084	$ 29,490	0.888	0.00	0.00	1,579		5,0...
	4	5	2	2	3.0	5	$ 19,620	1,103	$ 33,723	1.015	0.83	0.00	435	0	1,4...
	4		2		3.0		$ 4,685	2,574	$ 37,590	1.132	0.53	0.00	1,950		6,2...
			2		3.0		$ 1,325	3,380	$ 44,527	1.340	0.00	0.00	2,716		8,7...
		5	2	1	3.0	5	$ 14,730	2,381	$ 45,169	1.360	0.00	0.00	1,579	0	5,0...
	4	5	2		3.0	5	$ 16,560	2,872	$ 53,270	1.603	0.53	0.00	1,950	0	6,2...
		5	2		3.0	5	$ 13,200	3,677	$ 60,206	1.812	0.00	0.00	2,716	0	8,7...

Joonis L3.17. Optimeerimistulemuste andmed

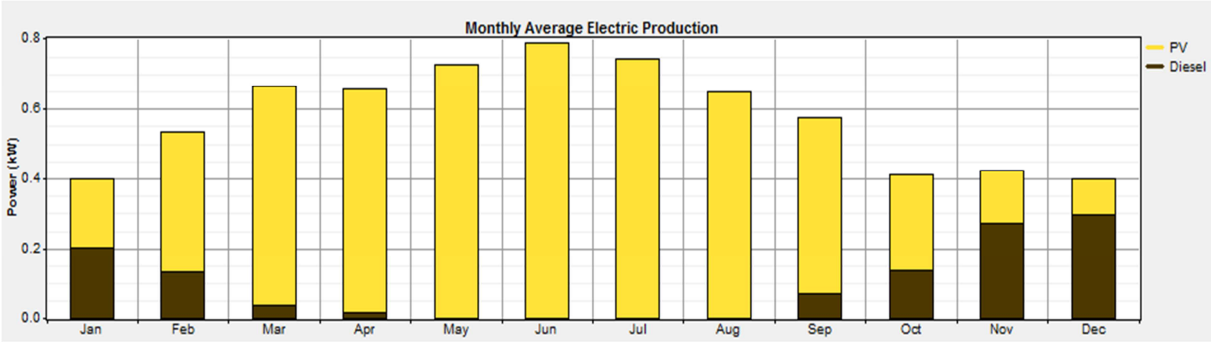
Tulemustest on nähe, et majanduslikult soodsaim on päikesepaneelide, diiselgeneraatori ja salvestiga variant mille algkapital on 7745 eurot ja aastane opereerimiskulu 806 eurot, mis teeb kWh hinnaks 0,543 eurot . Teiseks, on kasutada lihtsalt salvestit ja diiselgeneraatorit, mille algne investeering on mitu korda soodsam. Aastane opereerimiskulu on aga tunduvalt kallim - 2084 eurot, mis teeb kWh hinnaks 0,888 eurot.

Arvutustest on nähe, et süsteemi kuhu kuulub vesinikgeneraator ja elektrolüüser, ei ole mõistlik antud olukorras kasutada. Kõikides skeemides, kus on vesinikgeneraator, on selle toodetavaks energiaks null. Põhjus on selles, et toodetav päikeseenergia läheb kas kohe kasutusse või on see odavam ja seega mõistlikum lühiajaliselt salvestada akudesse, mitte aga elektrolüüsimise kaudu vesinikuna. Varuna kasutab süsteem diiselgeneraatorit.

L3 7 Järeldus

Kõige kuluefektiivsem on päikesepaneelidest, diiselgeneraatorist ja salvestitest koosnev konfiguratsioon.

Salvesti olemas olu omab suurt tähtsust, sest see mitte ainult ei salvesta päikesepaneelide toodetud energiat, vaid tagab ka diiselgeneraatori sujuva töö. Diiselgeneraatori sujuv töö aitab kokku hoida kütusekulusid.



Joonis L3.18. Kuu keskmine elektri tootmise graafik

Päikesepaneelid toodavad aastas 4246 kWh ja diiselgeneraator peab katma veel 842 kWh energiavajaduse.

Kogu süsteemi soetamise kulu on umbes 7748 eurot. Iga-aastane kütuse- ja hoolduskulu on umbes 806 eurot. Süsteemi kogu elutsükli hinnaks (Total NPC) on umbes 18000 eurot, mis teeb kWh hinnaks (Levelized COE) 0,543 eurot.