



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut  
Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK70LT

*Madis Uemaa*

**ELEKTRITARBIMISE JUHTIMISSÜSTEEMI  
RAKENDAMISE MÕJU TÖÖSTUSES**

Autor taotleb  
tehnikateaduste magistri  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2014

TTÜ mehhatroonika instituut  
Mehhatroonikasüsteemide õppetool

## **MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

2014. aasta 4. semester

Üliõpilane: Madis Uuema 122117MAHMM (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava MAHM02/09

Eriala Mehhatroonika

Juhendaja: teadur, Robert Hudjakov (amet, nimi)

Konsultandid: Priit Uuema, Elektroenergeetika spetsialist, 55650605

(nimi, amet, telefon)

### **MAGISTRITÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles) Elektritarbimise juhtimissüsteemi rakendamise mõju tööstuses

(inglise keeles) Impact of electricity load management system implementation in industry

### **Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Olemasolevate ning projekteeritava elektritarbimise juhtimissüsteemide uurimine ja hindamine	31.03.2014
2.	Veepumbale elektritarbimise juhtimissüsteemi projekteerimine ning prototüübi käivitamine.	17.04.2014
3.	Alternatiivse elektritarbimise mõõtmismudeli loomine mõõtmaks elektrienergia kulu ilma juhtimissüsteemi prototüübita.	21.04.2014
4.	Elektritarbimise juhtimissüsteemi käivitamine ning tulemuste kogumine	29.04.2014
5.	Juhtimissüsteemi tulemuste hindamine ja kokkuvõtete tegemine	04.05.2014

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Ülesande peamine eesmärk on vähendada tööstusettevõtete elektritarbimise kulusid. Selleks tuleb konstrueerida juhtimissüsteem, mis võtab internetist avatud elektrituru hinnakirja ning käivitab elektritarbijad (nt. veepump) soodsaimal võimalikul ajal.

**Täiendavad märkused ja nõuded:**.....

**Töö keel:** Eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 12.05.2014

**Töö esitamise tähtaeg** 22.05.2014

Üliõpilane Madis Uuema /allkiri/ ..... kuupäev.....

Juhendaja Robert Hudjakov /allkiri/ ..... kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

## SISUKORD

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE .....	2
SISUKORD.....	3
EESSÕNA.....	5
1. SISSEJUHATUS.....	6
2. ELEKTRIKULUDE VÄHENDAMINE TÖÖSTUSES.....	9
2.1. Elektri koormuse nihutamine.....	9
2.2. Elektri tarbimise nihutamise eeldused.....	10
2.3. Tarbimise optimeerimine.....	12
3. VEEPUMBA ELEKTRITARBITMISE JUHTIMISSÜSTEEM .....	15
3.1. Juhtimissüsteemi rakendamine veepumbale.....	15
3.2. Pumbajaama elemendid.....	17
3.2.1. Veepump ja sagedusmuundur.....	17
3.2.2. Vee reservuaarid ja nivoo andur.....	17
3.2.3. Pumbajaama kontrollid.....	18
3.3. Pumba tööaja optimeerimine.....	20
3.4. Juhtimissüsteemi projekteerimine.....	23
3.4.1. Optimeerimismootor.....	23
3.4.2. Kontrolleri riistvara.....	25
3.4.3. Kontrolleri tarkvara.....	31
3.4.4. Suhtlus.....	36
4. ELEKTRITARBITMISE JUHTIMISSÜSTEEMI RAKENDAMINE.....	37
4.1. Töögraafiku optimeerimine.....	37
4.2. Juhtimissüsteemi tulemused.....	40
5. TULEMUSTE ANALÜÜS.....	42
5.1. Testi tulemuste analüüs.....	42
5.2. Analüüs juhtimissüsteemi mõjust elektri kulule.....	43
5.2.1. Kulutatud elektrienergia hind.....	43
5.2.2. Alternatiivsete stsenaariumite elektrihinnad.....	45
5.2.3. Tulemuste võrdlus.....	49

<b>KOKKUVÕTE</b> .....	50
<b>SUMMARY</b> .....	53
<b>KIRJANDUSE LOETELU</b> .....	56
<b>LISAD</b> .....	58
Lisa 1 – Test päeva (23.05) optimeerimise sisendid/väljundid .....	58
Lisa 2 – Test päeva (23.05) pumba statistika .....	59

## **EESSÕNA**

Antud lõputöö on edasiarendus TTÜ energeetikateaduskonna doktorandi Priit Uemaa doktorantuuri artiklile „Cost-Effective Optimization of Load Shifting in the Industry by Using Intermediate Storages“. Lõputöö koostamine ja andmete kogumine käis ettevõtte Graanul Invest Helme tehases. Ettevõtte poolt abistasid lõputöö valmimisel kaasa härra Priit Uemaa, härra Kalle Moosus ning härra Stanislav Skiruk. Lisaks soovib autor avaldada tänu härra Allan Puusepale.

# 1. SISSEJUHATUS

Viimase kahe aastakümnega on nii elektri jaamade kui ka tarbijate tunduvalt suurenenud elektri võimsuse ja energia kulude kasv. Tõusnud on nii põlevate kütuste hinnad kui ka kulud kapitalile ehitamiseks uusi tootmisvõimsusi. Eriti on mõjutanud hindade kasv tööstussektorit, kelle elektrienergia lõpptarbimine on kõikidest tarbimisest suurim (kuni 40% [1]).

Euroopa Liidu kliimapoliitika koos elektri- ja energiaturgude liberaliseerimisega loovad mitmeid väljakutseid ja võimalusi turuosalistele. Eesti üleminek täielikult avatud elektriturule 1. Jaanuaril 2013 on avanud tööstustele uusi võimalusi kuidas hoida kulusid kokku elektri tarbimise pealt. Energiamahukates tootmistes, nagu puidutööstus, võib elektrikulu olla koguni 4-12% lõpptootete kogukuludest [2]. Seega on konkurentsi eelis just nendel ettevõtetel, kellel on paindlikust elektrikulude kokkuhoidmiseks.

Eesti kuulub Nord Pool Spot elektri piirkonda. Peale Eesti hõlmab Nord Pool Spot ka Läti, Leedu, Soome, Rootsi, Norra ja Taani riiki (sele 1.1). Nord Pool Spotis määratakse elektri hind eraldi igaks tunniks ning igale piirkonnale eraldi. Kõikide kauplemisspiirkondade elektri hinnad iga päeva iga tunni kohta avaldatakse Nord Pool Spoti kodulehel eelmise päeva kella 13-ks Kesk-Euroopa aja järgi (CET – Central Europe Time). Lihtsustatult tähendab see seda, et tarbija teab ette elektri hinda alates järgmise päeva kella 00.00 kuni 24.00 iga tunni kohta [3].



Sele 1.1.1 Nord Pool Spot kauplemisspiirkonnad [3]

Nagu enamasti elektriturudel, nõnda võib elektri hind ka Nord Pool Spotis varieeruda märkimisväärselt ühe päeva lõikes. Tiputarbimise ajal on enamasti hind tunduvalt kõrgem kui minimaalse tarbimise perioodil öösiti. Kuigi hinna kujunemine järgib teatud mustrit (öösi on hind madalam kui hommikul ja õhtusel tipp perioodil), kujuneb iga päev välja turu

olukorrast sõltuv unikaalne hinnagraafik. Seega, kui ettevõttes töötavad seadmed kõrge elektri tunnihinna perioodil, kasvavad ka ettevõtte elektrikulud.

Üks võimalus elektritarbimise kulude vähendamiseks on tarbimise nihutamine vastavalt turu hinnale (Load Management). Lühidalt tähendab see tootmist siis, kui elektrihind on madal ning tootmise peatamist siis, kui elektrihind on kõrge, ilma, et väheneks tööstuse lõppprodukti toodang.

Käesolev lõputöö on edasiarendus Tallina Tehnikaülikooli energeetikateaduskonnas doktoriõppes välja töötatud teoreetilisele mudelile, kuidas on võimalik elektritarbimise nihutamisega hoida kokku elektrikuludelt [4]. Lõputöö eesmärgiks on rakendada elektritarbimise juhtimissüsteemi tööstuses leidmaks selle mõju tööstuse elektrihinna kuludele. Eesmärgi täitmiseks tuleb täita järgnevad ülesanded:

- Uurida meetodeid elektritarbimise nihutamiseks.
- Projekteerida juhtimissüsteemi prototüüp.
- Koguda andmeid juhtimissüsteemi mõjust.
- Hinnata juhtimissüsteemi tulemusi.

Kuna lõputöös projekteeritava prototüübiga on plaan edasi minna ning toodet tulevikus turustada, siis ei ole kõik prototüübi lahendused käesolevas töös detailselt välja toodud, vaid on pigem kirjeldatud lahenduste käiku. See tähendab, et töösse ei ole lisatud mitte programmide koodid, vaid kirjeldus, mida mingisugune programm tegema peaks. Töö kandvaks osaks on just tulemuste saavutamine ning nende hindamine.

Elektritarbimise juhtimissüsteemi rakendatakse puidu graanuleid tootvas ettevõttes. Ettevõttel asub üle Baltikumi 6 graanuleid tootvat tehast ning kaks elektri ja soojus koostootmisjaama. Prototüüp projekteeritakse tehasesse, kus asub ka koostootmisjaam. Juhtimissüsteemi ei rakendata tervele tehasele, vaid ainult ühele kohalikule tarbijale – veepumbale. Töös kasutatud toodete valikutel on lähtutud lisaks muule ka ettevõtte koostööpartneritest.

Artiklis [4] uuritud meetod ei ole ainukene võimalus tööstuses elektrikulude vähendamiseks. Riikides, kus avatud energiaturu süsteem on toiminud kauem, on välja töötatud ka teisi optimeerimise lahendusi (näiteks artikkel [5]) ning on ettevõtteid, kes arendavad välja erinevaid juhtimissüsteeme (Dong Energy). Kuid selliseid, mis arvestavad iga uue päeva

optimume, laialdaselt veel ei kasutata. Lihtsamateks lahendusteks on tundide reastamine hindade põhjal ning tarbijate tööle panemine ainult kõige odavamatel tundidel arvestamata väliseid kulusid.

Teiseks mooduseks tööstuses ja kodumajapidamistes elektrikulude kokkuhoiuks on energiasäästlike masinate kasutamine. Selliste energiasäästlike masinate soetamine võib aga maksma minna rohkem, kui on eeldatav kokkuhoid elektrikuludelt. Samuti ei pruugi kasutuses olevatest seadmetest energiasäästlikumaid variante turul veel eksisteerida.

Kuigi on olemas märke, et tööstuses hakatakse juhtima tootmist vastavalt turu hindadele ja olukorrale, ei ole see siiski veel täielikult väljatöötatud ja laialdaselt kasutusele võetud tehnika [6]. Eriti Eestis, kus turg alles avanes. See annab piisavalt põhjust projekteerimaks juhtimissüsteemi, mida saaks rakendada tööstuses kulude kokkuhoiu eesmärgil.

Töös on kasutatud kontrollrite programmeerimiseks programmi STEP – 7 Micro/WIN, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ehitamiseks programmi Movicon ning optimeerimismudelite lahendamiseks programmi Microsoft Solver Foundation.

Töö on üles ehitatud neljas plokis. Teises peatükis kirjeldatakse elektrikulude vähendamise võimalusi tööstuses ning analüüsitakse elektritarbimise nihutamise võimalusi. Kolmandas peatükis kirjeldatakse lähemalt veepumbale elektritarbimise juhtimissüsteemi prototüübi projekteerimist. Neljandas peatükis rakendatakse juhtimissüsteem ning kogutakse andmed. Viiendas peatükis analüüsitakse andmeid ning hinnatakse juhtimissüsteemi mõju tööstusele.

Elektritarbimise juhtimissüsteemi mõju analüüsimiseks rakendatakse juhtimissüsteem veepumbale. Andmed kogutakse ühe testpäeva kohta ning seejärel analüüsitakse süsteemi mõju elektrienergia maksumusele selle testpäeva näitel.

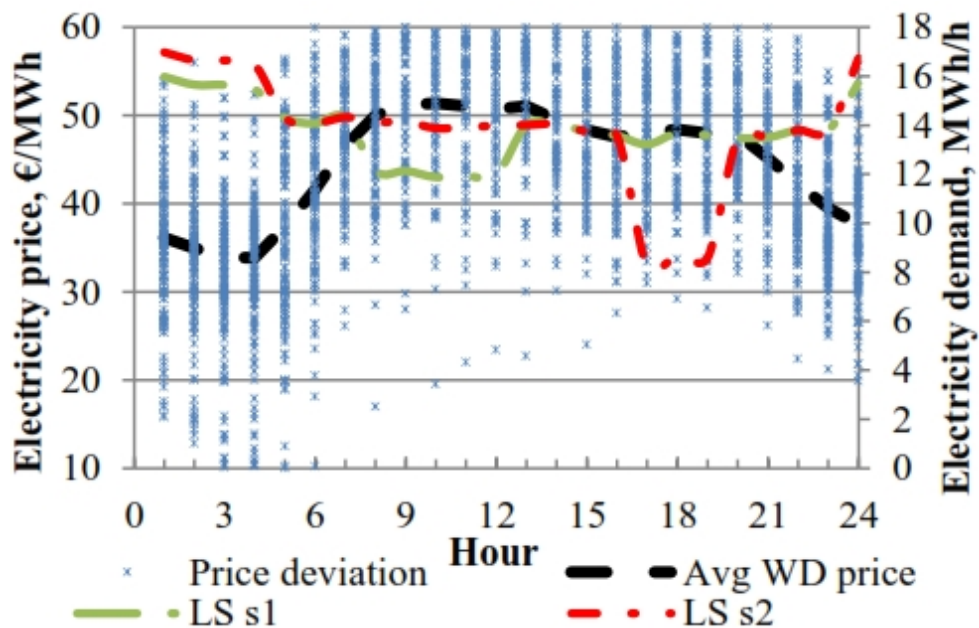


## 2. ELEKTRIKULUDE VÄHENDAMINE TÖÖSTUSES

### 2.1. Elektri koormuse nihutamine

Tootmise optimeerimiseks ja elektrikulu vähendamiseks on erinevaid võimalusi. Üheks võimaluseks on tarbimise nihutamine vastavalt turuhinnale. Uuringud on näidanud, et võrreldes tarbimisega vastavalt vajadusele (juhuslikult), võib tarbimise nihutamine optimaalseimasse ajaperioodi vastavalt turuhinnale anda kuni 17% kokkuhoidu [4].

Artikkel [4] analüüsib puiduhakkuri elektri koormuse nihutamise mõju tootmisele. Sele 2.1 illustreerib tööstusliku protsessi juhtimise printsiipi vastavalt turu hindadele. Hindandele hajuvuse ja varieeruvuse tõttu on välja toodud kaks võimalikku stsenaariumi: juhtimine vastavalt ajaloolise keskmisele turu hinnale (s1) ja juhtimine nihutades koormust vastavalt päev-ette turu hinnale (s2). Stsenaarium s2 annab lisakasutades ära päeva hinna tõelisi maksimume ja miinimume. Tähelepanu tuleb pöörata ka juhtimisele piiranguid seadvatele füüsilistele parameetritele: masinate võimsus, vaheladude mahutavus jms. [4]



Sele 2.1 Turu hinna juhuslikkuse hajuvus lubab kahte erinevat koormuse juhtimissüsteemi meetodit; WD –Tööpäev; LS – koormuse nihutamine; s1 – stsenaarium 1, kus tarbimisgraafik on genereeritud vastavalt ajaloolisele keskmisele turuhinnale; s2 – stsenaarium 2, mis illustreerib juhtimist vastavalt päev-ette turuhinnale, kus elektri hind on eriti kõrge vahemikus 17h – 19h [4].

## 2.2. Elektritarbimise nihutamise eeldused

Nihutamaks tootmises mingi üksiku protsessi või masina töösükli aega, on kõige tähtsamaks eelduseks vaheladude olemasolu. Vaheladudesse saab paigutada töödeldud materjale (nagu hakitud puit vms). Samuti võib vaheladudeks pidada ka reservuaare, kus saab hoida vett. Sellised vahelaod moodustavad nn. energia hoidlad, kus energia ei ole salvestatud füüsiliselt vaid läbi mõne tootmises kasutatava materjali hoiustamise. Energia hoidla tekib seetõttu, et vaheladudesse kogutava materjali tootmiseks on vaja kulutada energiat, kuid samas saab vahelaost materjali välja võtta ka siis, kui materjali sinna enam juurde ei toodeta. Seega on elektritarbimise seisukohast vahelao omadus sarnane füüsilisele energiasalvestamisele. Vaheladude eesmärged võib olla erinevaid:

- Tagada stabiilne ja pidev materjali liikumine (sele 2.2)
- Võimalus toota vastavalt soovile, mitte vastavalt võimalustele
- Riskide maandamine (masina rikke korral ei pea tootmine seiskuma)



Sele 2.2 Tootmisel on vajalik konstantne tooraine sisend. Selleks kasutatakse vaheladu, kuhu lisatakse muutuvate suurustena toorainet puiduhakkurit [4].

Furusawa jt. on oma artiklis [6] uurinud energiahoidlate süsteeme ning leidnud, et kasutades ükskõik millist sorti energiahoidlat, on sellel alati positiivne mõju ettevõtte kuludele ja kasumile.

Elektritarbimise juhtimissüsteemi rakendamiseks masinale peab selleks olemas olema vastav vaheladu ehk energiahoidla. Selline hoidla toimib puhvrina, mis ei lase üldisel tootmisel seiskuda kuid lubab masinal teostada töösükleid vastavalt elektri hinnale. Näiteks toodab puiduhakkur puidu laaste ainult öösel, kui elektri hind on odav, ning päeval kasutatakse tootmiseks vahelaos olevaid laaste.

Teiseks eelduseks elektritarbimise nihutamisel on piisav hinna kõikumine. Kui elektri hind oleks kogu aeg stabiilne või kõiguks minimaalselt, siis ei annaks koormuse nihutamine mingit efekti (või see oleks minimaalne). Seega, et ettevõtetele oleks kasumlik koormuse nihutamine,

peab vahe maksimaalsel tunni hinnal ja minimaalsel tunni hinnal olema märkimisväärne. Nord Pool Spoti elektri piirkonnas on elektri hinna kõikumine selleks piisav. Näiteks 10.04.2014 oli hinna vaheks Eestis Nord Pool Spoti Elspot turul 33,21 EUR/MWh (min=22,88 EUR/MWh; max=56,04 EUR/MWh) [3].

Oluline faktor tootmises muudatuste tegemiseks on tootmise paindlikus. Tehastest peab lõppprodukt väljuma mingi seaduspära alusel. Näiteks tööpäeval töö kellaajal või siis konstantselt ühtlase tempoga 24 tundi päevas. Enamasti on tootmise lõppväljund seotud mingisuguse pudelikaelaga tootmises. Lõppprodukt valmib nii kiiresti, kui kiiresti suudab oma ülesannet täita kõige aeglasem tootmise osa. Paindlikkuse tootmisele annab aga teiste tootmisosade suurem tootlikus ja vaheladude mahutavus. Seega, on võimalik nihutada ainult nende tootmisosade ja –masinate töösükleid, mille tootlikus on suurem kui tehase lõppprodukti tootlikus ning millel on olemas vastavad vahelaod ehk energia hoidlad.

Mida suurem on elektri tarbimine tööstuses ning mida paindlikum on tarbimise muutmine, seda kergem on tarbimist juhtida ning seda suuremat säästmist elektrikuludelt on võimalik saavutada [7].

Elektrikoormuse nihutamiseks on oluline ka kaugloetava arvesti (sele 2.3) olemasolu, mis on võimeline talletama tarbimisinfot väiksema ajaperioodi, näiteks iga tunni kohta. 2013. aasta alguseks on Eestis kaugloetav arvesti kõikides tarbiskohtades, mille peakaitse on suurem kui 63A. Ülejäänud tarbiskohtadele paigaldatakse sellised arvestid hiljemalt 2017. aasta alguseks [8].



**Sele 2.3 Kaugloetav elektriarvesti E350 [8]**

Viimasena tuleb arvestada ka materjali/tooraine/vahetoote kulumist/tarbimist energia hoidlast. Elektrikoormuse nihutamiseks on võimalik kulusid optimeerida ainult juhul, kui materjali tarbimist vahelaost on võimalik ette ennustada. Näiteks juhul kui tarbimine vastab mingisugusele kindlale seaduspärasusele (materjali/toorainet/vahetoodet kasutatakse ainult tööpäevadel kella 09.00 – 17.00 kindlates kogustes) või juhul kui tarbimine on kogu aeg konstantne. Kui tarbimist ei ole võimalik ette ennustada, võib tekkida olukord, kus päeva maksimum hinna juures tuleb töösükkel käivitada, kuna materjali/tooraine/vahetoote väljavool vahelaost on kasvanud märkimisväärselt suuremaks. See aga ei tagaks üldist kulude

vähennemist. Sellisel juhul aitaks ka piisavalt suure energia hoidla olemasolu, kuid sellise lao/hoidla välja ehitamine ei pruugi olla kuluefektiivne.

### 2.3. Tarbimise optimeerimine

Läbi koormuse nihutamise on tarbimist võimalik optimeerida mitmel viisil. Näiteks võib optimeerida ajaloolise keskmise hinna põhjal või vastavalt päev-ette hinnagraafiku järgi (sele 2.1). Peamised piirangud tulenevad vaheprotsesside maksimaalsest tootmise võimsusest ning sellest, et päeva lõpuks peavad tootmismahud vastama etteseatud normidele.

Üksiku tarbija elektri maksumust on võimalik minimeerida järgmiselt [4]:

$$\min_{Q_t} E \left[ \sum_t P_t * C^{CH}(Q_t) + C^E(Q_t) \right], \quad (2.1)$$

kus  $E$  – matemaatiline ootus (expected value),

$Q_t$  – tootmismahut,

$P_t$  – elektri hind ajaperioodi  $t$  kohta,

$C^{CH}$  – masina väljundvõimsus,

$C^E$  – koormuse nihutamise välised kulud, nt käivitamise kulud, tööjõu kulud jms.

Kuna elektri hind on juhuslik parameeter, mis võib olla erinev iga päev, siis elektri hinna  $P_t$  võib esitada stsenaariumi  $s$  kaudu [4]:

$$\min_{Q_t} \sum_s \sum_t P_t^s * C^{CH}(Q_t) * Pr(s) + C^E(Q_t), \quad (2.2)$$

kus  $Pr(s)$  – stsenaariumi  $s$  tõenäosus.

Piirangud ja eeldused on, et kasum ei tohi olla piiratud koormuse nihutamise tõttu, ehk süsteemi globaalne optimum tuleb leida tööstuse jaoks, eesmärgiga minimeerida elektrikulud. Võtmeteguriks siinkohal on optimeeritava tarbija tootmismahut  $Q_t$ . Tootmismahutu peaks olema võimalik muuta vahemikus [4]:

$$Q^{min} \leq Q_t \leq Q^{max}, \quad (2.3)$$

kus  $Q^{min}$  – minimaalne tootmiskaht,  
 $Q^{max}$  – maksimaalne tootmiskaht.

Võib eeldada, et mida rohkem ületab optimeeritava seadme maksimaalne tootmiskaht  $Q^{max}$  tööstuse nõutud materjali tootmiskahtu  $Q^P$ , seda suurem on tootmise paindlikkus, mis omakorda tähendab madalamaid kulusid.

Täiendavad füüsilised piirangud tulenevad veel sellest, et hoidlaid ei saa ületäita ega lasta alla alumise kriitilise piiri. Seega [4]:

$$W^{min} \leq W_t \leq W^{max}, \quad (2.4)$$

kus  $W_t$  – hoidla tegelik täituvus vastaval tunnil,  
 $W^{min}$  – minimaalne tööstuse poolt aktsepteeritav kogus, mis tuleneb vajadusest tagada tootmisprotsessis varusid,  
 $W^{max}$  – maksimaalne kogus, mis mahub hoidlasse.

Arendades välja optimeerimise mudeli kasutades valemit 2.2, on võimalik minimaliseerida paljude seadmete elektrikulu tööstuses. Optimeerimise mudeliga arvutatakse välja erinevate stsenaariumite põhjal vastava päeva kõige optimaalsem töögraafik. Arvutuste lahendamiseks võib kasutada programmi Microsoft Solver Foundation, mis kasutab Simplex-i meetodit. Selliseks arvutuseks on tarvis järgnevaid sisendeid:

- Vastava päeva turuhinnad
- Vajalik päeva tootmiskaht
- Masina väljundvõimsus
- Koormuse nihutamise välised kulud
- Maksimaalne ja minimaalne tootmiskaht
- Hoidlate maksimaalne ja minimaalne lubatud tase
- Hoidla hetkeseis

Seega, nagu juba välja toodud peatükis 2.1 on sellise optimeerimise mudeliga võimalik saavutada märkimisväärset kokkuhoidu osalisel koormusel töötavate seadmete elektrikuludelt. Edasi uuritakse käesolevas töös sellise mudeliga kulude vähendamist praktikas.

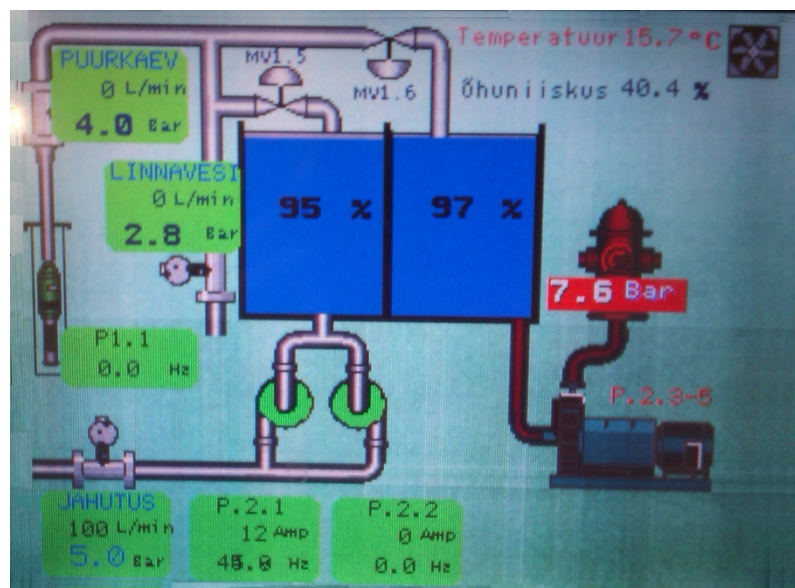
### 3. VEEPUMBA ELEKTRITARBIMISE JUHTIMISSÜSTEEM

#### 3.1. Juhtimissüsteemi rakendamine veepumbale

Peatükis 2.2 ja 2.3 kirjeldatud optimeerimismudeliga tuleb luua juhtimissüsteem veepumbale eesmärgiga minimaliseerida kulutusi elektrile. Katsealuseks pumbaks on puidu graanuleid tootva ettevõtte ühes tehases asuva pumpla veepump. Pumbajaam on ehitatud elektri ja soojus koostootmisjaama kõrvale eesmärgiga tarnida jaamale vajalikku vett. Vett kasutatakse jaamas:

- Veepuhastusjaamas vee töötlemiseks katla jaoks
- Kanalisatsiooni mineva vee jahutamiseks
- Veepehmendussüsteemi regenererimine
- Mehhaanilise filtri läbipesu
- Katla tahmapuhumiseks
- Tulekustutussüsteemi vee reservuaaris

Pumbajaamas on kaks reservuaari, kumbki mahutab 100 m<sup>3</sup> vett. Peamise sisendina pumpab reservuaaridesse vett puurkaevust veepump. Kui selle võimsusest puudu jääb on lisaks võimalik kasutada linna veeõrgust tulevat vett. Reservuaaridel on kaks väljundit. Esimese kaudu liigub



Sele 3.1 Koostootmisjaama pumbajaam. Pumplat juhtiva PLC HMI ekraan

koostootmisjaama, kus seda

kasutatakse erinevate protsesside jaoks. Teiseks väljundiks on tulekustutussüsteemi minev vesi. Seda väljundit kasutatakse ainult hädaolukordades – tulekahjude puhul. Kogu pumbajaama tegevust juhivad automaatselt PLC (Programmable Logic Controller) kontrollid, mida on võimalik SCADA liidese kaudu kaugelt monitoorida. Illustreeriv pilt pumbajaama süsteemist on toodud seel 3.1.

Enne optimeerimist töötab pumpla režiimis, kus veetaset reservuaarides hoitakse 95% ja 98% vahel. See tähendab, et kui veetase langeb alla 95%, lülitub pump sisse. Kui tase on tõusnud 98%-ni, lülitatakse pump jälle välja. Paakides on nivoo andur, mis mõõdab veetaset reaalselt. Kui puurkaevu pumbast jääb väheseks, lastakse reservuaaridesse vett ka linna veevärgist. Praktikas aga seda enamasti ei kasutata, kuna piisab ainult puurkaevu tootlikkusest.

Rakendades sellele pumbajaamale uut juhtimissüsteemi, tuleb arvestada kahe asjaoluga. Esiteks ei ole eeldatav kasum, mis saadakse elektrikulude vähenemiselt, suurem, kui on kulutused, mis tehakse selle juhtimissüsteemi väljatöötamisele ja rakendamisele. Kasum on seotud tarbitava elektrienergia kogusega. Kuna pumba kogu tarvitatav elektrienergia on küllaltki väikene, siis on ka kasum mida on võimalik optimeerimisel saavutada küllaltki väikene. Juhtimissüsteemi rakendamisele tehtavad riistvaralised kulutused on juba mitu korda kõrgemad sellest. Lõputöö eesmärk on aga töötada välja juhtimissüsteemi prototüüp ning leida protsentuaalne kasum elektrikulude vähenemiselt. See annab võimaluse tulevikus rakendada juhtimissüsteemi energiakulukamatele seadmetele, mille elektrikulude kokkuvõtte oleks juba märkimisväärne.

Teiseks asjaoluks on see, et kuigi ettevõtte on huvitatud kulude vähendamisest, tuleb siin töös välja pakutud uue juhtimissüsteemi lahendusel silmas pidada seda, et veetaset ei saa mahutites väga madalale lasta. Mida madalamal on alumine lubatud piir, seda suuremat kokkuvõtet on küll võimalik saavutada, kuid seda kõrgemaks tõuseb risk: pumba rikke või tulekahju korral peaks reservuaarides olema maksimaalne kogus vett. Ettevõttega saavutatud kokkuleppe kohaselt võib juhtimissüsteemi mõju uurimiste ajaks olla mahutite alumiseks piiriks 68%.

Põhjus, miks juhtimissüsteemi rakendamise mõju uurimiseks kasutatakse aga pumbajaama, on selles, et see on tootmises kõige vähetähtsam ja paindlikum element, millega saab katseid korraldada. Positiivse tulemuse põhjal ollakse valmis rakendama juhtimissüsteemi ka tootmise teistele osadele.



## 3.2. Pumbajaama elemendid

### 3.2.1. Veepump ja sagedusmuundur

Kaevus on kasutusel Calpeda sukeldatav puuraugu pump 4SD 10/17EC. Pumba andmed on toodud tabelis 3.1. Puurkaevu sügavus on 84 m, staatiline veetase kaevu pinnast 8,8 m. Kuna pump asub 30 m sügavusel, on pumba maksimaalne tootmiskaht  $Q^{max}$  alati 12 m<sup>3</sup> tunnis.

Tabel 3.1 Pumba Calpeda 4SD 10/17EC andmed [9]

Omadus	Väärtus
Pinge U	400 V
Voolutugevus I	7,4 A
Sagedus f	50 Hz
Mootori väljundvõimsus P	3 kW
Tootlikus kuni 12 m <sup>3</sup> /h	Kuni 35 m sügavuseni



Sele 3.2 Veepump Calpeda SD [9] vasakul ja sagedusmuundur F700 paremal

Pumba juhtimiseks kasutatakse sagedusmuundurit Mitsubishi F700 (sele 3.2). F700 väljund sageduse vahemik on 0,5 – 400 Hz, kusjuures pump töötab sagedusega 50 Hz. Sagedusmuunduri eesmärk on pumba pehmelt käivitamine (et voolutarve käivitamisel ei ületaks töövoolutarvet). PI-regulaatorit pumba juhtimiseks ei ole rakendatud. Mitsubishi F700 toetab Modbus RTU protokoll, läbi mille saab kontrollida sagedusmuundurit juhtida [10].

### 3.2.2. Vee reservuaarid ja nivoo andur

Pumbajaamas on kaks vee reservuaari, kumbki 100 m<sup>3</sup> - kokku 200 m<sup>3</sup>. Mõlema paagi sissevoolu kraane on võimalik avada ning nende vahel olev sektsiooni kraan on koguaeg lahti. Seega tarvitatakse vett pidevalt mõlemast reservuaarist ning nende tasapind väheneb koguaeg ühtlaselt. Lihtsustamise eesmärgil loeme edaspidi, et tegemist on ühe reservuaariga mille mahtuvus on 200 m<sup>3</sup>.

Mõlema reservuaari (mahuti) väljundil on rõhuandur (PIA) 0-1 bar, mis mõõdab hüdrostaatilist rõhku (veesamba kõrgust mahutis). Anduri vooluväljund muutub lineaarselt vahemikus 4...20 mA kui rõhk muutub 0...1 bar. Analoogsisend PLC-s digitaliseerib anduri väärtuse ning konverteerib selle meetriteks. Teades mahutite gabariite, on võimalik välja arvutada vee kogus mahutites.



Sele 3.3 Nivoo andur

Lisaks on pumplas kasutusel nivoorelee KARI EL-22 (sele 3.3), mille eesmärgiks pumba kuivkaitse. Puurkaevus on pumba juurde kinnitatud elektrood ning kui vesi langeb elektroodini, lülitub rele sisse. See omakorda lülitab pumba välja.

### 3.2.3. Pumbajaama kontrollid

Pumbajaamas juhib puurkaevu pumba ja trassipumpade (mahutite väljundite) tööd PLC kontrollid Siemens Simatic S7-200 (sele 3.4). Tegemist on Siemensi tööstusliku automaatika süsteemide SIMATIC S7 põlvkonna kontrollidriga. Kuigi kontrollid on kompaktned ja suudavad juhtida pumpla tööd, on tegemist nüüdseks vananenud kontrollidriga, mis on tootmisest maha võetud ning millele Siemens enam uuendusi ei tee. Kontrollidrigale on juurde ühendatud 5 moodulit (EM 277; EM 221; 3xEM 235) tagamaks ülesannete täitmist. Kontrollidri andmed on toodud tabelis 3.2.



Sele 3.4 Simatic S7-200 [11]

Kontrollidri programmeerimiseks on vajalik Siemensi poolt välja töötatud programm STEP 7-Micro/WIN. Programm töötab ainult operatsioonisüsteemiga Windows. Ühendamaks arvutit kontrollidriga tuleb kasutada PC/PPI kaablit. Suhtlus arvuti ja kontrollidri vahel käib läbi PPI S7 protokoll.

**Tabel 3.2** Kontrolleri Simatic S7-200 CPU 226 tehnilised andmed [11]

Physical size (mm)	190 x 80 x 62
Program memory	4096 words
Data memory	2560 words
Local on-board I/O	24 In/16 Out
Expansion modules	7
Analog adjustments	2
Communications Ports	2 RS-485
Floating-point math	Yes
Boolean execution Speed	0.37 microseconds/instruction

Lihtsa suhtluse kontrolleri tagab HMI (Human-Machine Interface) ekraan kontrolleri kapi uktsel (sele 3.1). Ekraanil on võimalik kuvada pumbajaama erinevaid olekuid. Samuti on SCADA liidese kaudu võimalik suhelda kontrolleri kaugelt. Läbi SCADA on võimalik kirjutada kontrolleri sisse ning lugeda andmeid (andurite näidud, statistika jms).

Lisaks ülalmainitule on käesoleva töö kohapealt olulisteks sisenditeks ja väljunditeks kontrolleri:

- Analoogsisendid mahutite veenivoo määramiseks
- Analoogsisend rõhu mõõtmiseks puurkaevu torustikus
- Sisendid mõõtmaks vooluhulka sisend ja väljund torudes
- Digitaalväljund mahutite täiteventiilide juhtimiseks
- Väljund läbi sagedusmuunduri pumba sisse ja välja lülitamiseks
- RS485 port

Maksimaalse ja minimaalse lubatud veetaseme mõõtmiseks paagis eraldi andureid ei ole. Nende väärtused tuleb eraldi kontrolleri sisse sisestada ning seejärel kontrolleri kontrollib igas tsüklis veetaseme väärtust nende suhtes.

### 3.3. Pumba tööaja optimeerimine

Optimeerimaks valitud pumba tööaega elektrihindade suhtes on tarvis teada peatükis 2.3 välja toodud arvutusmudeli sisendeid. Leides vajalikud sisendid antud pumbale, on võimalik lahendada algoritm (2.2).

#### 1) Vastava päeva turuhinnad:

Iga päeva turuhinnad on tarbijast mitte olenevad seadesuurus ning alates 13.00 (CET) on võimalik Nord Pool Spoti koduleheküljel vaadata ja alla laadida järgmise päeva hinnad [3].

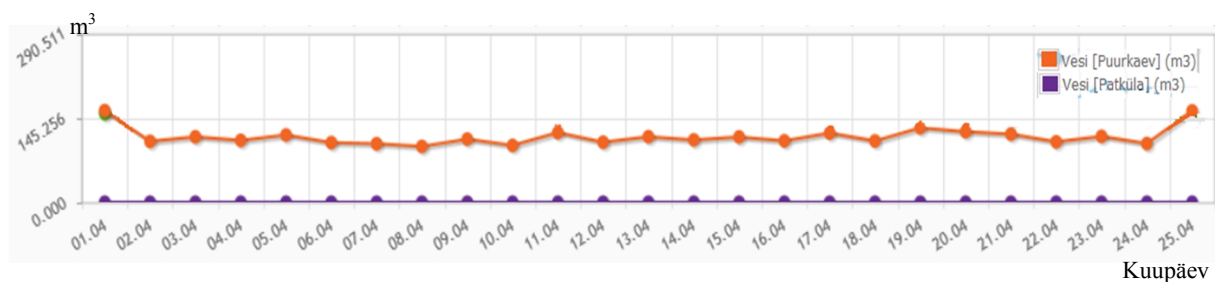
#### 2) Vajalik päeva tootmiskaht:

Vajalik päeva tootmiskaht  $Q^P$  all mõistetakse siinkohal veekogust, mis tehas tarvitab päevas. Arvestades asjaolu, et optimeerimine käib iga tunni kohta, on mõistlik leida ettevõtte vajalik tunni tootmiskaht  $Q_t^P$ . Kuna mahutite mahtu leitakse kuupmeetrites ning vee voluluhulka kuupmeetrites ajaühiku kohta, peaks lihtsuse mõttes olema tootmiskaht  $Q_t^P$  ühikuks  $m^3/h$ .

Kuigi koostootmisjaam, mis tarvitab pumbajaama vett, töötab pidevalt täisvõimsusel, ei ole vee tarbimist jaama poolt võimalik adekvaatselt ette ennustada. Selle peamiseks põhjuseks on katla tahmapuhastusaja määramatus. Samuti ei näita ka vee kulumise statistika mingisugust selget trendi. Seetõttu tuleb leida jaama keskmine veetarbimine tunnis.

Viimase kolme kuu statistika näitab, et linna veevõrgust ei ole vett mahutitesse voolanud. Seega kogu vesi, mis on tulnud puurkaevust, on edasi liikunud läbi mahutite jaama tarbimisse. Puurkaevu pumba keskmine tootlikus päevas viimase kolme kuu andmete põhjal on  $108 m^3$  vett (graafik 3.1). Keskmiselt on tunnis järelkult pumbatud  $108/24=4,5 (m^3)$  vett. Seega:

$$Q_t^P = 4,5 m^3/h$$



Graafik 3.1 Aprilli kuus vee tootlikus kuupmeetrites. Oranž – puurkaevu pump; Lilla – linna veevõrk (Patküla)

Kuigi vee tarbimine ei ole täpselt ette ennustatav on siinkohal võimalik kasutada keskmist veekulu, kuna see on piisavalt väikene võrreldes veereservuaaride mahtuvusega. Tuleb veel märkida, et minimaalne vee tarbimine on  $0 \text{ m}^3/\text{h}$  ning maksimaalne  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ .

3) Masina väljundvõimsus:

Masina väljundvõimsuseks  $C^{CH}$  on pumba võimsus. Pumba andmetes (tabel 3.1) on toodud võimsuseks  $3 \text{ kW}$ . Teades, et pumba voolutugevus on  $7,4 \text{ A}$  ning pinge  $400 \text{ V}$ , on võimalik võimsust kontrollida:  $P = U \cdot I = 7,4 \cdot 400 = 2960 \text{ W} \approx 3 \text{ kW}$ . Seega:

$$C^{CH} = 3 \text{ kW}$$

4) Koormuse nihutamise välised kulud:

Kuna pumba pehmeks käivitamiseks kasutatakse sagedusmuundurit, siis pumba tööle ja kinni lülitamistest suuri energiakadusid ei tule. Samuti puuduvad ka muud koormuse nihutamise välised kulud antud süsteemil. Seega:

$$C^E = 0 \text{ €}$$

5) Maksimaalne ja minimaalne tootmismahut:

Kuna pump asetseb puurkaevus  $30$  meetri sügavusel, on pumba maksimaalseks tootlikkuseks  $12 \text{ m}^3/\text{h}$  (tabel 3.1). Minimaalne tootlikus on  $0 \text{ m}^3/\text{h}$ . Seega:

$$Q^{min} = 0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q^{max} = 12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$0 \leq Q_t \leq 12 \tag{3.1}$$

6) Hoidlate maksimaalne ja minimaalne lubatud tase:

Mida suurem on maksimaalse ja minimaalse taseme vahe, seda paremaid optimeerimistulemusi on võimalik saavutada. Katseperioodiks on ettevõtte lubanud langetada minimaalset veetaset mahutites  $68 \%$  peale. Maksimaalne veetase hoidlas jääb  $98 \%$  peale, eesmärgiga ära hoida reservuaaride ületäituvust. Seega:

$$W^{min} = 200 * 0,68 = 136 \text{ m}^3$$

$$W^{max} = 200 * 0,98 = 196 \text{ m}^3$$

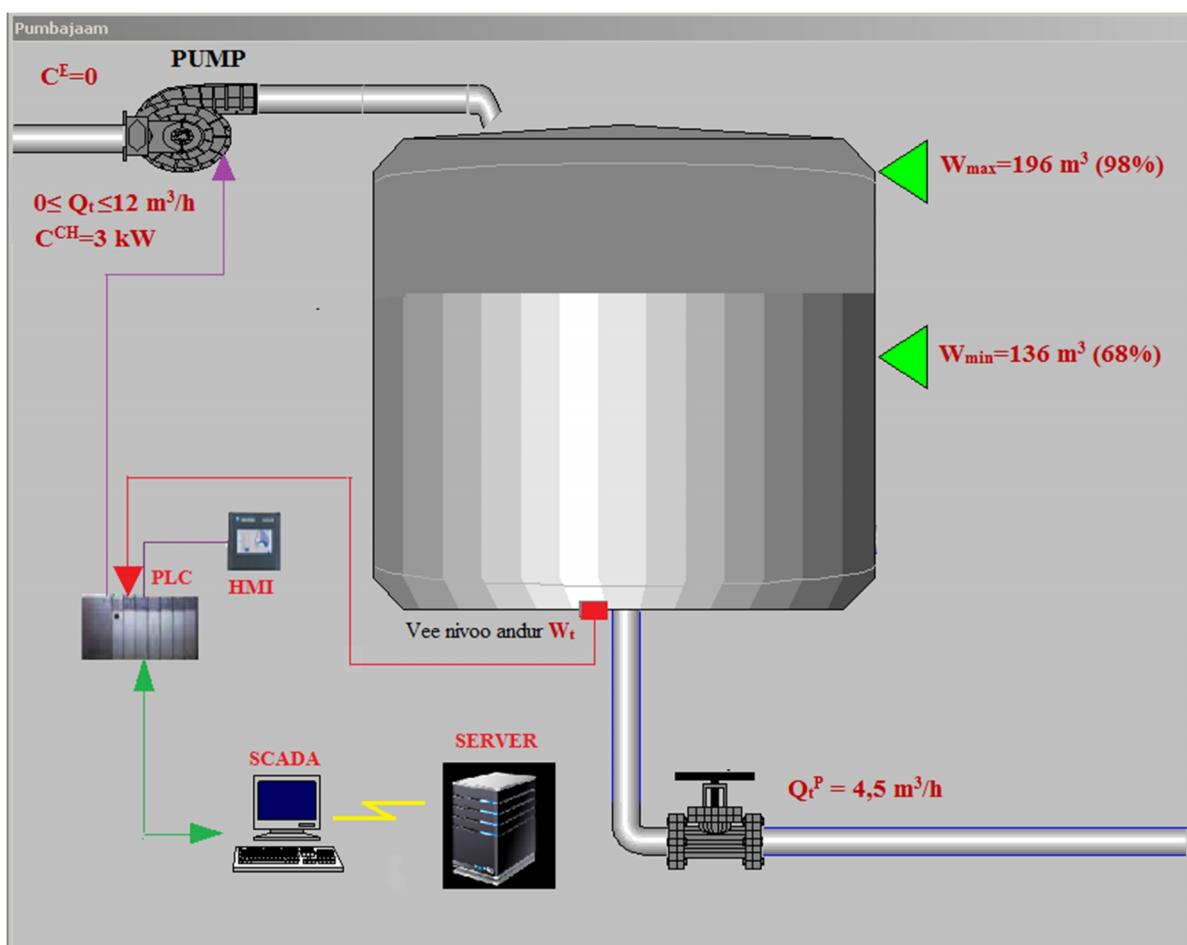
$$136 \leq W_t \leq 196 \tag{3.2}$$

7) Hoidla hetkeseis:

Mõõtmaks veetaset reservuaarides on kummagi mahuti väljavoolu juures rõhuandur. PLC kontrolleri analoogsisend loeb anduri väljundvoolu ning muundab selle veesamba kõrguseks meetrites. Optimeerimise jaoks on see vaja ümber arvutada aga kuupmeetriteks. Pumpla ja reservuaaride põhiplaani on toodud reservuaaride gabariidid: ühe mahuti pikkus on 5750 mm ja laius 4500 mm. Seega:

$$W_t = 5,75 * 4,5 * h \tag{3.3}$$

kus  $h$  – veesamba kõrgus reservuaaris.



Sele 3.5 Pumbajaama optimeerimise skeem koos optimeerimisalgoritmi vajalike sisenditega (v.a. elektrituru hinnad)

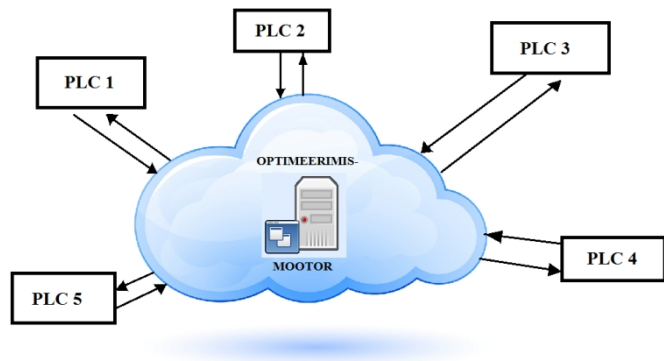
Illustreeriv joonis pumbajaama optimeerimisest on toodud seel 3.5. Leitud sisenditega on võimalik välja töötada optimaalseim töögraafik pumbale.

### 3.4. Juhtimissüsteemi projekteerimine

#### 3.4.1. Optimeerimismootor

Optimeerimismootor peab etteantud sisenditega (peatükk 3.3) leidma pumbale iga päev kõige optimaalsema töögraafiku. Selleks peab optimeerimismootoris jooksma algoritm, mis kasutab valemis (2.2) toodud mudelit kõige odavama tööaja leidmiseks. Mootori väljundiks peab olema numbrimassiiv 24 elemendiga – iga element kirjeldab pumba töötamise aega ja võimsust vastavas tunnis.

Teoreetiliselt oleks võimeline seda algoritmi lahendama mõni võimsam PLC kontrolleri või arvuti, mis on läbi SCADA ühendatud kontrolleriaga. Kuna pikemas perspektiivis on aga plaanis optimeerida ka teisi süsteeme, siis oleks kõige kasumlikuks lahenduseks pilveteenusel põhinev optimeerimismootor. Nõnda saavad erinevad kontrolleriid saata oma andmed ühele optimeerimismootorile, mis tagastab igale kontrolleriile individuaalse töögraafiku (sele 3.6).



Sele 3.6 Veebipõhine optimeerimismootor, mis suudab igale süsteemile optimaalseima töögraafiku genereerida

#### Microsoft Solver Foundation

Optimeerimismudeli ehitamiseks ja lahendamiseks valiti Microsoft Solver Foundation, mida kasutatakse matemaatilisteks optimeerimisteks ja modelleerimisteks .NET tarkvaraplatvormil. Solver Foundationiga saab kergesti ehitada ja lahendada reaalseid optimeerimismudeleid, kuna see pakub .NET API rakendusliidest ja *runtime* lubab mudeli loomist, aruandlust ja analüüsimist. Microsoft Solver Foundationi eelised on [12]:

- Stsenaariumite modelleerimine ja lahendamine kasutades piiranguid, eesmärke ja andmestikku (constraints, goals and data).

- Võimalik programmeerida keeles C#. Spetsiifiliste optimeerimismudelite lahendamiseks võimalik programmeerida keeles Optimaziton Modeling Language (OML).
- Sisseehitatud solverid üldlevinud mudeli tüüpide lahendamisteks.
- Võimalik integreerida paljude teiste *solver* programmidega.
- Liidesed Microsoft Office Exceli kasutamiseks.

Microsoft Solver Foundation kasutab mudeli lahendamiseks simplex meetodit (algoritm matemaatilisteks optimeerimisteks).

Optimeerimismootor paigutatakse esialgsete katsete läbiviimiseks ettevõtte serverisse. Serverit kasutab ettevõtte tehaste juhtimiseks, andmete kogumiseks, salvestamiseks ning analüüsimiseks. Server vastab optimeerimismootori süsteeminõuetele:

- Windows Server operatsioonisüsteem (versioon Windows Server 2008 või uuem)
- IIS veebiserver (versioon > 7.0)
- .NET raamistik (versioon > 4.0)

Optimeerimismootor on sisuliselt aplikatsioon, mis käivitub kui talle tehakse päring. Päringu sisus peavad olema vajalikud sisendid algoritmile, mis võimaldavad optimeerimist. Antud pumbajaama näitel edastatakse päringuga järgnevad sisendid:

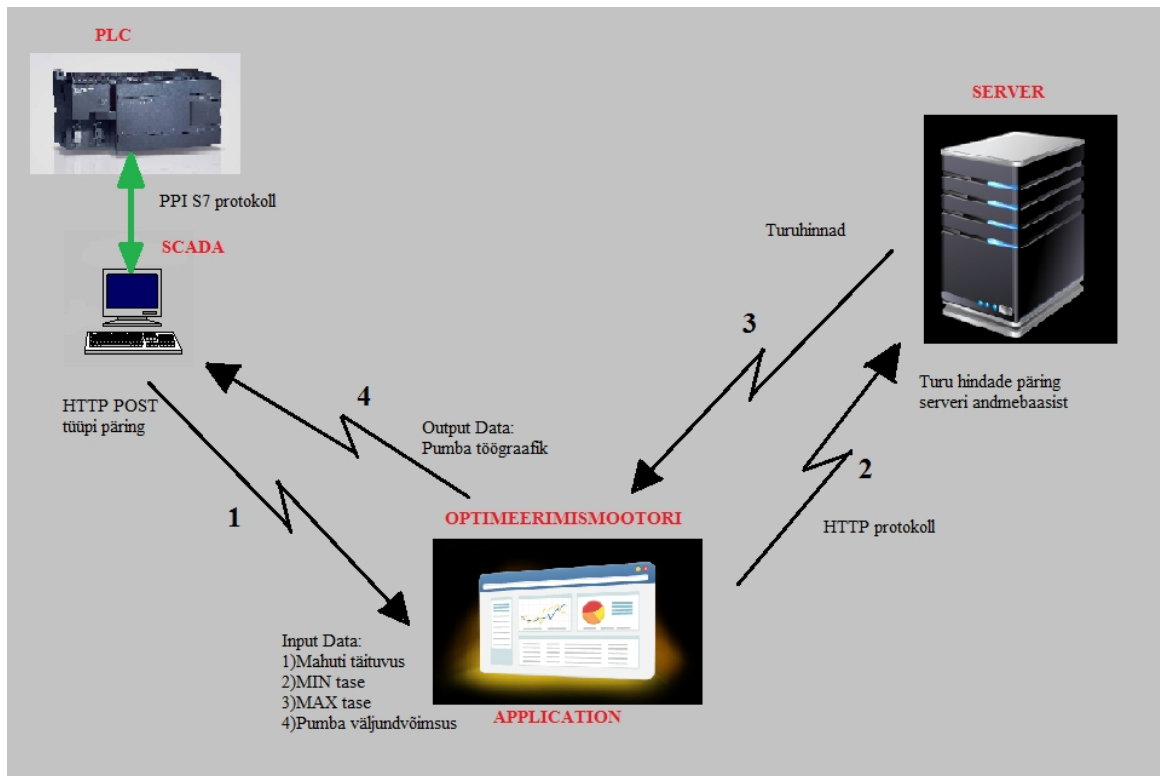
- Mahuti hetke veetase
- Minimaalne lubatud veetase
- Maksimaalne lubatud veetase
- Pumba väljundvõimsus

Kuigi ainukene muutuv suurus on mahuti hetke veetase, tuleb serverisse edastada ka teised andmed. See loob süsteemile paindlikust: kui on tarvis muuta mõnda parameetrit (näiteks alumist lubatud veetaset), siis ei pea seda tegema optimeerimismootori koodis, vaid saab muuta kontrolleri ühte väljundit, mis on tunduvalt lihtsam. Kui tulevikus ühendada ka teisi kontrollereid optimeerimismootori külge, tuleb edastada serverisse kõik süsteemi puudutavad andmed, k.a. süsteemi ID (identifitseerimaks, millise süsteemi/PLC-ga on tegu).

Kui optimeerimismootor saab kontrollerielt sisendid, peab mootor tegema päringu, et saada ka järgmise päeva elektri hinnad teada. Ettevõtte serverisse on juba loodud rakendus, mis iga



päev 16.00 küsib Nord Pool Spoti koduleheküljelt järgmise päeva elektri hinnad ning salvestab need serveris olevasse andmebaasi. Seega peab optimeerimismootor tegema päringu sellesse andmebaasi, kus ta saab vastu järgneva päeva iga tunni elektri hinna massiivi.



**Sele 3.7 Töögraafiku optimeerimine**

Teades kõiki vajalikke sisendeid luuakse Microsoft Solver Foundation-iga pumba töötamise mudel ning optimeerimismootor arvutab läbi kõik võimalikud variandid pumba töötamiseks. Seejärel valib ta välja kõige optimaalseima lahenduse, ehk lahenduse kus kulu elektri hinnale tuleb minimaalne. See lahendus formuleeritakse 24 elemendiga numbrimassiiviks, mis edastatakse päringu vastusena kontrolleriile (sele 3.7).

### 3.4.2. Kontrolleri riistvara

Kogu pumpla tööd juhib Siemens Simatic S7-200 PLC kontrolleri. Kuna optimeerimine toimub veebi serveris, peab kontrolleri olema võimalus ühenduseks internetiga. Nagu mainitud peatükis 3.2.3, on tegemist vanemat tüüpi kontrolleri ja sellel puudub Ethernet väljund. Ühenduse loomiseks on neli võimalust:

## I. Uus kontrollerr

Ühenduse tagamise üheks võimaluseks on paigaldada uuem PLC kontrollerr, millel oleks Ethernet ühendus. Sellise kontrollerriga oleks ühenduse saavutamine internetiga lihtne, kuid uue kontrollerr paigaldamine vajab pumbajaama uuesti projekteerimist ning ühendamist.

Kontrollerrite valikul lähtutakse enamasti ülesandest, mida kontrollerr peab täitma ning keskkonnast, kus ta seda täidab. Finantsiliselt ei ole kasulik osta kõrgtasemelist kontrollerrit väga lihtsa ülesande jaoks. Antud pumpla jaoks on sobiks kõige paremini Siemens Simatic S7 perekonna mõni muu mudel, millel on Ethernet väljund. Valitud kontrollerr peaks olema piisaval universaalne, et seda saaks kasutada tulevikus ka teistel objektidel, mida soovitakse optimeerida.



Sele 3.8 Siemens Simatic S7-1200

Esimene mudel Siemensilt, mis ei vaja lisa moodulit või eraldi kommunikatsiooni protsessorit interneti ühenduseks, on Simatic S7-1200 PLC kontrollerr (sele 3.8).

Kontrollerril on integreeritud PROFINETi liides, mida saab kasutada programmeerimiseks või suhtlemiseks teiste kontrollerritega. Kontrollerril on mürakindel RJ45 ühenduspesa, mis toetab Ethernet standardit ning mille andmeside kiirus võib olla 10/100 Mbit/s [13].

S7-1200 (CPU 1214C) hind, ilma erinevate lisadeta, on 365€. Võrdluseks S7-200, millel on CPU 226, maksab tänapäeval 850 € (kõrge hind on tingitud sellest, et see on tootmisest maha võetud) [14]. Lisaks kontrollerr hinnale lisandub kulutustele kontrollerrite vahetamine (700€).

Pumbajaam on ühendatud välismaailmaga valguskaabli abil. Muutmaks optilist signaali elektriliseks, on vaja adapterit, mis on mõeldud tööstuslikuks kasutamiseks. Selleks sobib Hirschmann SPIDER 1TX/1FX EEC Media Converter, millel on RJ45 pesa ning SC pesa. Konverter maksab 135€ [15].

Kokku maksab uue kontrollerr (ilma lisamoodulite) paigaldus  $700+365+135=1200\text{€}$ .

## II. Moodul interneti ühenduseks

Teine võimalus ühenduse loomiseks on paigaldada kontrolleri S7-200 juurde Ethernet varatit toetav kommunikatsiooni moodul. Antud juhtimissüsteemi jaoks sobiks pumbajaama Ethernet module CP-243-1 IT. Mooduli andmed on toodud tabelis 3.3:

Tabel 3.3 Ethernet module CP-243-1 IT andmed [16]

Andmeside kiirus	Liides	Mõõtmed	Opereeritavate ühenduste arv	Konfiguratsioon	HTTP ühenduste arv	Hind [17]
10/100 Mbit/s	RJ45	71.2 x 80 x 6 (mm)	8xS7 1xPG	STEP 7- Micro/WIN	4	275€

Lisaks kommunikatsiooni moodulile on tarvis ka optika/elektrilise signaali konverteerimisliidest. Selleks sobib eelmises punktis välja toodud Hirschmann SPIDER 1TX/!FX Media Converter (hind 135€).

Kokku maksaks uue riistvara soetamine  $275+135=410\text{€}$ .

## III. Universaalne juhtpaneel

Kolmas lahendus on vahetada kontrolleri praegune juhtpaneel (Magelis SCU) uue, universaalse juhtpaneeli vastu. Juhtpaneeli teevad universaalseks draiverid, mis võimaldavad ühildumist enamiku tootjate pakutava varustusega. See tähendab, et universaalseid juhtpaneele saab ühendada enamikule kontrolleritele, kui selleks on olemas vastavad draiverid. Läbi juhtpaneeli on võimalik kontrolleriit monitoorida ning juhtida.

Kasutamaks sellist juhtpaneeli antud juhtimissüsteemi tarbeks, peab juhtpaneelil olema olema ka Ethernet liides. Üheks paneeliks, mis sobib ühenduseks kontrolleriiga Simatic S7-200, on Beijer Electronics operaatorpaneel iX T4A. Juhtpaneeli andmed on toodud tabelis 3.4.

Kuna universaalset juhtpaneeli saab lihtsalt rakendada enamus töötavatele süsteemidele, annab see lahendus hea eelise järgmiste projektide tarvis. Soovides projekteerida elektritarbimise juhtimissüsteemi tarbijatele, kus kasutatakse juba mingit tüüpi kontrolleriit, on võimalik juhtimine läbi viia universaalse juhtpaneeliga. Ning kasutades juba eelnevate juhtimissüsteemide programmi paneelis, on vaja muuta ainult kontrolleri tööprogrammi koodi.

**Tabel 3.4 Beijer Electronics iX T4A tehnilised andmed [18]**

Tarkvara	iXDeveloper
Esipaneeli IP-kaitseaste	IP65
Tagapaneeli IP-kaitseaste	IP20
Protsessor	400 MHz ARM9
Vahemälu	80 MB
Töö temperatuur	-10 °C kuni 60 °C
Ethernet liides	1 x 10 Base-T / 100 Base-T (shielded RJ45)
USB (Universal Serial Bus)	1 x USB Host 2.0
Serial ports	COM2 ja COM4 jada pordid RS422/485
Esipaneeli mõõdud (WxHxD)	145x103x7 mm
Hind	450€

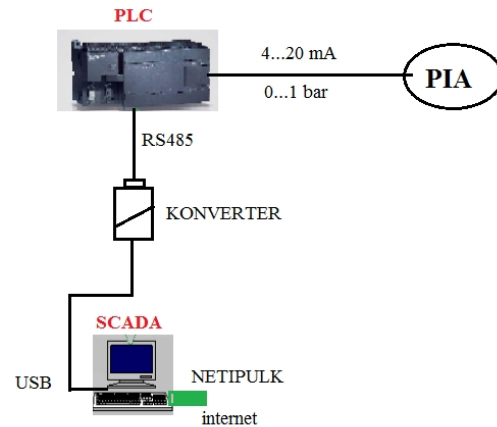
Beijer operaatorpaneeli iX T4A hind on 450€ (tabel 3.4). Paneeliga koos tuleb tarkvara tasuta. Ethernet ühenduse jaoks on vaja ka konverteerimisliidest Hirschmann SPIDER 1TX/!FX Media Converter (hind 135€). Kokku maksaks universaalse juhtpaneeli lahendust 585€.

#### **IV. Arvuti ühendamine**

Kuna antud juhtimissüsteemi rakendamise najal on tegemist ajutise projektiga (peatükk 3.1), siis projekteeritav lahendus internetiühenduse saamiseks ei pea olema püsiv. Seega üheks võimaluseks on kontrolleri ühendamine sülearvutiga, mis jääks katseperioodi ajaks füüsiliselt kontrolleri kõrvale pumbajaama. Hilisemal vajadusel võib sülearvuti vahetada arvutikasti vastu, millel on sobiv keskkonnaklass pumbajaamas töötamiseks, muutes seega lahenduse püsivaks.

Ühendamaks sülearvuti kontrolleri, on vaja USB/RS485 adapterit. Sülearvutis jookseks SCADA, läbi mille saab suhelda kontrolleri. Kõige lihtsam ja odavam viis interneti ühenduseks oleks netipulk (sele 3.9).

Arvuti nõueteks on operatsioonisüsteemi Windows olemasolu, kuna SCADA programm Movicon jookseb ainult Windowsi platvormil. Lisaks peaks tõrgeteta töö jaoks olema protsessor vähemalt kahe tuumaline. Muus osas sobivad kasutamiseks enamus kasutusel olevad sülearvutid, kaasa arvatud ka vanemad arvutid.



Sele 3.9 Sülearvuti ühendsskeem

USB to RS485 adapterite keskmine hind on 25€ [19]. Netipulga hinnad Eesti sideoperaatorite juures algavad 50€. Ajutine sülearvuti ei pea

olema uus ega võimas, seega sobilike arvutite hinnad antud ülesande täitmiseks jäävad 225€ juurde. Kokku läheb kontrolloriga internetiühenduse saavutamine läbi sülearvuti riistvaraliselt maksma 300€.

### Lahenduste võrdlus:

Tabel 3.5 Erinevad riistvaralised lahendused

	Uus kontrolleri	Moodul CP-243-1	Universaalne juhtpaneel	Arvuti
Eelised	- Leitud lahendust on võimalik rakendada tulevikus projekteeritavatel objektidel.	- Tagatud pidev interneti ühendus. - ei vaja kontrolleri kilbi ümber projekteerimist ega ehitamist.	-Võimalik kasutada kõikjal olemasolevatel kontrolleriitel, kui vastava firma draiverid on olemas.	- Riistvara kergesti kättesaadav. - Ühendamine ei vaja monteerimist. - Interneti ühendust võimalik saavutada läbi mobiilse andmeside.
Miinused	- tuleb ümber projekteerida ning ehitada kontrolleri kilp. - vajaks ülesannete täitmiseks lisamoodulite juurde ostmist.	- Lahendus sobilik ainult projektidele, kus kasutatakse Simatic S7-200 kontrollereid.	- Olemasolev paneel tuleks asendada universaalsega.	- sülearvuti ei vasta pumbajaamas töötamiseks vajalikele nõuetele. - arvutite tarkvaraline töökindlus jääb alla PLC-de tarkvara töökindlusele. - ebapüsiv monteeritus võib põhjustada tõrkeid.
Hind	1200€	410€	585€	300€

Tabelis 3.5 on toodud erinevate riistvaraliste lahenduste võrdlused. Kui projekteeritakse uusi objekte, kus on võimalus rakendada elektritarbimise juhtimissüsteemi, tuleks valida alati kontrolleri, millel on olemas RJ45 ühenduspesa. Sellisel juhul ei ole tarvis lisamooduleid või muud riistvara Ethernet kaabli (RJ45) ühendamiseks. Kui soovitakse rakendada elektritarbimise juhtimissüsteemi objektile, kus juba on olemas ning tööks kontrolleri, oleks kõige mõistlikumaks lahenduseks universaalne juhtpaneel. Hinn erinevus universaalsel juhtpaneelil ei ole teiste lahendustega võrreldes väga suur. Lisaks, kui on välja töötatud meetod ühendamaks läbi paneeli kontrolleri ning optimeerimismootorit, on võimalik seda kasutada enamuses kasutusel olevatest kontrolleriitel.

Arvestades, et tegemist on prototüübiga, on sobivaimaks lahenduseks sülearvuti kasutamine internetiühenduse saavutamiseks:

- Esiteks on võimalus saavutada tulemus kõige odavama hinnaga.
- Läbi Windowsi operatsioonisüsteemil töötava arvuti on süsteemi kõige lihtsam tööle saada – ei vaja erilist riistvara tundmist ega selle valdkonna spetsiaalseid teadmisi.
- Kuna vajalik riistvara (sülearvuti, ühenduskaabel, netipulk) on kergesti kättesaadav ning nende monteerimine ei ole vajalik, hoiab see aega kokku prototüübi väljatöötamise teiste etappide tarvis.
- Sülearvuti enamuses puuduseid, mis tulenevad sellest, et tegemist ei ole kestva lahendusega pumbajaamas valitsevas keskkonnas, on ebaolulised, kuna tegemist ei ole püsiva lahendusega. Peale katseperioodi lõppu tuleb ennistada pumbajaama eelnevad režiimid ja lahendused.

Kuigi sülearvuti paigaldamine ei anna kindlat kogemust püsiva süsteemi ehitamiseks järgnevatel objektidel, siis minnakse edasi tulemuste saavutamise eesmärgil just selle lahendusega.

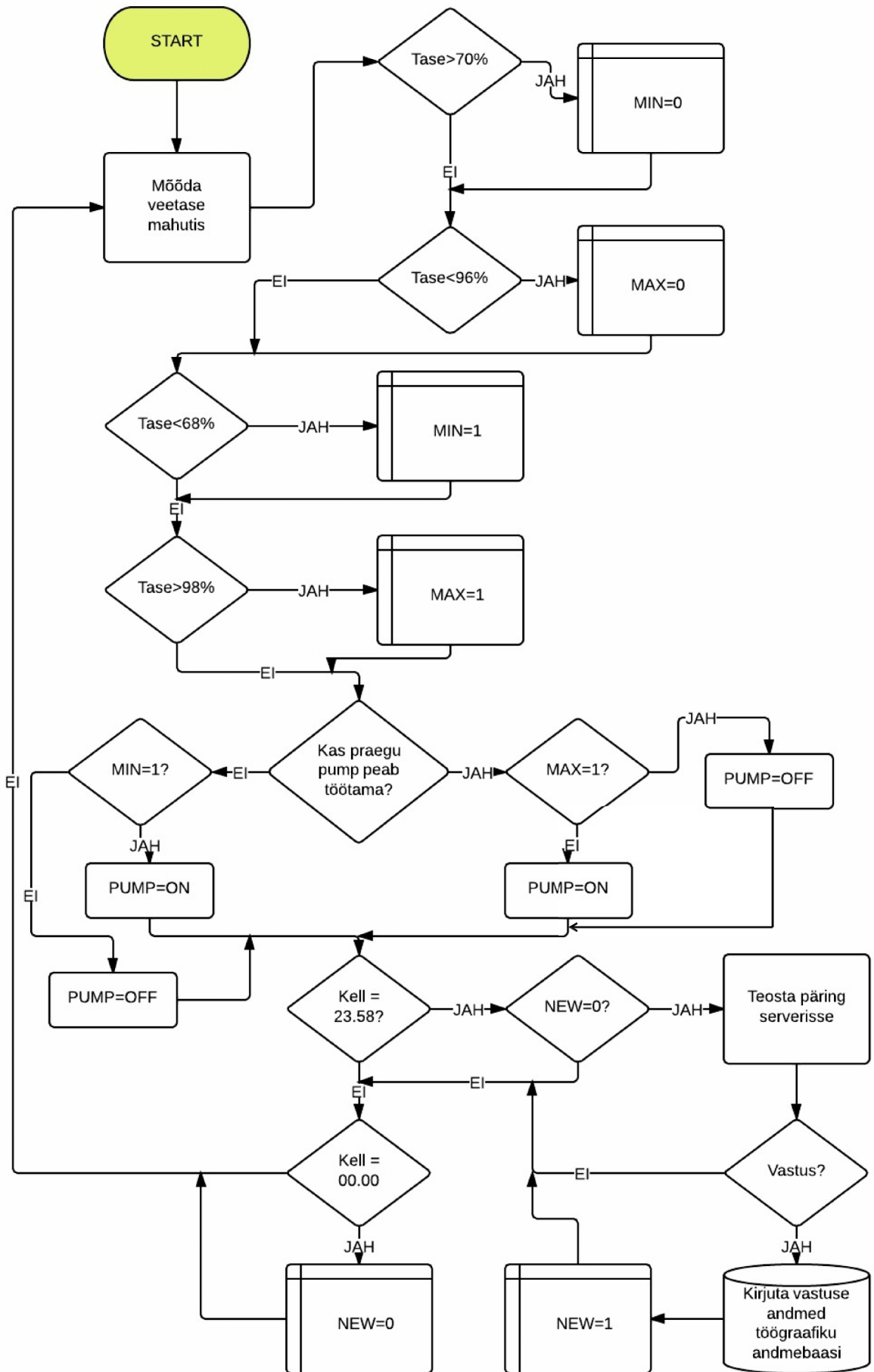
Pumbajaama kontrolleri kappi lisatakse kahetuumaline Fujitsu-Siemens Amilo sülearvuti, mis töötab Windows 7 operatsioonisüsteemil. Arvutile ühendatakse USB liidesega netipulk. Kuna sülearvuti asub pumbajaamas kontrolleri metallist kapis, tuleb mobiilse andmeside levi jaoks installeerida netipulga väline antenn. Antenn monteeritakse pumbajaama sisse kontrolleri kapi kohale. Testimistel saavutati andmeside allalaadimise kiiruseks 3 Mb/s ning üleslaadimisel 1 Mb/s.

### **3.4.3. Kontrolleri tarkvara**

#### **Algoritm**

Algoritm, mille põhjal kontroller peab töötama, on toodud selet 3.10. Iga tsükli alguses peab kontroller esmalt mõõtma veetaseme mahutis. Seejärel kontroller otsustab, kas pump peab töötama või mitte (vastavalt andmebaasis olevale töögraafikule). Kui veetase on üle 98%, lülitatakse pump kindlasti välja. Kui alla 68%, lülitatakse pump kindlasti sisse. Algoritm (sele 3.10) toodud muutujaid MIN ja MAX kasutatakse pumba juhtimiseks maksimum ja miinimum piiri juures. Juhul kui veetase läheneb maksimumile, aga pump peab töötama, siis MAX hoiab veetaset vahemikus 96-98%. Veetaseme langemisel miinimum piirini hoiab muutuja MIN veetaset vahemikus 68-70%, kui pump samal ajal töötama ei pea.

Järgmisena kontrollib kontroller, kas on vaja teha uus päring serverisse, et saada järgmise päeva töögraafik. Päring teostatakse iga päev kell 23.58. Muutujat NEW kasutatakse eesmärgil vältida mitmekordset päringu tegemist serverisse ning andmete üle kirjutamist. Kui ühe korra on päring serverisse tehtud ja vastus kätte saadud, ei lase muutuja NEW teist päringut sama aja kohta teha. Kui päringule vastust ei saada, teostatakse päringut senikaua kuni kell võrdub 23.58. Kui mingil põhjusel serverist uut töögraafikut ei saada (näiteks puudub ühendus), kasutatakse pumba juhtimiseks eelmise päeva graafikut (andmed jäävad üle kirjutamata). Kui töögraafik aga saadi kätte, kirjutatakse see kontrolleri andmebaasi.



Sele 3.10 Kontrolleri töötamise algoritm



## Tarkvara

Pumbajaama kontrolleri tarkvara lahenduse võib jagada kaheks: kontrolleri ning SCADA.

Kontrolleri puhul on tegemist programmeeritava loogikakontrolleriga (PLC), mis igas tsüklis teostab eelnevalt programmeeritud koodi. Kontrolleri saab programmeerida programmiga STEP-7 Micro/WIN ning kontrolleri juhib kogu pumbajaama erinevaid elemente: pumbad, mahutid jms. STEP-7 Micro/WIN on spetsiaalne tarkvara, mis on mõeldud Siemens S7 põlvkonna kontrolleri programmeerimiseks. Ostes Siemensi kontrolleri antakse tarkvara programmeerimiseks tasuta kaasa. STEP-7 Micro/WIN kasutamine on küllaltki lihtne, ning oma ülesehituselt meenutab Unitronicsi programmi Visilogic.

SCADA-ga juhitakse kontrolleri ning hoitakse sidet välismaailmaga. SCADA on programmeeritud Progea programmiga Movicon. Läbi SCADA teostatakse päring serverisse, salvestatakse uus töögraafik ning edastatakse kontrolleri, kas pump peab töötama või mitte. SCADA kaudu on võimalik kaugelt lugeda ka kõiki teisi kontrolleri väljundeid ning muuta ka sisendeid. Moviconis on võimalik kirjutada skripte Visual Basicuga, lisaks on võimalik koostada kasutajaliides läbi JAVA.

## Programmi kood

### I. Kontroller

Kuna kontrolleri töötas enne prototüübi projekteerimist juba režiimis, kus ta pidi pumbajaama juhtima, tuli kontrolleri koodi muuta vähe. Enamus tähtsamad funktsioonid jäid samaks (pumpade käivitamine, klappide juhtimine, sensorite mõõtmine ja andmete salvestamine). Peamine muutus, mis tuli teha, oli see, et pump ei hoiaks mitte veetaset väga kitsas vahemikus, vaid käivitaks vastavalt väärtusele ühes kindlas mälupesas. See tähendab, et kui SCADA kaudu muudetakse vastava mälupesaga väärtus nulliks, siis pump töötab, ning kui väärtus muudetakse üheks, siis pump seisab.

Teine tähtis muudatus kontrolleri koodis on seotud piirväärtuste 98% ja 68% hoidmisega. Ohutuse kohapealt oli oluline, et veetase ei tõuseks üle 98% ega langeks alla 68% - töökindluse tagamiseks tuli see sisestada kontrolleri koodi. Seega, kui veetase tõuseb 98%-ni, lülitatakse pump välja kuni tase langeb alla 96%. Veetaseme alanemisel kuni 68% lülitatakse aga pump sisse, kuni tase tõuseb 70%-ni.

Kuna mahutites ei ole mitte nivooandurid, vaid kummagi mahuti suudmel asub rõhuandur, siis ei ole kahe mahuti mõõdetud nivoo väärtused täpselt samad. Et ülesandest lähtuvalt on juhtimiseks tarvis kasutada üht nivootaset, tuleb teha koodi ka kolmas suurem muudatus. Lahendusena kasutatakse koodis elementi „MAX“, mille sisenditeks on mõlema rõhuanduri väärtused ning väljundiks suurema anduri väärtus. Seda väärtust kasutatakse kontrolleri juhtimiseks.

## II. SCADA

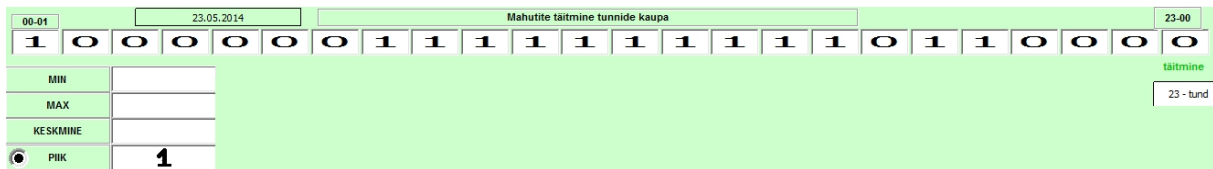
Kuna pumbajaamal puudus protsesside jälgimiseks ja juhtimiseks oma SCADA, tuli see ülesande täitmiseks luua. Lõpp tulemusena on võimalik kontrolleri kaugelt jälgida ning juhtida. Lisaks teostab SCADA päringuid serverisse eesmärgiga saada uusi töögraafikuid. Tabelis 3.6 on toodud kontrolleri tähtsamad sisendid ja väljundid, mida on võimalik kuvada SCADA-s.

**Tabel 3.6 SCADA-ga saab monitoorida kontrolleri mälupeasid, millest tähtsamad kuvatakse ka kasutajale (Outputs). Lisaks on võimalik läbi SCADA muuta kontrolleri mõningaid mälupeasid (Inputs).**

Nr.	Output	Input
0	Mahuti 1 nivoo (%)	Pump ON/OFF (klapid lahti/kinni) (MB)
1	Mahuti 2 nivoo (%)	Mahuti 1 ülemine piir (%)
2	Pumba tootlikus (%)	Mahuti 2 ülemine piir (%)
3	Pumba energiakulu (kWh)	Mahuti 1 alumine piir (%)
4	Pumba tootlikus (L/min)	Mahuti 2 alumine piir (%)
5	Rõhk puurkaevu torus (Bar)	
6	Pumbatud veekogus (m <sup>3</sup> )	
7	Trassipumpade tootlikus (L/min)	
8	Rõhk trassitorustikus (Bar)	
9	Trassipump 1 töötab (MB)	
10	Trassipump 2 töötab (MB)	
11	Puurkaevu pump töötab (MB)	
12	Klapp 1 on avatud (MB)	
13	Klapp 2 on avatud (MB)	

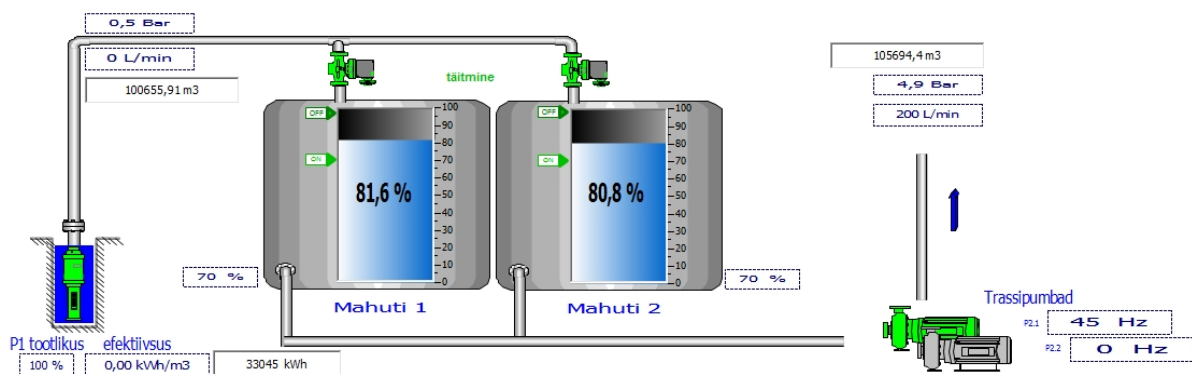
Elektritarbimise juhtimissüsteemi tööle saamiseks oli tarvis programmeerida Moviconi täitmaks teatud ülesandeid. Tuli koostada järgnevad skriptid:

- 1) Uue töögraafiku pärimine. Iga päev kell 23.58 teostab programm päringu optimeerimismootori serverisse, mille vastuseks peab tulema 24 elemendiga massiiv. Vastuseks saadud töögraafik kirjutatakse mälusse (vana graafik kirjutatakse üle). Kui vastust ei saada minuti aja jooksul, jääb töögraafik mälus üle kirjutamata
- 2) Iga tund programm võrdleb töögraafikus olevat hetke tunni väärtust etteantud piigiga (PIIK=1). Kui graafikus olev väärtus on väiksem kui piigi väärtus, pannakse pump tööle. Kui väärtus on võrdne või suurem, siis pump lülitatakse välja. Pumba töögraafiku ning piigi väärtusi saab muuta ka käsitsi (sele 3.11).



Sele 3.11 Pumba töögraafik. Üleval on toodud iga tunni väärtus töögraafikus (00.00-24.00). Kui väärtus on väiksem kui on piigi väärtus, lülitatakse pump tööle. Kui väärtus on suurem või võrdne lülitatakse pump välja.

- 3) Statistika koostamine. SCADA kaudu kuvatakse puurkaevu ja trassipumpade üldtootlikkused ning puurkaevupumba energiakulu 1 m<sup>3</sup> vee pumpamiseks (kWh/m<sup>3</sup>).
- 4) Visualiseeritakse kasutajale nii mahutid (sele 3.12) kui ka optimeerimise andmed (lisa 1), mida on võimalik muuta.
- 5) Koostatakse viimase 25 tunni graafikud järgnevatele muutujatele: puurkaevu pumba efektiivsus, mahutite 1 ja 2 nivood, rõhk trassis ja puurkaevu torus, puurkaevu- ja trassipumba veekulud (lisa 2).



Sele 3.12 SCADA-s visualiseeritud pumbad, mahutid, trassid ja klapid.

#### **3.4.4. Suhtlus**

Üheks tähtsamaks ülesandeks prototüübi tööle saamisel on suhtluse tagamine erinevate juhtimissüsteemi elementide vahel. Suhtluste protokolle illustreerib sele 3.7.

Sülearvuti, kus peal jookseb programm Movicon, on ühendatud kontrolloriga läbi USB/RS45 adapteri. Suhtlus käib läbi PPI S7 protokoll, mida toetavad mõlemad osapooled. Ühenduse eesmärgiks on lugeda andmeid kontrolleri mälupeadest ning samuti juhtida kontrolleri kasutaja poolt sisestavate sisenditega. Lisaks on võimalik muuta kontrolleri koodi läbi selle ühenduse.

Küsimaks uut töögraafikut peab programm tegema HTTP (Hypertext Transfer Protocol) POST tüüpi sünkroonse päringu serverisse. Päringu sisu on kodeeritud JSON (JavaScript Object Notation) formaadis ning seejärel oodatakse vastust samuti JSON formaadis. Kodeeritud sõnum peab sisaldama mahuti täituvuse, miinimumi, maksimumi ja pumba väljundvõimsuse väärtusi. Päringu vastuseks saadud massiiv peab sisaldama infot iga 24 tunni kohta, kas pump töötab või mitte.

Turuhinnad saab optimeerimismootor serveri andmebaasist (JSON formaadis). Selleks kasutab optimeerimismootor HTTP protokoll.

## 4. ELEKTRITARBIMISE JUHTIMISSÜSTEEMI RAKENDAMINE

### 4.1. Töögraafiku optimeerimine

Juhtimissüsteemi mõju hindamiseks testpäeva näitel tuleb peatükis 3 kirjeldatud süsteemi testida ning andmed koguda. Süsteemi testpäeva valikul on oluline, et tegemist oleks tööpäevaga, kuna nädalavahetusesti elektrihinna kõikumine turul on minimaalne. Samuti lihtsustaks analüüsimist see, kui testpäeva hinna variatsioon oleks mitme kordne.

Süsteemi testimise päevaks valiti reede, 23.05.2014. Antud kuupäeva elektri hinnad on toodud tabelis 4.1. Oluline on märkida, et elektri hinnad Nord Pool Spoti koduleheküljel on toodud CET ajatsooni järgi. Kasutades neid hindasid juhtimissüsteemi rakendamisel tuleb arvestada Eesti ajatsooniga (CET+1). See tähendab, et koduleheküljel olevatele hindade kellaegadele tuleb lisada üks tund juurde. Tabelis 4.1 toodud hindadele on vastav korrektsioon juba sisse viidud.

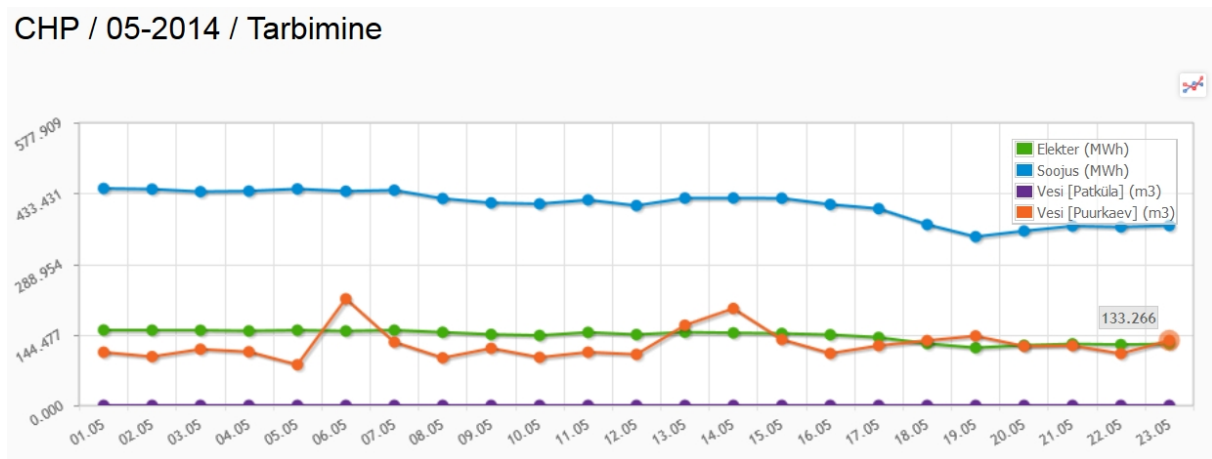
Tabel 4.1 Elektri hinnad 23.05.14 Eesti kauplemisspiirkonnas Nord Pool Spot turul [3]

Aeg	Hind (EUR/MWh)		
00-01	32,19	Min	24,64
01-02	29,33	Max	88
02-03	28,23	Avg	43,21
03-04	26,29	Peak	51,72
04-05	24,64	Off-Peak 1	35,97
05-06	27,16	Off-Peak 2	32,16
06-07	29,01		
07-08	47,01		
08-09	76,08		
09-10	76,06		
10-11	62,93		
11-12	55,06		
12-13	71		
13-14	88		
14-15	44,99		
15-16	39,56		
16-17	36,49		
17-18	35,3		
18-19	35,68		
19-20	40,99		
20-21	34,55		
21-22	33,76		
22-23	32,76		
23-00	31,88		

Peatükis 3.3 arvatigi, et viimasel kolmel kuul oli pumba keskmine tootlikus  $108 \text{ m}^3$  päevas. Kuna katse kestab ainult üks päev, mitte ei ole pikem vahemik, siis on oluline, et ennustatakse testpäeva veekulu võimalikult täpselt. Vee tarbimise graafikult (sele 4.1) näeb, et viimastel päevadel enne katset on veetarbimise trend olnud suurem võrreldes keskmisega:

- 18.05 –  $132 \text{ m}^3$
- 19.05 –  $142 \text{ m}^3$
- 20.05 –  $121 \text{ m}^3$
- 21.05 –  $122 \text{ m}^3$

Madalam veekulu 22. mail ( $106 \text{ m}^3$ ) oli seotud testimisega ning sellega ei pea arvestama. Sellest lähtuvalt ennustatakse vee tarbimist 23.05 keskmisest kõrgemaks –  $125 \text{ m}^3$  vett.



Sele 4.1 Maikuu vee tarbimise (oranž) graafik. Kaks suuremat tarbimise harja on tingitud mahutite puhastamisest.

Seega algoritmi sisestatakse test perioodiks uus tunni tootmismahut:

$$Q_t^P = \frac{125}{24} = 5,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Hoidla veetase kell 23.58, mis edastatakse optimeerimismootorile, on 83,5% ehk:

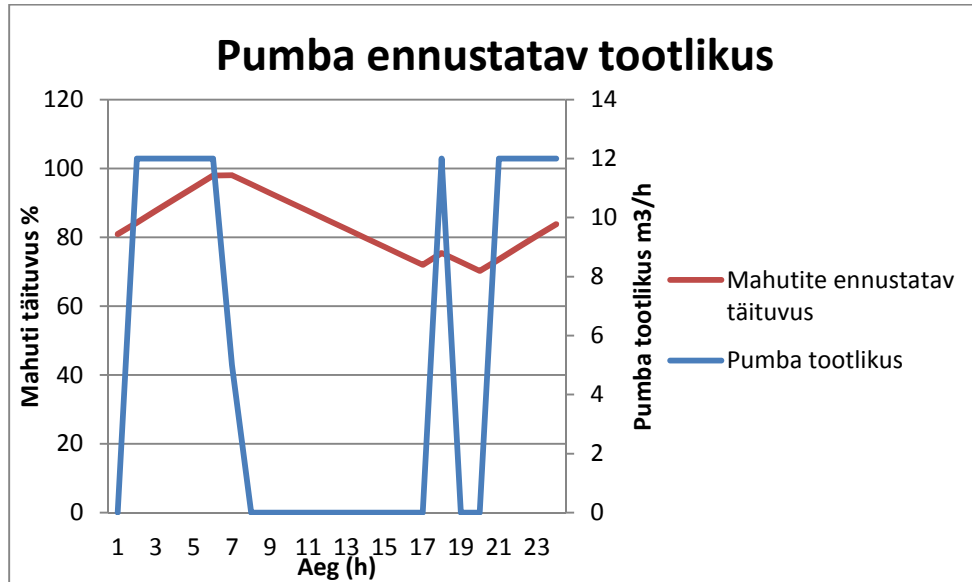
$$W_t = 200 * 0,835 = 167\text{m}^3$$

Tabel 4.2 Testpäeva (23.05) planeeritud optimeerimise andmed

Nr.	Kellaaeg	Paagi ennustatav täitumus (%)	Pumba Töögraafik	Planeeritav paaki pumbatava vee kogus (m <sup>3</sup> )	Paagi ennustatav veenivoo kõikumine (m <sup>3</sup> )
1	00 - 01	80,9	1	0	-5,2
2	01 - 02	84,3	0	12	6,8
3	02 - 03	87,7	0	12	6,8
4	03 - 04	91,1	0	12	6,8
5	04 - 05	94,5	0	12	6,8
6	05 - 06	97,9	0	12	6,8
7	06 - 07	98	0	5	-0,2
8	07 - 08	95,4	1	0	-5,2
9	08 - 09	92,8	1	0	-5,2
10	09 - 10	90,2	1	0	-5,2
11	10 - 11	87,6	1	0	-5,2
12	11 - 12	85	1	0	-5,2
13	12 - 13	82,4	1	0	-5,2
14	13 - 14	79,8	1	0	-5,2
15	14 - 15	77,2	1	0	-5,2
16	15 - 16	74,6	1	0	-5,2
17	16 - 17	72	1	0	-5,2
18	17 - 18	75,4	0	12	6,8
19	18 - 19	72,8	1	0	-5,2
20	19 - 20	70,2	1	0	-5,2
21	20 - 21	73,6	0	12	6,8
22	21 - 22	77	0	12	6,8
23	22 - 23	80,4	0	12	6,8
24	23 - 00	83,8	0	12	6,8

Pumba optimeeritud töögraafik testpäevale (23.05) on toodud tabelis 4.2 neljandas veerus. Väärtuse „0“ korral pump töötab ning väärtuse „1“ korral pump on välja lülitatud. Kolmandas veerus on pumba töögraafiku põhjal ennustatud mahutite täituvust ajas (%). Neljandas veerus on näidatud veekogused, mis pumbatakse testpäeval mahutitesse. Ajavahemikus 06.00-07.00 on mahutid täis ning toodud kogust vett (5 m<sup>3</sup>) läheb tarvis hoidmaks veetaset 98% läheduses. Viimas veerus on toodud mahutite veenivoo muutused. Kui pump ei tööta voolab mahutitest välja 5,2 m<sup>3</sup> vett. Kui pump töötab täis võimsusel, on mahutite veebilanss +6,8 m<sup>3</sup>.

Selel 4.2 on toodud graafik pumba ennustatavast tootlikkusest ja mahuti nivootaseme kõikumisest, kui pump töötab optimeeritud töögraafiku järgi. Ennustused on tehtud eeldusel, et tehas tarvitab tunnis vett 5,2 m<sup>3</sup>.



Sele 4.2 Pumba ennustatav tootlikus vastavalt optimeeritud töögraafikule

Lisas 1 on toodud testpäeva (23.05) optimeeritud sisendid pumbajaama kontrolleriile. Ülemises veerus on toodud pumba optimeeritud töögraafik (24 elemendiline massiiv). Lisaks on ära näidatud mahuti 2 täituvus (%) ning ülemine ja alumine piir (etteanne, %).

## 4.2. Juhtimissüsteemi tulemused

Testpäeval optimeeritud töögraafiku järgi töötanud pumba töögraafik on toodud lisas 2. Graafiku x-telg on ajatelg alates 22.05 kell 23.58.00 kuni 24.05 kell 00.00.00. Graafiku y-telg koosneb erinevate parameetrite teljestikest.

Graafikul olev roheline joon näitab trassi pumpade tootlikust (vooluhulka). Nagu graafikult näha, töötasid trassipumbad neljas režiimis:

- Tootlikkusega 0 l/min (pumbad seisid)
- Tootlikkusega 100 l/min
- Tootlikkusega 200 l/min
- Tootlikkusega 300 l/min



Punane ja rohekassinine joon märgivad rõhkusid pumbajaama torustikes.

Lilla joon näitab puurkaevu pumba efektiivsust, ehk vajaliku elektrienergia hulka ühe kuupmeetri vee transportimiseks (kWh/m<sup>3</sup>).

Hall joon (graafikul peidetud) näitab puurkaevu pumba tootlikust. Tootlikus oli vastavalt töögraafikule kas null või 200 l/min. Mõnikord võis tootlikus tõusta ka kuni 210 l/min. Puurkaevu pumba täpne vee tarbimine on toodud tabelis 4.3.

Sinise ja pruuni joonega on välja toodud vastavalt mahuti 1 ja mahuti 2 nivood (%). Kuigi kohati on nivoodel väikene erinevus, mis tuleneb rõhuanduritest, siis üldjoones muutuvad veetasemed mõlemas mahutis sama palju. Nagu näha graafikult lisas 2, siis veetasemed jõudsid küll väga lähedale alumisele ning ülemisele mahuti piirile, kuid kordagi ei ületanud neid.

**Tabel 4.3 Puurkaevu pumba vee tarbimine testpäeval (23.05)**

Aeg	Vesi m <sup>3</sup>
23.05.2014 - 00:00	0,050
23.05.2014 - 01:00	11,915
23.05.2014 - 02:00	12,190
23.05.2014 - 03:00	12,120
23.05.2014 - 04:00	12,100
23.05.2014 - 05:00	12,050
23.05.2014 - 06:00	12,010
23.05.2014 - 07:00	0,397
23.05.2014 - 08:00	0,000
23.05.2014 - 09:00	0,000
23.05.2014 - 10:00	0,000
23.05.2014 - 11:00	0,000
23.05.2014 - 12:00	0,000
23.05.2014 - 13:00	0,000
23.05.2014 - 14:00	0,000
23.05.2014 - 15:00	0,000
23.05.2014 - 16:00	0,000
23.05.2014 - 17:00	11,888
23.05.2014 - 18:00	0,403
23.05.2014 - 19:00	0,000
23.05.2014 - 20:00	11,843
23.05.2014 - 21:00	12,150
23.05.2014 - 22:00	12,090
23.05.2014 - 23:00	12,060
<b>KOKKU=</b>	<b>133,266</b>

## 5. TULEMUSTE ANALÜÜS

### 5.1. Testi tulemuste analüüs

#### 5.1.1. Puurkaevu pumba efektiivsus

Testperioodi jooksul kulutas pump keskmiselt 0,3 kWh energiat et pumbata 1 m<sup>3</sup> vett (lisa 2). Pumba efektiivsus oli kogu päeva jooksul küllaltki stabiilne. Kuna muutused olid väga väikesed, võib edasisteks arvutusteks kasutada keskmist väärtust.

Graafikust (lisa 2) selgub, et pumba esmakordsel tööle rakendumisel tõusis pumba energiakulu lühikeseks ajaks kõrgele (2,8 kWh/m<sup>3</sup>). Täpne põhjus ei ole teada. Kuna samaaegsel monitoorimisel energiakulu kasvu ei märganud, võib tegemist olla tarkvaralise veaga (kuvatakse valed andmed). Kuna edasistes pumba tööle rakendumistes mingisugust energiakulu tõusu ei täheldata, siis analüüsi huvides tegeletakse sellega kui eksega ning arvutustes sellega ei arvestata.

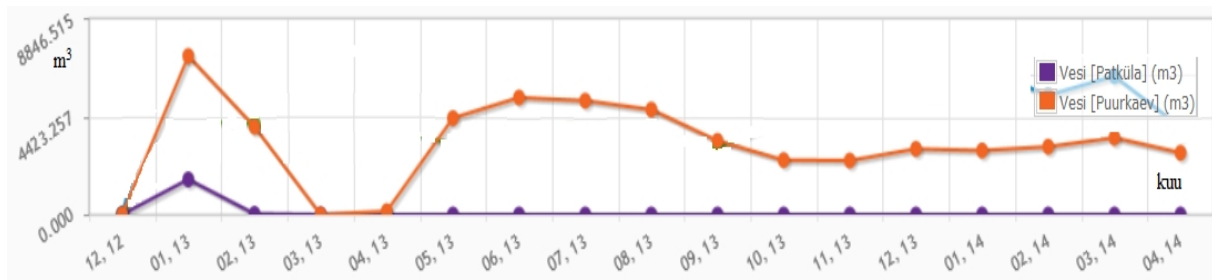
#### 5.1.2. Puurkaevu pumba tootlikus

Testpäeva vee tarbimiseks ennustati 125 m<sup>3</sup>. Tabel 4.3 näitab, et puurkaevu pump pumpas testpäeval kokku 133,266 m<sup>3</sup> vett. 7 m<sup>3</sup> vett, mis rohkem pumbati, tulenes sellest, et optimeerimismudeli järgi pidi pump pumpama kuuendal tunnil ainult 5 m<sup>3</sup> vett, kuna mahuti ennustati täis olema sellel ajal. Tegelikuses oli mahutites veel ruumi ning sel tunnil pumbati kokku 12 m<sup>3</sup> vett. Lisaks, nagu tabelist 4.3 selgub, pumpas pump peale igakordset klappide kinni panemist veel keskmiselt 0,4 m<sup>3</sup> vett. Seda seetõttu, et puurkaevu torustikus tuli saavutada kinniste klappidega rõhk 5 bar. Ülejäänud kuupmeetrid (0,466 m<sup>3</sup>) tulenesid pumba ebatäpsest tootmisest.

#### 5.1.3. Mahutite veetase

Lisas 2 olev graafik illustreerib väga hästi veetaseme kõikumist mahutites. Testpäeva alguses oli veetase 83,5% ning lõpus 77,0%. See tähendab, et isegi arvestades, et 125 m<sup>3</sup> asemel pumpas pump vett 133 m<sup>3</sup>, kulutas tehas vett veel lisaks 6,5% (13 m<sup>3</sup>). Seega kokku kulutas tehas reedel, 23.05, 146 m<sup>3</sup> vett, mis on 38 m<sup>3</sup> rohkem kui keskmine. Juhtimissüsteem on aga üles ehitatud põhimõttel, et kui vee tarbimine on mõnel päeval alla keskmise, siis süsteem normaliseerub ning mingeid lisa parandusi ei ole vaja sisse viia.

Lisaks tuleb meeles pidada, et vee keskmine tarbimine on leitud viimase kolme kuu statistika põhjal. Kui vaadata vee tarbimist pikemas perspektiivis, näiteks aasta, tuleb välja perioode kus vee tarbimine on alla viimase kolme kuu keskmise ning ka üle keskmise. Seega, edasise töötava lahenduse jaoks peaks kord kvartalis veetarbimise üle vaatama ja vajadusel muudatused tegema, või automatiseerima keskmise veekulu leidmise. Näiteks võib kontrolleri statistika põhjal ise leida viimase kolme kuu keskmise ning seda edastada optimeerimismudelile.



Sele 5.1 Vee tarbimise statistika tehases alates 12.12, kui tehas käivitati

Kuigi tehas tarbis vett testpäeval rohkem kui oli ennustatud, siis juhtimissüsteemi mõju hindamisel lähtutakse sellest veekogusest, mis pump mahutitesse pumpas.

## 5.2. Analüüs juhtimissüsteemi mõjust elektri kulule

### 5.2.1. Kulutatud elektrienergia hind

Kulutatud elektrienergia hinna leidmiseks tuleb teada kui palju vett pumbati ühes tunnis, kui palju energiat kulus ühe ühiku pumpamiseks ning kui palju on elektrienergia hind vastavas tunnis. Seega, vee pumpamise maksumus ühes tunnis:

$$M_t = Q_t * C_{Et} * P_t \quad (5.1)$$

- kus,  $M_t$  – Kulutatud elektrienergia maksumus vastaval tunnil (EUR)  
 $Q_t$  – pumbatud veemaht vastaval tunnil (m<sup>3</sup>)  
 $C_{Et}$  – pumba efektiivsus vastaval tunnil, arvutustes 0,3 kWh/m<sup>3</sup>  
 $P_t$  – Elektri hind vastaval tunnil (EUR/kWh)

Optimeeritud töögraafiku alusel töötanud pumba kulutatud elektrienergia maksumused igas tunnis on toodud tabelis 5.1. Päeva kogumaksumuse saab leida:

$$Maksumus = \sum_{t=0}^{23} M_t \quad (5.2)$$

Tabel 5.1 Optimeeritud töögraafiku alusel töötanud pumba elektrienergia maksumus

Aeg	Vesi (m <sup>3</sup> )	Energia (kWh) = Vesi(m <sup>3</sup> ) * efektiivsus(kWh/m <sup>3</sup> )	Hind (EUR/MWh)	Hind (EUR/kWh)	Maksumus (EUR)= energia (kWh) * Hind (EUR/kWh)
23.05.2014 - 00:00	0,050	0,015	32,19	0,03219	0,000483
23.05.2014 - 01:00	11,915	3,5745	29,33	0,02933	0,10484
23.05.2014 - 02:00	12,190	3,657	28,23	0,02823	0,103237
23.05.2014 - 03:00	12,120	3,636	26,29	0,02629	0,09559
23.05.2014 - 04:00	12,100	3,63	24,64	0,02464	0,089443
23.05.2014 - 05:00	12,050	3,615	27,16	0,02716	0,098183
23.05.2014 - 06:00	12,010	3,603	29,01	0,02901	0,104523
23.05.2014 - 07:00	0,397	0,1191	47,01	0,04701	0,005599
23.05.2014 - 08:00	0,000	0	76,08	0,07608	0
23.05.2014 - 09:00	0,000	0	76,06	0,07606	0
23.05.2014 - 10:00	0,000	0	62,93	0,06293	0
23.05.2014 - 11:00	0,000	0	55,06	0,05506	0
23.05.2014 - 12:00	0,000	0	71,00	0,071	0
23.05.2014 - 13:00	0,000	0	88,00	0,088	0
23.05.2014 - 14:00	0,000	0	44,99	0,04499	0
23.05.2014 - 15:00	0,000	0	39,56	0,03956	0
23.05.2014 - 16:00	0,000	0	36,49	0,03649	0
23.05.2014 - 17:00	11,888	3,5664	35,30	0,0353	0,125894
23.05.2014 - 18:00	0,403	0,1209	35,68	0,03568	0,004314
23.05.2014 - 19:00	0,000	0	40,99	0,04099	0
23.05.2014 - 20:00	11,843	3,5529	34,55	0,03455	0,122753
23.05.2014 - 21:00	12,150	3,645	33,76	0,03376	0,123055
23.05.2014 - 22:00	12,090	3,627	32,76	0,03276	0,118821
23.05.2014 - 23:00	12,060	3,618	31,88	0,03188	0,115342
KOKKU=		39,9798			1,212077

Kokku läks testpäeval maksuma optimeeritud töögraafiku alusel töötanud pumba elektrienergia:

Maksumus = 1,21€

## 5.2.2. Alternatiivsete stsenaariumite elektrihinnad

Elektritarbimise juhtimissüsteemi mõju analüüsimiseks tuleb peatükis 5.2.1 leitud maksumust võrrelda olukorraga, kus päeva põhiselt optimeeritud töögraafikut ei ole rakendatud. Ideaalis tuleks võrrelda optimeeritud pumpamist graafikuga, kuidas pump oleks töötanud testpäeval, kui juhtimissüsteemi ei oleks rakendatud. Kahjuks puudub tehase poolt tunnis tarvitatava vee täpne statistika, millega saaks hinnata juhtimissüsteemi mõju olukorraga, kus veetaset oleks hoitud 95% ja 98% vahel. Seega tuleb tulemusi hinnata teiste kriteeriumite alustel.

Juhtimissüsteemi mõju hindamiseks on koostatud kolm erinevat stsenaariumi. Esimese stsenaariumi korral pumpab pump vett igas tunnis võrdselt palju. Teise kahe stsenaariumi korral on võetud pumbajaama ajaloolisest statistikast kaks päeva, kus pump on pumbanud täpselt sama suure koguse vett ( $133 \text{ m}^3$ ) ning leitakse nende päevade maksumused testpäeva hindade korral.

Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et kuigi tehas tarvitas testpäeval rohkem vett, kui pump juurde pumpas, arvestatakse stsenaariumite maksumuste leidmisel ikkagi seda kogust, mis pumpas puurkaevu pump. Selle põhjal on võimalik leida ja võrrelda reaalselt energia kulu maksumust. Kuigi stsenaariumid ei anna võrdluseks täpset maksumust juhul, kui juhtimissüsteemi ei oleks rakendatud, siis peegeldavad nad (stsenaarium 2 ja 3) piisavalt täpselt elektrienergia maksumust tarbimisega juhuslikul ajal (siis kui vaja).

### I. Stsenaarium 1: võrdne tarbimine

Stsenaarium 1 eesmärgiks on võrrelda pidevat elektritarbimist ja optimeeritud töögraafikuga tarbimist.

Pideva tarbimise maksumuse leidmiseks on vaja teada vee pumpamise hulka ühes tunnis:

$$Q_{tk} = \frac{Q^P}{24} = \frac{133,266}{24} = 5,55275 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \quad (5.3)$$

kus,  $Q_{tk}$  – keskmine pumba tootmiskaht ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$Q^P$  – vajalik päeva pumbatav kogus ( $\text{m}^3$ )

Vastavalt valemis 5.3 leitud pumba tootlikkusele ühes tunnis, saab välja arvutada testpäeva hindadega elektrienergia maksumuse. Arvutused on toodud tabelis 5.2:

**Tabel 5.2 Stsenaarium 1 alusel töötanud pumba elektrienergia maksumus**

Aeg	Vesi (m <sup>3</sup> )	Energia (kWh) = Vesi(m <sup>3</sup> ) * efektiivsus(kWh/m <sup>3</sup> )	Hind (EUR/MWh)	Hind (EUR/kWh)	Maksumus(EUR)= energia (kWh) * Hind (EUR/kWh)
23.05.2014 - 00:00	5,553	1,665825	32,19	0,03219	0,053623
23.05.2014 - 01:00	5,553	1,665825	29,33	0,02933	0,048859
23.05.2014 - 02:00	5,553	1,665825	28,23	0,02823	0,047026
23.05.2014 - 03:00	5,553	1,665825	26,29	0,02629	0,043795
23.05.2014 - 04:00	5,553	1,665825	24,64	0,02464	0,041046
23.05.2014 - 05:00	5,553	1,665825	27,16	0,02716	0,045244
23.05.2014 - 06:00	5,553	1,665825	29,01	0,02901	0,048326
23.05.2014 - 07:00	5,553	1,665825	47,01	0,04701	0,07831
23.05.2014 - 08:00	5,553	1,665825	76,08	0,07608	0,126736
23.05.2014 - 09:00	5,553	1,665825	76,06	0,07606	0,126703
23.05.2014 - 10:00	5,553	1,665825	62,93	0,06293	0,10483
23.05.2014 - 11:00	5,553	1,665825	55,06	0,05506	0,09172
23.05.2014 - 12:00	5,553	1,665825	71,00	0,071	0,118274
23.05.2014 - 13:00	5,553	1,665825	88,00	0,088	0,146593
23.05.2014 - 14:00	5,553	1,665825	44,99	0,04499	0,074945
23.05.2014 - 15:00	5,553	1,665825	39,56	0,03956	0,0659
23.05.2014 - 16:00	5,553	1,665825	36,49	0,03649	0,060786
23.05.2014 - 17:00	5,553	1,665825	35,30	0,0353	0,058804
23.05.2014 - 18:00	5,553	1,665825	35,68	0,03568	0,059437
23.05.2014 - 19:00	5,553	1,665825	40,99	0,04099	0,068282
23.05.2014 - 20:00	5,553	1,665825	34,55	0,03455	0,057554
23.05.2014 - 21:00	5,553	1,665825	33,76	0,03376	0,056238
23.05.2014 - 22:00	5,553	1,665825	32,76	0,03276	0,054572
23.05.2014 - 23:00	5,553	1,665825	31,88	0,03188	0,053107
KOKKU=	133,266	39,9798			1,730709

Kui testpäeval oleks pump tootnud igas tunnis võrdselt vett, oleks elektrienergia kogumaksumus tulnud:

Maksumus = 1,73€

## II. Stsenaarium 2: tarbimine 18.05.2014 graafiku järgi

Stsenaarium 2-ga leitakse, kui palju oleks testpäeval maksma läinud elekter, kui pump oleks pumbanud 18.05 töögraafiku järgi.

18.05.2014 tootis pump 132,973 m<sup>3</sup> vett. Erinevus testpäeva tootmisega (0,293 m<sup>3</sup>) on piisavalt väikene, et sellega arvestama ei pea. Pumba tootlikkuse andmed tunni kohta 18.05 ning maksumused testpäeval on toodud tabelis 5.3. Kasutatud on valemid 5.1 ja 5.2.

**Tabel 5.3 Stsenaarium 2 alusel töötanud pumba elektrienergia maksumused**

Aeg	Vesi (m3)	Energia (kWh) = Vesi(m3) * efektiivsus(kWh/m3)	Hind (EUR/MWh)	Hind (EUR/kWh)	Maksumus (EUR)= energia (kWh) * Hind (EUR/kWh)
18.05.2014 - 00:00	3,280	0,984	32,19	0,03219	0,031675
18.05.2014 - 01:00	3,190	0,957	29,33	0,02933	0,028069
18.05.2014 - 02:00	4,798	1,4394	28,23	0,02823	0,040634
18.05.2014 - 03:00	5,243	1,5729	26,29	0,02629	0,041352
18.05.2014 - 04:00	4,553	1,3659	24,64	0,02464	0,033656
18.05.2014 - 05:00	7,367	2,2101	27,16	0,02716	0,060026
18.05.2014 - 06:00	5,944	1,7832	29,01	0,02901	0,051731
18.05.2014 - 07:00	3,456	1,0368	47,01	0,04701	0,04874
18.05.2014 - 08:00	5,363	1,6089	76,08	0,07608	0,122405
18.05.2014 - 09:00	5,657	1,6971	76,06	0,07606	0,129081
18.05.2014 - 10:00	3,040	0,912	62,93	0,06293	0,057392
18.05.2014 - 11:00	8,283	2,4849	55,06	0,05506	0,136819
18.05.2014 - 12:00	7,747	2,3241	71,00	0,071	0,165011
18.05.2014 - 13:00	4,653	1,3959	88,00	0,088	0,122839
18.05.2014 - 14:00	6,127	1,8381	44,99	0,04499	0,082696
18.05.2014 - 15:00	5,220	1,566	39,56	0,03956	0,061951
18.05.2014 - 16:00	6,158	1,8474	36,49	0,03649	0,067412
18.05.2014 - 17:00	4,843	1,4529	35,30	0,0353	0,051287
18.05.2014 - 18:00	8,723	2,6169	35,68	0,03568	0,093371
18.05.2014 - 19:00	4,907	1,4721	40,99	0,04099	0,060341
18.05.2014 - 20:00	6,090	1,827	34,55	0,03455	0,063123
18.05.2014 - 21:00	9,240	2,772	33,76	0,03376	0,093583
18.05.2014 - 22:00	2,928	0,8784	32,76	0,03276	0,028776
18.05.2014 - 23:00	6,163	1,8489	31,88	0,03188	0,058943
KOKKU=	132,973	39,8919			1,730913

Kui testpäeval oleks pump töötanud 18.05.2014 töögraafiku järgi, oleks elektri hind tulnud:

Maksumus = 1,73€

### III. Stsenaarium 3: tarbimine 23.09.2013 graafiku järgi

Stsenaarium 3-ga leitakse, kui palju oleks testpäeval maksma läinud elekter, kui pump oleks pumbanud 23.09.2013 töögraafiku järgi.

23.09.2013 tootis pump 132,227 m<sup>3</sup> vett. Erinevus testpäeva tootmisega (1,039 m<sup>3</sup>) on piisavalt väikene, et sellega arvestama ei pea. Pumba tootlikkuse andmed tunni kohta 18.05 ning maksumused testpäeval on toodud tabelis 5.4. Kasutatud on valemeid 5.1 ja 5.2.

**Tabel 5.4 Stsenaarium 3 alusel töötanud pumba elektrienergia maksumused**

Aeg	Vesi (m <sup>3</sup> )	Energia (kWh) = Vesi(m <sup>3</sup> ) * efektiivsus(kWh/m <sup>3</sup> )	Hind (EUR/MWh)	Hind (EUR/kWh)	Maksumus (EUR)= energia (kWh) * Hind (EUR/kWh)
23.09.2013 - 00:00	8,270	2,481	32,19	0,03219	0,079863
23.09.2013 - 01:00	2,382	0,7146	29,33	0,02933	0,020959
23.09.2013 - 02:00	0,000	0	28,23	0,02823	0
23.09.2013 - 03:00	0,000	0	26,29	0,02629	0
23.09.2013 - 04:00	2,232	0,6696	24,64	0,02464	0,016499
23.09.2013 - 05:00	1,432	0,4296	27,16	0,02716	0,011668
23.09.2013 - 06:00	0,000	0	29,01	0,02901	0
23.09.2013 - 07:00	0,000	0	47,01	0,04701	0
23.09.2013 - 08:00	6,947	2,0841	76,08	0,07608	0,158558
23.09.2013 - 09:00	11,781	3,5343	76,06	0,07606	0,268819
23.09.2013 - 10:00	1,210	0,363	62,93	0,06293	0,022844
23.09.2013 - 11:00	4,423	1,3269	55,06	0,05506	0,073059
23.09.2013 - 12:00	4,209	1,2627	71,00	0,071	0,089652
23.09.2013 - 13:00	1,080	0,324	88,00	0,088	0,028512
23.09.2013 - 14:00	11,823	3,5469	44,99	0,04499	0,159575
23.09.2013 - 15:00	5,212	1,5636	39,56	0,03956	0,061856
23.09.2013 - 16:00	7,698	2,3094	36,49	0,03649	0,08427
23.09.2013 - 17:00	11,723	3,5169	35,30	0,0353	0,124147
23.09.2013 - 18:00	4,967	1,4901	35,68	0,03568	0,053167
23.09.2013 - 19:00	11,712	3,5136	40,99	0,04099	0,144022
23.09.2013 - 20:00	3,398	1,0194	34,55	0,03455	0,03522
23.09.2013 - 21:00	8,454	2,5362	33,76	0,03376	0,085622
23.09.2013 - 22:00	11,662	3,4986	32,76	0,03276	0,114614
23.09.2013 - 23:00	11,612	3,4836	31,88	0,03188	0,111057
KOKKU=	132,227	39,6681			1,743984

Kui testpäeval oleks pump töötanud 23.09.2013 töögraafiku järgi, oleks elektri hind tulnud:

Maksumus = 1,74€



### 5.2.3. Tulemuste võrdlus

Elektri maksumuste võrdlused on toodud tabelis 5.5:

Tabel 5.5 Erinevate stsenaariumite maksumuste võrdlus

	Optimeeritud graafik	Ühtlane tootmine (stsenaarium 1)	18.05.2014 tootmine (stsenaarium 2)	23.09.2013 tootmine (stsenaarium 3)
Päevane elektrikulu maksumus	1,21 €	1,73€	1,73€	1,74€
Protsentuaalne maksumus (1,73-100%)	70%	100%	100%	101%

Tabeli 5.5 põhjal saab analüüsida juhtimissüsteemi rakendamise mõju veepumbale. Võrreldes stsenaariumiga, kus pump oleks tootnud võrdselt palju vett igas tunnis, saavutati optimeeritud graafikuga 30%-ne kokkuhoid. Samuti saavutati 30% (0,52€) kokkuhoid ka stsenaariumite 1 ja 2 puhul, kus pump tarbis elektrit vastavalt vajadusele (juhuslikult).

Antud testimispäeva tulemuste põhjal võib hinnata, et elektritarbimise juhtimissüsteemi rakendamisega on saavutatud veepumbal märkimisväärset kokkuhoiud. Kuigi see kokkuhoid on marginaalselt väike võrreldes tehtud kulutustega, siis rakendades edaspidi juhtimissüsteemi tarbijatele, mille päevast tarbimist võib mõõta MWh-ga, lüheneb tasuvusaeg mitmekordselt.

Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et antud lahendustega saab hinnata juhtimissüsteemi mõju tööstusele tööpäevadel, kus elektrihind kõigub mitmekordselt. Nädalavahetustel on hind tunduvalt stabiilsem ning sellist kokkuhoidu ei ole võimalik saavutada. Seega pikemas perspektiivis võib eeldada et saavutatud kokkuhoid jääb väiksemaks.

## KOKKUVÕTE

Üha kallinevate elektrihindade tõttu otsivad ettevõtted kulude kokkuhoidmiseks uusi lahendusi. Avatud ja üha liberaliseeruvad elektriturud annavad võimalusi kokkuhoiuks turuosalistele, kes seda ära oskavad kasutada. Üheks selliseks võimaluseks on elektritarbimise nihutamine vastavalt turu hindadele. See tähendab, et elektrit tarbitakse ettevõttes siis, kui hind on madal, ilma, et see mõjutaks lõppprodukti toodangu mahtu.

Käesolevas lõputöös arendati edasi Tallinna Tehnikaülikooli energeetikateaduskonna doktorantuuris [4] välja töötatud teoreetilist mudelit, mis juhib elektritarbimist vastavalt päevette teada olevatele turu hindadele. Lõputöö eesmärgiks oli projekteerida elektritarbimise juhtimissüsteem ning rakendada seda tööstuses, hindamaks juhtimissüsteemi mõju tööstuse kulude vähendamiseks.

Lõputöö eesmärgi täitmiseks uuriti elektritarbimise nihutamise teoreetilisi aluseid ning vastavalt sellele projekteeriti elektritarbimise juhtimissüsteem tööstuses olevale tarbijale. Elektritarbimise juhtimissüsteemi rakendati puidugraanuleid tootva ettevõtte ühe pumbajaama puurkaevu pumbale ning koguti andmeid selle süsteemi hindamiseks ja analüüsimiseks. Puurkaevu pump tarbib küll suhteliselt vähe elektrienergiat, kuid on see eest paindlik katsetustele ning sobib prototüübi projekteerimise põhjaks väga hästi.

Lõputöö teises peatükis uuriti elektritarbimise nihutamise teoreetilisi aluseid. Varasemad uuringud on näidanud, et elektritarbimise nihutamisega optimaalseimasse ajaperioodi vastavalt turu hindadele võib saavutada kulude kokkuhoidu kuni 17% [4]. Töös on välja toodud olulisemad elektritarbimise nihutamise eeldused: vaheladude olemasolu, piisav hinna kõikumine ühes päevas, tootmise paindlikkus muudatuste tegemiseks, kaugloetavate arvestite olemasolu ning see, kas vajalik tootmismahd on ette ennustatav või mitte. Peatüki lõpus on kirjeldatud optimeerimismudelit, mille najal luuakse elektritarbimise juhtimissüsteem.

Lõputöö kolmandas peatükis projekteeriti elektritarbimise juhtimissüsteem puurkaevu pumbale. Selleks analüüsiti olemasoleva pumbajaama süsteemi ning komponente, millest see koosneb. Seejärel arvutati välja pumbajaama optimeerimismudeli vajalikud parameetrid, nagu päevane tootmismahd, masina väljundvõimsus, koormuse nihutamise välised kulud jne.

Antud analüüsi põhjal projekteeriti juhtimissüsteem, mis koosneb kahest osast: pumbajaama juhtivast kontrollierist ning pumba elektritarbimist optimeeriv optimeerimismootor. Optimeerimismootoriks on pilveteenusel põhinev apliksatsioon, mis optimeerib talle saadetud andmete põhjal kõige odavama töögraafiku. Kuna pumbajaamal puudus kontrollier, mis oleks võimeline suhtlema optimeerimismootoriga, tuli kontrollierit riistvaraliselt täiustada. Lisaks tuli muuta kontrollieri tööprogrammi ning luua sellele SCADA liides.

Neljandas peatükis rakendati juhtimissüsteemi puurkaevu pumbale. Selleks valiti üks testpäev ning selle päeva hindade põhjal leiti optimaalseim töögraafik pumbale. Testpäeva pumpamise tulemused on toodud nii lisa 2 kui ka tabelis 4.3.

Viiendas peatükis analüüsiti tulemusi ning hinnati juhtimissüsteemi rakendamise mõju. Tulemuste põhjal leiti pumba poolt kulutatud elektrienergia maksumus. Kuna puudub täpne statistika, kuidas pump oleks pumbanud, kui juhtimissüsteemi ei oleks rakendatud, koostati analüüsimise eesmärgil kolm erinevat stsenaariumi. Esimese stsenaariumi puhul leiti elektrienergia maksumus, kui pump oleks pumbanud igas tunnis ühtlaselt palju. Teise ja kolmanda stsenaariumi korral valiti ajaloost päev, kus pumba tootlikus oli võrdne testpäevaga ning leiti elektrienergia maksumused vastavalt testpäeva hindadega. Võrreldes stsenaariumite tulemusi reaalse tulemusega saab hinnata juhtimissüsteemi mõju tööstusele.

Testpäeval pumba poolt kulutatud elektrienergia maksumus oli 1,21€. Stsenaarium 1 ja 2 korral tuli elektrienergia maksumuseks 1,73€ ja stsenaarium 3 korral 1,74€.

Ühe testpäeva näitel analüüsitud tulemuste põhjal leiti, et optimeeritud graafikuga töötav pump hoidis elektrienergia kuludelt kokku 30% ehk 0,52€. Kuigi saavutatud kokkuhoid oli marginaalselt väike võrreldes juhtimissüsteemile tehtud kulutustega, näitas see hästi, et rakendades elektritarbimise juhtimissüsteemi suurematele tarbijatele on võimalik saavutada arvestatavat kokkuhoidu.

Tähelepanu tuleb aga pöörata sellele, et käesolevas töös hinnati juhtimissüsteemi mõju ühe testpäeva näitel (reedene päev). Kuna nädalavahetusesti on elektrituru hindade kõikumine minimaalne, siis pikemas perspektiivis on elektrienergia kokkuhoid madalam kui 30%. Edasises arendustöös tulekski uurida juhtimissüsteemi mõju pikemas ajavahemikus, arvestades ka nädalavahetuste ning aastaegade hinnalist kõikumist.

Kuna tulemustest on selgelt näha, et elektritarbimise nihutamise on võimalik saavutada kokkuhoidu elektrihindadelt, siis annab see lõputööle tugeva praktilise väärtuse. Antud prototüübi põhjal on võimalik edasi liikuda süsteemi täiustamise ning turustamise poole. Juhtimissüsteemi saab rakendada paljudes ettevõtetes, kus on selleks olemas vajalikud eeldused (kõige tähtsam on vaheladu olemasolu). Kuna Eestis turg alles avanes, siis hetkel veel paljudes ettevõtetes elektritarbimise nihutamist ei kasutata.

Edasised arengusuunad antud lõputöö põhjal peaksid olema juhtimissüsteemile parenduste sisse viimine ning pikemad katsetused. Kui hetkel esitab kontrolleri optimeerimismootori sisendisse neli tähtsamat parameetrit, siis tulevikus peaks ta edastama kõik tarvilikud parameetrid. Sellisel juhul saaks luua universaalse optimeerimismootori, mis suudab sisendite põhjal optimeerida töögraafikud ka teistele tarbijatele.

Kontrolleri näitel selgus, et arvutatud päeva keskmine tarbimine oli pikemas ajas muutuv. Seega tuleks juhtimissüsteemile lisaks luua algoritm, mis suudab hinnata ja ennustada keskmiste tarbimiste muutumist.

Viimase olulise arengusuunana tuleks uurida tervele tehasele juhtimissüsteemi rakendamist. Antud töös käsitleti ainult ühe tarbija optimeerimist vastavalt elektri hindadele. Suurema kokkuhoiu eesmärgil tuleks aga optimeerida terve tootmisliin või tehas.

Seatud ülesanded, mis püstitati töö alguses, said täidetud ning probleemid lahendatud. Loodud on reaalselt töötav elektritarbimise juhtimissüsteem, millega on võimalik saavutada arvestatavat kokkuhoidu elektri kuludelt.

## SUMMARY

Due to the more increasingly rising electric prizes, companies are seeking for solutions to manage their costs. Opened and more increasingly liberalizing electric markets are giving opportunities for the market participants, who know how to take advantage of the markets. One of such an opportunity is load management accordingly to market prices. This means that electricity is consumed when the price is low without affecting the end product production.

Present thesis is further development of a theoretical model produced in Tallinns University of Technologies in the energetic department. The model describes shifting of the electric load according to the day-ahead spot market prices. The purpose of this thesis is to design a load management system and to apply it in industry in order to evaluate management systems effect on reducing industries costs.

To achieve the purpose of the thesis, load shifting theory was researched and from it a load management system for industrial consumer was designed. Thereafter the management system was applied and data gathered to evaluate and analyze the system. The load management system was applied to water pump in a factory which produces wood pellets. Even though the pump does not consume very much of electrical energy, it suited well for designing a prototype because it was very flexible.

In the second chapter the theory of load shifting was researched. Earlier researches had shown that shifting load to most optimal timeframe could give savings on electricity costs up to 17% [4]. The most important assumptions for shifting load are brought out: having intermediate storages, the fluctuation of the prices, flexibility of producing, having hour counting meters and knowing the needed produced volumes in a day. In the end of the second chapter the optimization model, upon which the management system is designed, is described.

In the third chapter the load managements system is designed for the water pump. For that, the pump station systems and components are analyzed. Thereafter the optimization model parameters, like days producing volume, output power, external costs etc. are calculated. With the given analyzes the management system is designed. The system consists of two parts: controller operating the pump station and the optimization motor optimizing the load shifting. Optimization motor is an application in the cloud, which optimizes with the given inputs the most low-priced work schedule. Since the pump stations controller was not capable of

communicating with optimization motor, the hardware needed to be upgraded. In addition the work program of the controller had to be changed and SCADA interface created.

In the fourth chapter the load management system was applied to the water pump. For that a test day was chosen and with its prices the optimized work schedule was calculated. The results of test day pumping are brought in appendix 2 and in table 4.3.

In the fifth chapter the results were analyzed and the management systems effect was evaluated. Based on the results the cost of electricity was calculated. Since there lacked accurate statistics, how the pump would have consumed without the applied management system, three different scenarios were produced. In the first scenario electricity cost was calculated when the pump would have pumped the same volume in every hour. In the case of second and third scenario a day with similar produced volume was selected from the history and the costs of electricity's were calculated with the tests day prices. When comparing the scenarios results with the actual result, the management system can be evaluated.

During the test day, the price of consumed electric energy was 1,21€. With the scenarios 1 and 2 the electricity price was 1,73€ and with scenario 3 it was 1,74€.

In the example of the analyzed results of the test day, it was found that pump with the optimized work schedule saved up to 30% (0,52€) from the electricity costs. Although the saving was considerably small comparing to the price of building the management system, it showed that when the management system is applied to a much larger consumer, a considerable saving may be gained.

Attention must be given to the fact, that the effect of the management system was evaluated upon one test day (Friday). Since during weekends the fluctuation of electricity market prices is minimal, the saving from costs over a longer period might be lower than 30%. In further research effect of management system over a long period of time, including weekends and seasons must be studied.

Since it is clear from the results, that shifting load can give considerable savings from the electricity costs, it gives a strong practical value to the thesis. With the designed prototype it is possible to improve and market the management system. Management system can be applied in various factories, as long as they have the right preconditions (out of which the

most important is to have an intermediate storage). Since the market opened fairly recently in Estonia, then the load shifting is not commonly used in Estonian companies.

Further developments with current thesis should involve improving the management system and producing longer test periods. When at the moment the controller sends 4 inputs to the optimization motor, then in the future it should send all of its parameters. This would allow the creating of a universal optimization motor, which could optimize work schedules for other consumers as well.

In addition, when calculating the average water consumption, the fact that the average can change over time, must be considered. Therefore, an algorithm should be created for controller to be able to assess its own water consumption and make changes in data if needed.

The last important development direction would be to research the effect of applying management system to the whole factory. In the current thesis the load management effect is studied only on one consumer. However, costs would be lowered considerably more when the whole producing line or factory would be optimized.

The given tasks, which were proposed in the beginning of this thesis, are completed and problems solved. A real working load management system has been designed which gives a considerable saving on electricity costs.

## KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Energiatalgude kodulehekül [WWW] [http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri\\_tarbimine](http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri_tarbimine) (23.05.2014)
- [2] Ecorys Research and Consulting, „Study on European Energy-Intensive Industries – The Usefulness of Estimating Sectoral Price Elasticities“, Methodological Review, First Interim Report for the Directorate- General Enterprise & Industry. ENTR/06/054. Cambridge, UK, 2009.
- [3] Nord Pool Spot kodulehekül [WWW] <http://nordpoolspot.com/> (10.04.2014)
- [4] P. Uemaa, J. Valtin, J. Kilter, A. Puusepp, I. Drovтар, A. Rosin. „Cost-Effective Optimization of Load Shifting in the Industry by Using Intermediate Storages. - Innovative Smart Grid Technologies Europe“ (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES, 1-5
- [5] T. Logenthiran, D. Srinivasan, T. Z. Shun. „Demand Side Management Smart Grid Using Heuristic Optimization“. – IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, sept 2012, vol. 3, no. 3, 1244-1252
- [6] K. Furusawa, H. Sugihara, K. Tsuji. „Economic Evaluation of Demand-side Energy Storage Systems by Using a Multi-Agent-Based Electricity Market“. – Electrical Engineering in Japan, mai 2009, (167), 3645
- [7] P. Uemaa, J. Valtin, J. Kilter, A. Puusepp, I. Drovтар, A. Rosin. „Load Control Implementation in the Energy Intensive Industry“. – 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Beirut, Lebanon, aprill 2014, 213-218
- [8] Elektrilevi kodulehekül [WWW] <https://www.elektrilevi.ee/kauglugemine-korduvad-kysimused> (16.04.2014)
- [9] Calpeda kodulehekül [WWW] <http://uk.calpeda.com/products/sd> (19.04.2014)
- [10] Mitsubishi Electric [WWW] [http://www.meau.com/eprise/main/sites/public/PRODUCTS/Variable\\_Frequency\\_Drives/F700/-Data\\_Sheet](http://www.meau.com/eprise/main/sites/public/PRODUCTS/Variable_Frequency_Drives/F700/-Data_Sheet) (20.04.2014)
- [11] Siemens Automation modular controller SIMATIC S7 [WWW] <http://www.automation.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/simatic-s7-controller/s7-200/cpu/pages/default.aspx#content> (24.04.2014)
- [12] Microsoft Solver Foundation [WWW] <http://msdn.microsoft.com/en-us/devlabs/hh145003.aspx> (26.04.2014)



- [13] Siemens Simatic S7 PLC kontrolleriid [WWW]  
<http://www.automation.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/simatic-s7-controller/Pages/Default.aspx> (27.04.2014)
- [14] Siemens kontrolleriite hinnad veebipoes [WWW]  
<http://www.conrad.com/ce/en/overview/1101119/Siemens-SIMATIC-S7;jsessionid=17297CF12262E6CB015AA35388237731.ASTPCEN22> (27.04.2014)
- [15] Hirschmann Media Converter veebipoes [WWW]  
<http://www.industrialnetworking.com/Manufacturers/Hirschmann-Media-Converters/Hirschmann-SPIDER-1TX-1FX-EEC-Media-Converter> (27.04.2014)
- [16] S7-200 kommunikatsiooni moodulite andmed [WWW]  
[http://www.automation.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/simatic-s7-controller/s7-200/communication/Documents/e20001-a1020-p272-x-7600\\_24-25.pdf](http://www.automation.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/simatic-s7-controller/s7-200/communication/Documents/e20001-a1020-p272-x-7600_24-25.pdf) (28.04.2014)
- [17] Siemens SIMATIC S7-200 CP243-1 IT hinnad veebipoes [WWW]  
<http://www.plchardware.com/Products/SM-6GK7243-1GX00-0XE0-UPP.aspx> (28.04.2014)
- [18] Beijer Electronics HMI operatsioonisüsteemid ja arvutid [WWW]  
[http://www.beijer.ee/web/web\\_ee\\_be\\_ee.nsf/alldocuments/7997E41B9D7849EAC125794C002C94CF](http://www.beijer.ee/web/web_ee_be_ee.nsf/alldocuments/7997E41B9D7849EAC125794C002C94CF) (29.04.2014)
- [19] USB to RS485 kaabli hinnad veebipoes [WWW]  
[http://apple.clickandbuild.com/cnb/shop/ftdichip?productID=101&op=catalogue-product\\_info-null&prodCategoryID=91](http://apple.clickandbuild.com/cnb/shop/ftdichip?productID=101&op=catalogue-product_info-null&prodCategoryID=91) (29.04.2014)



# Lisa 2 – Test päeva (23.05) pumba statistika

