



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Virumaa kolledž

**Liftide rekuperatiivpidurdusenergia taaskasutamine  
Tallinna Teletorni näitel**

**Recuperative braking energy recovery of the Tallinn TV Tower  
elevators**

Masinaehitus- ja energiatehnoloogia protsesside juhtimine

ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Peeter Leet

Üliõpilaskood: EDJR193200

Juhendaja: Veronika Shirokova,  
vanemlektor, programmijuht

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“22” mai 2023.

Autor: Peeter Leet

/ digiallkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele  
“22” mai 2023.

Juhendaja: Veroonika Shirokova

/ digiallkiri /

Kaitsmisele lubatud

“22” mai 2023.

Kaitsmiskomisjoni esimees Veroonika Shirokova

/ nimi ja digiallkiri /

## **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS**

Mina Peeter Leet (sünnikuupäev: 27.11.1990)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Tallinna Teletorni liftide rekuperatiivpidurdusenergia taaskasutamine“ mille juhendaja on Veroonika Shirokova,
  - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

# TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Peeter Leet, EDJR193200

Õppekava, peeriala: EDJR 16/17 Masinaehitus- ja energiatehnoloogia protsesside juhtimine, energiatehnika

Juhendaja(d): Vanemlektor, programmijuht, Veroonika Shirokova, veroonika.shirokova@taltech.ee

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) **Tallinna Teletorni liftide rekuperatiiv pidurdusenergia taaskasutamine**

(inglise keeles) **Recuperative braking energy recovery of the Tallinn TV Tower elevators**

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida erinevaid võimalusi liftide rekuperatiivpidurdusenergia taaskasutamiseks;
2. Leida optimaalseim lahendus standardsete hoonete jaoks;
3. Hinnata lifti energiaklassifikatsioon optimaalse lahenduse jaoks.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Materjali kogumine, andmekorje, töö kirjandusega	31.01.2023
2.	Tehnoloogiate analüüsimine, tööpõhimõtted	28.02.2023
3.	Efektiivsuse arvutamine, tulemuste hindamine, majanduslik vaatenurk	31.03.2023

**Töö keel:** Eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:**

22 mai 2023a

**Üliõpilane:** Peeter Leet

22 mai 2023a

/digiallkiri/

**Juhendaja/Programmijuht:** Veroonika Shirokova

22 mai 2023a

/digiallkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1. LIFTITURU TRENDID JA TEHNOLOOGIAD PIDURDUSENERGIA KASUTAMISEKS....	8
1.1 Rekuperatiiv pidurdusenergia kasutamine.....	8
1.1.1 Elektrienergia muundamine soojuseks .....	9
1.1.2 Elektrienergia suunamine tagasi võrku .....	11
1.1.3 Elektrienergia salvestamine .....	11
2 ARVUTUSED JA ENERGIAKLASSI MÄÄRAMINE .....	12
2.1 Uurimisobjekti päevane energiakulu sõites .....	13
2.2 Uurimisobjekti ööpäeva energiakulu seistes .....	15
2.3 Energiatõhususe klassi määramine .....	17
2.3.1 Lifti sõiduaegse jõudluse tase .....	17
2.3.2 Sõiduvälise aja jõudluse tase .....	17
2.3.3 Energiatõhususe klassifikatsioon .....	18
3 TALLINNA TELETORNI LIFTI REKUPERATIIV PIDURDUSENERGIA KASUTAMINE...	19
3.1 Rahaline kokkuhoid .....	23
KOKKUVÕTE .....	24
SUMMARY.....	25
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	26

## **EESSÕNA**

Käesoleva lõputöö autor on olnud alates 2012 aastast professionaalselt seotud liftide ja eskalaatorite paigalduse, hoolduse ja remondiga, alates seadmete montaažist kuni hooldusosakonna juhtimiseni. Lõputöö teema on seega kombinatsioon töö autori professionaalse tausta ning õpitava eriala vahel ning selle lõplik sõnastus valmis juhendaja Veroonika Shirokova abiga. Töö on koostatud Tallinnas ning andmed on kogutud peamiselt KONE materjalidest ning mõõdistustelt Tallinna Teletornis.

Võtmesõnad: Liftid, elektrienergia, rekuperatiivenergia, taaskasutus, diplomitöö.

## SISSEJUHATUS

Hooned kasutavad teadaolevalt u. 40% kogu maailmas kasutatud elektrienergiast. [1] Seega võib väita, et vähendades hoonete energiatarvet, saame saavutada kiiremaid tulemusi globaalsete kliimaeesmärkide saavutamiseks. UNEP-i andmetel on võimalik vähendada hoonete energiatarvet 30-80% kasutades juba täna saadavalolevaid tehnoloogiaid ja tooteid. Oma osa mängib siin ka linnastumine. Arvatakse, et aastaks 2050 elab kaks kolmandikku maailma populatsioonist linnades. [2] See tähendab, et energiasäästlikud hooned muutuvad aina olulisemaks komponendiks linnade jätkusuutlikkuse tagamisel.

Erinevatest poliitilistest sõnavõttudest ning programmide soovitustest jäävad peamiste märksõnadena kõlama „säästlik ja juhitud tarbimine“, „energiaallikate mitmekesistamine“ ning „puhas ja taastuenergia“. Võib väita, et on saanud selgeks tõsiasi, et edasine suund energiajulgeoleku tagamise kiirendamiseks ning kahjulike keskkonnamõjude minimeerimiseks on muuta seniseid tarbimisharjumusi säästlikumaks, mitmekesistada olemasolevaid energiaallikaid ja eelistada taastuvaid energiaallikaid.

Käesolevas lõputöös uurib autor, kuidas annab oma panuse energia säästlikumaks tarbimiseks liftide rekuperatiivpidurdusenergia kasutamine selle salvestamise või võrku tagasisuunamise läbi. Peamiseks uurimisobjektiks on Tallinna Teletorni reisijate lift. Lõputöö koosneb kolmest peatükist, inglise ja eesti keelsest kokkuvõttest ning lisadest.

Lõputöö teoreetilises osas, ehk esimeses peatükis kirjeldab autor, milline osakaal on liftidel hoonete energia tarbimises ning millised on tänapäeva trendid seoses linnastumise ja liftiäri globaalse turu kasvamisega. Lisaks loetletakse milliseid tehnoloogiaid kasutatakse liftide pidurdusenergia kasutamiseks.

Teine peatükk sisaldab praktilises osas saadud mõõtmistulemuste põhjal teostatud arvutusi lifti energiakulu ning energiaklassi määramiseks vastavalt standarditele: ISO 25745-1 Energy performance of lifts, escalators and moving walks – Part 1: Energy measurement and verification ja ISO 25745-2 Energy performance of lifts, escalators and moving walks – Part 2: Energy calculation and classification for lifts (elevators).

Kolmandas peatükis on kirjeldatud praktilise osa läbiviimise meetodikat ja mõõtmiste protsessi koos majandusliku vaatenurgaga.

# **1. LIFTITURU TRENDID JA TEHNOLOOGIAD PIDURDUSENERGIA KASUTAMISEKS**

Globaalne liftide ja eskalaatorite turg ületas 2022. aastal 145,6 miljardi USD (USA dollari) piiri ning arvatakse, et aastaks 2028 ületatakse ka 200 miljardi USD piir. [3] Tegemist on stabiilselt kasvava turusegmendiga ning sellele annab tublisti hoogu ka jätkuv linnastumise trend. Turu majanduslik kasv tähendab omakorda ka seda, et elektrit tarbivaid seadmeid tuleb ühikutena turule pidevalt juurde. Täna ollakse arusaamisel, et Euroopa Liidus on liftide energiatarve ca 1% kogu tarbitud elektrienergia mahust. [4] Energiatõhusus on aga üks Euroopa Liidu strateegilistest prioriteetidest ning 2018. aastal seati paketi „Puhas energia kõikidele eurooplastele“ raames uus eesmärk, milleks on vähendada energiatarbimist 2030. aastaks vähemalt 32,5%. [5] 2020. aasta sügisel avaldas komisjon renoveerimise ergutamiseks uue strateegia „Euroopa renoveerimislaine – keskkonnahoidlikumad hooned, uued töökohad, parem elujärg“, millega tahetakse lähiaastail renoveeritavate hoonete määra vähemalt kahekordistada ning tagada renoveerimise abil suurem energia- ja ressursitõhusus. [5] Lisaks eelnevale kogub ka Eestis hoogu uute ja ka olemasolevate hoonete sertifitseerimine näiteks BREEAM meetodil.

Seega on selge, et poliitilised ning majanduslikud trendid soosivad nii kinnisvaraarendajaid kui ka tehnoloogiasektorit töötama aina enam innovatiivsete ja jätkusuutlike lahenduste väljatöötamisel.

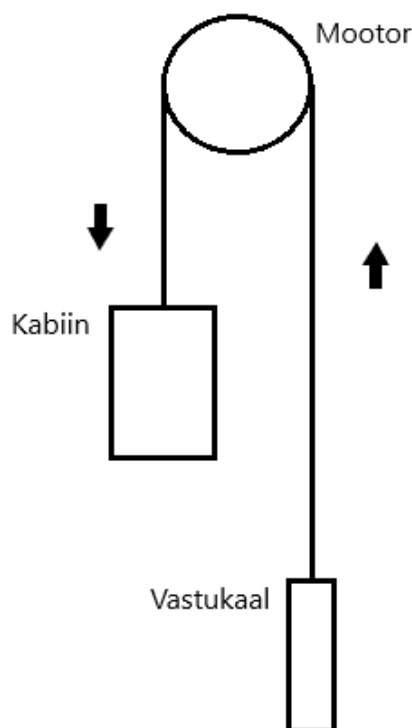
## **1.1 Rekuperatiiv pidurdusenergia kasutamine**

Käesolevas töös on fookuses ilma reduktorita sagedusmuunduri ja elektrimootoriga kandetrossidega liftid (ingl.k gearless traction elevators). See tehnoloogia on tänapäeval kõige populaarsem seetõttu, et need pakuvad võimalikult palju paindlikkust hoonete planeerimisel. Võrreldes näiteks hüdrauliliste liftidega on nende energiatarve madalam, tõstekõrgused suuremad ning sõit sujuvam. Kaasaegsed liftid on varustatud sagedusmuunduritega, mis tagab lifti liikumisel sujuva kiirenduse ja pidurdamise. Vanematel sagedusmuunduritel üldjuhul energiatagastuse funktsiooni ei ole. Liftitootja KONE on näiteks pakkunud KDL-tüüpi sagedusmuunduritele energiatagastuse funktsiooni lisana, mida tellija saab soovikorral oma liftile juurde osta. KDM-tüüpi sagedusmuunduritel on aga energiatagastuse funktsioon juba sisseehitatud – seda tüüpi sagedusmuundureid kasutatakse üldjuhul kõrgemate ja kiiremate liftide puhul, kus energiatagastuse osakaal on suurem. 2023 aasta jooksul aga asendatakse uutel seadmetel KDL sagedusmuundurid järgmise generatsiooni omadega, millel on energiatagastuse funktsioon juba olemas, mistõttu puudub tellijal vajadus täiendavate investeeringute jaoks.



Klassikaline lift töötab „kaalude“ põhimõttel, kus üle mootori hõõrdratta kulgevate trosside ühes otsas on liftikabiin (vt joonis 1.1) ning teises otsas on vastukaal (1:1 riputuse korral). Mootori pöörlemise korral liiguvad liftikabiin ja vastukaal vastupidistes suundades. Adaptiivse kaalusüsteemi korral on vastukaalu raskus üldjuhul võrdne kabiini kogukaalu ja ligikaudu 40-50% kandevõime summaga. See tähendab, et enim energiat tarbib süsteem olukorras, kus tühi liftikabiin liigub allasuunas. Vastupidises olukorras, kus tühi liftikabiin liigub alt üles toimub aga dünaamiline või regeneratiivne pidurdamine ning mootor lülitub generaatori režiimi. Sellises olukorras on vaja leida tekkinud energiale rakendus – selleks on liftide puhul kolm võimalust:

1. Juhtida energia piduritakistisse, muundades energia soojuseks;
2. Suunata energia tagasi võrku;
3. Salvestada energia lokaalselt akudesse.

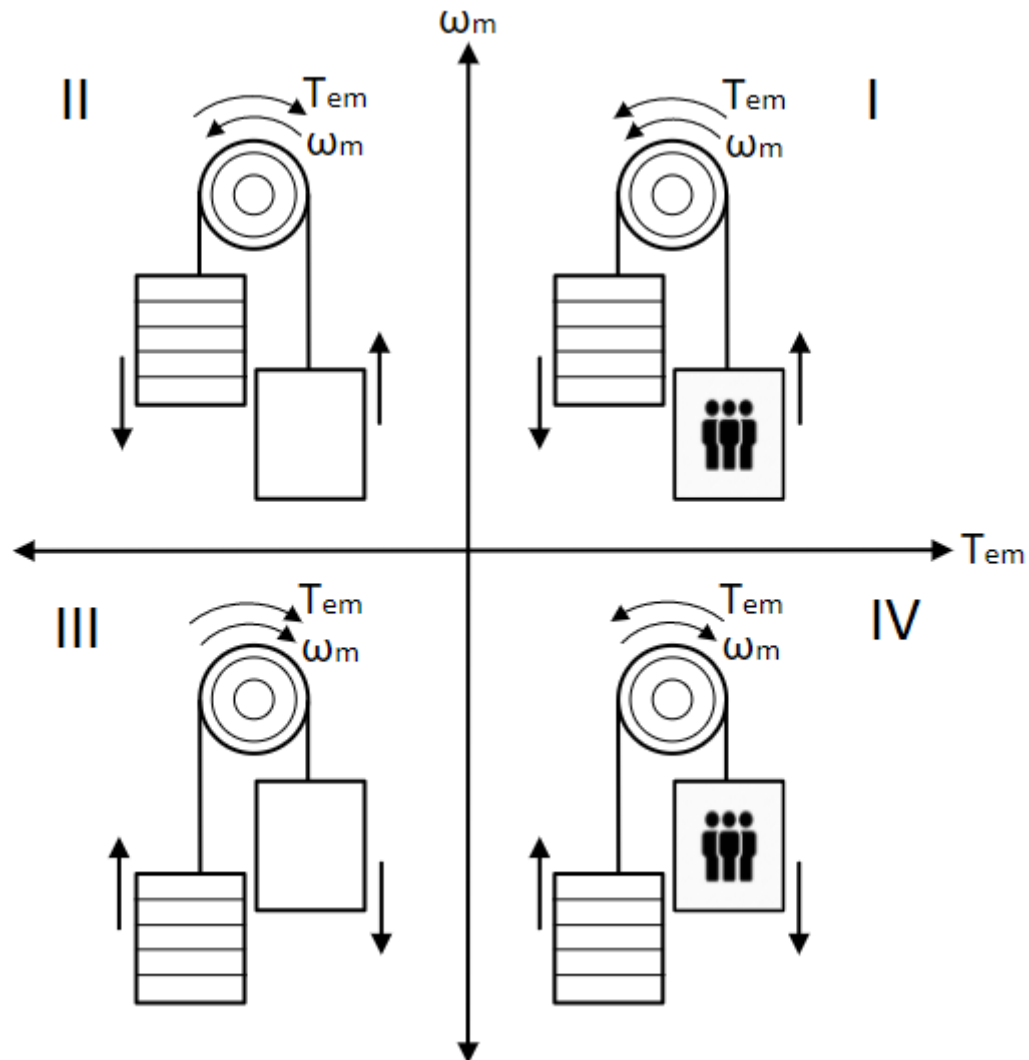


Joonis 1.1 Lifti põhimõtteskeem

### **1.1.1 Elektrienergia muundamine soojuseks**

Kui sagedusmuunduril puudub regeneraerimise funktsioon, siis kasutatakse liigenergia ärakasutamiseks piduritakistit. Tekkinud elektrienergia suunatakse takistisse, mis

muundab selle soojuseks. Tegemist on lihtsa kuid kuluka lahendusega, kus tekkinud energia lastakse raisku. Seda protsessi nimetatakse dünaamiliseks pidurdamiseks ning see leiab aset siis, kui mootor lülitub generaatori režiimi, ehk siis kui pöördemomendi ja mootori pöörlemise suunad on vastupidused.



Joonis 1.2 Elektrimootori töörežiimid [9]

Joonis 1.2 kujutab elektrimootori töörežiime. Esimeses ja kolmandas kvadrantis töötab mootor mootorirežiimil, moment ja mootori pöörlemise suunad on ühesuunalised, mis tähendab, et toimub elektrienergia tarbimine. Teises ja neljandas kvadrantis, kus momendi ja mootori pöörlemise suunad on vastupidised, töötab mootor generaatorirežiimis, ehk toimub dünaamiline või regeneratiivne pidurdamine.

### **1.1.2 Elektrienergia suunamine tagasi võrku**

Nähtust, mille käigus elektrimootor tagastab energiat elektrivõrku ning see tarbitakse ära samasse võrku ühendatud seadmete poolt, nimetatakse elektrienergia rekuperatsiooniks. Ainuke erinevus dünaamilise ja regenereeriva pidurduse vahel ongi asjaolu, et tekkinud elektrienergia tarbitakse ära teiste võrgusolevate seadmete poolt soojusenergiaks muundamise asemel. Selleks, et toimuks elektrienergia tagastamine sagedusmuunduriga varustatud liftil, peab sagedusmuundur olema energiat tagastava funktsiooniga.

### **1.1.3 Elektrienergia salvestamine**

Regeneratiivse pidurdamise teel saadud energia võrku suunamise asemel on võimalik ka tekkinud elektrienergia salvestada. Juba täna on turul erinevad ettevõtted, kes sedalaadi tooteid pakuvad. Üheks võimalikuks lahenduseks on näiteks ettevõtte Skeleton Technologies toode Elevator KERS, mille tööpõhimõte seisneb selles, et regenereeritud energia kasutatakse ära sama lifti poolt, millega seade ühendatud on. Generaatori režiimis genereeritud energia salvestatakse kondensaatoritesse ning seda omakorda tabitakse lifti poolt mootori režiimil töötades. See tähendab, et võrku energiat tagasi ei suunata vaid see kasutatakse ära lokaalselt [6]. Mis tingimustel ja kas see on parem lahendus, kui energia võrku tagastamine on käesoleva töö kirjutamise hetkel ebaselge. Lõputöö autor on osaliselt seotud projektiga, mille käigus kogutavad andmed peaksid sellele küsimusele vastused andma kuid käesoleva töö kaitsmise hetkeks veel põhjapanevaid järeldusi teha ei saa.

Lisaks on võimalus lifti poolt genereeritud elektrienergiat salvestada akudesse ning seda tarbida hoonesiseselt ajal, mil näiteks elektri hetkeline börsihind on kõrge. Sellise süsteemi loomine nõuaks aga komplekssemat lähenemist ning eeldab, et hoone energiasüsteem on projekteeritud vastavalt.

## 2 ARVUTUSED JA ENERGIAKLASSI MÄÄRAMINE

Käesolevas lõputöös teostatud mõõdistused on kooskõlas järgmiste standarditega:

1. ISO 25745-1 Energy performance of lifts, escalators and moving walks – Part 1: Energy measurement and verification;
2. ISO 25745-2 Energy performance of lifts, escalators and moving walks – Part 2: Energy calculation and classification for lifts (elevators).

Mõõdistused teostati Tallinna Teletornis 13. märtsil 2023 ning kasutatud seadmeks oli Chauvin Arnoux PEL 104 Power-Energy Logger. Mõõtmised viidi läbi koostöös Tehnoaudit OÜ spetsialisti Aimar Meliste ning AS KONE tehnilise toe inseneri Rainer Taaliga. Kõik peatükis 2 kasutatud valemid on võetud standardist ISO 25745-2 Energy performance of lifts, escalators and moving walks – Part 2: Energy calculation and classification for lifts (elevators).

Lõputöö uurimisobjektiks on Tallinna Teletorni reisijate lift järjekorranumbriga 1 (vt tabel 2.1), mis on paigaldatud aastal 1977 ning moderniseeritud aastal 2011 AS KONE poolt.

Tabel 2.1 Lifti andmed

Tootja	Hitachi Construction Machinery Co LTD
Moderniseerija	AS KONE
Tehasenumbr	13750
Tootmise aeg	1977 a
Paigaldamise aeg	1979 a
Moderniseerimise aeg	2011 a
Tõstevõime	1000 kg
Tõstekõrgus	164,3 m
Peatuste arv	21
Kabiini liikumiskiirus	3,5 m/s
Mootori tüüp	Sünkroonmootor MX32 (reduktorita)
Mootori võimsus	29,9 KW
Sagedusmuunduri tüüp	Vacon CXI

## 2.1 Uurimisobjekti päevane energiakulu sõites

Lifti kasutussagedus määratakse Tabel 2.2 abil.

Tabel 1.2 Kasutussageduse kategooria [8]

Kasutussageduse kategooria	1	2	3	4	5	6
Kasutussagedus	Väga madal	Madal	Keskmine	Kõrge	Väga kõrge	Kõrgeim
Käivituste arv päevas	50	125	300	750	1500	2500

Uurimisobjekti kasutussageduse kategooria on 3.

Tavajuhtudel kasutatakse keskmise sõidu pikkuse määramiseks Tabelit 2.3. Vastavalt korruste arvule ja kasutussageduse kategooriale määratakse keskmise sõidu pikkus protsentides. Näiteks, kui tegemist on kahekordse liftiga, on iga sõidu pikkus 100% lifti tõstekõrgusest. Mida rohkem on teenindatavaid korruseid, seda tõenäolisem on, et keskmise sõidu pikkus on vastavalt kasutussageduse suurenemisele aina väiksem. Kuna lõputöö uurimisobjekti näol on tegemist erihoonega ning lifti kasutatakse peamiselt liikumiseks väljapääsutasandi ning vaateplatvormi vahel, kasutab lõputöö autor väärtusena 90%.

Tabel 2.2 Keskmise sõidui pikkus [8]

Kasutussageduse kategooria	1-3	4	5	6
Peatuste arv	Keskmise sõidu pikkus protsentides			
2	100%			
3	67%			
> 3	49%	44%	39%	32%

Keskmine energiakulu sõidu ajal meetri kohta määratakse siis, kui lift liigub nimikiirusel.

Antud väärtus määratakse valemiga (2.1):

$$E_{rm} = \frac{1}{2} \left( \frac{E_{rc} - E_{sc}}{s_{rc} - s_{sc}} \right) \quad (2.1)$$

kus

$E_{rc}$  on referentstsükli energiakulu ISO 25745-1 järgi (Wh);

$E_{sc}$  on lühikese tsükli energiakulu (Wh);

$s_{rc}$  on referentstsükli ühe suuna sõidupikkus ISO 25745-1 järgi (m);

$s_{sc}$  on lühikese tsükli ühe suuna sõidu pikkus (m).

Start/stopp energiakulu hõlmab endas energiat, mida lift kasutab kiirendamisel nimikiiruseni ja aeglustamisel korrusel peatumiseni sisaldades ka energiakulu uste avamiseks ja seismisel. Lahutatakse väärtus mis oleks kulunud sama distantsi läbimiseks nimikiirusel.

Start/stopp energiakulu arvutamiseks kasutatakse valemit (2.2):

$$E_{ssc} = \frac{1}{2}(E_{rc} - (2 \cdot E_{rm} \cdot s_{rc})) \quad (2.2)$$

Selleks, et arvutada keskmise tsükli sõidu energiakulu, tuleb kasutada valemit (2.3):

$$E_{rav} = 2 \cdot E_{rm} \cdot s_{av} + 2 \cdot E_{ssc} \quad (2.3)$$

kus

$E_{rm}$  on keskmine energiakulu meetri kohta (Wh/m);

$s_{av}$  on ühe suuna keskmine sõidu pikkus (m);

$E_{ssc}$  on start/stopp energiakulu iga sõidu kohta (Wh).

Kui ei ole võimalik kasutada lühikese tsükli andmeid nagu käesolevas töös, näiteks ka juhul kui lühikese tsükli jooksul ei saavtata nimikiirust, siis kasutatakse keskmise tsükli energiakulu arvutamiseks valemit (2.4):

$$E_{rav} = E_{rc} \cdot \frac{s_{av}}{s_{rc}} \quad (2.4)$$

ehk

$$E_{rav} = 301,1 \cdot \frac{147,6}{164} = 271 \text{ Wh}$$

Päevase energiakulu arvutamiseks kasutatakse valemit (2.5):

$$E_{rd} = \frac{k_L \cdot n_d \cdot E_{rav}}{2} \quad (2.5)$$

kus

$E_{rav}$  on keskmise tsükli energiakulu (Wh);

$n_d$  on päevane sõitude arv vastavalt tabelile 1;

$k_L$  on koormustegur.

ehk

$$E_{rd} = \frac{0,93 \cdot 300 \cdot 271}{2} = 37\,805 \text{ Wh}$$

Koormusteguri leidmiseks kasutatakse valemit (2.6) ning keskmise koormuse protsentuaalne väärtus võetakse tabelist 2.4.

Tabel 2.3 Koormustegur [8]

Kasutussageduse kategooria	1-3	4	5	6
Kandevõime (kg)	Koormustegur (Q)			
≤800	7,50%	9,00%	13%	19%
801 to ≤1 275	4,50%	6,00%	8,20%	13,50%
1 276 to ≤2 000	3,00%	3,50%	5,00%	9,00%
>2 000	2,00%	2,20%	3,00%	6,00%

Uurimisobjekti koormustegur vastavalt sisendandmetele on 4,5%.

Kui

$$k_L = 1 - (\%Q \cdot 0,0164), \quad (2.6)$$

siis saame uuritava objekti koormusteguriks:

$$k_L = 1 - (4,5 \cdot 0,0164) = 0,93$$

## 2.2 Uurimisobjekti ööpäeva energiakulu seistes

Päevane sõiduaeg arvutatakse valemiga (2.7) ning väärtust näidatakse tundides (h):

$$t_{rd} = n_d \cdot \frac{t_{av}}{3600} \quad (2.7)$$

kus

$t_{av}$  on aeg, mille jooksul uurimisobjekt läbib keskmise sõidupikkuse, sh uste avamise ja sulgemise aeg (s). Selle väärtuse leidmiseks kasutatakse valemit (2.8).

$$t_{av} = \frac{s_{av}}{v} + \frac{v}{a} + \frac{a}{j} + t_d \quad (2.8)$$

kus

$t_d$  on uste avamiseks ja sulgemiseks kuluv aeg sekundites;

$a$  on kiirendus ( $m/s^2$ ), mis on sagedusmuunduri tehaseseadistuse väärtus;

$j$  on järk ( $m/s^3$ ), mis on sagedusmuunduri tehaseseadistuse väärtus;

$v$  on nimikiirus ( $m/s$ ).

ehk

$$t_{av} = \frac{147,6}{3,5} + \frac{3,5}{0,5} + \frac{0,5}{0,64} + 10 = 60 \text{ s}$$

$$t_{rd} = 300 \cdot \frac{60}{3600} = 5 \text{ h}$$

Päevase energiakulu arvutamiseks ajahetkel, kui lift ei ole sõidus, tuleb arvutada aeg kui palju lift ühes ööpäevas seisab. Selleks kasutatakse valemit (2.9):

$$t_{nr} = 24 - t_{rd} \quad (2.9)$$

ehk

$$t_{nr} = 24 - 5 = 19 \text{ h}$$

Ööpäevase energiakulu arvutamiseks lifti seismisel kasutatakse andmeid Tabelist 2.5.

Ööpäevane energiakulu lifti seismisel sisaldab kolme komponenti:

1. Aeg, mil lift seisab esimesed 5 minutit;
2. Aeg mil lift tarbib energiat seistes vahemikus 5-30 minutit;
3. Aeg pärast 30 minutit seisuaja.

Tabel 2.4. Ajategur [8]

Kasutussageduse kategooria		1	2	3	4	5-6
Ajategur (%)	R <sub>id</sub>	13	23	36	45	42
	R <sub>st5</sub>	55	45	31	19	17
	R <sub>st30</sub>	32	32	33	36	41

Ööpäevane energiakulu lifti seismisel arvutatakse valemiga (2.10):

$$E_{nr} = \frac{t_{nr}}{100} (P_{id}R_{id} + P_{st5}R_{st5} + P_{st30}R_{st30}) \quad (2.10)$$

kus

$P_{id}$  on tarbitav võimsus seistes (W);

$P_{st5}$  on tarbitav võimsus pärast 5 minutit (W);

$P_{st30}$  on tarbitav võimsus pärast 30 minutit (W);

$R_{id}$  on ajategur seistes (%);

$R_{st5}$  on ajategur seistes 5. minutist(%);

$R_{st30}$  on ajategur seistes 30. minutist(%).

Kuna tarbitav võimsus 5. ja 30. minutist on sama, siis arvutamisel liidetakse vastavad tegurid omavahel.

$$E_{nr} = \frac{19}{100} (315 \times 36 + 282 \times 64) = 5584 \text{ Wh}$$

Kogu ööpäevas tarbitud energia arvutamiseks kasutatakse valemit (2.11):

$$E_d = E_{rd} + E_{nr} \quad (2.11)$$

ehk

$$E_d = 37805 + 5584 = 43388 \text{ Wh}$$

Aastase tarbitud energia arvutamiseks tuleb korrutada ööpäevas tarbitud energia lifti töösoleku päevade arvuga aastas. Meie uurimisobjekti puhul on selleks arvuks 365, ehk kasutades valemit (2.12):

$$E_y = E_d \times d_{op} \quad (2.12)$$

ehk



$$E_y = 43388 \times 365 = 15837 \text{ kWh}$$

## 2.3 Energiatõhususe klassi määramine

Käesolevat klassifitseerimise meetodikat saab kasutada uute liftide või olemasolevate liftide klassifitseerimiseks. Samuti on võimalik reklassifitseerida lifte pärast nende moderniseerimist. Selles meetodis kasutatavaid sisendandmed saadakse kas mõõtmiste, simulatsiooni või lifti tootja andmetest. Käesolevas töös on kasutatud klassifitseerimiseks andmeid, mis on saadud kohapeal teostatud mõõtmistel. Tehnilised andmed on saadud lifti dokumentatsioonist.

### 2.3.1 Lifti sõiduaegse jõudluse tase

Spetsiifilise sõiduenergia leidmiseks keskmise sõidutsükli ajal, kasutatakse valemit (2.13)

$$E_{spc} = \frac{1000 \cdot k_L \cdot E_{rav}}{2 \cdot Q \cdot s_{av}} \quad (2.13)$$

kus

$E_{spc}$  on keskmise sõidutsükli spetsiifiline sõiduenergia mWh/(kg·m);

$k_L$  on koormustegur;

Q on kandevõime (kg).

ehk

$$E_{spc} = \frac{1000 \times 0,93 \times 271}{2 \times 1000 \times 147,6} = 0,85 \text{ mWh/kg} \cdot \text{m}$$

Saadud tulemust võrreldakse tabel 2.5 väärtustega ning määratakse spetsiifilise sõiduenergia klass.

Tabel 2.5 Keskmise sõidutsükli spetsiifiline sõiduenergia [8]

Keskmise sõidutsükli spetsiifiline sõiduenergia (mWh/kgm)	$\leq 0,7$ 2	$\leq 1,0$ 8	$\leq 1,6$ 2	$\leq 2,4$ 3	$\leq 3,6$ 5	$\leq 5,4$ 7	$> 5,4$ 7
Jõudluse tase	1	2	3	4	5	6	7

Arvutatud tulemuse võrdlemine Tabel 2.6 väärtustega, saab järeldada, et uurimisobjekti keskmise sõidutsükli spetsiifilise sõiduenergia jõudluse tase on 2.

### 2.3.2 Sõiduvälise aja jõudluse tase

Seistes on uuritava lifti võimsus koheselt pärast sõidu lõpetamist 315 W ning pärast viie- ja kümneminutilist seisuperioodi 282 W. Jõudluse tase seistes määratakse sisendandmete võrdlemisega väärtustega Tabelis 2.6.

Tabel 2.6 Võimsus seistes [8]

Võimsus seistes (W)	≤50	≤100	≤200	≤400	≤800	≤1600	>1600
Jõudluse tase	1	2	3	4	5	6	7

Mõõtetulemuste võrdlemisel tabeli 2.7 andmetega, saab määrata sõiduvälise aja jõudluse tasemeks 4.

### 2.3.3 Energiatõhususe klassifikatsioon

Energiatõhususe klassi määramiseks võrreldakse ööpäevase energia kogukulu tabelite 5 ja 6 piirväärtustega. Järgnev klassifitseerimine Tabeli 2.7 järgi on tehtud eeldusel, et lifti ööpäevane sõitude arv on 300.

Tabel 2.7 Energiaklassi määramine [8]

Energiaklass	Energiakulu ööpäevas (Wh)
A	$E_d \leq 0,72 \times Q \times n_d \times s_{av} / 1\,000 + 50 \times t_{nr}$
B	$E_d \leq 1,08 \times Q \times n_d \times s_{av} / 1\,000 + 100 \times t_{nr}$
C	$E_d \leq 1,62 \times Q \times n_d \times s_{av} / 1\,000 + 200 \times t_{nr}$
D	$E_d \leq 2,43 \times Q \times n_d \times s_{av} / 1\,000 + 400 \times t_{nr}$
E	$E_d \leq 3,65 \times Q \times n_d \times s_{av} / 1\,000 + 800 \times t_{nr}$
F	$E_d \leq 5,47 \times Q \times n_d \times s_{av} / 1\,000 + 1\,600 \times t_{nr}$
G	$E_d > 5,47 \times Q \times n_d \times s_{av} / 1\,000 + 1\,600 \times t_{nr}$

Energiaklassi määramiseks on vaja esmalt leida vastava klassi  $E_d$  väärtus. Selleks asendatakse muutujad Tabel 2.8 valemities eelnevalt arvutatud väärtustega ning saadud tulemusi võrreldakse lifti reaalse  $E_d$  väärtusega. Energiaklassi arvutamiseks kasutatakse valemeid Tabelist 2.8.

$$E_{dA} = \frac{0,72 \times 1000 \times 300 \times 147,6}{1000 + 50 \times 19,3} = 32847 \text{ Wh}$$

ja

$$E_{dB} = \frac{1,08 \times 1000 \times 300 \times 147,6}{1000 + 100 \times 19,3} = 49752 \text{ Wh}$$

Uuritava objekti päevase energia kogukulu ( $E_d$ ) väärtus on 43388 Wh, seega vastavalt Tabel 2.8 valemities abil saadud väärtuste järgi saab järeldada, et **tegemist on B-klassi liftiga.**

### 3 TALLINNA TELETORNI LIFTI REKUPERATIIV PIDURDUSENERGIA KASUTAMINE

Selleks, et mõõtmised saaks teostatud ohutult, ilma hoones viibivaid inimesi ohustamata ning uurimisobjekti kahjustamata, kaasas lõputöö autor protsessi ka AS KONE ja Tehnoaudit OÜ spetsialistid. Esmalt eemaldati lift normaaltöö režiimist ning seejärel ühendati mõõteseadme sondid vastavalt standardis ettenähtud juhistele (vt joonis 3.1).

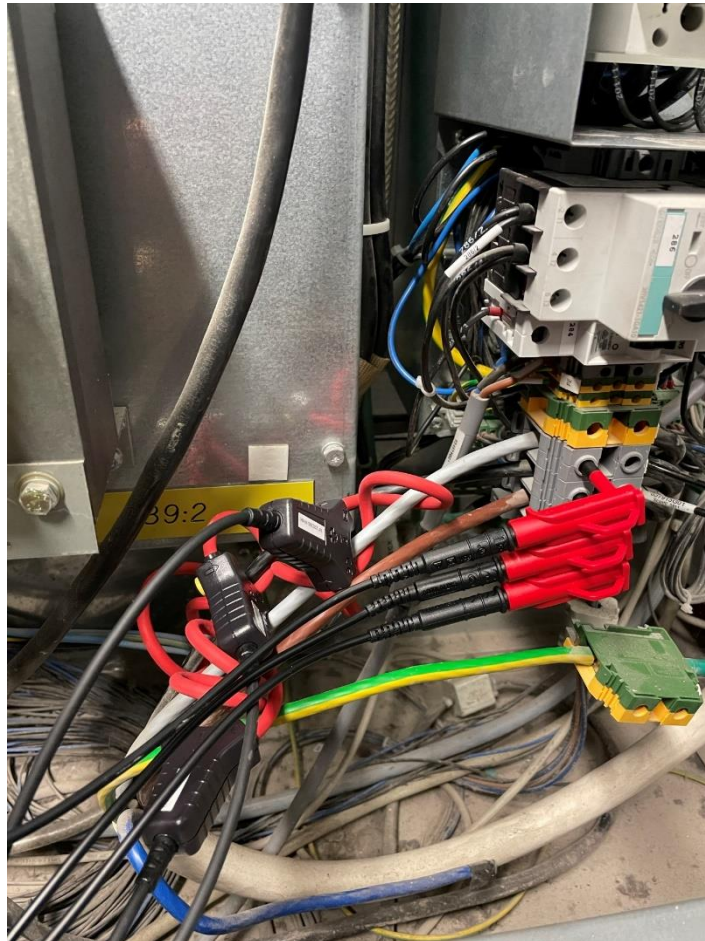
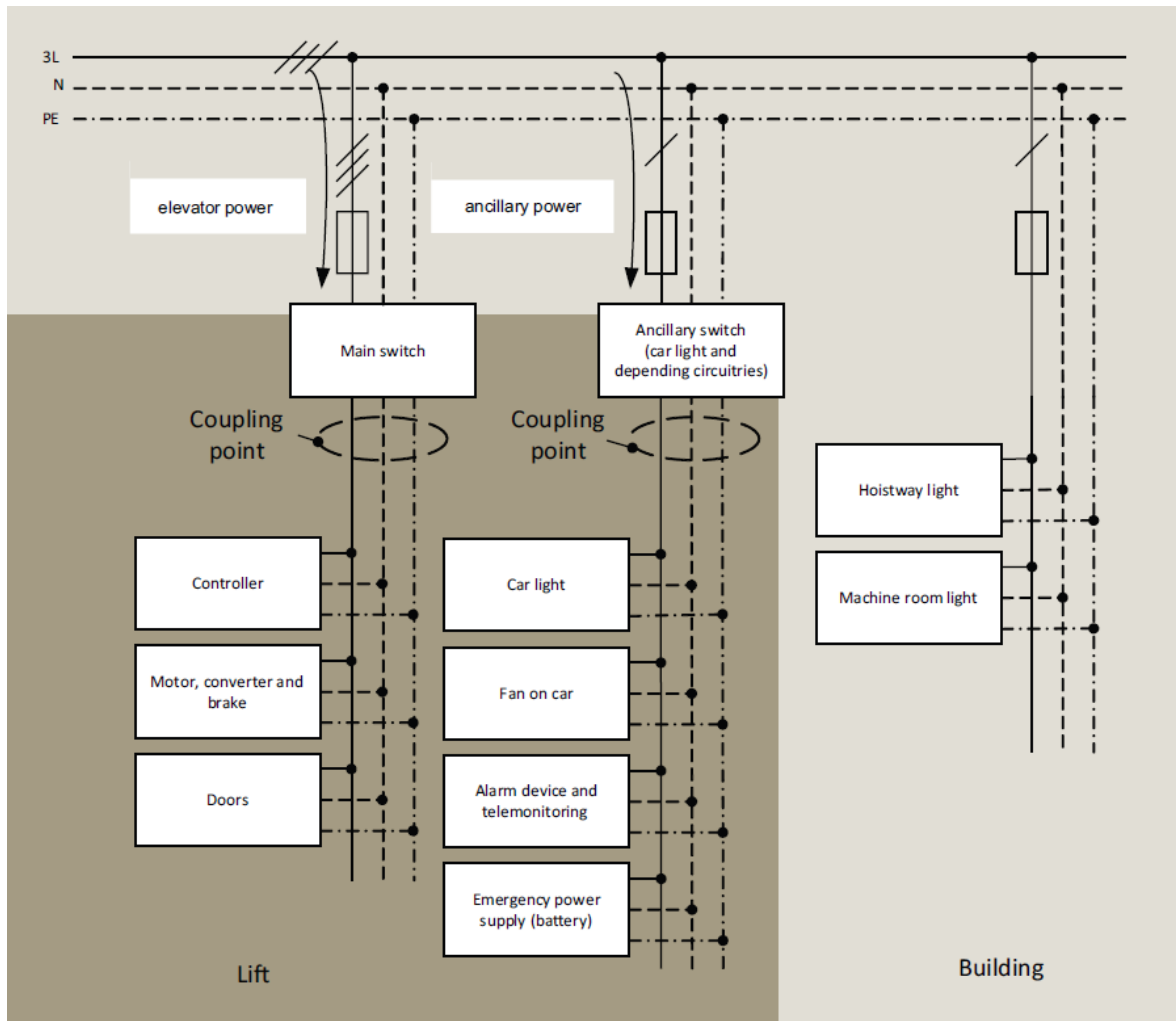


Foto 3.1 Mõõteseadme ühendus lifti kilbis

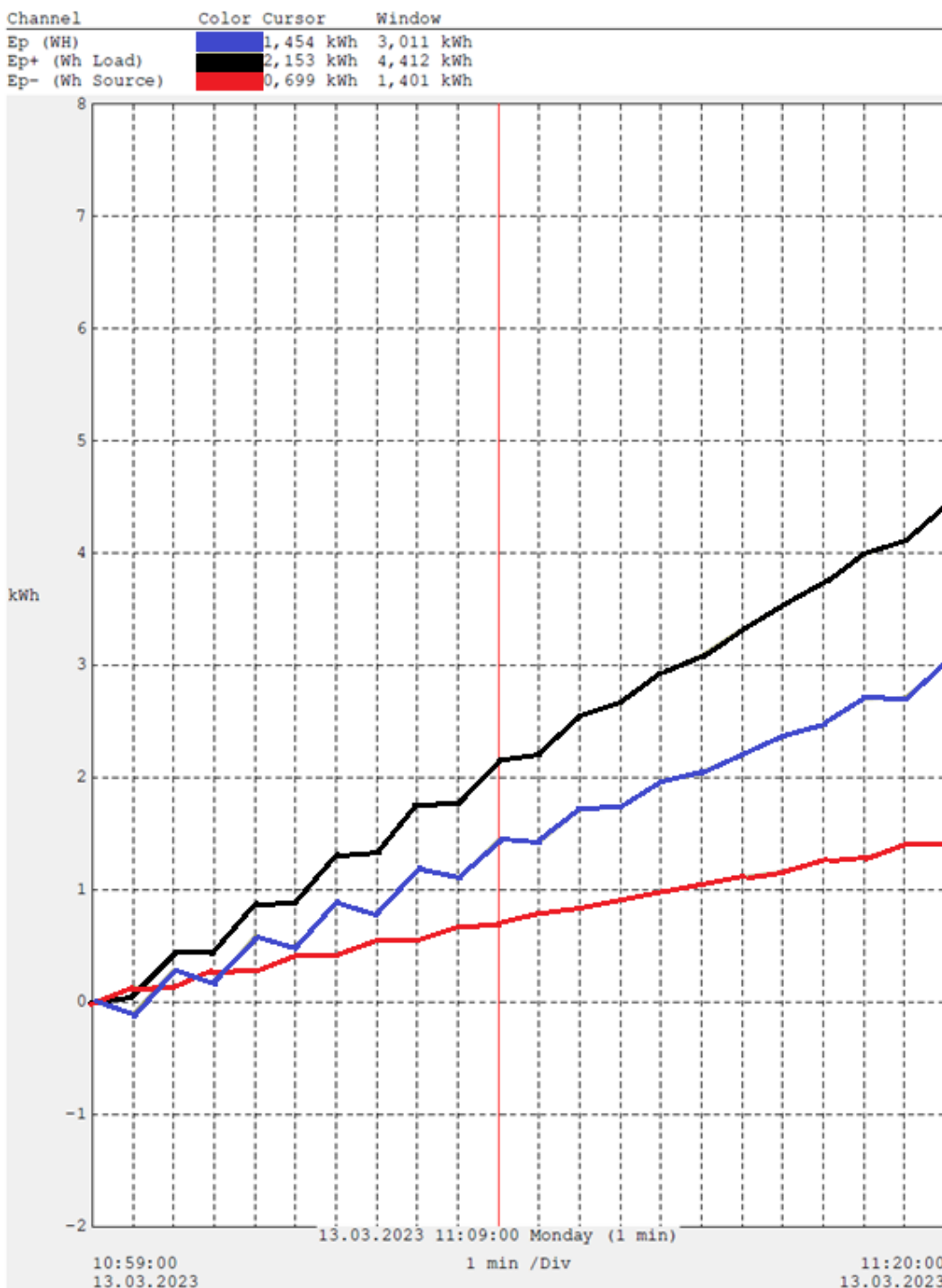
Joonisel 2.2 on kujutatud mõõteseadme ühendamise põhimõte. Ampermeetri sondid on paigaldatud ümber faaside juhtmete ning voltmeetri sondid on ühendatud faaside klemmide külge. Neutraal kasutusel ei ole, sest tegemist on kolmnurkühendusega.



Joonis 2.2 Mõõteseadme ühendamine [7]

Kõige mahukam osa mõõtmiste teostamisel on referentstsükli energia mõõtmine. Referentstsükliks nimetatakse tsüklit, mil tühi liftikabiin sõidutatakse alumiselt peatuselt kõige ülemisele ning seejärel tagasi. Tsüklil sisaldab ka mõlemas asukohas uste avamist ning sulgemist. Eelmainitud tsüklit korratakse 10 korda ning mõõtetulemused salvestatakse. Ühe referentstsükli energiakulu (vt joonis 2.3) määramiseks jagatakse kogu tarbitud energia tsüklite arvuga. Seejärel mõõdetakse energiakulu lifti seistes. Selleks läbitakse üks referentstsükkel ning mõõtmist alustatakse lifti peatumisel 1 minuti vältel, oodatakse 5 minutit ning mõõdetakse veelkord 1 minut. Seismisel mõõdetakse võimsust vattides ning saadud tulemus jagatakse mõõdetud ajaga. Ehk antud juhul ühega sest mõõtmisele kulnud aeg oli mõlemal juhul 1 minut.

1 min Summary



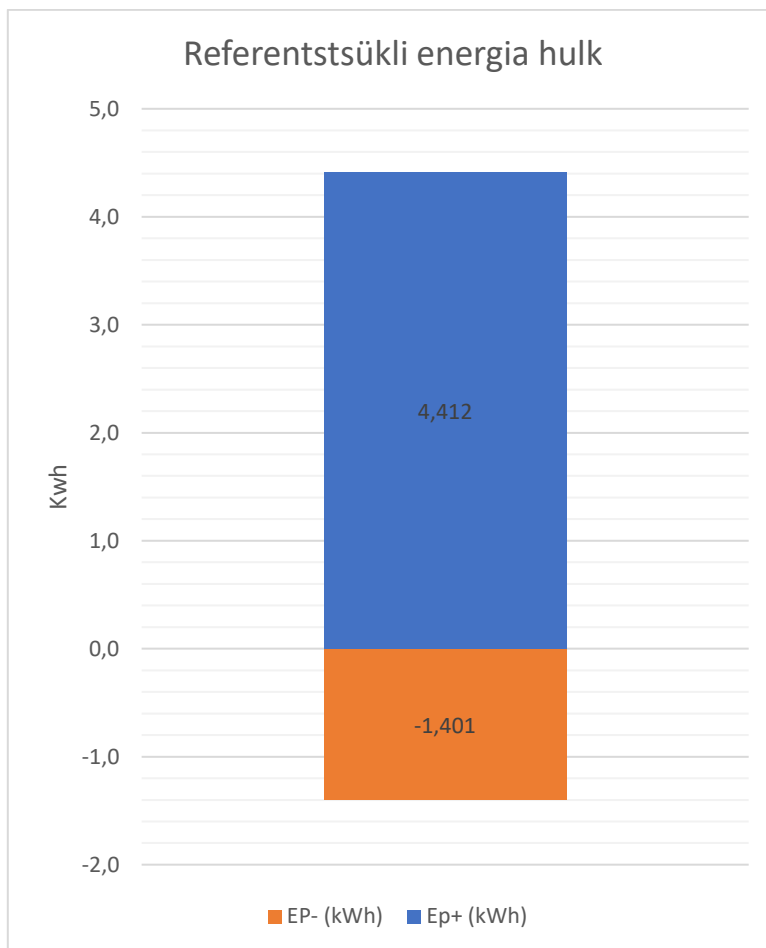
Joonis 2.3 Referenttsükli energiakulu, väljavõte mõõteseadmest

Ep – lifti poolt tarbitud energia

Ep+ – kogu sagedusmuunduri läbiva energia hulk

Ep- – genereeritud energia hulk

Uuritav lift on varustatud sagedusmuunduriga Vacon CXI, millel on energiatagastuse funktsioon sisseehitatud. Joonis 2.4 visualiseerib referentstsükli käigus sagedusmuundurisse sisenevat energia hulka, milleks on 4,412 kWh, sellest tagastati võrku 1,401 kWh. See tähendab, et võrreldes tarbitud energia hulka tagastatud energia hulgaga on tagastatava energia suurusjärk **31,8%**.



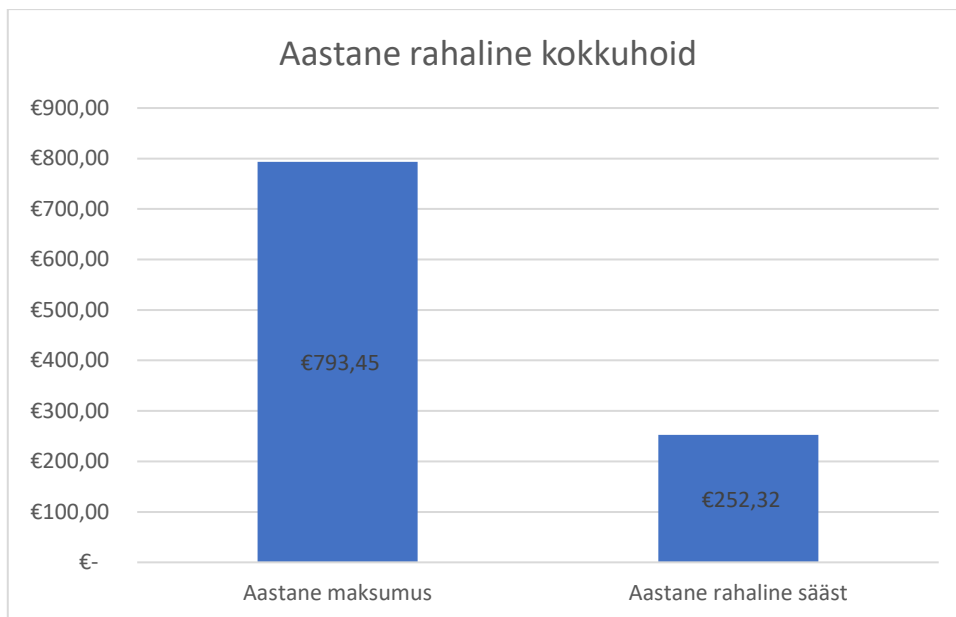
Joonis 2.4 Referentstsükli energia hulk

KONE toote teabematerjalidest [10] saab kõrgete ja keskmise kõrgusega hoonete liftide energiatagastuse kohta lugeda, et liftide energiatagastusprotsent võib kaasaegsete tehnoloogiate kasutamisel olla kuni 45%. Täpne protsent sõltub aga juba konkreetse lifti konfiguratsioonist ning kasutusest. Näiteks nüanss, kas kasutusel on süsinikkiud kanderihmad või terastrossid mõjutavad tõstetava massi hulka oluliselt ning see omakorda ka lifti energiatarvet. Madalate hoonete liftide energiatagastuse maksimum on teabelehe [11] andmetel 40%.

### 3.1 Rahaline kokkuvõid

Kui uuritava lifti ei oleks kasutusel sagedusmuundur, millel on ka energiatagastuse funktsioon, oleks regenereeritav pidurdusenergia muundatud piduritakisti abil soojusenergiaks. Mõõtmistulemused kinnitavad, et mootori generaatorirežiimis töötamisel toimub energiatagastus hoone võrku, mistõttu väheneb välisvõrgust tarbitava elektrienergia hulk.

Vastavalt mõõtmistulemustele on võimalik arvutada ka potentsiaalne elektrienergia rekuperatsioonist saadav majanduslik kasu. Lõputöö autoril puuduvad andmed milline on lifti omaniku täpne elektrienergia kWh maksumus, seega joonisel 2.5 esitatud tulemused on saadud eeldusel, et ühe kWh maksumus on 0,05 €.



Graafik 1.5 Aastane rahaline kokkuvõid

## KOKKUVÕTE

Lõputöö üheks peamiseks eesmärgiks oli luua seos liftide energiakulu ning säästlike hoonete vahel läbi kohapeal teostatud mõõdistuste. Modernsetes linnades on liftide olemasolu hädavajalik ning mõneti võetakse neid linnaelanike poolt lausa iseenesest mõistetavatena. Tänapäeval oleks raske ette kujutada, millised oleks hooned ja linnad siis, kui need seadmed hoonetest täielikult puuduksid. Nagu sissejuhatuses ja esimeses peatükis selgus, siis hoonete energiatarve ning kui juba kitsamalt vaadata, siis ka liftide energiakulu kogu maailma energiatarbimisest märkimisväärne osa – hoonete puhul lausa 40% kogu tarbitud energiast. Liftide puhul arvatakse see näitaja olevat näiteks Euroopa Liidus 1%.

Enne lõputöö kirjutamist ei seadnud autor kahtluse alla hüpoteesi, et energiataagastuse funktsiooniga sagedusmuundurid tõepoolest ka energiat tagastavad. Küll aga oli küsimuse all see, kui palju energiat hoone võrku tagastatakse. Tänu lõputöö praktilisele osale – kohapeal läbiviidud mõõdistustele ja standardi järgi teostatud arvutustele – sai selgeks, et Tallinna Teletorni lift nr. 1 tagastab võrku **31,8%** kogu lifti poolt tarbitud elektrienergiast. Saadud tulemus näitab selgelt, et analoogsete liftide puhul on energiataagastusfunktsiooniga sagedusmuunduri olemasolu tõepoolest mõistlik.

Kuigi suuremat osa linnadest ei moodusta ainult teletorni mõõtu hooned, siis jäi käesoleva lõputöö kontekstis vastamata küsimusele, mis kõrgusest ja nimikiirusest ning kasutussagedusest alates on kõige mõistlikum energiataagastuse funktsiooniga sagedusmuundureid kasutada. Saab järeldada, et kõrgemate, kiiremate ja sagedase kasutusega hoontes on võimalik saada sarnaseid tulemusi. Kindlasti väärib samalaadset analüüsi ka näiteks 5. kordsete kortermajade liftid. KONE tebelehelt madalate hoonete liftide kohta, millel on kasutusel energiataagastusega sagedusmuundur saab teada, et tagastatava energia suurusjärg selliste liftide puhul on maksimaalselt 40%. Niisamuti nagu ka kõrgemate liftide puhul, oleneb lõplik tulemus lifti konfiguratsioonist, parameetritest ning kasutussagedusest.

Sissejuhatuses mainitud UNEP-i väide, et hoonete energiatarvet on võimalik vähendada 30-80% kasutades selleks juba täna saadaolevaid tehnoloogiaid on kahtlemata mõtlemapanev. Niisamuti on ka energiat tagastavad sagedusmuundurid turul vabalt kättesaadavad ning võivad neid õigesti kasutades anda omapoolse panuse hoonete energiatarbimise vähendamisesse.



## SUMMARY

One of the main goals of the thesis, „Recuperative braking energy recovery of the Tallinn TV Tower elevators“ by Peeter Leet was to create a connection between the energy consumption of elevators and sustainable buildings through on-site measurements.

Buildings are known to use approx. 40% of the electricity used worldwide (1). Thus, it can be argued that by reducing the energy consumption of buildings, we can achieve faster and more effective results in achieving global climate goals. According to UNEP, it is possible to reduce the energy consumption of buildings by 30-80% using technologies and products already available today.

In modern cities, the presence of elevators is essential and to some extent they are taken for granted. Today, it would be hard to imagine what buildings and cities would be like if these devices were completely absent. As it became clear in the introduction and the first chapter, the energy consumption of buildings and, if you look at it more narrowly, the energy consumption of elevators is a significant part of the world's energy consumption - in the case of buildings as much as 40% of the total energy consumed. For elevators, this indicator is believed to be 1% in the European Union.

Before writing the thesis, the author did not question the hypothesis that frequency converters with the energy return function do indeed return energy. However, the question was how much energy is returned to the building grid. Thanks to the practical part of the thesis - measurements carried out on site and calculations performed according to the standard - it became clear that the Tallinn TV-tower lift no. 1 returns 31.8% of the total electrical energy consumed by the elevator to the grid. The obtained result clearly shows that a frequency converter with an energy recovery function is indeed reasonable for similar elevators.

Although a large part of cities is not only made up of buildings the size of TV towers, in the context of this thesis, the question of which height, nominal speed and usage frequency is the most reasonable to use frequency converters with energy return function remained unanswered. It can be concluded that similar results can be obtained in higher, faster and more frequently used buildings. The elevators of, for example, 5-floor apartment buildings certainly deserve a similar analysis. As seen from KONE's datasheet for low rise elevators (11), we can see that the maximum amount of recoverable energy is up to 40%. Actual amount of recoverable energy will depend on the real configuration, parameters and the usage of the elevator.

The statement of UNEP mentioned in the introduction, that it is possible to reduce the energy consumption of buildings by 30-80% using the technologies already available today, is undoubtedly thought-provoking. In the same way, frequency converters that return energy are also freely available on the market and, if used correctly, can make their own contribution to reducing the energy consumption of buildings.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Energy efficiency of buildings.  
<https://www.euenergycentre.org/images/unep%20info%20sheet%20-%20ee%20buildings.pdf> (12.03.23).
2. Ritchie, H., Roser, M. Urbanization.  
<https://ourworldindata.org/urbanization#number-of-people-living-in-urban-areas> (12.03.23).
3. Elevator and Escalator Market by Type, Service, End Use, and Region 2023-2028.  
<https://www.researchandmarkets.com/reports/5732865/elevator-escalator-market-type-service-end-use#src-pos-1> (14.03.23).
4. T. De Almeida, A., Hirzel, S., Patrao, C., Fong, J. Energy-efficient elevators and escalators in Europe: An analysis of energy efficiency potentials and policy measures. [https://www.researchgate.net/publication/257227042\\_Energy-efficient\\_elevators\\_and\\_escalators\\_in\\_Europe\\_An\\_analysis\\_of\\_energy\\_efficiency\\_potentials\\_and\\_policy\\_measures](https://www.researchgate.net/publication/257227042_Energy-efficient_elevators_and_escalators_in_Europe_An_analysis_of_energy_efficiency_potentials_and_policy_measures) (14.03.23).
5. Energiatõhusus.  
<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/et/sheet/69/energiatohusus> (17.03.23).
6. Stubender, K. Elevator KERS: The next step in energy efficiency  
<https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/elevator-kers> (25.04.23).
7. ISO 25745-1 Energy performance of lifts, escalators and moving walks – Part 1: Energy measurement and verification.
8. ISO 25745-2 Energy performance of lifts, escalators and moving walks – Part 2: Energy calculation and classification for lifts (elevators).
9. Four-quadrant operation of DC motor. <https://sciample.com/resources/pe-drives-lab/basic-drives/dc-four-quadrant> (17.05.23).
10. KONE regenerative solution for high-rise.
11. KONE regenerative solution for low-rise.