

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond

Anton Laukonen 204330IABM

# **Auvere elektrijaama energiaploki seadmete hooldusprotsessi optimeerimine**

Magistritöö

Juhendaja: Olga Dunajeva  
PhD

Kohtla-Järve 2022

## **Autorideklaratsioon**

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

Autor: Anton Laukonen

11.05.2022

## Annotatsioon

Uurimisobjektiks on Auvere elektrijaama energiaploki seadmed. Töö eesmärgiks on Auvere elektrijaama energiaploki seadmete hooldusprotsessi optimeerimine masinõppe abil. Peamiseks probleemiks Auvere energiaploki töös on vaatamata seadmete uudsusele ploki kõrge avariimäär, mis ei ole seotud seadmete vananemisega.

Lõputöös kirjeldatakse hooldusprotsessi koos kõige kriitilisemate plokidefektide ja nendega kaasnevate kulude analüüsiga. Samuti kirjeldatakse eesmärgi saavutamiseks vajalikku protsessi: alates meetodite valikust, vajalike andmete otsimisest ja töötlemisest kuni masinõppe mudeli treenimiseni. Prognoosimudeli koostamiseks valiti välja andmed Auvere turbiini seadmete kohta. Kasutatakse *historian serveri* ajaloolisi analoogturbiini temperatuuri mõõtmise andmeid. 2021. aasta aprillis toimus 7 turbiini hädaseiskamist turbiini stressi tõttu. Ülaltoodud sündmuste andmeid kasutati masinõppe mudeli koostamiseks. Tulemusena on konstrueeritud mudel turbiini termilise stressi ennustamiseks. Andmete analüüsiks valitud Weka tarkvara. Random Forest meetodi abil saadud mudeli F-skoor 0,985. On määratud 26 temperatuuritegurit, mis mõjutavad turbiini stressi.

Samuti teeb lõputöö autor ettepaneku kaaluda võimalust luua mitmeotstarbeline platvorm, mis võimaldab paigutada masinõppe tööriistu, ja soovitusüsteem, mille põhiülesanne on ühendada masinõppe ennustavad tulemused jooksva teabega remondivajaduse, materjalide kättesaadavuse, sarnaste seadmete remondi ajalooliste andmete ja remondijuhiste andmete kohta. Tulemusena seadmete hooldusprotsesside optimeerimine põhiliste defektide klasside õigeaegse prognoosimise teel lubab vältida täiendavat rahalist kahju ja suurendab seadmete kättesaadavust. Näiteks 2021. aastal jäi turbiini stressi hädaseiskamise tõttu kaotatud kasumit ligikaudu 190 000 €.

Magistritöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 43 leheküljel, 4 peatükki, 20 joonist, 8 tabelit.

## **Abstract**

### **The Optimization of the Maintenance Process of the Equipment of the Unit at the Auvere Power Plant**

The object of research is the equipment of the power unit of the Auvere power plant. The aim of the work is to optimize the maintenance process of the equipment of the Auvere power plant by means of machine learning. The main problem in the operation of the Auvere power unit, despite the novelty of the equipment, is the high accident rate of the unit, which is not related to the aging of the equipment. The thesis describes the maintenance process with an analysis of the most critical block defects and their associated costs. The process required to achieve the goal is also described: from the selection of methods, the search and processing of the necessary data to the training of the machine learning model.

The Auvere turbine equipment has been chosen to build the forecast model. Historian server historical data and turbine-related analog temperature measurements are used. Data are taken from 7 events (April 2021 data). Weka software selected for data analysis. The F-score of the model obtained by the Random Forest method was 0.985. The application of machine learning algorithms has made it possible to understand and identify the temperature factors that affect turbine stress. This data can be used to implement the ML model in the future applications.

The author of the thesis also suggests considering a multi-purpose platform to deploy ML tools and a referral system that combines up-to-date DCS data, predictive ML results, repair needs, material availability information and historical equipment repair information. As asset management methods, a combined method containing CBM and RCM elements is proposed, depending on the type of equipment. Thus, in contrast to the current system, the focus of repair work is shifting from reactive to predictive, focusing on the reliability and availability of production equipment.

Thus, the optimizing of the maintenance processes of the technological equipment avoids the additional financial loss by timely forecasting of the major defect classes and increases the equipment availability. For example, in 2021, the lost profit due to the emergency shutdown of the turbine stress was about € 190,000.

The thesis is in Estonian language and contains 43 pages of text, 4 chapters, 20 figures, 8 tables.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

*Asset management*, varahaldus

BIT	<i>Business Info Technology</i> , äriinfotehnoloogia
BPM	<i>Business process management</i> , äriprotsesside juhtimine
CBM	<i>Condition-based maintenance</i> , seisundipõhine hooldus
CFB	<i>Circulating fluidized bed</i> , tsirkuleeriv keevkiht
CPS	<i>Cyber-physical system</i> , küberfüüsiline süsteem
CRM	<i>Customer relationship management</i> , kliendisuhete juhtimine
DCS	<i>Distributed Control System</i> , hajutatud juhtimissüsteem
DHI	<i>Device Health Index</i> , seadme terviseindeks
DM	<i>Data mining</i> , andmekaevandamine
ENK	<i>Energia Kaubandus</i> , Eesti Energia AS-i üksus
EP	<i>Enefit Power AS</i> , Eesti suurenergeetika ettevõtte
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> , ettevõtte ressursside planeerimine
FE	<i>Finite element (FE) rotor model</i> , lõpliku element (LE) rootori mudel
FEM	<i>Finite element method</i> , lõplike elementide meetod
FN	<i>False Negative</i> , valenegatiivne
FP	<i>False Positive</i> , valepositiivne
GFT	<i>Gradient field transform</i> , gradientvälja teisendamine
HMI	<i>Human Machine Interface</i> , inimese-masina liides
HPC	<i>High pressure cylinder</i> , kõrgsurve silinder
HR	<i>Human resources</i> , inimressursid
IFS	<i>Industrial and Financial Systems</i> , tööstus- ja finantssüsteemid
IJS	Integreeritud juhtimissüsteem
Industry 4.0	<i>The Fourth Industrial Revolution</i> , neljas tööstusrevolutsioon
IoS	<i>Internet of Services</i> , teenuste internet
IoT	<i>Internet of Things</i> , nutistu (asjade internet)
IPdM	<i>Intelligent predictive maintenance</i> , intelligentne prognoosiv hooldus
IPM	<i>Integrated Pest Management</i> , integreeritud kahjuritõrje
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , rahvusvaheline standardimisorganisatsioon
KKS	<i>Kraftwerk-Kennzeichensystem</i> , Elektriijaama identifitseerimissüsteem
KPI	<i>Key performance indicator</i> , peamine tulemusnäitaja
LPC	<i>Low pressure cylinder</i> , madala rõhuga silinder
MCC	<i>Matthew's correlation coefficient</i> , matteuse korrelatsioonikordaja
ML	<i>Machine learning</i> , masinõpe
MPC	<i>Medium pressure cylinder</i> , keskmise rõhuga silinder
MVH	Mundamise varahaldus

OMM	<i>Operation and maintenance manual</i> , kasutus- ja hooldusjuhend
PdM	<i>Predictive maintenance</i> , prognoosiv hooldus
PM	<i>Preventive maintenance</i> , profülaktika või ennetav hooldus
R	<i>programming language</i> , programmeerimiskeel
Random Forest	ML algorithm
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> , usaldusväärsuskeskne hooldus
RFID	<i>Radio-frequency identification</i> , raadio sageduse tuvastamine
RM	<i>Reactive maintenance</i> , reaktiivne hooldus
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> , ruutkeskmine viga
RUL	<i>Remaining useful life</i> , järelejäänud kasulik eluiga
SBM	<i>Statistical-based Predictive Maintenance</i> , statistikapõhine ennustav hooldus
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> , järelevalvekontroll ja andmete kogumine
SMOTE	Weka filter
T	Temperatuur
TD	<i>Target device</i> , sihtseade
TG	Turbogeneraator
TN	<i>True Negative</i> , tõelised negatiivsed
TP	<i>True positive</i> , tõelised positiivsed küljed
Weka	<i>Waikato Environment for Knowledge Analysis</i> , waikato keskkond teadmiste analüüsimiseks
VH	Varahaldus
VM	<i>Virtual-metrology</i> , virtuaalne metroloogia

# Sisukord

1.	Sissejuhatus .....	11
2.	Varasema kirjanduse ülevaade .....	13
2.1.	Seadmete hooldusstrateegiad .....	14
2.2.	Industry 4.0 põhikomponendid .....	16
2.2.1.	Küberfüüsikalised süsteemid (CPS) .....	18
2.2.2.	Asjade Internet (IoT) .....	18
2.2.3.	Andmekaevandus (DM) .....	18
2.2.4.	Teenuste Internet (IoS) .....	19
2.2.5.	Arukas ennustushooldus .....	19
2.2.6.	Kogu tehases kasutatav IPM-süsteem .....	21
2.3.	Kokkuvõtte varasemate uuringute tulemuste analüüsist .....	21
3.	Äriprobleemi analüüs .....	23
3.1.	Ettevõtte kirjeldus .....	23
3.2.	Objekti kirjeldus .....	23
3.3.	Ettevõtte tootmisvara juhtimisprotsess .....	24
3.4.	Varahalduse planeerimine .....	26
3.5.	Reeglid ja ennetusmeetmed .....	28
3.6.	Aktuaalsed varahalduse probleemid .....	28
3.7.	Tootmisvarade haldussüsteem .....	34
4.	Auvere ploki turbiini termilise stressi ennustamine masinõppe abil .....	37
4.1.	Tarkvara valik .....	38
4.2.	Andmed ja ülesanne .....	39
4.3.	Meetodid .....	39
4.3.1.	Masinõppe algoritmid .....	39
4.3.2.	Klasside tasakaalustamatus .....	41
4.3.3.	Normaliseerimine .....	42
4.3.4.	Mudelite hindamine .....	43
4.4.	Tulemuste hindamine .....	44
5.	Varahalduse platvormi arendamine .....	46
5.1.	Olemasolev defektide kõrvaldamise skeem .....	47
5.2.	Mitmeotstarbelise platvormi loomise põhjused .....	48
5.3.	Kavandatav teenindusskeem .....	49
5.4.	Uue platvormi kasutamise ja selle rakendamise eelised .....	51

6. Kokkuvõte .....	53
Kirjanduse loetelu .....	54
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks .....	59
Lisa 2 – Algtunnuste nimekiri .....	60



## Jooniste loetelu

Joonis 1. Neli tööstusrevolutsiooni.....	17
Joonis 2. Intelligentse ennustava hoolduse (IPdM) süsteemide raamistik Industry 4.0.	20
Joonis 3. BPM-skeem. ....	21
Joonis 4. Ettevõtte juhtimise komponendid.....	25
Joonis 5. MVH strateegia, mis põhineb standardiga. ....	25
Joonis 6. Vara elutsükli mudel.....	27
Joonis 7. Auvere ploki remondi ja hoolduse kulude jaotus 2020–2021 tööliikide lõikes, eurodes.....	29
Joonis 8. Auvere ploki remondi ja hoolduse kulude jaotus tööliikide lõikes. ....	29
Joonis 9. KKS Elektri jaama identifitseerimissüsteem.....	30
Joonis 10. Auvere elektriploki remondi- ja hoolduskulude 2020–2021 objektide lõikes. ....	31
Joonis 11. Operatiivteabe liidese vaade.....	33
Joonis 12. Tootmisvarahaldussüsteemi komponendid. ....	35
Joonis 13. Defektide jaotus põhjuste tüüpide järgi. ....	36
Joonis 14. Auvere ploki turbiin. ....	37
Joonis 15. Kõige populaarsemad masinõppe tarkvara tööriistad.....	38
Joonis 16. Atribuutide jaotus enne tasakaalustamist ja normaliseerimist.....	41
Joonis 17. Atribuutide jaotus pärast tasakaalustamist ja normaliseerimist.....	42
Joonis 18. Defektide tuvastamise ja kõrvaldamise skeem.....	48
Joonis 19. Remondi korraldamise kavandatav skeem. ....	50
Joonis 20. Auvere üksuse seisak alates 2015. aastast. ....	51

## Tabelite loetelu

Tabel 1. Energiaploki hädaolukorra sündmused aastateks 2020–2021. ....	31
Tabel 2. Väljavõte pöörlemismehhanismide hädaolukordadest. ....	33
Tabel 3. Peamiste hooldus- ja remondistrateegiate lühikirjeldus. ....	34
Tabel 4. Tasakaalustamise vahendite kasutamise tulemused. ....	41
Tabel 5. Segadusmaatriks, Simple Logistic mudel enne ja pärast normaliseerimist. ....	43
Tabel 6. Segadusmaatriks, Random Forest ja Simple Logistic mudel. ....	43
Tabel 7. Kasutatud mudelite tulemused. ....	44
Tabel 8. Kaotatud kasumi maksumuse arvestus 2016–2021 stressi TG tõttu. ....	52

# 1. Sissejuhatus

Elekter on kõige levinum kasutatav ja toodetud energia vorm. Elektrienergiatööstuse probleemiks on suurte mahtude pikaajalise salvestamise võimaluse puudumine ning seetõttu on elektri tootmine pidev ja vältimatu protsess. Energiasäästusüsteemid on praegu väljatöötamisel ja on veel testimisjärgus. Elektriijaama ei saa peatada puhkuseks või nädalavahetuseks, nagu näiteks mööblivabrik. Protsess on väga oluline ja tõsine. Elektriijaamad ja elektrivõrgud on strateegilise tähtsusega objektid. Nõuded neile on kõrged.

Elektriijaama töökindluse parandamiseks on mitu võimalust: organisatsioonilised meetmed, automaatsed koondamissüsteemid, suurenenud nõuded seadmetele, plaaniline ennetav hooldus, mille eesmärk on kõrvaldada võimalikud kahjud.

Kuus aastat tagasi jäi Eesti Energias toimunud konverentsil kõlama lause, et kui ettevõtte ajaga kaasas ei käi, siis on ettevõtte määratud läbikukkumisele. Neil päevil oli väljend Industry 4.0 lihtsalt populaarne. Aja möödudes muutus kõik kiiresti ja meeldejäävast fraasist sai sellest väljendist filosoofia. Üleminekuperioodil peeti mainekaks tiitli Industry 3.5 saamist. Praegu on paljud ettevõtted selle filosoofiaga juba liitunud ja mitmetest teoreetilistest suundadest hakati liikuma praktilisele rakendamisele. Ilmselgete asjade (nimelt tootmisprotsesside automatiseerimise kaasaegsete edusammude kasutamisest saadav kasu) ignoreerimine pole enam võimalik.

Seega magistritöö eesmärgiks on optimeerida Auvere elektriijaama energiaploki seadmete hooldusprotsessi masinõppe meetodite abil. Selle eesmärgi saavutamiseks peab autor lahendama mitmeid konkreetseid ülesandeid: varasemate teadlaste kogemuste ja seadmete hoolduse hetkesuundade uurimine, äriprobleemi analüüsimine, sobiva meetodite ja tööriistade valimine, võimalikult parima prognoosmudeli konstrueerimine ning soovitude koostamine Industry 4.0 elementide rakendamiseks.

Töö koosneb järgmistest põhiosadest. Peatükk „Varasema kirjanduse ülevaade” on üldteoreetilise iseloomuga ja sisaldab vastavateemaliste artiklite analüüsi. Märksõnadeks siinjuures on *Predictive maintenance*, *Machine learning*, *Asset management*, *condition-based maintenance*, *Industry 4.0* jne.

Ettevõtet ja uurimisobjekti kirjeldatakse peatükis „Äriprobleemi analüüs”. Samuti selgitatakse välja varahalduse probleeme ja kirjeldatakse tootmisvarade haldamise süsteemi.

Hetkel Auvere elektrijaamas kasutusel 2 peamist seadmete hooldusliiki (ennetav ja reageeriv), mis vaevalt võimaldab meil KPI eesmäärke töökindluse osas täita (vt peatükki 3). Seadmete töötamise käigus tekkivate probleemide (vt jaotist 3.7) lahendamiseks ning avariisageduse vähendamiseks peatükis „Auvere ploki turbiini termilise stressi ennustamine masinõppe abil” autor konstrueerib ML vahendite abil prognoosmudeli, mis suudab määrata atribuutide mõju tugevust konkreetsele sündmusele – turbiini termilisele stressile (vt peatükki 4).

Järgmises peatükis „Varahalduse platvormi arendamine” leiab autor probleeme ML algoritmide rakendamises olemasolevas DCS süsteemis ning teeb ettepaneku kaaluda võimalust luua mitmeotstarbeline platvorm, mis võimaldab paigutada masinõppe tööriistu, ja soovitusüsteem, mille põhiülesanne on ühendada masinõppe ennustavad tulemused jooksva teabega remondivajaduse, materjalide kättesaadavuse, sarnaste seadmete remondi ajalooliste andmete ja remondijuhiste andmete kohta.

Töö tulemusena pakub autor optimeerimiseks välja konkreetsed lahendused, mida kirjeldatakse kokkuvõttes (vt Kokkuvõtet).

## 2. Varasema kirjanduse ülevaade

Üsna pikka aega on olnud väga aktuaalne infotehnoloogiate tootmisprotsessidesse juurutamise teema. See on täiesti arusaadav, kuna kaasaegne maailm tervikuna on pidevas liikumises, muutub ja areneb. Suures osas puudutab see infotehnoloogiat, sest inimene on olnud tunnistajaks tehnoloogilisele progressile ehk teadus-tehnoloogilisele revolutsioonile, mis ei saanud jätta avaldamata teatud mõju tema mõtteviisile, mis väljendub muuhulgas soov kasutada tootmisprotsessides digilahendusi, mis täidaksid rutiinset statistikatööd ning aitaksid langetada efektiivseid ja ratsionaalseid otsuseid, kuid kõrgel eksperttasemel, andmetele tuginedes suudaksid nad koostada ja välja pakkuda konkreetse tegevusplaani ja juhtimisotsused.

Nagu D. Denisov oma uurimuses märgib, on „täiustatud tööstusanalüütika aktiivne arendamine, mis põhineb tehnoloogiliste ja tootmisrežiimide parameetrite kogumisel ja analüüsil, võimaldanud luua digitaalseid lahendusi iseõppiva soovitaja süsteemide vormis, ja otsuste tegemise tugisüsteeme juhtidele ja valdkonna spetsialistidele”. Tähelepanuväärne on, et „tööstusettevõtete täiustatud analüütika digitaalsed tööriistad ennustavad seadmete, liinide ja üksikute tootmisüksuste plaanivälisest seiskamist, optimeerivad seadmete tööd antud tehnoloogilistes režiimides, vähendavad tootmiskulusid ning parandavad toodangu kvaliteeti ja mahtu. Digitaalsetel tööriistadel põhinev integreeritud lähenemine võimaldab tuvastada tootmises elektrit tootvate turbiinide ebanormaalseid töörežiime, vähendada protsessiseadmete seisakuid ja tõsta nende efektiivsust”. [1]

Professor Klaus Schwab kasutab oma raamatus „Neljas tööstusrevolutsioon” eelkõige mõistet Industry 4.0, öeldes, et „tarkade tehaste tehnoloogiat levitades loob neljas tööstusrevolutsioon maailma, kus virtuaalsed ja füüsilised tootmissüsteemid suudavad paindlikult üksteisega globaalsel tasandil suhelda. See võimaldab toodete täielikku kohandamist ja uute töömudelite loomist”. [2]

Rahvusvaheliste ettevõtete arengu taustal on konkurents teatud turgudel väga kõrge, võitluses tõhususe nimel hakkasid ettevõtted näitajaid jälgima mitte aasta- ja kvartaliaruannete, vaid reaajas. Digitaliseerimise arenguga on võimalik tootmisest andmeid saada peaaegu koheselt, suurandmete salvestamiseks luuakse nii lokaalseid kui ka pilvekeskusi. Kuid selles etapis tekib küsimus: mida nende andmetega teha, lihtsalt

salvestada, töödelda edasiseks analüüsiks või kasutada homset tõhusust parandavate otsuste langetamiseks?

Arvestades selle teema ja eriti sellise kontseptsiooni nagu Industry 4.0 asjakohasust, on sellele pühendatud mitmeid uuringuid, mille ülevaade esitatakse selles peatükis. Selle peatüki kontekstis vaadeldakse artikleid, mis on seotud 4. revolutsiooni kontseptsiooni ning tööriistade ja meetodite kasutamisega ennetava hoolduse valdkonna arendamiseks. Probleemi paremaks mõistmiseks autor aga ennekõike esitab seadmete hoolduse ja remondiga seotud strateegia kontseptsiooni.

## **2.1. Seadmete hooldusstrateegiad**

Hooldusspetsialistid ei saa alahinnata hooldusstrateegia valimise tähtsust jätkusuutliku toimimise tagamiseks, kuna nende valitud hooldusstrateegial võib olla märkimisväärne rahaline mõju.

Olemasolevad väljaanded pakuvad erinevaid strateegiate loendeid ja nende omaduste kirjeldusi. Strateegiate olemuse ühemõtteliseks tõlgendamiseks on vaja ühtset klassifitseerimistunnust, mida saab võtta näiteks lähenemisena remonditoimingu teostamise aja prognoosimiseks, mis tagaks seadmete töökindluse ja stabiilse tootmise. Seega on võimalik eristada (ja mitmed uurijad teevad seda, näiteks [3], [4]) 5 seadmete hooldusstrateegiat:

1. PM – preventive maintenance (Profülaktika või ennetav hooldus)
2. RM – reactive maintenance (Reaktiivne hooldus)
3. PdM – predictive maintenance (Prognoosiv hooldus)
4. CBM – condition based maintenance (Seisundipõhine hooldus)
5. RCM – reliability centered maintenance (Usaldusväärsuskeskne hooldus)

Igal ülaltoodud seadmete hooldusstrateegial on oma eripärad ja optimaalsed kasutusvaldkonnad. Vaatleme neid üksikasjalikumalt.

Ennetav (ehk plaaniline) hooldus (PM) on seadmete ja varade regulaarne ja planeeritud hooldus, et hoida neid töökorras ning vältida seadmete ootamatutest riketest tingitud kulukaid planeerimata seisakuid [5]. See strateegia näitab kavandatud tegevust. Teisisõnu, seadmete hooldust teostatakse juba enne rikke tekkimist, ja tulemusena aitab PM vältida seadmete seisakuid ja tootmisvõimsuse vähenemist.

Mitmed autorid väidavad, et „peaaegu alati on odavam teha plaanilisi hooldusi kui oodata rikkeid” [6]. Arvestades aga dünaamiliste seadmete (pumbad, ventilaatorid, turbiinid) iseärasusi, ei pruugi defekti teket seostada selle perioodilise hooldusega. Samas on seost võimalik jälgida ka muude väliste põhjustega, nagu näiteks ebaõige töö, üleminekurežiim tingimused ja muud mõjud. Sellega seoses saame rääkida tõhusamate hooldusmeetodite olemasolust. Reaktiivne hooldus (RM) on erakorraline või plaaniväline hooldusprotseduur, mille käigus probleemid lahendatakse nende ilmnemisel. „RM-tegevuse provotseerivad juhuslikud vaatlused, seadmete talitlushäired ja seadmete rikked” [7].

Selle strateegia kohta avaldavad mitmed autorid arvamust, et „nii kummaline, kui see ka ei kõla, võib mõnikord see strateegia osutada parimaks. See on õige valik ainult siis, kui seadme parandamiseks pole lihtsat ja odavat võimalust. Kui osa väljavahetamine on odavam kui remont, siis tuleks kasutada kiirabistrateegiat ja hoida pidevat varuosade varu” [3]. Seda lähenemist kasutatakse aga käesoleva töö autori arvamuse järgi peamiselt lihtsate ja kergesti vahetatavate seadmete või nende komponentide puhul. Elektri jaama puhul räägime kõrgtehnoloogilistest seadmetest. Töömaht ja nende rakendamisele kuluv aeg on antud juhul ebaproportsionaalselt suur ning 100% seadmete dubleerimine ei ole ka rahaliselt põhjendatud. Näiteks 300-eurone laagri vahetus võib nõuda kuni nädalast masina seisakut, mille tulemuseks on kaotatud kasum elektri börsihinnast.

Ennustav hooldus (PdM) aitab ennustada, millal seadmed hooldust vajavad. Prognoos tehakse kindla teabe põhjal, mis on vältimatu rikke usaldusväärne eelkäija. Näited hõlmavad vibratsiooni või termilist analüüsi [6]. Olemasoleva PdM-tarkvara (vt peatükki 5) eesmärk on hinnata, millal mõni seade langeb rivist välja. See võimaldab planeerida korrigeerivat hooldust kuni rikkeni. Väljakutse on planeerida hooldust kõige sobivamal ajal, enne seadmete rikki minekut, et maksimaalselt pikendada selle eluiga. Ennetava hoolduse lahenduste põhiarhitektuur koosneb tavaliselt andmete kogumisest ja salvestamisest, andmete teisendamisest, seisundi jälgimisest, varade seisundi hindamisest, ennustavast, otsuste tugisüsteemist ja kasutajaliidese kihist [8].

Mõned teadlased märkisid, et „sellise teenuse rakendamiseks on vaja teha kulutusi kas analüütiliste seadmete soetamiseks ja kasutajate koolituseks või töövõtjate kaasamiseks analüüsi teostamiseks. Õige valik sõltub konkreetsest olukorrast” [6].

Terminit seisundipõhine hooldus (CBM) kasutatakse mõnikord planeeritud hoolduse sünonüümina. Plaanilise hoolduse korral määratakse aga hooldusprotseduuride sagedus eelnevalt kindlaks, koostatakse hooldusgraafik. Seisundipõhises hoolduses tehakse hooldust olenevalt sellest, millist infot seadmete kohta saavad reaajas andmekogumissüsteemid anduritelt, mis mõõdavad teatud parameetreid. Andmehõivesüsteem võrdleb neid andmetega, mis on spetsiifilised häireolukorrale, et saaks teha hooldust enne, kui seade rikki läheb. [6]

Põhimõtteliselt võimaldab seisukorrapõhine hooldus ajastada, millal seadmed remondiks välja viiakse. Näiteks tootmises saab seada reegli, et kord kuus on seadmed kindlal kellaajal remondis. Veidi enne seda perioodi tehakse ülevaatus ja otsustatakse, kas seda võimalust kasutada või ei vaja seadmed hetkel remonti. Teisel juhul jätkatakse seadme eksploatatsiooni kuni järgmise plaanitud ajani, et hinnata selle seisundit.

Usaldusväärsuskeskne hooldus (RCM) võib kirjeldada kui protsessi, mis tagab hooldustööde tõhusa, säästliku, usaldusväärse ja ohutu teostamise [9]. On olemas ka selline definitsioon: „RCM on integreeritud inseneritehniline lähenemine, mille eesmärk on teostada kõik seadmete kõrgeima töökindluse tagamiseks vajalikud tööd minimaalsete hoolduskuludega” [6].

On hästi teada, et masina talitlushäired võivad põhjustada tagajärgi, mis võivad ulatuda odava laagri lihtsast asendamisest õnnetuseni, mis võib kaotatud tootmise, vigastuste või reostuse korral maksta miljoneid [10]. Sellest lähtuvalt on kirjanduses viimase paarikümne aasta jooksul pööratud olulist tähelepanu seisundipõhisele hooldusele ja hiljuti ka ennustavale hooldusele [11].

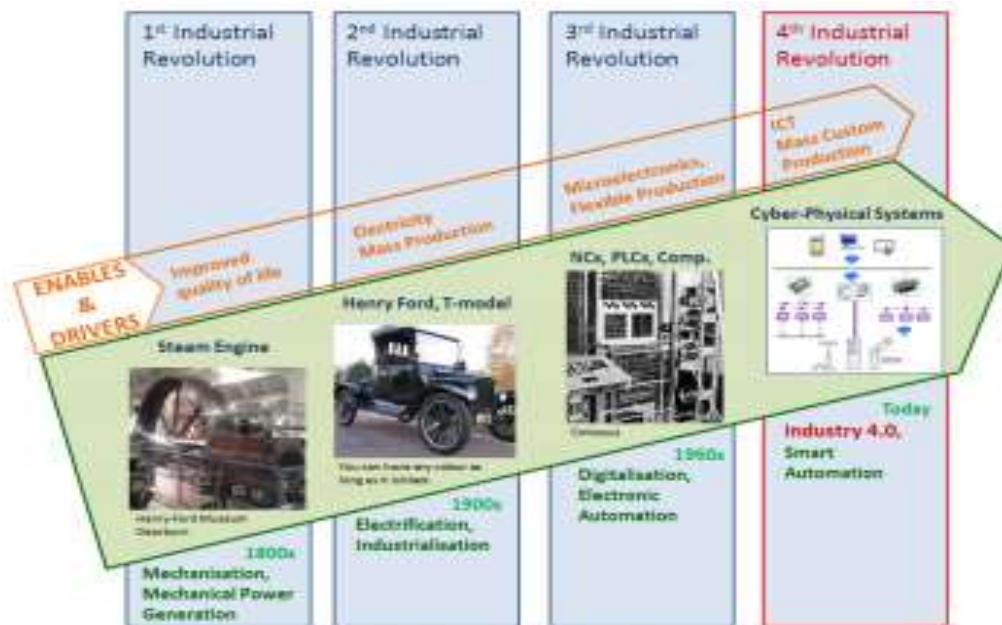
Ennustava hoolduse eesmärk on vähendada seisakuid ja hoolduskulusid tõrgeteta tootmise eeldusel, jälgides seadmete töötingimusi ja ennustades võimalikke seadmete rikkeid. Tulevase võimaliku rikke prognoosimine võimaldab hoolduse planeerimist enne rikke tekkimist [12].

## **2.2. Industry 4.0 põhikomponendid**

Termin Industry 4.0 tutvustati Hannoveri messil 2011. aastal Saksamaal, et esitada uut suundumust traditsiooniliste tööstusharude võrgustiku loomisele [13].



Tööstuslike tootmissüsteemide väljatöötamise etapid alates käsitsi töötlemisest kuni Industry 4.0 kontseptsioonini on esitatud Joonisel 1 nelja tööstusrevolutsiooni läbimise kujul. [14]



Joonis 1. Neli tööstusrevolutsiooni.

Allikas: [14]

Peamine idee on kasutada ära selliste uute tehnoloogiate ja kontseptsioonide potentsiaal nagu: [14]

1. Interneti ja IoT kättesaadavus ja kasutamine;
2. tehniliste protsesside ja äriprotsesside integreerimine ettevõtetes;
3. reaalse maailma digitaalne kaardistamine ja virtualiseerimine;
4. „Nutikas” tehas, sealhulgas „nutikad” tööstustootmisvahendid ja „nutikad” tooted.

Mõnede allikate järgi võib Industry 4.0 tehas põhjustada järgmise languse: [15]

1. tootmiskulud 10–30%;
2. logistikakulud 10–30%;
3. kvaliteedijuhtimise kulud 10-20%.

Sellises tehases olevad tooted on ka nutikad, sisseehitatud sensoritega, mida kasutatakse traadita võrgu kaudu reaalajas andmete kogumiseks, lokaliseerimiseks, toote oleku ja keskkonnatingimuste mõõtmiseks. [16]

Industry 4.0 on tootmiselementidel lisaks füüsilisele esitusele ka virtuaalne identiteet, andmeobjekt, mis on salvestatud andmepilve. Selline virtuaalne identiteet võib hõlmata mitmesuguseid andmeid ja teavet toote kohta, alates dokumentidest kuni 3D-mudeliteni, individuaalsed identifikaatorid, praeguse oleku andmed, ajaloo teave ja mõõtmis-/katseandmed. Industry 4.0 kontseptsiooni olulised elemendid on ka koostalitlusvõime ja ühenduvus. Tuleks luua pidev infovoog seadmete ja komponentide, *Machine-To-Machine* suhtluse (M2M), tootmissüsteemide ja osalejate vahel. Seeläbi saavad masinad, tooted ja tehased ühenduda ja suhelda tööstusliku Interneti ühenduse kaudu (mis põhineb peamiselt traadita võrgul). [14]

### **2.2.1. Küberfüüsikalised süsteemid (CPS)**

Oluline komponent on küberfüüsikalised süsteemid (Cyber-Physical Systems, CPS), mis viivad füüsilise maailma virtuaalsesse maailma. Neid võib mõista süsteemi põhiühikuna. CPS-i arengut iseloomustab kolm etappi. Esimese põlvkonna CPS sisaldab identifitseerimistehnoloogiaid nagu RFID-sildid, mis võimaldavad objekte ainulaadselt tuvastada. Salvestus ja analüüs tuleb pakkuda tsentraliseeritud teenusena. Teise põlvkonna CPS-seadmed on varustatud piiratud funktsioonivalikuga andurite ja ajamitega. Kolmanda põlvkonna CPS võimaldab andmeid salvestada ja analüüsida, on varustatud mitme anduri ja ajamiga ning ühildub võrguga. [4]

### **2.2.2. Asjade Internet (IoT)**

Asjade Internet (IoT) võimaldab „asjadel või objektidel” suhelda üksteisega ja teha koostööd nende „tarkade” komponentidega, et jõuda ühiste eesmärkideni. CPS-i põhjal saab määratleda kui „asjad või objektid”. Seetõttu võib IoT-d pidada võrguks, kus CPS teeb omavahel koostööd ainulaadsete aadressiskeemide kaudu. [13]

### **2.2.3. Andmekaevandus (DM)**

Reaalajas toimuvad suurandmed pole lihtsalt tohutu hulga andmete salvestamine andmebaasi või lattu. Andmekaevandamine võimaldab mitmest allikast kogutud suurandmete põhjal analüüsida ja avastada mustreid, reegleid ja teadmisi. Nii et saab teha õige otsuse õigel ajal ja õiges kohas. [13]

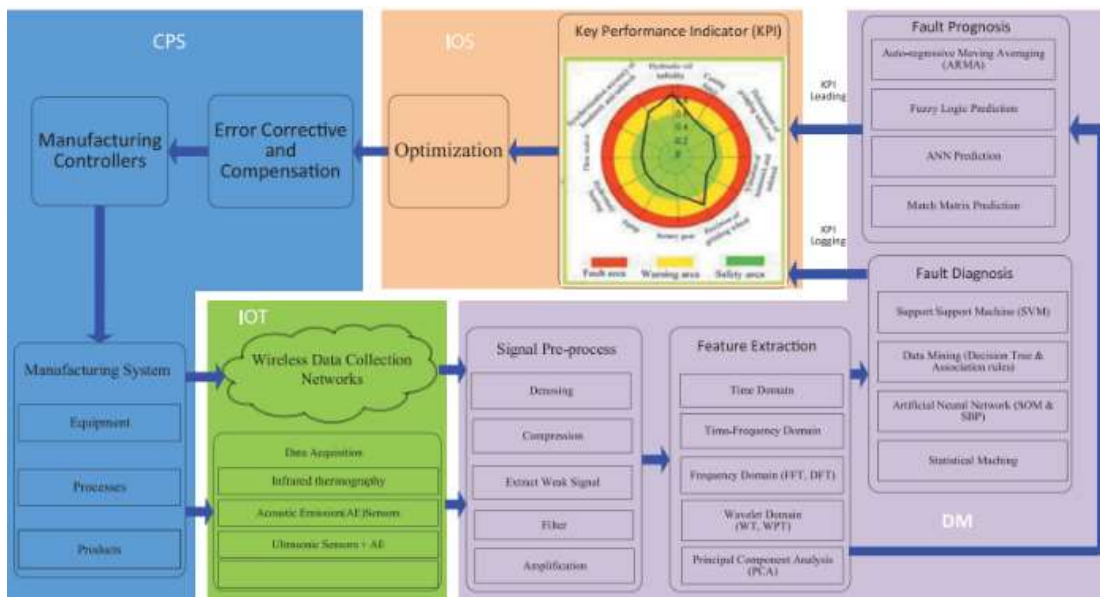
#### **2.2.4. Teenuste Internet (IoS)**

Teenuste Internet (IoS) võimaldab teenuseosutajatel pakkuda oma teenuseid Interneti kaudu. IoS koosneb ärimudelitest, teenuste infrastruktuurist, teenustest endast ja osalejatest. Teenuseid pakuvad ja ühendavad lisandväärtusteenusteks erinevad tarnijad. Nendest teavitatakse nii kasutajaid kui ka tarbijaid ning neile on juurdepääs erinevate kanalite kaudu. [13]

#### **2.2.5. Arukas ennustushooldus**

Ennetav hooldus on tegevuste kogum, mis tuvastab seadmete füüsilises seisundis muutusi (rikke tunnused), et teha asjakohaseid hooldustöid seadmete tööea maksimeerimiseks ilma rikete riski suurendamata. See klassifitseeritakse rikke tunnuste tuvastamise meetodite järgi kahte liiki: (1) statistikal põhinev ennustav hooldus ja (2) seisundipõhine ennustav hooldus. Statistikapõhine ennustav hooldus (SBM) sõltub tehasesiseste esemete ja komponentide seiskumiste täpsest registreerimisest saadud statistilistest andmetest, et töötada välja tõrgete ennustamiseks mõeldud mudelid, samas kui tingimusel põhinev ennustav hooldus (nimetatakse ka seisundipõhiseks hoolduseks) sõltub seadme pidevast või perioodilisest seirest, et avastada rikke tunnuseid ja teha hooldusotsuseid.

Üks pakutavatest intelligentsete prognooside haldamise lahendustest (Joonis 2) avab ettevõtetele uusi innovaatilisi võimalusi. CPS-i poolt genereeritud ja IoT jälgimisseadme / protsessi seisukorra kaudu edastatud andmed vaadatakse automaatselt üle, et leida kõik mustrid, mis viitavad võimalikule rikkele. Selles otsuses kasutatakse Interneti-põhist teenust, et võimaldada varakult tuvastada seiskumise algust ning kavandada ja rakendada parandusmeetmeid kõige tõhusamalt. See tähendab ka seda, et saab vältida planeerimata seisakuid ja tõhusamalt kasutada nii personali kui ka ressursse. Selle uuendusliku lahenduse nimi on Industry 4.0 for Intelligent Predictive Maintenance (IPdM). [13]



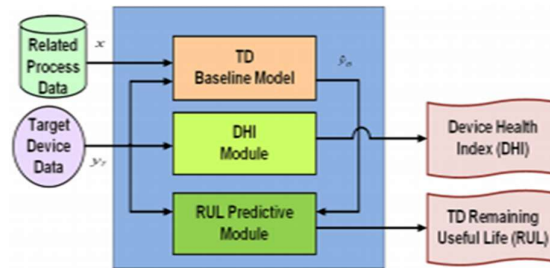
Joonis 2. Intelligentsse ennustava hoolduse (IPdM) süsteemide raamistik Industry 4.0.

Allikas: [14]

PdM on olnud 2016. aasta Industry 4.0 põhiteemaks Hannoveri messil 2016 [17]. PdM jälgib seadmete tervist ja ennustab, millal on vaja hooldust. Ennustus on järelejäanud kasuliku eluea (RUL) hinnangu vormis [18].

Autorid on pakkunud välja virtuaalse metrooloogial põhineva (VM-põhise) BPM-skeemi, mis sisaldab sihtseadme (TD) baasmudelit, seadme terviseindeksi (DHI) moodulit ja RUL-i ennustavat moodulit, nagu on näidatud Joonisel 3. VM-meetodil genereeritud TD-baasmudel kasutatakse rikete tuvastamisel võrdlusalusena. BPM-skeemi rakendades on võimalik teostada rikete diagnoosimist ja prognoosimist ning vältida ka massiivsete ajalooliste rikete andmete nõuet [19].

Vaadates Joonist 3, genereerib BPM TD ( $\hat{y}$ ) baasjoone vastavalt protsessiandmete (X) ja TD andmete (yT) olulistele valimitele ning seejärel luuakse DHI TD hetke terviseseisundi hindamiseks. Lõpuks hinnatakse RUL, mis näitab, kas seade on ohutus või riskiseisundis [19].



Joonis 3. BPM-skeem.

Allikas: [19]

TD sisaldab viit seisundit: esialgne, aktiivne, passiivne, haige ja surnud. Tavaliselt on TD aktiivses seisundis, kui see on tervislik. Siiski jõuab TD haigesse seisundisse, kui  $yT$  ületab künnise. TD jõuab haigestunud olekusse, kui TD halvneb, nii et TD olemasolevad ressursid on ammendatud. Siis on varustus maas. Üldiselt on erinevatel TD-del erinevad füüsilised omadused, mille tulemuseks on erinevad haigusseisundi künnised. Normaliseerimata toob see kaasa äärmiselt keerulise seireprobleemi, kui sajad TD-d töötavad koos tehases. Seetõttu on vajalik meetod haigusseisundi künniste erinevate väärtuste teisendamiseks normaliseeritud indekseks. Sellisena pakutakse normaliseeritud DHI vahemikus 0 kuni 1. [20]

### 2.2.6. Kogu tehases kasutatav IPM-süsteem

Praegu suudavad enamused tavapäraseid PdM-i süsteeme teostada tõrke diagnostika ja / või prognostilisi algoritme ainult iga seadme puhul [12]. Ühe tööriista jaoks tuleb siiski jälgida mitut sihtseadet ja tehas sisaldab suures koguses tööriistu. Seetõttu on enamiku tavapäraste PdM-süsteemide eelised eiratud, kuna need keskenduvad kogu seadme asemel üksnes seadmete taseme jälgimisele. Kõigi tervise seisundite jälgimiseks igast üksikust sihtseadmest kuni kõigi seadmeteni ja kogu tehaseeni kaasa arvatud, tuleks välja töötada tõhus kogu tehases kasutatav IPdM-süsteemi arhitektuur [21].

## 2.3. Kokkuvõtte varasemate uuringute tulemuste analüüsist

Peamiseks probleemiks Auvere energiaploki töös (probleemi üksikasjalik kirjeldus on toodud peatükis 3) on vaatamata seadmete uudsusele ploki kõrge avariimäär, mis ei ole seotud seadmete vananemisega, kuid see on eeldatavasti seotud projekteerimisvea või selle ebaõige tööga. Seega on seadmete töökindluse parandamiseks vaja kasutada

kaasaegseid tehnoloogiaid, mis suudavad tagada soovitud töökindluse ja vähendada õnnetusjuhtumite arvu. Üheks suunaks on Industry 4.0 filosoofia rakendamine.

Erinevate juba avaldatud uuringute tulemuste analüüsi ning autori poolt lahendatava probleemiga seotud küsimuste lahendamise võimalike lähenemisviiside, meetodite ja vahendite põhjaliku uurimise põhjal suutis ta kindlaks teha, millised Industry 4.0 komponendid võiksid olla edasise rakendamise arutelude objektiks. Kaalutades ka seda, kuidas leevendada või ennetada hädaolukordi (ML-mudeli rakendamine, algoritmide või nende kombinatsiooni valik) (vt peatükki 4).

Seadmete hooldusstrateegiate küsimuse teooriaga tutvumine võimaldas autoril teha nende kohta olulisi tähelepanekuid. See omakorda lubas valida sobiva lähenemisviisi Auvere ploki seadmete hooldusele. Varahaldusmeetoditena tehakse ettepanek rakendada kombineeritud meetodit, mis ühendab CBM-i ja RCM-i elemente. Samuti proovib autor katsena rakendada Industry 4.0 filosoofiat, kasutades sündmuste ennustamiseks masinõpet, pakkudes välja multifunktsionaalse platvormi loomise (vt peatükki 5).

### **3. Äriprobleemi analüüs**

#### **3.1. Ettevõtte kirjeldus**

Enefit Power AS (EP) on üks Eesti Energia AS kontserni (EE) tootmisüksustest, mis kuulub suurenergeetika valdkonda ja mis moodustati 2021. aastal kontserni kahe ettevõtte – Enefit Energiatootmine AS ja Enefit Kaevandused AS ühinemise tulemusena [22].

EP hõlmab endas kolme tegevusvaldkonda:

1. primaarenergia valdkond (põlevkivi kaevandamine Estonia kaevanduses ja Narva karjääris, raudteelogistika, kütuse etteanne);
2. energia muundamise valdkond (elektri- ja soojusenergia, vedelkütuse [mitmesuguste fraktsioonide põlevkiviõli ja põlevkivibensiini] ja uttegaasi, samuti põlevkivituha [põletatud põlevkivi] tootmine põlevkivielektrijaamade [Eesti elektrijaam, Balti elektrijaam ja Auvere elektrijaam] baasil ja energiatehnoloogiaseadmed põlevkivi töötlemiseks pürolüüsi teel [Enefit140-1, Enefit140-2 ja Enefit280]).
3. varahalduse (VH) valdkond.

Vastutus EP tegevusvaldkondade eest on jaotatud kolme Juhatuse liikme vahel. Vastutus ettevõtte, kui terviku tegevuse eest on Juhatuse esimehel.

EP-l on sertifikaadid, mis kinnitavad praeguse IJS-i vastavust rahvusvaheliste standardite ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 45001:2018 ja ISO 55001:2014 nõuetele. EP-i keemialabor on akrediteeritud vastavalt katselaborite pädevusele sätestatud ISO 17025:2017 standardi üldnõuetele [22].

#### **3.2. Objekti kirjeldus**

Praegu on Auvere energiablokk Eesti moodsaim põlevkiviküttel keevkihttehnoloogia plokk. Lisaks põlevkivile kasutab Auvere elektrijaam kütusena põlevkiviõli tootmisprotsessi produkti, poolkoksiahju gaasi, mis tekib Enefit140 ja Enefit280 seadmetega. Suitsugaasid väljuvad 100 meetri kõrguste korstnate kaudu atmosfääri. Kiltkivi tarnitakse raudteel. 330 kV pingega toodetud elekter kantakse ühtsesse elektrisüsteemi. Auvere elektrijaama installeeritud võimsus on 305 MW, saadaolev võimsus on 305 MW bruto / 272 MW neto.

Investeeringiprojektide elluviimisega suureneb Auvere elektrijaamas biokütuste põletamise osakaal. See seade on üsna kaasaegne suure hulga mõõtevahenditega; mõõteandmed sisestatakse DCS (Alspa) juhtimissüsteemi.

Auvere elektrijaam koosneb ühest plokist. Seade koosneb ühest kondensatsiooniauruturbiinist ja ühest Alstomi toodetud CFB katlast. Kasutusele võetud 2015. aastal.

Auvere energiaploki põhikomponendid on: turbiin, boiler, astmeline trafo ja abiseadmed (primaarõhupuhur, sekundaarõhupuhur, suitsuärastus, tsirkulatsioonipumbad) ning välisseadmed (kütuse etteande ja tuha eemaldamise tee, vesi puhastusjaam).

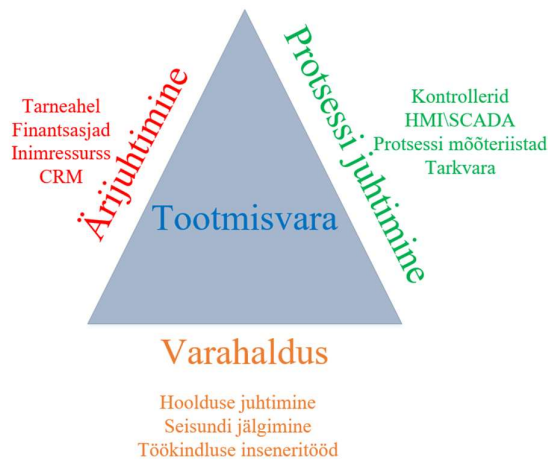
Uurimisobjektiks valiti Auvere elektrijaama energiaploki seadmed, nimelt: prognoosimudeli koostamiseks valiti välja Auvere turbiin ning samuti käsitleti üldist hooldusprotsessi, analüüsiti kriitilisemaid ploki defekte ja nendega seotud kulusid.

### **3.3. Ettevõtte tootmisvara juhtimisprotsess**

Igas kaasaegses tööstusettevõttes kasutatakse vähemalt 3 tüüpi põhisüsteeme, mis peavad olema korralikult ühendatud (Joonis 4):

1. Protsessi juhtimine (Controller & I/O, HMI/SCADA, Process Instrumentation, Process Management, Software)
2. Varahaldus (Maintenance Management, Condition Monitoring, Reliability Engineering)
3. Ärijuhtimine (Supply Chain, Financials, HR, CRM, Operations)





Joonis 4. Ettevõtte juhtimise komponendid.

Allikas: autori koostatud

Vaatame varahaldussüsteemi lähemalt. Varahaldus võimaldab organisatsioonil varadest väärtust ammutada, et saavutada organisatsiooni eesmärgid. See, mis on väärtuslik, sõltub nendest eesmärkidest, organisatsiooni olemusest ja eesmärgist ning selle sidusrühmade vajadustest ja ootustest. Varahaldus loob väärtust, tasakaalustades varadega seotud finants-, keskkonna- ja sotsiaalseid kulusid, riske, teenuse kvaliteeti ja toimivust [23].

Varahalduse üksuse põhiprintsiibid on ISO 55001 standardil põhinev EP strateegia, mida rakendatakse ka Auvere elektrijaamas (Joonis 5).

## Poweri VH strateegia ISO 55001-s

**Strateegia aluseks on Eesti Energia kinnitatud strateegia**

1. **Varahalduse ülesanne on** saavutada tootmisvarade juhtimise abil kontserni strateegilised eesmärgid ja väärtuse kasv.
2. **Varahaldus hõlmab tootmisvarade kogu elukaart:** planeerimine, arendamine, kasutamine, hooldamine, renoveerimine ja vabanemine koos sellega kaasnevate mõjudega.
3. **Varahalduse sisuks on** tootmisvarade tulemuslikkuse, kulude ja riskide optimeerimise otsuste tegemine kvaliteetse, õigeaegse ja piisava informatsiooni alusel.

Joonis 5. MVH strateegia, mis põhineb standardiga.

Allikas: EP juhatuse esitlus

Seega strateegia aluseks on Eesti Energia kinnitatud strateegia. Varahalduse ülesanne on saavutada ettevõtte strateegilised eesmärgid, samuti kasvatada kontserni väärtust läbi tootmisvarade haldamise. Varahalduse olemus on teha otsuseid tootmisvarade jõudluse, kulude ja riskide optimeerimiseks lähtuvalt kvaliteedist.

Ülesannete täitmiseks kasutatakse järgmisi protseduure:

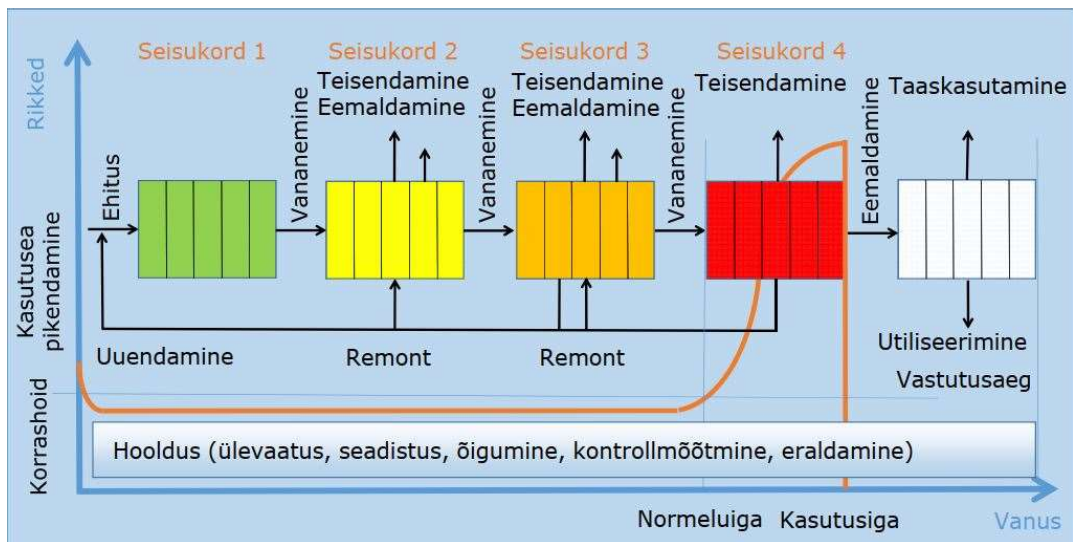
- K.MVH.01 Seadmete plaaniliste remontide planeerimine ja läbiviimine
- K.MVH.02 Seadmete hoolduse ja remondi tööde registreerimine
- K.MVH.03 Seeriaobjektide ja kasutatud varuosade registreerimine
- K.MVH.04 Energeetiliste seadmete metallist juhtimine
- K.MVH.05 Õlitehase seadmete jooksva ja kapitaalremondi plaanide koostamine
- K.MVH.06 Eesti elektrijaama, Balti elektrijaama, Auvere elektrijaama ja Õlitehase jõutrafode õlikvaliteedi kontrolli protseduur.

### **3.4.Varahalduse planeerimine**

Varade haldamisel peab ettevõtte kinni „Planeerimise kooskõlastatuse põhimõttest”:  
Strateegia EE 5 aastat / => Muundamise varahalduse strateegia 5 aastat => VH eesmärgid 1 aasta (KPI) & VH Eelarve 1 aasta => VH plaanid [22].

Lähtudes kinnitatud aastaeelarvest ja aasta tootmisplaanist, koostatakse ja kinnitatakse „Põhiseadmete remondigraafik” (aastaks) – põhidokument, mis määrab kindlaks remondi tähtajad ja remondikohad – plokid, elektrotehnilised seadmed. Vastavalt Nord Pool Spot elektrituru reeglitele kooskõlastatakse remondigraafik ENK juhtkonnaga ja see avaldatakse vähemalt 6 nädalat enne remonditööde algust (vastavalt EE nõuetele – vähemalt 8 nädalat enne remonditööde algust) [22].

Oluline on märkida, et varahaldus hõlmab kogu tootmisvara elutsükli planeerimisetapist kuni kõrvaldamiseni, nimelt: planeerimine, arendus, kasutamine, hooldus, uuendamine ja utiliseerimine koos nende tagajärgedega. Elutsükkel on näidatud Joonisel 6.



Joonis 6. Vara elutsükli mudel.

Allikas: [22]

Tulevikku arvestades avaldatakse ka „Põhiseadmete hooldusgraafik” (4 aastat ette) / Schedule of Maintenance. Edasised korrigeerimised ja otsuste tegemine seoses seadmete remondiga sõltuvad olukorrast avatud elektriturul. Lähtudes omaniku huvidest, mis on seotud äritegevusega, saab sõltuvalt turuolukorrast remondigraafikut aasta jooksul paindlikult muuta.

Muudatuste korral kooskõlastatakse graafik MVH üksuse spetsialistidega, kes kontrollivad ja analüüsivad seadmete seisukorda (arvestades metallikontrolli ja vibratsioonidiagnostika tulemusi, elektriseadmete vibratsioonidiagnostika tulemusi), samuti võttes arvesse Eesti Vabariigi seadusandlike nõudeid kõrge riskiga seadmete järelevalve osas.

EP Juhatus võtab vastu remondigraafiku muutmise otsuse, kaaludes riske ja võimalusi ning võttes arvesse võimalik erakorralise remondi alternatiivkulu, kui seadmed töötavad turul kõrgete hindade perioodil maksimaalsel koormusel (kuni rikkeni).

Sellela seoses on varahalduse planeerimine keskendumas ennetavatele meetmetele – „VH plaanid”, mis kujutavad endast ennetav-plaaniliste remontide plaane, mis töötatakse välja MVH üksuse spetsialistide poolt tootjate juhiste alusel ja sisestatakse IFS Applications infosüsteemi teabehaldusosakonna töötajate poolt vastavalt loogikale „Paigaldamine – süsteemid – seadmed – komponendid”.

Plaanilis-ennetavate remontide plaane koostatakse ja juurutatakse järk-järgult:

- esimeses järjekorras – 1. klassi kriitilisuse seadmetele, mis asuvad äritegevuse keskmes;
- teises järjekorras – 2. klassi kriitilisuse seadmetele;
- kolmandas järjekorras – 3. klassi kriitilisuse seadmetele [22].

### **3.5.Reeglid ja ennetusmeetmed**

Alalised üldised organisatsioonilised nõudmised, ohutusnõuded ja energiaturul osalejatele esitatavad nõuded on kehtestatud reeglite kogumiga, mille järgimine on kohustuslik kogu personalile:

- 4.1. „Eesti Energia kontserni töökorralduse reeglid”;
- 4.2. ER.TOH.01 „Soojusmehhaaniliste seadmete teenindamise ohutuseeskiri”;
- 4.3. ER.TOH.02 „Elektriseadmete ohutu kasutamise reeglid”;
- 4.4. ER.NOT.01 „Aktsiisilao töökorralduse eeskiri”;
- 4.5. ER.TEH.01 „Aktsiisivaba kütuse kasutamise kohta arvepidamise eeskiri Balti elektrijaamas”.

Antud reeglite järgimine on üldisteks ennetavateks meetmeteks kvaliteedi, keskkonna, tööohutuse ja varahalduse valdkonnas, mis on kehtestatud kõikidele töötajatele [22].

### **3.6.Aktuaalsed varahalduse probleemid**

Hetkel kasutatakse EP tootmises kahte peamist tüüpi seadmete hooldust:

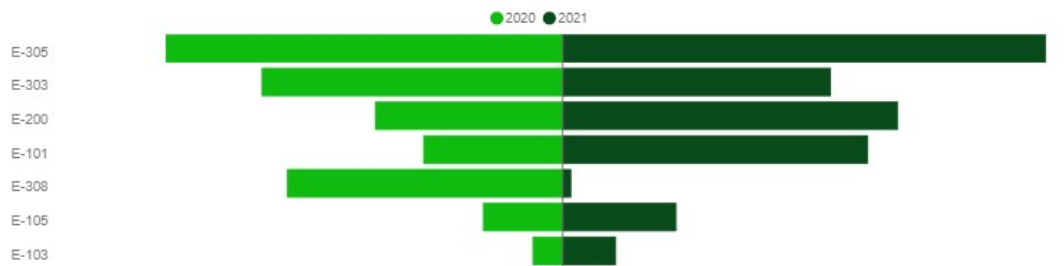
1. ennetav – vastavalt graafikule või tööajale;
2. reaktiivne (plaaniväline) – kui mõni komponent läheb rikki, toimub avariiremont.

Ennetava hoolduse puhul saab rääkida fikseeritud tõenäosusest avariiliste rikete tekkeks. Reaktiivne hooldus seevastu hõlmab seadmete töötamist kuni rikkeni, tagades seadme ressursi maksimaalse kasutamise.

Joonisel 7 on kujutatud planeeritud ja planeerimata tööde suhe (kuluandmed esitatakse tahtlikult skemaatiliselt ilma summadeta).

Joonisel 7 ja 8 kuvatakse järgmised tööde liigid:

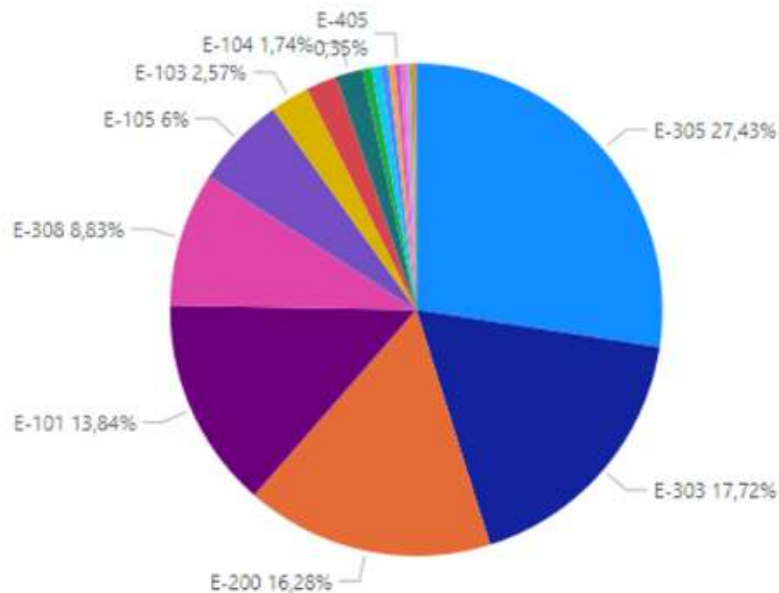
- E-305 – jooksev remont (plaaniline töö)
- E-303 – korraline hooldus (plaaniline töö)
- E-200 – hetkeseisust tingitud hooldus (plaaniväline töö)
- E-101 – defektide kõrvaldamine (plaaniväline töö)
- E-308 – hooldus, mis ei vaja stopp plokki (plaaniline töö)
- E-105 – lisatööd, mis on vajalikud defekti kõrvaldamiseks (plaaniline töö)



Joonis 7. Auvere ploki remondi ja hoolduse kulude jaotus 2020–2021 tööliikide lõikes, eurodes.

Allikas: autori koostatud

Joonisel 8 on näha, et 54% kuludest on seotud planeeritud kuludega, 30% erakorraliste kuludega ja 16% kõigi muude tööliikidega.

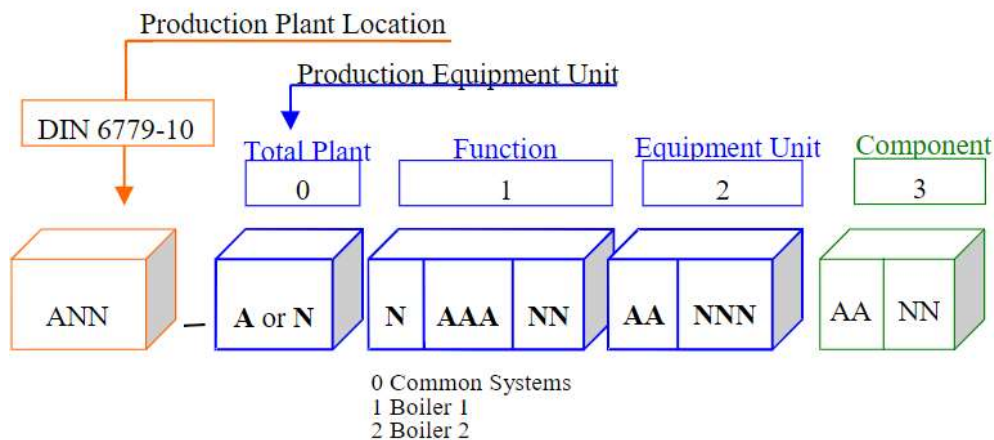


Joonis 8. Auvere ploki remondi ja hoolduse kulude jaotus tööliikide lõikes.

Allikas: autori koostatud

Selleks, et mõista seadme identifitseerimise põhimõtteid on vaja KKS süsteemiga tutvuda.

Seadmete identifitseerimiseks ettevõttes kasutatakse KKS koodi – Kraftwerk-Kennzeichensystem (KKS) – elektriijaamade tuvastamise süsteemi, mille põhiprintsiip on näidatud Joonisel 9. Näiteks Equipment Unit Key – AN tähendab Compressor units, blowers, fans.



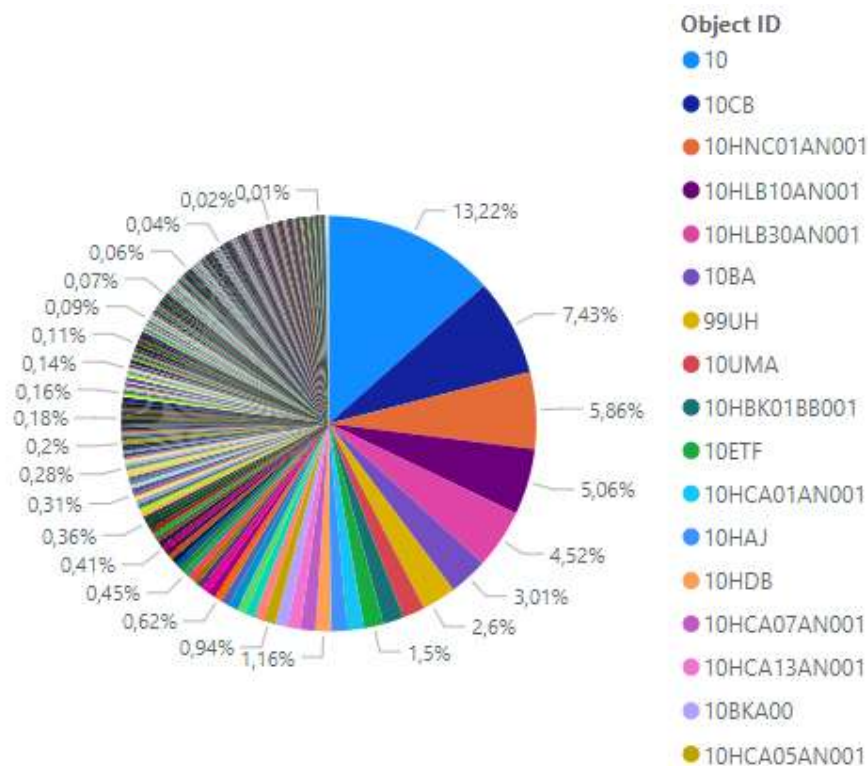
Joonis 9. KKS Elektriijaama identifitseerimissüsteem.

Allikas: Identification System KKS juhend

Kui jaotada kulud seadmete kaupa, siis objektide kaupa TOP5 (Joonis 10) hulka kuuluvad 3 konkreetset seadet ning üldised süsteemikoodid 10 ja 10CB, mis ei anna jaotusspetsiifikat (praegu on üldiste koodide kasutamine süsteemi seadete tasemel keelatud, et vältida segadust andmete analüüsimisel):

1. 10 – Auvere ploki ühine kood
2. 10CB – kontrolli ja juhtimise funktsionaalrühm, mida kasutati lepinguliste kulude kajastamiseks
3. 10HNC01AN001 Suitsueemaldi teenus „4Y/32 000hrs” koos Howden Axial Fans ApS-iga
4. 10HLB10AN001 Primaarõhupuhur DV-PV
5. 10HLB30AN001 Teisene õhupuhuri teenus „4Y/32 000hrs” koos Howden Axial Fans ApS-iga

Sellest tulenevalt võime järeldada, et enam kui 15% iga kahe aasta eelarvest läks kolme pöörleva masinaüksuse hoolduseks ja remondiks (Joonis 10).



Joonis 10. Auvere elektriloki remondi- ja hoolduskulude 2020–2021 objektide lõikes.

Allikas: autori koostatud

Allolevas tabelis on toodud peamised hädaolukorrad, mis viisid energiabloki seiskamiseni (Tabel 1). Tabelis on kajastatud ainult need vead, mis põhjustasid põhiseadmete seiskamise. Defektide kogumaht vastavalt IFS-ile Applications >9000. Väljavõte on võetud siseressursi *opinfo*-st, toimetatud andmed on toodud Tabelis 1.

Tabel 1. Energiabloki hädaolukorra sündmused aastateks 2020–2021.

Põhjus	Kuupäev	Seisak, tundides
Välissoojusvaheti nr. 10 leke. (320,1 t.)	09.11.2021	320
Välissoojusvaheti nr. 10 leke	09.11.2021	265,1
Leke välissoojusvahetis nr.10 (232 t), Katla väljalülitamine (10,5 t), Kolde ja tsüklooni puhastus, SealPod'i puhastus ja välissoojusvahetite nr 20 ja 30 puhastus (115,1 t)	01.04.2021	232
Kompensaatori vahetus „Topka-VTO nr 4”, parem pool (10HDB47BR101)	17.11.2020	215,8
Tugiseadmete remont (Abiseadmete remont)	01.03.2021	203,7
Tugiseadmete remont (Sekundaarõhupuhuri kanali avamine)	10.11.2021	167
Katla peamise võimsusregulaatori remont	11.06.2020	162,3
Leke välissoojusvahetis nr. 10	25.03.2021	147,1
Armatuuri remont	13.04.2021	128,5

Koonusklaapi remont	22.10.2020	123,8
Secondarülekuumendi lekk (katla teise auruülekuumendi leke, kõrgusmärk 49.6)	02.05.2021	112,4
Soojusvahetis nr 4 tuhavool puudub	03.07.2020	84,8
Veekeemia režiimi rikkumine. Koonusklaapi remont.	09.10.2020	75,3
LPC rootori andurite reguleerimine	10.02.2020	70
Armatuuri remont	11.09.2020	58,7
Survekarbi remont	25.07.2020	54,5
Turbiini telje nihkeanduri defekt.	19.10.2021	51,8
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega (trumli tase)	11.03.2020	18,6
Sekundaarse süsteemi (turbiini välja lülitamise reguleerimisklaapi tõttu) remont	21.10.2021	15
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega (sekundaarne ülekuumendi)	14.07.2020	9,2
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega (trumli tase)	09.03.2020	8,3
Armatuuri remont	24.02.2020	7,7
Turbiini reguleerimis ja kaitse süsteemide rike	17.05.2021	7,7
Turbiini väljalülitamine kondensaatori rõhukaitse tõttu (W kadu), kondensaatori vakuumklapp on avatud	13.06.2021	7,7
Turbiini väljalülitamine kondensaatori rõhukaitse tõttu (W kadu), kondensaatori vakuumklapp on avatud	09.07.2021	7
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega (ökonomaiseri tase)	08.06.2020	6,1
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega – vigane katla võimsuse regulaator	11.06.2020	5,9
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega instrumendi õhurõhu languse tõttu	30.07.2020	5,6
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega heitgaaside hapnikusalduse vähenemise tõttu	09.03.2021	5,2
Katla tugiseadmete remont	26.12.2020	4,8
Katla väljalülitamine kõrge temperatuuri tõttu tsüklonides	04.12.2021	4,8
Tugiseadmete remont	28.02.2021	4,5
Turbiini väljalülitamine kondensaatori rõhukaitse tõttu (W kadu)	02.08.2021	4,3
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega O <sub>2</sub>	27.10.2020	3,4
Sekundaarõhupuhuri seiskamine laagri №3 vibratsiooni tõttu	15.12.2020	3,2
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega generaatori võimsuse tõttu	24.07.2020	3
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega toitepumbi surve tõttu. Turbiini armatuuri remont	28.10.2021	2,6
Väljalülitamine tehnoloogilise kaitsega – vigane katla võimsusregulaatori	09.06.2020	2,2
Turbiini kaitse, kõrgrõhutsilindri stress 105%. Kõrgrõhu auru temp. langetamine. VTO #3 on täis	02.08.2021	1,8
Õhukulu vähendamine SealPot-le N-4	16.07.2021	1,6
Katla väljalülitamine koldes madala temperatuuri tõttu	14.12.2021	1,4
Stress HPC	10.01.2020 21:19	1,2

Allikas: autori koostatud

Analüüsid avariijuhtumite arvu Tabelit 1 seisakute lõikes, võib märkida, et suur arv seisakutunde on seotud katlaseadmete (soojusvahetid, torustikud, kompensaatorid jne) avariimääraga. Selle põhjuseks on peamiselt projekteerimisvead, mis on seotud seadmete valikuga.



Seega uuendab seadme omanik remonditööde käigus seadmeid töökindluse tõstmiseks. Arvesse tuleks võtta olemasolevate või äsja kasutusele võetud seadmete või komponentide elutsükli, et jälgida nende järelejäänud eluiga. Pöörlevate masinate rikete määr on vähem seotud tootmise spetsiifikaga ja rohkem töömõjudega ning seadmetel esinevad defektid on tüüpilised samastele seadmetele teistes jaamades. Seega toimub hooldus vastavalt tootja juhistele – OMM, mis ei võimalda vältida hädaolukordi, mis on dünaamiliste seadmete loomulik protsess, ja toob kaasa täiendavaid seadmete seisakuid koos rahalise kahjuga. Teave pöörlevate mehhanismide hädaolukordade kohta on toodud Tabelis 2.

Tabel 2. Väljavõte pöörlemismehhanismide hädaolukordadest.

Algseis	Uus seis	Kuupäev	Märkused
Töös	Plaaniväline remont	15.12.2020 18:05	Sekundaarõhupuhuri seiskamine laagri №3 vibratsiooni tõttu
Töös	Plaaniväline remont	25.07.2020 02:35	Primaarõhupuhuri remont
Töös	Plaaniväline remont	23.04.2019 05:44	Sekundaarõhupuhuri seiskamine
Töös	Moderniseerimine	14.10.2016 01:02	Primaarõhupuhuri seiskamine laagri №4 vibratsiooni tõttu
Töös	Moderniseerimine	08.10.2015 16:52	Sekundaarõhupuhuri seiskamine
Töös	Moderniseerimine	18.10.2015 02:48	Tõmbeventilaatori vibratsioon

Allikas: siseressursi *opinfo*

Täiendamist vajab ka sündmuste salvestussüsteem, mis hetkel on realiseeritud veebikeskkonnas, kus vastutav (elektrijaama valveinsener) fikseerib tekstina seadmete uue seisu kirje. Märgendiga sidumine puudub, samuti on problemaatiline kasutada andmeid analüüsiks tekstide keelelistest iseärasustest (kanded on tehtud erinevate inimeste poolt): lühendid, keel (eesti, vene, inglise), puudulik info jne (Joonis 11).

K Auvere					
Предыдущее состояние	Установленное состояние	Подстатус	Время перевода	Заявка до	Комментарии
Неплановый ремонт	Работа		05.05.2022 01:12		
Работа	Неплановый ремонт		05.05.2022 00:05		Välja lülitatud kaitses tõttu seoses tuha tasemega ökonomaiseris / Отключен защитой по уровню золы в бункере экономайзера
Работа	Работа		25.04.2022 02:37		
Резерв	Работа - стабилизация режима	Работа - стабилизация режима	24.04.2022 23:37		
Резерв	Резерв	Растопка	24.04.2022 15:55		
Неплановый ремонт	Резерв		23.04.2022 19:00		
Работа	Неплановый ремонт		15.04.2022 03:00	25.04.2022 01:00	Defektide kõrvaldamine: elektrifiltrite remont; katla kolde puhastus ja muu defektide kõrvaldamine / Устранение дефектов: Ремонт ЭФ, чистка топки, устранение накопившихся дефектов, инспекции.
Работа	Работа		15.04.2022 00:01		
Неплановый ремонт	Работа	Работа - стабилизация режима	14.04.2022 21:01		
Работа	Неплановый ремонт		14.04.2022 18:39		Отключен защитой по повышению перепада давления на рукавном фильтре. Mega Fabric Filter (10HDD10)
Работа	Работа		09.03.2022 09:00		
Работа	Работа	Работа - стабилизация режима	09.03.2022 00:00		Ремонт вспомогательного оборудования блока.

Joonis 11. Operatiivteabe liidese vaade.

Allikas: siseressursi *opinfo*

Selles jaotises on juba nimetatud ettevõttes kasutatavaid seadmete hoolduse liike: ennetav ja reageeriv. Ennetava ja reageeriva hoolduse plussid ja miinused on toodud Tabelis 3.

Tabel 3. Peamiste hooldus- ja remondistrateegiate lühikirjeldus.

		tugevused	nõrkused
tegevuste olemus	ennetav	Parimad tingimused seadmete hoolduse ja remondi planeerimiseks.	Märkimisväärsed kulud seadmete hooldusele ja remondile seoses töökõlblike komponentide ja osade väljavahetamisega.
	reaktiivne	Minimaalsed hoolduskulud.	Rikked ja õnnetuste likvideerimise kulud on suured ja ettearvamatud.

Allikas: autori koostatud

Siiski on oluline märkida, et mõlemal ülalmainitud seadmete hooldusel on oma puudused. Näiteks võib olla nende seadmete väljavahetamine, mis pole oma ressursi teeninud. See tähendab, et sel juhul on suurenenud materjalide tarbimine, tööjõukulud, varuosad jne.

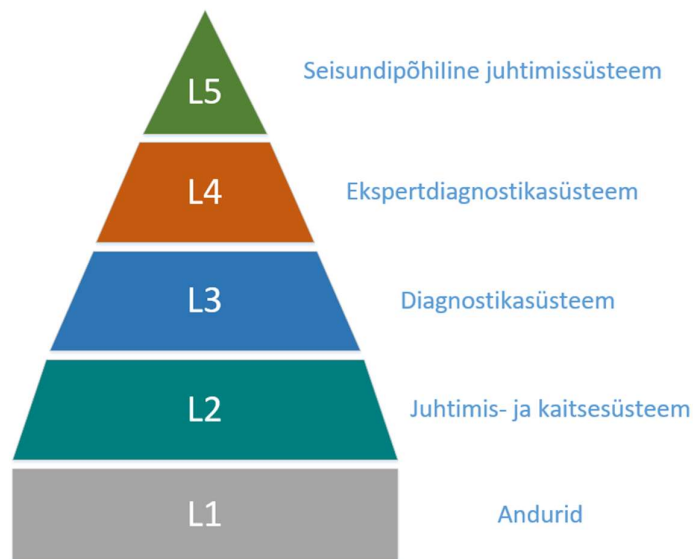
Reaktiivse teenuse miinuseks on sündmuse toimumise ebakindlus, võimalik, et pikad remondiajad, samuti vajadus varuosade järele, mida mõnikord seostatakse pikkade tarneaegadega.

Defekti tuvastamise fakt fikseeritakse ERP süsteemis vastava prioriteediga. Konkreetsete kahjustustega töötamise võime määratakse järgmise dokumendiga – „Elektrijaamade ja võrkude tehnilise toimimise reeglid”. Juhul, kui seadmete kasutamist ei ole võimalik jätkata ja funktsionaalset koondamist ei pakuta, peatatakse põhiseadmed.

Nendel tingimustel on ilmselgelt vajalik kasutada kaasaegseid hooldusmeetodeid, mis põhinevad ML kasutamisel, et määrata kindlaks seadmete olek, võrreldes selle trendiga elutsükli graafikul.

### 3.7. Tootmisvarade haldussüsteem

Tootmisvarahaldussüsteemis saab eristada järgmisi komponente: andurid, seire- ja kaitsesüsteemid, diagnostikasüsteem, ekspertsüsteem, üksuse seisukorra juhtimissüsteem (Joonis 12).



Joonis 12. Tootmisvarahaldussüsteemi komponendid.

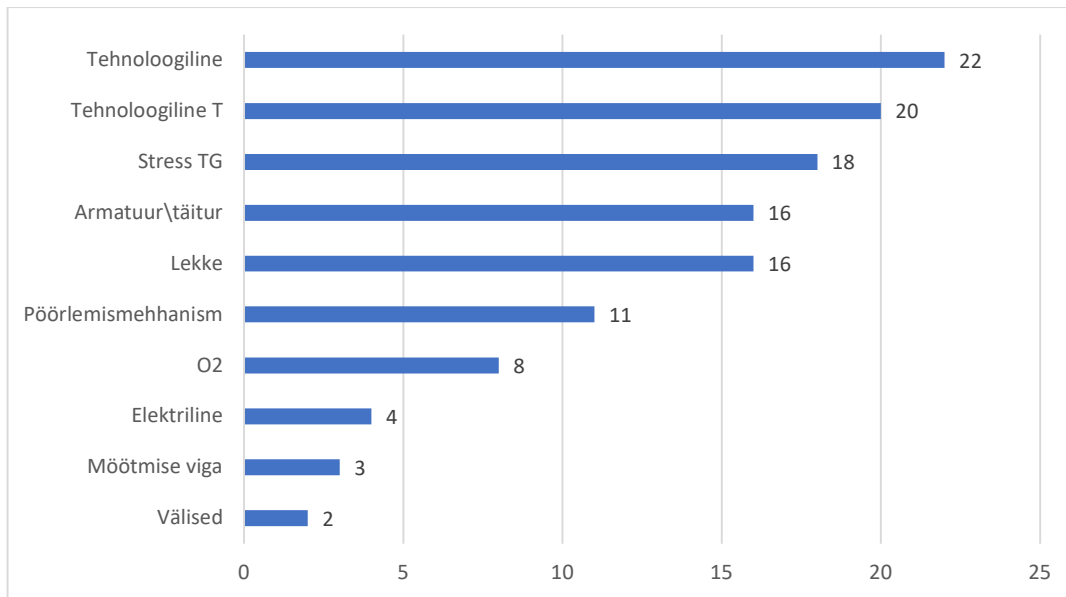
Allikas: autori koostatud

Nagu artikli „Asset management in the process Industry” autorid rõhutavad, on „tihe ülemaailmne konkurents ja püsiv hinnasurve toonud esile varahalduse tähtsuse paljudes tööstusharudes. Keskendumine „varade tasuvusele” on muutunud tootmisprotsessi võtmeküsimuseks”. Kuid „kahjuks ei ole meil praegu kulutõhusaid tööstusliku kvaliteediga süsteeme, mis suudaksid füüsiliste mõõtmiste ja kogemustel põhinevate väärtuste põhjal ennustada konkreetsete protsesside ja seadmete järelejäänud eluiga”. [24]

Joonisel 13 on näidatud 120 Auvere ploki seiskamiseni viinud defekti jaotus kogu tööperioodi peale. Autor jagas need järgmisteks tüüpideks:

1. Välised – operaatorite mõju ning hooldus ja remont ei ole võimalik, näiteks madala kvaliteediga kütus või selle puudumine.
2. Mõõtmise viga – mõõteseadmete viga, kõrvaldatakse asendamisega, vähesust ja erinevaid mõõtmisstrateegiaid arvestades on ennustav tuvastamine raskendatud.
3. Elektriline – seotud toiteallika mõjuga.
4. O<sub>2</sub> – hapniku mõõtmine, mõõtmisviga või tööviga.
5. Pöörlemismehhanism – defektid tõmbeventilaatoril, primaar- ja sekundaarõhu ventilaatoril, pumpadel.
6. Leke – leke soojusvahetuselementidel või torudel.
7. Armatuur\täitur – armatuuri või täituri komponentide kahjustus.
8. Stress TG – tööviga, mille tagajärjel lülitub turbogeneraator (TG) välja.

9. Tehnoloogiline T – tööviga, mis on seotud paljude teguritega erinevates katla- või turbiinisüsteemides, mis reeglina tõi kaasa temperatuuri (T) languse kaitse töösätetele.
10. Tehnoloogiline – mitmesugused seadmete rikke ja töörežiimidega seotud vead.



Joonis 13. Defektide jaotus põhjuste tüüpide järgi.

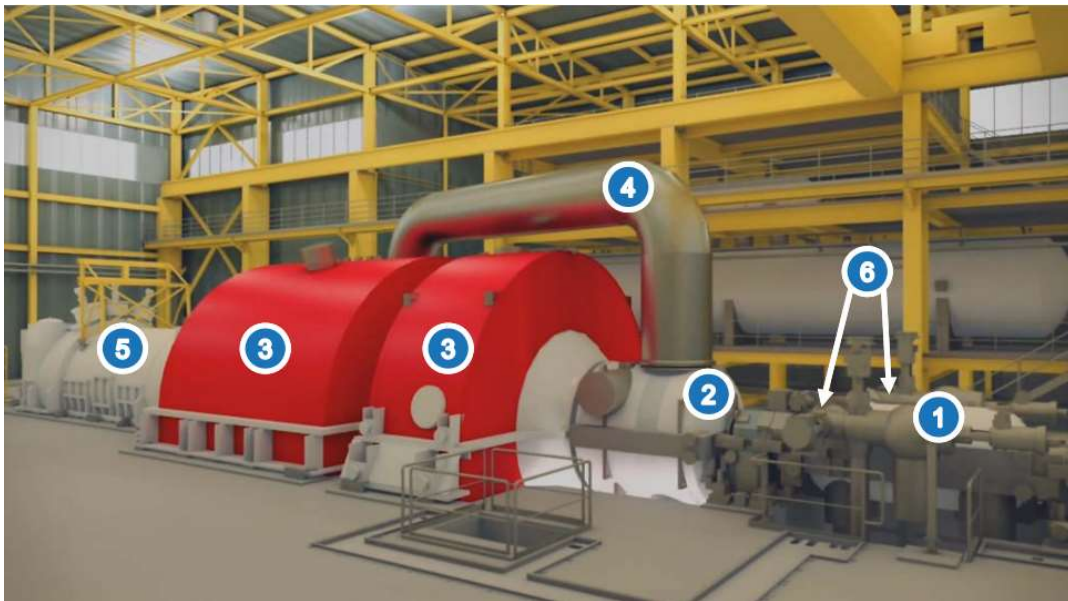
Allikas: autori koostatud

Temperatuuriga seotud tehnoloogiliste ja tehnoloogiliste T seadmete väljalülitamise põhjused on üldistatud rühmad ja erinevad üksteisest oluliselt (protsessi erinevad osad ja funktsionaalsed rühmad). Kolmandal kohal on turbiini termilise stressiga seotud seisakud. Peatükis 4 käsitleb autor võimalust kasutada ML-i selliste olukordade esinemise ennustamiseks, et vähendada selliste olukordade esinemist tulevikus. Küsimuse, mis on seotud armatuuri või täiturmeehhanismi kahjustustega, mis on samuti olulised defektid, jätab autor tulevikuks.

## 4. Auvere ploki turbiini termilise stressi ennustamine masinõppe abil

Auvere energiablokk on hetkel Eesti kaasaegsem, keevkihttehnoloogial põlevkivil töötav monoplokk käivitati 2015. aastal. Seadmed on üsna kaasaegsed suure hulga mõõteseadmetega, kõik andmed salvestatakse juhtimissüsteemi *historian* (DCS) abil. Kuna 7 aasta jooksul on toimunud piisaval hulgal erinevaid remondi-, hooldus- ja hädaolukordi, siis sisaldab süsteem suurt hulka andmeid, mis annab võimalust kasutada seda andmebaasi uurimiseks ja seoste leidmiseks. Erilist tähelepanu väärrib kindlasti Auvere ploki turbiini (Joonis 14) masinõppe abil stressi ennustamise teema.

Soojuselektrijaamas tekitab termilise stressi kuuma auru ja külma rootori vaheline temperatuur. Ülemäärased termilised pinged lühendavad auruturbiini rootori eluiga ja piiravad jaama käivitusaega.



Joonis 14. Auvere ploki turbiin.

Allikas: [25]

Joonisel 14 esitatud numbrid näitavad järgmisi komponente:

1. Kõrgsurve silinder (HPC)
2. Keskmise surve silinder (MPC)
3. Madala surve silinder (LPC)
4. Mõödavoolutoru
5. Generaator
6. Sisselasketoru

Seoses suhteliselt uute seadmete sagedaste hädaolukordadega on vaja leida hooldusviis, mis tõstab nende töökindlust ja vähendab seega hoolduskulusid ning suurendab kättesaadavust väiksema kuluga elektrienergia tootmiseks.

Mööduvate protsesside ajal tuvastab juhtimissüsteem turbiini termilise stressi tekkimise. Kõik operaatori käsutuses olevad näitajad ei võimalda aga parameetrite kõrvalekallet määrata. Sellega seoses on vaja kindlaks määrata termilist stressi mõjutavad tegurid. Loogikaskeemide ja juhiste analüüs ei võimaldanud kindlaks teha selle sündmuse konkreetseid põhjuseid. Seega on autor seadnud ülesandeks määrata turbiini stressi mõjutavad tegurid.

Turbiini termilise stressi teema on üsna aktuaalne. Sellega on seotud mitmed uuringud [26]- [30].

#### 4.1. Tarkvara valik

Turul on saadaval mitu ML tarkvara. Allpool on loetletud nende seas kõige populaarsemad (Joonis 15).

Comparison Chart

	Platform	Cost	Written in language	Algorithms or Features
Scikit Learn	Linux, Mac OS, Windows	Free.	Python, Cython, C, C++	Classification Regression Clustering Preprocessing Model Selection Dimensionality reduction.
PyTorch	Linux, Mac OS, Windows	Free	Python, C++, CUDA	Autograd Module Optim Module nn Module
TensorFlow	Linux, Mac OS, Windows	Free	Python, C++, CUDA	Provides a library for dataflow programming.
Weka	Linux, Mac OS, Windows	Free	Java	Data preparation Classification Regression Clustering Visualization Association rules mining
KNIME	Linux, Mac OS, Windows	Free	Java	Can work with large data volume. Supports text mining & image

Joonis 15. Kõige populaarsemad masinõppe tarkvara tööriistad.

Allikas: [31]

Masinõppe meetodite rakendamiseks autoril on valitud Weka tarkvara. Weka on visualiseerimistööriistade ja algoritmide kogu andmete kaevandamise ja ennustamise

probleemide lahendamiseks koos graafilise kasutajaliidesega neile juurdepääsuks. Weka võimaldab lahendada ülesandeid nagu andmete ettevalmistamine (eeltöötlus), rühmitamine, klassifitseerimine, regressioonanalüüs ja tulemuste visualiseerimine [32].

Weka eelised, millest sai magistritöös püstitatud ülesannete lahendamiseks just see tarkvara valimine:

1. Tasuta kättesaadavus.
2. See on täielikult rakendatud Java programmeerimiskeeles ja töötab seega praktiliselt igal kaasaegsel arvutusplatvormil.
3. Põhjalik andmete eeltöötlus- ja modelleerimistehnikate komplekt.
4. Kasutuslihtsus tänu graafilisele kasutajaliidesele [33], see tähendab võimalust rakendada ML-i ilma koodi kirjutamata.

## 4.2. Andmed ja ülesanne

Selles uuringus kasutatakse *historian* serveri ajaloolisi analoogturbiini temperatuuri mõõtmise andmeid. 2021. aasta aprillis toimus 7 turbiini hädaseiskamist turbiini stressi tõttu. Ülaltoodud sündmuste temperatuuri mõõtmise andmeid kasutati masinõppe mudeli koostamiseks. Temperatuuri vahemikud on erinevad: 0...100°C, 0...1000°C (vt Lisa 2).

Andmestik koosneb 47 numbrilist tüüpi atribuudist ja ühest kahendtüübi klassist. Class atribuut oli numbriline, kuna turbiini peatus toimub teatud sättepunkti väärtusel, siis on kõik väärtused kuni sättepunkti asendatud „0”-ga (peatust polnud) ja suuremad väärtused asendatakse „1”-ga (tekkis peatus). See võimaldab rohkem algoritme kasutada. Atribuutide loend on esitatud Lisas 2. Andmestikus on 544 kirjet, kasutatakse 2 päeva enne sündmust ja 2 päeva pärast. Andmed on eelnevalt puhastatud puuduvatest väärtustest.

Autoril on püstitatud ülesanne: leida võimalikult parim mudel termilise stressi põhjusel turbiini peatamise ennustamiseks.

## 4.3. Meetodid

### 4.3.1. Masinõppe algoritmid

Töös on võetud kasutusele kõige populaarsemad masinõppe algoritmid:

- SimpleLogistic

- Multilayer.perceptron
- Random Forest
- Naive Bayesi
- J48

*Logistiline regressioon* (ingl. logistic regression) või üldisemalt logistiline mudel ehk logit-mudel prognoosib uuritava sündmuse toimumise tõenäosust ja selle muutumist sõltuvalt pideva argumenttunnuse väärtuse muutumisest [34].

*Multi-Layer Perceptron* algoritmid toetavad nii regressiooni kui ka klassifitseerimise probleeme. Seda nimetatakse ka tehisnärvivõrkudeks või lihtsalt närvivõrkudeks. Närvivõrgud on keerukas algoritm, mida saab kasutada ennustavas modelleerimisel, kuna seal on nii palju konfiguratsiooniparameetreid, mida saab tõhusalt häälestada ainult intuitsiooni ja rohkete katsete ja vigade abil. See on algoritm, mis on inspireeritud aju bioloogiliste närvivõrkude mudelist, kus väikesed töötlemisüksused, mida nimetatakse neuroniteks, on paigutatud kihtideks, mis hea konfiguratsiooni korral suudavad esitada mis tahes funktsiooni. [35]

*Random Forest* on otsustuspuude mudelite ansambel, mida saab kasutada klassifitseerimiseks või regressiooniks. Otsustuspuud ehitatakse ahne algoritmi abil, mis valib puu ehitamise igas etapis parima jaotuspunkti. Random Forest rikub puu loomise ajal ahne jagamisalgoritmi, nii et jagamispunkte saab valida ainult sisendatribuutide juhusliku alamhulga hulgast. Sellel lihtsal muudatusel võib olla suur mõju, vähendades puude sarnasust ja sellest tulenevaid ennustusi. [35]

*Naive Bayesi* klassifikaator on tõenäosuslik masinõppemudel, mida kasutatakse klassifitseerimisülesande jaoks. Klassifikaatori tuum põhineb Bayesi teoreemil.

$$P(A|B) = \frac{P(A) P(B|A)}{P(B)} \quad (1)$$

Kasutades Bayesi teoreemi leitakse sündmuse A juhtumise tõenäosuse, arvestades, et sündmus B on toimunud (vt valem 1). [36]

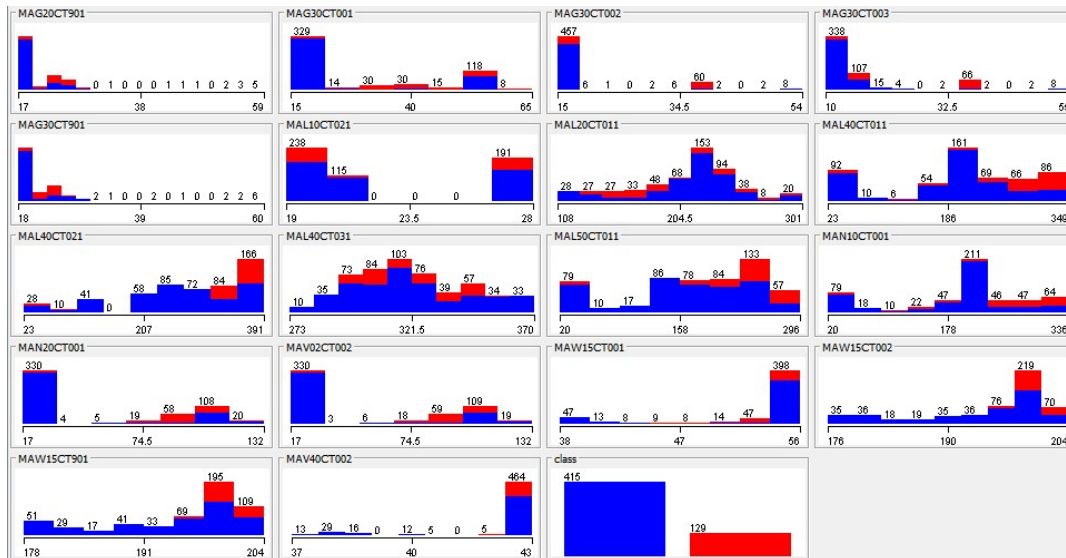
*J48* algoritm konstrueerib otsustuspuud treenimisandmetel, kasutades teabe entroopia kontseptsiooni. Treenimisandmed on juba klassifitseeritud näidiste hulk  $S=\{s_1, s_2, \dots\}$ . Iga valim si koosneb p-mõõtmelisest vektorist  $(x_1, i, x_2, i, \dots, x_p, i)$ , kus  $x_j$  tähistab vastava valimi atribuudi väärtusi või tunnuseid, samuti klassi, kuhu valim kuulub.



Suurima klassifikatsiooni täpsuse saavutamiseks puu ehitamisel on parim atribuut, mille järgi jagada, atribuut, millel on kõige suurem teave [37].

### 4.3.2. Klasside tasakaalustamatus

Pärast andmete laadimist on eeltötluse etapis hinnatud atribuutide jaotust (Joonis 16). Parema klassifikatsiooni huvides prooviti klasse tasakaalustada.



Joonis 16. Atribuutide jaotus enne tasakaalustamist ja normaliseerimist.

Allikas: autori koostatud

Klassid ei ole tasakaalus (Tabeli 4, Raw data). Mudeli jõudluse parandamiseks kasutab autor tasakaalustamise tööriistu erinevate filtrite näol, tulemused on toodud Tabelis 4.

Tabel 4. Tasakaalustamise vahendite kasutamise tulemused.

Nõ	Label	Raw data	Smote	SpreadSubsample	ClassBalanser	Resample
1	0	415	415	415	336.5	415
2	1	129	258	258	336.5	258

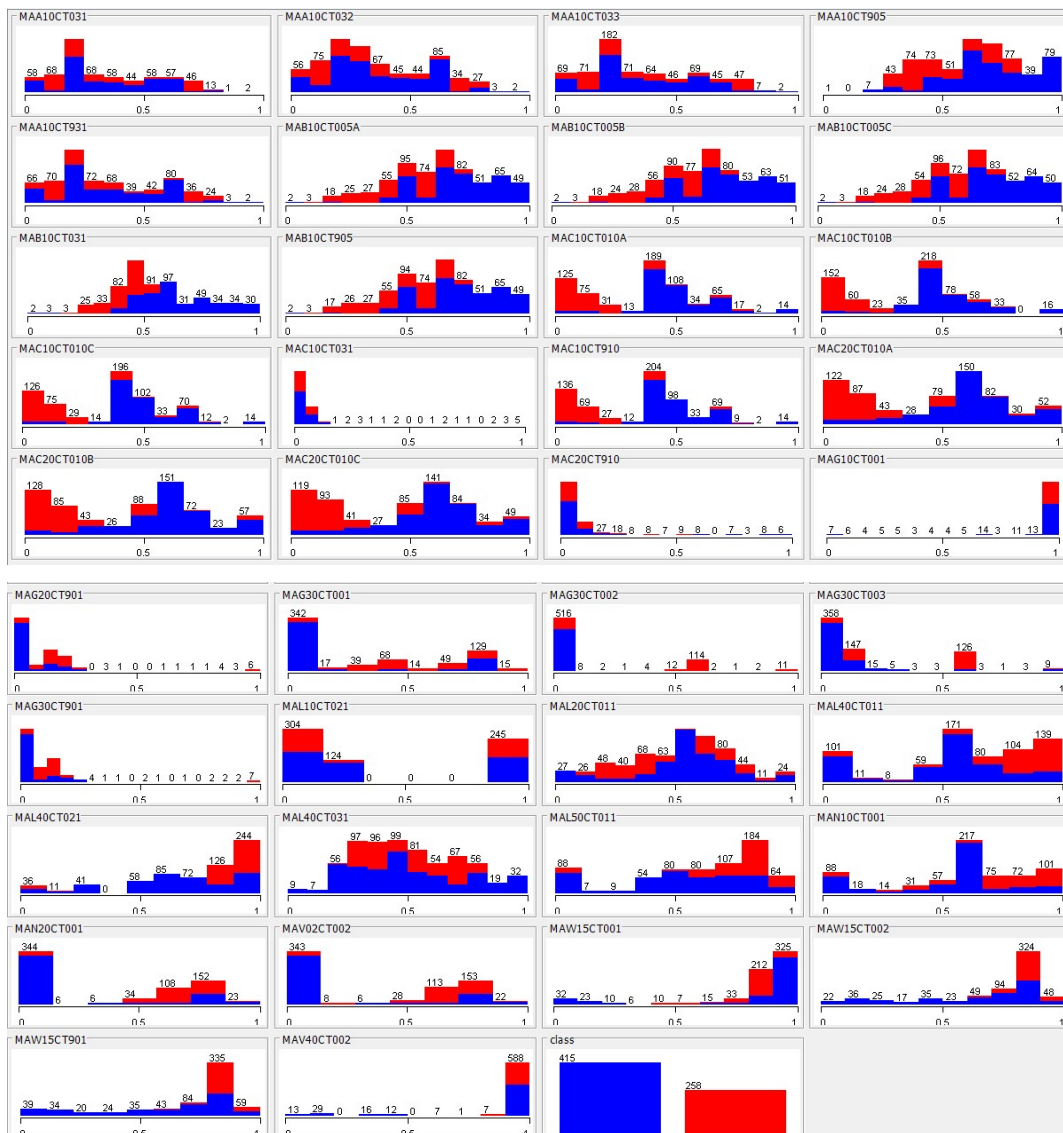
Allikas: autori koostatud

Kõige tasakaalustatum komplekt saadakse ClassBalanceri kasutamisel, mis kaalub eksemplare andmetes ümber, nii et igal klassil oleks sama kogukaal. Kõikide eksemplaride kaalude kogusumma jäetakse alles. Muudetakse ainult selle filtri poolt vastuvõetud esimese andmepartii kaalusid, nii et seda saab kasutada koos filtreeritud klassifikaatoriga. Kui klass on numbriline, diskreteeritakse see võrdse laiusga

diskretiseerimisega, et luua pseudoklassid kaalumiseks [38]. Selline jaotus osutub liiga ideaalseks, autor kasutab edaspidi andmeid pärast tasakaalustamist *SMOTE*.

### 4.3.3. Normaliseerimine

Kuna atribuutidel on erinevad temperatuurivahemikud, mõjutavad väärtused masinõppe mudelit erinevalt, on vaja läbi viia normaliseerimine, selleks autoril on rakendatud Weka filtrit *unsupervised.attribute.Normalize*, seega jälgime muutust vahemikus 0 kuni 1, tulemus on näidatud Joonisel 17.



Joonis 17. Atribuutide jaotus pärast tasakaalustamist ja normaliseerimist.

Allikas: autori koostatud

Pärast tasakaalustamist *SMOTE* ja normaliseerimist *Normalize* on saadud optimaalse andmestiku. Histogrammidel on temperatuurid selgelt jagatud kahte rühma, need aga ei sõltu klassist. Autor peab selle põhjuseks turbiini eelsoojenemist käivitamise ajal. Turbiini erinevaid osi kuumutati erinevatel aegadel.

Tabel 5. Segadusmaatriks, Simple Logistic mudel enne ja pärast normaliseerimist.

Simple Logistic - normaliseeritud				Simple Logistic - normaliseerimata			
a	b	<--	classified	a	b	<--	classified
398	17	=	0	401	14	=	0
13	245	=	1	20	109	=	1
	0,955				0,937		Täpsus

Allikas: autori koostatud

Mudeli täpsus ei erine palju. Pärast normaliseerimist tundub segadusmaatriks veidi usaldusväärsem (Tabel 5).

#### 4.3.4. Mudelite hindamine

Kõigi mudelite hindamiseks töös on kasutatud 10-kordset ristvalideerimist. See tähendab, et andmed olid jaotatud 10 ühtlase suurusega ja juhuslikuks osaks ning seejärel kasutatud üht osa valideerimiseks ja teist 9 treenimisandmestikuna. See oli tehtud 10 korda ja siis valideerimistulemuste keskmises F-skoorid on esitatud mõlema klassi F-skooride kaalutud keskmistena. F-skoor on harmooniline keskmine täpsuse (*precision*) ja saagise (*recall*) vahel.

Need mudelid näitavad ühe muutuja sõltuvusi, korrelatsioone teistega. See aitab ära tunda teatud tegurite võimalikku mõju teistele. Sõltuvuste tundmine aitab paremini mõista, kuidas süsteemid üksteisega suhtlevad.

Uuringud võivad defineerida sõltuvusi, mis on autori jaoks ootamatud.

Tabel 6. Segadusmaatriks, Random Forest ja Simple Logistic mudel.

Random Forest				Simple Logistic				
a	b	<--	classified	as	a	b	<--	classified
408	7		a	= 0	398	17	=	0
3	225		b	= 1	13	245	=	1
	0,985					0,955		Täpsus

Allikas: autori koostatud

Seega Tabelis 6 on toodud normaliseeritud andmete tulemused: TP - 408 ja TN - 225 omakorda FP -3 ja FN - 7, mis on väga hea näitaja. Valem Simple Logistic model Class1 jaoks:

Stress TG=		-22,42	+	
10MAG10CT001	*	14,21	+	LP BYP1 TEMP1 IN CONDR
10MAW15CT002	*	8,86	+	SEALT GLS SEALING SYS
10MAC10CT031	*	8,75	+	T LPT EXHAUST
10MAG20CT901	*	6,09	+	LP BYP2 TEMP IN CONDR 1/2
10MAC10CT910	*	4,61	+	T VENT PROT LP TURB 2/3
10MAV40CT002	*	3,76	+	T LOIL HEADER
10MAW15CT001	*	2,71	+	SEALT GLS SEALING SYS
10MAG30CT001	*	1,97	+	CondenserT1 TAL CONDENSER INLET
10MAG30CT002	*	1,84	+	CondenserT2 TAL CONDENSER INLET
10MAL40CT011	*	1,41	+	T DRAIN PIPE
10MAG20CT001	*	1,12	+	LP BYP2 TEMP1 IN CONDR
10MAN10CT001	*	0,74	+	LP BYP1 DUMP TUBE TEMP CondenserCONDENSER
10MAG30CT003	*	0,66	+	TEMPERATURE 3
10MAL50CT011	*	0,58	+	T DRAIN PIPE
10MAB10CT031	*	-7,71	+	TurbineT IPT EXHAUST
10MAC20CT910	*	-5,77	+	T VENT PROT LPT2 TURB 2/3 CondenserCONDENSER HOTWELL
10MAG10CT004	*	-3,84	+	TEMP
10MAA10CT905	*	-2,93	+	T HPT STRESS CALC 2/3
10MAC10CT010A	*	-2,79	+	T VENT PROT LP TURB ACT VAL
10MAL40CT031	*	-2,78	+	T DRAIN PIPE
10MAG10CT901	*	-1,91	+	LP BYP1 TEMP IN CONDR 1/2
10MAA10CT031	*	-1,7	+	TurbineT HP TURBINE EXHAUST
10MAL10CT021	*	-1,3	+	T DRAIN PIPE
10MAG10CT002	*	-0,77	+	LP BYP1 TEMP2 IN CONDR
10MAB10CT005A	*	-0,46	+	T IPT STRESS CALC
10MAL20CT011	*	-0,4	+	T DRAIN PIPE

(2)

#### 4.4. Tulemuste hindamine

Valitud mudelite tulemuste võrdlus on esitatud Tabelis 7.

Tabel 7. Kasutatud mudelite tulemused.

Model	F-Measure	Kappa	MCC
Naive Bayesi	0,894	0,774	0,775
SimpleLogistic	0,955	0,906	0,906
Multilayer perceptron	0,981	0,9522	0,959
J48	0,981	0,9592	0,959
Random Forest	0,985	0,9687	0,969

Allikas: autori koostatud

Mudelite täpsuse hindamiseks on kasutatud järgmised meetrikad.

$$F\text{-Measure} = 2 * \text{Precision} * \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall})$$

$$Kappa = (\text{observed accuracy} - \text{expected accuracy}) / (1 - \text{expected accuracy})$$

MCC-d kasutatakse masinõppes binaarsete (kaheklassiliste) klassifikatsioonide kvaliteedi mõõdikuna. See võtab arvesse tõeseid ja valesid positiivseid ja negatiivseid ning seda peetakse üldiselt tasakaalustatud mõõduks, mida saab kasutada isegi siis, kui klassid on väga erineva suurusega.

Selle uuringu tulemuste põhjal saab teha järgmised järeldused. Random Forest mudelit kasutades saab sündmust ennustada täpsusega 0,985. Masinõppe algoritmide rakendamine on võimaldanud mõista ja määrata 26 temperatuuritegurit, mis mõjutavad turbiini stressi (vt valem 2).

Neid andmeid saab kasutada ML-mudeli rakendamiseks platvormi loomisel.

## 5. Varahalduse platvormi arendamine

Käsitatud teema aktuaalsusega ja olulisusega (sh majanduslik kasu ettevõttele) on seotud suur arv selle teemaga seotud teadustööde. Näiteks 2021. aastal kaitsi Tallinna Tehnikaülikoolis magistrinääd, mille eesmärk oli minimeerida rahalisi kahjusid Enefit Poweri elektrijaama tootmisel [39].

Selle magistrinääd uurimisobjektina oli Enefit Power elektrijaama tsirkuleeriva keevkihiga plokk. Autor määratles oma eesmärgina masinöpe mudeli koostamise, mille abil saab õigeajaliselt ennustada leket katlas, et vältida või minimeerida tootmise rahalist kaotust. Masinöpe mudeli algoritm peab sobima protsessijuhtimissüsteemi integreerimiseks. Nagu autor märgib, „eesmärgi saavutamiseks kasutakse standardseid statistika ja masinöpe meetodeid IT-vaatenurgast protsessi tehnoloogiasse süvenemata” [39]. Autor otsustas kasutada mudeli parameetritena kõiki auru ja veekulude mõõtmisi, mis lubas hea täpsusega 81% ennustada uuritava katla lekke. Autori arvutuste kohaselt „ühe lekke õigeaegne ennustamine poolteist päeva enne avarii seiskamist säästab ootamatu kulutusi ulatuses kuni 58000 €” [39].

Samal aastal kaitsi veel üks magistrinääd, mille eesmärgiks oli rikete tuvastamise meetodika väljatöötamine masinöppemeetoditel põhinevatel tööstusseadmetel ja nende tehnoloogial juurutamine ettevõtte juhtimissüsteemi [40]. Andmete põhjal Enefit Power AS ettevõtete infoserveritest koguti mitmeid ML-mudeleid paigaldatud ennustama seadmete talitlushäirete esinemist töö ajal. ML mudelite ehitamiseks kasutati programmeerimiskeelt R ja WEKA tarkvara. Juhtumipõhise rikete tuvastamise meetodi puhul kasutati lineaarset ja logistilist regressioonimudelit loodud seadmete probleemide ennustamiseks. Lineaarse regressiooni mudeli jaoks RMSE treenimisandmetel oli 0,13. Mudeli r-ruut oli 92,6%. Logistilise regressiooni mudel klassifitseeris õigesti 99,98% treenimisandmetest. Autor rõhutab, „et leitud meetodid on universaalsed ja rakendatavad mis tahes huvitatud ettevõtte mehhanismid. Teave esitatakse projektis sellisel kujul nii, et seda tööd oli võimalik kasutada meetodilise juhendina integreerimisel kaalutletud meetodid igas tööstusettevõttes” [40].

Pole kahtlust, et teadlased nõustuvad, et peamine viis seadmete töökindluse parandamiseks on nende rikke ennustamine ja kontrolli all oleva jääkelu riski jälgimine. Selle probleemi lahendamiseks saab kasutada ML meetodeid. Selline lähenemine ennustavate mudelite ülesehitamisel on aga keskendunud pretsedentide põhjal mudeli

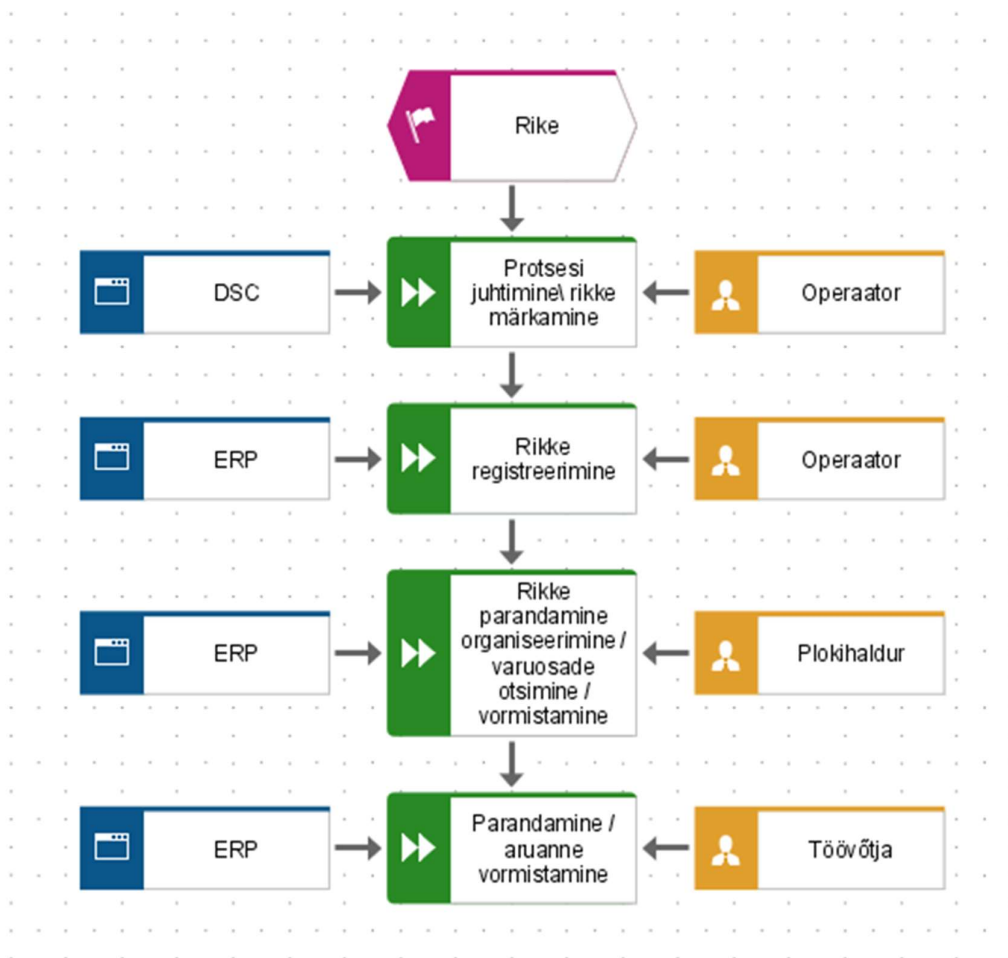
treenimisele, mida näitavad näiteks kaks ülalmainitud magistritööd, aga ka käesoleva töö 4. peatükk. Samuti tuleb märkida, et nende meetodite kasutamine on rakendatav sündmuse ennustamise olulise täpsusega.

Arvestada tuleb aga sellega, et turul on juba valmis testitud PdM-tarkvara, mille töökindlus on katseliselt kinnitatud (näiteks Bently Nevada poolt toodetud System1 [41], [42]). Siiski on oluline, et nendel toodetel oleks piiratud kasutusala. Seega kasutatakse ülaltoodud toodet ainult pöörlevatel mehhanismidel. Tööriistade kasutamine paljude rakenduste jaoks on praegu juurutamise staadiumis (näiteks maailma juhtiva tööstustarkvara AVEVA tooted, [43]).

Autor proovib katsena rakendada Industry 4.0 filosoofiat, kasutades sündmuste ennustamiseks masinõpet, pakkudes välja multifunktsionaalse platvormi loomise. Selliste platvormide kasutuselevõtt eeldab infrastruktuuri (personal, ettevõtte struktuur) valmisolekut ja suuri kapitaliinvesteeringuid. Samas sõltub rentaablus paljuski valmisolekust seda filosoofiat omaks võtta. Autor teab kogemusest näiteid, kui Balti elektrijaama vanadele seadmetele paigaldati vibratsioonidiagnostika süsteem, kuid selle süsteemi olemasolu ei päästnud turbiini labasid hävimisest, kuna töötajad ei suutnud vastava programmi tulemusi tõlgendada.

### **5.1.Olemasolev defektide kõrvaldamise skeem**

Joonisel 18 on diagramm defekti tuvastamiseks ja kõrvaldamiseks. Selle skeemi kohaselt tuvastab defekti reeglina ERP-süsteemis registreeritud operatiivpersonal. Defekti kõrvaldamise edasise korraldamise korraldab selle seadme eest vastutav ploki haldur.



Joonis 18. Defektide tuvastamise ja kõrvaldamise skeem.

Allikas: autori koostatud

## 5.2. Mitmeotstarbelise platvormi loomise põhjused

Käesoleva töö autor näeb probleemi ML algoritmide rakendamises olemasolevas DCS süsteemis. Selleks tehakse ettepanek kaaluda võimalust luua mitmeotstarbeline platvorm, mis võimaldab paigutada masinõppe tööriistu, ja soovitusüsteem, mille põhiülesanne on ühendada masinõppe ennustavad tulemused jooksva teabega remondivajaduse, materjalide kättesaadavuse, sarnaste seadmete remondi ajalooliste andmete ja remondijuhiste andmete kohta.

Antud juhul teeb autor ettepaneku kasutada täiesti teistsugust lähenemist defekti tuvastamisel, selle kõrvaldamisel ja äriprotsessi mõjutamisel, et tõsta elektritootmise seadmete töökindlust ja kättesaadavust. Varahaldusmeetoditena tehakse ettepanek rakendada kombineeritud meetodit, mis ühendab CBM-i ja RCM-i elemente, olenevalt



seadmete tüübist. Vibratsioonidiagnostika süsteemiga varustatud pöörlevate masinate puhul rakendada CBM ennustajaid. CBM-i ennustaja on plokile juba paigaldatud, kuid seda ei kasutata erinevatel põhjustel (vajadus süsteemi konfigureerimiseks, mis nõuab personali (pakuti välja uus analüütiku roll)). Ülejäänud seadmete puhul tehakse ettepanek rakendada RCM-meetodeid. Tuletame meelde, et CBM-lähenemine võimaldab tuvastada defekti selle arendamise varajases staadiumis, pakkudes mitte ainult rikete statistikat, vaid ka andmeid seadmete seisukorra suundumuste kohta, mis võimaldab tööks paremini valmistuda, vähendada seisakuid, vähendada rikete arvu, aga ka erakorralise hoolduse kulusid [44]. RCM on kaasaegne meetodika, mis võimaldab ettevõttel optimeerida oma varade hooldus- ja remondiprogrammi 20% või rohkem, säilitades samal ajal seadmete töökindluse [45]. Lisateavet CBM-i ja RCM-i kohta leiab jaotisest 2.1.

### **5.3.Kavandatav teenindusskeem**

Olles tutvunud kaasaegsete hooldusstrateegiatega ning analüüsinud tööde teostamist tootmises ja olemasolevaid probleeme ettevõtte varade haldamisel (tootmisprotsessi peatamine seadmete rikke korral, pikk hooldusprotsess ja seadmete rikke põhjuse väljaselgitamine, plaanivälise remondi kõrge hind jne) strateegiliste ülesannete paremaks täitmiseks, autor jõuab järeldusele RCM-i platvormi rakendamise vajadusest. Kuna aga RCM-i tööriistast üksi selle meetodika kasutamiseks ei piisa, on vaja teha muudatusi organisatsioonis ja lähenemises järgmiste ülesannete lahendamisel:

- Määratleda olemasolevas tootmises funktsioonid ja nendega seotud jõudlusstandardid.
- Teha kindlaks olukorra põhjused, kui seade lakkab täitmast oma funktsioone.
- Tõsta esile igat tüüpi funktsionaalsete rikete põhjused.
- Teha kokkuvõtte igat tüüpi seadmete rikke tagajärgedest.
- Määrata igat tüüpi rikke tähendus.
- Määrata tegurid, mis vähendavad seadmete rikke ohtu.
- Ajakohastada meetodikat perioodiliselt, et valida sobiv ennetav hooldusprotseduur.

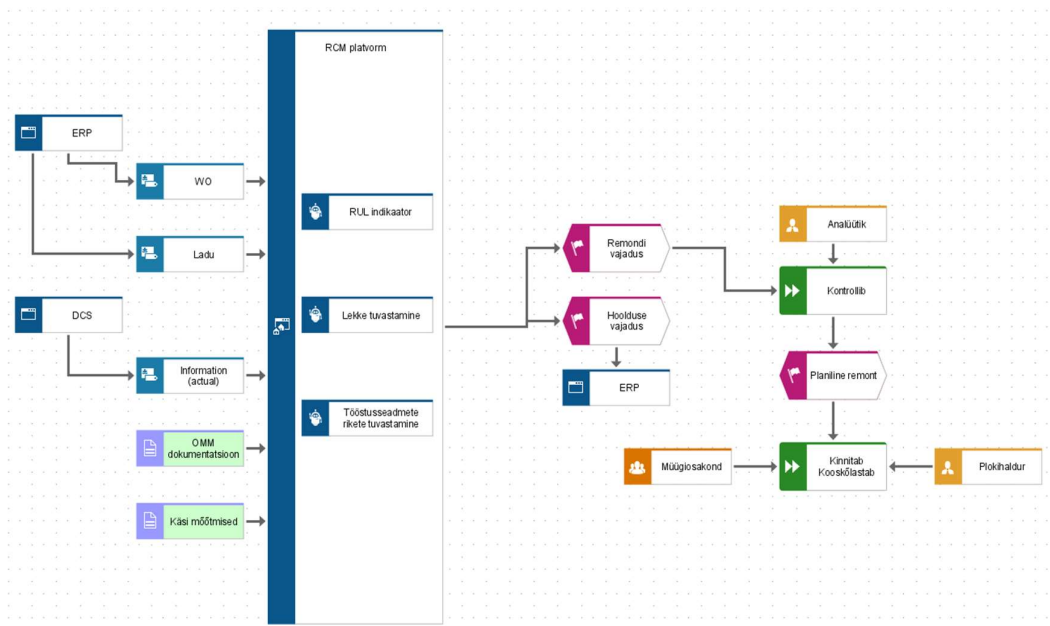
Uue remondikorraldusskeemi põhielemendiks saab platvorm (Joonis 19), mille ülesandeks on koondada erinevatest allikatest pärit teave:

- ajalooline teave objektiga seotud defektide kohta (kulud, remondiaeg);

- teave viimase hoolduse, nõutava hooldusgraafiku ning vajalike osade ja materjalide kohta;
- materjalide ja varuosade olemasolu objektiga seotud ladudes (laagrid, määrded, remondikomplektid jne);
- teave käsitsi tehtud mõõtmistest (vibratsioon, õlianalüüs ja muud testid).

Platvormi väljund on:

- ennustused remondivajaduse kohta;
- objekti elutsükli etapi kuvamine;
- kokkuvõtlik teave tööde teostamise võimalikkuse kohta (ressursside olemasolu või puudumise maatriks);
- soovitused töörežiimide reguleerimise vajaduse kohta (turbiini stress jne).



Joonis 19. Remondi korraldamise kavandatav skeem.

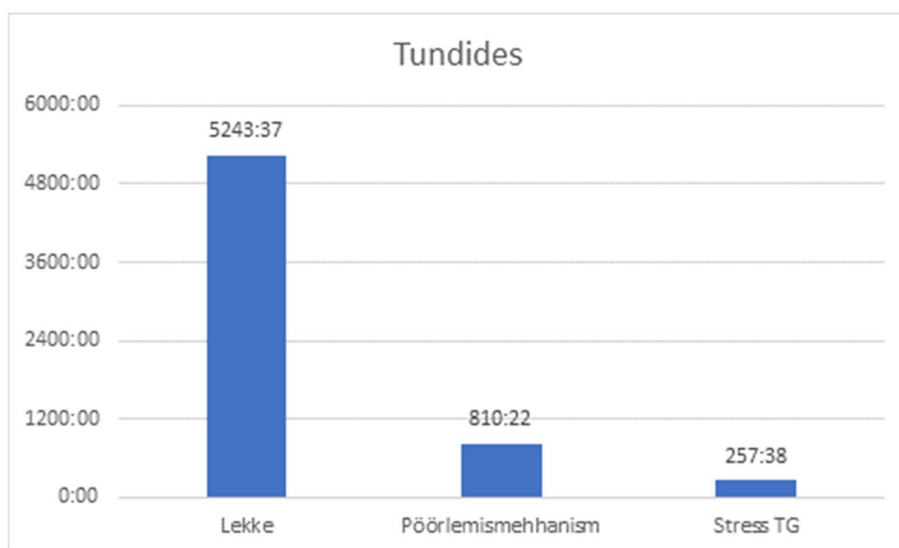
Allikas: autori koostatud

Seega on erinevalt praegusest süsteemist remonditööde fookus nihkumas reaktiivselt ennustavale, keskendudes tootmiseseadmete töökindlusele ja kättesaadavusele. Kavandatava meetodi eripäraks on vajadus tuua personalitabelisse analüütiku roll, kes kontrollib pidevalt süsteemiandmeid, et vähendada hädapäraste remonditööde esinemist, ja edastab valmis teabe ploki haldurile.

## 5.4. Uue platvormi kasutamise ja selle rakendamise eelised

Kavandatava mitmeotstarbelise platvormi eeliseks on seadmete seisakuaja vähendamine võimalike rikete ja probleemide varajase hoiatamise kaudu. Võimalus kaugjälgida ja tõrkeotsingu protsessi kiirendada peaks parandama töötajate tõhusust varahalduses. Remondi teostamine vastavalt tegelikule seisukorrale optimeerib planeeritud tööde graafikuid ja võimaldab suurendada kasumit.

Joonisel 20 on kujutatud Auvere ploki seisakuid tundides alates 2015. aastast kolme põhilise defektitüübi puhul: lekked, pöörlemismehhanismide talitlushäired ja turbiini stress. Kulude maksumuse määravad remondikulud ja kaotatud kasum üksuse seadmete mittekättesaadavuse hetkedel.



Joonis 20. Auvere üksuse seisak alates 2015. aastast.

Allikas: autori koostatud

Seega on remondile (uuendustele) kuluv aeg kokku 260 päeva 7 aasta jooksul, mis on tööaja suhtes märkimisväärne. Eeldatakse, et multifunktsionaalse platvormi juurutamine vähendab planeerimata seisakuid. Tegevuskulude kokkuhoid sõltub elektri hinnast Nord Pooli turul.

Tabelis 8 on toodud ligikaudne arvutus kaotatud kasumi kohta, mis on tingitud termilise stressi tõttu turbiinide seiskamisest aastatel 2016–2021.

Registreeritud juhtumite keskmine seisakuaeg on 2 tundi. Mitu juhtumit võeti valimist välja, kuna need on väga ekstreemsed: peale seiskamist tehti muid remonditöid, mis suurendasid seisakuid. Elektrienergia maksumus põhineb Eleringi infol, netovõimsus on keskmiselt 275 MW.

Tabel 8. Kaotatud kasumi maksumuse arvestus 2016–2021 stressi TG tõttu.

Kuupäev	Seisak	Elektrihind, eur/MW*h	Energia, MW*h	kaotatud kasum, eur
02.08.2021 16:26	0:49	29	224	6 496
14.04.2021 12:56	105:24	48	28985	
14.04.2021 09:39	2:48	125	770	96 250
14.04.2021 07:29	1:44	76	476	36 176
14.04.2021 05:30	1:24	44	385	16 940
14.04.2021 00:45	2:46	30	760	22 800
13.04.2021 22:31	1:46	47	485	22 795
10.01.2020 21:19	1:16	27	348	9 396
10.01.2020 20:25	0:45	30	206	6 180
13.07.2018 18:18	4:19	54	1187	64 098
22.02.2018 16:43	125:07	45	34407	
07.02.2018 17:30	0:13	57	59	3 363
03.11.2017 03:55	1:11	27	325	8 775
03.10.2017 21:21	4:21	28	1196	33 488
03.10.2017 20:17	0:38	43	174	7 482
22.02.2016 12:54	3:07	32	857	27 424
<b>Kokku:</b>				<b>361 663</b>

Allikas: autori koostatud

2021. aastal, millal toimus 7 turbiini hädaseiskamist turbiini stressi tõttu, kaotatud kasum (andmed mudeli treenimiseks on võetud nendest juhtumitest, vt peatükki 4) üle 90% ennustamise tõenäosust arvestades on umbes 190 000 eurot.

Mitmeotstarbelise platvormi loomiseks on plaanis kasutada kontserni sisemisi ressursse BIT osakonna arendusüksuse näol, mille ülesandeks saab valmistehnilisel ülesandel põhineva toote loomine, mille aluseks on saab olema see magistritöö.

Otsus toote kasutuselevõtuks sõltub varahalduse valdkonna juhust. Pärast platvormi edukat testimist saab ettevõtte kaaluda lahenduse skaleerimist teistele kontserni kriitilistele seadmetele.

## 6. Kokkuvõte

Seoses sagedaste hädaolukordadega Auvere elektrijaama suhteliselt uutel seadmetel tekkis vajadus leida hooldusviis, mis parandab nende töökindlust, vähendab seeläbi hoolduskulusid ning suurendab elektritootmise kättesaadavust, kasutades kaasaegseid ML meetodeid. Töö tulemusena pakkus autor Auvere elektrijaama energiabloki seadmete hooldusprotsessi optimeerimiseks välja järgmised lahendused.

Seadmete töötamise käigus tekkivate probleemide lahendamiseks ning avariisageduse vähendamiseks luuakse ML vahendite abil mudel, mis suudab määrata atribuute ja nende mõju tugevust konkreetsele sündmusele – turbiini termilisele stressile. Selle uurimise tulemuste põhjal tehakse järgmised järeldused. Random Forest mudelit kasutades saab sündmust ennustada täpsusega 0,985. On määratud ka 26 temperatuuritegurit, mis mõjutavad turbiini stressi. Neid andmeid saab kasutada ML-mudeli rakendamiseks tulevikus, kasutades Pdm-i.

Samuti on pakutud mitmeotstarbeline platvorm, mis võimaldab paigutada masinõppe tööriistu, ja soovitusüsteem, mille põhiülesanne on ühendada masinõppe ennustavad tulemused jooksva teabega remondivajaduse, materjalide kättesaadavuse, sarnaste seadmete remondi ajalooliste andmete ja remondijuhiste andmete kohta.

Autoril on tehtud ettepanek kasutada täiesti teistsugust lähenemist defekti tuvastamisel, selle kõrvaldamisel ja äriprotsessi mõjutamisel, et tõsta elektritootmise seadmete töökindlust ja kättesaadavust. Varahaldusmeetoditena tehakse ettepanek rakendada kombineeritud meetodit, mis ühendab CBM-i ja RCM-i elemente, olenevalt seadmete tüübist. Vibratsioonidiagnostika süsteemiga varustatud pöörlevate masinate puhul rakendage CBM ennustajaid. Ülejäänud seadmete puhul tehakse ettepanek rakendada RCM-meetodeid.

Seega väldib protsessiseadmete hooldusprotsesside optimeerimine põhiliste defektide klasside õigeaegsel prognoosimisel täiendavat rahalist kahju ja suurendab seadmete kättesaadavust. Näiteks 2021. aastal, millal toimus 7 turbiini hädaseiskamist turbiini stressi tõttu, jäi turbiini stressi hädaseiskamise tõttu kaotatud kasumit ligikaudu 190 000 €.

## Kirjanduse loetelu

[1] Д. Ю. Денисов (2021). Развитие систем поддержки принятия решений на основе искусственного интеллекта в менеджменте российских компаний // Экономические системы. Том 14. № 4 (55). С. 32. DOI 10.29030/2309-2076-2021-14-4-29-36.

[2] Клаус Шваб (2016). Четвертая промышленная революция. [Online]. Available at: <https://www.litres.ru/klaus-shvab/chetvertaya-promyshlennaya-revoluciya-21240265/chitat-onlayn/> [Vaadatud: 30-aprill-2022].

[3] В. Е. Южно, В. С. Панько (2017). Разработка методики и программного обеспечения для ежедневного автоматизированного планирования ремонта оборудования. [Online]. Available at: <http://ieeetpu.ru/proceedings/papers/rcp165.pdf> [Vaadatud: 30-aprill-2022].

[4] What's Your Maintenance Strategy? (2018). [Online]. Available at: <https://www.danielpenn.com/maintenance-strategy-five-methods/> [Vaadatud: 30-aprill-2022].

[5] WHAT IS PREVENTIVE MAINTENANCE? (2022). [Online]. Available at: [https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-preventive-maintenance#:~:text=Preventive%20maintenance%20\(PM\)%20is%20the,equipment%20before%20a%20problem%20occurs.](https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-preventive-maintenance#:~:text=Preventive%20maintenance%20(PM)%20is%20the,equipment%20before%20a%20problem%20occurs.) [Vaadatud: 30-aprill-2022].

[6] В. Казарин (2022). 5 стратегий обслуживания оборудования. [Online]. Available at: <https://wkazarin.ru/2016/09/13/5-strategies-for-equipment-maintenance/> [Vaadatud: 30-aprill-2022].

[7] Preventive Maintenance vs. Reactive Maintenance: Do You Have to Choose? (2022). [Online]. Available at: [https://www.getmaintainx.com/blog/preventive-maintenance-vs-reactive-maintenance#:~:text=Reactive%20Maintenance%20\(RM\)%20is%20a,equipment%20malfunctions%20and%20equipment%20failures.](https://www.getmaintainx.com/blog/preventive-maintenance-vs-reactive-maintenance#:~:text=Reactive%20Maintenance%20(RM)%20is%20a,equipment%20malfunctions%20and%20equipment%20failures.) [Vaadatud: 29-aprill-2022].

[8] What is Predictive Maintenance? (2022). [Online]. Available at: <https://www.heavy.ai/technical-glossary/predictive-maintenance#:~:text=Predictive%20maintenance%20refers%20to%20the,when%20maintenance%20should%20be%20performed.> [Vaadatud: 29-aprill-2022].

[9] Overview of Reliability Centered Maintenance (RCM) (2022). [Online]. Available at: [https://inspectioneering.com/tag/reliability+centered+maintenance#:~:text=Reliability%20Centered%20Maintenance%20\(RCM\)%20is,to%20identify%20or%20monitor%20flaws.](https://inspectioneering.com/tag/reliability+centered+maintenance#:~:text=Reliability%20Centered%20Maintenance%20(RCM)%20is,to%20identify%20or%20monitor%20flaws.) [Vaadatud: 29-aprill-2022].

- [10] L.O.A. Affonso, *Machinery Failure Analysis Handbook: sustain your operations and maximize uptime*, Elsevier 2013.
- [11] Van Horenbeek, L. Pintelon, A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 120 (2013) 39-50.
- [12] Z. Li, K. Wang, Y. He, Industry 4.0–Potentials for Predictive Maintenance, *International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*, (2016).
- [13] K. Wang, Intelligent Predictive Maintenance (IPdM) System– Industry 4.0 Scenario, *WIT Transactions on Engineering Sciences*
- [14] Andreja Rojko, Industry 4.0 Concept: Background and Overview, ECPE European Center for Power Electronics e.V., Nuremberg, Germany.
- [15] Thomas Bauernhansl, Jörg Krüger, Gunther Reinhart, Günther Schuh: Wgp-Standpunkt Industrie 4.0, *Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik Wgp e. v.*, 2016.
- [16] B. C. Morello, B. Ghaouar, C. Varnier and N. Zerhouni, “Memory tracking of the health state of smart products in their lifecycle,” *Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Proceedings of 2013 International Conference on, Rabat, 2013
- [17] HANNOVER MESSE (2016). [Online]. Available at: <https://www.hannovermesse.de/> [Vaadatud: 17-detsember-2021].
- [18] Fulton, S., M. Kim (2007). ISMI Consensus Preventive and Predictive Maintenance Vision Guideline: Version 1.1. International SEMATECH, Report Technology Transfer 06114819C-ENG. New York: ISMI.
- [19] Hsieh, Y.-S., F.-T. Cheng, H.-C. Huang, C.-R. Wang, S.-C. Wang, and H.-C. Yang. 2013 “VM-Based Baseline Predictive Maintenance Scheme.” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 26 (1): 132–144.
- [20] Specification for Data Collection Management (DCM). SEMI E134-0305. Milpitas: SEMI.
- [21] Yu-Chen Chiu, Fan-Tien Cheng and Hsien-Cheng Huang (2017). Developing a factory-wide intelligent predictive maintenance system based on Industry 4.0. [Online]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/319232769\\_Developing\\_a\\_factory-wide\\_intelligent\\_predictive\\_maintenance\\_system\\_based\\_on\\_Industry\\_40](https://www.researchgate.net/publication/319232769_Developing_a_factory-wide_intelligent_predictive_maintenance_system_based_on_Industry_40) [Vaadatud: 18-detsember-2021].

- [22] Enefit Power AS-i integreeritud juhtimissüsteemi käsiraamat (energia muundamise valdkond ja muundamise varahaldus) (2021). Sisedokument. Kood: K.KVJ.03.
- [23] ISO 55000:2014 [Online]. Available at: <https://www.iso.org/standard/55088.html> [Vaadatud: 28-aprill-2022].
- [24] Norbert Kuschnerus, Christine Maul, Hasso Drathen. Asset management in the process industry. [Online]. Available at: [https://gvt.org/dechema\\_media/Downloads/Presse/achemasia/AA+worldwide+1+2007/S026\\_027\\_M5\\_851-p-870.pdf](https://gvt.org/dechema_media/Downloads/Presse/achemasia/AA+worldwide+1+2007/S026_027_M5_851-p-870.pdf) [Vaadatud: 28-aprill-2022].
- [25] Narva\_Plant101\_RU (2014). Sisedokument.
- [26] Nakai, A., Nakamoto, M., Kakehi, A., Hayashi, S. (2002). Turbine start-up algorithm based on prediction of rotor thermal stress. [Online]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/526968> [Vaadatud: 14-detsember-2021].
- [27] Głuch J., Krzyżanowski J. New attempt for diagnostics of the geometry deterioration of the power system based on thermal measurement, Proc. of ASME Turbo Expo 2006, Paper No GT2006-90263, Barcelona, Spain, 2006.
- [28] Rusin, A., Nowak, G., Lipka, M. (2014). Practical Algorithms for Online Thermal Stress Calculations and Heating Process Control. [Online]. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01495739.2014.937219?scroll=top&needAccess=true> [Vaadatud: 14-detsember-2021].
- [29] Lausterer G. K., On-line thermal stress monitoring using mathematical models, Control engineering practice, vol. 5, no. 1, pp.85-90, 1997.
- [30] Dominiczak, K., Rządkowski, R., Radulski, W., Szczepanik, R. (2015). On-Line Prediction of Temperature and Stress in Steam Turbine Components Using Neural Networks. [Online]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/283867189\\_On-Line\\_Prediction\\_of\\_Temperature\\_and\\_Stress\\_in\\_Steam\\_Turbine\\_Components\\_Using\\_Neural\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/283867189_On-Line_Prediction_of_Temperature_and_Stress_in_Steam_Turbine_Components_Using_Neural_Networks) [Vaadatud: 11-detsember-2021].
- [31] 10+ Most Popular Machine Learning Software Tools (2022). [Online]. Available at: [https://www.softwaretestinghelp.com/machine-learning-tools/#Comparison\\_Chart](https://www.softwaretestinghelp.com/machine-learning-tools/#Comparison_Chart) [Vaadatud: 10-mai-2022].
- [32] Weka (2022). [Online]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Weka> [Vaadatud: 10-mai-2022].



- [33] Weka (машинное обучение) – Weka (machine learning) (2021). [Online]. Available at: [https://ru.wikibrief.org/wiki/Weka\\_\(machine\\_learning\)](https://ru.wikibrief.org/wiki/Weka_(machine_learning)) [Vaadatud: 10-mai-2022].
- [34] Kaart, T. (2012). Binaarsete tunnuste analüüsimetodid. [Online]. Available at: [http://ph.emu.ee/~ktanel/bin\\_tunnuste\\_analyys/index.php](http://ph.emu.ee/~ktanel/bin_tunnuste_analyys/index.php) [Vaadatud: 4-detsember-2021].
- [35] <https://machinelearningmastery.com/use-regression-machine-learning-algorithms-weka/> [Vaadatud: 14-detsember-2021].
- [36] R. Gandhi (2018). Naive Bayes Classifier. [Online]. Available at: <https://towardsdatascience.com/naive-bayes-classifier-81d512f50a7c> [Vaadatud: 4-detsember-2021].
- [37] N. Khanna, J48 Classification (C4.5 Algorithm) in a Nutshell (2021). [Online]. Available at: <https://medium.com/@nilimakhanna1/j48-classification-c4-5-algorithm-in-a-nutshell-24c50d20658e> [Vaadatud: 11-mai-2022].
- [38] ClassBalancer (sourceforge.io). [Online]. Available at: <https://weka.sourceforge.io/doc.dev/weka/filters/supervised/instance/ClassBalancer.html> [Vaadatud: 10-mai-2022]
- [39] V. Zaitsev (2021). CFB katla õigeaegne lekke tuvastamine masinaõpe abil. [Online]. Available at: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/73976014-ef25-4a29-b9cb-0e81d3912e26> [Vaadatud: 07-mai-2022].
- [40] D. Poljakov (2021). Application of Machine Learning Methods to Industrial Equipment Fault Detection. [Online]. Available at: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/1006747c-c75b-4b54-84b9-78ce49d83dcb> [Vaadatud: 07-mai-2022].
- [41] System 1 Condition Monitoring Software (2022). [Online]. Available at: <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada/system-1-condition-monitoring-software> [Vaadatud: 07-mai-2022].
- [42] Bently Nevada (2022). [Online]. Available at: <https://www.skb-4.com/bently-nevada> [Vaadatud: 07-mai-2022].
- [43] AVEVA™ Predictive Analytics (2022). [Online]. Available at: <https://www.aveva.com/en/products/predictive-analytics/#overview> [Vaadatud: 10-mai-2022].
- [44] CONDITION BASED MAINTENANCE (2022). [Online]. Available at: <https://www.maintex.ru/method/CBM> [Vaadatud: 10-mai-2022].

[45] RCM. Обслуживание, ориентированное на надежность (2022). [Online]. Available at: <https://topsoft.by/products/upravlenie-aktivami/strategii-ekspluataczii/rcm-obsluzhivanie-orientirovannoe-na-nadezhnost/> [Vaadatud: 10-mai-2022].

## **Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Anton Laukonen

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "[Lõputöö pealkiri]" , mille juhendaja on [Juhendaja nimi]
  - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

11.05.2022

## Lisa 2 – Algtunnuste nimekiri

HierarchicalName	Description	MinRaw	MaxRaw	Unit
10MAA10CT031 YQ60	Turbine;T HP TURBINE EXHAUST;	0	1000	°C
10MAA10CT032 YQ60	Turbine;T HP TURBINE EXHAUST;	0	1000	°C
10MAA10CT033 YQ60	Turbine;T HP TURBINE EXHAUST;	0	1000	°C
10MAA10CT905 XJ60	;T HPT STRESS CALC 2/3;	0	1000	°C
10MAA10CT931 XJ60	Boiler;T HP EXHAUST ST 2/3;	0	1000	°C
10MAB10CT005A YQ60	;T IPT STRESS CALC;	0	1000	°C
10MAB10CT005B YQ60	;T IPT STRESS CALC;	0	1000	°C
10MAB10CT005C YQ60	;T IPT STRESS CALC;	0	1000	°C
10MAB10CT031 YQ60	Turbine;T IPT EXHAUST;	0	400	°C
10MAB10CT905 XJ60	;T SURFACE IPT 2o3 2/3;	0	1000	°C
10MAC10CT010A XJ60	;T VENT PROT LP TURB ACT VAL;	0	300	°C
10MAC10CT010B XJ60	;T VENT PROT LP TURB ACT VAL;	0	300	°C
10MAC10CT010C XJ60	;T VENT PROT LP TURB ACT VAL;	0	300	°C
10MAC10CT031 YQ60	;T LPT EXHAUST;	0	200	°C
10MAC10CT910 XJ60	;T VENT PROT LP TURB 2/3;	0	300	°C
10MAC20CT010A XJ60	;T VENT PROT LPT2 ACT VAL;	0	300	°C
10MAC20CT010B XJ60	;T VENT PROT LPT2 ACT VAL;	0	300	°C
10MAC20CT010C XJ60	;T VENT PROT LPT2 ACT VAL;	0	300	°C
10MAC20CT910 XJ60	;T VENT PROT LPT2 TURB 2/3;	0	300	°C
10MAG10CT001 XQ50	;LP BYP1 TEMP1 IN CONDR;	0	200	°C
10MAG10CT002 XQ50	;LP BYP1 TEMP2 IN CONDR;	0	200	°C
10MAG10CT003 XQ50	Condenser;CONDENSER TEMPERATURE1;	0	200	°C
10MAG10CT004 XQ50	Condenser;CONDENSER HOTWELL TEMP;	0	100	°C
10MAG10CT010 XQ50	;ST INTL DRN FLASH BOX TEMP;	0	200	°C
10MAG10CT901 XJ60	;LP BYP1 TEMP IN CONDR 1/2;	0	200	°C
10MAG20CT001 XQ50	;LP BYP2 TEMP1 IN CONDR;	0	200	°C
10MAG20CT002 XQ50	;LP BYP2 TEMP2 IN CONDR;	0	200	°C
10MAG20CT003 XQ50	Condenser;CONDENSER TEMPERATURE 2;	0	200	°C
10MAG20CT901 XJ60	;LP BYP2 TEMP IN CONDR 1/2;	0	200	°C
10MAG30CT001 YQ60	Condenser;T1 TAL CONDENSER INLET;	0	200	°C
10MAG30CT002 YQ60	Condenser;T2 TAL CONDENSER INLET;	0	200	°C
10MAG30CT003 XQ50	Condenser;CONDENSER TEMPERATURE 3;	0	200	°C
10MAG30CT901 XJ60	Condenser;T TAL CONDENSER INLET 1/ 2;	0	200	°C
10MAL10CT021 XQ50	;T DRAIN PIPE;	0	600	°C
10MAL20CT011 XQ50	;T DRAIN PIPE;	0	600	°C
10MAL40CT011 XQ50	;T DRAIN PIPE;	0	600	°C
10MAL40CT021 XQ50	;T DRAIN PIPE;	0	600	°C
10MAL40CT031 XQ50	;T DRAIN PIPE;	0	600	°C
10MAL50CT011 XQ50	;T DRAIN PIPE;	0	600	°C
10MAN10CT001 XQ50	;LP BYP1 DUMP TUBE TEMP;	0	300	°C
10MAN20CT001 XQ50	;LP BYP2 DUMP TUBE TEMP;	0	300	°C
10MAV02CT002 XQ50	;T LOIL TANK;	0	100	°C
10MAW15CT001 YQ60	SEAL;T GLS SEALING SYS;	0	300	°C
10MAW15CT002 YQ60	SEAL;T GLS SEALING SYS;	0	300	°C
10MAW15CT901 XJ60	SEAL;T GLS SEALING SYS LPT 1/ 2;	0	300	°C
10MAV40CT002 XQ50	;T LOIL HEADER;	0	100	°C