EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Aksel Bulavs

MOOTORITE KATSESTENDI ANDMEHÕIVE- JA ANALÜÜSISÜSTEEM

ENGINE TEST BENCH DATA ACQUISITION AND PROCESSING SYSTEM

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: vanemlektor Janar Kalder, PhD
kaasprofessor Risto Ilves, PhD
nooremteadur Roland Allmägi, MSc

Tartu 2025

Eesti Maaülikool
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006

Bakalaureusetöö lühikokkuvõte

Autor: Aksel Bulavs

Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia

Pealkiri: Mootorite katsestendi andmehõive- ja analüüsisüsteem

Lehekülgi: 40	Jooniseid: 25	Tabeleid: 3	Lisasid: 3

ETIS-e valdkond ja CERCS-i kood: Loodusteadused ja tehnika T120, T170.
Juhendaja(d): Janar Kalder, Risto Ilves, Roland Allmägi.
Osakond või õppetool: Metsanduse ja inseneeria instituut.
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2025.

Eesti Maaülikooli tehnikamaja mootorite katselaboris puudub sisepõlemismootorite katsestendi andmehõive- ja analüüsisüsteem. Vajalikud mõõtetulemused hõivatakse erinevates seadmetes ning kohati tuleb need manuaalselt fikseerida, mis raskendab katsete sooritamist, muudab andmete analüüsimise keeruliseks ning aeganõudvaks ja vähendab mõõtetulemuste täpsust. Bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua kõnealune andmehõive- ja analüüsisüsteem selleks vajaliku riist- ja tarkvaralahendusega. Töö autor ühendas laboris kasutatavad mõõteseadmed – x-act kontrolleri, kütusekulu- ja õhukulu mõõturid ning heitgaasianalüsaatori katselabori juhtruumis paikneva lauaarvutiga ning kirjutas programmeerimiskeelt Python kasutades programmi, mis väljastab CSV-failina mootorite katsestendi mõõtetulemused. Andmehõiveprogramm sisaldab ka funktsionaalsust mõõtetulemuste väljastamiseks xlsx-formaadis. Andmete analüüsimisel saab programmi abil lisaks otsestele mõõtmistele leida mõningaid sisepõlemismootori tööparameetreid arvustuslikult ning genereerida mõõtetulemustele tuginevaid karakteristikuid visualiseerivaid graafikuid.
Bakalaureusetööl on praktiline väärtus – valminud mootorite katsestendi andmehõive- ja analüüsisüsteem on kavas Eesti Maaülikooli tehnikamaja mootorite katselaboris kasutusse võtta. Töö autori loodud süsteemile on võimalik lisada veel mitmeid tarkvaralisi funktsionaalsusi ning sellega saab ühendada täiendavaid sisepõlemismootorite katsetamisega seotud mõõte- ja juhtseadmeid.

Võtmesõnad: sisepõlemismootor, katsestendi automatsioon, mootorite katselabor.

Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Aksel Bulavs		Curriculum: Engineering	
Title: Engine test bench data acquisition and processing system			
Pages: 40	Figures: 25	Tables: 3	Appendices: 3
ETIS research field and (CERCS) code: Natural Sciences and Engineering, T120, T170. Supervisor(s): Janar Kalder, Risto Ilves, Roland Allmägi. Department / Chair: Institute of forestry and engineering. Place and year of defence: Tartu 2025.			
The engine test facility at the Estonian University of Life Sciences lacks an engine test bench data acquisition and processing system. The necessary measurements are acquired by multiple different devices and some of the results have to be logged manually, which complicates testing, makes analysing data difficult, and reduces the accuracy of measurement results. The aim of this bachelor´s thesis was to create the data acquisition and processing system in question with the necessary hard- and software solution. The author of this thesis connected the measurement devices used in the laboratory – an x-act controller, fuel consumption and air flow meters, and an exhaust gas analyser to a desktop computer located in the control room of the facility and wrote a program using the Python programming language, that outputs the measurement results of the engine test bench as a CSV-file. The data acquisition software also includes the functionality necessary to export the measurement results as an xlsx-file. In addition to measuring the operating parameters of an internal combustion engine directly, the software can also be used to calculate some indirect results when analysing data and graphs visualising engine characteristics based on test data can be generated. This bachelor´s thesis also serves a practical purpose – the created engine test bench data acquisition and processing system is planned to be used in the engine testing facility located in the engineering building of the Estonian University of Life Sciences. The system created by the author of this thesis can be improved by increasing the functionality of its software and integrating additional measurement and control equipment used to test internal combustion engines.			
Keywords: Internal combustion engine, test bench automation, engine test facility			

SISUKORD

SISSEJUHATUS 5
1. SISEPÕLEMISMOOTORITE KATSESTEND 7
1.1. Sisepõlemismootorite katsetamine 7
1.2. Dynas3 dünamomeetriline koormusstend 8
1.3. AVL *Fuel Mass Flow Meter* kütusekulumõõtja 12
1.4. AVL *Flowsonic Air* õhukulumõõtja 13
1.5. Bosch BEA050 heitgaasianalüsaator 14
1.6. Mootoritestimise abisüsteemid 15
2. ANDMEHÕIVESÜSTEEM LOOMINE 18
2.1. Andmehõivesüsteemi üldine kirjeldus 18
2.2. RS-232 ühendusliides 19
2.3. X-act kontrolleri andmehõive 20
2.4. AVL *Fuel Mass Flow Meter* kütusekulumõõtja andmehõive 22
2.5. AVL *Flowsonix Air* õhukulumõõtja andmehõive 25
2.6. Bosch BEA050 heitgaasianalüsaatori andmehõive 26
2.7. Andmehaldus 27
3. ANDMEANALÜÜS 28
3.1. Kaudsete mõõtetulemuste arvutamine 28
3.2. Mõõtetulemuste visualiseerimine 32
3.3. Mõõtetulemuste analüüsimine 33
KOKKUVÕTE 34
ALLIKALOEND 36
LISAD 37
Lisa 1. Andmehõiveloogika funktsionaalne diagramm 38
Lisa 2. Andmeanalüüsiloogika funktsionaalne diagramm 39
Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta 40

SISSEJUHATUS

Eesti Maaülikooli tehnikamaja mootorite katselaboris puudub sisepõlemismootorite katsestendi andmehõive- ja analüüsisüsteem. Vajalikud mõõtetulemused hõivatakse erinevates seadmetes ning kohati tuleb need manuaalselt fikseerida, mis raskendab katsete sooritamist, muudab andmete analüüsimise keeruliseks ning aeganõudvaks ja vähendab mõõtetulemuste täpsust. Andmehõivesüsteemi loomist raskendab erinevate tootjate katseseadmete kasutamine, millel puuduvad ühised kommunikatsiooniprotokollid ning mille komplektseks ühiseks haldamiseks puudub olemasolev tarkvara.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on luua andmehõive- ja analüüsisüsteem Eesti Maaülikooli mootorite katsestendile. Hetkel puudub mootorite katselaboris nimetatud automaatika, mõõtetulemused hõivatakse erinevates seadmetes ning kohati tuleb need manuaalselt fikseerida, mis raskendab katsete sooritamist, muudab andmete analüüsimise keeruliseks ning aeganõudvaks ja vähendab mõõtetulemuste täpsust.

Projekteeritava süsteemi keskmeks on arvuti, mis hõivab andmed ühendatud katseseadmetest, juhib katseprotsessi ning katse lõppedes väljastab katsetulemused ning nende analüüsid. Sellise süsteemi ehitamiseks uuris töö autor sisepõlemismootorite katsetamise põhimõtteid, töötas läbi katseseadmete dokumentatsiooni, et tutvuda nende võimekuse ning andmevahetusviisidega, ja lõi vajaliku tark- ning riistvara. Kuigi lõputöö kujutab endast peamiselt tarkvaraprojekti, on oluline mõista kasutatavate katseseadmete tööpõhimõtet ning nende mõõdetavaid parameetreid, et mõõtetulemused korrektselt fikseerida ning kaudseid mõõteparameetreid leida.

Töö eesmärgi täitmiseks püstitati järgmised ülesanded:

1. Anda ülevaade sisepõlemismootorite katsetamisest;
2. Kaardistada olemasolev olukord laboris;
3. Selgitada andmehõivesüsteemi aluseid ja tööpõhimõtteid;
4. Luua võimalused olemasolevate mõõteseadmete ühendamiseks andmehõivetarkvaraga;
5. Luua andmehõive- ja analüüsi tarkvara;
6. Katsetada loodud tarkvara sobivust andmete haldamiseks ja töötlemiseks.

Töö esimene peatükk käsitleb sisepõlemismootorite katsetamise metoodikat ning selleks vajalikke katseseadmeid. Töö teine peatükk kirjeldab autori tehtud tööd katseseadmetega andmehõive loomiseks ning kolmas peatükk autori loodud andmeanalüüsisüsteemi tööpõhimõtet.

Lõputöö raames loodud süsteem läheb reaalsesse kasutusse Eesti Maaülikooli tehnikamaja mootorite katselaboris, seetõttu on nii selle töö teoreetilised kui ka praktilised osad oluliseks dokumentatsiooniks kõnealuses laboris töötavatele tudengitele ja ülikooli personalile, võimaldamaks neil autori ehitatud süsteemi kasutada, hooldada ja täiendada, ka siis, kui autor Eesti Maaülikooliga enam seotud ei ole.

1. SISEPÕLEMISMOOTORITE KATSESTEND

1.1. Sisepõlemismootorite katsetamine

Sisepõlemismootor on soojusmootor, mis muundab kütusest tuleneva keemilise energia mehhaaniliseks energiaks. Kütuse keemiline energia muundatakse soojuslikuks energiaks kütuse põlemisel või oksüdeerimisel mootorisse suunatud õhuga. See soojuslik energia tõstab mootoris olevate gaaside rõhku ja temperatuuri, mille tagajärjel gaas paisub vastu mootori mehhanisme, mis mehhaaniliste lülide kaudu muundavad liikumise väntvõlli pöörlemiseks [1: 1].

Sisepõlemismootoreid on vaja katsetada, et määrata nende jõudlus ning vastavus sätestatud normidele ning nõuetele. Sisepõlemismootorite testimiseks peab olema võimalik võrrelda ajami jõudlust mootori erinevates konfiguratsioonides või erinevate mootorite vahel. Selleks on vaja komplektset juhtimis- ning andmehõive süsteemi [2: 1].

Sisepõlemismootorite dünaamiliste ja ökonoomiliste näitajate määramiseks erinevatel režiimidel kasutatakse eksperimentaalsete andmete alusel koostatud graafikuid, mida nimetatakse karakteristikuteks. Üheks oluliseks karakteristikuks on sisepõlemismootori kiiruskarakteristik. Kiiruskarakteristik kirjeldab mootori võimsuslike ja ökonoomsuslike parameetrite sõltuvust mootori pöörlemissagedusest, mis saadakse sisepõlemismootori pidurdamisel katsestendil, mootori maksimaalse toodetava võimsuse juures [3: 28]. Kasutades nimetatud katsemeetodit ning muid vajalikke katseseadmeid, saab mõõta mitmeid katsetatava mootori tööparameetreid, mida läheb vaja ka kaudsete mõõtetulemuste leidmiseks.

Sisepõlemismootori arendatud pöördemoment kirjeldab mootori võimekust teha tööd. Koos mootori pöörlemissagedusega on tema abil võimalik leida mootori võimsus. Nimetatud parameetrid leitakse kasutades koormusstendi [1: 50-53].

Kuna sisepõlemismootor muundab keemilist energiat mehhaaniliseks energiaks, kasutades kütust ja oksüdeerijat, milleks on tavaliselt hapnik, on mootori töö tagamiseks vaja kindlustada kütuse ja oksüdeerija sobiv vahekord. Selleks on tarvis mõõta mootori kasutatavat kütuse ja oksüdeerija massi, mida tehakse vastavalt õhu- ja kütusekulu mõõturitega [1: 55-56].

Sisepõlemismootori põlemiskambris toimuvate keemiliste protsesside tagajärjel toodetakse nelja peamist heidet, milleks on erinevad lämmastikuühendid NO_x, vingugaas CO, süsihappegaas CO_2 ja põlemata kütuseosakesed HC, mille kontsentratsioonid heitgaasis leitakse heitgaasianalüsaatoritega. Nimetatud näitajad on olulised, kuna lisaks heitgaaside nõuetele vastavuse kontrollimiseks saab kõnealuste esinevate kontsentratsioonide põhjal hinnata mootori tööd [1: 62].

Mootori katsetamise käigus soojendatakse see töötemperatuurile, üldiselt jahutusvedelik ja õli temperatuurile 80–85°C, samuti veendutakse mootori ja katsestendi korrasolekus. Seejärel viiakse mootor soovitud töörežiimile ning lastakse mootori tööparameetritel stabiliseeruda [3: 17].

1.2. Schenck Dynas$_3$ koormusstend

Dünamomeeter on seade, mis andes välise koormuse katsetatavale mootorile, absorbeerib mootori toodetava võimsuse. Esimesed dünamomeetrid pidurdasid mootorit, kasutades mehhaanilist hõõrdumist. Tänapäeval on kasutuses peamiselt hüdraulilised ja elektroonilised dünamomeetrid. Hüdrauliline dünamomeeter või „vesipidur“ koosneb kesta sees olevast rootorist, mis on ühendatud katsetatava mootoriga. Läbi dünamomeetri jookseb konstantne vedelikukogus. Mootori arendatav võimsus kantakse vedelikule üle vedeliku takistuse tõttu, rootori pööreldes vedelikus. Vedelikutaseme muutumisel dünamomeetris määratakse mootorile antav koormus. Elektroonilistes dünamomeetrites muundatakse mootori arendatud mehhaaniline energia elektrienergiaks. Elektrienergiat saab muundada soojusenergiaks või, alalisvoolu või regeneratiivsete vahelduvvoolu dünamomeetrite korral, elektrienergiaks. Viimati nimetatud elektrienergia muundatakse takistipanku kasutades soojusenergiaks või suunatakse elektrivõrku [4: 468].

Eesti Maaülikooli mootorite katselaboris on kasutusel firma Schenck Pegasus GmbH Dynas$_3$ LI250 koormusstendi süsteem, mis koosneb vahelduvvoolu induktsioonmootorist, pöördemomendi mõõtmise süsteemist, pöörlemiskiiruse mõõtmise süsteemist, sagedusmuundurist, pöördemomendi signaalianalüsaatorist, stendi juhtkontrollerist, turvamoodulist ning toitemoodulist [5: 1].

Süsteemi juhtimiseks kasutatav digitaalne kontroller x-act juhib nii katsetatava sisepõlemismootori kui ka koormust tekitava asünkroonmootori pöörlemiskiirust ja

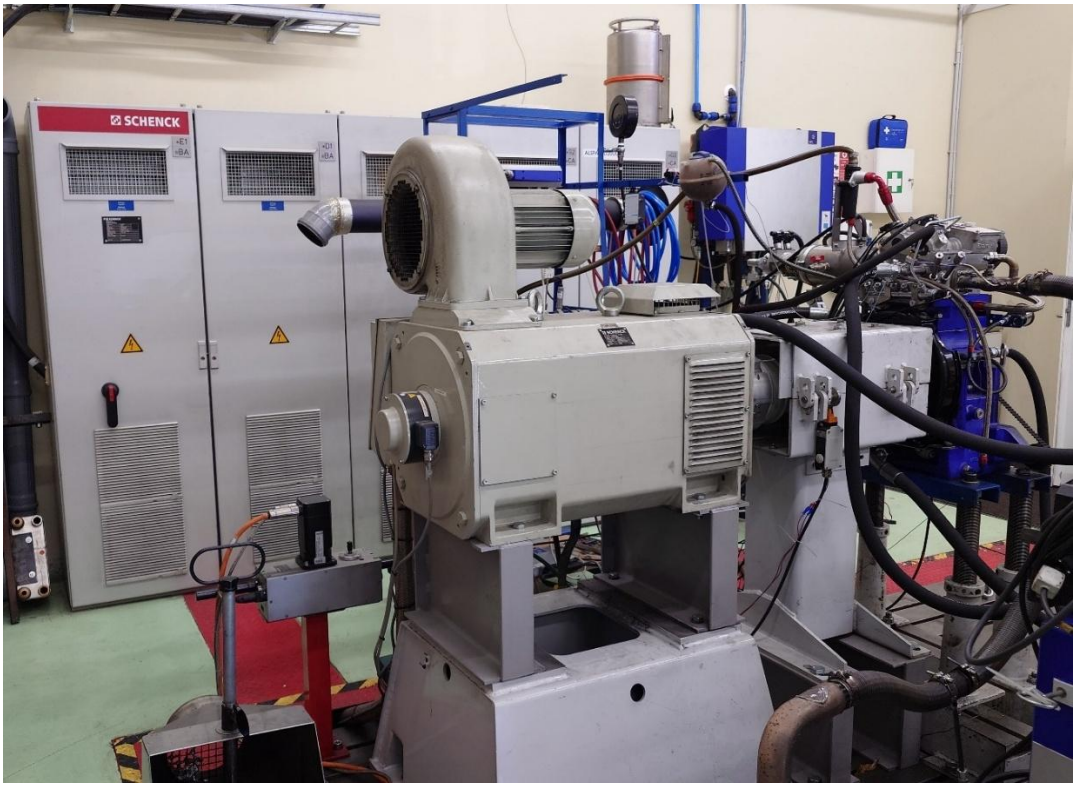
pöördemomenti. Pöördemomendi signaalianalüsaator edastab pöördemomendi anduritega flantsi abil pöördemomendi väärtuse x-act kontrollerisse, kasutades seejuures häirekindlat sagedussignaali. Asünkroonmootori külge kinnitatud enkooder edastab pöörlemissagedusega proportsionaalse ruutsignaali vahendusel kontrollerile ja sagedusmuundurile pöörlemiskiiruse [6: 6]. Nimetatud kontroller on kujutatud joonisel 1.

Joonis 1. X-act kontroller (Bulavs 2025).

Dynas3 koormusstendis koormab testitavat sisepõlemismootorit sellega võlli kaudu ühendatud, vahelduvvoolul töötav lühisrootoriga asünkroonmootor, mis on oma tööparameetrite poolest võimeline koormama nii diisel-, otto- kui ka elektrimootoreid võimsusega kuni 250 kW, maksimaalsel pöörlemissagedusel 10000 min^{-1} [5: 10,16]. Kõnealune asünkroonmootor on kahepooluseline, võimsusteguriga 0,89 ning ühendatud kolme faasiga tähtühenduses. Mootori nimipinge on 400 V, nimivoolutugevus 390 A, maksimaalne voolusagedus 165 Hz. Kirjeldatud koormusmootori jahutamiseks on sellele paigaldatud radiaalset ventilaatorit vedav elektrimootor, mille tööks on vaja kolmefaasilist 400 V toitepinget sagedusel 50 Hz. Jahutusmootori nimivoolutugevus on 6,1 A.

Sagedusmuundur on vahelduvvooludünamomeetri keskseade. Juhtides vahelduvvoolumootori toitevoolu sinusoidlaine sagedust, on võimalik määrata selle töökiirust. Sagedusmuundurit jahutatakse õhuga [6: 9].

Sagedusmuundur koosneb välise vooluvõrgu ja vahelduvvoolumootori poolsetest impulssmuunduritest, mis kasutavad IGBT (isoleeritud paisuga bipolaartransistor) lülituselemente. Vahelduvvoolumootori väljapõhine vektorjuhtimine tagab mootori täpse juhtimise kogu selle kiirusvahemikus. Tänu välise vooluvõrgu poolsele impulssinverterile on võimalik seadme võimsustegurit vastavalt vajadusele reguleerida, et minimiseerida sisendvoolu reaktiivsed komponendid. Sagedusmuunduri kapile on paigaldatud juhtpaneel, et seadistada impulssmuundureid ja lugeda veateateid [5: 41]. Katsetatavat sisepõlemismootorit koormav asünkroonmootor ning seda juhtiv sagedusmuundur on kujutatud joonisel 2.



Joonis 2. Esiplaanil asünkroonmootor, tagaplaanil sagedusmuundur (Bulavs 2025).

Mootorivõlli pöördemomenti mõõdetakse pöörleva flantsi küljes oleva mehhaanilise pinge anduri silla abil. Saadud signaal muundatakse digitaalseteks, sagedusmoduleeritud, impulssideks, mis edastatakse staatorile, kasutades kontaktivaba infrapuna saatjat. Anduri tööks vajalik elektrienergia edastatakse induktiivselt. Suurima täpsuse tagab mõõtetulemuste lugemine otse seadmelt [6: 10].

Koormusstendi süsteemi juurde kuulub ka toitemoodul, millel on puutetundlik ekraan mõõtetulemuste lugemiseks ning flantsi seadistamiseks. X-act kontrolleriga suhtlemiseks on toitemoodulil digitaalsed ja analoogsed väljundid. Pöörlemiskiiruse mõõtmiseks kasutatakse inkrementaalset kiirusenkooderit, mis on kinnitatud vahelduvvoolumootori võlli mittevedavale otsale. Enkooderil on kaks sensorit, mille signaale töötleb sagedusmuunduriga kontroller. X-act on modulaarne reaalajaline kontroller, mis juhib nii koormust tekitava vahelduvvoolumootori kui ka katsetatava sisepõlemismootori kõiki operatsioone [6: 11].

X-act kontroller sisaldab mitut kontrollmoodulit [7: 8-9]:

1. digitaalse signaaliprotsessoriga protsessormoodul;
2. kommunikatsioonimoodul, mis võimaldab suhelda kontrolleri teiste moodulite ning juhtpaneeliga CAN (*Controller Area Network*) liidese ning süsteemiväliste juhtseadmetega RS (*Recommended Standard*) 232 liidese abil;
3. dünomeetri juhtmoodul, mille abil kontroller saab suhelda dünamomeetri koormusstendi ja selle sagedusmuunduriga;
4. mootori juhtmoodul, mis võimaldab kontrolleril suhelda katsetatava sisepõlemismootoriga;
5. alalisvoolu konvertermoodul kontrolleri ja selle moodulite toiteks.

X-act kontrolleri juhtpaneelil on alljärgnevad nupud [7: 27-28]:

1. *Measure* (mõõtmine), mis võimaldab lugeda koormusstendi andurite mõõtetulemusi;
2. *Control* (kontroll), mille abil saab seadistada katsetatavale mootorile antud koormuse parameetreid;
3. *Setup* (sätted) katsetatava mootori, koormusstendi, selle signaaligeneraatori ning seatud sensorite parameetrite muutmiseks;
4. *Calibr* (kalibreerimine) erinevate sensorite ja täiturite kalibreerimiseks;
5. *Digital I/O* (digitaalsed sisendid-väljundid) koormusstendi mootori ja kontrollerisisese CAN liidese sisendite ja väljundite kuvamiseks ning diagnostikaks.

Dynas3 koormusstendi süsteemi stabiilsuse ja turvalisuse tagamiseks kuulub komplekti turvamoodul SZM, mis garanteerib hädaolukorras stendi turvalise peatumise ning ei lase sellel käivituda, kui vajalikud töötingimused, nagu näiteks piisav õli- ja kütuserõhk, pole tagatud [6: 12, 8: 1].

Toitemoodul ESM toidab turvamoodulit SZM, kontrollerit x-act ning pöördemomendianduri signaalianalüsaatorit 230 VAC ja 24 VDC pingetega. Mooduli keskse toitelüliti abil saab terve süsteemi toidet korraga sisse/välja lülitada. Automaatsed liinikaitselülitid pakuvad toitemoodulile ning sellega ühendatud seadmetele lisakaitset [6: 13, 9: 3].

1.3. AVL *Fuel Mass Flow Meter* kütusekulumõõtja

Katsetatava sisepõlemismootori tarvitatava kütuse koguse mõõtmiseks kasutatakse AVL *Fuel Mass Flow Meter* kütusekulumõõtjat. Nimetatud seade on mõeldud pidevateks mõõtmisteks dünaamilistel mõõtepinkidel ning toetab kõiki tüüpi mootoreid võimsusega kuni 500 kW, mõõtevahemikus 0-125 kg/h, ilma et seadet oleks vaja modifitseerida. Sobivad nii puhtad diislikütused ja bensiinid kui ka nende ja alkoholisegud [10: 65]. Kirjeldatud kütusekulumõõtja on kujutatud joonisel nr 3.

Joonis 3. AVL kütusekulumõõtja (Bulavs 2025).

Kütusekulumõõtja töö põhineb Coriolisi efekti kasutaval vedelikuvoolu sensoril, tänu millele on võimalik mõõtmisi pidevalt sooritada. Sensori suur täpsus ja reageerimiskiirus on tagatud sensortoru väga väikse läbimõõdu, toru ette ühendatud pumba ja rõhuregulaatoriga, mille eesmärgiks on tagada pidev kütuserõhk sensoris vastavalt kütusevoolule [10: 66].

AVL kütusekulumõõtja suudab väljastada mõõtetulemusi nii massipõhiselt kg/h kui ka mahupõhiselt l/h. Lisaks on võimalik mõõta ka kütuse tihedust kg/m3 ning temperatuuri [10: 68]. Kirjeldatud kütusekulumõõtja on kujutatud joonisel nr 3.

1.4. AVL *Flowsonix Air* õhukulumõõtja

AVL *Flowsonix Air* õhukulumõõtja koosneb kahest peamisest komponendist: katsetatava sisepõlemismootori sisselaskesüsteemiga ühendatavast mõõtepeast ning dünomeetrilise koormusstendi kontrolleri juures asuvast signaalianalüsaatorist, mis lisaks mõõtesensori digitaalsete signaalide analüüsimisele varustab seda ka elektriga [11: 57,65].

Signaalianalüsaatori osadeks on toiteplokk, ekraaniga juhtpaneel ning erinevad sideliidesed, mille abil luuakse signaalianalüsaatori ühendus arvuti või muu stendiautomaatikaga [11: 57].

Mõõtepea koosneb mõõtetorust, õhurõhu-, temperatuuri-, niiskusandurist ning kahest ultraheli sensorist ja nende juhtelektroonikast [11: 58]. Kirjeldatud õhukulumõõtja mõõtepea on kujutatud joonisel nr 4.

Joonis 4. AVL õhukulumõõtja mõõtepea (Bulavs 2025).

AVL *Flowsonix Air* õhuvoolu mõõtmine põhineb ultrahelisignaali rännaku-ajavahemiku meetodil. Kaks ultrahelisignaali saadetakse samaaegselt kahest saatjast läbi mõõdetava meediumi, milleks antud juhul on õhk. Üks ultrahelisignaalidest saadetakse õhuvoolu suunas ning teine vastupidises suunas. Helikiiruse ja voolukiiruse interaktsioon kiirendab ühe signaali liikumist ning aeglustab teist [11: 53].

1.5. Bosch BEA050 heitgaasianalüsaator

Kuna mootorilaboris kasutatud BOSCH BEA050 heitgaasianalüsaatori tootmine on aastaid tagasi lõpetatud ning tootja seda seadet enam ei toeta, pole BEA050 heitgaasianalüsaatori kohta saada ametlikku dokumentatsiooni. Selle asemel kasutatakse sarnaste mudelite BOSCH BEA055 ja BEA350 heitgaasianalüsaatorite materjale, kuna nimetatud seadmed töötavad samal põhimõttel ning erinevad peamiselt kasutatava tarkvara poolest. Nimetatud heitgaasianalüsaator on kujutatud joonisel 5 [12: 17].

Joonis 5. Bosch BEA050 heitgaasianalüsaator (Bulavs 2025).

BOSCH BEA050 heitgaasianalüsaatoriga saab analüüsida kõiki bensiinil töötavaid ottomootoreid, et neid defekteerida ning kontrollida mootorite heitgaaside vastavust seatud normidele [12: 17]. Kasutades mittehajuva infrapuna spektroskoopia mõõtemeetodit mõõdab seade vingugaasi (CO), süsihappegaasi (CO_2) ning põlemata kütuseosakeste (HC) kontsentratsiooni heitgaasis. Hapniku (O_2) kogus heitgaasis leitakse elektrokeemiliselt ja liigõhutegur (λ) arvutatakse nimetatud gaaside mõõtetulemuste põhjal, kasutades Bretschneideri võrrandit:

$$\lambda = \frac{CO_2 + \frac{CO}{2} + O_2 + \left(\frac{H_{CV}}{4} \cdot \frac{3,5}{3,5 + \frac{CO}{CO_2}} - \frac{O_{CV}}{2}\right) \cdot (CO_2 + CO)}{\left(1 + \frac{H_{CV}}{4} - \frac{O_{CV}}{2}\right) \cdot (CO_2 + CO + K \cdot HC)}, \quad (1)$$

kus kõikide gaaside kontsentratsioonid on protsentides ruumalast; *K* on kordustegur *HC* taandamiseks NDIR meetodilt FID meetodiks; H_{CV} kirjeldab vesiniku ja süsiniku suhet kütuses ning O_{CV} hapniku ja süsiniku suhet kütuses, mille väärtused olenevad kasutatavast kütusesegust; tüüpiliselt on H_{CV} väärtus 1,7261 ja O_{CV} väärtus 0,0175 [12: 18].

1.6. Mootoritestimise abisüsteemid

Katsetatavat sisepõlemismootorit õlitatakse ja jahutatakse AVL–577 abisüsteemiga, mis juhib nimetatud vedelike vooluhulka ja temperatuuri, õli puhul ka rõhku. Süsteem koosneb kolmest vedelikuringist: sisepõlemismootori jahutusvedelik, sisepõlemismootori õlitus ja abisüsteemi enda jahutusvedelik. Seadet on võimalik juhtida, kasutades katsestendi automaatsüsteemi või kõnealuse abisüsteemiga integreeritud kontrollerit [13: 1].

Õlitussüsteem koosneb alljärgnevatest komponentidest [13: 34-36]:

1. tsirkulatsioonipump, mis tekitab sisepõlemismootori tööks vajaliku õli voolu;
2. küttekeha, mida kasutatakse õli soojendamiseks soovitud töötemperatuurini;
3. käsitsi juhitav rõhuregulaator, mis võimaldab reguleerida õlirõhku;
4. soojusvaheti õli vajadusel jahutamiseks;
5. õlifilter õlist kõrvaliste osakeste eemaldamiseks.

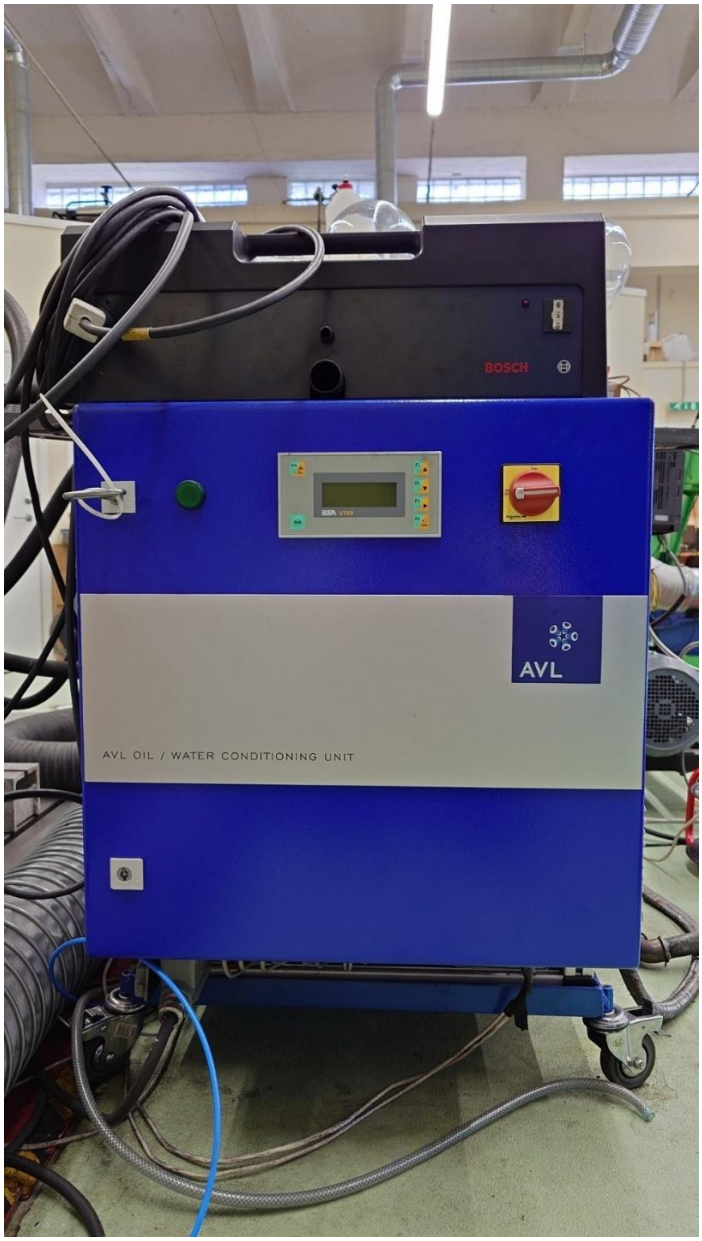
Õli ülerõhu korral, milleks on 8 bar, rakendub turvaventiil, mis suunab õli ringlusest reservpaaki. Abisüsteemi juhtimissüsteemile informatsiooni edastamiseks on õliringis voolulüliti, rõhulüliti, temperatuuriandur ning kasutajale tagasiside andmiseks õlirõhku näitav manomeeter [13: 34-36].

Katsetatava sisepõlemismootori jahutussüsteem koosneb alljärgnevatest komponentidest [13: 31-33]:

1. tsirkulatsioonipump, mis tekitab sisepõlemismootori tööks vajaliku jahutusvedeliku voolu;
2. küttekeha jahutusvedeliku soovitud töötemperatuurile soojendamiseks;

3. soojusvaheti jahutusvedeliku vajadusel jahutamiseks;
4. jahutusvedeliku filter vedelikust kõrvaliste osakeste eemaldamiseks.

Seadme juhtsüsteemile informatsiooni edastamiseks on jahutusvedeliku ringis voolulüliti ja temperatuuriandur ning kasutajale tagasiside andmiseks jahutusvedeliku rõhku näitav manomeeter [13: 31-33]. AVL–577 abisüsteem on kujutatud joonisel 6.



Joonis 6. AVL-577 abisüsteem (Bulavs 2025).

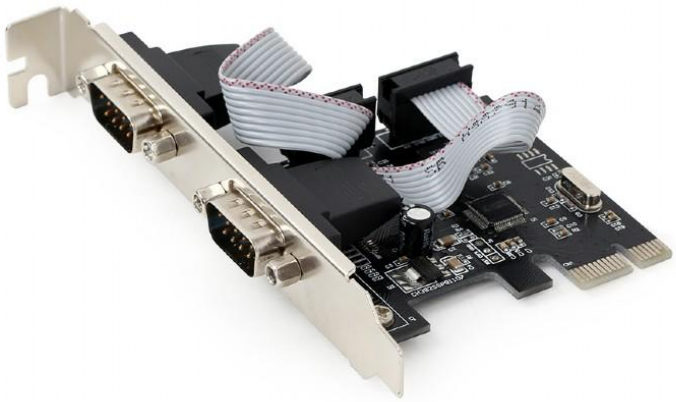
Abisüsteemi enda jahutussüsteem koosneb soojusvahetist, mille abil kantakse soojusenergia üle katsetatava sisepõlemismootori õlitus- ning jahutusringist seadme enda jahutussüsteemi. Juhtventiil juhib jahutusvedeliku voolu, rõhku vähendava ventiili abil on võimalik määrata

süsteemi soovitud rõhu ülemine piir. Lisaks on ka selles vedelikuringis filter, et eemaldada vedelikust kõrvalised osakesed [13: 29,30]. Kuna kõnealuses jahutusvedeliku ringis puudub pump jahutusvedeliku voolu tekitamiseks ning soojusvahetid jahutusvedeliku jahutamiseks, peab seadmega ühendama täiendava välise seadme, mis pakub vajadusele vastavat vedeliku voolu ning jahutusvõimekust [13: 27]. Mootorilaboris kasutatakse abisüsteemi jahutamiseks linna veevõrgust tulevat külma kraanivett, mis pärast soojusvaheti läbimist juhitakse kanalisatsiooni.

2. ANDMEHÕIVESÜSTEEM LOOMINE

2.1. Andmehõivesüsteemi üldine kirjeldus

Kõik eespool kirjeldatud mõõteseadmed (x-act kontroller, AVL kütusekulumõõtja, AVL õhukulumõõtja ning Bosch heitgaasianalüsaator) ühendas mootorite katselabori juhtruumis paikneva lauaarvutiga, millele töö autor paigaldas kaks Gembird SPC-22 laienduskaarti, lisades niimoodi arvutile vajalikud RS-232 ühendusliidest toetavad emased DB9 ühenduspesad. Nimetatud laienduskaart on kujutatud joonisel 7.



Joonis 7. Gembird SPC-22 laienduskaart [14].

Töö autori koostatud programmeerimiskeelel Python põhinev andmehõiveprogramm kontrollib esmalt ühendust katseseadmetega. Eduka andmevahetuse loomisel kõigi seadmetega ning start-käskluse saamisel hakkab programm mõõteseadmetelt järjest vaheldumisi pärima vajalikke mõõtetulemusi ning neid salvestama CSV-formaadis andmebaasifaili. Saades stopp-käsu, lõpetab tarkvara suhtluse mõõteseadmetega ning andmete salvestamise faili. Seejärel on saadud mõõtetulemused valmis analüüsimiseks või väljastamiseks xlsx-formaadis. Andmehõiveloogika funktsionaalne diagramm on kujutatud lisas 1.

2.2. RS-232 ühendusliides

Andmehõivesüsteemi loomisel kasutati mõõteseadmete ja andmehõivearvuti vahelise kommunikatsiooni loomiseks RS-232 ühendusliidest. RS-232 ehk *Recommended standard* „soovituslik standard“ 232 on 1962. aastal USA organisatsiooni Electrical Industries Association defineeritud jadaliidesel põhinev andmeside standard, mis määrab andmesideühenduse füüsilised karakteristikud, nagu näiteks signaalipinged, kaablitüübid ning pistikute viikude ühendused [15: 96]. Olenemata oma vanusest on RS-232 standard siiani laialdaselt kasutusel tänu oma suurele müraimmuunsusele ning võimekusele edastada signaale üle pika vahemaa [15: 99].

Andmevahetus RS-232 standardil põhineb tavaliselt ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) standardil, tänu millele on ka vormistamata andmevoog küllaltki hõlpsasti loetav [15: 101]. DB9 ja DB25 on vastavalt 9- ja 25-klemmised, jadaliidese jaoks kasutatavad, mehhaanilised ühenduspordid [15: 50]. Mõlemasuunaliseks andmesideks on vaja kolme viiku: TD – *transmit data* (andmete saatmine), RD – *recieve data* (andmete vastuvõtmine) ja GND – *ground* (signaalimass). Andmevahetuseks peab ühe seadme TD viigu ühendama teise seadme RD viiguga ning vastupidi, RD viigu TD viiguga [15: 121]. Kõik signaalid määratakse pingega signaalimaa suhtes [15: 114]. Loogiline tase viitab nimetatud pingele, mille puhul on biti väärtus 1 või 0 [15: 105].

RS-232 protokoll on asünkroonne, ehk andmevahetuseks ei ole vaja taktsignaali, mis suhtlevaid seadmeid omavahel sünkroniseerib. Andmeformaat koosneb ühest start-bitist, seitsmest või kaheksast andmebitist, ühest võrdsusbitist ning ühest või kahest stop-bitist. Start-bit annab vastuvõtvale seadmele teada, et järgnevad andmebitid, mis, kasutades tavaliselt ASCII formaati, kannavad edasi soovitud informatsiooni. Võrdsusbiti abil saab kontrollida vastuvõetud andmete korrektsust. Stop-bit annab teada, et andmevahetus on lõppenud ning mõõtes aega start- ja stop-biti vahel, on võimalik veenduda, et andmevahetuses pole vigu [15: 100-102]. Boodikiirus kirjeldab jadaliidese suhtluskiirust sümbolites sekundi kohta. See peab olema mõlemal omavahel suhtleval seadmel sama [15: 110].

Mõõteseadmetega ühenduse loomiseks oli oluline RS-232 ja ASCII standarditega tutvuda, kuna andmehõiveprogrammi loomiseks tuli kohati käsklusi saata ja tulemusi vastu võtta autoril endal baidi kaupa.

2.3. X-act kontrolleri andmehõive

Dynas3 koormusstendi x-act kontrolleri ühendamiseks andmehõivearvutiga valmistas töö autor kaabli, mille arvutipoolses otsas oli emane DB9 pistik ning kontrolleripoolses otsas emane DB25 pistik, mis on kujutatud joonisel 8. Nimetatud pistikute ühendamiseks kasutas autor jadaandmevahetuseks mõeldud kaheksasoonelist kaablit. Elektroonilised ühendused on kirjeldatud tabelis 1 [16: 186].

Joonis 8. Vasakul emane DB9 pistik, paremal emane DB25 pistik [17,18].

Tabel 1. X-act kontrolleri ja andmehõivearvuti vahelise kaabli elektrilised ühendused [16: 186]

Arvutipoolne DB9 pistik	Signaal	Kontrolleripoolne DB25 pistik	Signaal
Pin 2	TxD	Pin 2	RxD
Pin 3	RxD	Pin 3	TxD
Pin 5	GND	Pin 7	GND

Andmevahetus põhines RS-232 kommunikatsiooniprotokollil, mille boodikiirus oli 19 200 sümbolit sekundis, andmevahetusbittide arv 8, võrdsusbittide arv 0 [16: 186].

X-act kontrolleriga kommunikatsiooni alustamiseks kasutas töö autor oma programmis Pythoni jadaühenduse teeki (*library*). Järgnev kood joonisel 9 defineerib füüsilise andmehõivearvuti pordi, millega x-act konrtoller on ühendatud, ning loodava jadaühenduse parameetrid.

```
Xact = serial.Serial(
    port='COM5',
    baudrate=19200,
    parity=serial.PARITY_NONE,
    stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
    bytesize=serial.EIGHTBITS
)
```

Joonis 9. X-act kontrolleri jadapordiühenduse defineerimine.

X-act-i kommunikatsioon põhineb SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) käsklussüntaksil, mis on levinud test- ja mõõtmisinstrumentidel, ning põhineb ASCII protokollile [7: 76]. SCPI käsklused koosnevad järjestikustest, semikoolonitega eraldatud, alamkäsklustest. Käskluse lõpus peab olema LF „*newline*“ sümbol (*character*), ASCII koodiga 0x0a [7: 77]. Kontrollerilt tulenevad SCPI vastused põhinevad ASCII formaadis väärtustel, mis on eraldatud komade või semikoolonitega [7: 79].

Näiteks käsk, millega autor küsis stendi hetkel arendatavat koormust, on kujutatud joonisel 10:

```
Xact.write((":CB:DATA:TORQ:ACT?" + '\r\n').encode())
```

Joonis 10. X-act kontrollerile andmepäringu saatmine.

Käsu osa ":CB:DATA " viitab kontrolleri andmehõive alammoodulile, “:TORQ:ACT?” tähendab, et küsitakse hetkelist pöördemomenti. Käsu lõppu lisatud + '\r\n' lisab eelnevalt saadetud sümbolitele kontrolleri oodatavad LF ja CR sümbolid. Pärast seda kodeeritakse käsklus baidireaks ning edastatakse kontrollerile.

Pärast kirjeldatud käsu saatmist vastab x-act kontroller andmetega, mida loetakse sisse järgneva joonisega 11:

```
torque = float(Xact. readline().decode('utf-8'))
```

Joonis 11. X-act kontrolleri mõõtetulemuse lugemine.

Kujutatud koodiriba loeb jadaühenduse kaudu saabunud vastuse, dekodeerib selle baidireast inimesele loetavasse utf-8 formaati, ning omastab ujukomaarvuna muutujale *torque*, mis salvestab endasse hetkelise pöördemomendi väärtuse njuutonmeetrites. Sama meetodiga loetakse kontrollerist koormusstendi hetkeline pöörlemissagedus min^{-1} ja hetkeline arendatud koormus kilovattides. Juhul kui stendil katsetatav sisepõlemismootor seda toetab, siis ka kontrolleri poolt mootorile saadetud hetkeline „gaasipedaali asend“, mis vastavalt mootori tüübile juhib drosseli klapi lahtiolekunurga, kõrgsurvepumba aretatava kütuserõhu või mingi muu meetodi abil katsetatava sisepõlemismootori arendatavat võimsust.

Kuna kõik kontrolleri saadetud mõõtetulemused on ühikuteta numbrid, oli töö autori jaoks töötava tarkvaralahenduse loomiseks oluline eelnevalt põhjalikult tutvuda töö teoreetilises osas kirjeldatud dokumentatsiooniga, mis käsitlesid koormusstendi tööpõhimõtteid, kontrolleri näite jms.

2.4. AVL *Fuel Mass Flow Meter* kütusekulumõõtja andmehõive

AVL kütusekulumõõtja ühendamiseks andmehõivearvutiga valmistas töö autor kaabli, mille arvutipoolses otsas oli emane DB9 pistik ning kütuselugejapoolses otsas isane DIN8 pistik. Autori tehtud kaablile funktsionaalselt sarnane kaabel on kujutatud joonisel 12. Elektroonilised ühendused on kirjeldatud tabelis 2 [10: 50].

Joonis 12. Emane DB9 – isane DIN8 andmevahetuskaabel [19].

Tabel 2. AVL mõõteseadme ning andmehõivearvuti vahelise kaabli elektrilised ühendused [10: 49]

Arvutipoolne DB9 pistik	Signaal	Kütuselugejapoolne DIN8 pistik	Signaal
Pin 2	TxD	Pin 1	RxD
Pin 3	RxD	Pin 2	TxD
Pin 5	GND	Pin 3	GND

Andmevahetus põhines RS-232 kommunikatsiooniprotokollil, mille boodikiirus oli 9600 sümbolit sekundis, andmevahetusbittide arv 8, võrdsusbittide arv 0 ja stop-bittide arv 1 [10: 49].

Sarnaselt x-act kontrollerile kasutas töö autor jadaühenduse loomiseks Pythoni teeki (*library*) ning defineeris ühenduse parameetrid, mis on kujutatud joonisel 13.

```
AVLfuel = serial.Serial(
    port='COM6',
    baudrate=9600,
    parity=serial.PARITY_NONE,
    stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
    bytesize=serial.EIGHTBITS
)
```

Joonis 13. AVL kütusekulumõõturi jadapordiühenduse defineerimine.

Kommunikatsioon AVL kütuselugejaga põhineb *master-slave* põhimõttel töötaval AK-protokollil, mis on levinud katsestendide automatsioonisüsteemides [10: 97]. See protokoll eeldab suhtlust ASCII formaadis, mille kõik sõnumid algavad sümboliga STX (0x02) ning lõppevad sümboliga ETX (0x03). Kütusekulumõõtjale saadetud sõnumite sisu koosneb neljatähelisest kombinatsioonist, mille esimene täht ütleb, kas tegu on juhtkäsklusega (S), sättekäsklusega (E), andmepäringuga (A) või tsüklilise andmepäringuga (R). Kütusekulumõõtja saadetud vastused järgivad sarnast formaati, mille konkreetne sisu oleneb käsklusest [10: 98].

Järgneval joonisel 14 kujutatud koodiread kirjeldavad käsku, millega autor päris kütusekulumõõtjalt mõõtetulemusi.

```
AVLfuelmessage = " ASEX "
AVLfuel.write(b'\x02' + AVLfuelmessage.encode('utf-8') + b'\x03')
```

Joonis 14. AVL kütusekulumõõturile andmepäringu saatmine.

Esimesel real olev käsk „ASEX“ ütleb mõõteseadmele, et päritakse mõõtetulemusi seadme kõigilt anduritelt. Kuna see kütuselugeja eeldab eespool nimetatud STX ja ETX sümboleid, tuli töö autoril need vastavasse käsuritta käsitsi sisestada (b´\x02´ ja b´\x03´). Täht b viitab, et järgnevad kuueteistkümnendsüsteemis esitatud sümbolikoodid edastatakse

baidireaformaadis, nende vahel asuv käsk kodeeritakse mõõteseadmele arusaadavasse utf-8 formaati ning lõplik käsk edastatakse jadaühenduse kaudu kütusekululugejale.

```
AVLfueldata_raw = AVLfuel.read_until(expected='\x03'.encode('UTF-8'))
```

Joonis 15. AVL kütusekulumõõturi mõõtetulemuste lugemine.

Kuna erinevalt x-act kontrollerile ei saada firma AVL seadmed oma vastuse lõppedes realõpu sümbolit LF, koodiga 0x0a, peab programm arvestama mõõteseadme vastuse lõpuks sümbolit ETX, koodiga 0x03, nagu on ka eelneval koodireal, joonisel 15, kujutatud. Vastasel juhul ei teaks programm, et saadud käsk on lõppenud ning programm ei saaks järgmise tegevusega edasi liikuda, kuigi kogu vajalik informatsioon on juba käes.

Eelmisel koodireal defineeritud muutuja *AVLfueldata_raw* sisaldab mõõtetulemusi baidivooformaadis, mistõttu see tuleb see järgnevalt loetavaks dekodeerida utf-8 formaati.

```
AVLfueldatasplit = AVLfueldata_raw.decode('UTF-8').split(" ")
```

Joonis 16. AVL kütusekulumõõturi mõõtetulemuste eraldamine.

Kuna saadetud käsklus tagastab mitu tühikuga eraldatud mõõtetulemust korraga, jagab funktsioon „*split*“ selle eristatavateks väärtusteks ning lisab need andmemassiivi *AVLfueldatasplit*, nagu kujutatud joonisel 16. Vajalikud mõõtetulemused saab eraldi muutujatele ujukomaarvudena omistada järgneva koodijupiga joonisel 17.

```
instFuelMassFlow = float(AVLfueldatasplit[7])
meanFuelMassFlow = float(AVLfueldatasplit[8])
movingavgFuelMassFlow = float(AVLfueldatasplit[9])
fuelDensity = float(AVLfueldatasplit[12])
fuelTemp = float(AVLfueldatasplit[13])
```

Joonis 17. AVL kütusekulumõõturi mõõtetulemuste vastavatele muutujatele omistamine.

Vastavatele muutujatele omistatakse hetkeline kütusekulu ühikuga kg/h, keskmistatud kütusekulu ühikuga kg/h, liikuvalt keskmistatud kütusekulu ühikuga kg/h, kütusetihedus ühikuga kg/m^3 ja kütuse temperatuur ühikuga °C.

2.5. AVL *Flowsonix Air* õhukulumõõtja andmehõive

Olles toodetud sama firma poolt, töötab andmehõivearvuti andmevahetus AVL õhukulumõõtjaga sarnaselt AVL kütusekulumõõtjaga. AVL õhukulumõõtja signaalianalüsaatori ühendamiseks andmehõivearvutiga kasutatakse kütusekulumõõtjaga samasugust kaablit, mille elektroonilised ühendused on kirjeldatud tabelis 2 [11: 46]. Ka suhtlus selle seadmega põhineb eelmises alampeatükis kirjeldatud AK-protokollil [11: 141]. Kommunikatsioon õhukulumõõtja ja andmehõivearvuti vahel luuakse sarnast koodi ja parameetreid kasutades nagu eelmises alampeatükis ära toodud. Ainsaks erinevuseks on, et kui kütusekulumõõtja ühendati andmehõivearvuti füüsilise pordiga COM6, siis õhukulumõõtja ühendatakse füüsilisse porti COM7.

Järgnev kood, joonisel 18, õhukulumõõtjale mõõtetulemuste päringukäsu saatmiseks on analoogne eelnevalt kirjeldatud mõõteseadmega:

```
AVLairmessage = " AMES "
AVLair.write(b'\x02' + AVLairmessage.encode('utf-8') + b'\x03')
```

Joonis 18. AVL õhukulumõõturile andmepäringu saatmine.

Sarnaselt loetakse ka selle käsu vastus baidivooks, nagu kujutatud joonisel 19:

```
AVLairdata_raw = AVLair.read_until(expected='\x03'.encode('UTF-8'))
```

Joonis 19. AVL õhukulumõõturi mõõtetulemuste lugemine.

Saadud vastus dekodeeritakse ning tükeldatakse, kujutatuna joonisel 20:

```
AVLairdatasplit = AVLairdata_raw.decode('UTF-8').split(" ")
```

Joonis 20. AVL õhukulumõõturi mõõtetulemuste eraldamine.

```
airtemp = float(AVLairdatasplit[10])
airpress = float(AVLairdatasplit[11])
airvelosity = float(AVLairdatasplit[12])
```

Joonis 21. AVL õhukulumõõturi mõõtetulemuste vastavatele muutujatele omistamine.

Joonisel 21 kujutatud kood omastab vastavatele muutujatele ujukomaarvudena hetkelise õhu temperatuuri ühikutes °C, hetkelise õhurõhu ühikutes kPa ning hetkelise õhu liikumiskiiruse ühikutes m/s.

2.6. Bosch BEA050 heitgaasianalüsaatori andmehõive

Kuna dokumentatsioon BOSCH BEA050 heitgaasianalüsaatori andmevahetuse loomiseks puudus, pidi töö autor selle pöördprojekteerimise (*reverse engineering*) teel tuletama. Nimetatud heitgaasianalüsaator oli paigaldatud analüüsisüsteemi BOSCH FSA740 ning ühendatud seda juhtiva arvutiga, kasutades emane DB9 – emane DB9 jadaandmevahetuse kaablit. Sellest järeldas töö autor, et tegemist on ilmselt RS-232, RS-422 või RS-485 kommunikatsiooniprotokolliga. Paigaldades nimetatud arvutisse tarkvara *Serial Port Monitor* oli autoril võimalik jälgida juhtarvuti ning BEA050 vahelist andmevahetust, mille abil ta tuvastas, et seadmete vaheline kommunikatsioon põhines RS-232 protokollil, kasutades standardseid parameetreid – boodikiirus 9600 sümbolit sekundis, andmevahetusbittide arv 8, võrdlusbittide arv 0 ning stopp-bittide arv 1.

Järgnev koodiblokk joonisel 22 kirjeldab jadaliidese parameetrite defineerimist ning ühenduse loomist BEA050 heitgaasianalüsaatoriga.

```
BEA050 = serial.Serial(
    port='COM8',
    baudrate=9600,
    parity=serial.PARITY_NONE,
    stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
    bytesize=serial.EIGHTBITS
)
```

Joonis 22. Bosch heitgaasianalüsaatori jadapordiühenduse defineerimine.

Analüsaatorist andmepäringu tegemiseks kasutas töö autor juhtarvutile paigaldatud ametliku BOSCH tarkvara käsklusi, salvestades konkreetsed baidid, mis need käsklused moodustasid, tarkvara *Serial Port Monitor* abil. Samuti toimus heitgaasianalüsaatori poolt väljastatud vastuste salvestamine tarkvara *Serial Port Monitori* kasutades. BEA050 poolt tagasi saadetud vastused olid peamiselt ASCII formaadis, mis lihtsustas märgatavalt selle seadmega andmevahetusprogrammi loomist.

Näiteks, nimetatud heitgaasianalüsaatorist hapniku kontsentratsiooni andmepäringu käsklus üksikute sümbolitena kujutatult, joonisel 23 on järgnev:

```
BEA050.write(b'\x02' + b'\x4F' + b'\x50' + b'\x73' + b'\x52' + b'\x65' +
b'\x6D' + b'\x20' + b'\x22' + b'\x6F' + b'\x6E' + b'\x22' + b'\x03' +
b'\x32' + b'\x30' + b'\x45' + b'\x39')
```

Joonis 23. Bosch heitgaasianalüsaatorile andmepäringu saatmine.

Kasutades oma programmeerimise ja andmevahetuse alaseid, erinevate õpingute ja tööpraktikate kaudu saadud, teadmisi ja kogemusi, jõudis töö autor järeldusele, et nii kujutatud käskluse, kui üldiselt ka teised mõõteseadmele saadetavad käsklused, saab jagada neljaks osaks. Esiteks, sarnaselt eelmistes alampeatükkides kirjeldatud AVL mõõteseadmetele, algab käsklus universaalse andmevahetuse alguse sümboliga STX. Järgnevad sümbolid kirjeldavad saadetavat käsklust, kuni sümbolini ETX, mis lõpetab andmevahetuse. Järgnevaid kuueteistkümnendikkoodis karaktereid kasutatakse vigade kontrolliks, et katseseade saaks veenduda vastuvõetud käskluse terviklikkuses.

Järgnev koodirida joonisel 24 loeb jadaühenduse puhvrist andmevoo, dekodeerib selle, ning omastab ujukomaarvuna vastavale muutujale protsentides:

```
O2consentr = float(BEA050.read(ser.in_waiting).decode('UTF-8'))
```

Joonis 24. Bosch heitgaasianalüsaatori mõõtetulemuse lugemine.

Analoogse koodiga päris töö autor nimetatud heitgaasianalüsaatorilt ka vingugaasi, süsihappegaasi ning põlemata kütuseosakeste mahupõhise kontsentratsiooni ning liigõhuteguri (lambda arvu) kohta.

2.7. Andmehaldus

Nagu kujutatud lisas 1, töötab andmehõive tsükliliselt, mõõtetulemusi päritakse eelmistes alampeatükkides kirjeldatud mõõteseadmetelt üksteise järel, sagedusega 10 Hz. Iga tsükli lõpus kirjutab programm kõik mõõtetulemused andmebaasina kasutatavasse CSV-formaadis faili ühe reana, kus iga mõõtetulemus on esitatud modifitseerimata, algsel kujul, ning eraldatud komadega. Ujukomaarvud kasutavad USA-formaadis koma asemel punkti. Lisaks mõõtetulemustele kirjutatakse vastavale reale ka kaks ajalist väärtust – mõõtetulemuste pärimise ajahetk, lähtudes andmehõivearvuti süsteemikellast, ning mõõtmise algusest kulunud aeg. Iga järgnev mõõtetulemuste päring koos vastavate kellaaegadega lisatakse uuele reale.

Kuigi kirjeldatud failiformaat on arvuti jaoks hõlpsasti ja kiiresti tõlgendatav, on see inimesele loetamatu. Seetõttu lisas töö autor oma loodud andmehõiveprogrammi funktsiooni, mille abil saab nimetatud programmi mõõtetulemused loetavas formaadis xlsx-failina väljastada.

3. ANDMEANALÜÜS

3.1. Kaudsete mõõtetulemuste arvutamine

Lisaks otsestel mõõtmistel saadud tulemustele tuleb osad sisepõlemismootori tööparameetrid leida arvutuslikult. Järgnevad valemid kirjeldavad nimetatud arvutustehteid, mida töö autori loodud tarkvara kasutas vajalike karakteristikute leidmiseks.

Efektiivvõimsus:

$$\boldsymbol{P_e = \frac{M_t \cdot n_e}{9550}}, \tag{2}$$

kus P_e on efektiivvõimsus, kW; M_t on mootori pöördemoment, Nm ja n_e väntvõlli pöörlemissagedus, min^{-1}.

Kütuse tunnikulu:

$$\boldsymbol{B_f = \frac{3600 \cdot m_f}{\tau_f}}, \tag{3}$$

kus B_f on kütuse tunnikulu, kg/h; m_f on katses tarbitud kütuse mass, g ja τ_f kütuse tarbimiseks kulunud aeg, s.

Kütuse erikulu:

$$\boldsymbol{b_e = \frac{1000 \cdot B_f}{P_e}}, \tag{4}$$

Kus b_e on kütuse erikulu, g/kWh; B_f on kütuse tunnikulu, kg/h ja P_e efektiivvõimsus, kW.

Liigõhutegur:

$$\boldsymbol{\lambda_a = \frac{B_a}{14,3 \cdot B_f}}, \tag{5}$$

kus λ_a liigõhutegur; B_a on tegelik õhukulu, kg/h ja B_f kütuse tunnikulu.

Tegelik õhukulu:

$$\boldsymbol{B_a = \frac{m_a \cdot 3600}{\tau_a}} \ , \tag{6}$$

Kus B_a on tegelik õhukulu, kg/h; m_a on tegelik õhumass, kg ja τ_a katse kestvus, s.

Tegelik õhumass:

$$\boldsymbol{m_a = \frac{V_a \cdot \rho_{em}}{1000}} \ , \tag{7}$$

kus m_a on tegelik õhumass, kg; V_a on õhukulu, l ja ρ_{em} keskkonna tihedus, kg/m^3.

Keskkonna tihedus:

$$\boldsymbol{\rho_{em} = \frac{3,48 \cdot B_{em}}{t_{em+273}}} \ , \tag{8}$$

kus ρ_{em} on keskkonna tihedus, kg/m^3; B_{em} on keskkonna rõhk, kPa ja t_{em} keskkonna temperatuur, °C.

Keskkonnarõhk:

$$\boldsymbol{B_{em} = 133,322 \cdot p_{env}} \ , \tag{9}$$

Kus B_{em} on keskkonnarõhk, kPa; p_{env} on baromeetri õhurõhk, mmHg.

Keskmine efektiivrõhk:

$$\boldsymbol{p_e = \frac{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_t \cdot M_t}{\sum V_h}} \ , \tag{10}$$

Kus p_e on keskmine efektiivrõhk, MPa; τ_t on mootori taktide arv, $\sum V_h$ silindrite töömahtude summa, l ja M_t mootori pöördemoment, Nm.

Silindrite summaarne töömaht:

$$\boldsymbol{\sum V_h = i \cdot V_h} \ , \tag{11}$$

kus i on silindrite arv ja V_h ühe silindri ruumala, l.

Efektiivkasutegur:

$$\boldsymbol{\eta_e = \frac{3600}{Q_a \cdot b_e}}\ , \tag{12}$$

Kus η_e on efektiivkasutegur; Q_a on kütuse alumine kütteväärtus, MJ/kg ja b_e kütuse erikulu, g/kWh.

Keskmine mehhaaniline kadurõhk:

$$\boldsymbol{p_{mk} = \frac{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_t \cdot M_c}{i \cdot V_h}}\ , \tag{13}$$

kus p_{mk} on keskmine mehhaaniline kadurõhk, MPa; M_c on takistusmoment, Nm; τ_t mootori taktide arv, i silindrite arv ja V_h ühe silindri ruumala, l.

Mehhaaniline kaduvõimsus:

$$\boldsymbol{P_{mk} = \frac{p_{mk} \cdot i \cdot V_h \cdot n_e}{30 \cdot \tau_t}}\ , \tag{14}$$

Kus P_{mk} on mehhaaniline kaduvõimsus, kW; p_{mk} on keskmine mehhaaniline kadurõhk, MPa; i silindrite arv; V_h ühe silindri ruumala, l; η_e efektiivkasutegur ja τ_t mootori taktide arv.

Mehhaaniline kasutegur:

$$\boldsymbol{\eta_m = \frac{P_e}{P_e + P_{mk}}}\ , \tag{15}$$

kus η_m on mehhaaniline kasutegur; P_e on efektiivvõimsus, kW ja P_{mk} mehhaaniline kaduvõimsus, kW.

Keskmine indikaatorrõhk:

$$\boldsymbol{p_i = p_e + p_{mk}}\ , \tag{16}$$

kus p_i on keskmine indikaatorrõhk, MPa; p_e on keskmine efektiivrõhk, MPa ja p_{mk} keskmine mehhaaniline kadurõhk, MPa.

Indikaatorvõimsus:

$$\boldsymbol{P_i = P_e + P_{mk}} \ , \tag{17}$$

kus P_i on indikaatorvõimsus, kW; P_e on efektiivvõimsus, kW ja P_{mk} mehhaaniline kaduvõimsus, kW.

Kütuse indikaator-erikulu:

$$\boldsymbol{b_i = \frac{1000 \cdot B_f}{P_i}} \ , \tag{18}$$

kus b_i on kütuse indikaator-erikulu, g/kWh; B_f on kütuse tunnikulu, kg/h ja P_i indikaatorvõimsus, kW.

Indikaator-kasutegur:

$$\boldsymbol{\eta_i = \frac{3600}{Q_a \cdot b_i}} \ , \tag{19}$$

kus η_i on indikaator kasutegur; Q_a on kütuse alumine kütteväärtus, MJ/kg ja b_e kütuse indikaator-erikulu, kg/h.

Täiteaste:

$$\boldsymbol{\eta_v = \frac{33,3 \cdot B_a}{i \cdot V_h \cdot n_m \cdot \rho_{em}}} \ , \tag{20}$$

kus η_v on täiteaste; B_a on tegelik õhukulu, kg/h; i silindrite arv, V_h ühe silindri ruumala, l; n_m mootori pöörlemissagedus, min^{-1} ja ρ_{em} keskkonna tihedus, kg/m^3 [3: 19-21].

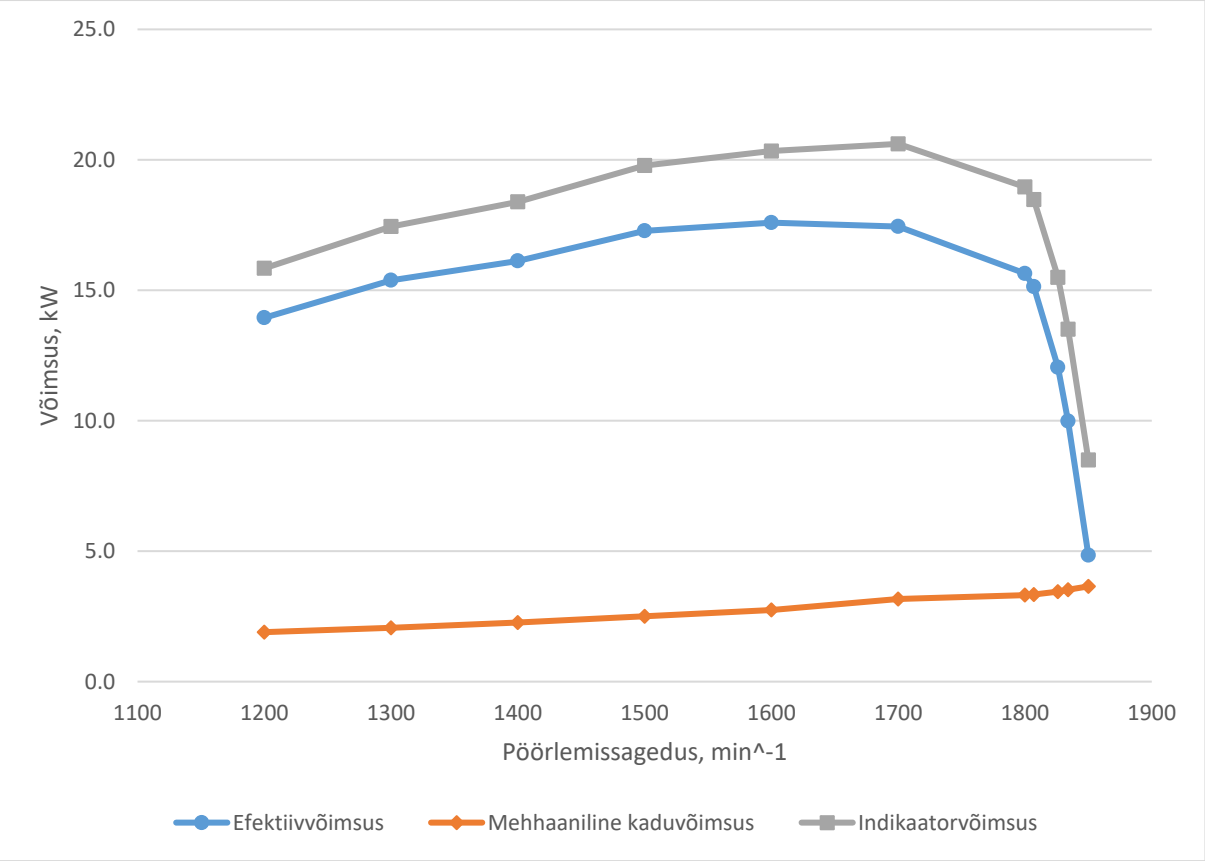
Kirjeldatud valemeid kasutades programmeeris töö autor funktsiooni, mis võtab sisendiks andmehõive tulemusel loodud CSV-faili ning väljastab selle põhjal uue CSV-faili, milles on lisaks otsestele mõõtetulemustele ka kaudsed mõõtetulemused. Kirjeldatud programm loeb sisend-CSV-failist esimese rea, eraldab *split*-funktsiooni kasutades selle rea kõigiks algseteks mõõtetulemusteks ja sooritab nendega vajalikud arvutused. Järgmisena kopeerib programm väljund-CSV-faili selle rea, ning lisab rea lõppu kaudsed mõõtetulemused. Seejärel võtab programm ette sisendfailist järgmise rea ning sooritab samad tegevused, kuni

kõik sisendfaili read on läbi töötatud. Üldise andmeanalüüsiloogika funktsionaalne diagramm on kujutatud lisas 2.

Selleks, et kaudsed tulemused inimese jaoks loetavaks teha, kasutab programm alampeatükis 2.7 kirjeldatud funktsiooni, võttes sisendiks ka kaudseid mõõtetulemusi sisaldava CSV-faili.

3.2. Mõõtetulemuste visualiseerimine

Siiamaani on mootorilabori personal katsetatud sisepõlemismootorite karakteristikuid manuaalselt vormistanud, mis on ajamahukas ja veaaldis protsess. Seepärast kirjutas töö autor programmi, mille peamiseks funktsiooniks on võtta sisendiks kaudseid mõõtetulemusi sisaldav CSV-formaadis andmebaasifail ning selle põhjal automaatselt genereerida soovituid karakteristikuid visualiseerivaid graafikuid.



Joonis 25. Näide andmeanalüüsiprogrammi loodavast graafikust.

Kirjeldatud programm loob kasutajaliidese, kus kasutajal on võimalik valida sisendiks CSV-fail ning seejärel määrata graafiku telgedele omistatavad parameetrid, sarnaselt nagu programmis Excel. Joonisel 25 on kujutatud näide programmi loodavast graafikust.

3.3. Mõõtetulemuste analüüsimine

Andmeanalüüsi teostamiseks sisaldab autori loodud tarkvara funktsiooni, mille abil on võimalik leida erinevaid statistilisi näitajaid, nagu näiteks miinimum, maksimum ja keskmised väärtused, kas terves katses või valitud vahemikus. Lisaks võimaldab tarkvara leida mingile kindlale andmepunktile vastate parameetrite väärtuseid ning nendele vastavaid statistilisi näitajaid. Näiteks, milline on mootori keskmine kütuse tunnikulu, kui see töötab 50% koormusel. Nimetatud näite põhjal erinevaid mõõteparameetreid läbi töötades on võimalik moodustada tabeli nr 3.

Tabel 3. Näide andmeanalüüsiprogrammi loodavast mõõteandmete tabelist

Data		**Fuel**	Diislikütus		
Measurement		**1**	**2**	**3**	**4**
Load	**%**	**25**	**50**	**75**	**100**
n_e	rpm	2300	2300	2300	2300
p_{inlet}	bar	0.4	0.4	0.4	0.4
t_{intake}	℃	35.05	34.53	33.8662	33.5616
B_a	kg/h	45.3	45.8	45.5522	45.8101
B_f	kg/h	0.747424	1.17725	1.56364	1.97494
P_e	kW	2.088063	4.24597	6.40208	8.37204
b_e	g/kW h	357.9507	277.263	244.24	235.897
Exhaust gas					
λ		4.33	2.909	2.102	1.703
CO_	kg/kW h	0.005563	0.00207	0.00129	0.00175
CO2	kg/kW h	1.213896	0.90534	0.83321	0.79478
HC	kg/kW h	0.000116	6.9E-05	5.7E-05	4.4E-05
NOx	kg/kW h	0.002931	0.00273	0.00358	0.00348

Tähiste selgitused: n_e – efektiivkasutegur, p_{inlet} – õhurõhk mootori sisselaskekollektoris, t_{intake} – õhu temperatuur sisselaskekollektoris, B_a – tegelik õhukulu, B_f – kütuse tunnikulu, P_e – efektiivvõimsus, b_e – kütuse erikulu, **λ –** liigõhutegur**, CO** – vingugaasi kogus heitgaasis, **CO2** – süsihappegaasi kogus heitgaasis, **HC** – põlemata kütuseosakeste kogus heitgaasis, **Nox** – lämmastikuühendite kogus heitgaasis.

Seejuures töötab andmehõive tsükliliselt, mõõteseadmetelt päritakse üksteise järel mõõtetulemusi. Iga tsükli lõpus kirjutab programm mõõtetulemused andmebaasina kasutatavasse CSV-formaadis faili. Lisaks mõõtetulemustele kirjutatakse vastavale reale ka kaks ajalist väärtust – mõõtetulemuste pärimise ajahetk, lähtudes andmehõivearvuti süsteemikellast, ning mõõtmise algusest kulunud aeg. Andmehõiveprogramm sisaldab ka funktsionaalsust mõõtetulemuste väljastamiseks xlsx-formaadis.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö käigus loodi Eesti Maaülikooli tehnikamaja mootorite katselaborisse mootorite katsestendi andmehõive- ja analüüsisüsteem koos vajaliku riist- ja tarkvaraga. Selleks uuris töö autor esmalt põhjalikult sisepõlemismootorite katsetamise põhimõtteid ja töötas läbi katselaboris kasutatavate seadmete dokumentatsiooni.

Mootorite katselaboris on kasutusel firma Schenck Pegasus GmbH Dynas3 LI250 dünamomeetriline koormusstend, mida juhitakse digitaalse x-act kontrolleriga. Katsetatava sisepõlemismootori tarvitatava kütuse koguse mõõtmiseks kasutatakse AVL *Fuel Mass Flow Meter* kütusekulumõõtjat. Õhukulu mõõdetakse seadmega AVL *Flowsonic Air,* heitgaase analüsaatoriga BOSCH BEA050. Mootorite katsestendi andmehõive- ja analüüsisüsteemi loomiseks ühendas töö autor nimetatud seadmed mootorite katselabori juhtruumis paikneva lauaarvutiga. Andmeside standardi RS-232 kasutamiseks paigaldas töö autor lauaarvutile kaks Gembird SPC-22 laienduskaarti ning ühendas lauaarvuti x-act kontrolleri, kütusekulumõõtja ja õhukulumõõtja enda valmistatud spetsiaalsete kaablitega.

Tarkvaralahenduse kirjutamiseks kasutas töö autor programmeerimiskeelt *Python*.

Loodud programm väljastab mootorite katsestendi järgmised väärtused: pöördemoment (Nm), pöörlemissagedus (min^{-1}), arendatud koormus (kW); kütusekulu (kg/h), keskmistatud kütusekulu (kg/h), liikuvalt keskmistatud kütusekulu (kg/h), kütusetihedus (kg/m^3), kütuse temperatuur (°C); õhutemperatuur (°C), õhurõhk (kPa), õhuliikumise kiiruse (m/s); vingugaasi, süsihappegaasi ja põlemata kütuseosakeste mahupõhise kontsentratsioon ning liigõhutegur (lambda arv).

Andmete analüüsimisel saab programmi abil lisaks otsestele mõõtmistele leida mõningaid sisepõlemismootori tööparameetreid arvustuslikult ning genereerida mõõtetulemustel baseeruvaid karakteristikuid visualiseerivaid graafikuid. Samuti sisaldab autori loodud tarkvara funktsiooni, mille abil on võimalik leida erinevaid statistilisi näitajaid, nt miinimum, maksimum ja keskmised väärtused, kas katses tervikuna või valitud vahemikus. Leida saab ka mingile kindlale andmepunktile vastate parameetrite väärtuseid ning nendele vastavaid statistilisi näitajaid. Näiteks, milline on mootori keskmine kütuse tunnikulu, kui see töötab 50% koormusel.

Bakalaureusetööl on praktiline väärtus – valminud mootorite katsestendi andmehõive- ja analüüsisüsteem on kavas Eesti Maaülikooli tehnikamaja mootorite katselaboris kasutusse võtta. Töö autori loodud süsteemile on võimalik lisada veel mitmeid tarkvaralisi funktsionaalsusi ning sellega saab ühendada täiendavaid sisepõlemismootorite katsetamisega seotud mõõte- ja juhtseadmeid.

ALLIKALOEND

[1] **Pulkrabek, W. W.** (1997). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Upper Saddle River: Prentice Hall. 426 lk.

[2] **Atkins, D. R.** (2009). An introduction to Engine Testing and Development. Warrendale: SAE International. 308 lk.

[3] Mootorite ja toiteaparatuuri katsetamine. (2016). Tartu: Eesti Maaülikool. 55 lk.

[4] **Kirkpatrick, T. A.** (2020). Internal Combustion Engines Applied Thermosciences. Hoboken: Wiley. 634 lk.

[5] Operating Instructions $Dynas_3$ and frequency converter. (2004). Darmstadt: Schenck Pegasus GmbH. 73 lk.

[6] **Dadt, J. H.** (2005). Motoring and Loading Test System $Dynas_3$ for Engine Test Stands. Darmstadt: Schenck Pegasus GmbH. 36 lk.

[7] x-act Operator´s Instructions Type D, DE, S. (2002). Darmstadt: Schenck Pegasus GmbH. 121 lk.

[8] Central Safety Unit Type SZM. (2001). Darmstadt: Schenck Pegasus GmbH. 45 lk.

[9] Incoming supply module ESM. (2000). Darmstadt: Schenck Pegasus GmbH. 10 lk.

[10] AVL FUEL MASS FLOW METER. (2009). Graz: AVL List GmbH. 176 lk.

[11] AVL FLOWSONIX AIR. (2015). Graz: AVL List GmbH. 162 lk.

[12] BEA 055. (2016). Plochingen: Robert Bosch GmbH. 280 lk.

[13] AVL – 577 Cooling Water and Lube Oil Supply Unit. (2016). Graz: AVL List GmbH. 55 lk.

[14] Gembird Europe B.V. (2025). SPC-22 laienduskaart [foto]. https://gembird.com/img.aspx?id=93868&w=770&h=770 (28.05.2025).

[15] **Dawoud, S. D., Dawoud, P.** (2020). Serial Communication Protocols and Standards. Alsbjergvej: River Publishers. 532 lk.

[16] x-act Start-up Instructions Type D, DE, S. (2001). Darmstadt: Schenck Pegasus GmbH. 238 p.

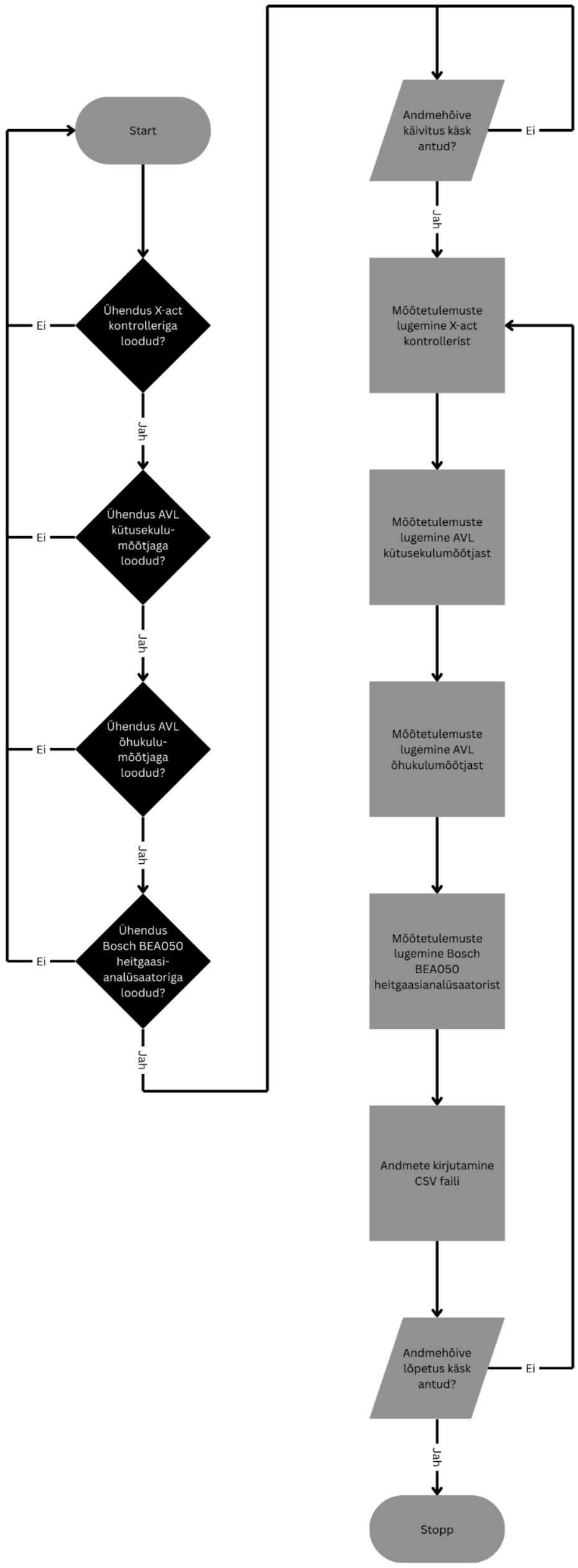
[17] Dormikor OÜ (26. mai 2025). emane DB9 pistik [foto]. https://www.oomipood.ee/image/cachewebp/catalog/DSC-109_1-400x400.webp (30.05.2025).

[18] Dormikor OÜ (26. mai 2025). emane DB25 pistik [foto]. https://www.oomipood.ee/image/cachewebp/catalog/DSC-125_1-400x400.webp (30.05.2025).

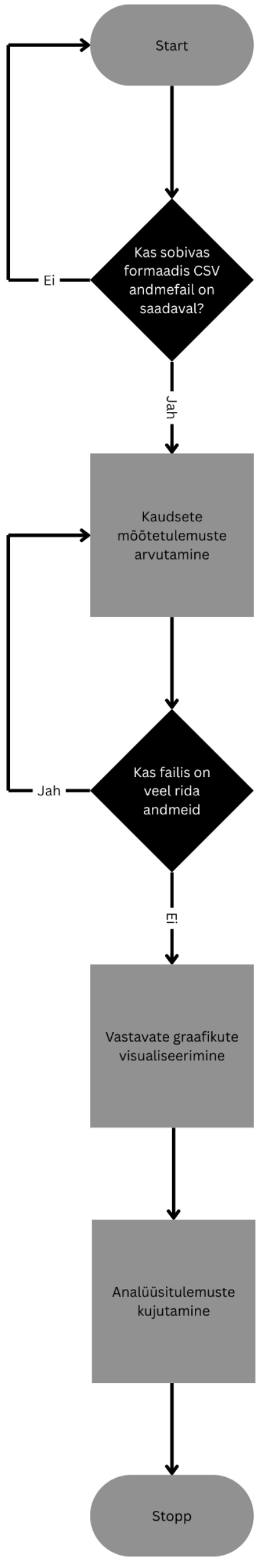
[19] Amazon Inc (2025). emane DB9 – isane DIN 8 kaabel [foto]. https://m.media-amazon.com/images/I/61ZQcIf5yPL.jpg (29.05.2025).

LISAD

Lisa 1. Andmehõiveloogika funktsionaalne diagramm



Lisa 2. Andmeanalüüsiloogika funktsionaalne diagramm



Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Aksel Bulavs,

(*autori nimi*)

sünniaeg 03.03.2000,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

   Mootorite katsestendi andmehõive- ja analüüsisüsteem,

   (*lõputöö pealkiri*)

   mille juhendaja(d) on Janar Kalder, Risto Ilves ja Roland Allmägi,

   (*juhendaja(te) nimi*)

   salvestamiseks säilitamise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi EMU DSpace lisamiseks ja Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates lõputööd reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. olen teadlik, et lihtlitsentsiga antavad õigused jäävad alles ka mulle;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Juhendaja(d) (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas)