



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut
autotehnika õppetool

MEA70LT

Ats Umbleja

**Super Stock sarja võistlusmootori sisselaskesüsteemi
elementide projekteerimine ja simulatsioon.**

Autor taotleb
tehnikateaduse magistri
akadeemilist kraadi

Tallinn
2014

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.<<A

“.....”201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”201... a.

..... allkiri

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

201.... aastasemester

Üliõpilane: Ats Umbleja, 122251 (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava: Tootearendus ja tootmistehnika

Eriala: Transporditehnika

Juhendaja: Vanemteadur, Dr. Hans Rämmal (amet, nimi)

Konsultandid: (nimi, amet, telefon)

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Super Stock sarja võistlusmootori sisselaskesüsteemi elementide projekteerimine ja simulatsioon.

(inglise keeles) Design and simulation of inlet system elements for Super Stock series competition engine.

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Lähteandmete kogumine. Sõiduki veojõustendis mõõtmise. Tutvumine tehtud tööde ning turul pakutavate toodetega.	17. märts
2.	Mootori algolukorra simulatsioonid. Võrrelda mitme tarkvaraga andmeid, teha hinnang mudelite usaldatavuse kohta.	14. aprill
3.	Projekteeritava kollektori komponentide määramine analüütiliselt ning mootorisimulatsiooni tarkvaradega.	28. aprill
4.	Sisselaskekollektori CAD mudeli loomine. Dünaamilised analüüsid kollektori voolavusest ja tugevusest.	12. mai
5.	Tehnoloogia kirjeldus ning hinnakalkulatsioon. Lõputöö esitamine juhendajale. Vormistatud tööjoonised.	22. mai

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud

probleemid:.....

Täiendavad märkused ja nõuded:.....

Töö keel:

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt

Töö esitamise tähtaeg.....

Üliõpilane /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja..... /allkiri/ kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SELEDE LOETELU	6
TABELITE LOETELU	8
EESSÕNA.....	9
1. SISSEJUHATUS.....	10
2. SISSELASKESÜSTEEMI KIRJELDUS.....	13
3. LÄHTEANDMETE KOGUMINE	14
3.2 Mootori õhutarve.....	19
4. AUTOKERE AERODÜNAAMIKA MÕJU SISSELASKELE	25
5. SISSELASKESÜSTEEMI PROJEKTEERIMINE.....	27
5.1 Akustiline ülelaadimine.....	27
5.2 Karburaator.....	29
5.3 Mootori vajalik võimsus.....	31
5.4 Nukkvõlli valik.....	33
6. SISSELASKEKOLLEKTORI ELEMENDID.....	37
6.1 Primaarkanalid	37
6.2 Sisselaskekollektori õhuanum	40
6.3 Sisselaskekollektori õhuanuma geomeetria eelanalüüs.....	42
6.3.1 Risttahuka geomeetriaga õhuanum	42
6.3.2 Silindriline õhuanum	45
6.3.3 Omavõnkesagedused	46
6.3.4 Anuma tugevus rõhupulsatsioonidele	48
6.3.5 Õhuanuma geomeetria valik lähtudes simulatsioonide tulemustest.....	50
7. SISSELASKEKOLLEKTORI PROJEKTEERIMINE.....	51
7.1 Kollektori õhuruumalamudeli projekteerimine ja analüüs.....	51
7.1.1 Traktide õhuruumala mudel	51
7.1.2 Õhumassi jaotumine traktidesse dünaamiliste tingimuste korral.....	53
7.1.3 Õhuruumalamudeli voolavuse analüüs	54
7.1.4 Õhuanuma ruumala analüüsi kokkuvõte	57
7.2 Kollektori tootemudeli loomine	57
7.3 Tugevusanalüüs.....	60
8. TOOTMISTEHNOLOOGIA	62
8.1 Materjali valik	62
8.2 Komponentide valmistamine.....	62

9. PROJEKTEERITUD TOOTE MAKSUMUS	64
KOKKUVÕTE	66
SUMMARY	69
Kasutatud kirjandus:.....	72
LISAD	73
LISA 1	73
Sisselaskekollektor(Originaalsuurus A1).....	73
LISA 2	74
Õhuanum(originaalsuurus A1).....	74
LISA 3	75
Karburaatori flants.....	75
LISA 4	76
OSA I.....	76
LISA 5	77
OSA II.....	77

SELEDE LOETELU

Sele 1.1. Võistlusauto mootor. 5 liitise töömahuga LG4	10
Sele 3.1 3D skännimiseks ettevalmistatud mootoriplokk ja skanneerimine Atos'ega.....	14
Sele 3.2 Vasakul NX-i imporditud STL fail ning paremal on näha mõõdetud andmete järgi koostatud klapiajami süsteem esimesele silindrile koos plokikaantega.	14
Sele 3.3. Kepsu pikkuse mõõteprotokoll.....	15
.....	16
Sele 3.4 LG4 mootoriga sõiduk veojõu mõõtestendis.....	16
Sele 3.5 Sõiduki esialgne stendis mõõdetud võimsuse kõver	16
Sele 3.6 NX Motion Simulation keskkonnas sisselaske klapi avanemine	19
Sele 3.7 Klappide avanemise diagramm, ekspordituna NX-ist. Punane värv tähistab sisselaske klappi ning sinine väljalaske oma.	20
Sele 3.8. GT-Power mootori simulatsiooni ülesehitus.	20
Sele 3.9 Üldvaade ühest silindrite plokist simulatsioonis.	21
Sele 3.10 Mõõdetud ja simuleeritud väliskarakteristikute graafikud	22
Sele 3.11 GT-Poweriga simuleeritud täiteaste	23
Sele 3.12 GT-Poweriga simuleeritud momendi graafik.....	23
Sele 3.13 Keskmise õhumassi vool õhupuhasis	24
Sele 3.14 Keskmise õhumassi voolu kiirus õhupuhasis	24
Sele 4.1 Rõhu jagunemine auto kere piirkondades	25
Sele 4.2 Pontiac Trans Am mootorikattes olev avaus A-piilarite vahetus läheduses	26
Sele 4.3 Pontiac Trans Am mootorikattes olev õhuvõtu ava eestvaates	26
Sele 5.1 Rõhulaine tekkimine ja peegeldumine [2].....	27
Sele 5.2 Primaarkanali pikkuse sõltuvus mootori pööretest	28
Sele 5.3. Karburaatori põhimõtteline ehitus.....	30
Sele 5.4. Käikude kiiruse kasv sõltuvalt mootori pööretest.	31
Sele 5.5 Miinimum väärtustega mootori momendigraafik saavutamaks aega 16 sekundit	32
Sele 5.6. Erinevate tarkvaradega simuleeritud võimsusekõverad	34
Sele 5.7. Toodetavate nukkvõllide mõju pöördemomendile võrreldes algväärtustega.....	35
Sele 5.8. Performer-Plus nukkvõlli mõju võimsuse kõverale	35
Sele 6.1. Klapikanali pikkus võetuna STL faili ristlõikest.....	37
Sele 6.2 Goal Seek käsuga leitud primaarkanali diameeter voolukiiruse 75 m/s juures.....	38
Sele 6.3. Optimeerimistöööriista kasutajaliides programmis Lotus Engine Simulation.....	39
Sele 6.4. Ühe anumaga sisselaske mudel Lotus Engine töökeskkonnas	40
Sele 6.5. Kahe võrdse ruumalaga anumaga kollektori mudel Lotus Engine töökeskkonnas ...	40

Sele 6.6. Mootorikatte paigutus mootori suhtes	41
Sele 6.7. Õhuvoolu osakeste jälitusjooned karburaatorist traktidesse läbi kollektori anuma. .	42
Sele 6.8 Õhuosakeste liikumine, kui traktide avad asuvad erinevatel kõrgustel.....	43
Sele 6.9. Turbulentse ning laminaarse voolavuse olemasolu enne trakti sisenemist	44
Sele 6.10. Külgmiste traktide mõlema voolamisliigi esindatus	44
Sele 6.11. Silindrilise kujuga sisselaskekollektori anum	45
Sele 6.12. Silindriline õhuanum staatilises olekus, kui voolamine toimub kõigist traktidest ..	46
Sele 6.13. Esimene mood silindrilisel anumal 867 Hz.....	47
Sele 6.14. Ristahuka kujulise õhuanuma esimene mood, 1568 Hz.....	47
Sele 6.15. Anuma deformatsioon tingituna sisemisest rõhust 3 bar.....	48
Sele 6.16. Kollektori õhuanuma materjali väsimuse ohutustegur	49
Sele 6.17. Kollektori õhuanuma materjali tugevuse ohutustegur.....	49
Sele 7.1. Ühendatud torustikuga kollektori õhuruumala mudel	52
Sele 7.2. Õhuvoolu kiiruse graafik 5200 pöördel Lotus Engine Simulation tarkvarast.....	53
Sele 7.3. Õhumassi voolukiirus sisselaske takti kestvuse hetkel	54
Sele 7.4. Alarõhk sisselaskekollektoris	55
Sele 7.5. Õhuosakeste liikumise kiirus õhuanumas kaugeimasse trakti karburaatorist	56
Sele 7.6. Õhukeeriste toimel traktist tagasi imetavad õhuosakesed	56
Sele 7.7. Sinine õhumudel koos loodud anuma korpuse konstruktsiooniga	57
Sele 7.8. Kollektori anuma osaline konstruktsioon	58
Sele 7.9. Projekteeritud sisselaske kollektori koost mootori 3D mudelil.....	59
Sele 7.10. Projekteeritud sisselaskekollektor	59
Sele 7.11. Õhuanuma esimene mood 477 Hz.....	60
Sele 7.12. Väsimuspinged õhuanumas rõhuga 3 bar.....	61
Sele 7.13. Trakti esimene mood, 477 Hz	61
Sele 8.1. Ülemineku CAM freesimine	63

TABELITE LOETELU

Tabel 3.1 Lähteandemed arvutusmoodulis.....	17
Tabel 3.2. Hoovõtuga läbitav vahemaa ajavahemike kaupa	18
Tabel 5.1 Sisselaske trakti pikkused vastavalt valitud mootori pööretele.....	29
Tabel 5.2 Valitud võimsuse kõver läbib 400m hinnanguliselt III käiguga 3800 pöördel minutis	32
Tabel 5.3 Arvutuslikud veerandmiili ajad erinevate nukkvõllidega	36
Tabel 9.1 Tööstlustele kuluv aeg	64
Tabel 9.2 Materjali kulu	64
Tabel 7.3 Ühe toote kulud kokku	65

EESSÕNA

Lõputöö teema tulenes reaalsest vajadusest parandada olemasoleva mootori võimekust kiirendusspordis.

Autor valis teema, kuna see on huvipakkuv ning autoinsenerile vajalikke oskusi arendav. Kuna töö on plaanis ka reaalselt ellu viia ning esimesed sammud selles suunas juba tehtud, tekitab valitud teema entusiasmi ka pärast valmimist.

Autor tänab töö juhendamise eest doktor Hans Rämmalit, kelle loetud õppeaine tekitas süvenenud huvi mootori gaasivahetusprotsessidest ning kelle konsultatsioonid on pannud autori huvituma teadusest, mis seisab siseõlemismootori arendustöös. Veel tänab autor doktorant Henri Lend'i abistamiseks mootori osade 3D skanneerimisel ja Taavo-Erkki Vitsut'it, kes usaldas autorile mõõtmiseks mootori detailid ning jagas ka üldist infot Eesti kiirendusspordis toimuvast.

Eriti tänulik on autor oma elukaaslasele ning tütrele mõistva suhtumise ning toetuse eest lõputöö valmimiseks.

1. SISSEJUHATUS

Käesolevas magistritöös projekteeritakse sisselaskekollektor Super Stock sarjas sõitma hakkavale autole ning käsitletakse ka kollektori valmistamise tehnoloogiat. Kollektor projekteeritakse vastavalt eelarve mahule ning tehnilistele piirangutele võimalikult optimaalne.

Vastavalt National Hot Rod Association (NHRA) kirjeldusele on Super Stock sarjas lubatud algselt osaleda sõidukiga, millel on tehase poolt ettenähtud mootoriplokk, plokikaaned ning karburaator. Sisselaske projekteerimisel arvestatakse ka reeglit, mis nõuab autokere originaalset välimust. NHRA kodulehel on saada tabelid tehase parameetritega mootori detailidest ning seerianumbritest, et oleks võimalik tuvastada kas mootor antud sarja sobib. Sarja olemuseks on läbida veerand miili pikkune distantsvõimalikult kiiresti. Hooajati tehakse aga reeglitesse korrekture, et muuta ala populaarsemaks võistlejatele ning samuti ka huvitavamaks pealtvaajatele, lubades teha muudatusi kas rohkem või muutes ajakoeffitsente, millal süttib erineva võimsusega autode stardituli.

Võistlusautoks on 1987 aasta Pontiac Firebird(Sele 1.1), millel on kasutusel 1983. aasta LG4 mootor, kubatuuriga 5002 cm³ ning mis kasutab Rochester Quadrajete karburaatorit. Tehas hindas mootori võimsuseks 150 hobujõudu 4000 pöördele minutil ning 325 N*m 2400 pöörde juures. Kas mootor selliseid väliskarakteristikuid ka 30 aastat hiljem omab, selgitab välja veojõu mõõtestend, mille tulemustest lähtudes ka uus sisselaske kollektor projekteeritakse.



Sele 1.1. Võistlusauto mootor. 5 liitise töömahuga LG4

Sisselaskekollektori teemal on teinud eelnevalt magistritöö tudengivormeli meeskonna liige Markko Püü võistlusautole FEST12, kuid masin kasutas nelja silindriga mootorratta mootorit, mis töötab ringraja sõidu rezhiimil, erinedes oluliselt kiirendusvõistluse rezhiimidest.

Teema osutus valituks, kuna plaanis on kirjeldatud autoga sõitma hakata Super Stock sarjas ning nägin head võimalust kursustel õpitut reaalselt rakendada. Olles tutvunud olemasolevate lahendustega antud mootoritüübile, on tõenäoline, et suurel hulgal neist ei ole tõenäoliselt kasutatud akustilist ülelaadimist ning seega on kasutamata sellest meetodist tulenev võimsuse lisa. Üldiselt kasutatakse ostutooteid, sest sageli napib meeskondadel ise projekteerimiseks inimressurss ning põhiline eelis saadakse kogemuslikult erinevaid ostutoodete kombinatsioone proovides.[13]

Kuna võistlusautoks on karburaatormootoriga Trans Am, siis esialgu välistab eelarve ülelaadimisseadmed ning ka sissepritse lisamise ning täiteastme tõstmiseks tuleb kasutada projekteerimisel gaaside liikumisdünaamikast tingitud efekte, mis aitavad kaasa täiteastme parandamisele isegi üle 100%. Lisaks seab piirangud ka auto madal kapotijoon, ning V paigutusega mootori iseärasus, kus kollektor peab gabariitidelt mahtuma kahe silindrirea ning kapoti vahele. Sealjuures peab kollektor olema madala õhuvoolu takistusega, hea kütuse ja õhu jaotamisega silindrite vahel, traktide pikkused peaksid kasutama ära akustilist ülelaadimist.

Hetkel kommertslikult pakutavatest toodetest ei kasutata karburaator mootoritel häälestatud traktide pikkusi, kuna nende mahutamine mootoriruumi on keeruline ning kindlasti ka kallim toota. Selle veendumiseks mõõdeti turul oleva trakti pikkuseid ning saadud väärtus viitab kasulikule efekti tekkimisele alles pöörtele, mida antud mootor ei kasuta.

Sisselaske kollektori modelleerimiseks kasutatakse Gamma Technologies GT-Suite programmipaketi GT-ISE moodulit, Lotus Engine Simulation moodulit, Siemens'i CAE (Computer Aided Engineering) tarkvara NX 9.0 ning Solid Edge. NX9 pakub paremaid võimalusi 3D töötamiseks, seda eriti pindadega ning STL(Stereo Lithography) failidega, mida tuli käesolevas töös palju teha. Solid Edge'i 2D keskkond on aga kasutajasõbralikum, ning näiteks dxf(drawing exchange format) loomine oluliselt kiirem. Lisaks leiab rakendust ka MS Office Excel ning OpenOffice Calc tabel arvutusteks ning andmete vahetamiseks erinevate simulatsiooni programmide vahel.

Töös kirjeldatakse sisselaske süsteemi üldiselt ning selle mõju mootori väliskarakteristikutele. Lähteandmed koguti mõõtestendist ning kasutati ka 3D skanneerimist, et mõõtetulemused oleksid võimalikult täpsed. Lisaks simuleeritakse hetke mootori võimekust veerandmiilil analüütiliselt tabelarvutusprogrammi mooduliga ning võrreldakse saadud tulemust tehase poolt pakutuga ning samuti ka reaalse sõidukitse tulemusega, et veenduda simulatsioonide õigsuses. Mootori õhutarve leitakse simulatsiooni programmiga ning tehakse ka kontrollarvutus analüütiliselt. Uuritakse ka aerodünaamikat, et otsustada kuhu peaks paigutama filtreerimata õhu sisenemise ava.

Projekteerimise peatükis kirjeldatakse sisselaskesüsteemi komponente ning nende valikut, leitakse arvutuslikult eesmärgi täitmiseks vajalik mootori momendi kumer ning projekteeritakse sisselaske elemendid vastavalt sellele, et eesmärk oleks saavutatud. Lisaks analüüsitakse projekteeritud kollektori voolavust LEM(Lõplike Elementide Meetod) arvutitarkvaraga NX.

Tootmistehnoloogia kirjeldab, kuidas kollektori elemendid valmistatakse ning millisest materjalist. Lisaks simuleeritakse ka freesitavaid detaile CAM (Computer Aided Manufacturing) tarkvaraga, et oleks täpsem ülevaade tootmisele kuluvast ajast. Lehtmetsalli ja painutustööde jaoks küsitakse hinnapakkumised metallitöötlus ettevõtelt.

Majanduslikus põhjenduses leitakse kollektori prototüübi loomise kulutused materjalile ning töötlusprotsessidele.

2. SISSELASKEÜSTEEMI KIRJELDUS

Sisselaske süsteemi eesmärgiks on tagada mootorile värske õhu kogus põlemisprotsessiks silindrites. Sisselaske süsteem koosneb õhuvõtu kanalist, õhufiltrist, karburaatorist või eraldi drosselklapist sissepritse mootorite puhul, sisselaske kollektorist, traktidest ning lõpeb ühe või enama klapiga. Kogu süsteem seab mootorile ette piirid, kui suure õhu massi hulgaga ta suudab oma silindrid täita. Iseloomustavat parameetrit nimetatakse täiteastmeks ning ta omab mootori võimsuse juures proportsionaalset tähtsust. Mootori võimsus antakse valemiga[1]

$$P = \frac{\eta_f \eta_v N V_d Q_{HV} \rho_{a,i} \left(\frac{F}{A}\right)}{2} \quad (2.1)$$

Kus η_f – mootori kasutegur

η_v – täiteaste

N – mootori pöörded

V_d – silindri töömaht

Q_{HV} – kütuse kütteväärtus

$\rho_{a,i}$ – õhutihedus

$\frac{F}{A}$ – kütuse-õhu suhtarv

Täiteaste võib iseloomustada nii kogusüsteemi, kui ka ainult sisselaske trakti ning klapi õhu pumpamise efektiivsust. Ühel juhul võetakse arvesse atmosfääri ning teisel juhul kollektorist asetsevat õhutihedust. Täiteaste tüüpilised väärtused mootorile, mis kasutab õhu pumpamiseks ainult kolbide poolt tekitatud hõrendust, on 80-90% ning see leitakse järgmise valemiga

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,i} V_d} \quad (2.2)[1]$$

kus, η_v – täiteaste

V_d – silindri töömaht

m_a – õhumass

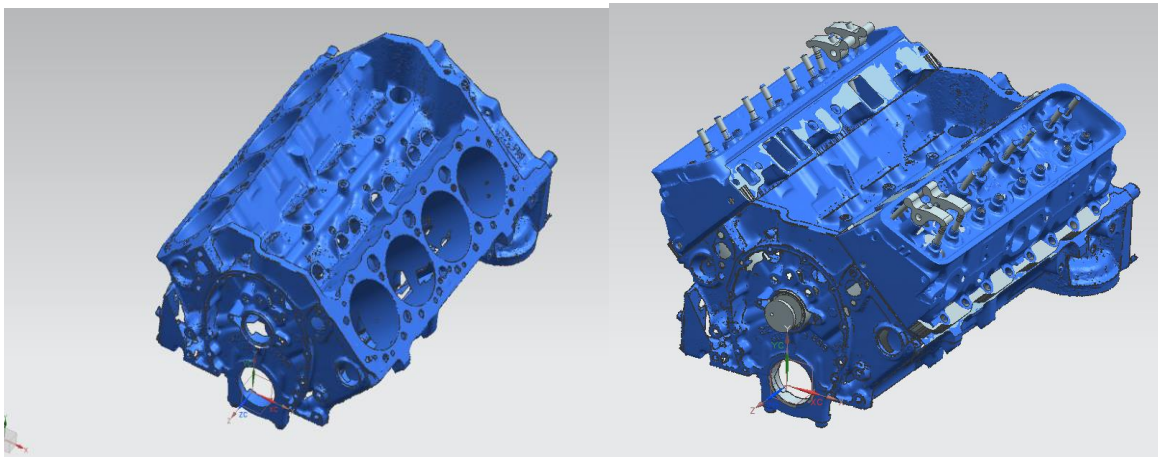
$\rho_{a,i}$ – õhutihedus

3. LÄHTEANDMETE KOGUMINE


Lähteandmete jaoks kasutati tagurpidi projekteerimist (inglise k. reversed engineering). Selleks kasutati Tallinna Tehnika Ülikooli mehaanikainstituudi Atos 3D skännerit(näha seel 3.1 vasakul) millega loodi suurematest detailidest(mootoriplokk, plokikaaned, sisselase) STL failid. Väiksemate detailide mõõtmised teostati AS Normas Mitituyo mõõtemasinaga, kus lihtsamate geomeetria mõõtetulemused vormistati protokollina (sele 3.3, kepsu pikkus) ning keerulisemad(näiteks nukkvõlli nukkkide profiilid) salvestati dxf faili.

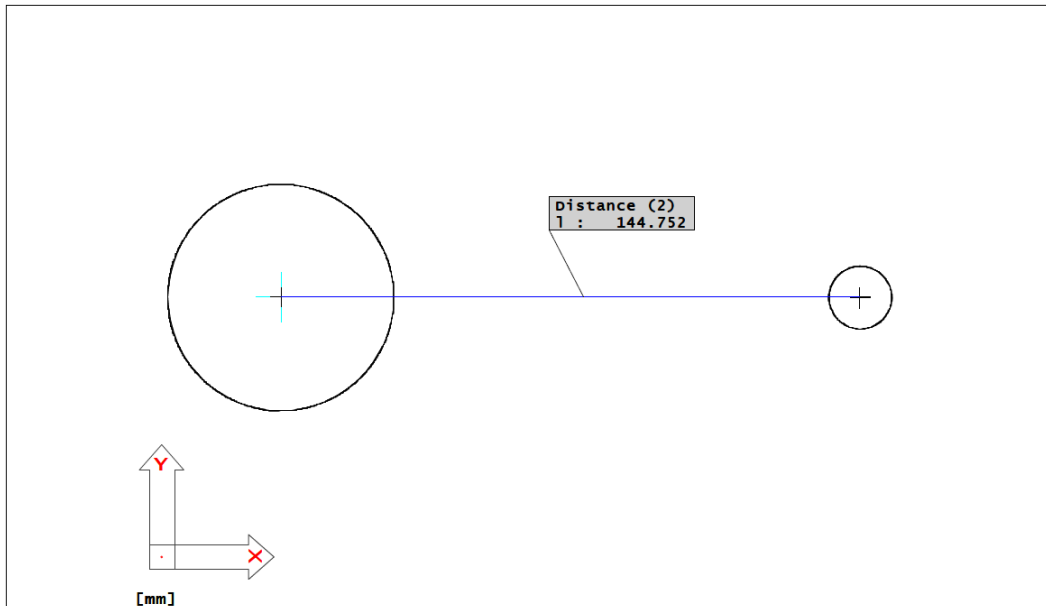


Sele 3.1 3D skännimiseks ettevalmistatud mootoriplokk ja skanneerimine Atos'ega



Sele 3.2 Vasakul NX-i imporditud STL fail ning paremal on näha mõõdetud andmete järgi koostatud klapijamsi süsteem esimesele silindrile koos plokikaantega.

 NORMA	MÕÕTEPROTOKOLL RECORD OF MEASUREMENTS		Nimi Name	Allkiri Signature	Kuupäev Date
Rakis(t)je tarnija Tool(s) supplier		Mõõtis Measured	Tiit Sassian		25.02.2014
Rakis(ed) Tool(s)	Tellimuse nr Order No	Toote nr Part No	Joonise nr Drawing No	Pesa nr Cavity No	Partii nr Batch No
			Revision	Detail	



Printed: 25.02.2014 20:37:29

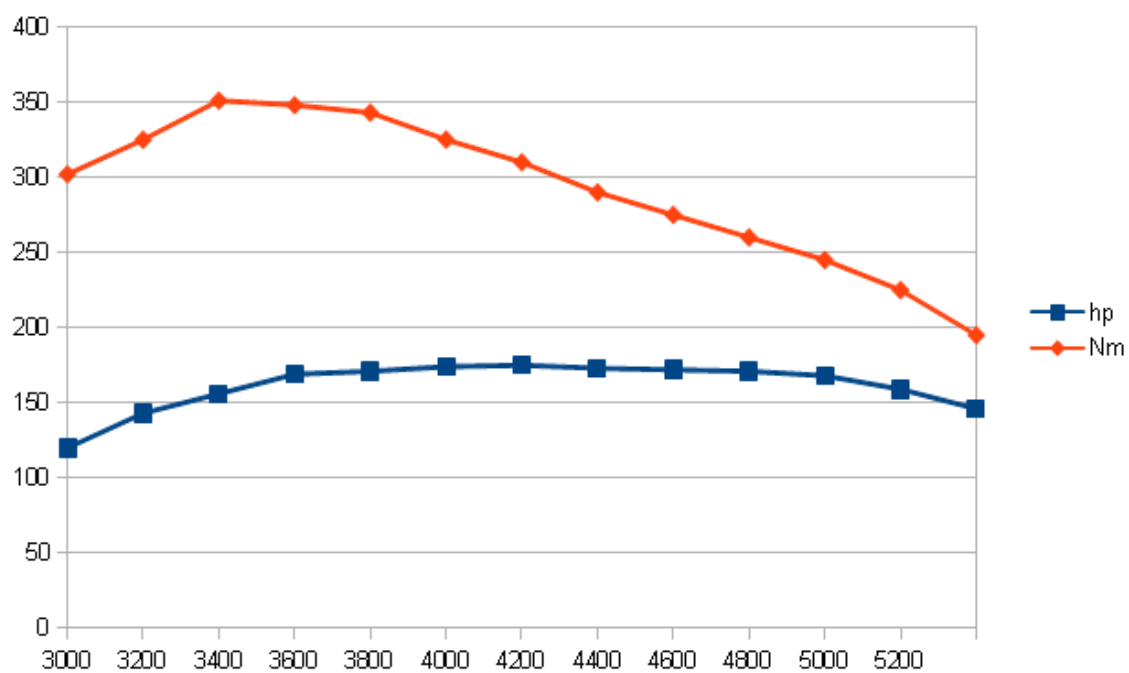
Page 1 of 1

Sele 3.3. Kepsu pikkuse mõõteprotokoll

Lisaks mootori komponentide mõõtmisele teostati ka sõiduki jõukõverate mõõtmine Ligur Motors OÜ stendis. Seel 3.5 on toodud auto esialgne võimsuse sõltuvus pööretest graafiliselt. Maksimaalsed 176,6 hobujõudu saavutab mootor 4037 pöörde juures ning 359 Nm saavutatakse 3312 pöörde juures.



Sele 3.4 LG4 mootoriga sõiduk veojõu mõõtestendis



Sele 3.5 Sõiduki esialgne standis mõõdetud võimsuse kõver

Kuna antud sõiduki veerandmiili läbimise logifailid puuduvad, siis kasutades sõidukite liikumisteooria kursusel loodud tabelarvutuseprogrammi moodulit[4], saab hinnata mootori suutlikust veerandmiilil ning teha esialgse hinnangu, millist paranemist ajas oleks realne

oodata. Lähteandmed on toodud tabelis 1, kus kollased lahtrid on sisestatavad andmed ning sinised lahtrid mooduli abil arvutatud väärtused

Tabel 3.1 Lähteandemed arvutusmoodulis

Auto mark		Pontiac	
Mudel		Firebird	
Väljalaskeaaasta		1986	
Mootori töömaht		5,0	L
Suurim võimsus		221	HP
Rehvimõõt			
Rehvi laius	mm	265	
Profiliindeks		50	
Velje mõõt, tollides		14	
Ratta raadius		0,3103	
Katsemass, kg	Tühimass + juht	1530	
Vertikaalkoormus esiteljele, %		54	
Vertikaalkoormus tagateljele, %		46	
Veotelje efektiivsust arvestav tegur		1,3	
Max veojõud		6417,5	
lauppind, m ²		1,928	
õhutakistustegur		0,31	
õhutihedus, kg/m ³		1,202	
aerotegur		0,598	
veeretakistustegur		0,012	
Peaülekande ülekandearv		3,23	
I käigu ülekandearv		3,06	
II käigu ülekandearv		1,63	
III käigu ülekandearv		1,00	
IV käigu ülekandearv		0,69	

Moodul kasutab ühtlaselt muutuva liikumise seoseid ning arvestab ka õhu- ja veeretakistust. Veerandmiili läbimiseks vajaliku aja suurusjärgu hindamiseks kasutatakse tabelarvutustes keha ühtlaselt muutuva sirgjoonelisel liikumise koordinaadi valemit

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{a_x t^2}{2} \quad (3.1)[5]$$

kus x - punktmassi koordinaat ajahetkel t ,

a_x – punktmassi kiirendus

t – aeg

x_0 – punktmassi alguskoordinaat

v_0 – punktmassi algne kiirus

Läbitav vahemaa ajavahemike kaupa, on toodud tabelis 3.2, kus punase kirjaga rida on ligilähedane 400m läbimisel.

Tabel 3.2. Hoovõtuga läbitav vahemaa ajavahemike kaupa

Käik	Kiirendus	Aeg, s	Kiirus, km/h	Vahemaa, m
I	0	0,00	0	0
	4,77	2,01	34,55	9,65
	5,14	2,15	37,02	11,03
	5,56	2,28	39,49	12,39
	5,51	2,40	41,96	13,79
	5,42	2,53	44,43	15,29
	5,13	2,66	46,90	16,94
	4,88	2,79	49,36	18,77
	4,55	2,94	51,83	20,82
	4,29	3,09	54,30	23,10
	4,04	3,26	56,77	25,64
	3,79	3,43	59,24	28,45
	3,46	3,62	61,70	31,62
	2,97	3,84	64,17	35,35
II	2,80	4,14	64,87	40,82
	2,76	5,59	69,50	69,95
	2,70	6,06	74,14	79,34
	2,53	6,55	78,77	89,79
	2,38	7,08	83,40	101,60
	2,19	7,64	88,04	115,01
	2,03	8,25	92,67	130,31
	1,88	8,91	97,30	147,64
	1,73	9,62	101,94	167,34
	1,53	10,41	106,57	190,17
	1,25	11,34	111,20	218,12
III	1,29	11,64	113,29	227,45
	1,15	13,28	120,84	280,55
	1,02	14,80	128,40	333,05
	0,86	16,31	135,95	387,76
	0,72	17,89	143,50	448,35
	0,59	19,61	151,05	517,76
	0,45	21,55	158,61	599,84
	0,28	23,78	166,16	698,98

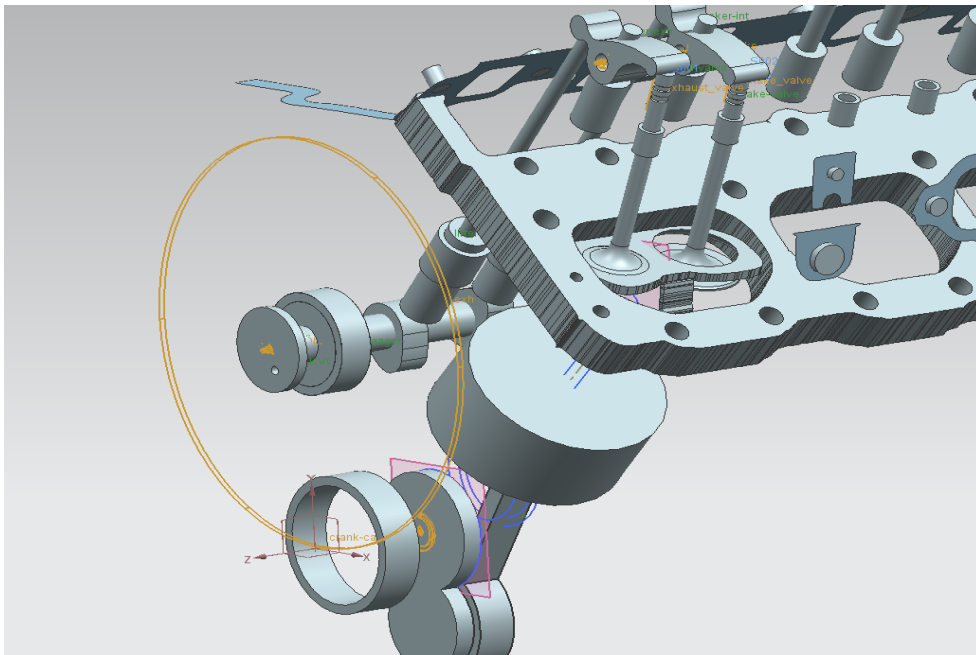
Moodulist järeldeb, et 400m läbimiseks kulub autol ligi 17 sekundit. Sellise aja pakkus välja ka valmistaja tehas(16,8 sekundit) [6] ning samuti on selline aeg saavutatud tehaseseades autoga Tartus asuval Raadi lennuväljal, kus sai mõõta auto 400m läbimise aega võistlustel kasutatava tehnikaga ning mis andis ka lõppkiiruse samasse suurusjärku. Seega võib mooduli poolt pakutavat hinnangut aktsepteerida.

Muutes momendigraafikut pöörete vahemikus, kus tõenäoliselt toimuvad käiguvahetused ning mootor vajab kiirendamiseks enam võimsust, näitas moodul aja paranemist kuni sekund. Seega seatakse töö eesmärgiks veerandmiil läbida ajavahemikus 16,00 – 16,30 sekundit.

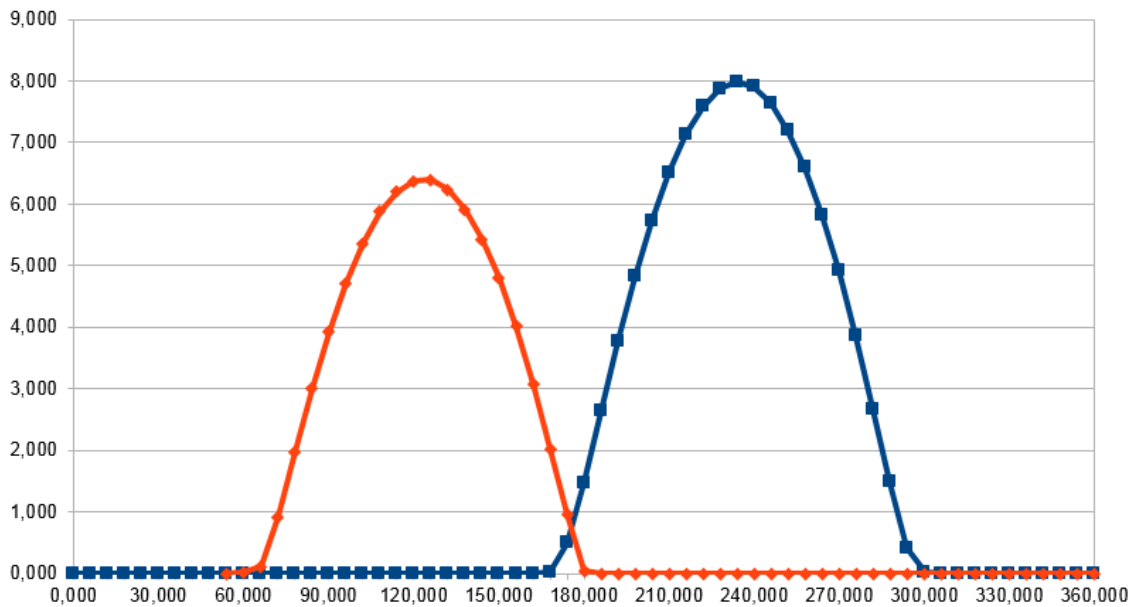
3.2 Mootori õhutarve

Et määrata projekteeritava sisselaske kollektori traktide pikkused, läbimõõdud ning anumate mahud, tuleb välja arvutada mootori õhu tarbimine pöörete vahemikus, kus kollektor töötab kõige sagedamini. Selleks kasutatakse mootori simulatsiooni tarkvara GT-Suite moodulit GT-ISE(GT-Power) ning GT-Post keskkonda.

Kuna gaasivahetuse protsessis on suur roll ka klapimehhanismil siis klappide tõusude leidmiseks sai kasutada NX-i Motion Simulation keskkonda(sele 3.6), milles sai simuleeritud eelnevalt mõõdetud detailide koostu dünaamikat ning eksportida saadud tulemused Excel'i failiformaati(sele 3.7). Nii sai vajalikud väärtused ka klapi tõusule vastavalt nukkvõlli pöördenurgale.

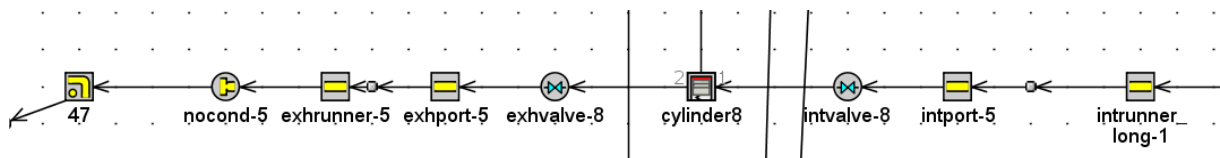


Sele 3.6 NX Motion Simulation keskkonnas sisselaske klapi avanemine

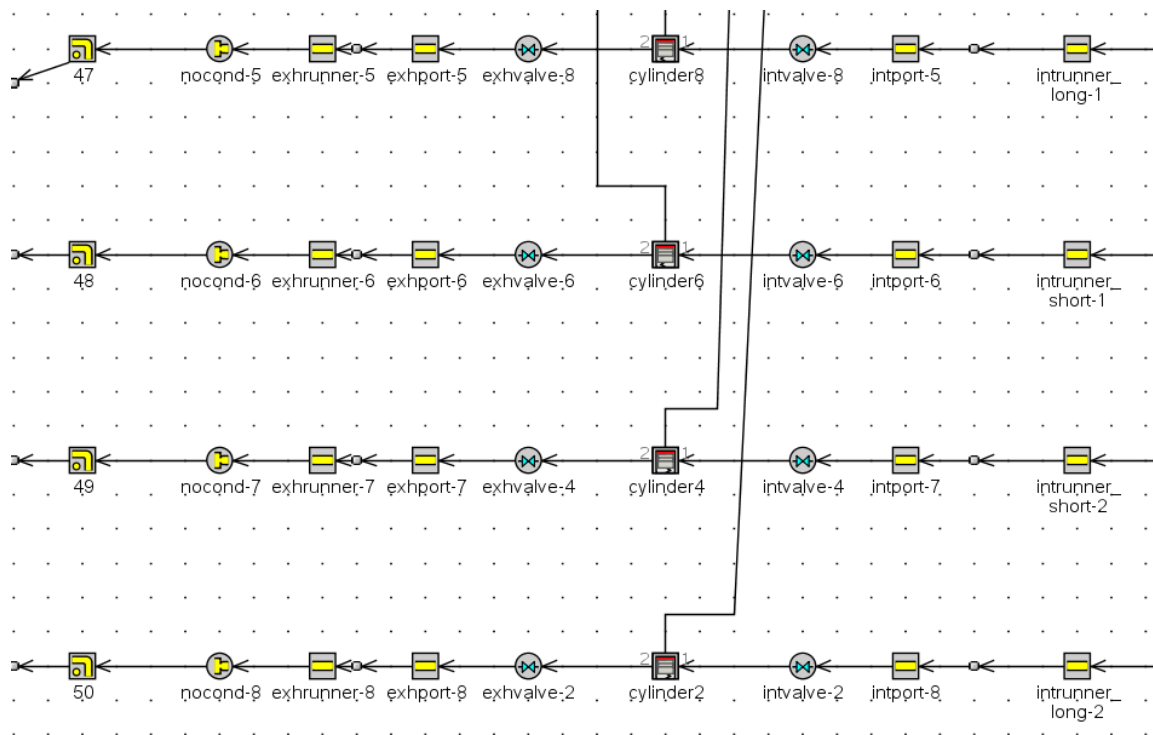


Sele 3.7 Klappide avanemise diagramm, ekspordituna NX-ist. Punane värv tähistab sisselaske klappi ning sinine väljalaske oma.

Seejärel loodi GT-ISE keskkonnas 8 silindrilise mootori simulatsioon, kuhu sisestati mõõdetud väärtused ning defineeriti testi keskkond ning tingimused. Seel 3.8 on toodud ühe silindri juurde kuuluvad simulatsiooni komponendid.

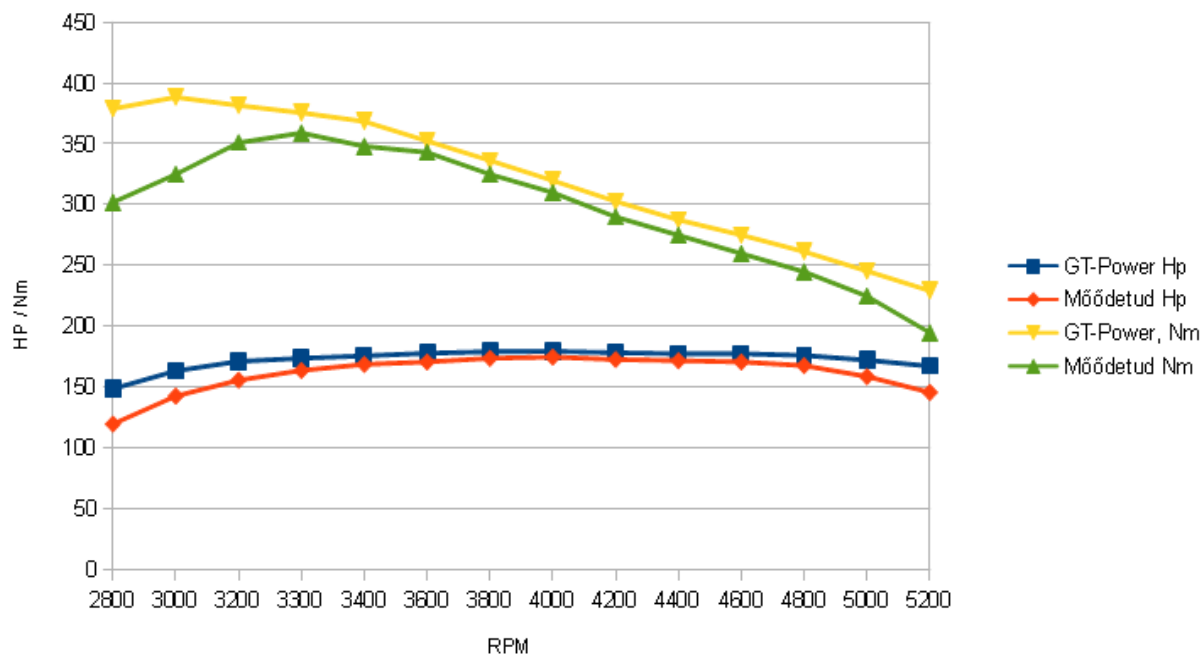


Sele 3.8. GT-Power mootori simulatsiooni ülesehitus.



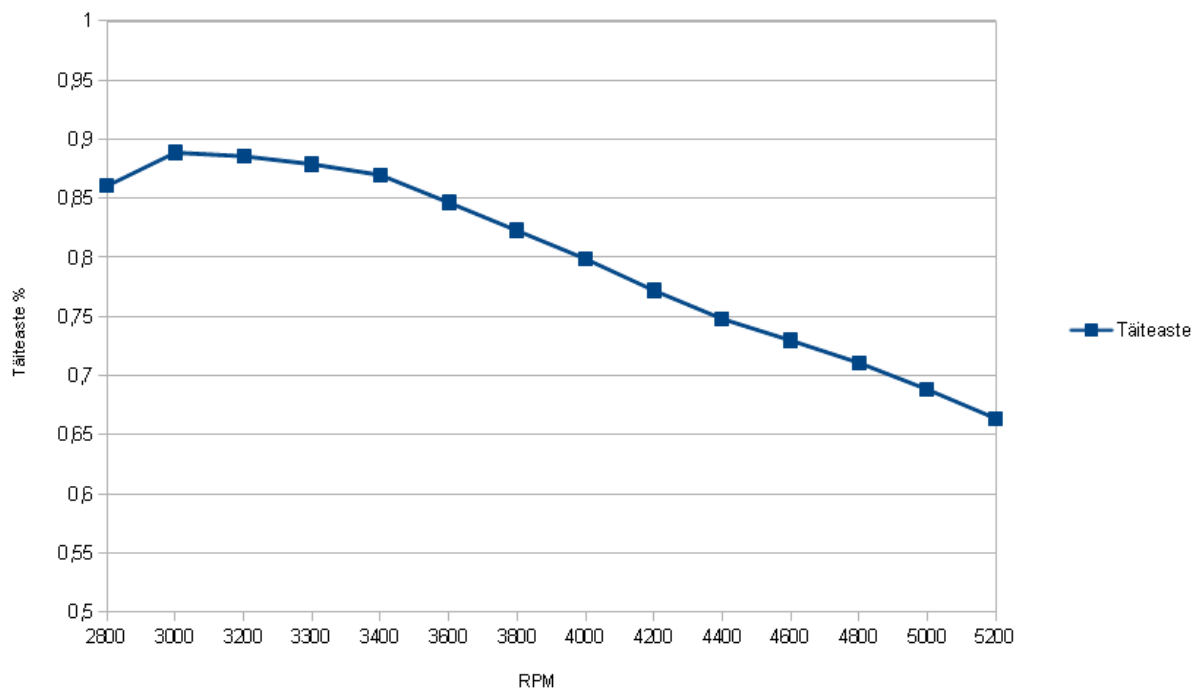
Sele 3.9 Üldvaade ühest silindrite plokest simulatsioonis.

Kuna realselt mõõdetavat võimsusekõver on mõõdetud sõiduki rattast, siis mõjutavad tulemusi ka asjaolud, mida GT-Power-iga loodud mootori simulatsioonis on jäetud arvestamata. Silmas pidades kirjanduses toodud automaatkasti kasutegurit 80-86 % [9], mida vaatluse all oleval masinal kasutatakse, võiks GT-Poweri poolt loodavad momendi graafikud olla mõõdetutest mitte rohkem, kui 20% suuremad. Mõõdetud ja GT-Poweriga simuleeritud väliskarakteristikud on toodud seel 3.10.

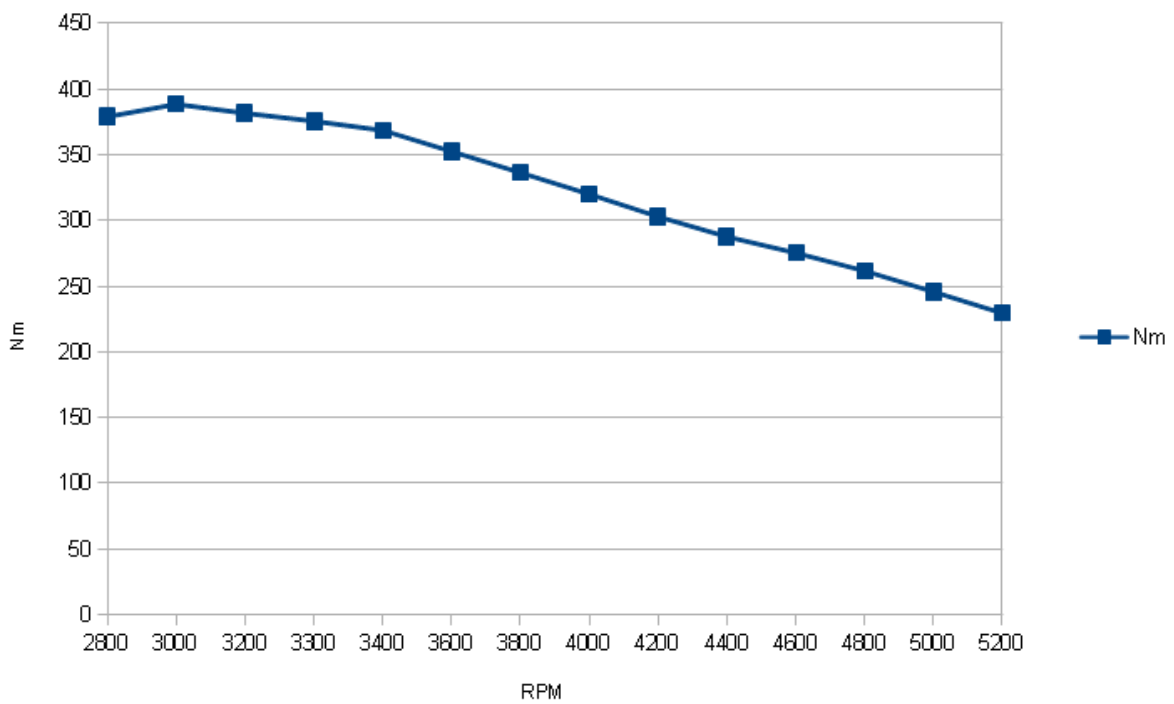


Sele 3.10 Mõõdetud ja simuleeritud väliskarakteristikute graafikud

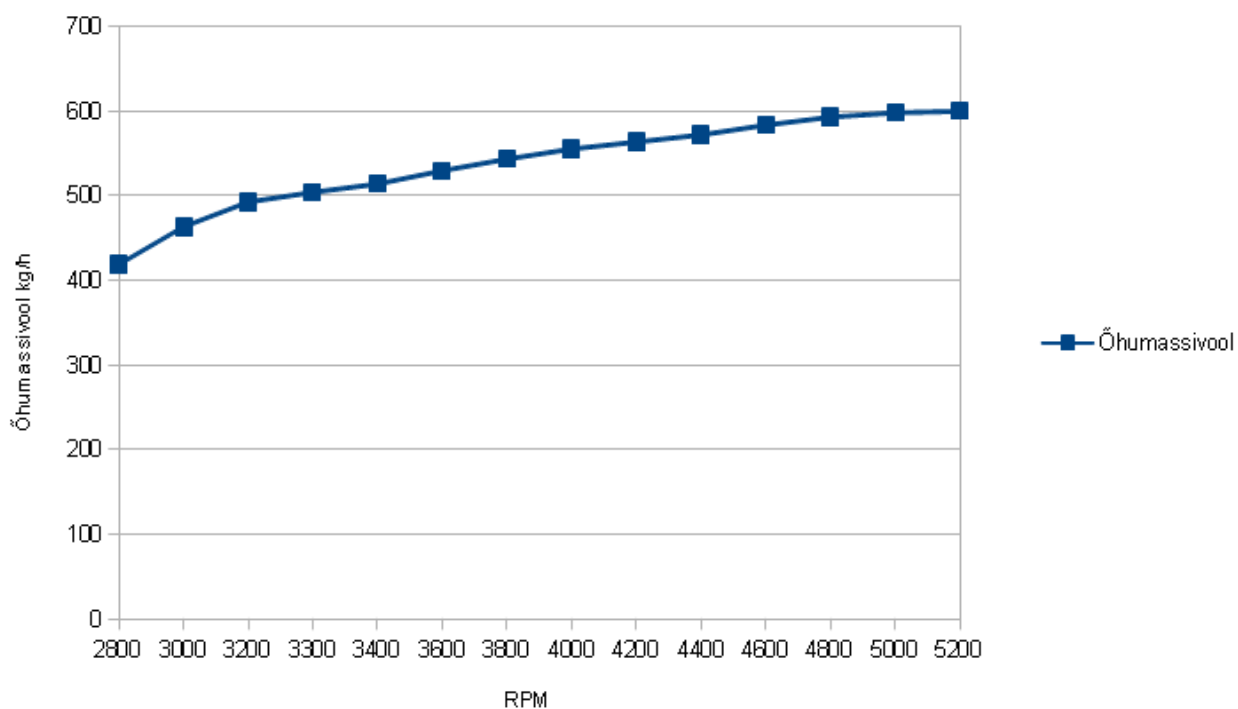
Simulatsioon seati tulemusi arvutama 2800 vāntvōlli pōrdest 5200 pōrdeni minutis, sammuga 200. Samm seati lūhemaks vahemikus 3200-3400, sest just seal saavutas sõiduk pingis maksimaalse pōrdemomendi. Seejārel genereeriti post fail (inglise k. tulemuste fail), mille kuvamiseks on eraldi moodul GT-POST. Selles keskkonnas saab hōlpsalt vaadelda huvi pakkuvast komponendis mitmete parameetrite graafikuid ning vārtusi. Seel 3.11 ja 3.12 on nāha algseades sisselaske kollektori tāiteaste graafik ning momendi graafik, mis jāllegi kinnitab asjaolu, et tāiteaste mōjutab mootori jōudlust. Ōhuhulk, mis lābib ōhupuhastit on toodud Seel 3.13.



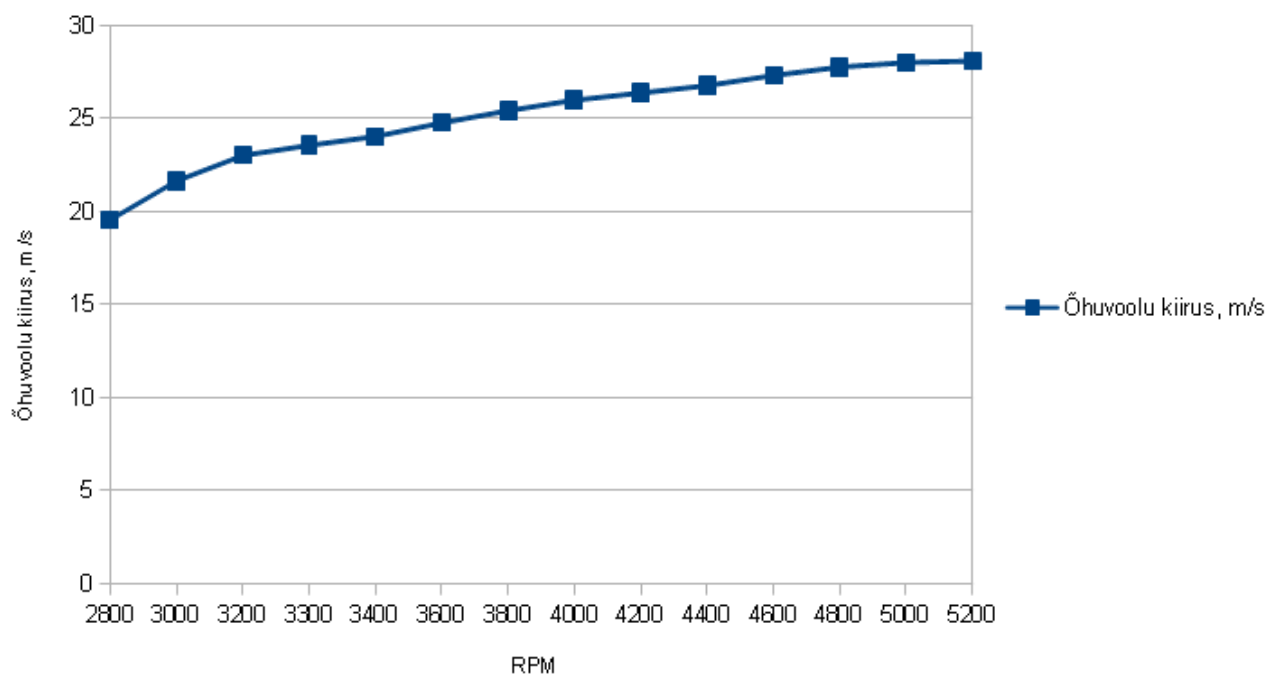
Sele 3.11 GT-Poweriga simuleeritud täiteaste



Sele 3.12 GT-Poweriga simuleeritud momendi graafik



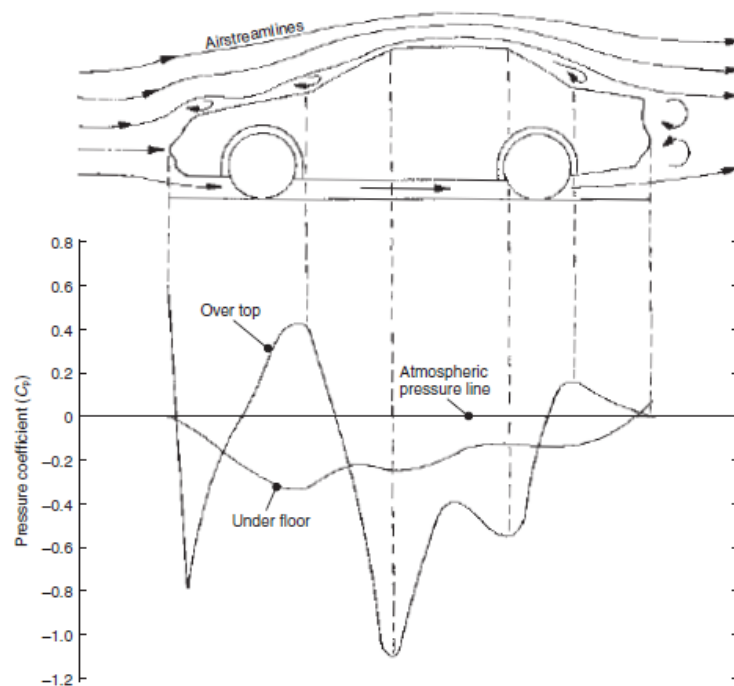
Sele 3.13 Keskmine õhumassi vool õhupuhastis



Sele 3.14 Keskmine õhumassi voolu kiirus õhupuhastis

4. AUTOKERE AERODÜNAAMIKA MÕJU SISSELASKELE

Tingituna asjaolust, et täiteaste mõjutab mootori jõudlust, tuleb tähelepanu pöörata ka musta õhu kanalitele enne õhufiltrit. Õhuvõtu peaks paigutama rõhutõusu alasse ning selliselt, et eeldatavasti oleks ka Δp võimalikult väike. Autokere aerodünaamikat käsitlevas allikas [3] presenteeritud rõhu jagunemise graafikud üle auto kere on toodud ka seel 4.1.



Sele 4.1 Rõhu jagunemine auto kere piirkondades

Graafikult ilmneb, et rõhutõus on esinina, esiklaasi ees ning tagumise klaasi alaosas. Kui vaadelda ka Pontiac Trans Am'i kapotis olevat avaust (sele 4.2 ja sele 4.3), mis on tehtud juba tehasest, siis lähtudes seel 4.1 toodud graafikust võib väita, et tegu ei ole pelgalt disaini elemendiga, vaid funktsionaalse avaga, mille eesmärgiks on tõsta õhurõhku sisselaskest. Graafikult ilmneb ka, et õhuvõttu auto põhjaalla ei ole otstarbekas paigaldada, kuna seal valitseb alarõhu piirkond ning võib esineda mootori poolt tekitatud sooja õhumassi liikumist õhuvõttu, mis ei ole samuti soositud.



Sele 4.2 Pontiac Trans Am mootorikattes olev avaus A-piilarite vahetus läheduses

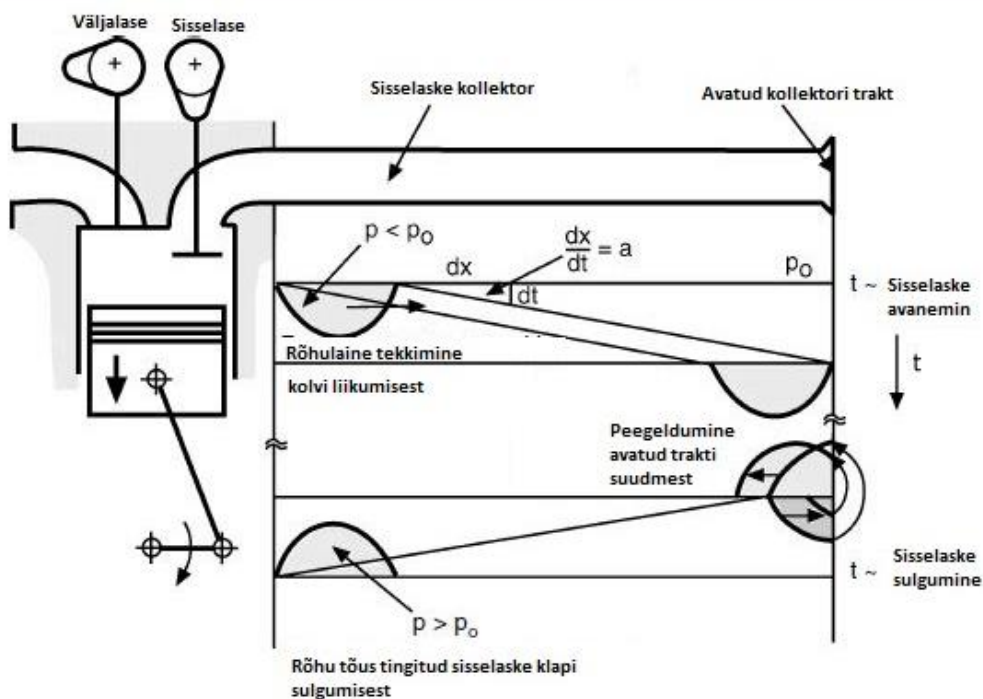


Sele 4.3 Pontiac Trans Am mootorikattes olev õhuvõtu ava eestvaates

5. SISSELASKESÜSTEEMI PROJEKTEERIMINE

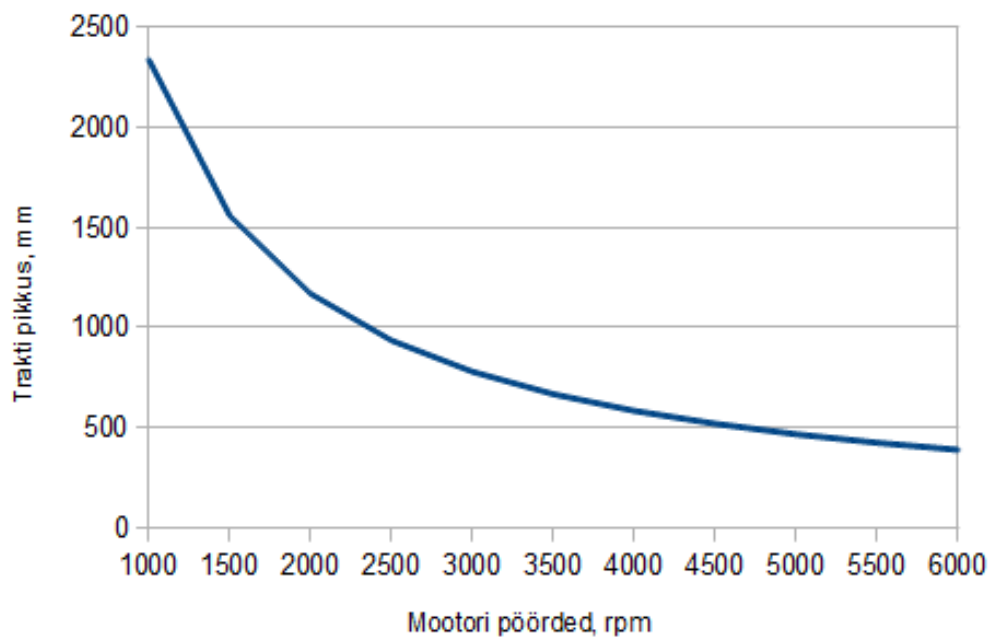
5.1 Akustiline ülelaadimine

Võimaluseks tõsta täiteastet ilma lisaseadmeteta on kasutada rõhulainete resonantsi, mis on tingitud õhu pulsilisest liikumisest sisselaske klapi dünaamika tõttu. Rõhulaine tekkimist selgitab sele 5.1.



Sele 5.1 Rõhulaine tekkimine ja peegeldumine [2]

Akustilist ülelaadimist on võimalik häälestada mingi kindla pöörde juures ning tänapäeva sisselaskekollektorid omavad seepärast muutuva pikkusega trakte, et tagada rõhulainetekasutamist laiemas pööretevahemikus. Sisselase trakti pikkuse sõltuvus mootori pööretest on toodud seel 5.2. [3]



Sele 5.2 Primaarkanali pikkuse sõltuvus mootori pööretest

Primaarkanali pikkused leitakse valemiga[3]:

$$L = \frac{\theta_t * C}{0,012 * N} \quad (5.1)$$

Kus θ_t – väntvõlli pöördenurk, mille jooksul rõhulaine läbib trakti pikkuse

L – Trakti pikkus millimeetrites, et ram efekt tekiks

N – mootori pöörded minutis

C – heli levimise kiirus õhus

Pikkuste leidmiseks pöörete kaupa, koostati arvutusmoodul tabelarvutus programmiga, millega saadud tulemused on toodud tabelis 5.1. Parameeter θ_t valiti 85 kraadi, kuna mitmed eksperimendid on näidanud, et optimaalne väärtus asub 80 – 90 kraadi piirkonnas[3].

Tabel 5.1 Sisselaske trakti pikkused vastavalt valitud mootori pööretele

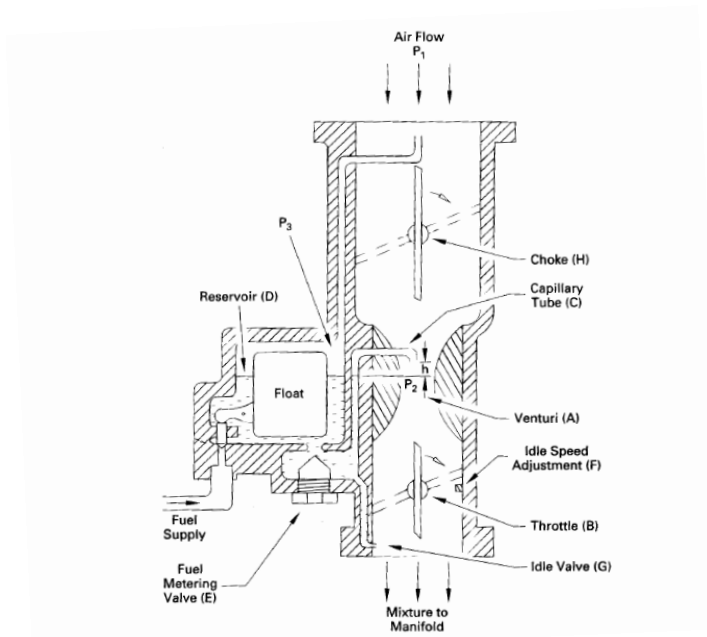
θ_t , kraadi	85	85	85	85
C, m/s	330	330	330	330
N, rpm	3000	3200	4000	5000
L, mm	779	730	584	468

Arvutustest selgub ka rõhulaine peegeldumise traktide pikkuste projekteerimise negatiivsem pool – isegi kui maha lahutada sisselaske kanalite pikkused silindri peades, võib torude pikkuste mahutamisel mootoriruumi tekkida raskusi.

5.2 Karburaator

Karburaatorid olid sisepõlemismootorite õhu-kütuse segu valmistamisel levinud kuni 1990ndate aastate lõpuni, kui neid hakkasid asendama ökonoomsemad sissepritse süsteemid. Praeguseks hetkeks kasutatakse neid väikese kubatuuriga mootoritel (muruniidukid) või Ühendriikide autoentusiastid kiirendus, hobi ja näituseautode mootoritel.

Karburaatori põhimõtteline ehitus on toodud seel 5.3, kus ahenevas torus (ingl. k. Venturi) tekib õhuvoolu kiirem liikumine ning rõhulang, mis omakorda tingib kütuse mööda kapillaar toru pihustuma õhumassi. Kuna bensiini pihustumine on sõltuvuses õhuvoolu kiirusega, siis õigesti projekteeritud ning seadistatud karburaator on võimeline tagama ühtlast lambda väärtust kogu pöörete vahemikus.

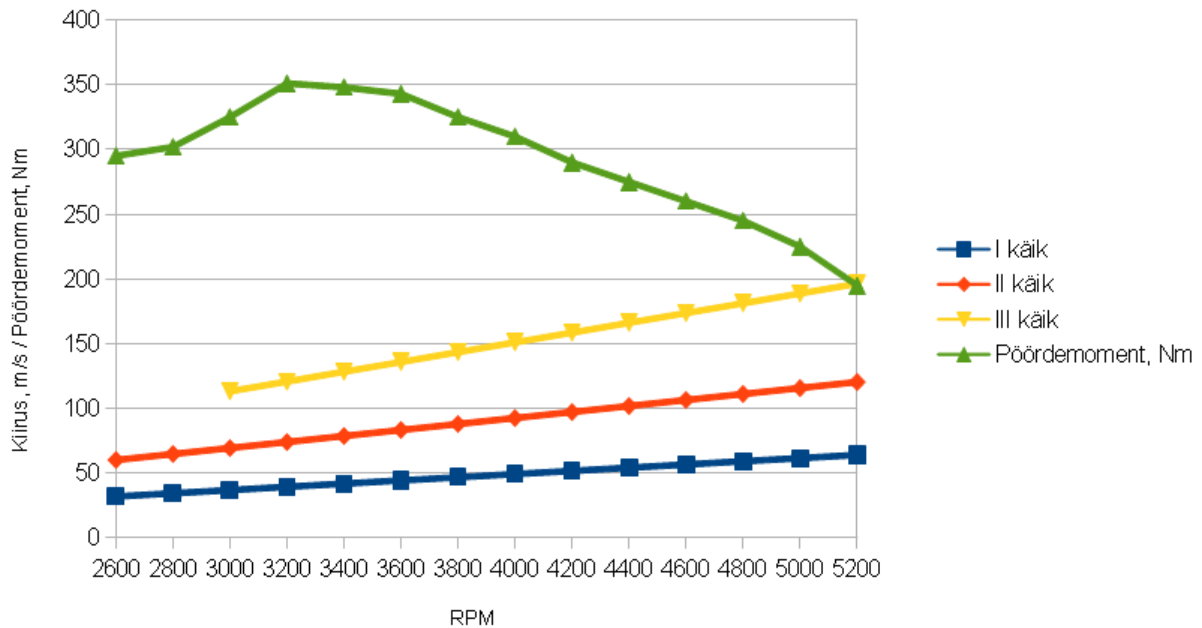


Sele 5.3. Karburaatori põhimõtteline ehitus

Testiauto karburaator on tehase poolt hinnatud maksimaalse voolavusega 1019 m³/h (600 CFM, Cubic Feet per Minute) simulatsioonide põhjal jääb antud mootori õhutarve 500 m³/h, mis tähendab, et karburaator voolamist takistavaks elemendiks tõenäoliselt ei ole. Väliskarakteristikute stendis oli ühendatud ka λ mõõteseade, mis näitas täiskoormusel väärtuseks 0,88 – 0,89 ning ühtlastel pööretel 1,00, mis tähendab, et karburaatori kütusesegu seaded on piisavalt head ning korrigeerimist ei vaja.

5.3 Mootori vajalik võimsus

Antud mootorit plaanitakse kasutada veerandmiili läbimiseks võimalikult kiiresti. Selleks on vaja leida mootorile sobiv momendi graafik, mis tagab hea koostöö olemasoleva käigukastiga, milleks on TH-700R4. Käiguvahetuse hetked valitakse vastavalt arvutusmoodulist lähtudes, mis arvestab käigukasti kasuteguri protsenti ning ülekande arve. Tehaseseades auto käikudega saavutatud kiirus on toodud seel 5.4, kus on näha ka mõõdetud momendi väärtuste graafik.



Sele 5.4. Käikude kiiruse kasv sõltuvalt mootori pööretest.

Toodud graafikult on näha, et käigud töötavad momendi piikväärtuse ümbruses väga väikese osa oma kasutusajast. Selline paigutus on iseloomulik tänavaautole, millelt oodatakse head sõidetavust ja võimsust madalatel pööretel. Veerandmiili kiiremaks läbimiseks tuleks piikväärtused projekteerida selliselt, et käigukasti käigud kasutaksid ära rohkem tõusvat osa graafikust ning langev osa jääks vähem tähtsasse pööretevahemikku. Tabelarvutus mooduli graafikutel tuginedes valitakse pööretevahemikuks, kuhu projekteeritakse piikväärtus, 3200 – 4800 rpm, ehk graafiku ekstreemum jääb 3800 RPM-ile.

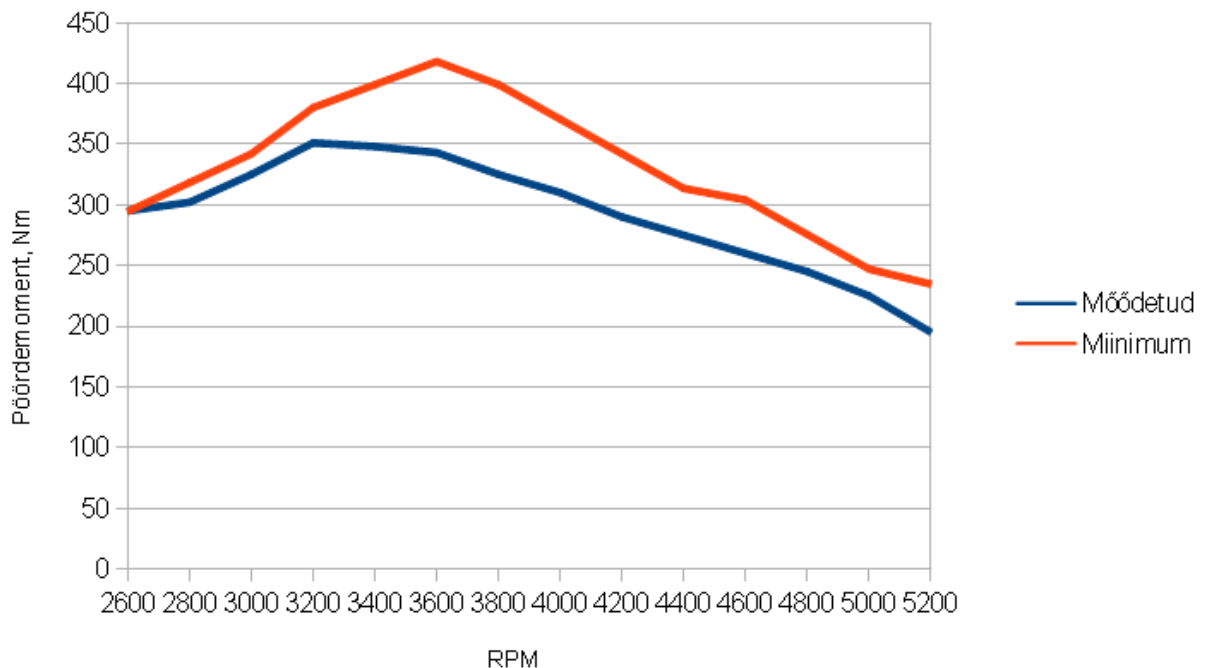
Vajaliku võimsuse kõvera leidmiseks kasutatakse eelnevalt mainitud tabelarvutuse moodulit (tabel 3.1), mis hindas veerandmiili aega piisavalt täpselt. Muutes pööretel saavutatud momendi väärtusi leitakse eelnevalt seatud kriteeriumile sobiv minimaalne graafik, mis tagab sekundilise võidu veerandmiili läbimisel. Arvutusmooduli tulemused on toodud tabelis 5.2.

Moodulist järeldub, et nüüd läbitakse 400m pikkune distants ajaga 15,83 sekundit ning kiirusega 143,5 km/h.

Tabel 5.2 Valitud võimsuse kõver läbib 400m hinnanguliselt III käiguga 3800 pöördel minutis

3000	III	1,41	10,56	113,29	215,87
3200		1,58	11,96	120,84	261,59
3400		1,63	13,27	128,40	306,85
3600		1,69	14,53	135,95	353,19
3800		1,54	15,83	143,50	403,50
4000		1,34	17,28	151,05	462,94
4200		1,14	18,98	158,61	535,66
4400		0,93	21,01	166,16	627,08
4600		0,82	23,41	173,71	740,10
4800		0,61	26,34	181,26	884,35
5000		0,39	30,53	188,82	1098,45
5200		0,26	36,91	196,37	1438,75

Lähtudes tabelarvutusmoodulist saadud tulemustest, ei tohiks mootori momendi graafik olla väiksem, kui on toodud seel 5.5



Sele 5.5 Miinimum väärtustega mootori momendigraafik saavutamaks aega 16 sekundit

Lähtudes tabelarvutustes saadud tulemustest, tuleb mootori momendigraafik projekteerida vähemalt ligilähedaseks seel 25 toodud graafikuga, kus maksimum väärtused asetsevad pöörete vahemikus 3600 – 3800 pööret minutis.

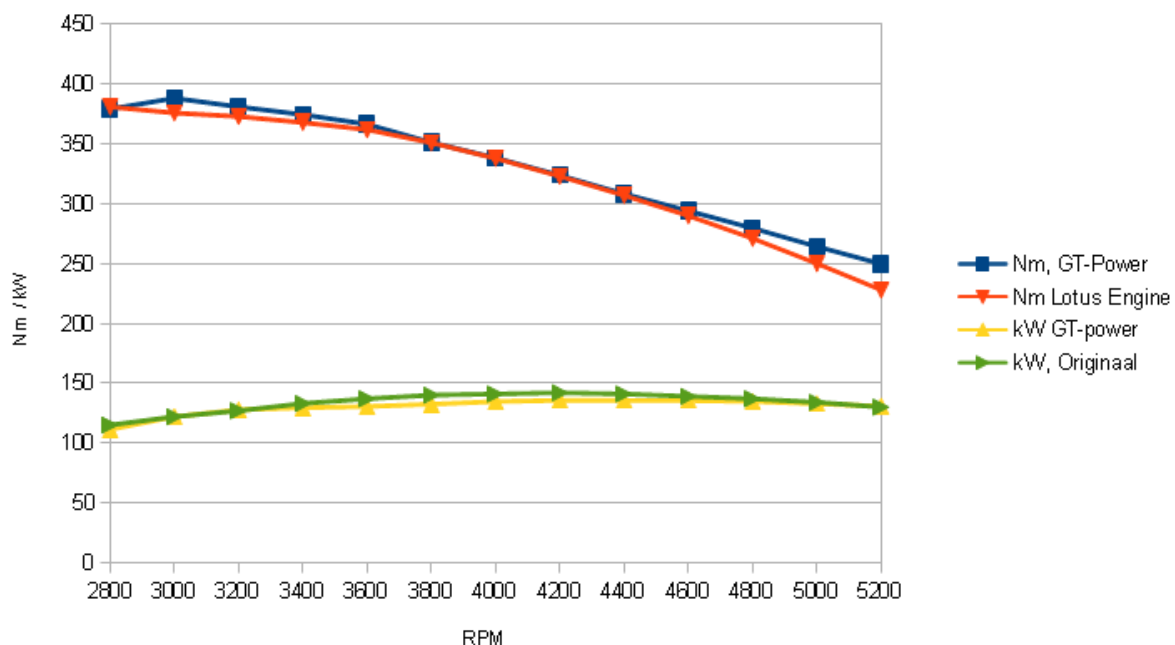
5.4 Nukkvõlli valik

Kui vaadata stendis saadud võimsuse kõverat, mis on suhteliselt ühtlane pea kogu pööretevahemiku, siis tõenäoline on, et puhtalt sisselaske kollektori projekteerimisest ei piisaks püstitatud eesmärgi saavutamiseks. Selleks, et tõsta mootori piikväärtusi soovitud pööretele, peavad projekteeritav sisselaske kollektor ning nukkvõll omavahel hästi sobima.

Kuna klapiajastusest sõltub mootori gaasivahetus kõige rohkem, oleks tarvis täpse simulatsiooni loomiseks mõõta nukkvõllide avanemise punktid sõltuvalt pöördenurgast. Tekkivad kõverad on kindlasti erineva tõusuga, ning tänapäeva nukkvõllid ei oma ka sümmeetrilist profiili, mistõttu on pakutavate nukkvõllide simuleerimine ilma mõõtmisi teostamata äärmiselt keerukas. Seetõttu on vajalik mootori simulatsioon ka programmiga Lotus Engine Simulation, sest selles on võimalik kasutada standard sümmeetrilisi genereeritavaid graafikuid, millega saab hästi proovida erinevaid klapi ajastuse pöördenurki, et näha mis suunas võimsuse kõverad liiguvad.

Kui on teada, milliste parameetritega peaks nukkvõlli ajastus teoreetiliselt olema, valitakse juba nukkvõllitootjate hulgast tooted, millede andmed ka uuesti simulatsiooni sisestatakse, ning vaadeldakse tulemustest, milline on ligilähedaseim optimaalseima simulatsiooni tulemusega. Nukkvõlli parameetreid ning mõju gaasivahetusele antud töös täpsemalt ei uurita, kuna see ei ole töö eesmärgiks.

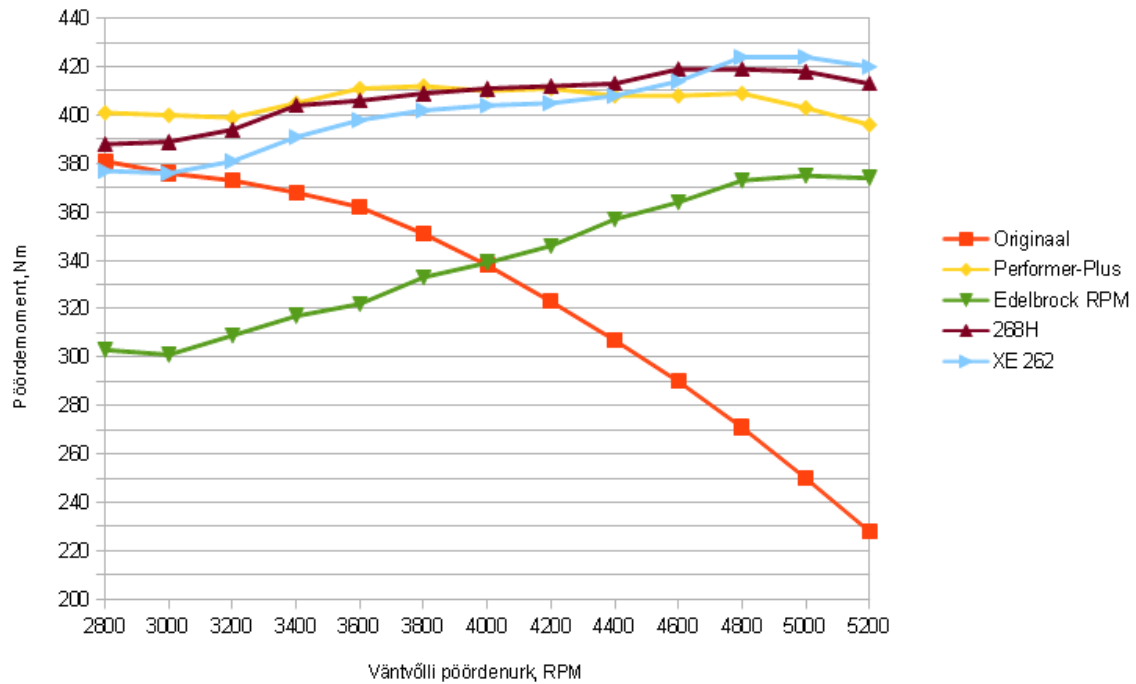
Lotus Engine Simulation'iga esialgseid simuleeritud mootori väliskarakteristikuid on võrreldud GT-Poweriga seel 5.6. Võimsuse kõverad jäävad 5% erinevuse sisse, mida peetakse antud töös piisavaks.



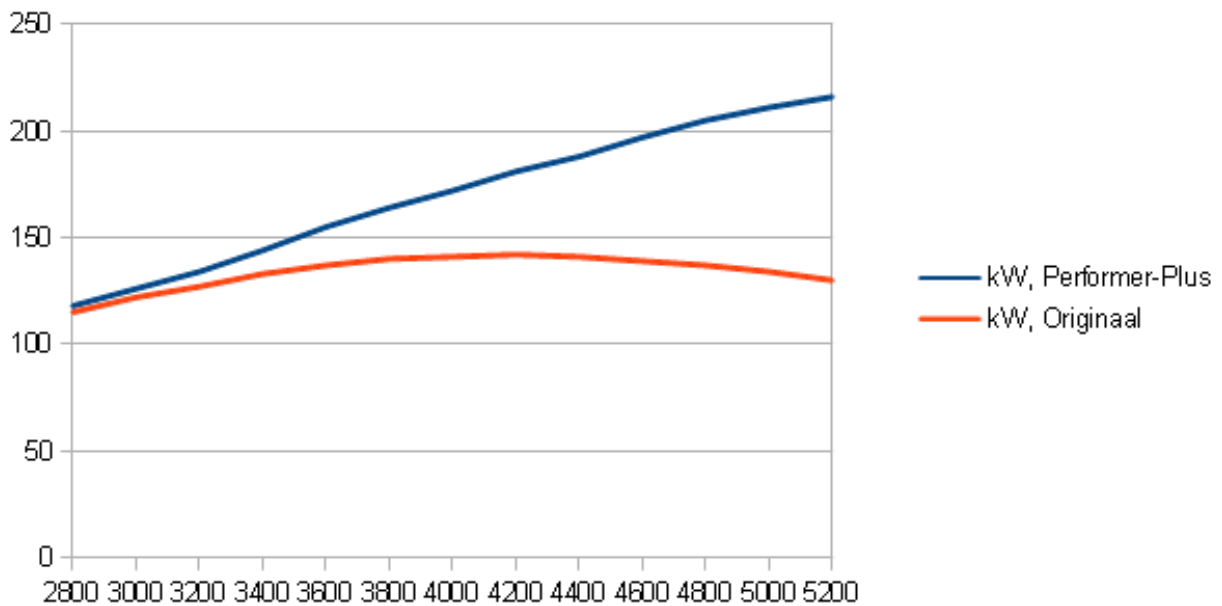
Sele 5.6. Erinevate tarkvaradega simuleeritud võimsusekõverad

Järgevalt võrreldakse nelja erinevat nukkvõlli. Valituteks osutus Edelbrocki pakutavad Performer-Plus ning RPM seeria ning Competition Cam ettevõtte poolt pakutavad 268H ning XE 262. Tooted valiti klapiastuse optimeerimise tulemusi arvestades, praktikute ning tootja poolt saadud soovitusliku info põhjal. Kõik neli nukkvõlli simuleeriti Lotus Engine tarkvaraga ning koondtulemused saadud pöördemomendi graafikutest on toodud seel 5.7.

Võrdlusest selgub, et Edelbrock Performer-Plus ning mõlemad Competition Cams'i nukkvõllid hoiavad pöördemomendi suhteliselt ühtlase, kuid samas kasvava trendiga. Antud töös käsitletavale mootorile ei sobi Edelbrocki RPM seeria nukkvõll, kuna see on projekteeritud töötama pööretel, mida ei ole võimalik sellest mootorist hetkel saada. Seda on näha ka seel 5.7, kus RPM seeriaga saavutab mootor 360 Nm alles 4400 pöördel. Seel 5.8 on näidatud ka Performer-Plus võimsuse graafik, mis on tõusva trendiga ning seetõttu esialgne väide, et võimsus on pärsitud nukkvõlli poolt, oli tõene ning sai nüüd simulatsiooni läbi kinnitust



Sele 5.7. Toodetavate nukkvõllide mõju pöördemomendile võrreldes algväärtustega



Sele 5.8. Performer-Plus nukkvõlli mõju võimsuse kõverale

Võrreldakse ka simuleeritud tulemustega veerandmiili aegu, et näha, kas antud tooted tagavad ka vajaliku ajalise võidu. Arvutuslikud veerandmiili läbimise ajad on toodud tabelis 5.3, kus Δt tähistab arvutuslikku ajalist võitu võrreldes tehase seades autoga.

Tabel 5.3 Arvutuslikud veerandmiili ajad erinevate nukkvõllidega

	Pöörded	Kiirendus	Aeg	Kiirus	Läbitud vahemaa	Δt
Originaal	3200	1,29	16,55	135,95	407,83	0,0
RPM	3600	1,18	15,61	135,95	383,85	0,9
Performer-Plus	4000	1,55	14,90	151,05	404,41	1,6
XE 262	4000	1,52	15,36	151,05	416,28	1,2
XE 268H	4000	1,56	15,00	151,05	406,33	1,5

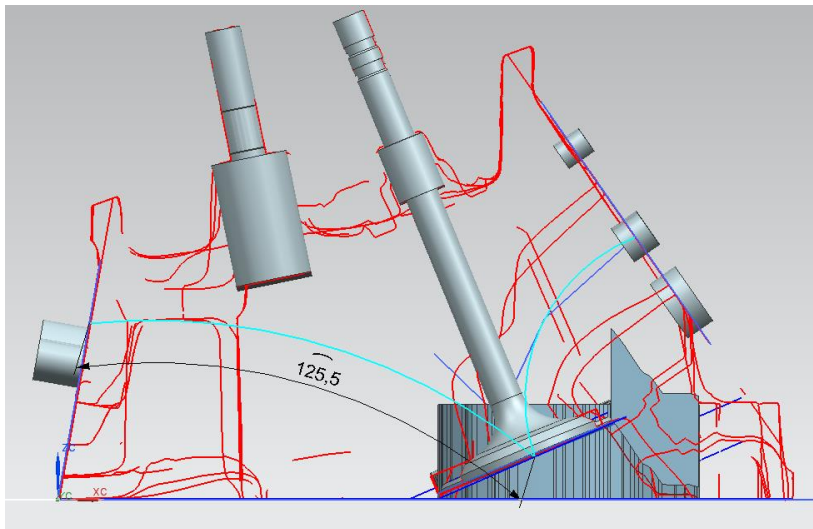
Kõige paremat mõju avaldaks praeguse mootorikonfiguratsiooni korral samuti Edelbrocki Performer-Plus. Nimetatud nukkvõll on saanud ka soovitusi mitme praktiku poolt, kui ülejäänud mootori detailid on jäänud tehaseseadesse. Seega osutub see ka valituks nukkvõlliks käesolevas töös käsitletavale mootorile.

6. SISSELASKEKOLLEKTORI ELEMENDID

Eelnevalt selgus, et optimaalseks võimsuse piikväärtuse saavutamise pööretevahemikuks oleks 3800 pööret minutis, mis saavutatakse Edelbrock Performer-Plus nukkvõlliga. Täiteastme parandamiseks nimetatud piirkonnas projekteeritakse sisselaske kollektor kasutama akustilist ülelaadimist.

6.1 Primaarkanalid

Kasutades eelnevalt toodud valemit(5.1) arvatati tabelarvutusega sisselaske trakti pikkus 4800 pöörde juures, milleks saadi 475 mm. Pöörded 4800 võeti kompromissina hoida vooliku pikkused võimalikult lühikesed ning samas, et akustiline ülelaadimine toimuks võimalikult momendigraafiku haripunkti läheduses. Primaarkanalid pikkuse leidmiseks on vaja maha lahutada arvatatud trakti pikkusest vahemaa klapist kollektori kinnitusplaadini ja kinnitusplaadi paksus. Klapikanali pikkuse leidmiseks kasutatakse eelnevalt plokikaane 3D skanneeritud faili, millesse konstrueeritakse sujuv kaar(sele 6.1, mõõduga tähistatud kaare pikkus) sisselaske klapikanali algusest kuni klapi tsentrini.



Sele 6.1. Klapikanali pikkus võetuna STL faili ristlõikest

Kollektori materjali paksuseks võetakse esialgu 10mm, kuid mida saab hiljem ka vähendada ja mille tõttu suureneb siis vastaval juhul ka primaarkanalid pikkus.

$$L_{\text{primaarkanal}} = L_{\text{trakt}} - L_{\text{klapikanal}} - S_{\text{flantsid}} - S_{\text{üleminek}} = 475 - 125,5 - 8 - 40 = 301,5 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Järgmisena tuleb arvutada primaarkanali läbimõõt mis tagaks voolukiiruse, mis ei ületaks 75m/s, kuna selleks loetakse piiri, kui hakkab langema mootori täiteaste ning seetõttu ka mootori väliskarakteristikud. Voolu kiiruseks kasutatakse valemit[3]:

$$v_{in} = \frac{nQN\eta_v}{2 \times 60A} \quad (6.1)$$

Kus n – silindrite arv

Q – töömaht

N – väntvõlli pöörlemiskiirus, rpm

η_v – täiteaste, %

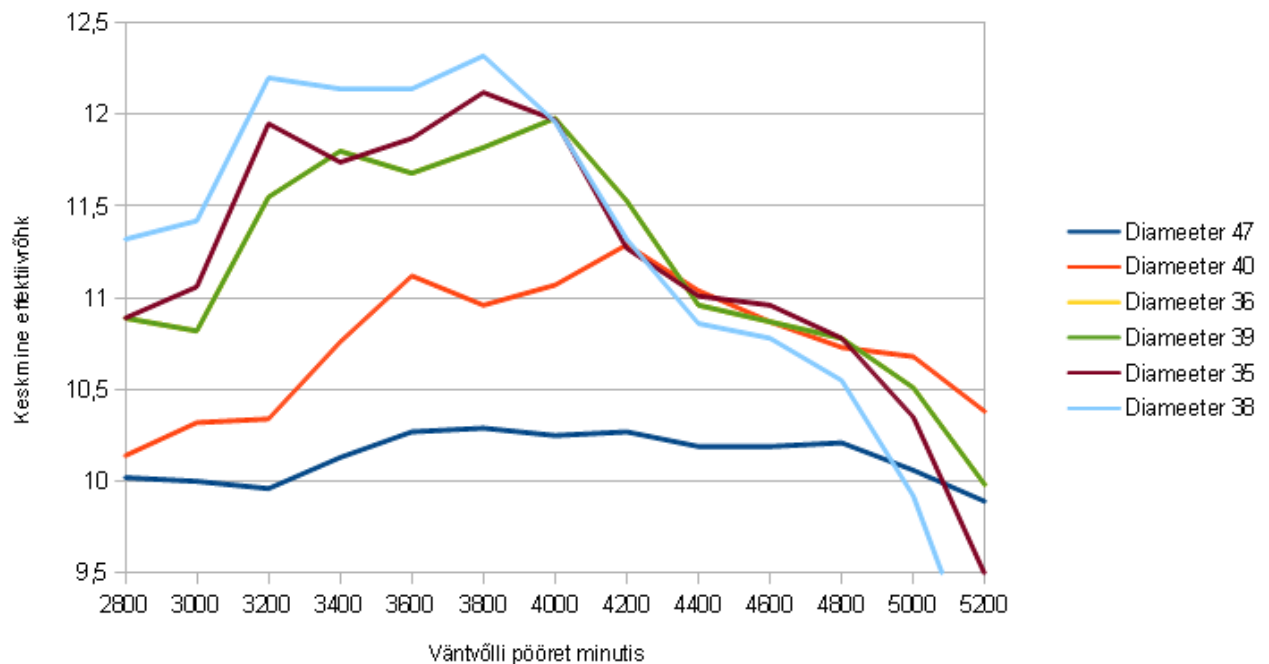
A – trakti ristlõike pindala

Valem sisestatakse tabelarvutus programmi OpenOffice Calc ning kasutatakse tööriista Goal seek. Kuna optimaalseks õhuvoolu kiiruseks loetakse 75m/s [3], siis on Goal Seek käsku kasutades hõlbus leida toru diameeter. Pöörete arv 5000 on valitud, kuna sel hetkel toimuvad tavaliselt käiguvahetused. Tulemus on toodud seel 6.2, kus on näha, et voolukiiruse 75 m/s saavutaks 21,461mm toru läbimõõdu korral.

v	75	m/s
n silindrit	1	tk
N	5000	rpm
η_v	100	%
A	0,0003	m ²
Q silindri V	0,000626	m ³
A	0,0003	m ²
R	0,0105	m
D	21,0443	mm

Sele 6.2 Goal Seek käsuga leitud primaarkanali diameeter voolukiiruse 75 m/s juures

Kuigi leitud primaarkanali diameetri juures on maksimaalne soovitatav keskmine õhuvoolu kiirus, siis realselt ei ole seda otstarbekas kasutada, kuna silindripeade traktide avad on ristküliku kujulised, mille pindala ületab leitud kanali pindalat mitmekordselt. Seepärast kasutatakse Lotus Engine Simulation tarkvara optimeerimistööriista, et leida optimaalseim kanalite läbimõõdu suurus ette antud sisselaskekollektori anuma mahu juures. Võrdluseks tuuakse keskmise efektiivrõhu graafikud, mis on näidatud ka seel 6.3. Kuna täiteaste ja momendi kõverad järgivad sama trendi, siis neid eraldi võrrelda ei ole mõtet.

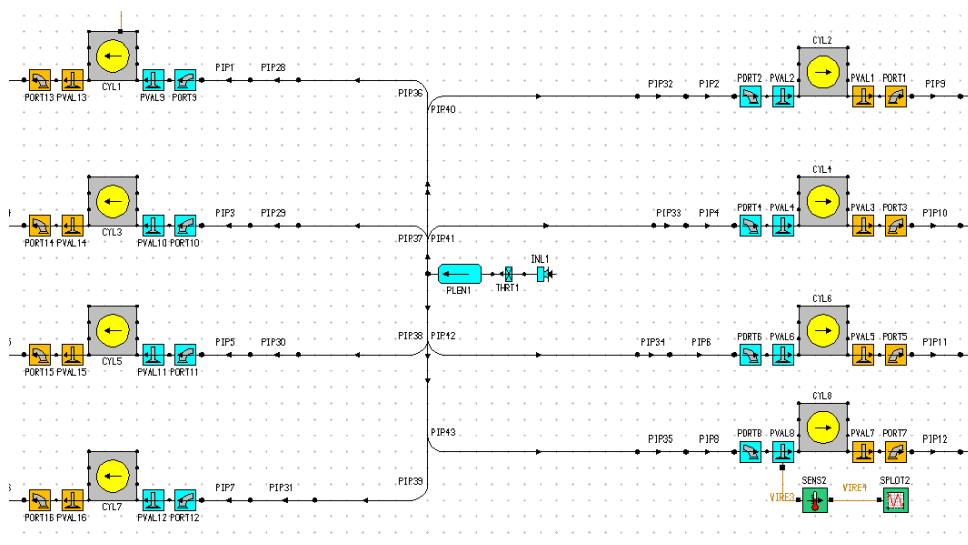


Sele 6.3. Optimeerimistööriista kasutajaliides programmis Lotus Engine Simulation

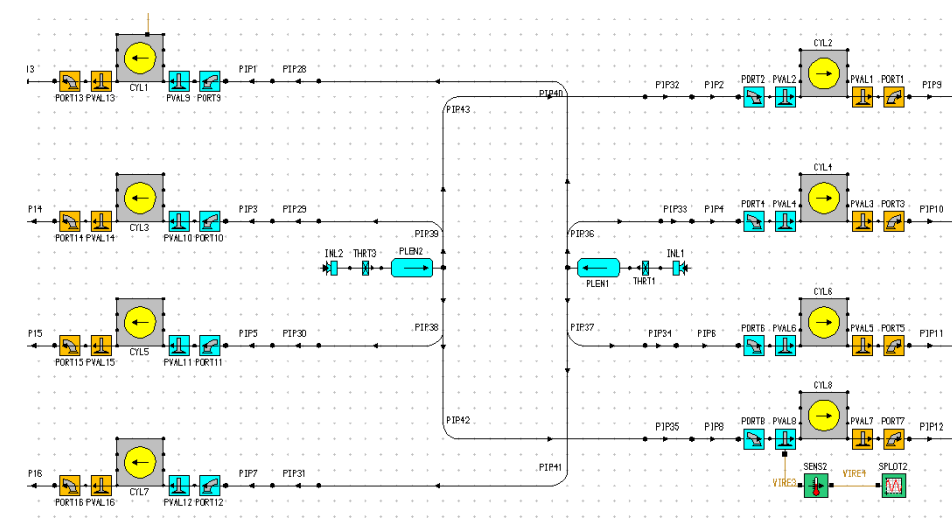
Võrdlevalt graafikult ilmneb, et parim keskmine efektiivrõhk hakkab kasvama alates 3000 pöördest ning langeb alla 11,5 bari alles pöördel 4200, ehk sellise kooslusega saavutatakse parim pöördemoment just selles piirkonnas, kus võistlusauto käigukast enamiku ajast töötab. Seega osutub trakti siseläbimõõduks 38 mm

6.2 Sisselaskekollektori õhuanum

Simulatsioonide põhjal ilmes, et kollektori õhuanuma ruumala mõju täiteastele on selgelt olemas ning eksisteerivad ka kriitilised väärtused, kus on näha drastilist mõju. Käesoleval mootoril oli miinimum anuma maht 4 liitrit, mida suurendades oli täheldada täiteastme paranemist, kuid mõju ei olnud suur. Piirangud anuma mahule paneb ka mootori ja mootorikatte vaheline ruum, mis antud autol on väga piiratud. Eelnevate testide põhjal, kus prooviti mitmeid anuma ja silindrite traktide ühendamist, osutus suur traktide ühine anum(sele 6.4) kõige optimaalsemaks lahendiks, mis tagas alati suurema täiteastme, kui näiteks kahe väiksema anuma kasutamine(sele 6.5).

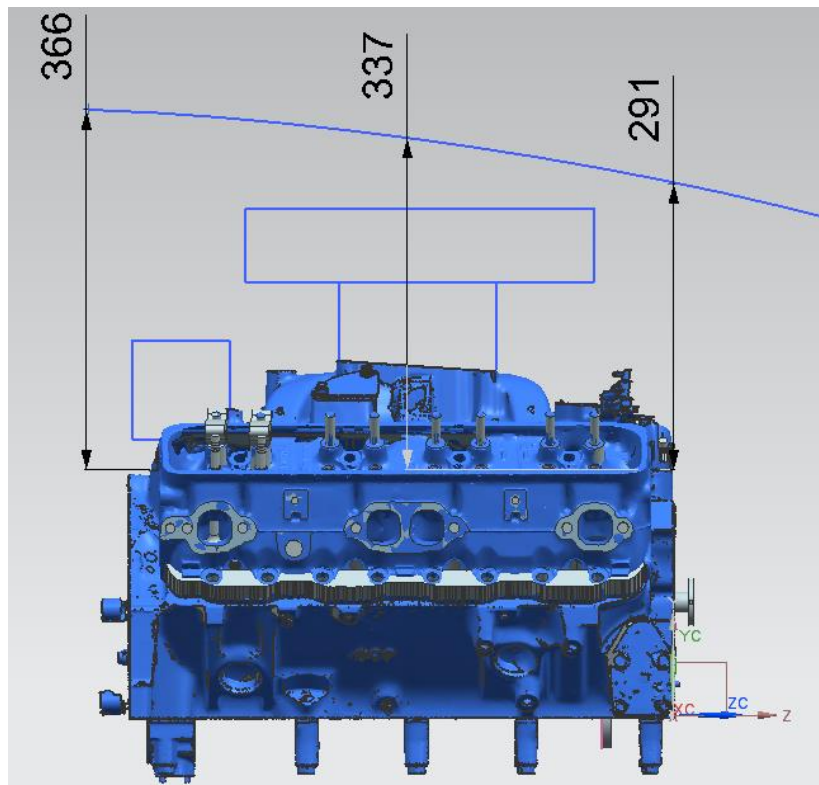


Sele 6.4. Ühe anumaga sisselaske mudel Lotus Engine töökeskkonnas



Sele 6.5. Kahe võrdse ruumalaga anumaga kollektori mudel Lotus Engine töökeskkonnas

Enne projekteerima asumist mõõdeti üle ka karburaatori ning õhupuhasti. Õhupuhastiks oli 355 mm läbimõõduga ning 75 mm paksusega Edelbrocki õhupuhasti. Karburaatori kõrguseks mõõdeti 80 mm. Mootorikatte kõrguseks mõõdeti kolm punkti – kõrgeim, õhupuhastiga samal joonel ning madalaim punkt, mis asusid vastavalt 366 mm, 337 mm ja 291 mm mootori poolsest sisselaskekollektori alumisest tasapinnast. Piirjooned on toodud seel 6.6 koos mõõtudega.



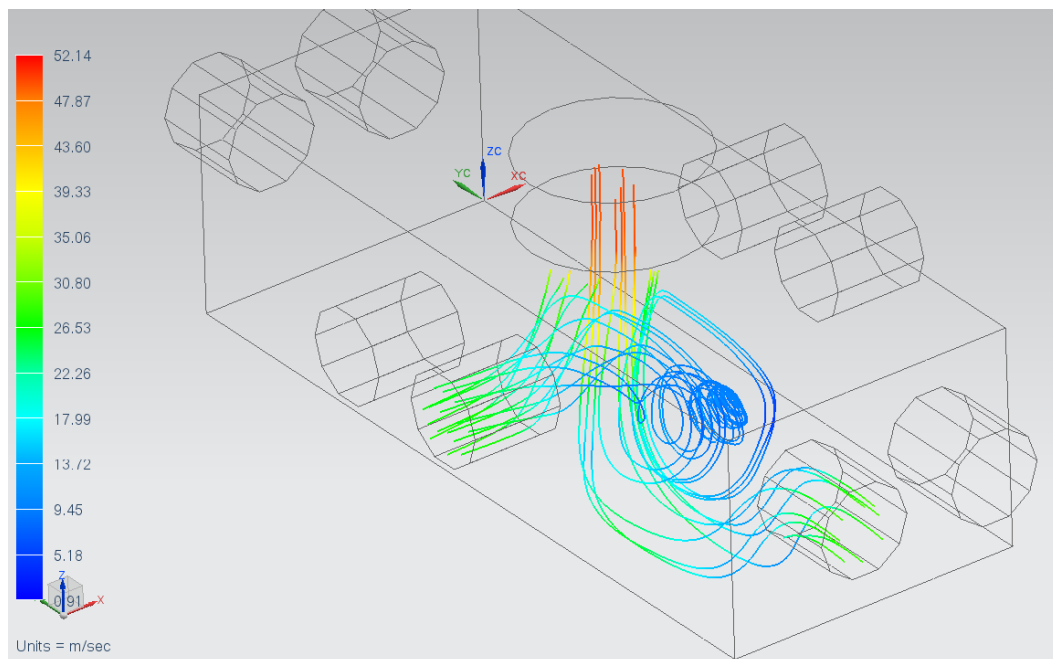
Sele 6.6. Mootorikatte paigutus mootori suhtes.

Selel 6.6 on näidatud ka jagaja kaane gabariitide piirkond. Kollektori projekteerimisel võetakse arvesse, et detail peab mahtuma määratud piiridesse.

6.3 Sisselaskekollektori õhuanuma geomeetria eelanalüüs

6.3.1 Risttahuka geomeetriaga õhuanum

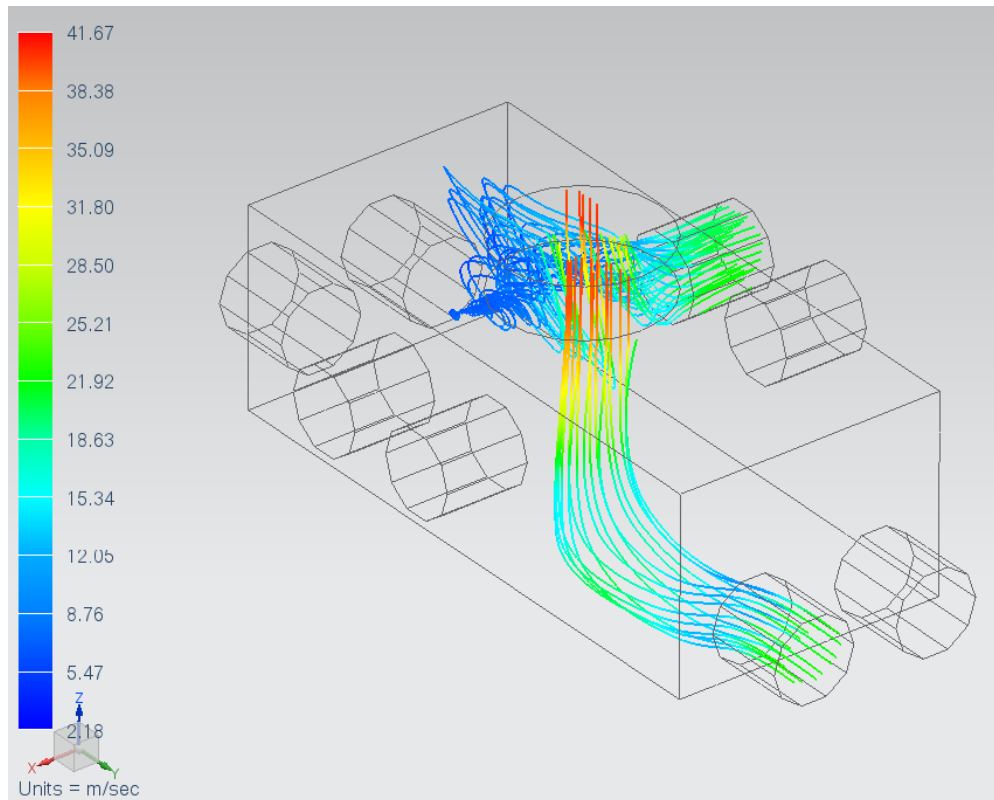
Kuna traktide läbimõõdud on võrdlemisi suured ning ruum, kuhu mahutada nii pikad traktid, kui ka nelja liitrine õhu anum, tuleb hoolikalt valida traktide kinnituse kohad õhuvõtu anumasse. Valiku tegemise kinnituseks tehakse loodud 3D mudeli skeemidele lõplike elementide meetodit kasutades vedelike ning gaaside voolamise analüüs. Kuna sellised arvutused nõuavad arvutitelt rohkelt tehteid, siis on need tavaliselt ka küllaltki aeganõudvad. Et aega säästa tuleb esialgu luua suurema arvutusvõrgustikuga (inglise keeles *mesh*) mudel, mille põhjal saab teha esialgsed hinnangud, kas loodud mudel on õhu liikumise seisukohalt piisavalt hea, et oleks tagatud sujuv kütuse-õhu segu silindrite vahel. Üks esimesi võimalikke variante on toodud selal 36, kus traktide avausest on pandud õhk voolama 23 m/s, mis on üldiselt mootorite sisselaskeõhu keskmiseks kiiruseks. [1]



Sele 6.7. Õhuvoolu osakeste jälitusjooned karburaatorist traktidesse läbi kollektori anuma.

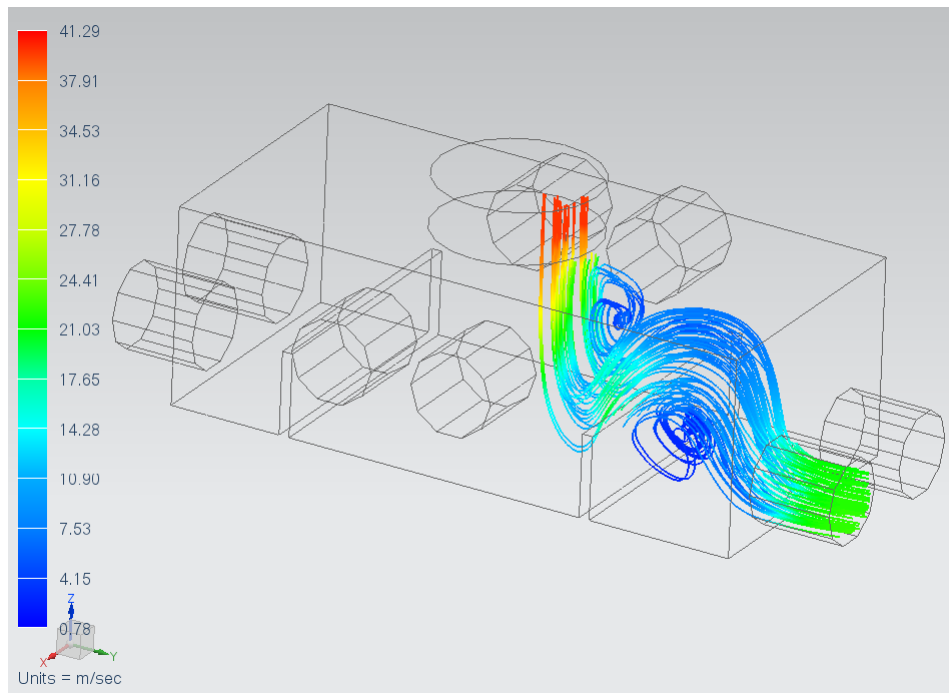
Analüüsi tulemusest selgub, et õhuvool seguneb paremini turbulentside toimel anuma pikemasse külgedesse ühendatult. Kuna aga külgedel ei ole kõikide traktide ühendamiseks ruumi, siis simuleeritakse ka võimalusi, kui neli trakti on kinnitatud anuma otsesse, kuid viidud põhjale lähemale, et õhuvool oleks sujuvam ning simuleeritakse ka anuma ehitust, kus kasutatakse ribisid, et toimuks parem õhu ja kütuse segunemine enne trakti sisenemist.

Selel 6.8 on näidatud õhusakeste liikumise jälitusjooned, kui pikemas otsades on traktid viidud põhjale lähemale. On näha, et õhuvool karburaatori avast on küllaltki sujuv ning ilma eriliste häiringuteta, samas kui küljele avanevatesse traktidesse satub lisaks eelnevalt turbulentsse käitumisega õhuvool, mis on hästi segunenud kütusega.

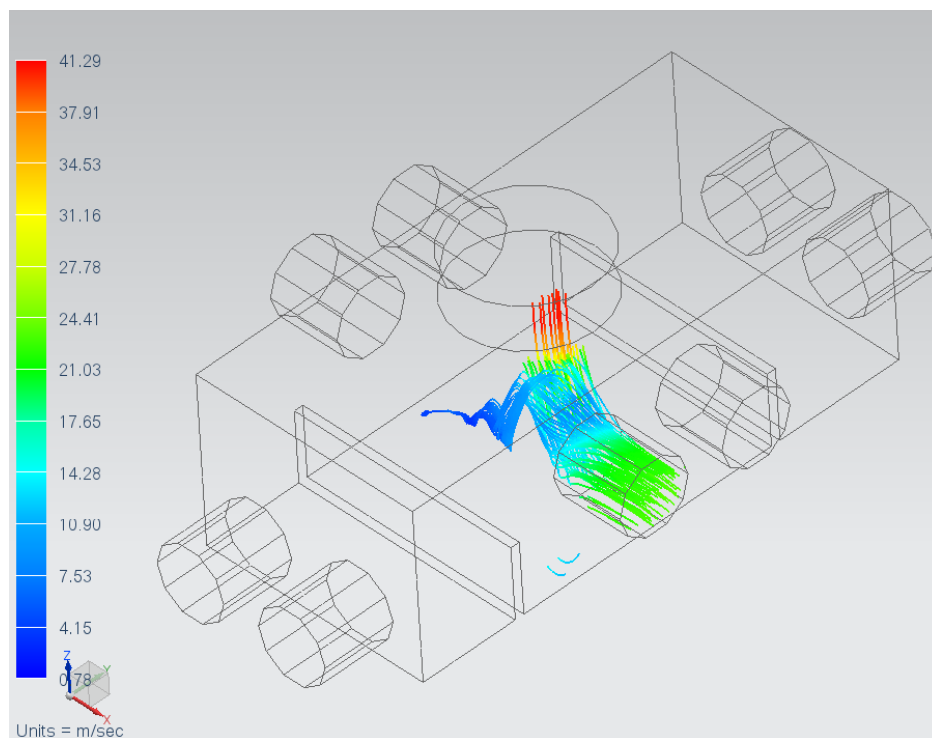


Sele 6.8 Õhusakeste liikumine, kui traktide avad asuvad erinevatel kõrgustel

Kolmandana simuleeritakse anumad, millesse on projekteeritud vaheseinad, eesmärgiga parandada kütuse ja õhu segunemist anumas. Simulatsiooni tulemused on toodud selguse huvides eraldi selel 6.9 ja selel 6.10, kus on näha, et lisatud ribadest on tingitud soovitud turbulents anumas sees, mis aitab kaasa kütuse segunemisele enne trakti sisenemist.



Sele 6.9. Turbulentse ning laminaarse voolavuse olemasolu enne trakti sisenemist

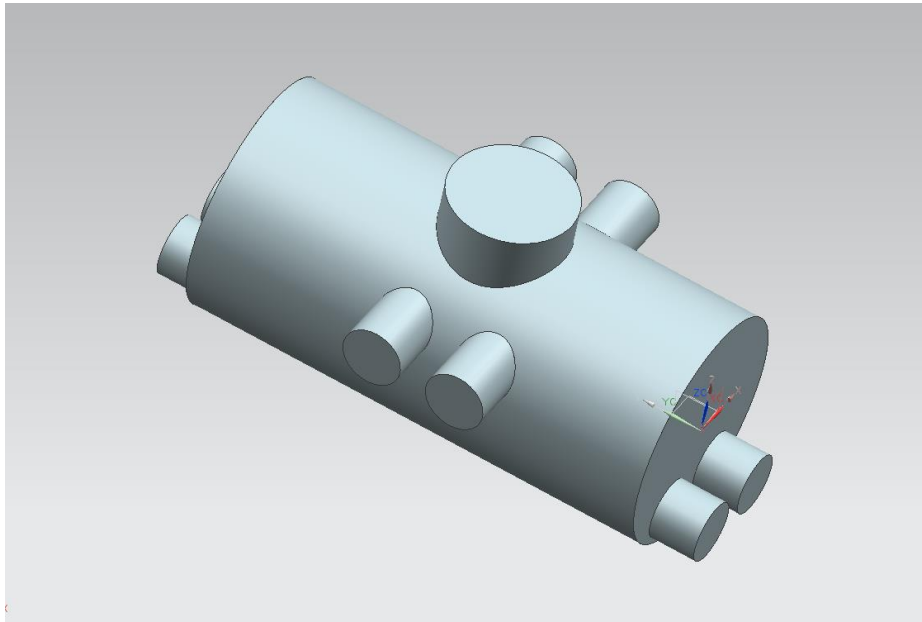


Sele 6.10. Külgmiste traktide mõlema voolamisliigi esindatus

Risttahuka kujulise anuma negatiivseks pooleks võib olla tema kehv jäikus, ehk traktidest tulevad õhupulsid tõstavad kollektori poolt tekitatud müra. Kuna jäikuse ribide projekteerimine lahendaks küll probleemi, kuid samal ajal muudab valmistamise keerukamaks ning seetõttu ka kallimaks.

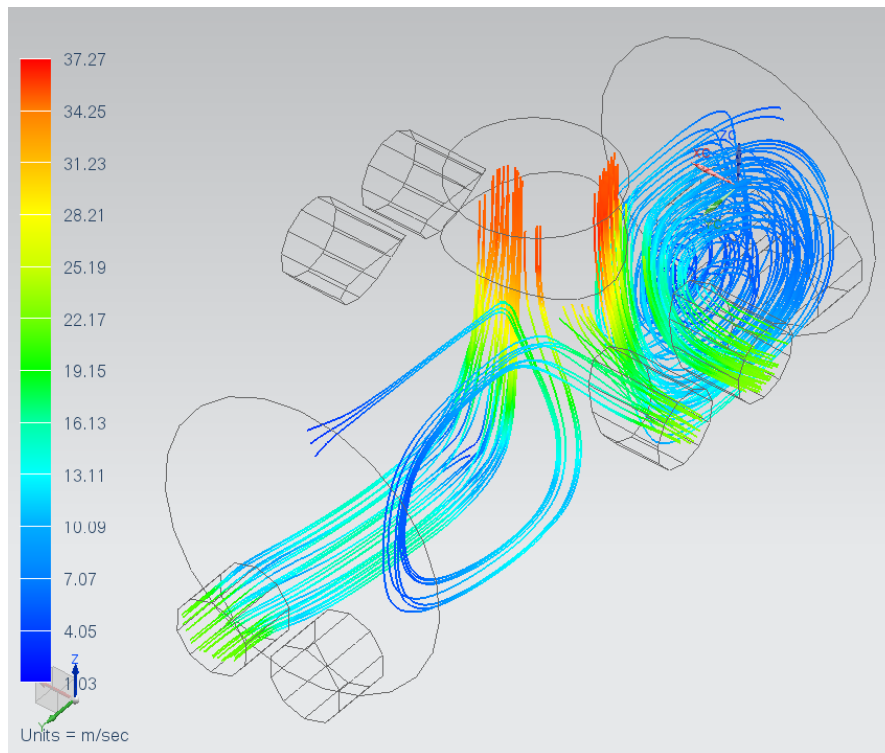
6.3.2 Silindriline õhuanum

Kuigi silindriline õhuanum on sama ruumala saavutamiseks oma gabariidilt suurem, on tema konstruktsioon oluliselt jäigem ka sama seinapaksusega materjali puhul. Samuti võimaldab silindri kasutamine anumad paigaldada madalalmale, kuhu risttahukas ei mahtunud. Silindriline konseptsioon on näidatud seel 6.11.



Sele 6.11. Silindrilise kujuga sisselaskekollektori anum

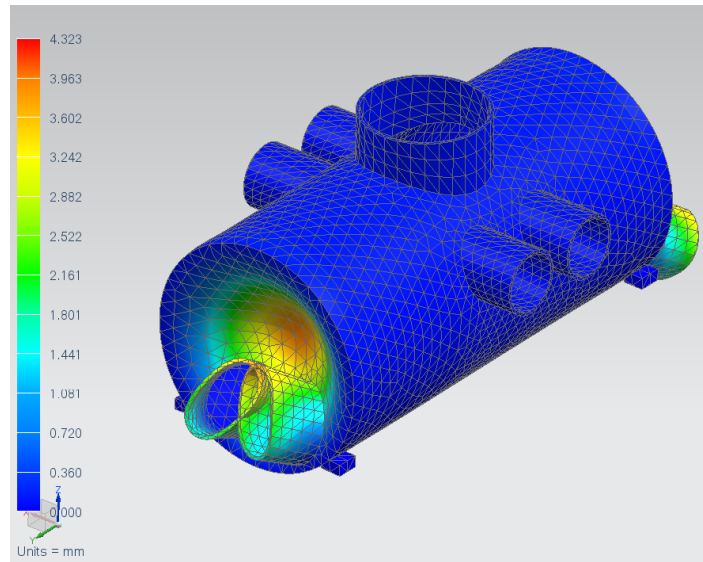
Staatilises olukorras on silindrilise anuma voolamine toodud seel 41, kus on näha ka silindrilise anuma eripära tekitada külgmistele traktidesse anumasse turbulents, mis tagab kütuse ja õhu segunemise paranemise. Seetõttu ei ole vaja ka projekteerida anumasse lisaelemente, mis parandaksid turbulentside tekkimist.



Sele 6.12. Silindriline õhuanum staatilises olekus, kui voolamine toimub kõigist traktidest.

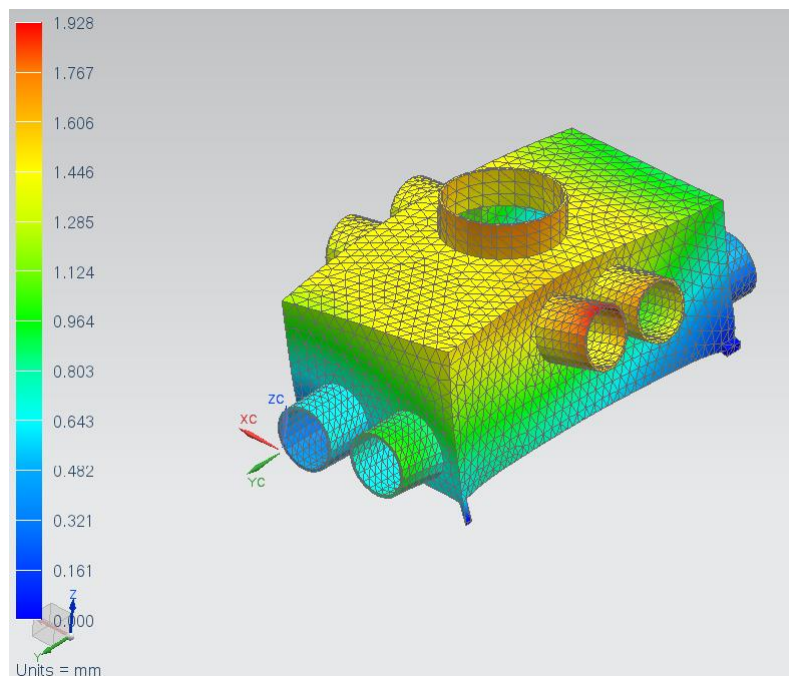
6.3.3 Omavõnkesagedused

Kuna mootorites on suur hulk pöörlevaid masse, mis kõik tekitavad vibratsiooni, tuleb teada saada piirid, millise mahu ning seinapaksusega peaks anum olema. Esialgseks seinapaksuseks määratakse 2mm alumiinium. Kuna tegu on hetkel kui kokku keevitatud koostuga, siis lisatakse anumale 4 jäika kinnitust, mis kujutavad anuma raami külge kinnitamist. Esialgsel hinnangul ei tohiks omavõnkesagedus kokku langeda mootori esimese harmoonikuga 400 Hz. Seel 6.13 on toodud esimene silindrilise anuma mood 867 Hz mis on kõrgem kui seatud piir, ehk resonants võnkumist ebasoositud sagedusel oodata ei ole. Risttahuka kujulise anuma esimene mood on 1586 Hz, mille kõrguse on tinginud tõenäoliselt traktide õhuvõttudest tingitud jäikuse suurenemine.



Sele 6.13. Esimene mood silindrilisel anumal 867 Hz

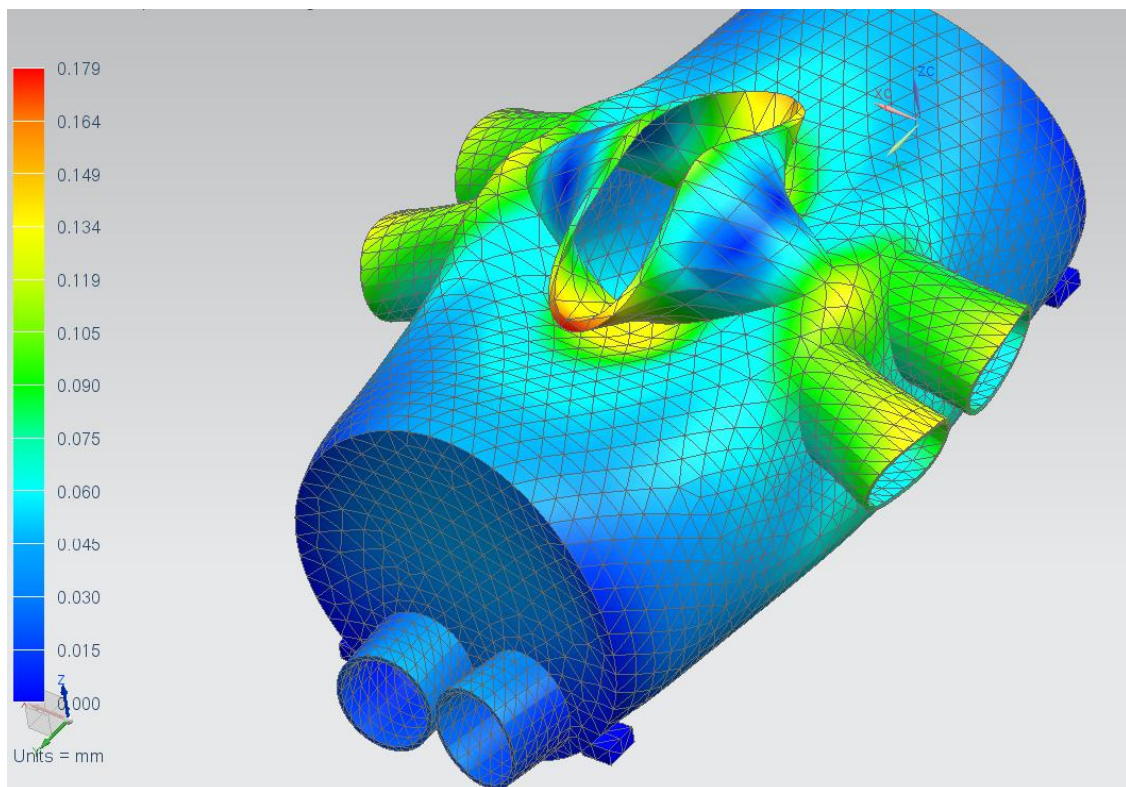
Simulatsioonist ilmnes ka, et teine mood on sarnase käitumisega ning sagedusel 876 Hz, kolmas mood on aga juba 922 Hz, mis on samuti piiranguks seatud sagedusest väljas. Seega võib oletada, et kollektori anuma lõpliku mudeli väljatöötamise käigus lisatud materjal kindlasti veelgi tõstab omavõnkesageduste piire ning moodide tsoonid liiguvad ebasoodsast piirkonnast veelgi kaugemale. Selel 6.14 on näidatud risttahuka kujulise anuma esimene mood



Sele 6.14. Risttahuka kujulise õhuanuma esimene mood, 1568 Hz

6.3.4 Anuma tugevus rõhupulsatsioonidele

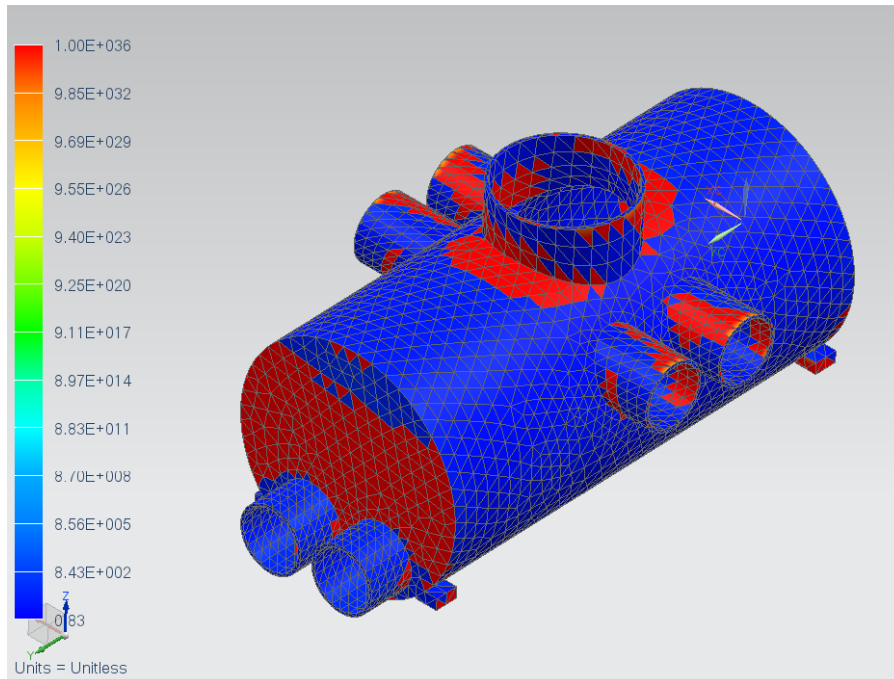
Välistamaks olukorda, kui kogu kollektor on CAD mudelina valmis loodud ning ilmneb, et tema disain ei pea vastu rõhu pulsulistest muutustest tingitud väsimusele, on raisatud hulganisti aega ning tööd peaks alustama uuesti. Selleks puhuks teostatakse ka 2mm seinaga anuma tugevusanalüüs sisselaskekollektoris aset leidvaile rõhu pulssidele, mis võivad ulatuda kuni 3 bar-ini. Rõhu mõjul deformeerunud anum on näidatud seel 6.15, kus on näha ka maksimaalne deformatsioon punase värvusega millimeetrites.



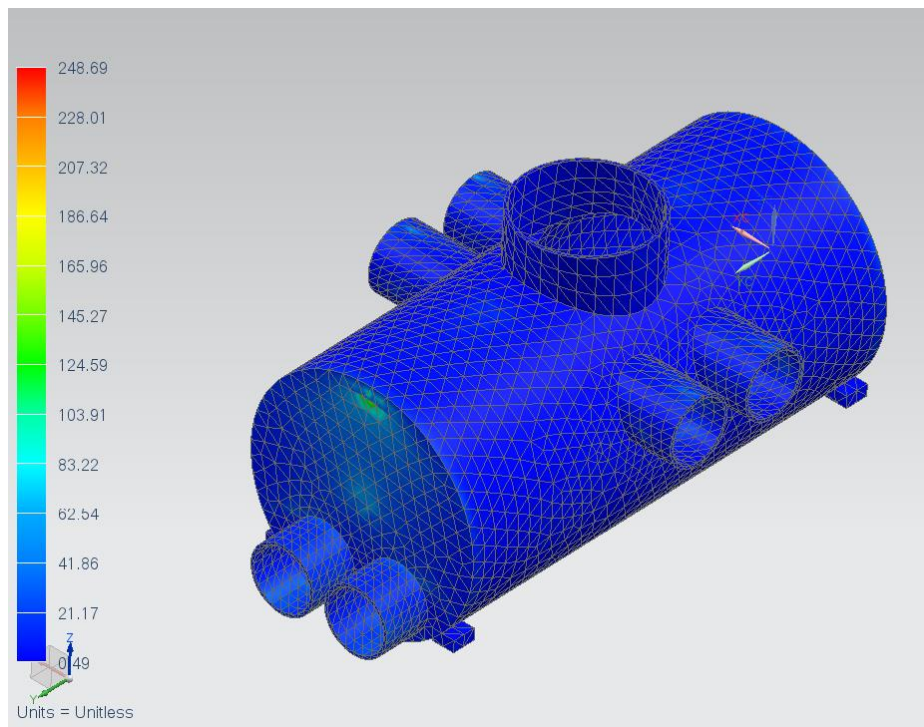
Sele 6.15. Anuma deformatsioon tingituna sisemisest rõhust 3 bar

Tulemuste põhjal võib järeldada, et kui kollektorile on lisatud karburaatori flants, mis hetkel kõige enam deformeerunud piirkonda jäigemaks muudab, siis jäävad ka deformatsioonid veelgi väiksemaks. Seega hetkel ei ole vajadust anuma seinapaksust suurendada või lisa tugevuselemente spetsiaalselt projekteerida. Sarnane tulemus oli ka ristahuka kujulisel anumal

Silindrilist anumat simuleeriti ka väsimusele ja tugevuse varutegurile, mille tulemused on toodud vastavalt sele 6.16 ja sele 6.17. Simulatsioonist järeldub, et 2mm seinapaksusega alumiinium anum peab ilusti vastu üle 1 miljoni tsükli, mis on ka seeriatootmises levinud piirmäär.



Sele 6.16. Kollektori õhuanuma materjali väsimuse ohutustegur



Sele 6.17. Kollektori õhuanuma materjali tugevuse ohutustegur

6.3.5 Õhuanuma geomeetria valik lähtudes simulatsioonide tulemustest

Tehtud simulatsioonide põhjal otsustati projekteerida sisselaskekollektorile õhuanum ruumalaga vähemalt 4 liitrit, millest väiksema väärtuse puhul oli täheldada olulist võimsuse kadu. Täiteastme kerget kasvutrendi oli märgata kuni 5 liitrise õhuanuma ruumalani.

Eelnevalt analüüsitud geomeetriad olid risttahukas ning silindriline õhuanum. Teostati nii voolavus analüüs kui tugevusanalüüs rõhule 3 bar. Tulemustest selgus, et mõlemad geomeetriad on piisava jäikuse ning tugevusega, siis saab teha eelistuse alles projekteerimisel, kui arvestatakse ka piiranguid mõõtmetele, et tagatud oleks 4 liitrine ruumala ning piisav jäikus omavõnkesagedusele ja tugevusele.

7. SISSELASKEKOLLEKTORI PROJEKTEERIMINE

Eelnevalt leitud geomeetria analüüs andis hea ülevaate, milline võiks anum oma mõõtmetelt olla, et täidetud oleks kõik piirtingimused. Seega kontrollitakse projekteerimise käigus pidevalt anuma ruumala. Selleks modelleeritakse esialgu „õhuruum“. See annab võimaluse teha ka projekteerimise vaheetappides voolavuse analüüse, et traktide paigutused oleksid võimalikult optimaalselt valitud ning tagatud oleks ka paigaldamiseks vajalik ruum detailide ümbruses.

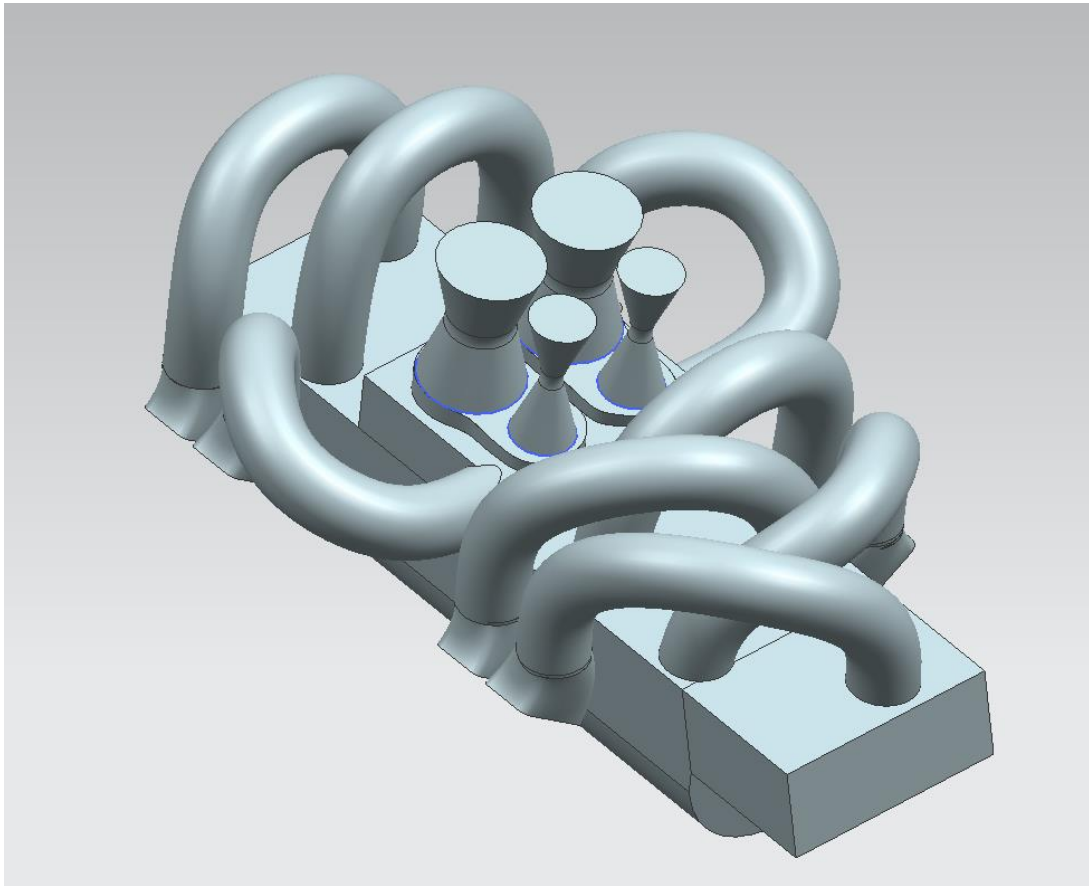
7.1 Kollektori õhuruumalamudeli projekteerimine ja analüüs

7.1.1 Traktide õhuruumala mudel

Järgmisena projekteeritakse kanalid ühendamiseks silindripeades ning õhuanumas asuvaid trakte. Mudeli loomise käigus selgus, et kõige optimaalsemaid traktide pikkuseid, mis eelnevalt leitud (valem 6.1) on antud ruumi väga keeruline paigutada. Kuna hetke etapis loodavale mudelile pannakse juba rõhku ka lõpp toote kujunemiseks, siis projekteerimisel arvestatakse ka rohkemate piirtingimustega.

Modelleerida tuli ka üleminekud ümaralt ristlõike pindalalt plokikaane ristküliku ristlõikele. Loodud mudel on samuti liidetud anuma ning traktidega, et nende simulatsioon toimuks ühel ajal. Seel 7.1 on näidatud õhuruumala mudel koos üleminekute, traktide ning tingliku karburaatori ahenevate lõõridega, mis on liidetud voolavuse analüüsiks üheks tervikuks.

Sarnaselt eelanalüüsile ei pöörata ka esialgse õhumudeli loomisel nii suurt rõhku pisidetailidele, kui üldisele konseptsioonile, et analüüse saaks vaheetappides teha võimalikult kiiresti. Lisaks peab arvestama ka sellega, et dünaamiline arvutus võtab rohkelt aega ning seetõttu on esialgsetes arvutustes kasutatud suuremaid arvutusvõrgu elemente, eesmärgiga lühendada arvutusteks kuluvat aega arvutuse täpsuse hinnaga. Kui mudelit on vastavalt esialgsetele analüüsile parandatud ning tulemused on rahuldavad, arvutatakse mudel uuesti väiksemate elementidega, et saavutada arvutuste parem täpsus.



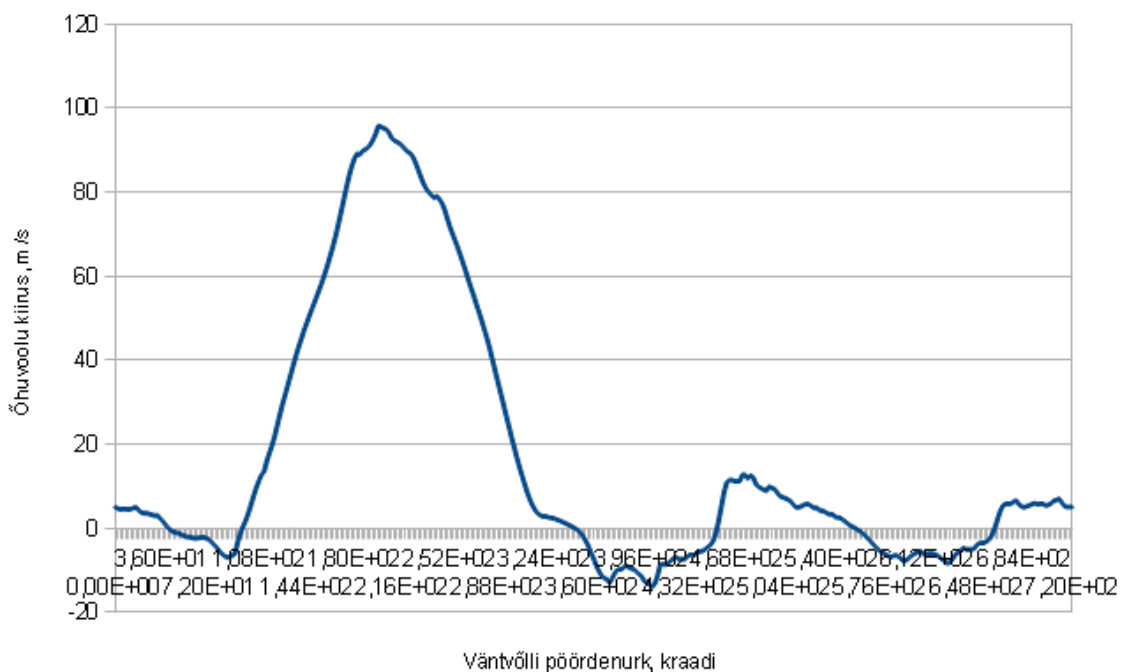
Sele 7.1. Ühendatud torustikuga kollektori õhuruumala mudel

Torude paigutamisel kasutati NX-i tööriista moodulit Mechanical Routing, mis võimaldab luua painutatud jooni(inglise keeles *splines*) ruumiliselt. Lisaks sellele kontrollib programm automaatselt, et painutusnurgad ei läheks liiga järsuks, kuvades vigased raadiused punaselt. Kuna loodud õhuruumalamudel is peeti silmas kogu trakti pikkust üldiselt, siis ei ole momendil ka teada, milliste lõikude tarvis üldse kasutatakse teras toru, või saab kasutada painutatavat alumiinium või kummimaterjalist torusid.

Õhumudelile lisati ka ahenevad düüsid, mis simuleerivad karburaatori lõõre. Simulatsioon viiakse läbi nii maksimaalse õhuanuma ruumalaga, mida saab ette nähtud ruumi paigutada, kui ka Lotus Engine Simulaatoriga saadud optimaalne 4 liitrise mahuga.

7.1.2 Õhumassi jaotumine traktidesse dünaamiliste tingimuste korral

Kui eelnevat valikut testiti õhu osakeste liikumist staatilises olekus, siis praegust konstruktsiooni simuleeritakse olukorras, kui õhuvool läbib kõiki traktide avausi süüte järjekorras. Sellise meetodikaga saab täpsema ülevaate traktide vastastikmõjust õhumassi voolamisele reaalsemas olukorras. Õhumassi voolu kiirused saab kasutades Lotus Engine Simulation tarkvara tulemuste kuvamist graafiliselt, kus saab vaadelda iga silindri traktides toimuvat eraldi ning lihtsamate tekstitöötlus võtetega ka vormindada nad MS Excelis, mis on suuteline suhtlema ka CAE tarkvaraga NX. Seel 7.2 on Lotus Engine Simulationiga simuleeritud õhuvoolu kiiruse graafik, mis on näidatud ühe vāntvõlli pōörde puhul kiirusel 5200 pōōret minutis.



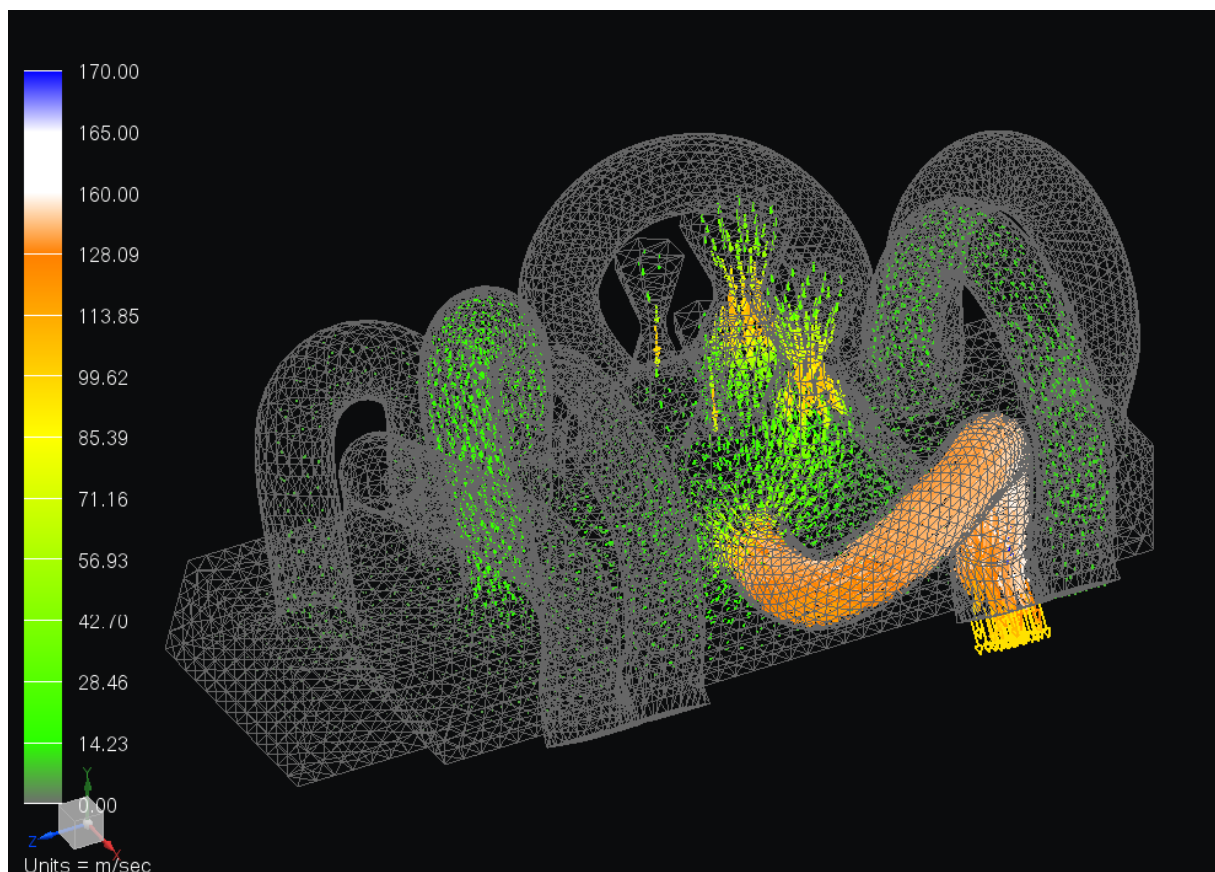
Sele 7.2. Õhuvoolu kiiruse graafik 5200 pōōrdel Lotus Engine Simulation tarkvarast

Õhukiiruse graafikud sisestati iga silindri kohta programmi NX tabelina, mis seejärel teostas LEM(Lõplike elementide meetod) arvutuse õhusakeste liikumisest.

7.1.3 Õhuruumalamudeli voolavuse analüüs

Voolavuse analüüsiks defineeritakse arvutusvõrgustik väiksemate elementidega, et tulemus oleks täpsem. See aga tingib koos torustiku lisamisega arvutusaja pikenemise. Selel 7.3 on toodud simulatsiooni kuva, kui ühes traktis toimub sisselaske takt ning ülejäanutes on näha õhu liikumise jätkumist. Simulatsioonist on võimalik tuvastada, et õhukanalites jätkavad osakesed liikumist ning klapi sulgumisest tingituna surutakse õhu osakesi kõikidesse traktidesse.

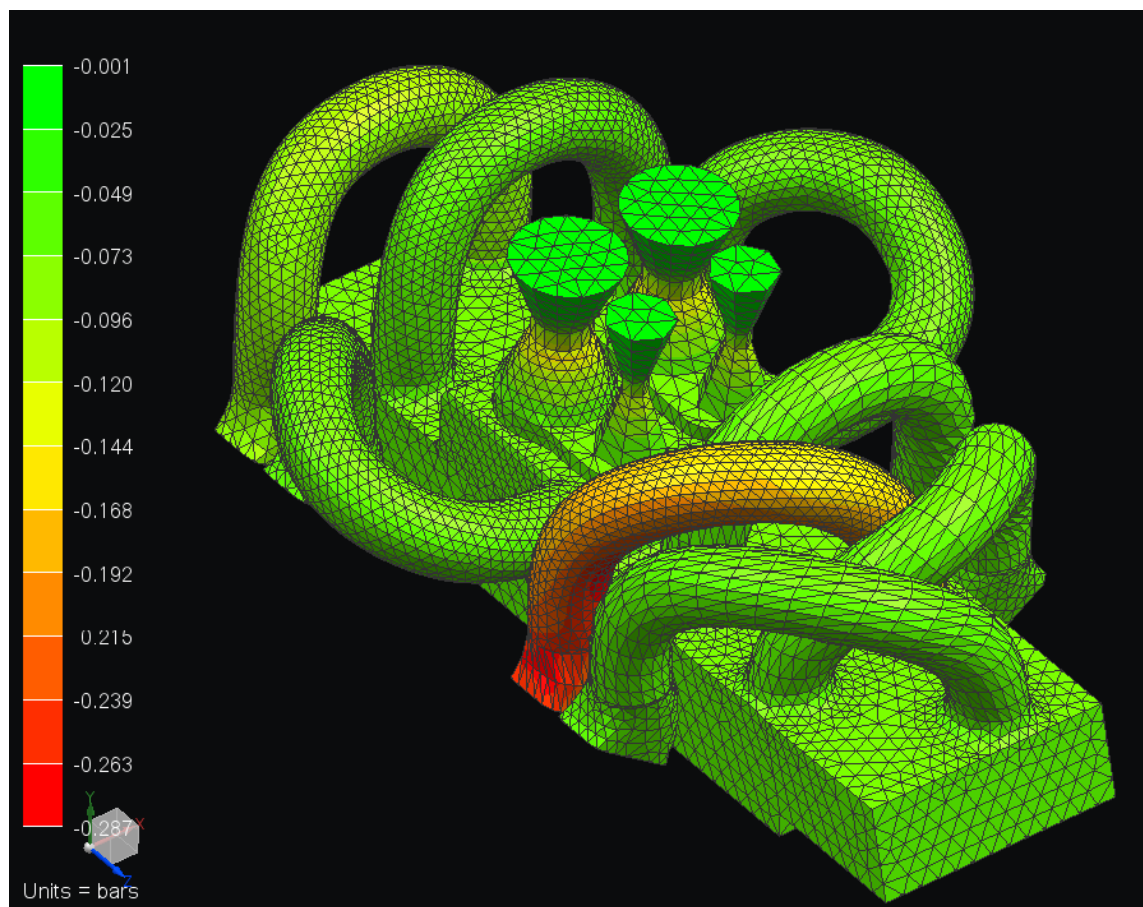
Analüüsist selgub ka, et õhuanuma ruumala võib olla liiga suur, kuna kirjanduses [3] märgitakse soovituslikuks õhuvooluks suunaga üles 14 m/s, et oleks tagatud kütuseosakeste liikumine koos õhumassiga ning osakeste liikumiseks horisontaalsel tasapinnal on vajalik vähemalt 10 m/s õhuvoolu kiirust.



Sele 7.3. Õhumassi voolukiirus sisselaske takti kestvuse hetkel

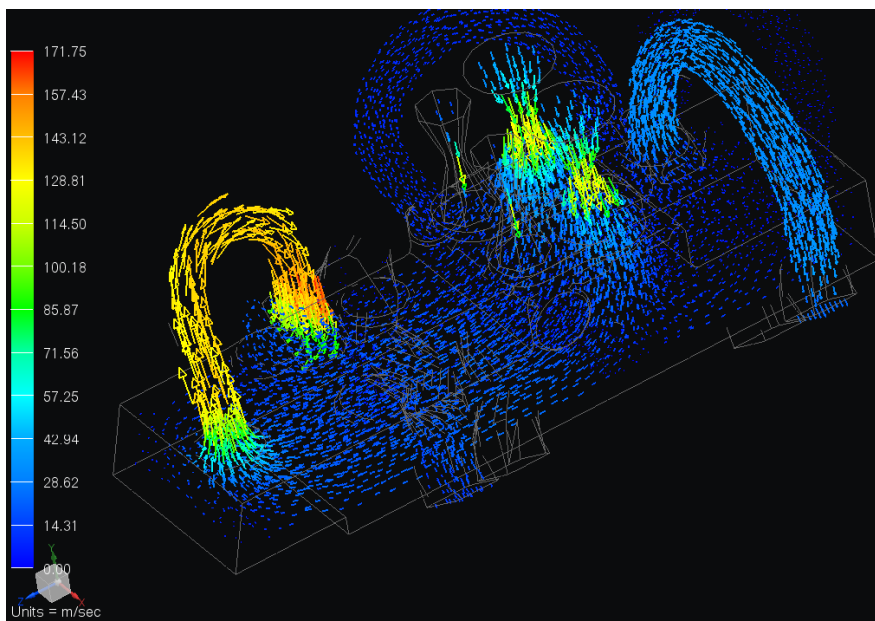
Rajatingimuseks seatud õhukiiruse graafikutelt on näha, et sisselaske traktis saavutatakse plokikaane ava juures kiiruseks ligi 100 m/s. Selle tulemusena jääb keskmine õhuvoolu kiirus traktides alla poole Machi.

Kasutades LEM analüüsi on võimalik ka jälgida õhuruumis tekkivaid alarõhke. Ühe kanali maksimaalne alarõhk on toodud seel 7.4 kus saavutatakse isegi 0.3 bar alarõhku. Ilmneb ka, et sisselaske takti ajal valitseb alarõhk kogu sisselaskekollektoris.



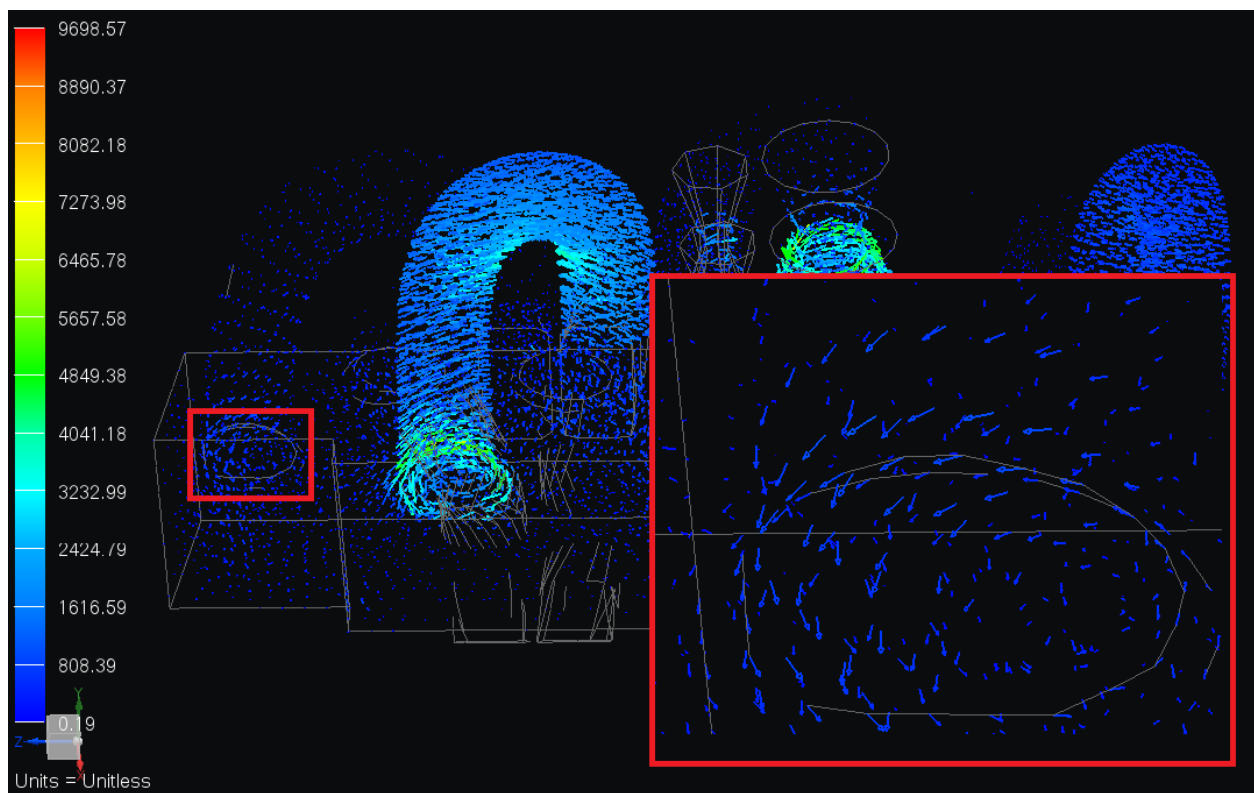
Sele 7.4. Alarõhk sisselaskekollektoris

Vaadeldakse ka õhuanumas liikuva õhu kiirust kaugeimasse trakti. Kirjanduses on toodud minimaalne õhuliikumine kütuse edasikandumiseks pikisihis 10 m/s [3]. Antud mudelil see ka saavutatakse ning on kuvatud seel 7.5, kus on näha, et õhukiirus anumas jääb üle miinimum kiiruse isegi karburaatorist kõige kaugemal asetsevas traktis.



Sele 7.5. Õhuosakeste liikumise kiirus õhuanumas kaugeimasse trakti karburaatorist

Lisaks õhuvoolu kiirusele vaadeldi ka õhuanumas tekkivaid õhukeeriseid ning nagu on näha seel 7.6, siis tõmmatakse sisselaske faasis oleva trakti naabruses olevatest traktidest õhumassi tagasi anumasse. Kõige suuremad õhupöörised tekivad karburaatori all asuvasse alasse, tingituna karburaatori ahenevatest lõõridest



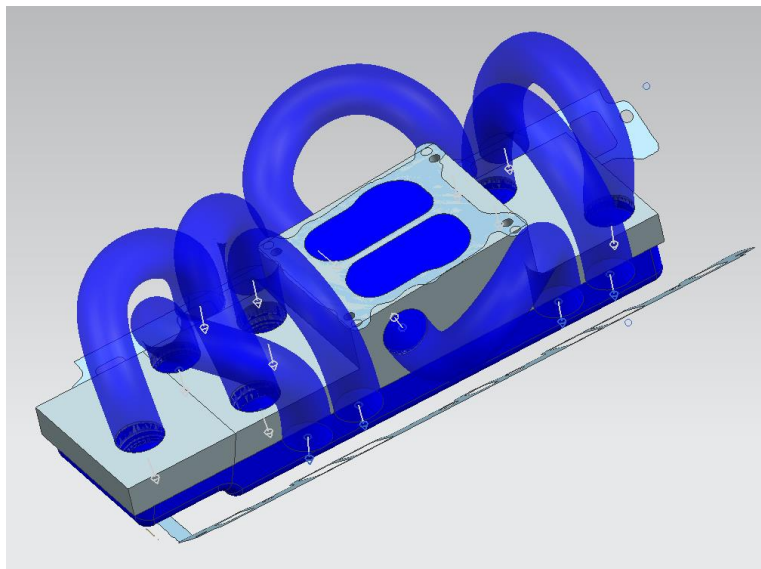
Sele 7.6. Õhukeeriste toimel traktist tagasi imetavad õhuosakesed

7.1.4 Õhuanuma ruumala analüüsi kokkuvõte

Lotus Engine Simulationi ning NX Advanced Simulationiga tehtud analüüsides selgus, et parim õhuanum sisselaske kollektorile on ruumalaga 4 liitrit. Ilmnes ka, et kasutada tuleks tõenäoliselt risttahukatest koosnevat anumad, et oleks võimalik lihtsamalt prototüüpi koostada. Õhuvoolavusele kehtestatud minimaalsed piirkiirused olid samuti täidetud ning väärtused isegi ületasid neid. Kollektori keskmine õhuvoolu kiirus jäi alla poole Machi, mis on samuti soovitatud kiiruse piirmäär, mida ei tohiks maksimaalse täiteastme saavutamiseks ületada. Samuti tekib kollektoris piisaval määral õhukeeriseid, mis parandavad kütuse segunemist õhuga kollektoris.

7.2 Kollektori tootemudeli loomine

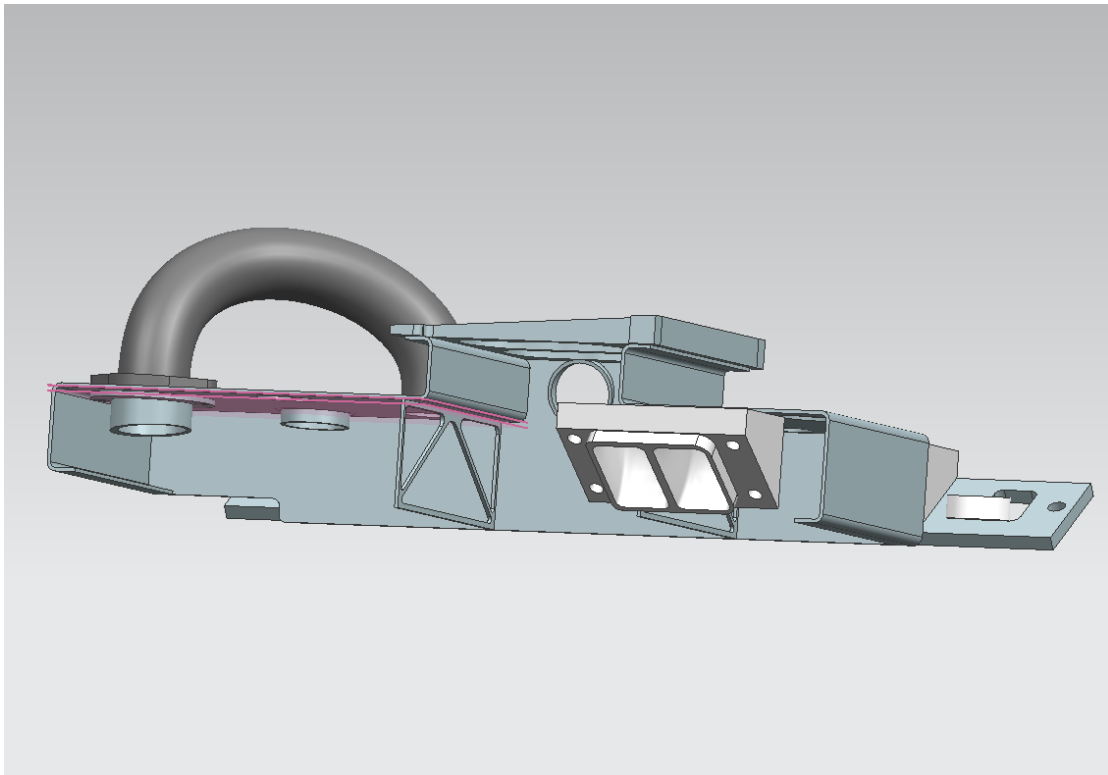
Kuna eelnevalt loodud õhumudel koos traktidega on juba olemas, on toote mudeli väljatöötamiseks juba hea alustala olemas, kuna on selge, kus paiknevad traktid peavad olema. Õhumudelist tootemudeli loomisel on suuresti abiks NX-i 3D tööriistad, mis teevad ühes failis mitme mudeliga töötamise lihtsamaks. Esimesena alustatakse anuma korpusest, millele eelnevatel analüüside põhjal võetakse materjali paksuseks 2 mm. Seel 7.7 on näidatud sinise värvusega õhumudel ning halliga anuma korpus.



Sele 7.7. Sinine õhumudel koos loodud anuma korpuse konstruktsiooniga

3D toote mudeli loomisel peetakse silmas materjalide valikut. Iga detaili kontrollitakse enne põhjalikult välja modelleerimist teadaolevatele jõududele, et materjalide valik(ptk 9) ja paksus oleksid optimaalsed. Silmas peab pidama ka kollektori valmistamiseks võimalikke ning

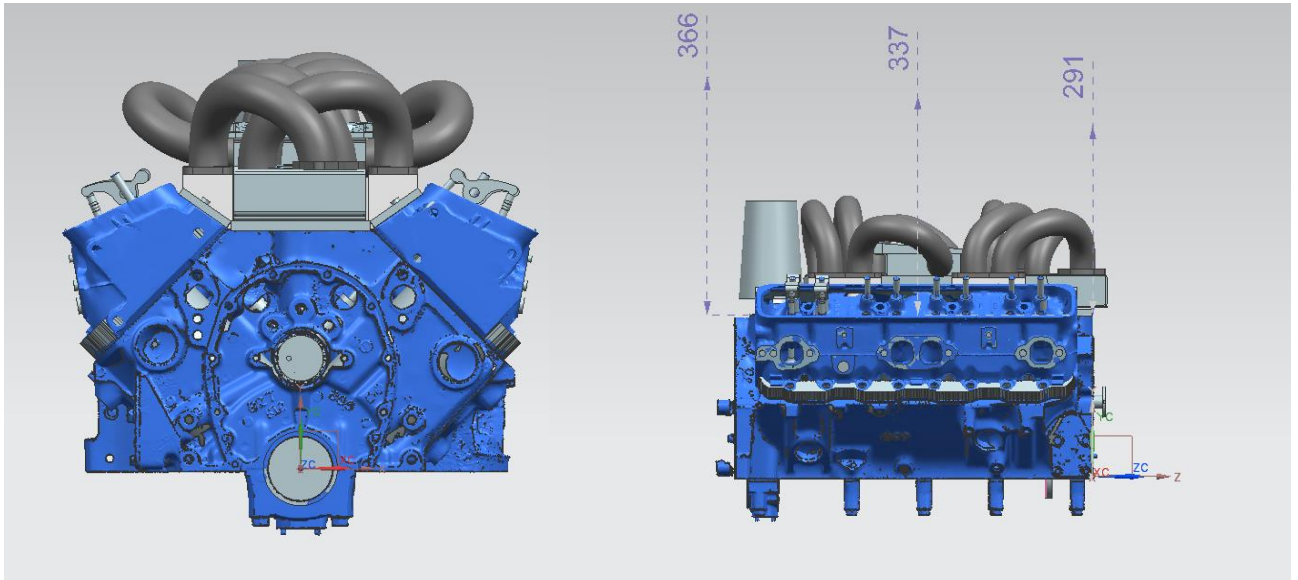
odavaid tehnoloogiaid. Seepärast eelistatakse lehtmaterjali ning painutamist, seejärel freesimist ning treimist ning viimaks kiir prototüüpimiseks kasutatavat 3D printerit. Selel 7.8 on näidatud osa koostamisel olevast mudelist, kus on näha sisselaske trakt, suudmik ning lehtmaterjalist painutatud kollektori osad, koos tugevdusribidega, mis on projekteeritud tõstma omavõnke sagedust kõrgematele hertsidele. Lisaks on sele keskosas näha ümardorult plokikaane suudme kujuliseks trakti ülemineku detaili.



Sele 7.8. Kollektori anuma osaline konstruktsioon

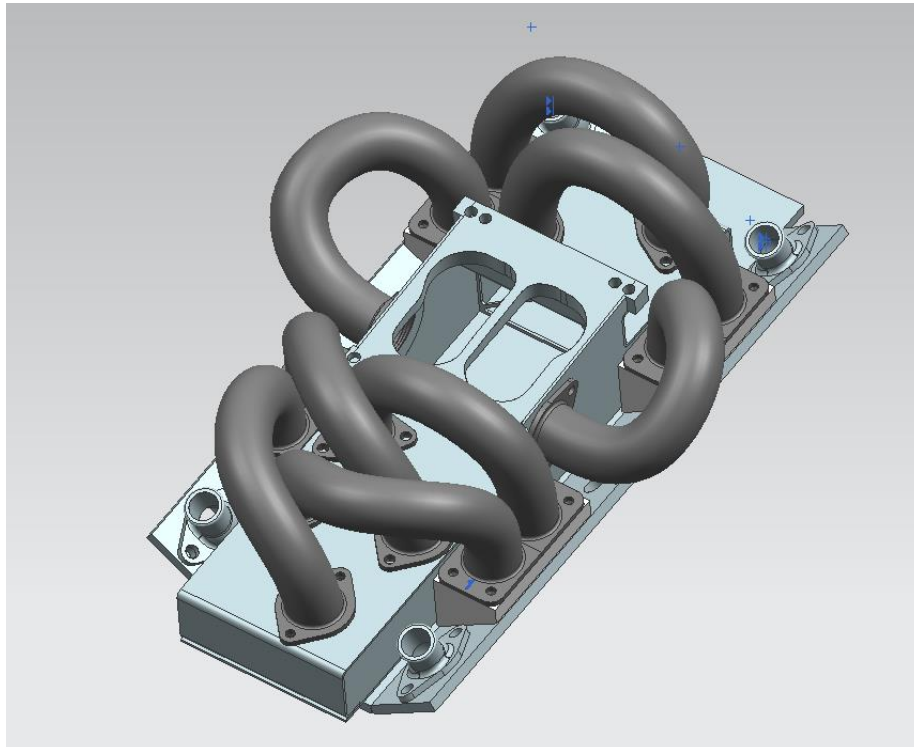
Mudeli loomisel kasutatakse enamjaolt 3D kujundite lõikamist tasapindadega ning seejärel neile meelepärase kuju andmist sünkroontehnoloogiaga (inglise keeles synchronous technology), mis laseb manipuleerida kujundi enda tasapindadega, lisada raadiuseid, koonilisust ning mudeli osasid omavahel liita ja lahutada

Selel 7.10 on näidatud lõpliku toote mudelit koos 3D skanneeritud mootori osadega. Kollektor vastab ettenähtud gabariitmõõtmete piirangule (sele 7.9). Ning samuti jääb ohutusse kaugusesse mootorikate.



Sele 7.9. Projekteeritud sisselaske kollektori koost mootori 3D mudelil

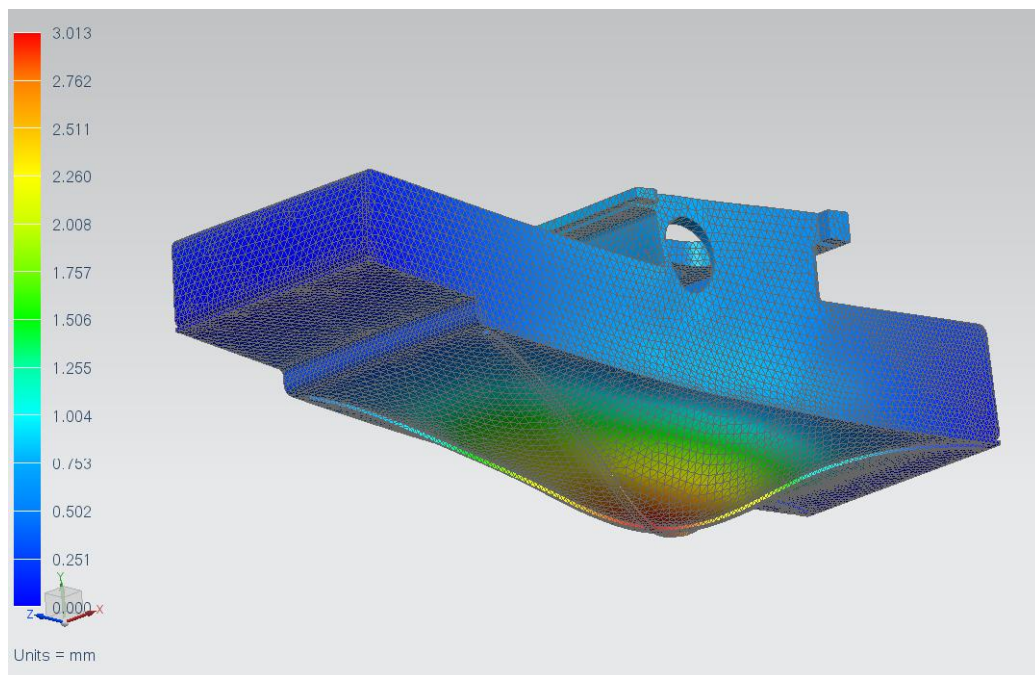
Lõplik kollektorimudel on toodud seel 7.10.



Sele 7.10. Projekteeritud sisselaskekollektor.

7.3 Tugevusanalüüs

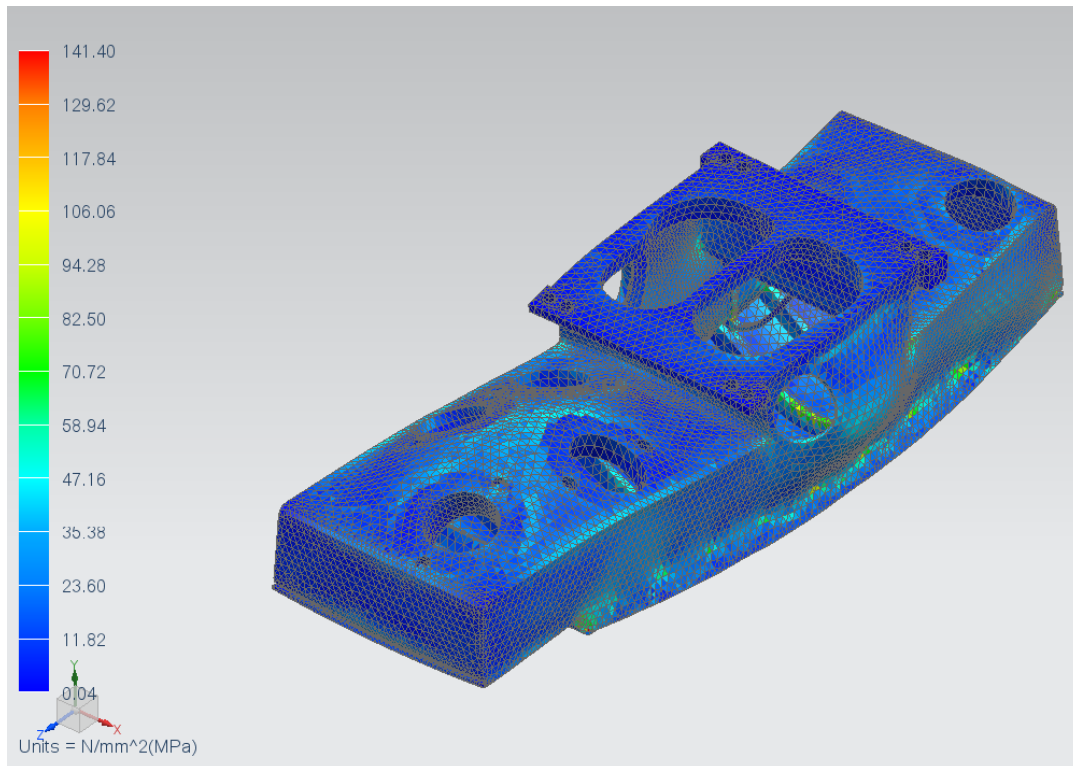
Kuna loodud kollektori mudel erineb esialgsetest geometria analüüsides, tuleb teha valmis kollektorile uued LEM tugevusanalüüsid nii tekkivatele rõhkudele, kui ka omavõnkesagedusele. Vajalikud rõhud saab graafikuna eksportida Lotus Engine Simulationist, kuid kontrollitakse ka 3 bar rõhuga kollektori seintele nagu tehti eelanalüüsis. Sele 7.11 on näidatud kollektori õhuanuma omavõnkesagedus, mille esimene mood jääb 477 Hz juurde, ning vibratsioonide tagajärjel hakkab karburaatori alune põhi võnkuma.



Sele 7.11. Õhuanuma esimene mood 477 Hz

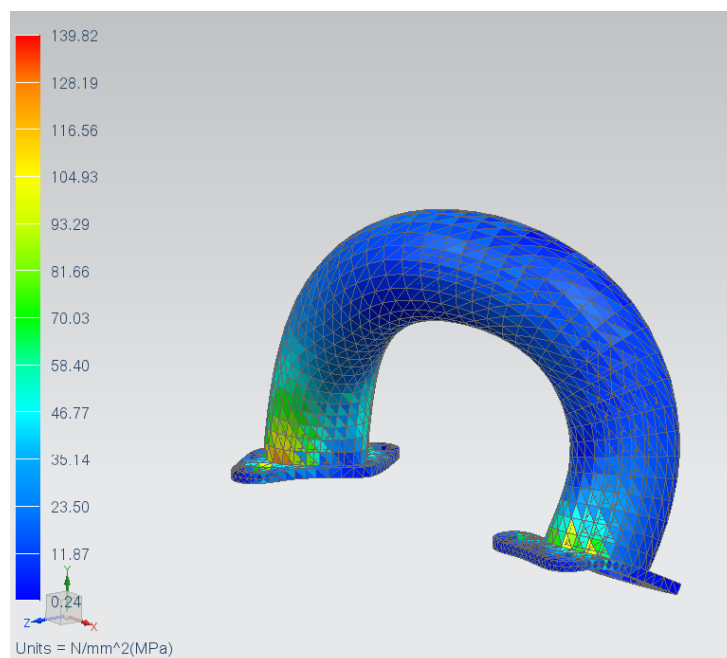
Kuigi 477Hz ületab mootori esimest harmoonikut 400Hz, siis projekteeritakse anuma põhja veel lisa jäikusribid, mis tõstavad esimese moodi 510 Hz piirkonda ning võnkumiste amplituud samuti kahaneb maksimaalsest 3 millimeetrist 1,6 millimeetrini.

Lisaks testisti õhuanumat ka rõhule 3 bar, mille tulemusena tõusid pinged kuni 141,4 MPa, kuid seda ainult teravates pingete konsentraatorites. Arvestades materjali valikut ning Lotus Engine Simulation andmete põhjal on tulemused rahuldavad. Graafiline kujutis pingete jagunemisest üle õhuanuma on toodud selet 7.12.



Sele 7.12. Väsibuspinged õhuanumas rõhuga 3 bar

Arvutati ka traktide omavõnke sagedused, mis jäid kõik üle 400 Hz. Esimese silindri trakti esimene mood on toodud seel 7.13. Trakte testiti ka alarõhule, mis samuti andis rahuldavaid tulemusi.



Sele 7.13. Trakti esimene mood, 477 Hz

8. TOOTMISTEHNOLLOOGIA

8.1 Materjali valik

Materjali valikul lähtutakse asjaolust, et kollektor peab kindlasti kaaluma vähem, kui praegune, mis erinevatel tootjatel jääb 7 kg lähedusse. Käesolevas töös projekteeritud kollektori kogukaal jääb 5 kg juurde, ehk kollektor on ligi 2 kilo kergem masstootmises olevast kollektorist. Kerget kaalu omav ning samal ajal ka küllalt tugeva voolavuspiiriga on alumiinium EN AW 5754 H14.

Materjali voolavuspiiriks on 180 MPa, mis ületab eelnevas tugevusanalüüsis leitud 140 MPa varuga. Lisaks on nimetatud alumiinium ka külmtöödeldav, mis on tähtis õhuanuma konstruktsioonis olevatele painutatud lehtmaterjali valmistamiseks. Lehtmetalli omavaheliseks ühendamiseks kasutatakse TIG keevitust ning hermeetiliseks muutmiseks bensinikindlat tihendiliimi Permatex 85420 PermaShield.

8.2 Komponentide valmistamine

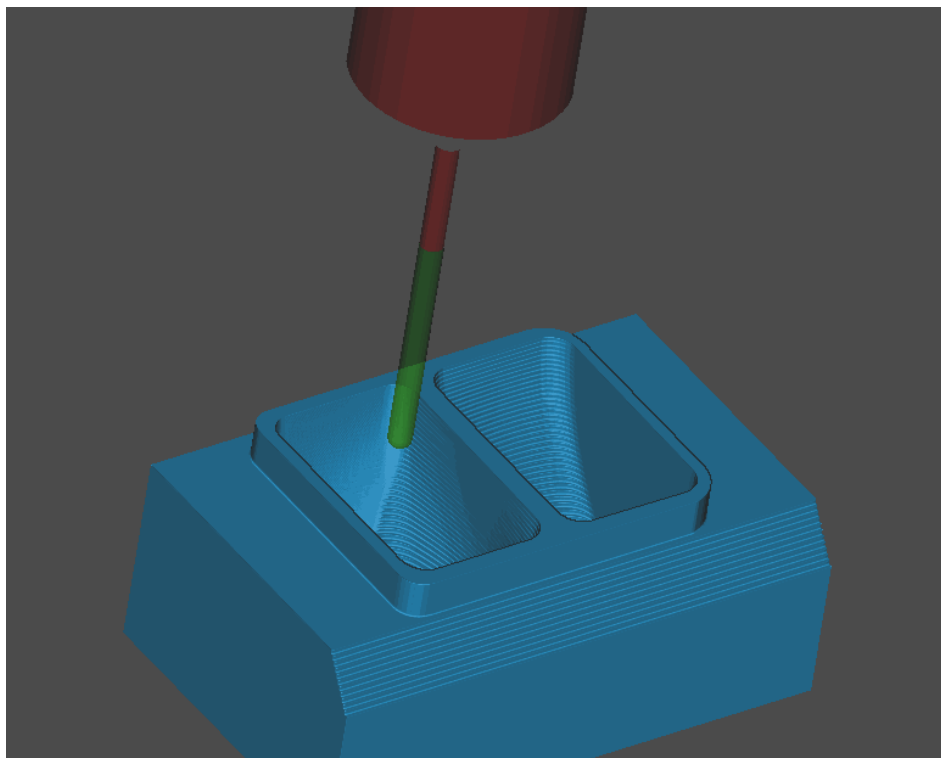
Freesimis tehnoloogiaga valmistatakse traktideks olevad üleminekud, mis on vaja freesimiseks üles seada mitu korda ning võimalik, et isegi nurga all 3 teljelises freespingis, et trakt saaks võimalikult mudeli lähedasena freesitud. Ülemineku ümara avade poolse külje freesimine simulatsioon on toodud seel 8.1. Teostades CAM (Computer Aided Manufacturing) simulatsioone, saab teha kindlaks, kuidas detaili freesida, et pingi aega kuluks kõige vähem. Nurga all üles seadmist saab vältida ka 5 teljelise freespingiga, kuid nende tunnihind on kallim, kui enamlevinud 3 teljelistel freespinkidel.

Ülejäänud lehtmetailist koosnevaid detaile lõigatakse kas laserlõikusega või vesilõikusega.

Laserlõikuse kasuks räägib suurem lõikekiirus kui vesilõikusel, kuid samas kuna tegu on termilise protsessiga, siis on head lõikepinda paksematel materjalidel raske saavutada.

Käesolevas projektis on laserlõigatavaks detailideks flantsid silindripeade ning kollektori ühendamiseks ning alusplaat, millele pinnakaredusele suuri nõudmisi ei ole tarvis esitada.

Küll aga peab olema tagatud hea tasapinnalisus ühenduspindade vahel ning seetõttu võib vajalikuks osutuda tasapinna freesimine. Kuna aga tegu on tasapinnaga ning flantsidesse on tarvis freesida avad üleminekute tarvis, siis võidetakse ülesseade ajaga.



Sele 8.1. Ülemineku CAM freesimine

Torustiku loomiseks on esialgne tehnoloogia 3D printimine, mis on tänaseks päevaks sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast oluliselt oma hinnas langenud. Valida on hetke turul laserpaagutus tehnoloogia ning kiht-kihi haaval sulatamise tehnoloogia, mis kannataks ka mootori töös tekkivaid vibratsioone. Kolmas tehnoloogia kasutab materjaliks kipsi, kuid see võib osutuda liialt hapraks ning seetõttu osutub see tehnoloogia välistatuks. Neist kolmest kõige odavam on ABS plastikut kasutatav tehnoloogia, kuid mis eeldab torudele tugevdus võrgustiku projekteerimist, et tõsta omavõnkesagedust. Laserpaagutusega loodud detailid on end ka varasemalt tudengivormeli projektides tõestanud.

9. PROJEKTEERITUD TOOTE MAKSUMUS

Kuna projekteeritud kollektor on üksikeksemplaris, siis on loogiline, et toote valmistamise kulu on kõrgem, kui masstoodangus toodetavate kollektorite hinnad. Tootevalmistamiseks arvestatakse turu keskmiste minuti või tunnihinnaga. Ajakulu arvestatakse SECO tööriistadega töötlemisel ning töötusaeg saadakse CAM tarkvarast, sisestades kataloogist soovituslikud ettenihked ja lõikekiirused.

Arvutuslik ajakulu detailidele on toodud tabelis 9.1, kus lõiketöötlus ajad on simuleeritud CAM tarkvaraga ning laserlõikus ning painutamisele kuluv aeg on saadud hinnapäringuga. Lisaks on kuvatud koostus olevate tükide arv tehnoloogia kaupa ning arvestuslik hind.

Tabel 9.1 Töötlustele kuluv aeg

	Tunnihind	Kuluv aeg	Hind kokku
Freesimine	35	3	105
Laserlõikus	100	0,3	30
Painutamine	30	0,5	15
		Kokku:	150

Tabelis ei kajastatud 3D printimist, mille hind kujuneb laserpaagutuse korral vastavalt sellele, mitu prinditavat detaili on võimalik tööruumi paigutada. ABS plastikut materjalina kasutatav tehnoloogia on mitmel ettevõttel hinnaga 0,50 eurot 1 cm³, mis teeb selle tehnoloogia kallimaks, kui laserpaagutus, kuna viimase puhul arvestatakse materjali kuluks kogu tööruumi täitev pulber, ning detaili tüki hind sõltub sellest, kuidas õnnestub detailid paigutada. Antud töö puhul on selleks 4 toru ning 4 flantsi 300 euroga.

Lisaks tehnoloogiale on tarvis arvestada ka materjali kulu, mis on toodud tabelis 9.2. Kilohinnad ettevõtetel erinevad ning hetkel on keskmiseks alumiiniumi kilo hinnaks 7 eurot.

Tabel 9.2 Materjali kulu

	Ühiku hind	Kogus	Hind
Lehtmaterjal, kg	2,5	17	42,5
Plokkmaterjal, kg	7	5	35
3D printimine, cm ³	0,5	46	23
		Kokku:	100,5

Tabel 7.2 näitab ka 3D printimise tehnoloogia keskmist hinda 1 cm³ puhul, kui tööalasse õnnestub mahutada 4 toru ning flantsi. Ühe masinatäie hinnaks kujunes hinnapäringu järgi 300 eurot. Kogukulud on toodud tabelis 7.3

Tabel 7.3 Ühe toote kulud kokku

Kulu	Maksumus
Metallitöötlus	150
3D printimine	300
Materjal	101
Koostamine	30
Hind kokku:	581

Masstoodangus olevate kollektorite hinnad algavad 200 dollarist, ehk 150 eurost, kuid sellele lisanduvad veel transpordikulud ning tollimaks, mis võivad ületada kollektori enda hinda, sõltuvalt saadetise kaalust.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös projekteeriti sisselaskekollektor General Motorsi mootorile LG4, mille ülejäänud komponendid on valmistaja tehase originaalid. Kollektor projekteeriti sõitma Super Stock klassi kiirendusvõistluse autole, mille eesmärgiks oli parandada veerandmiili läbimise aega sekundi võrra. Samas lisades meeskonnale eelise, et konkurent ei saa sarnast lahendust kasutada.

Sisselaskekollektor projekteeriti kasutama akustilist ülelaadimist pööretel 4900 RPM, kompromissina traktide mahutamise mootoriruumi ning täiteastme paranemise kõige enamkasutatavas pööretevahemikus.

Magistritöös koguti algandmed mootori väliskarakteristikute kohta veojõumõõtestendis. Ülejäänud olulisemad mootori komponendid simulatsioonide teostamiseks mõõdeti kasutades 3D skanneerimist ning Mitituyo mõõtemasinat. Mõõdetud detailidest koostati CAE tarkvaraga NX 9.0 klapiajami mudelid ning simuleeriti selle kinemaatikat, mille tulemusel genereeriti tabelarvutuse tabelid mootorisimulatsiooni programmide tarbeks.

Tabelarvutuse programmi moodulit kasutati arvutusliku hinnangu andmiseks mootori suutlikusest veerandmiili läbimiseks ning saadud tulemused olid väga lähedased realselt sõidetud ning ka tehase poolt pakutud aegadega, mis andsid kinnitust nii simulatsioonide õigsuses kui ka selles, et arvutusmoodul annab tõepäraseid tulemusi. Seega annab arvutusmoodul ka adekvaatse tulemuse, kui sisenditeks on projekteeritud sisselaskeelementidega simulatsiooni momendikõverate väärtused.

Esialgsete väliskarakteristikute simulatsioonideks kasutati tarkvara GT-Suite ning Lotus Engine Simulation, mis andsid väga sarnased tunnusgraafikud mõõdetud väärtustega. Samuti oli mõlema programmi genereeritud tunnusjoonte erinevuseks üksteisest 5%, mida loeti piisavalt täpseks.

Simulatsioonide põhjal valiti mootorile turul pakutavate ostutoodete hulgast uus nukkvõll, millega likvideeriti mõõtestendis mõõdetud võimsuskõvera horisontaalsus, mis viitas selgelt gaasivahetuses esinevale häirele.

Kollektori projekteerimise etapis arvestati eelkõige akustiliseks ülelaadimiseks vajalikku trakti pikkust ning samuti arvatati välja trakti suurus, mis tagaks maksimaalse lubatud õhumassi kiiruse traktis. Simulatsiooni tarkvarast aga järeldus, et analüütiliselt leitud toru siseläbimõõt ei annaks mootori efektiivsusele maksimaalset võimalikku täiteastet ning seetõttu kasutati Lotus Engine Simulationi optimeerimis tööriista, mis andis maksimaalse täiteastme 38 mm läbimõõduga trakti korral. Sarnaselt leiti ka kollektori õhuanuma ruumala maht, mille optimaalne väärtus on 4 liitrit.

Eelanalüüsis arvatati LEM tarkvaraga risttahuka kujulise ning silindrilise kujuga õhuanuma õhuosakeste liikumisteede karburaatorist traktide sisend avadesse, et oleks näha, kumba geomeetrilist kujundit projekteerima asumisel eelistada voolamise seisukohalt. Tugevusanalüüsid ilmnas, et mõlemad varjandid on piisavalt vastupidavad ning nende omavõnkesagedused ületasid kõvasti mootori esimest harmoonikut 400 Hz.

Projekteerimist alustati õhuruumalamudelid, mida on tarvis LEM analüüsi teostamiseks. Seega hoiti kokku projekteerimis aega, kuna keerulisi detaile ei olnud tarvis välja joonestada. Õhuliikumise graafikud eksporditi mootori simulatsiooni programmist Lotus Engine Simulation ning neid kasutati dünaamilise voolamise analüüsiks LEM tarkvaraga, mis on integreeritud CAE programmi NX. Analüüsi käigus uuriti nii voolu kiirusi traktides kui tekkinud keeriseid, mis aitavad kaasa õhu ja kütuse segunemisele. Saadud tulemused näitasid, et voolukiirused traktides jäävad alla soovituslikult maksimaalsest poolest helikiirusest, mistõttu ei esine kollektoris liigsest õhukiirusest tingitud täiteastme halvenemist.

Tootemudeli loomisel arvestati ka geomeetrilisi piiranguid, mis olid tingitud mootoriruumi ruuminappusest ning asjaolust, et projekteeritav kollektor peab mahtuma kahe silindrirea vahele. Tootemudeli loomise aluseks võeti eelnevalt konstrueeritud õhuruumala mudel, mis oli analüüsid sobivaimaks osutunud ja modelleeriti selle ümber tootemudel. Tootemudelit omakorda kontrolliti omavõnkesagedusele ning samuti ka rõhule 3 bar, mis võib sisselaskekollektoris esineda.

Tootmistehnoloogiat käsitleti üksikeksemplari loomise seisukohalt. Prototüübi loomiseks valiti lehtmaterjali lõikus laseriga ning seejärel painutamine. Ümaralt traktide torude ristlõikelt üleminekuks silindripeades olevatesse traktidesse kasutatakse freesimist ning ühendavate torude loomiseks osutus kõige otstarbekamaks 3D printimine.

Kollektori kogukaaluks kujunes 4,8 kg, mis on 2 kilo kergem kui alumiiniumist kommertskasutuseks mõeldud alumiiniumvaland

Viimaks käsitleti ka prototüübi valmistamise kulusid üksikeksemplarina. Arvestati kokku kuluv materjal ning selle töötlemise hinnad. Üksikeksemplari hind kujunes kallimaks kui turul pakutavad, kuid nende puhul on akustilise ülelaadimise efekt antud mootori puhul kasutatavast pööretevahemikust väljas.

Lõputöös püstitatud ülesanne sai arvutuslikult edukalt lahendatud ning simulatsioonides saadud väärtused olid mõistlikud ning tõenäoliselt ka saavutatavad. Edaspidine uurimustöö võiks käsitleda loodud toote katsetusi sihtotstarbeliselt ning selle käigus välja tulnud projekteerimis puudujääkidega, millele virtuaalselt ilma auto mootoriruumi mudelita ei olnud võimalik tähelepanu pöörata. Toote edukuse puhul katsetustel võiks uurida kollektori tootmist seeriana ning samuti anda rohkem turustamist lihtsustav välimus õhuanumale. Sellisel juhul muutub oluliseks ka tootmiseseadmete soetamine, et kollektori turuhinda tuua konkurentsivõimelisemaks.

SUMMARY

In this thesis intake manifold for General Motors LG4 engine was designed. All of the rest of internal components were the originals from the manufacturer. This manifold was designed to Super Stock series competition, which goal is to improve the quarter mile time by one second and also to provide the unique solution which competitors could not copy.

Intake manifold was designed to use charge inertia benefits at 4900 rotations per minute. Compromise had to be made to fit the intake pipes in the intake bay and to have the effect of charge inertia in most desirable range of RPM.

For this thesis lots of data was necessary to collect. The characteristics of the engine was measured by the dynamometer. All the important parts that were needed for the simulations were 3D scanned or measured by measuring machine Mitituyo at Norma. Results were used to produce the 3D model of the valvetrain to simulate its kinematics by the CAE program NX 9.0. It was then possible to export the motion data to simulation program with the spreadsheet program Excel.

Spreadsheet modulus were also used to calculate the ability of the engine at the quarter mile and the outcome was very close to the numbers proposed by the factory and also that was measured at the track with the professional equipment. This means that the modulus calculates the time in acceptable tolerance and it can be trusted to simulate the quarter mile time with the simulated engine torque data.

Original engine was simulated using the program GT-Suite and Lotus Engine Simulation, which both gave reasonable results in horsepower and torque graphs, differing only from each other by 5% and that was considered as acceptable for the further work.

New camshaft needed to be selected from different manufacturers and to do this different simulations were taken according to the data on the e-catalogues and also solutions that were proposed in different forums. The power graph was measured quite flat and it clearly meant that the gas exchange processes are disturbed. As an outcome of the simulations the problem was fixed and the power graph continued to climb.

In the design of the intake manifold it was mainly focused on the charge inertia effect and the pipe length needed to produce it. The diameter of the pipe was calculated also, that would lead to the maximum mean air velocity in the intake tract. From the simulation software it was concluded that the previously found diameter do not provide the maximum volumetric efficiency and thus optimization process in the Lotus Engine Simulation was performed to find the optimum diameter, which finally came 38 mm. Same process was conducted with the intake plenum, which volume should be at least 4 litres.

In the analysis of the possible geometric bodies the air path from carburetor to the intake tracts was found using the NX FEM application. In the strength and modal analysis both bodies proved themselves as acceptable. Both of the two options were higher modal frequency than engine's first harmonic 400 Hz.

The design of the intake was started with the air-volume model needed for the FEM analysis. Due to this, lots of designing time was saved, because the model didn't have to look as detailed and consist of lots of parts. The air movement data was exported from Lotus Engine Simulation using spreadsheet program and was used in the dynamic analysis of the air in the intake. The study focused on the air velocity in the tracts and also the vorticity of the air to better help mixing the fuel with the air. It was seen from the results that air velocities are lower than the recommended mean value of half a Mach (speed of sound) and it also generated enough vorticities to help mixing the air and fuel.

In the creation of the product model, lots of restrictions had to be taken into account. The main problem was fitting the intake pipes in the engine bay, because there is very little clearance for it and it also needed to be fitted in the valve-train valley of the engine. The basis for the product design was previously modeled air-volume. Intake manifold model was also analyzed with FEM to be sure it can withstand the inner pressure of 3 bars and that the modal modes won't resonate with engine's first harmonic.

Production technology was described as creation of a prototype. Lots of sheetmetal parts were therefore created and also adding them a few bends to save up the assembly time. Milling technology was suggested to the transformers of the round shape tract to the cylinder head port, that was rather rectangular. The extremely complicated pipes of the manifold were suggested to 3D printing, because its cost are nowadays much cheaper than to bend the metal pipes.

In the last chapter the economical aspect of the project was handled but it was also kept in mind that this is for prototyping only. As was expected the overall price was much more than the products in the market, but the designed manifold is unique and specially designed for this particular engine.

The assignement of this thesis was solved and the results collected were also reasonable and, no doubt, achivable. Future reserach could be made at the field testing and to remove the design flaws that were impossible to take account virtually without the engine bay model. If the design succeeds then it could be thought of producing the manifold commercially in little series. Little attention also could be put into making it commercially more attractive. In addition, little reserach could be made into buying the industrial machines to lower the cost of the product and offer it to the market more consumer friendly price.

Kasutatud kirjandus:

1. Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals, USA: McGraw-Hill, 1988.
2. Hiereth, H., Prenninger, P. Charging the Internal Combustion Engine, Viin: Springer-Verlag, 2003.
3. Heisler, H. Advanced Engine Technology, Hungary: Elsevier, 2008.
4. Bosch, R. Gmbh. Automotive Handbook 8th Edition, Germany: Robert Bosch, 2011.
5. Kabardin, O. Koolifüüsika käsiraamat, Tallinn: Valgus, 1985.
6. Zeroto60times andmebaas [WWW] <http://www.zeroto60times.com> (11.04.14).
7. GT-Suite User Manual and Tutorials
8. Siemens NX Help, CAST(Computer Aided Self Teach)
9. Naunheimer, H., Bertsche, B., Ryborz, J., Novak, W. Automotive Transmissions Fundamentals, Selection, Design and Application, Berliin: Springer-Verlag, 2011
10. Lotus Engine Simulation Tutorial
11. Herranen H., Karjust, K., Kers, J., Krustok, J., Kulu, P., Käerdi, H., Laansoo, A., Lend, H., Otto, T., Pödra, P., Riives, J., Saarna, M., Sergejev, F., Tiidemann, T., Veinthal, R. Mehaanikainseneri käsiraamat, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012.
12. Singal, R.K., Singal, M., Singal, R. Basics of Mechanical Engineering. New Delhi: I.K., International Publishing House Pvt. Ltd. 2012.
13. Intervjuu Taavo-Erkki Vitsutiga teemal „Mootorite arendustöö Eesti kiirendusspordis“ (14.04.2014)
14. Edelbrocki koduleht [WWW] <http://www.edelbrock.com> (01.04.2014)
15. Competition Cams koduleht [WWW] <http://www.compcams.com> (07.04.2014)
16. Pontiac Firebird'i omanike foorum [WWW] <http://www.thirdgen.org> (01.01.2014)

LISAD

LISA 1

Sisselaskekollektor(Originaalsuurus A1)

LISA 2

Õhuanum(originaalsuurus A1)

LISA 3

Karburaatori flants

LISA 4

OSA I

LISA 5

OSA II