



**TALLINNA
TEHNIKA KÕRGGKOO**

Aldo Mandre

**ERIOSTARBELISE
APARATUURI
PÕRUTUSKINDLUSE
KATSESÜSTEEMI
PARENDAMINE**

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2015

Aldo Mandre

**ERIOOTSTARBELISE
APARATUURI
PÕRUTUSKINDLUSE
KATSESÜSTEEMI PARENDAMINE**

LÕPUTÖÖ

Mehaanikateaduskond
Masinaehituse eriala

Tallinn 2015

Mina

Aldo Mandre tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Lõputöö autor

.....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

Üliõpilase kood: 110820388

Õpperühm: MI 81

Lõputöö vastab sellele püstitatud kehtivatele nõuetele ja tingimustele.

Juhendajad

Tavo Kangru.....

Paul Liias.....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

.....

Konsultandid

Sokolov Peeter.....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

.....

Kaitmisele lubatud „.....“20....a.

..... teaduskonna dekaan.....

Teaduskonna nimetus

Nimi ja allkiri

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1. MEHAANILINE LÖÖK.....	7
1.1 Parameetrite mõju spektri graafikule.....	9
2. KONSTRUKTSIOONIELEMENTIDE VALIK	15
2.1 Konstruktsioon.....	15
2.2 Haamer.....	16
2.2.1 Haamri pea	21
2.3 Resonantplaat.....	21
2.4 Raam	23
2.5 Alasi.....	26
2.6 Elektroonika.....	27
3. TUGEVUSARVUTUSED	29
2.1 Nelikant kinnituspoltide tugevusarvutused	29
3.2 Laagrikorpuse poltide tugevusarvutused	31
3.3 Laagrikorpuse plaadi kinnituste tugevusarvutused.....	32
3.4 Nelikant lati tugevusarvutused	33
3.5 Haamri võlli tugevusarvutus.....	35
3.6 Laagrite valik.....	36
4. VALMISTAMISTEHNOLOOGIA	38
4.1 Tooriku valik	38
4.2 Seadmete valik.....	39
4.3 Detailide töötlemistehnoloogia valik ja režiimide arvutus	40
4.4 Operatsioonide normeerimine, tööaja arvutus	46
5. MAJANDUSLIK OSA	47
5.1 Kulutused materjalile.....	47
5.2 Kulutused seadmetele ja tööjõule	49
5.3 Kulutused lõikeinstrumentidele ning rakistusele.....	50
5.4 Konstruktsiooni omahind	51
KOKKUVÕTE.....	52
SUMMARY	53

VIIDATUD ALLIKAD.....	54
LISAD	58
Lisa 1. Operatsiooniaegade normeerimine.....	59
Lisa 2. Al profiili hinnad	68
Lisa 3. Standardsete toodete hinnad	69
Lisa 4. Kulutused lõikeinstrumentidele.....	70

SISSEJUHATUS

Käesolev diplomitöö sisaldab endas erinevate põrutusspektrite tekitamiseks vajalike katseseadmete projekteerimist ning modelleerimist. Töö on teostatud ettevõttes Radius Space OÜ, mis asutati 2014 aasta lõpus, kui omavahel ühendasid jõud Eesti esimesest satelliidist Estcube-1 välja kasvanud ettevõtte Space OÜ ning üle kümne aasta metallitöötlemisega tegelenud firma Radius Machining OÜ. Radius Space OÜ arendab ja toodab väikesatelliitide mehaanilisi detaile ning süsteeme nagu nt. lahtikäivad päikesepaneelid, antennid, korpused. See on ainus Eesti eraettevõtte, kes omab enda projekteeritud ja toodetud komponente kosmoses.

Töö eesmärgiks on luua ettevõttele löögi katsetus laud, millega oleks võimalik kontrollida projekteeritud satelliitide vastupidavust põrutusele ning vibratsioonile. Taoline katsetamine muutub tänapäeval üha olulisemaks kuna satelliitide projekteerimisel üritatakse hoida kokku materjali pealt, saades niiviisi kergemaid konstruktsioone. Mida kergem on konstruktsioon seda väiksemad tulevad kulutused selle kosmosesse saatmiseks. Samas mida rohkem materjali satelliidilt eemaldada, seda nõrgemaks ta jääb. Siinkohal tulekski nüüd rohkem panustada konstruktsiooni katsetamise peale, et anda garantii uue ning kergema konstruktsiooni töökindluses. Hetkel Eestis puuduvad vastavad seadmed satelliitide katsetamiseks ning katsetused tuleb läbi viia välismaal, eelkõige Hollandis, mistõttu suurenevad kulutused transpordile. Ainsana on Tartus olemas vibratsiooni laud, aga sellega ei ole võimalik saavutada piisavalt suuri ülejõude, mis tekivad kanderaketide eemaldumisel. Konstruktsiooni projekteerimisel lähtutakse Martin Jonsson uurimustööst „Development of shock test facility for qualification of space equipment” [1]. Uurimustöös kajastatavale konstruktsioonile tehakse omapoolseid parendusi koos vastavate põhjendustega.

Projekteeritav konstruktsioon peab vastama järgmistele nõuetele:

- Katseseade peab võimaldama etteantud põrutusspektri tekitamist ja mõõtmist sageduste vahemikus 100 Hz ... 10 KHz ja kiirenduste vahemikus (0...10 000) g;
- Katseseade peab olema kompaktne ja kergesti transporditav;
- Löögi asukoht peab olema muudetav;

- Katset peab olema võimalik korrata;
- Satelliidi maksimaalne mass 20 kg.
- Konstruktsiooni maksimaalsed parameetrid: 2200x2400x2700mm

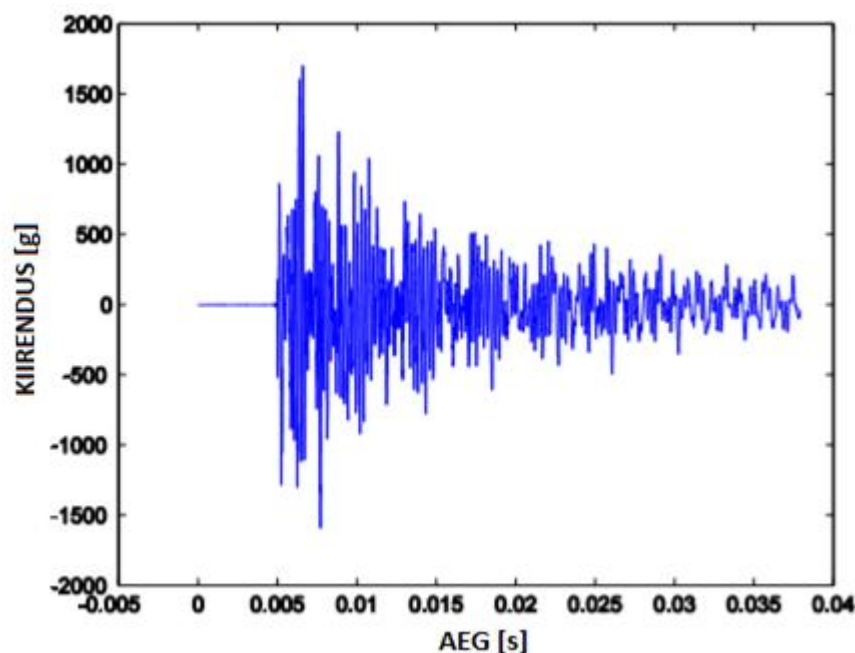
Kindlasti tuleks ära mainida, et tegemist ei ole müügi tootega vaid ettevõtte enda katseseadmega, tänu millele saab ta oma klientidele anda garantii kosmoseaparatuuri vastupidavuse osas.

Projekteeritava konstruktsiooni elementidele on teostatud kõik vajalikud tugevusarvutused. Diplomi töö tegemisel on kasutatud võimalikult palju standardseid elemente, mida on võimalik Eestist tellida. Mittestandardsete detailide puhul on ära toodud nende tootmise tehnoloogia koos operatsiooniaegade normeerimisega.

Antud diplomitöö on jagatud nelja suuremasse peatükki. Esimeses osas kirjeldatakse konstruktsioonielementide valikut koos vajalike arvutustega. Teises osas määratakse detailide töötlemise tehnoloogia. Seejärel tehakse vajalikud majandustehnilised arvutused koos konstruktsiooni omahinnaga. Kõige lõpus saab tutvuda tehniliste joonistega, mille alusel valmistatakse soovitud konstruktsioon.

1. MEHAANILINE LÖÖK

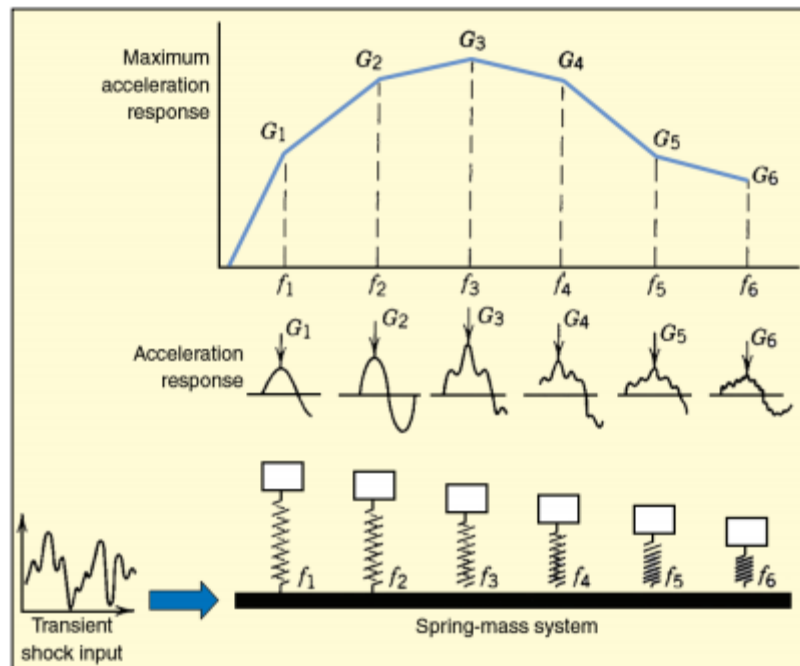
Mehaaniline löök on äkiline kiirendus või aeglustus, mis on põhjustatud kokkupõrkest, kukumisest, löögist, maavärinast või plahvatusel. Löök on mööduv füüsiline erutus, mille terminit kasutatakse äärmuslike jõudude puhul, millele materia allub. Lihtsustatuna võib lööki vaadelda kui vektorit, mille ühik saadakse kiirendusest. Tavapärast on selleks ühikuks g, mis väljendab raskuskiirenduse kordarvu. Löögi impulssi saab iseloomustada selle maksimaalse kiirenduse, kestuse ning impulsi kuju järgi (kolmnurkne, pool siinus, trapetsi kujuline jne.) (Sele 1). [2]



Sele 1. Löögist põhjustatud kiirenduse graafik [1]

Selet 1 on näha, et kiirenduse positiivne ning negatiivne pool on sarnased nii kujult kui ka maksimaalsete väärtuste poolest. Antud juhul on tegemist kahaneva sinusoid graafikuga. Kiirenduse mõju löögist on lühiajaline ning selle väärtus langeb tagasi algolekusse vähem kui 0,04 sekundiga. Kuigi kiirenduse väärtused võivad küündida 300 000 g-ni siis tänu lühikesele ajale märkimisväärsed muudatusi jäiga keha kiirenduses ning nihkes ei toimu.

Löögi paremaks uurimiseks kasutatakse löögi (šoki) reageerimis spektrit ehk SRS. SRS on mingi suvalise mõõduva kiirenduse graafiline kujutamine nagu nt. löök. Seejuures vaadeldakse ühe vabadusastmega süsteemi (SDOF) reageerimist kiiruse muutusele. SRS näitab maksimaalse kiirenduse reageerimist lõpmatu arvu vabadusastmetega, kusjuures igal vabadusastmel on erinev loomulik sagedus. Näitena tuuakse allpool ära SRS-i graafiku koostamine vedru otsas oleva massi abil (Sele 2).



Sele 2. SRS-i koostamine [3]

Selelt 2 näeme, et kiirendus kasvab G_1 -lt kuni G_3 -ni ning hakkab seejärel langema. Sagedus aga suureneb pidevalt x-teljel vasakult paremale minnes. See on tingitud sellest, et kui lasta vedru otsas olev mass vabalt võnkuda siis alguses on kehal suurem kiirendus ning tal kulub rohkem aega, et teha üks täis võnge. Kuna vedru tahab saavutada stabiilset olekut siis kiirendus langeb ning kehal kulub ühe täisvõnke tegemiseks aina vähem aega ehk siis sagedus kasvab.

Kindlasti tuleb ära määrata projekteeritava konstruktsiooni summutamis norm ζ . Antud juhul võetakse selleks 5%. Siinkohal saame arvutada kvaliteedi teguri Q , mis saadakse valemist (1) [4].

$$Q = 1/(2*\zeta), \quad (1)$$

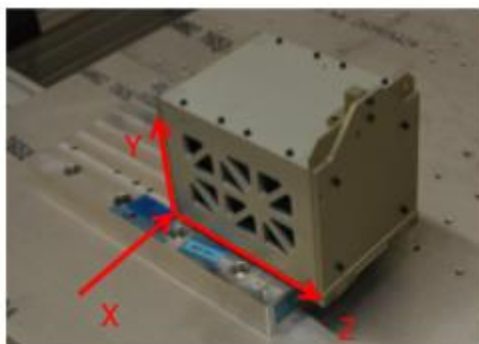
kus Q -kvaliteedi tegur
 ζ -summutamis norm

Vastavalt valemile 1 arvutatakse kvaliteedi tegur:

$$Q = 1/(2*0,05) = 10$$

SRS on standardne vahend kosmosetööstuses kuid siiski ei tasu seda 100 protsendiliselt usaldada, sest see annab meile ainult oletatava löögi spektri väärtused. Samuti ei ole olemas unikaalset SRS-i, mis kehtiks iga kiirenduse puhul.

Satelliitide testimisel tuleb arvestada sellega, et orbiidile saadetavale satelliidile ei kandu kanderakettide eemaldumisel tekkiv löök otseselt, vaid kaudselt läbi kinnituselementide. Seetõttu tuleb katsekeha kinnitada sama tüüpi kinnituselementidega nn. hoidjasse, mis on omakorda kinnitatud ümbritsevasse keskkonda (Sele 3). Lõpuks peab tekitatav löök läbi hoidja jõudma katsekehani. Selleks, et tekitada lööki peab olemas olema löögi tekitaja. Samuti on vajalik löögi vastuvõtja.



Sele 3. ESTCUBE prototüübi kinnitus hoidjasse

1.1 Parameetrite mõju spektri graafikule

Konstruksiooni valmistamisel arvestatakse tingimusega, et teatud parameetreid saaks muuta kuna soovitud SRS graafiku saamine ei ole nii lihtne ning nõuab muudatuste tegemist katsetamise käigus. Parameetrite väljaselgitamiseks tuginetakse Martin Jonsson uurimustööle. Lõplikud parameetrid selguvad siiski katsetamise käigus. Järgnevalt käsitletaksegi järgmiste parameetrite mõju SRS graafikule:

- Löögi tugevus/kiirus
- Haamri mass
- Alasi materjal
- Haamripea materjal
- Löögi asukoht
- Resonantplaadi kinnitus
- Vahtplasti mõju

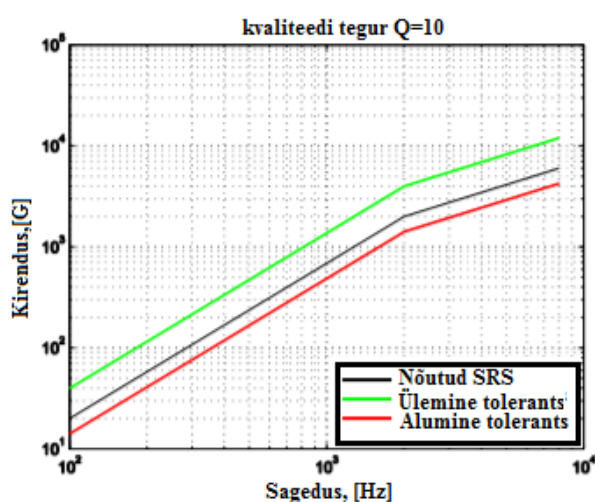
Töös kajastatavad katse tulemused on läbi viidud haamri langemisel resonantplaadi peale.

Parameetrite muutmisega peab olema saavutatav Euroopa Kosmoseagentuuri poolt kehtestatud spektri graafik (Sele 4). Spektri ülemine tolerants on +6 dB ning alumine tolerants -3dB. Haamri poolt tekitatav spekter peab mahtuma tolerantsi hälvete sisse. SRS-i tingimused on koondatud allolevasse tabelisse (Tabel 1):

Tabel 1

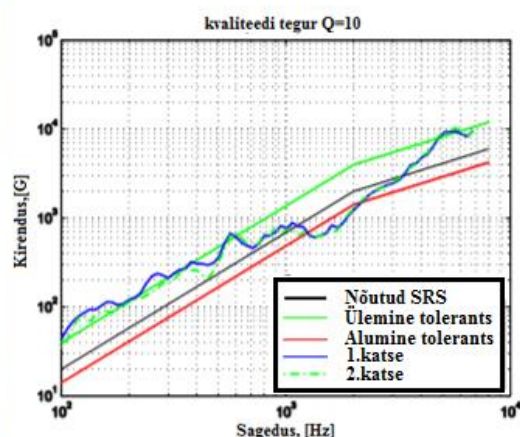
SRS tingimused

Sagedus, Hz	Kiirendus, g	Tolerantsid, dB
100	20	+6 dB/-3 dB
2000	2000	
8000	6000	



Sele 4.SRS piirhälbed [5]

Selel 5 on näha Hollandi löögikatsetus ettevõttesse THOR saadetud satelliidi Estcube prototüübi testimine x-telje suunas koos SRS-ga.



Sele 5. ESTCUBE prototüübi testimine

Löögi tugevuse määramine seisneb langeva haamri kaldenurga valikust. Vaatleme haamri löögi mõju SRS-le nurkadel 15°, 30°, 45°, 60° ning 75°. Valemist 2 [6] leitakse haamri kiirus v [m/s] vahetult enne lööki:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (2)$$

kus g -raskuskiirendus m/s^2 ,
 h -haamri kõrgus löögi pinnast.

Kasutades siinusfunktsiooni valemit (3) [7], saadakse haamri kõrgus h [m] löögi pinnast.

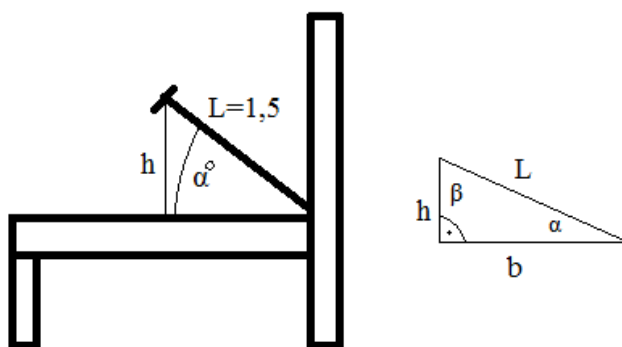
$$\sin \alpha = \frac{a}{c}, \quad (3)$$

$$a = c * \sin \alpha$$

kus a -kaatet m;
 α -kaateti vastasnurk °;
 c -hüpotenuus m.

Antud juhul on hüpotenuusiks haamri pikkus L , kaatetiks kõrgus h ning kaateti vastasnurgaks haamri langemisnurk α (Sele 6). Seega saadakse :

$$h = L * \sin \alpha$$



Sele 6. Haamri langemisnurk

$$h_1 = 1,5 * \sin 15^\circ = 0,388 \text{ m}$$

$$h_2 = 1,5 * \sin 30^\circ = 0,750 \text{ m}$$

$$h_3 = 1,5 * \sin 45^\circ = 1,061 \text{ m}$$

$$h_4 = 1,5 * \sin 60^\circ = 1,299 \text{ m}$$

$$h_5 = 1,5 * \sin 75^\circ = 1,449 \text{ m}$$

$$v_1 = \sqrt{2 * 9,81 * 0,388} = 2,76 \text{ m/s}$$

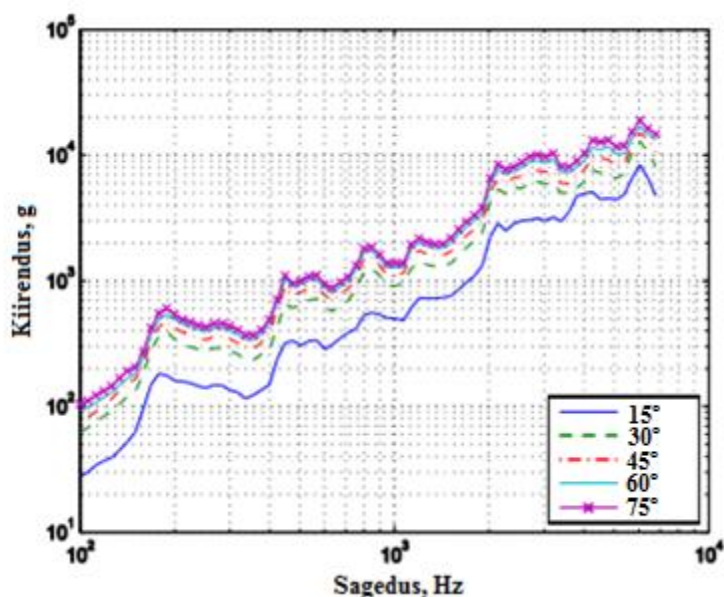
$$v_2 = \sqrt{2 * 9,81 * 0,750} = 3,84 \text{ m/s}$$

$$v_3 = \sqrt{2 * 9,81 * 1,061} = 4,56 \text{ m/s}$$

$$v_4 = \sqrt{2 * 9,81 * 1,299} = 5,05 \text{ m/s}$$

$$v_5 = \sqrt{2 * 9,81 * 1,499} = 5,42 \text{ m/s}$$

Arvutustest on näha, et mida kõrgemalt haamer kukub, seda suurem on tema kiirus. Seetõttu peaks nihkuma ka SRS-i graafiku üldpilt kõrgemate väärtuste poole. Selle paremaks arusaamiseks on järgnevalt ära toodud antud katsete löögi spektri graafikud (Sele 7).



Sele 7. Haamri kaldenurga mõju SRS-le [1]

Graafikult on näha, et spektrite üldpilt jäi samaks. Esimese ja teise katse vaheline erinevus on märgatavalt suurem kui ülejäänud järjestikuste katsete erinevused. See on tingitud haamri kaarjast trajektoorist ning sinusoidist. Kui võrrelda esimese ja teise katse haamri kiiruste erinevust, milleks on 1,08 m/s järgnevate katsetega siis näeme, et haamri kiiruste erinevus väheneb teatud logaritmi järgi. Sellest ka siis selline hüpe esimese ning teise spektri vahel.

Haamri massina kasutatakse roostevabast terasest AISI 304 valmistatud kahe kiloseid raskusi, mida saab vajadusel lisada haamri tagumisele küljele. Kokku on võimalik lisada 4 kilogrammi.

Haamri massi varieerumisel muutub eelkõige spektri murdepunkti alumine pool. Mida suuremat raskust kasutada, seda kõrgemad kiirendused saadakse sagedusel kuni 1000 Hz. See tähendab

omakorda spektri ühtlustumist. Raskuse lisamine küll tõstab kiirenduse väärtusi madalatel sagedustel, kuid seejuures ei ole märkimisväärset muutust SRS-graafikus suuremate raskuste korral. [1]

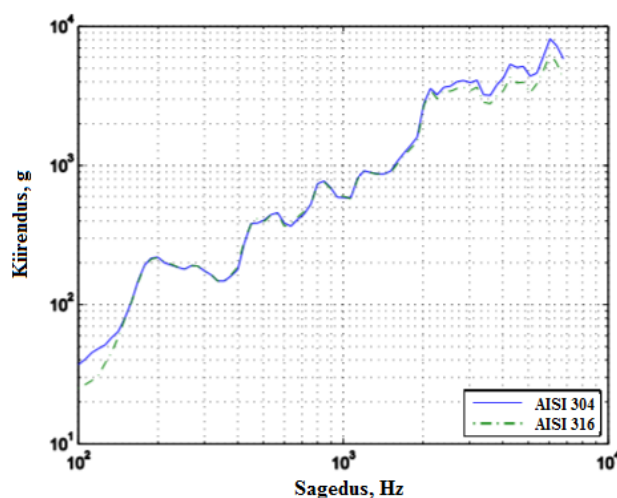
Kokkuvõttes ei tasuks konstruktsiooni häälestamisel väga palju rõhku panna erinevate raskuste vahetamisele. Piisab kui katsetada 2 kg juures. Löögi tugevust reguleeritakse eelkõige haamri langemisnurgaga.

Ühe võimalusena on tulevikus kaalutud veel jõusaali raskuste kasutamist, mille ostmine tuleb tunduvalt odavam kui spetsiaalsete raskuste valmistamine. Selleks tuleks haamri tagumisele küljele töödelda kindla läbimõõduga tasku, kuhu asetatakse vahepuks, mille peale käib raskus. Tuleviku aspekti vaadates töödeldaksegi haamri taha 30mm läbimõõduga ning 5 mm sügavune tasku. Vastavalt kasutatava raskuse siseavale saab kombineerida erineva astmega pukse.

Alasi materjaliks valitakse roostevaba teras AISI 304. Kui võrrelda alumiinium 6082-st ning AISI 304-st valmistatud alasid siis erinevused SRS spektris ei ole väga suured. Muutused toimuvad peamiselt spektri murdepunktist kõrgematel sagedustel. Seejuures tõstab kõvem materjal kiirenduste väärtusi. Kindlasti tasuks tulevikus katsetada teiste materjalidega, et veenduda alasi materjali valiku olulisusest. Alasi tööjoonis on ära toodud lisades (Lisa 13). [1]

Haamripea otsustati valmistada roostevabast terasest AISI 304. Selle kinnituseks on ära toodud SRS spekter AISI 304 ning AISI 316 kohta (Sele 8).

Selel 8 võib märgata, et kõvema materjali korral saadakse väiksemad kiirendused kõrgematel sagedustel. Lisaks sellele langeb kõvema materjali korral kiirenduste väärtus sagedusel kuni 200 Hz.



Sele 8. SRS-i mõju haamri pea materjalist [1]

Resonantplaati on võimalik nihutada 16 erinevasse asendisse. Mida rohkem resonantplaadi nurga poole minna, seda suurem kiirendus antud sagedusel saadakse. Kui nihutada resonantplaati nii x-kui y-telje suunas korraga, saadakse veelgi kõrgemad kiirendused spektri murdepunkti juures, milleks on 1000Hz.

Vahtplasti kasutamine resonantplaadi all ühtlustab SRS graafikut ning samuti langetab üldisi kiirenduste väärtusi. Kindlasti tuleks kasutada pehmendusi ka konstruktsiooni ning põranda vahel. Kuna konstruktsiooni ei kinnitata põranda külge, vaid hoopis lükatakse vastu sein (resonantplaadi küljele suunatud löögi korral), tuleks kasutada isolatsiooni materjali ka sein ja raami vahel. Isolatsiooni materjalina võidakse kasutada lisaks vahtplastile ka kummi. Isolatsiooni materjali kasutamise täpsemad tingimused määrab ära tööline, kelle ülesandeks on seadistada laud vastavalt soovitud SRS spektrile.

Resonantplaati on võimalik kinnitada kahel erineval viisil. Esimeseks variandiks oleks plaadi fikseerimine külgtugede abil ning teiseks võimaluseks oleks resonantplaadi kinnitamine raami külge tavaliste pitskruvidaga. Mõlemal juhul nihkub kogu spektri graafik allapoole võrreldes vabalt raamil seisva plaadiga. Kuigi märkimisväärt erinevust SRS-le nende variantide puhul ei ole, tasub siiski kinnituse mõju arvestada konstruktsiooni häälestamisel. [1]

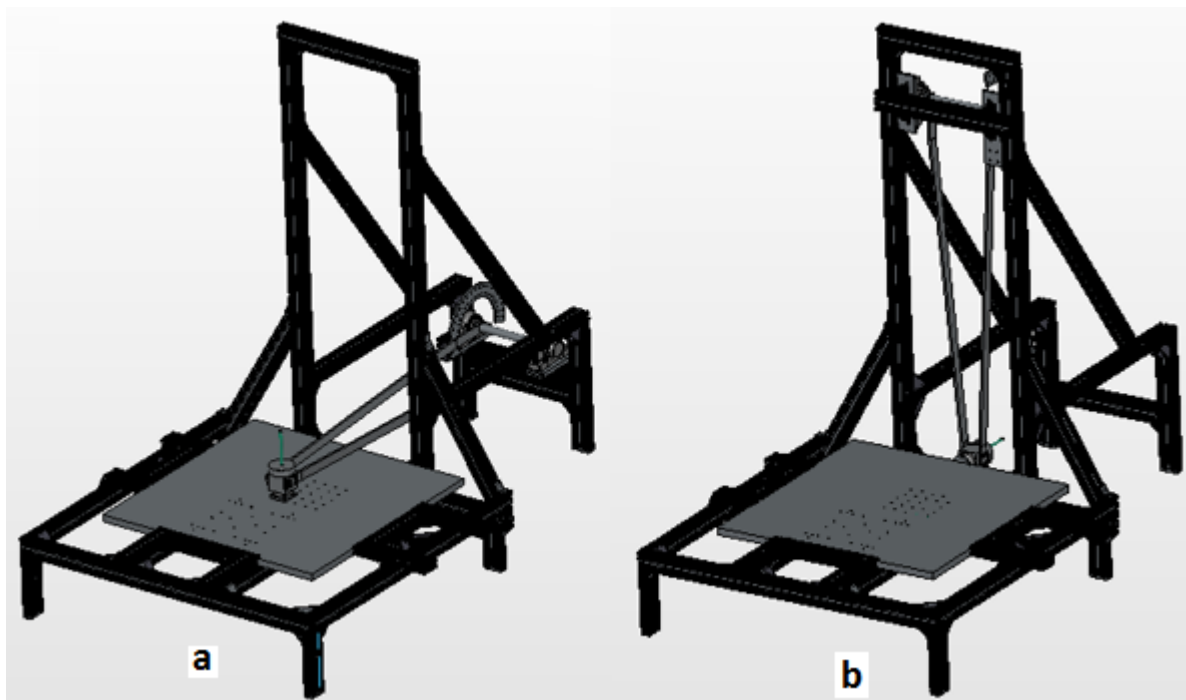
2. KONSTRUKTSIOONIELEMENTIDE VALIK

2.1 Konstruktsioon

Diplomitöös projekteeritud konstruktsiooni põhielementideks on raam, haamer ning resonantplaat. Väga tähtsal kohal on veel andur ning arvuti tarkvara, mille abil genereeritakse visuaalne kujutis katsetulemuste kohta. Antud juhul mõeldakse selle all löögi spektri graafikut.

Konstruktsioon kujutab endast T-soontega alumiinium raami, mis toetub kuue reguleeritava tugijalaga (Lisa 15) vastu aluspinda. Raami külge on võimalik kinnitada kahes erinevas asendis haamer, sõltuvalt sellest kuhu kohta löök on suunatud. Haamri sujuv liikumine saavutatakse laagritega. Haamri kaldenurga reguleerimiseks kasutatakse 180 kraadist malli. Selleks, et saavutada katse korratavus on malli sisse töödeldud 8mm läbimõõduga avad, kusjuures iga ava vaheline erinevus on viis kraadi. Vastavalt soovitud nurgale asetatakse sobiva istuga tihvt 8 mm-sse avasse ning haamer tõstetakse vastu tihvti. Seejärel lastakse haamril kukkuda enda raskuse jõul vastu alasi, mis on kinnitatud resonantplaadi külge. Resonantplaadile on kinnitatud uuritav katseseade koos anduriga, mis registreerib ära haamri poolt tekitatud löögi ning saadab vastavad andmed USB juhtme kaudu arvutisse. Arvutis kasutatav programm genereerib saadud andmetest löögi spektri graafiku, mille tulemusi võrreldakse Euroopa kosmoseagentuuri ESA poolt etteantud SRS-ga [5].

Konstruktsiooni paremaks ettekujutuseks on toodud ära Selel 9 satelliidi katsetamislaud resonantplaadi peale suunatud löögiga (a) ning resonantplaadi küljele suunatud löögiga (b).

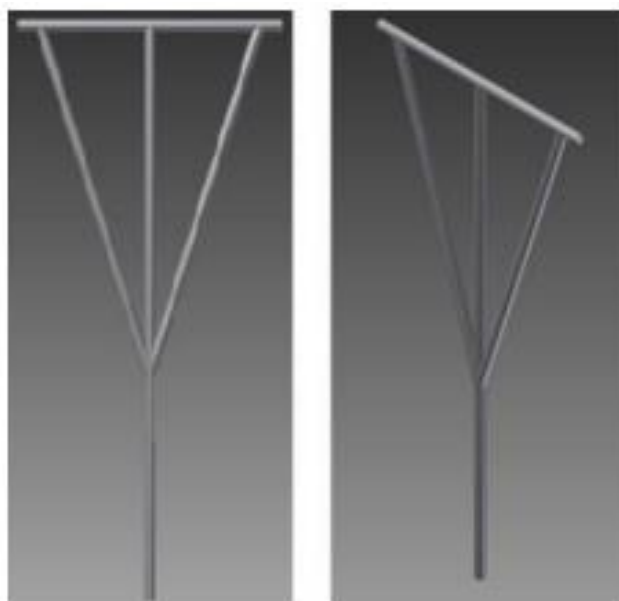


Sele 9. Satelliidi katsetamislau (a) pealt löögiga ning (b) küljele löögiga [1]

2.2 Haamer

Haamri valikul lähtutakse valmistamise lihtsusest ning hinnast. Võiks öelda et haamer on antud konstruktsiooni kõige tähtsam element, kuna just sellega tekitatakse vajalik löögi jõud.

Haamri valikul vaadeldakse Jonssoni uurimustöös projekteeritud haamrit, analüüsitakse seda ning tehakse mõningad parendused. Vaatleme kõigepealt haamri vart (Sele 10).



Sele 10. Jonsson haamri vars

Jonsson haamri varre puhul on jõu õlana kasutatud ümarterast, mis on keevitatud haamri keskme ning võlli külge. Selleks, et anda konstruktsioonile jäikust kasutatakse kahte lisatuge, mis on samuti keevitatud võlli ning jõu õla külge.

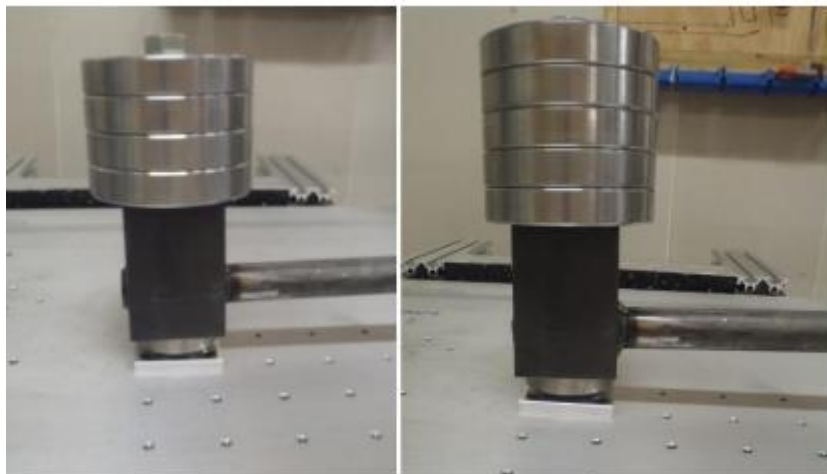
Antud haamri varre konstruktsiooni positiivseks küljeks võib pidada selle jäikust. Samas on väga raske välja vahetada konstruktsiooni erinevaid osi, kuna enamus elemente on omavahel kokku keevitatud. Peale selle tuleb jõu õlana kasutataval ümarterasele ning tugelele töödelda vastava raadiusega sooned, et nad paremini omavahel kokku sobiksid. See toob endaga kaasa lisakulutusi, mis antud konstruktsiooni puhul oleksid üsna suured, kuna töödeldavad sooned asuvad nurga all. Väikese koguse puhul ei ole selline töötlemine kuigi otstarbekas.

Antud diplomitöös otsustati haamri varrena kasutada ümarterase asemel kahte nelikant latti, kus lattide üks ots on keevitatud võlli külge ning teine ots on jäetud vabaks (Sele 11). Taoline konstruktsioon võimaldab vajadusel vahetada haamri keset, mis kinnitatakse varre külge kaheksa poldiga. Lisaks sellele on taolist haamri vart palju odavam toota kui Jonssoni poolt valitud vart. Parendatud haamer on konstruktsioonilt palju stabiilsem ning tänu kahele varrele jaguneb kogu löögijõud nelikant lattide vahel ühtlasemalt. Haamri varre tööjoonis on ära toodud lisades (Lisa 12).



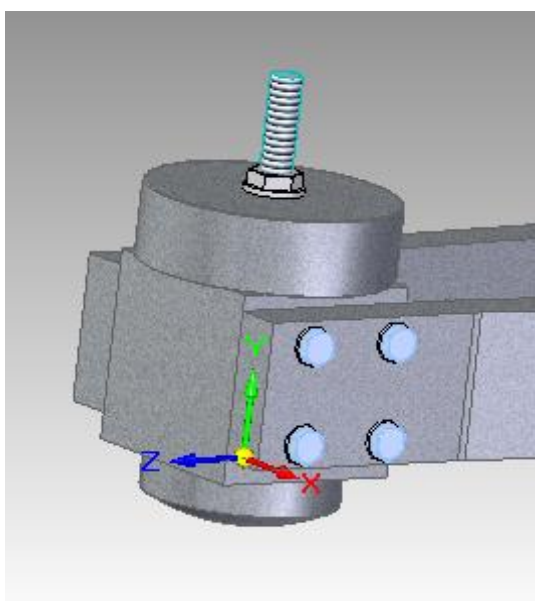
Sele 11. Parendatud haamri vars

Jonssoni uurimustöös on haamri löögipoolne osa (Sele 12) lahendatud järgnevalt: Haamri kese on keevitatud varre külge. Keskme ühte otsa on töödeldud kaks keeret, mille abil toimub haamri pea kinnitus ning teise otsa üks keere, tänu millele saab löögipoolsele osale lisada raskusi. Kokku on võimalik lisada viis raskust, massiga 2 kg. Raskuste fikseerimine toimub erinevate poltidega.



Sele 12. Jonsson haamri löögipoolne osa [1]

Antud diplomitöös otsustati konstruktsiooni üldpilt jätta samaks. Ainsana tehti muudatused haamri keskmes (Lisa 8), kus kinnitus varre külge toimub poltidega. Siinkohal võib tekkida probleem poltide lahti tulemisega. Selleks tuleks polte aeg-ajalt üle keerata. Lisaks sellele on maksimaalselt võimalik lisada 4 kg lisaraskust. Raskuste fikseerimiseks kasutatakse erineva mõõduga poltide asemel hoopis ühte keermelatti ning mutrit. Niiviisi puudub vajadus vahetada iga raskuse lisamisel või ära võtmisel polte (Sele 13).



Sele 13. Haamri löögipoolse osa parendus

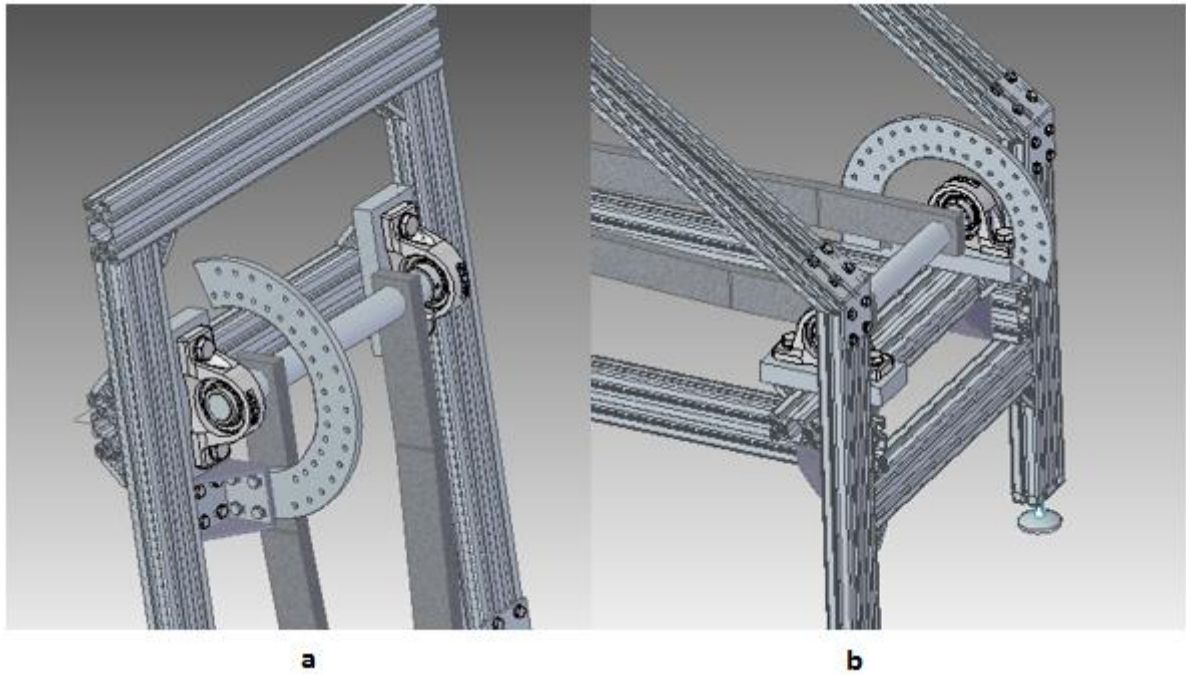
Haamri langemisnurga muutmiseks on Jonssoni töös kasutatud nn. malli (Sele 14), kuhu on töödeldud viie kraadise erinevusega läbivad keermed. Vastavalt soovitud nurgale keeratakse polt õigesse pesasse ning haamer tõstetakse varrega vastu polti.



Sele 14. Jonsson haamri nurga muutmise lahendus [1]

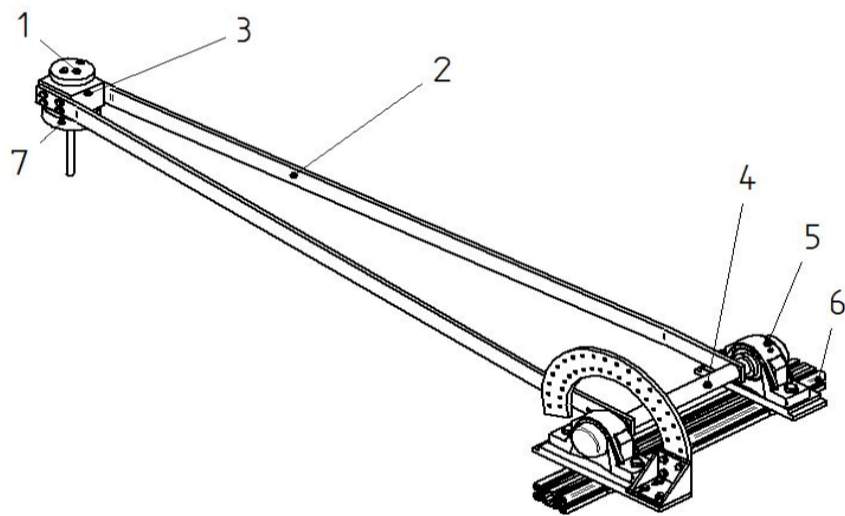
Antud lahenduse puhul on positiivseks küljeks selle odavus, mistõttu otsustati taolise idee kasuks. Hoolimata sellest leiti vajalikuks teha konstruktsiooni mõningaid muudatusi. Haamri kaldenurga fikseerimiseks kasutatakse poldi asemel tihvti, mistõttu tuleb malli töödelda vastava läbimõõduga avad. Jonssoni konstruktsiooni puhul haamri paigutamisel erinevatesse asenditesse muutub haamri asukoht malli suhtes, mistõttu on vaja malli teha suurem. Lisaks sellele toimub resonantplaadi küljele suunatud löögi korral haamri kinnitus konstruktsiooni keskele, mis ei võimalda saavutada maksimaalset löögijõudu, kuna ülemine raami tala jääb ette. Seetõttu otsustati haamri asukoha muutmisel raamil leida selline lahendus, kus haamri asukoht malli suhtes ei muutuks ning resonantplaadi küljele suunatud löögi korral oleks võimalik saavutada maksimaalset löögijõudu.

Probleemi lahenduseks tuleb haamri pöörlemiselg nihutada ülemisest talast eemale. See on saavutatud järgnevalt: Profiil, mille külge haamrisüsteem on kinnitatatud, on valitud 160 mm pikem nii, et profiili kinnitamisel laagrikorpuse aluse külge jääb profiili mõlemasse otsa varu 80 mm. Järgnevalt on haamrisüsteemi kinnitatud raamile vaba profiili pinnaga, kusjuures raami vastu toetub profiili laiem külge. Haamri pöörlemiselje kaugus profiili toetuspinnast peab tulema suurem kui raami profiili paksus, milleks on 40 mm. Antud juhul on pöörlemiselje kaugus tugipinnast 77,6 mm. Lahutades maha veel haamri varre pool paksust, milleks on 30 mm, saadakse reaalseks kauguseks 47 mm, mis on täiesti piisav. Haamri kinnitused raamile on ära toodud alloleval seel (Sele 15), kus (a) on haamri kinnitus resonantplaadi küljele suunatud löögi korral ning (b) resonantplaadi peale suunatud löögi korral. Haamri koostejoonis asub lisades (Lisa 7).



Sele 15. Haamri kinnitus a) küljele suunatud löögi korral ning b) pealt suunatud löögi korral

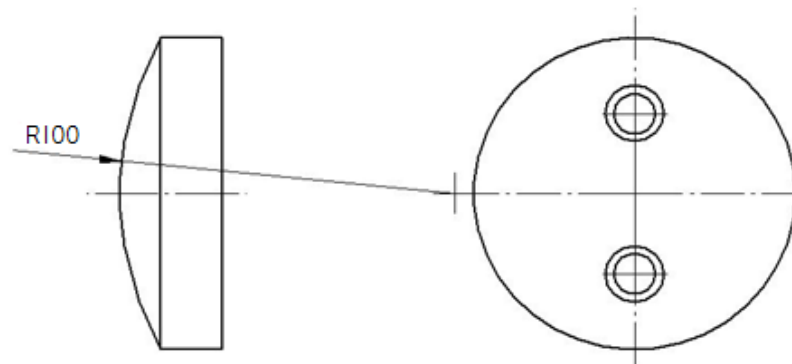
Lõplik haamri konstruktsioon on ära toodud Seel 16. Valitud haamri konstruktiivsed elemendid on haamri pea (1), kaks nelikant metall latti (2), haamri kese (3) ning ümarlatt (4). Haamri keskmeks elemendiks on haamri kese, mille külge on kinnitatud kahe poldiga haamri pea ning nelja poldiga kumbki metall latt. Metall lati teised otsad on keevitatud ümarlati külge MAG keevitusega. Ümarlati kummaski otsas on laagrid koos laagrikorpusega (5), mis on kinnitatud kahe M12x40 poldiga alumiinium profiili külge, mille kaugus fikseeritakse profiiliga (6). Lisaks sellele on haamri pea kinnituse otsa töödeldud M12 keere, tänu millele saab vajadusel lisada haamrile raskusi (7).



Sele 16. Haamri konstruktsioon

2.2.1 Haamri pea

Haamri pea (Sele 17) on valmistatud roostevaba terasest AISI 304. Kuna detaili kinnitus toimub poltidega, siis saab vajadusel kasutada ka teisest materjalist haamri päid. Lähtudes Jonsson katsetulemustest on haamri pea töödeldud raadiusega 100 mm selleks, et saada võimalikult konstantne kontaktpind haamri pea ja alasi vahel. Mida suurem raadius valida, seda suurem tuleb ka kiirendus. See on selgesti märgatav kõrgemate sageduste korral. Tasapinnalise haamri pea puhul ei pruugi kontaktpind haamri pea ja alasi vahel korduvate katsete korral nii ühtne olla, mistõttu ei saada täpset tulemust. Antud diplomitöö puhul jäetakse haamri pea raadius siiski konstantseks ning keskendutakse teiste parameetrite muutmisele. Haamri pea tööjoonis on ära toodud lisades (Lisa 9).



Sele 17. Haamri pea [1]

2.3 Resonantplaat

Resonantplaat on valmistatud alumiinium plaadist EN AW-6082 [8] mõõtmetega 1000x1000x30 mm. Plaadi paksusel on väga suur roll SRS graafikule. Lähtudes ESA poolt kehtestatud spektri murdepunkti sagedusele, milleks on 1000 Hz [1, p. 55], ning Jonssoni uurimustööle otsustati valida plaadi paksuseks 30 mm. Mida õhem plaat valida, seda madalamaks muutub spektri murdepunkt.

Resonantplaadi küljele löögi puhul tekivad pikisuunalised lained, mis levivad plaadis palju kiiremini kui sellega risti olevad lained. Sellest tulenevalt tõuseb ka spektri murdepunkti sagedus. Teades soovitud sagedust ning plaadi materjali, saab valemist (4) [9] välja arvutada soovitusliku plaadi külje pikkuse l [mm] piki suunas.

$$l = \frac{c}{2f}, \quad (4)$$

kus c - laine levimiskiirus materjalis m/s;

f - soovitud spektri murdepunkti sagedus kHz.

Pikisuunaline laine levimiskiirus c [m/s] materjalis leitakse valemist (5) [9]:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (5)$$

kus E - Youngi moodul GPa [10];

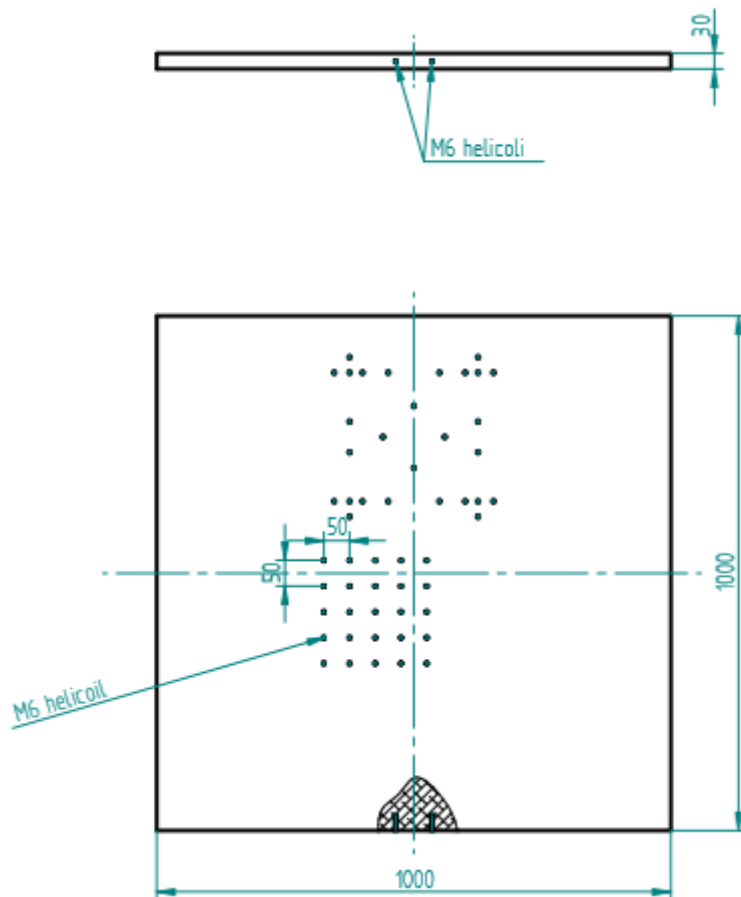
ρ - materjali tihedus kg/m³.

$$c = \sqrt{\frac{70000}{2700}} = 5,09 \text{ m/s}$$

$$l = \frac{5,09}{2 \cdot 1} = 2,55 \text{ m}$$

Kuigi soovituslik plaadi külje pikkus tuli 2,55 meetrit, valitakse resonantplaadi külgedeks ikkagi üks meeter, kuna SRS-i murdepunkti sageduse nihe 1000 Hz poole 2,55 meetrise külje puhul ei ole nii suur võrreldes ühe meetrise külje puhul [1]. Pealegi eeldab suurem plaat rohkem kulutusi materjalile ning suuremat katsetusruumi.

Resonantplaati on töödeldud erinevatesse kohtadesse helicoil keermed. Helicoil keerme eelis seisnebki selles, et poltide pidev lahti ning kinni keeramine ei kuluta alumiinium keeret nii ruttu ära, kuna helicoil keere paikneb konstantselt resonantplaati töödeldud keerme sees. Keermete asukohad on valitud järgnevalt: selleks et nihutada resonantplaati nii x- kui y suunas on plaati töödeldud 50 mm vahega keermed, mis arvestavad alasi kinnitusavasid. Maksimaalselt on võimalik plaati nii x- kui y-telje suunas liigutada 150 mm. Katsekeha kinnitamiseks tehakse plaati 25 korrapäraselt paiknevat keeret. Resonantplaat on kujutatud Selet 18.



Sele 18. Resonantplaat

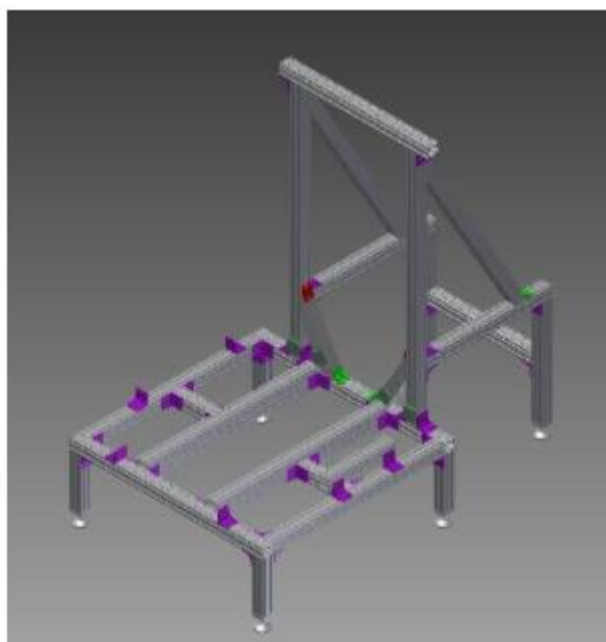
2.4 Raam

Raami parendamisel lähtuti eelkõige hinnast. Jonssoni uurimustöös on konstruktsiooni raam valmistatud alumiiniumist, mis otsustati jätta samaks. Täpsemalt kasutatakse raami valmistamisel T-soontega alumiinium profiili [11]. Profiili eeliseks on see, et ei ole vaja töödelda lisa avasid profiilide omavaheliseks ühendamiseks. Lisaks võimaldavad T-sooned konstruktsiooni muuta vastavalt vajadusele ilma, et oleks vaja teha lisakulutusi. Esialgu oli plaanis raam valmistada 80x80 profiilist, kuid tänu profiili kõrgele hinnale otsustati profiili 40x80 kasuks. Seejuures jälgiti, et profiili pikem külg (antud juhul 80mm) oleks suunatud jõudude rakendumis suunale ehk siis vertikaalselt.

Raami parendamisel tuleb silmas pidada eespool püstitatud eesmärki, kus nõuti löögi asukoha muutmist. Selle all mõeldakse seda, et haamriga peab olema võimalik saada lüüa nii resonantplaadi küljele kui ka otse plaadi peale. Vastavalt Jonssoni uurimustööle võetakse haamri jõu õla pikkuseks 1,5 meetrit, mis tähendab omakorda piisavalt pikkade profiilide valimist nii horisontaal- kui vertikaalsuunas. Raami kõrguse puhul arvestati katseruumi kõrgusega, milleks oli 2,7 meetrit. Valmistatava raami kõrgus on 2,2 meetrit, mis mahub etteantud parameetritesse. Resonantplaadi

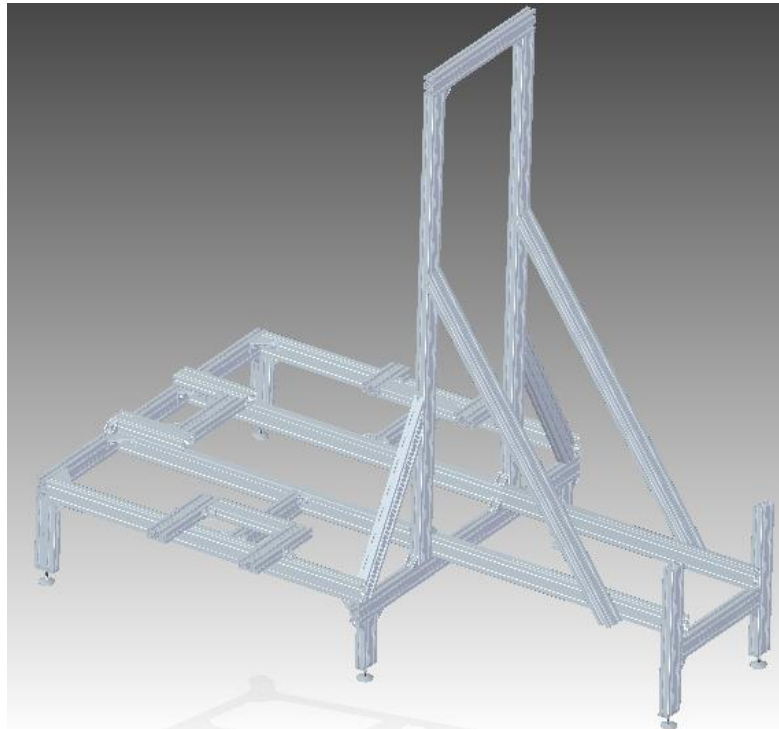
küljele suunatud löögi puhul pole antud ruumis võimalik katsetada dünaamilise löögi mõju katsekehale haamri maksimaalselt kõrguselt, milleks on 3 meetrit.

Järgnevalt vaadeldakse Jonssoni projekteeritud raami konstruktsiooni (Sele 19). Raami detailid on omavahel kinnitatud teatud painde all olevate nurkadega (enamasti 90 kraadi). Võiks öelda, et konstruktsioon koosneb kahest osast. Esimeseks oleks raam kuhu peale toetub resonantplaat ning teiseks oleks raam, mida kasutatakse haamri kinnitamiseks. Selleks, et konstruktsioon oleks stabiilsem, kasutatakse lisatugesid. Samuti on haamri kinnitamiseks kasutatav raami osa tehtud võimalikult lai. Raamile on lisatud juurde üks statsionaarne ning kaks liigutatavat tuge resonantplaadi fikseerimiseks.



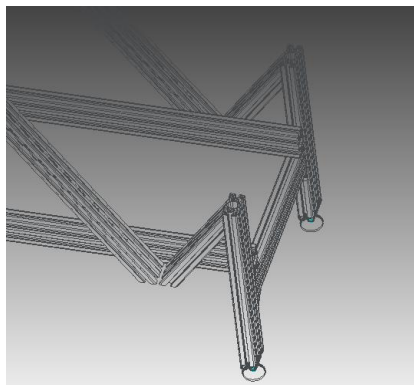
Sele 19. Jonssoni raami konstruktsioon

Jonssoni raami konstruktsiooni otsustati sisse viia mõningad parendused. Selleks, et raam oleks stabiilsem ning jäigem, valmistatakse raami alus ühtse tervikuna. Siinkohal valitakse kaks pikka profiili, mis läbivad konstruktsiooni peaaegu täies pikkuses. Valitud profiilid toetuvad raami peale nii keskest kui tagant. Profiili eesmine asetus ning kinnitus on jäetud samaks. Raami profiilide ühendamiseks plaanitakse kasutada firma Teamster poolt pakutavaid standardseid tugevdusribiga nurgakinnitusi, mis muudavad raami veelgi jäigemaks. Esialgne parendatud raami konstruktsioon on ära toodud Selal 20.



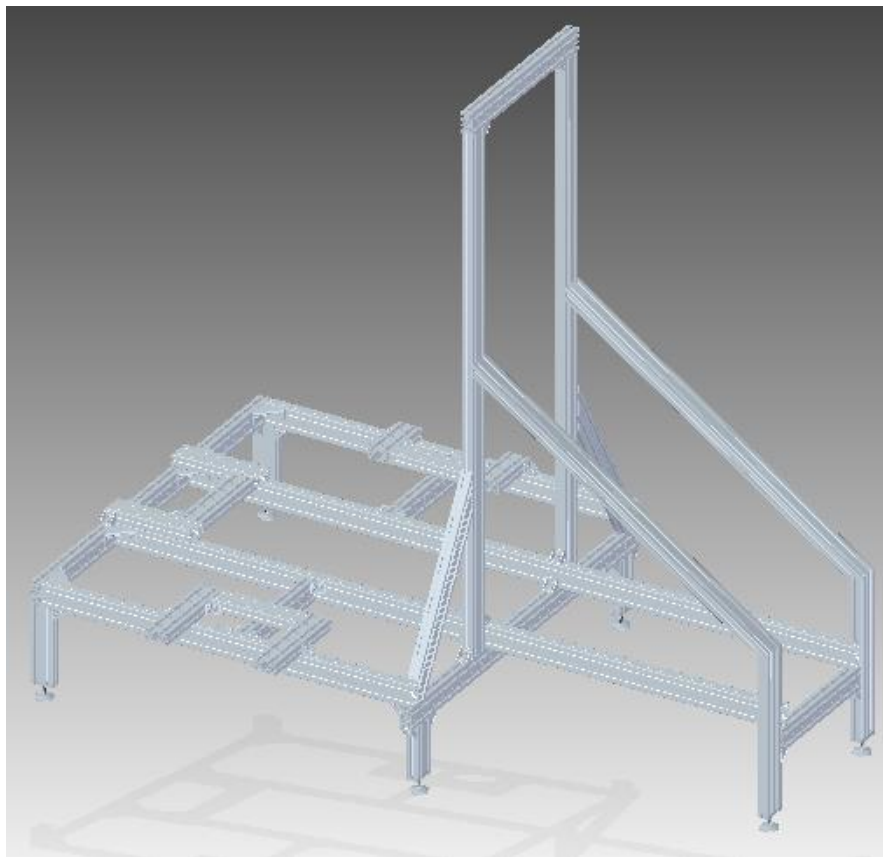
Sele 20. Esialgne raami parendatud konstruktsioon

Selel 20 toodud konstruktsiooni puhul tekib jällegi probleem tugede alumise poole kinnitamisega raamile. Nimelt toetuvad talad raamile küljega teatud nurga all, mis teeb kinnitamise keerulisemaks. Selle probleemi lahendamiseks tuleks kasutada spetsiaalselt painutatud nurgakinnitusi või siis paigutada raami külge lisa tugesid. Lisa tugede kasutamine eeldab omakorda lisakulutusi ning muudab konstruktsiooni välimuselt robustsemaks. Samas ei ole mõtet tellida nii väikeses koguses spetsiaalseid nurgakinnitusi. Lisaks sellele tuleks konstruktsiooni toetada veel tagumiste jalatugede profiili kohast, kuna just sinna toimub haamri kinnitus. Selel 21 on ära toodud üks võimalik lahendus antud probleemile. Siinkohal tekib sama probleem, mis suurte tugitalade kinnitamisega- kulub rohkem ressursse materjalile ning talade kinnitamisele.



Sele 21. Raami tagumise osa toetus

Raami edasisel parendamisel kaotati ära lühemad toed ning pikendati suuremaid tugesid nii, et nad ühendaksid vertikaalseid talasid omavahel (Sele 22). Niiviisi saavutab konstruktsioon suurema jäikuse ning võrreldes Jonssoni originaal raamiga kulub vähem nurgakinnitusi. Kui arvestada seda, et üks suur 90 kraadne nurgakinnitus maksab 10 eurot siis raami parendatud konstruktsiooniga hoiaks kokku juba üle 40 euro. Lõplik raami joonis on ära toodud lisades (Lisa 5).



Sele 22. Raami parendatud mudel

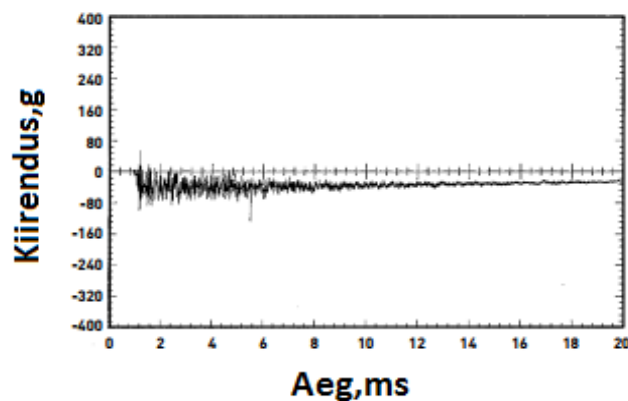
2.5 Alasi

Alasi materjali valikul kaalutleti kahe variandi vahel. Nendeks olid alumiinium EN AW 6082-T6 ning roostevaba teras AISI 304. Lähtudes Jonssoni katsetulemustest otsustati siiski roostevaba terase kasuks. Alumiinium on suhteliselt pehme metall ning ei pea löökidele nii hästi vastu kui AISI 304. Alumiinium 6082-T6 kõvadus on 90 HB [12], roostevabal terasel AISI 304 seevastu 123HB [13]. Alasi mõõtmeteks valiti 75x75x10 mm. Alasile on töödeldud neli ava, läbi mille toimub poltidega M6x20 kinnitus resonantplaadi külge.

2.6 Elektroonika

Elektroonika poole pealt on vaja andurit, kaablit, arvutit ning tarkvara, mis genereeriks löögi spektri graafiku vastavalt anduri poolt saadud infole.

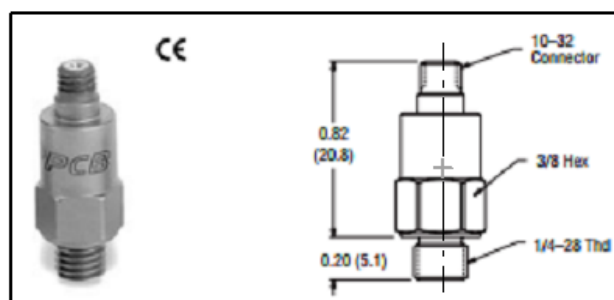
Haamri poolt tekitatava kiirenduse mõõtmiseks kasutatakse piesoelektrilisel tööpõhimõttel töötavat andurit. Tavaliste anduritega esineb mõningaid probleeme, millest tähtsaim on spektri graafiku nihe x- ning y telje suhtes (Sele 23). Selle probleemi vältimiseks kasutatakse sisseehitatud mehaanilisi filtriga andurit, mis tagab anduri mehaanilise isolatsiooni igast küljest. [14]



Sele 23. Kiirenduse ning aja graafiku nihe x-telje suhtes [14]

PCB Piezotronics kataloogist valiti anduriks mudel PCB 350B03 (Sele 24) [15, p. 75] ning ühendus kaabliks 003C10 [15, p. 185] pikkusega 3 meetrit. Anduri põhiparameetrid on järgnevad:

- Kiirendus amplituud $\pm 10\,000\text{ g}$
- Sageduste vahemik $0,4 - 10\,000\text{ Hz}$
- Tundlikkus $0,5\text{ mV/g}$
- Mass $4,5\text{ g}$
- Sisseehitatud mehaaniline ning elektriline filter
- Titaan konstruktsioon



Sele 24. Andur PCB 350B03 [15]

Kokkuvõttes suudeti Jonssoni mudelisse sisse viia väga palju erinevaid parendusi. Parendatud mudeli raami põhi valmistatakse ühtse tervikuna, mis muudab konstruktsiooni palju stabiilsemaks. Lisaks asendati tavalised painutatud nurgad standardsete nurkadega, mis tänu tugevdusribidele muudavad raami palju jäigemaks. Väga oluliseks saab pidada ka väiksema ristlõikega alumiinium profiili kasutamist, mis kahandas raami maksumust poole võrra. Parendatud mudeliga on võimalik ära kasutada kogu haamri õla pikkus saavutades niiviisi maksimaalne löögijõud. Selle all mõeldakse haamri pöörlemistelje eemale viimist raami vertikaal taladest. Samuti tehti suured muudatused haamri konstruktsioonis. Haamri õla senine ümarteras asendati kahe nelikant latiga, mis on palju stabiilsem ning tänu poltliidetele on võimalik vahetada löögipoolset osa. Lisa raskustena on võimalik kasutada jõusaali raskusi, mille soetamine on tunduvalt odavam, kui spetsiaalaraskuste tootmine. Diplomitöö käigus projekteeritud konstruktsiooni koostejoonis on ära toodud lisades (Lisa 6).

3. TUGEVUSARVUTUSED

Tugevusarvutuste tegemisel vaadeldakse eelkõige haamri erinevaid komponente. Nendeks on nelikant latt, võll, poldid. Samuti tehakse vajalikud tugevus ning kontroll arvutused laagrite valikul. Läbivaks suuruseks ongi langeva haamri poolt tekitatud jõud, mis sõltub jõu õlast. Jõu õlg on ära määratud nelikant lattide pikkusega. Antud töö puhul on jõu õlaks valitud 1500mm. Kuigi reaalselt ei ole võimalik katsetavas ruumis saavutada haamri maksimaalset löögijõudu, tehakse arvutused ikkagi maksimaalsete parameetritega.

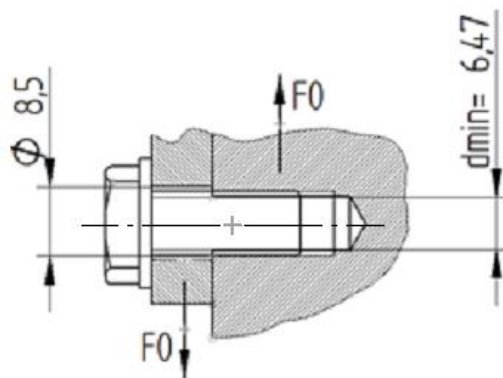
2.1 Nelikant kinnituspoltide tugevusarvutused

Valime algselt poltideks M8x25 tugevusklassiga 8.8 ning nelikant lati avade suuruseks 8,5 mm. Kuna tegemist on lõtkuga poldi ning ava vahel siis kasutame valemit (6) [16], et leida poldi kinnitamisel tekkivad jõud tõmbele F_0 [N] (Sele 25):

$$F_0 = K * F / (i * f * z), \quad (6)$$

kus	K	- detaili nihke varutegur (1,4...2);
	F	- maksimaalne haamri poolt tekitatud jõud N;
	i	- kontaktpindade arv ;
	f	- hõõrdetegur (0,15...0,2) ;
	z	- poltide arv.

$$F_0 = 1,5 * 2772,3 / (1 * 0,15 * 8) = 3465,4 \text{ N}$$



Sele 25. Poldile mõjuvad jõud

Maksimaalne haamri poolt tekitatud jõud F [N] saadakse valemist (7) [17]:

$$F = A * s, \quad (7)$$

kus A - töö J;
 s - trajektoori pikkus m.

$$F = 735,75 * 4,71 = 3465,38 \text{ N}$$

Tööks kuluv energia A [J] saadakse valemist (8) [17]:

$$A = M = m * L * g * (1 - \cos \alpha), \quad (8)$$

kus M - haamri moment Nm,(J);
 m - haamri mass kg ;
 L - jõu õlg m ;
 g - raskuskiirendus m/s²;
 α - haamri maksimaalne võimalik langemis nurk °.

$$A = 25 * 1,5 * 9,81 * (1 - \cos 180^\circ) = 735,75 \text{ Nm} = 735,75 \text{ J}$$

Haamri massi arvestamisel võetakse arvesse järgmiste komponentide massid: haamrikinnitus kese, kaks lisaraskust, haamri pea, kinnituselemendid ning haamri nelikantlati pool raskust. Kasutades Solid Edge tarkvara, saadakse haamri massiks umbes 20 kg.

Haamri poolt läbitud trajektoori pikkus s [m] saadakse valemist (9) [17]:

$$s = \pi * r * \alpha / 180, \quad (9)$$

kus r - haamri õlg m;
 α - haamri langemis nurk °.

$$s = \pi * 1,5 * 180 / 180 = 4,71 \text{ m}$$

Kasutades valemit (10) [16] saadakse poldi jõud väändeale F_v [N]:

$$F_v = F_0 * 1,3, \quad (10)$$

$$F_v = 3465,38 * 1,3 = 4504,99 \text{ N}$$

Arvestades nii väänet kui tõmmet korraga, leitakse poldi tugevustingimus valemist (11) [16]:

$$\sigma = \frac{1,3*4*F_0}{\pi*d^2} \leq [\sigma], \quad (11)$$

kus d - M8 poldi sisekerme läbimõõt mm ;

$[\sigma]$ - lubatud koormus MPa.

$$\sigma = \frac{1,3*4*3465,38}{\pi*6,647^2} \leq [133]$$

$$\sigma = 129,8 < 133$$

Poldi M8 tugevusklassiga 8.8 lubatud koormus saadakse valemist (12) [16]:

$$[\sigma] = R_m/s_t, \quad (12)$$

kus R_m - poldi voolavuspiir MPa [18];

s_t - varutegur [16].

$$[\sigma] = 640/4,8 = 133,3 \text{ MPa}$$

Antud juhul on poldi tegelik koormus väiksem lubatud koormusest, mistõttu võib kasutada küll M8 polte haamri nelikant lattide kinnitamiseks haamrikeskme külge.

3.2 Laagrikorpuse poldide tugevusarvutused

Ühe laagrikorpuse kinnitamisel kasutatakse kahte M14 polti tugevusklassiga 8,8. Kokku on konstruktsioonis kaks laagrikorpust (Lisa 10),(Lisa 11). Seega on kogu jõud ära jagatud nelja poldi vahel. Poldid arvutatakse tõmbele (valem 13) [16]:

$$\sigma = \frac{F}{z} / A \leq [\sigma], \quad (13)$$

kus σ - tõmbepinge MPa

A - poldi ristlõike mm^2 ;

z - poldide arv;

$[\sigma]$ - lubatud koormus MPa.

$$\sigma = \frac{3465,38}{4} / 110 = 7,88 \text{ MPa}$$

Poldi ristlõike saame ringi pindala valemist (valem 14) [19]:

$$A = \pi*d^2/4, \quad (14)$$

kus d - poldi sisekerme läbimõõt mm^2 (M14 kerme $d= 11,835$) [20]

$$A = \pi*11,835^2/4 \approx 110 \text{ mm}^2$$

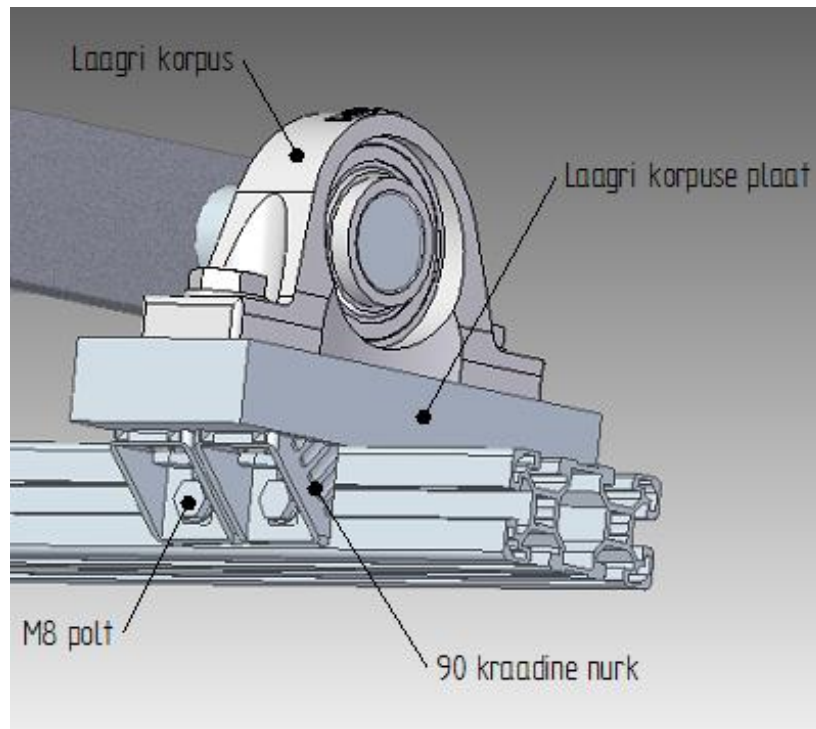
Poldi M14 tugevusklassiga 8.8 lubatud koormus saadakse valemist (12):

$$[\sigma] = 640/4,2 = 152,38 \text{ Mpa}$$

Arvutuslik poldi tõmbepingest on väiksem lubatud tõmbepingest, mistõttu saab kasutada M14 polte tugevusklassiga 8.8 laagrikorpuse kinnitamiseks.

3.3 Laagrikorpuse plaadi kinnituste tugevusarvutused

Laagrikorpuse plaat (Lisa 10), (Lisa 11) on kinnitatud alumiinium profiili külge M8 poltidega, kasutades selleks 90 kraadist nurka. Kummalegi poldile mõjuvad erinevad jõud. Laagrikorpuse plaadi küljes olev polt töötab tõmbele ning alumiinium profiili küljes olev polt lõikele. Kumbki plaat on profiili külge kinnitatud kahe poldiga. Seega töötab kokku kaheksa polti tõmbele ning kaheksa polti lõikele. Olukorra paremaks arusaamiseks on alltoodud laagrikorpuse plaadi kinnitus.



Sele 26. Laagrikorpuse plaadi kinnitus

Peatükis 4.1 sai juba korra arvutatud kaheksa M8 polti lõikele. Kuna antud poltidele mõjub sama jõud pole mõtet arvutusi uuesti korrata. Siiski tuleks arvutada kas poldid peavad vastu tõmbele.

Kasutades valemit 13 saadakse:

$$\sigma = \frac{3465,38}{8} / 34,7 = 12,48 \text{ MPa}$$

Poldi ristlõike saame valemist 14:

$$A = \pi \cdot 6,647^2 / 4 \approx 34,7 \text{ mm}^2$$

Poldi M8 tugevusklassiga 8.8 lubatud koormus leiti valemist 8, milleks oli $[\sigma]=133,3$ MPa

Arvutuslik poldi tõmbepinge on väiksem lubatud tõmbepingest, mistõttu saab kasutada M8 polte tugevusklassiga 8.8 laagrikorpuse plaadi kinnitamiseks.

3.4 Nelikant lati tugevusarvutused

Selleks et kontrollida lati tugevust, leiame kõigepealt valemist (15) [17] nelikant lati paindepinge σ_p [N/mm²]. Võttes materjaliks teras S355 saadakse lubatud paindepingeks 355 N/mm²:

$$\sigma_p = \frac{M}{W} < [\sigma], \quad (15)$$

kus M - painde momet Nm;

W - ristlõike vastupanumoment mm³

$[\sigma]$ - lubatud paindepinge N/mm².

Painde moment M [Nm] saadakse valemist (16) [17]:

$$M = F * L \quad (16)$$

$$M = 3465,38 * 1,5 = 5198,07 \text{ Nm}$$

Selleks, et saada ühele nelikant latile mõjuv moment, tuleb jõud jagada pooleks ehk siis $M = 3465,38/2 * 1,5 = 2599,04$ Nm.

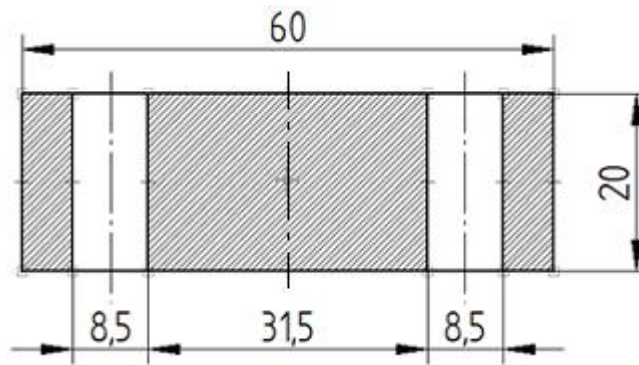
Ristlõike vastupanumoment arvutatakse kõige ohtlikumas lõikes, milleks on poltide kinnituskoht (Sele 27). Vastupanumoment W [mm³] leitakse valemist (17) [17] kolmes etapis. Esimeses etapis arvutatakse täisristlõike vastupanumoment. Teises etapis keskmise ristlõike ning tühja koha vastupanumoment. Kolmandas etapis ainult keskmise osa vastupanumoment. Erinevad etapid on kujutatud Selel 28. Lihtsustamise mõttes arvutame ainult ühe nelikant lati ristlõike vastupanumomendi :

$$W = \frac{b * h^2}{6}, \quad (17)$$

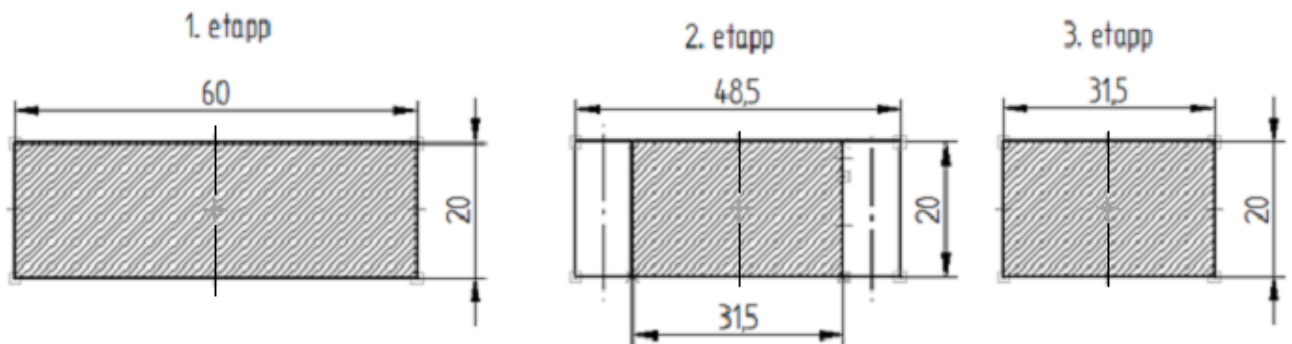
kus W - ristlõike vastupanumoment mm³;

b - ristlõike laius mm;

h - ristlõikepikkus mm.



Sele 27. Nelikant lati ohtlik ristlõige



Sele 28. Vastupanumomendi arvutus etapid

$$W_1 = \frac{20 \cdot 60^2}{6} = 12000 \text{ mm}^3$$

$$W_2 = \frac{20 \cdot 48,5^2}{6} = 7840,83 \text{ mm}^3$$

$$W_3 = \frac{20 \cdot 31,5^2}{6} = 3307,5 \text{ mm}^3$$

Kogu vastupanumoment saadakse järgmiselt:

$$W = W_1 - W_2 + W_3 = 12000 - 7840,83 + 3307,5 = 7466,67 \text{ mm}^3$$

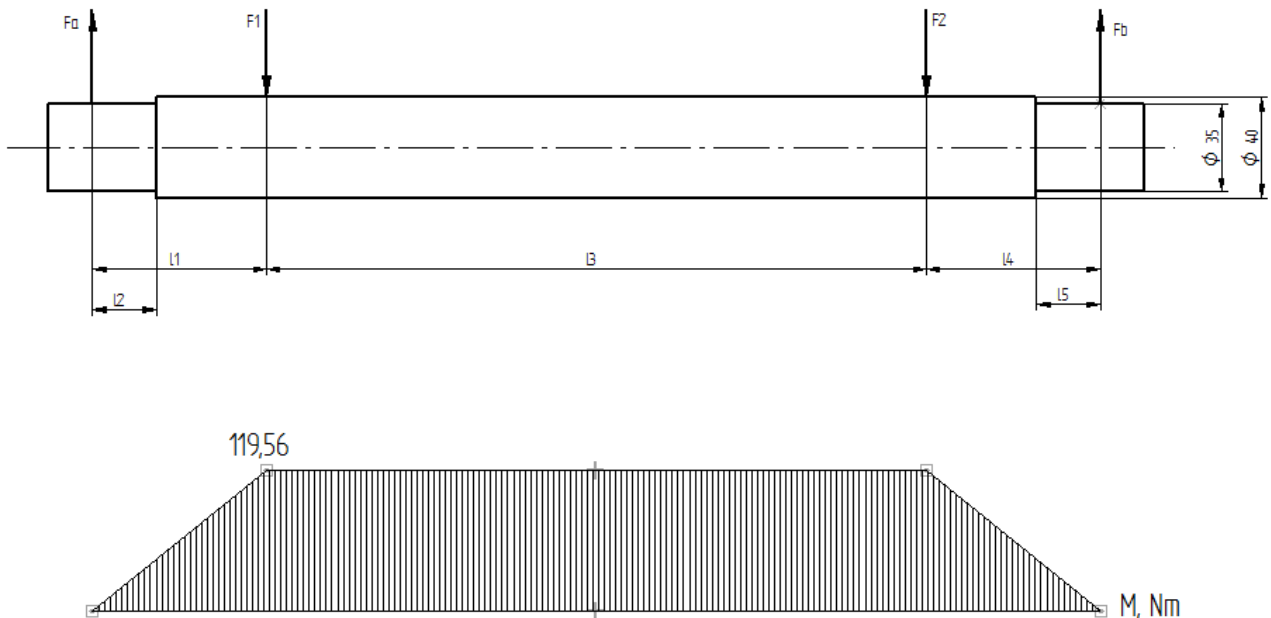
Seega nelikant lati paindepinge on:

$$\sigma_p = \frac{2599,04}{7466,67} \cdot 1000 = 348 \text{ N/mm}^2 < [\sigma]$$

Arvutuslik paindepinge on väiksem kui lubatud. Seega võib antud parameetritega ning materjaliga nelikant latti kasutada projekteeritavas konstruktsioonis haamri õlana.

3.5 Haamri võlli tugevusarvutus

Haamri võlli (Lisa 14) valmistamisel on kasutatud terast S235. Võlli tugevusarvutuste tegemiseks on vaja teada kõige suurema painde all olevat kohta. Selle leidmiseks koostame toereaktsioonid ning painde epüüri (Sele 29).



Sele 29. Võlli toereaktsioon koos painde epüüriga

$$F_1 = F/2 = 3465,38/2 = 1732,69 \text{ N}$$

$$F_2 = F_a = F_b = F_1$$

$$l_1 = l_4 = 69 \text{ mm}$$

$$l_2 = l_5 = 25,4 \text{ mm}$$

$$l_3 = 262 \text{ mm}$$

Painde epüürist näeme, et võll on kõige rohkem koormatud jõudude F_1 ning F_2 juures. Kuna jõud mõjuvad sümmeetriliselt, leitakse paindepinge ainult jõu F_1 juures. Samas tuleb arvestada sellega, et võll on otsest peenem. Seetõttu tuleb arvutada paindemoment ka kõige ohtlikumas ristlõikes, milleks on 35mm võlli läbimõõt.

Kõigepealt leitakse paindemoment valemist 16:

$$M_1 = F_1 * l_1 = 1732,69 * 69 = 119,56 \text{ Nm}$$

$$M_2 = F_1 * l_2 = 1732,69 * 25,4 = 44 \text{ Nm}$$

Leiame vastupanumomendi $W [\text{mm}^3]$ valemist (18) [17]:

$$W = \frac{\pi \cdot D^3}{32}, \quad (18)$$

kus W - vastupanumoment mm^3 ;

D - võlli diameeter mm .

$$W_1 = \frac{\pi \cdot 40^3}{32} = 6283,19 \text{ mm}^3$$

$$W_2 = \frac{\pi \cdot 35^3}{32} = 4209,24 \text{ mm}^3$$

Paindepinge saadakse valemist (15):

$$\sigma_{p1} = \frac{M_1}{W_1} \cdot 1000 = \frac{119,56}{6283,19} \cdot 1000 = 19,03 \text{ N/mm}^2 < [\sigma_{lub}]$$

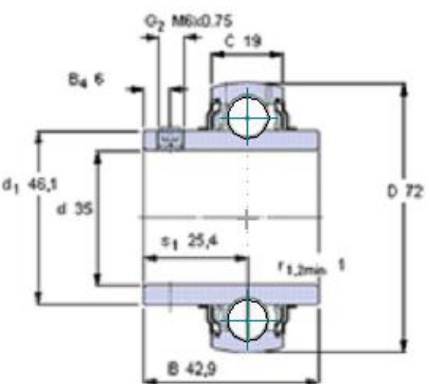
$$\sigma_{p2} = \frac{M_2}{W_2} \cdot 1000 = \frac{44}{4209,24} \cdot 1000 = 10,45 \text{ N/mm}^2 < [\sigma_{lub}]$$

Arvutustest näeme, et nii jõu F_1 juures tekkiv paindepinge kui ohtliku ristlõike juures tekkiv paindepinge on väiksem lubatust, mis teras S235 puhul on 235 N/mm^2 .

3.6 Laagrite valik

Laagrite valikul lähtutakse võlli läbimõõdust, milleks on 35 mm. Antud konstruktsiooni korral mõjuvad laagritele eeldatavate radiaaljõud, mistõttu otsustati üherealistel radiaalkuullaagrite kasuks. Radiaalkuullaagrid on suhteliselt odavad ning kergesti kättesaadavad. Kokku on konstruktsioonis vaja kahte laagrit. Esialgne laager valitakse SKF kodulehelt tähistusega YAR 207-2F [21]. Laagri andmed on ära toodud Selel 30.

Principal dimensions				Basic load ratings		Limiting speed	Designation
d	D	B	C	dynamic C	static C ₀	with shaft tolerance h6	
mm				kN		r/min	-
35	72	42,9	19	25,5	15,3	5300	YAR 207-2F



Hexagonal key size [mm]	3
Rec. tightening torque [Nm]	4
Appropriate rubber seating ring	RIS 207 A
Calculation factor	f _p 14

Sele 30. Laager YAR 207-2F [21]

Laagri kontrollimisel lähtutakse sellest, et haamri poolt tekitatav dünaamiline jõud ei ületaks lubatud väärtust. Antud juhul on haamri löögist tekkiv jõud F jagatud ära kahe laagri vahel nii, et kummalegi mõjub pool jõudu. Seega mõjub ühele laagrile maksimaalselt $F/2 = 3465,38/2 = 1732,69$ N. Vaadates Sele 30 näeme, et laager suudab taluda dünaamilist jõudu 25500 N. Kuna tegelik koormus on väiksem kui lubatud, osutus antud laager sobilikuks kasutamaks projekteeritavas konstruktsioonis.

4. VALMISTAMISTEHNOLLOOGIA

4.1 Tooriku valik

Konstruksiooni valmistamisel on vajadus erinevate toorikute järele. Kuna detailid valmistatakse ettevõttes Radius Machining OÜ, tellitakse toorikud antud ettevõtte seniste tarnijate seast. T-soonega alumiinium profiil tellitakse ettevõtte Teamster OÜ. Järgnevalt on ära toodud iga konstruksiooni elemendi nimetus koos tooriku mõõtmete ning materjaliga (Tabel 2):

Tabel 2

Tooriku valik

Nimetus	Kogus	Materjal	Mõõdud
Haamri kinnituskese	1	S235 JRG2/EN 10025	Nelikant 80, L=82mm
Haamri pea	1	AISI 304	Ümarteras D = 80 mm, L= 40 mm
Laagri korpuse alus	1	S235 JRG2/EN 10025	Teraslatt 80x30 L= 273 mm
Laagri korpuse alus 2	1	S235 JRG2/EN 10025	Teraslatt 80x30 L= 193 mm
Haamri vars	2	S355 JO/EN 10025	Teraslatt 20x60 L= 1575
Mall	1	AISI 304	Roostevaba leht 340x235 mm, s=10mm
Alasi	1	AISI 304	Roostevaba latt 10x80 mm L= 77mm
Võll	1	S235 JRG2/EN 10025	Ümarteras D= 40 mm, L= 437
Tihvt	1	AISI 304	Ümarteras D= 8mm, L= 32mm
Raskus	2	AISI 304	Ümarteras D= 105mm, L= 40
Jala toe plaat	6	AISI 304	Ümarteras D= 60mm, L=25
Resonantplaat	1	EN-AW-6082-T6	Plaat 1000x1005, s= 30mm
Nurga kinnitus 1	4	AISI 304	Roostevaba leht 90x170, s= 5 mm
Nurga kinnitus 2	4	AISI 304	Roostevaba leht 50x90, s= 5 mm

4.2 Seadmete valik

Enamus seadmeid on valitud ettevõtte Radius Machining OÜ masinapargist. Seadmete valikul lähtuti detailide keerukusest ja mõõtudest. Valisin pingid, mis võimaldavad detaile valmistada võimalikult väheste paigaldustega ja tagavad vajaliku täpsuse ning tootlikkuse.

- Lintsaag- Bomar Ergonomic 290.250 GAE [22] – Võimaldab lõigata detaile nurga all 0-60 kraadi. Antud saega saab lõigata ruudukujulist materjali mõõtudega kuni 270 x 270 mm ning ristkülikukujulist materjali mõõtudega kuni 290 x 230 mm. Lisaks on võimalik seadistada masin automaatrežiimile, andes operaatorile rohkem aega tegelemaks muu tööga.
- CNC freespink Haas VF4 [23] – Haasi pingi eeliseks on hea hinna ja kvaliteedi suhe ning kohaliku esinduse olemasolu. Töölaua mõõtmed (1321 x 457) ning selle liikumine x-telje sihis (1270 mm) on piisavad töötlemaks resonantplaadi lõigatud külge ning helicoil keermeid, tagades kõrge täpsuse ja tootlikkuse. Freespingi VF 4 andmed on ära toodud allolevas tabelis (Tabel 3).
- CNC treipink Haas ST-20SS [24]– Pingi eeliseks on hea hinna ja kvaliteedi suhe ning kohaliku esinduse olemasolu. Samuti on võimalik lisada revolvrissse aktiivtööriist, mis võimaldab kerge vaevaga teostada keerulisi freesimistöid. Lati ettesöötjaks on BAR2008ST. Treipingi andmed on ära toodud Tabelis 4.
- Keevitus aparaat- Kemppi Kempact Pulse 3000 [25]– Kvaliteetne ja professionaalne keevitusaparaat, hõlmates mitmeid funktsioone. Lihtne kasutada, väga heade keevitus omadustega, võimaldab keevitada ka alumiiniumi. Keevitusvool 65-250A. Samuti väga hea hinna ja kvaliteedi suhtega.
- Painutuspink CNC Aliko Press Brake 6000/630 [26]- Antud pink on suuteline painutama kuni 50 mm paksust lehtmaterjali pikkusega 6000 mm .
- Laserlõikuspink TruLaser 3030 (L20) [27] – Seadme lõikepindalaks on 1500x3000mm. Maksimaalne materjali paksus musta ning roostevaba terase puhul on 25 mm. Pingi täpsus on 0,1 mm ning maksimaalne lõikekiirus 140m/min.

Tabel 3

Haas VF4 andmed

Parameetrid	Väärtused
x-telje käigupikkus	1270mm
y-telje käigupikkus	508mm
z-telje käigupikkus	635mm
Töölaua pikkus	1321mm
Töölaua laius	457mm
T-soonte arv	5
T-soone laius	16mm
Max. Töölaua mass	1588kg
Max. Pöörete arv	12000p/min
Võimsus	22,4 kW
Max. Tööriista diameeter	89mm

Tabel 4

Haas ST-20SS andmed

Haas ST-20SS Parameetrid	Väärtused
x-telje käigupikkus	236mm
z-telje käigupikkus	533mm
Padruni läbimõõt	210mm
Max. Tooriku läbimõõt	254mm
Max. Pöörete arv	5000 p/min
tööriistahoidja	12VDI
VDI ava läbimõõt	40mm

4.3 Detailide töötlemistehnoloogia valik ja režiimide arvutus

Saagimine:

Teraslati saagimiseks kasutatakse BAHCO 3857 Easy-Cut [28] saelinti mõõtmetega 2910 x 27 x 0,9.

Kuna valitud sael on kasutada ainult kaks lõikekiirust, siis valin kiirema ehk $V_c=80\text{m/min}$, mida

soovitab ka tootja kalkulaator. Konstruktsiooniterase soovitatav ettenihe $v_f = 400\text{mm/min}$. Pöörlemissagedus n [p/min] leitakse valemist (19):

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c}, \quad (19)$$

kus V_c – lõikekiirus m/min;

D_c – diameeter ($D_c = 926,3 \text{ mm}$)

$$n = \frac{80 \cdot 1000}{\pi \cdot 926,3} = 27,5 \text{ p/min}$$

Ettenihe pöördele on seega $f_n = v_f / n = 400/27,5 = 14,5 \text{ mm/p}$

Puurimine:

1. Tsentripuuriks läbimõõduga 14 mm kasutatakse Hassay-savage [29] tsentripuuri 81951400. Valin lõikerežiimid, mis sobivad nii konstruktsiooni terase S235 kui roostevaba terase AISI 304 jaoks: lõikekiirus $V_c = 80\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,2 \text{ mm}$ Pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 1819 \text{ p/min}$.
2. Tsentripuuriks läbimõõduga 10 mm kasutatakse Hassay-savage tsentripuuri 81951000. Valin lõikerežiimid, mis sobivad nii konstruktsiooni terase S235, S355 kui roostevaba terase AISI 304 jaoks: lõikekiirus $V_c = 80\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,15 \text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 2546 \text{ p/min}$.
3. Avade Ø 6,2 puurimiseks kasutatakse Sandvik Coromant puuri R840-0620-30-A0A [30, p. 872]. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid materjali Al 6082 töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 180\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,3 \text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 9241 \text{ p/min}$.
4. Avade Ø 6,4 puurimiseks kasutatakse Sandvik Coromant puuri R840-0640-30-A1A [30, p. 871]. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid materjali AISI 304 töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 60\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,1 \text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 2984 \text{ p/min}$.
5. Avade Ø 6,8 puurimiseks kasutatakse Sandvik Coromant läbijahutusega puuri R840-0680-30-A1A [30, p. 872]. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid nii materjalide S235, S355 kui AISI 304 töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 80\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,17 \text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 3745 \text{ p/min}$.

6. Avade Ø 8 puurimiseks kasutatakse Sandvik Coromant läbijahutusega puuri R840-0800-30-A1A [30, p. 872]. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid materjali AISI 304 töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 60\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,15\text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 2387\text{ p/min}$.
7. Avade Ø 8,5 puurimiseks kasutatakse Sandvik Coromant läbijahutusega puuri R840-0850-30-A1A [30, p. 872]. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid materjali AISI 304 töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 60\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,15\text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 2387\text{ p/min}$.
8. Avade Ø 10,2 puurimiseks kasutatakse Sandvik Coromant läbijahutusega puuri R840-1020-30-A1A [30, p. 872]. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid nii materjali AISI 304 kui S235 töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 80\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,2\text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 2497\text{ p/min}$.
9. Avade Ø 12 puurimiseks kasutatakse Sandvik Coromant puuri R840-1200-30-A0A [30, p. 873]. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid materjali S235 töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 110\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,3\text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 2917\text{ p/min}$.
10. Avade Ø 13 puurimiseks kasutatakse Sandvik Coromant läbijahutusega puuri R840-1300-30-A1A [30, p. 873]. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid materjali AISI 304 töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 60\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,17\text{ mm}$, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 1469\text{ p/min}$.

Keermestamine:

1. M8 keermestamiseks kasutatakse Sandvik Coromant umbava keermepuuri EX01M86G [31, p. 192]. Ettenihe pöördele on võrdne keerme sammuga ($f_n = 1,25\text{ mm/p}$). Lõikekiirus V_c valitakse lähtuvalt tootja soovitusest materjalide S235 ja S355 korral 20 m/min ning AISI 304 puhul 6m/min . Spindli pöörete arv konstruktsiooni teraste puhul on $n = 796\text{ p/min}$ (19) ning roostevaba terase puhul $n = 239\text{ p/min}$ (19).
2. M12 keermestamiseks kasutatakse Sandvik Coromant umbava keermepuuri EX01M126G [31, p. 192]. Ettenihe pöördele on võrdne keerme sammuga ($f_n = 1,75\text{ mm/p}$). Lõikekiirus V_c valitakse lähtuvalt tootja soovitusest materjalie S235 korral 22 m/min ning AISI 304 puhul 6m/min .

Spindli pöörete arv S235 korral on $n = 584$ p/min (19) ning roostevaba terase puhul $n = 159$ p/min (19).

3. M6 helicoil keermestamiseks kasutatakse Böllhoff umbava keermepuuri 01414060152 [32]. Ettenihe pöördel on võrdne keerme sammuga ($f_n = 1$ mm/p). Lõikekiirus V_c valitakse Al 6082 puhul 35 m/min, pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 1857$ p/min.
4. M14 keermestamiseks kasutatakse Sandvik Coromant läbiv ava keermepuuri E854M14 [31, p. 57]. Ettenihe pöördel on võrdne keerme sammuga ($f_n = 2$ mm/p). Lõikekiirus V_c valitakse lähtuvalt tootja soovitusel materjalile S235 korral 17 m/min. Pöörlemissagedus n arvutatakse valemist 19: $n = 387$ p/min.

Freesimine:

1. Resonantplaadi külje freesimiseks kasutatakse alumiinium freesi R216.32-10025-AK32A [30, p. 807] tolerantsiga h10. Freesi diameeter on 10 mm, maksimaalne lõikelaius $a_p = 32$ mm ning lõikeservi on kaks. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid: lõikekiirus $V_c = 1000$ m/min, ettenihe hambale $f_z = 0,027$ mm, pöörlemissagedus $n = 31830$ p/min (19). Kuna freespingi VF4 maksimaalne pöörete arv on 12000 p/min, valitakse pöörlemissageduseks $n = 12000$ p/min. Seega lõikekiirus $V_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 12000}{1000} = 377$ m/min. Töölaua ettenihe $v_f = f_z \cdot n \cdot z_n = 0,027 \cdot 12000 \cdot 2 = 648$ mm/min, ettenihe pöördel $f_n = f_z \cdot z_n = 0,027 \cdot 2 = 0,054$ mm/p.
2. Haamri keskme ava (läbimõõduga Ø 30mm) ning varre ava (läbimõõduga Ø 40mm) freesimiseks kasutatakse Sandvik Coromant freesi R216.24-08050EAK19P [30, p. 771] tolerantsiga h9, diameetriga Ø 10mm ning hammaste arvuga $z_n = 4$. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid konstruktsiooni terase töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 120$ m/min, ettenihe hambale $f_z = 0,027$ mm, pöörlemissagedus $n = 3820$ p/min (19), töölauda ettenihe $v_f = 413$ mm/min, ettenihe pöördel $f_n = 0,108$ mm/p.
3. Haamri pea poldi tasku ning alasi poldi tasku freesimiseks kasutatakse Sandvik Coromant freesi R216.24-06050CAK13P [30, p. 771] diameetriga Ø 6mm ning tolerantsiga h9. Freesil on neli lõikeserva ning maksimaalne lõikelaius $a_p = 13$ mm. Vastavalt tootja soovitusele valitakse lõikerežiimid, mis sobiksid roostevaba terase töötlemiseks: lõikekiirus $V_c = 60$ m/min, ettenihe hambale $f_z = 0,014$ mm, pöörlemissagedus $n = 3183$ p/min (19), töölauda ettenihe $v_f = 178$ mm/min, ettenihe pöördel $f_n = 0,056$ mm/p.

4. Detailide (haamri kese, laagrikorpuse alus, laagrikorpuse alus 2, alasi) pinna töötlemiseks kasutatakse Sandvik Coromant laupfreeesi R290-050A32-12M [30, p. 678], tööriistahoidjat BT40-FMB(C)32-60 [33] ning terikplaate R290-12T308M-PM [30, p. 679], mille materjaliks on GC1030. Vastavalt tootja soovitusel valitakse eraldi lõikerežiimid nii roostevaba terase AISI 304 kui terase S235 töötlemiseks: AISI 304 puhul lõikekiirus $V_c = 225\text{m/min}$, maksimaalne laastu paksus $h_{ex} = 0,1\text{mm}$. Kuna antud tööriista peanurk on 90° siis on laastu maksimaalne paksus võrdeline ettenihkega hambale ehk $f_z = 0,1\text{mm}$, pöörlemissagedus $n = 1432\text{ p/min}$ (19), töölaua ettenihe $v_f = 573\text{ mm/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,4\text{mm/p}$. Konstruktsiooniterase puhul lõikekiirus $V_c = 340\text{m/min}$, maksimaalne laastu paksus $h_{ex} = 0,1\text{mm}$ ($f_z = 0,1\text{mm}$), pöörlemissagedus $n = 2165\text{ p/min}$ (19), töölaua ettenihe $v_f = 866\text{ mm/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,4\text{mm/p}$.

Treimine:

1. Otspinna ning koorivtöötluste jaoks kasutatakse tööriistahoidjat B1-40x25 [33], terahoidjat PCLNR 2525M 12 [30, p. 124] ning teraplaati CNMG 12 04 08-WF [30, p. 23]. AISI 304 puhul valitakse teraplaadi materjaliks GC2015 ning S235 puhul GC4215. Vastavalt tootja soovitusel valitakse eraldi lõikerežiimid nii AISI 304 kui S235 töötlemiseks: S235 puhul lõikekiirus $V_c = 405\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,4\text{mm}$, pöörlemissagedus $n = 3683\text{ p/min}$ (19). Roostevaba terase puhul on treitavad detailid erineva läbimõõduga mistõttu leitakse iga detaili kohta eraldi lõikerežiimid. Valides AISI 304 töötlemise lõikekiiruseks $V_c = 220\text{m/min}$ ning ettenihkeks pöördele $f_n = 0,4\text{mm}$ saadakse haamri pea treimisel pöörlemissageduseks $n = 898\text{ p/min}$ (19), tihvti treimisel $n = 8754\text{ p/min}$ (19), jalatoe plaadi treimisel $n = 1207\text{ p/min}$ (19) ning raskuse treimisel $n = 687\text{ p/min}$ (19).
2. Puhastöötlusteks kasutatakse tööriistahoidjat B1-40x25 [33], terahoidjat PDJNR 2525M 11 [30, p. 125] ning teraplaati DNMG 11 04 08-PF [30, p. 28] materjaliga GC4215 (konstruktsiooni terase treimisel) ning GC2015 (AISI 304 treimisel). Vastavalt tootja soovitusel valitakse eraldi lõikerežiimid nii AISI 304 kui S235 töötlemiseks: S235 puhul lõikekiirus $V_c = 550\text{m/min}$, ettenihe pöördele $f_n = 0,1\text{mm}$, pöörlemissagedus $n = 5002\text{ p/min}$ (19). Roostevaba terase puhul on treitavad detailid erineva läbimõõduga, mistõttu leitakse iga detaili kohta eraldi lõikerežiimid. Valides AISI 304 töötlemise lõikekiiruseks $V_c = 260\text{m/min}$ ning ettenihkeks pöördele $f_n = 0,2\text{mm}$ saadakse haamri pea treimisel pöörlemissageduseks $n = 1061\text{ p/min}$ (19), jalatoe plaadi treimisel $n = 1427\text{ p/min}$ (19) ning raskuse treimisel $n = 811\text{ p/min}$ (19). Tihvtile puhastöötlust ei tehta.

Painutamine:

Haamri varre painutamine toimub firmas Levstal OÜ. Ettevõtte kasutab painutamiseks CNC pinki Aliko Press Brake 6000/630. Painutuskiiiruseks valitakse u. 4mm/sek = 0,24 m/min.

Laserlõikus:

Malli gabariitmõõtmel lõigatakse välja ettevõttes Laserline OÜ. Ettevõtte kasutab laserlõikepink TruLaser 3030 (L20). Võttes arvesse lõigatava materjali paksust, milleks on 10 mm, saadakse lõikekiiruseks $V_c = 140\text{m/min}$.

Keevitamine:

Haamri varre keevitamine võlli külge toimub ettevõttes Artefer OÜ aparadiga Kemppi Kempact Pulse 3000. Järgnevalt leitakse traadi etteande kiirus V_t [m/h] valemist 20:

$$V_t = \frac{4 \cdot a_s \cdot I}{\pi \cdot d_{\text{traat}}^2 \cdot \rho}, \quad (20)$$

kus a_s – traadi sulamise tegur g/Ah;
 I – voolutugevus A ($I = 200\text{A}$);
 d_{traat} – traadi läbimõõt mm ($d_{\text{traat}} = 1,2$);
 ρ – traadi tihedus g/mm³ (terase jaoks $\rho = 7,8\text{ g/mm}^3$).

$$V_t = \frac{4 \cdot 14,9 \cdot 200}{\pi \cdot 1,2^2 \cdot 7,8} = 337,8\text{ m/h}$$

Traadi sulatamistegur a_s [g/Ah] on leitav valemist (21):

$$a_s = 2 + \sqrt{\frac{I}{d_{\text{traat}}}} \quad (21)$$

$$a_s = 2 + \sqrt{\frac{200}{1,2}} = 14,9\text{ g/Ah}$$

Keevituskiiirus V_k [mm/min] on leitav valemist (22):

$$V_k = \frac{a_{ps} \cdot I}{100 \cdot F_b \cdot \rho}, \quad (22)$$

kus a_{ps} – pealesulatustegur g/Ah;
 F_b – võlli ristlõikepindala mm² (võetakse 0,3...0,6 mm²).

$$V_k = \frac{14,5 \cdot 200}{100 \cdot 0,45 \cdot 7,8} = 8,26\text{ m/h} = 137,7\text{ mm/min}$$

Pealesulatustegur saadaks järgnevalt: $a_{ps} = a_s \cdot (1 - \psi) = 14,9 \cdot (1 - 0,025) = 14,5\text{ g/Ah}$

kus ψ - metalli kadumise tegur pritsimisel, võetakse 0,02...0,03;
 a_s – traadi sulamise tegur g/Ah.

4.4 Operatsioonide normeerimine, tööaja arvutus

Toorikute saagimisel arvutatakse materjali eemaldamise määr Q_{max} [cm²/min] valemist (23):

$$Q_{max} = V_c (1,54 - 1,13 \log t_{pi}), \quad (23)$$

kus V_c - lõikekiirus m/min;
 t_{pi} - saelehe hammaste arv ühe inch-i kohta= 8

Masinaaegade T_m [min] arvutamisel kasutatakse valemeid 24, 25, 26, 27 ning 28:

$$T_m = S/Q_{max}, \quad (24)$$

kus S - lõigatava materjali ristlõikepindala mm².

$$T_m = \frac{l+l_1+l_2}{f_n \times n}, \quad (25)$$

kus l - töödeldava pinna pikkus mm;
 l_1 - sisselõikepikkus mm;
 l_2 - ülejooksu pikkus mm;

$$T_m = r/v, \quad (26)$$

kus r - paindraadius mm;
 v - painutamiskiirus m/s.

$$T_m = \frac{P}{V_c}, \quad (27)$$

kus P - detaili ümbermõõt mm;

Ümbermõõt P leitakse Solid Edge tarkvara abil

$$T_m = L/V_k, \quad (28)$$

kus V_k - keevitamiskiirus mm/min;
 L - keevisõmbluse pikkus mm.

5. MAJANDUSLIK OSA

Majanduslikus osas tuuakse ära kulutused, mis on seotud projekteeritava konstruktsiooni valmistamisega. Enamus detaile on võimalik valmistada ettevõttes Radius Machining OÜ. Ainsana ostetakse sisse laserlõike ning painutus teenust.

5.1 Kulutused materjalile

Järgnevalt leitakse konstruktsioonielementide materjali kulu Q [kg] valemist 29:

$$Q = q \cdot A_{pr}, \quad (29)$$

kus A_{pr} - tootmisprogramm tk;

q - materjali kulunorm detaili kohta kg;

Haamri kinnituskese RS.01.00.01 kulu:

$$Q = 3,774 \cdot 1 = 3,774 \text{ kg}$$

Haamri pea RS.01.00.02 kulu:

$$Q = 0,718 \cdot 1 = 0,718 \text{ kg}$$

Laagri korpuse alus RS.01.00.03 kulu:

$$Q = 4,254 \cdot 1 = 4,254 \text{ kg}$$

Laagri korpuse alus 2 RS.01.00.04 kulu:

$$Q = 3,519 \cdot 1 = 3,519 \text{ kg}$$

Haamri vars RS.01.00.05 kulu:

$$Q = 14,525 \cdot 2 = 29,05 \text{ kg}$$

Mall RS.01.00.06 kulu:

$$Q = 2,452 \cdot 1 = 2,452 \text{ kg}$$

Alasi RS.01.00.07 kulu:

$$Q = 0,429 \cdot 1 = 0,429 \text{ kg}$$

Haamri völli RS.01.00.08 kulu:

$$Q = 4,085 \cdot 1 = 4,085 \text{ kg}$$

Tihvt RS.01.00.09 kulu:

$$Q = 0,012 \cdot 1 = 0,012 \text{ kg}$$

Raskus RS.01.00.10 kulu:

$$Q = 2 \cdot 2 = 4 \text{ kg}$$

Resonantplaat RS.01.00.11 kulu:

$$Q = 81,254 \cdot 1 = 81,254 \text{ kg}$$

Jala plaat RS.01.00.12 kulu:

$$Q = 0,196 \cdot 6 = 1,176 \text{ kg}$$

Nurga kinnitus 1 RS.01.00.13 kulu:

$$Q = 0,470 \cdot 4 = 1,88 \text{ kg}$$

Nurga kinnitus 2 RS.01.00.14 kulu:

$$Q = 0,111 \cdot 4 = 0,444 \text{ kg}$$

Materjali maksumus D_m [€] leitakse valemist 30:

$$D_m = (q \cdot h) - (qj \cdot hj), \quad (30)$$

kus D_m - kulutused materjalile ühe detaili kohta;

h - detaili materjali ühe kg hind €/kg;

q - materjali kulunorm detaili kohta kg;

qj - jäätmete kogus ühe detaili kohta kg;

hj - jäätme ühe kg hind €/kg [34], [35].

Haamri kinnituskese RS.01.00.01 materjali maksumus:

$$D_m = (4,110 \cdot 2) - (0,336 \cdot 0,9) = 7,92 \text{ €}$$

Haamri pea RS.01.00.02 materjali maksumus:

$$D_m = (1,614 \cdot 3) - (0,896 \cdot 0,65) = 4,26 \text{ €}$$

Laagri korpuse alus RS.01.00.03 materjali maksumus:

$$D_m = (5,132 \cdot 2,2) - (0,878 \cdot 0,9) = 10,5 \text{ €}$$

Laagri korpuse alus 2 RS.01.00.04 materjali maksumus:

$$D_m = (3,628 \cdot 2,2) - (0,109 \cdot 0,9) = 7,88 \text{ €}$$

Haamri vars RS.01.00.05 materjali maksumus:

$$D_m = 2((14,800 \cdot 2,5) - (0,275 \cdot 0,9)) = 73,51 \text{ €}$$

Mall RS.01.00.06 materjali maksumus:

$$D_m = (6,414 \cdot 3,2) - (3,962 \cdot 0,65) = 17,95 \text{ €}$$

Alasi RS.01.00.07 materjali maksumus:

$$D_m = (0,593 \cdot 3,2) - (0,164 \cdot 0,65) = 1,79 \text{ €}$$

Haamri völli RS.01.00.08 materjali maksumus:

$$D_m = (4,3 \cdot 2,2) - (0,215 \cdot 0,9) = 9,27 \text{ €}$$

Tihvt RS.01.00.09 materjali maksumus:

$$D_m = (0,013 \cdot 3) - (0,001 \cdot 0,65) = 0,04 \text{ €}$$

Raskus RS.01.00.10 materjali maksumus:

$$D_m = 2((2,780 \cdot 3,2) - (0,78 \cdot 0,65)) = 16,78 \text{ €}$$

Resonantplaat RS.01.00.11 materjali maksumus:

$$D_m = (81,767 \cdot 2,5) - (0,513 \cdot 0,92) = 203,95 \text{ €}$$

Jala plaat RS.01.00.12 materjali maksumus:

$$D_m = 6((0,340 \cdot 3,2) - (0,144 \cdot 0,65)) = 5,97 \text{ €}$$

Nurga kinnitus 1 RS.01.00.13 materjali maksumus:

$$D_m = 4((0,614 \cdot 3) - (0,144 \cdot 0,65)) = 6,99 \text{ €}$$

Nurga kinnitus 2 RS.01.00.14 materjali maksumus:

$$D_m = 4((0,181 \cdot 3) - (0,007 \cdot 0,65)) = 2,15 \text{ €}$$

Materjali maksumus kokku $D_{mKokku} = 368,98 \text{ €}$

Alumiinium profiilide hinnad ning standardsete toodete hinnad on ära toodud lisades (Lisa 2), (Tabel 8) ning (Lisa 3), (Tabel 9).

5.2 Kulutused seadmetele ja tööjõule

Võttes seadmete tunnitasuks 30 eurot ning arvestades tüki kalkulatsiooni, mil seade on hõivatud, saame leida seadmete kasutamise kulud (elekter, remont, amortisatsioon jne.):

Treipink ST-20SS:	$30 \cdot 1,91 = 57,3 \text{ €}$
Freepink VF-4:	$30 \cdot 4,04 = 121,2 \text{ €}$
Keevitusaparaat Kemppi Kempact Pulse 3000:	$30 \cdot 0,47 = 14,1 \text{ €}$
Lintsaa Bomar Ergonomic 290.250 GAE:	$30 \cdot 3,68 = 110,4 \text{ €}$
Painutuspink CNC Aliko Press Brake 6000/630	$30 \cdot 1,09 = 32,7 \text{ €}$
Laserlõikuspink TruLaser 3030 (L20)	$30 \cdot 1,04 = 31,2 \text{ €}$
Kokku	366,9 €

Kokku on konstruktsiooni valmistamiseks vaja üheksat inimest (Tabel 5). Tehnoloogil kulub tootmistehnoloogia väljatöötamiseks koos kulude koostamisega u. 6 tundi. Programmeerijal kulub umbes 12 tundi, et saada valmis kõik vajalikud programmid (14 detaili). Komplakteerijal kulub umbes 5 tundi konstruktsiooni kokkupanekuks. Teiste tööliste ajad saadakse tüki kalkulatsioonist (Tabel 7).

Tabel 5

Kulutused tööjõule [36]

Ametinimetused	Tunnitasu bruto €	Tööaeg h	Tööliste arv	Kokku €	Sotsiaalmaks+ töötuskindlustus	Tööandjale kokku €
Tehnoloog	8	6	1	48	16,22	64,22
Programmeerija	7	5	1	35	11,83	46,83
CNC treipingi operaator	5	1,91	1	9,55	3,23	12,78
CNC freespingi operaator	5	4,04	1	20,2	6,83	27,03
Keevitaja	7	0,47	1	3,29	1,12	4,41
Saepingi operaator	4	3,68	1	14,72	4,98	19,7
Painutuspingi operator	5	1,09	1	5,45	1,84	7,29
Laserpingi operaator	6	1,04	1	6,24	2,11	8,35
Komplakteerija	4	5	1	20	6,76	26,76
Kokku						217,37

5.3 Kulutused lõikeinstrumentidele ning rakistusele

Instrumentide kulutuste arvutamisel ei ole mõtet leida igale lõikeriistale eraldi püsivusaega ning täieliku kulumise aega. Detailide valmistamiskogus on väike ning mitte ühegi instrumendi tööaeg ei ületa 20 minutit. Lihtsustamise mõttes valitaksegi igat tööriista ainult üks (va. laupfreesi terikud). Kulutused lõikeinstrumentidele on ära toodud lisades (Lisa 4), (Tabel 10).

Rakistuse poole pealt tuleb valmistada spetsiaalne vinkel resonantplaadi külgmiste M6 helicoil töötlemiseks. Rakise valmistamise kuluks võetakse u. 30 eurot.

5.4 Konstruktsiooni omahind

Toote omahinna ligikaudsel arvutamisel summeeritakse kulutused materjalile, instrumentidele, seadmetele ning tööjõule. Saadud väärtused kantakse allolevasse tabelisse (Tabel 6).

Tabel 6

Toote omahinna kalkulatsioon

Nimetus	Maksumus €
Kulutused materjalile	368,98 + 661,75
Kulutused tööjõule	217,37
Kulutused seadmetele	366,9
Kulutused instrumentidele	781
Kulutused rakisele	30
Standardsed tooted	628,3
Konstruktsiooni omahind	3054,3

KOKKUVÕTE

Diplomitöö käigus projekteeriti konstruktsioon, millega on võimalik katsetada ettevõttes Radius Space OÜ valmistatavaid väikesatelliite. Katseseade on kompaktne ning kergesti transporditav tänu spetsiaalsele T-soonega alumiinium profiilile. Löögi asukohta resonantplaadile on võimalik muuta kahel moel. Esimeseks võimaluseks oleks haamri asukoha muutmine raamil ning teiseks võimaluseks oleks resonantplaadi nihutamine raamil. Katse korratavus saavutatakse fikseeritud mallile, mille sisse on töödeldud viie kraadi erinevusega avad. Katseseade võimaldab saavutada põrutusspektrit sageduste vahemikus 100 Hz -10 KHz ning kiirenduste vahemikus 0-10000 g.

Diplomitöö oli jagatud neljaks suureks osaks: konstruktsiooni projekteerimine (parendamine), detailide valmistamise tehnoloogia, majandustehnilised arvutused ning joonised.

Projekteeritud konstruktsiooni aluseks oli Martin Jonssoni poolt välja töötatud katselaud, mida suudeti parendada nii konstruktsiooni kui ka hinna poolest. Parendatud mudelile tehti vajalikud tugevusarvutused, milleks on haamri võlli ning varre tugevusarvutus paindele ning kinnituspoltide tugevusarvutused nii tõmbele kui lõikele.

Suudeti välja töötada iga konstruktsioonialemendi valmistamistehnoloogia, mis sisaldab endas materjali, töötlusrežiimide ning lõikeinstrumentide valikut. Lisaks sellele arvutati detailide töötlusajad, mis olid aluseks majandustehnilistele arvutustele. Majanduse poole pealt arvutati toote omahind, milleks oli umbes 3000 eurot.

Lõputöö tulemused vastavad esitataud nõuetele, mistõttu võib antud diplomitöö lugeda igati õnnestunuks.

SUMMARY

The title of the topic is „Improvement of Shock Test Bench for Scientific Equipment Testing”. Topic is based on company Radius Space OÜ which is the subsidiary of Radius Machining OÜ. Radius Space is the first private company in Estonia to have it’s own manufactured satellites in space.

The purpose of this diploma work is to improve Martin Jonsson shock test bench which was designed in 2012. So far the company was testing satellites in Netherland. In order to improve Jonsson shock test bench different requirements were made:

- Testing bench has to enable shock response spectrum in frequency range of 10 Hz to 10 kHz and in acceleration range of 10 to 10000 g
- Testing bench needs to be compact and transportable
- Impact location has to be convertible
- Repeatability of the test
- Possible to test satellite with dimensions 400 x 500 x 400 mm

The whole work is divided into four main chapters which are: improvement of Jonsson shock test bench, manufacturing technology, economical calculations and drawings.

After finding the best solution to the construction different strength calculations were made e.g. calculating bending stress for hammer shaft and holder, calculating fastening bolts to shear and tension. After that manufacturing technology was determined to every single construction element. At the end of the diploma work construction net cost was calculated which was approximately 3000 euros.

As the current diploma work meets all the requirements, the work is considered to be successful.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] M. Johnsson, „Development of Shock Test Facility for Qualification of Space Equipment,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/167112.pdf>. [Kasutatud 01. aprill, 2015].
- [2] Wikipedia, „Shock,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Shock_%28mechanics%29. [Kasutatud 24. veebruar, 2015].
- [3] J. Alexander, „Shock Response Spectrum- A Primer,“ Minnesota, 2009.
- [4] ESA-ESTEC, „Space Engineering,“ Noordwijk, 2013.
- [5] I. s. t. f. THOR, „Shock test report Estcube,“ 2013.
- [6] „Hyperphysics,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/flobi.html>. [Kasutatud 28. märts, 2015].
- [7] Wikipedia, „Pythagoras's theorem,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_theorem. [Kasutatud 28. märts, 2015].
- [8] Metallimarket. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.metallimarket.ee/tootegrupid/plaadid>. [Kasutatud 24. märts, 2015].
- [9] V. Giurgiutiu, „Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors,“ Elsevier, 2008.
- [10] Wikipedia, „Aluminium,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>. [Kasutatud 09. märts, 2015].
- [11] „Basiv mechanic elements,“ Teamster OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/basic-mechanic-elements/index>. [Kasutatud 25. märts, 2015].
- [12] „AZO Materials,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2813>. [Kasutatud 28. märts, 2015].

- [13] „ASM Aerospace Specification Metals Inc.,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304A>. [Kasutatud 28. märts, 2015].
- [14] M. Endevco, „Problems in high-shock measurement,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.vibrationdata.com/tp308.pdf>. [Kasutatud 28. märts, 2015].
- [15] „PCB Piezotronics,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.pcb.com/Linked_Documents/Vibration/VIB300E_1204.pdf. [Kasutatud 10. aprill, 2015].
- [16] М. Фролов, техническая механика, 1990, p. 352.
- [17] H.Lepikson, Masinaehitaja käsiraamat, Tallinn: Valgus, 1968, p. 688.
- [18] „Westfield fasteners,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.westfieldfasteners.co.uk/Ref_Strength_Spec.html. [Kasutatud 22. märts, 2015].
- [19] Wikipedia, „Ring,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://et.wikipedia.org/wiki/Ring>. [Kasutatud 09. aprill, 2015].
- [20] P. Põdra, „Masinaelemendid, Keermesliited,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.mh.ttu.ee/priitp/Masinaelemendid/Loeng/3_Keermesliited.pdf. [Kasutatud 09. aprill, 2015].
- [21] „Y-bearings with grub screws,“ SKF, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/y-bearings/y-bearings-with-grub-screws/index.html?prodid=103002207&imperial=false>. [Kasutatud 09. aprill, 2015].
- [22] „Bomar,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.bomar-germany.de/en/ergonomic/automatic/ergonomic-290250-gae>. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [23] „Haas Automation Inc.,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.haascnc.com/mt_spec1.asp?id=VF-4&webID=40_TAPER_STD_VMC#gsc.tab=0. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [24] „Haas Automation Inc.,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.haascnc.com/cs_spec1.asp?id=ST-20SS&chucksize=8%20Inch#gsc.tab=0. [Kasutatud 15 aprill 2015].
- [25] „Kemppi,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPIWeb/DS_KempactMIG2530_Pulse3000_

- AD705_1212_EN.pdf/\$file/DS_KempactMIG2530_Pulse3000_AD705_1212_EN.pdf.
[Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [26] „Levstal Steel Constructions,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://levstal.com/et/metalli-painutus/>. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [27] „Laserline,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.laserline.ee/index.php?page=91>. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [28] „Toolmarketing, Tooted,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://cat.toolmarketing.eu/et/a/saelint-easy-cut-3857-27-0.9-ez-s-2480mm>. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [29] „Hassay-savage,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.hassay-savage.com/wp-content/uploads/NC-Spotting-Application.pdf>. [Kasutatud 16. aprill, 2015].
- [30] „Sandvik Coromant Catalogue,“ 2009. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 16. aprill, 2015].
- [31] „Sandvik Coromant Tap catalogue,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/c-2900-141.pdf>. [Kasutatud 16. aprill, 2015].
- [32] „Viba,“ Böllhoff, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.viba.nl/nl/catalog/bevestigen/merken/helicoil/helicoil-plus--schroefdraad--inserts/helicoil-plus--machinetappen/helicoil-plus--blind-45--metrisch-iso/542703000>. [Kasutatud 16. aprill, 2015].
- [33] „IMTE Your tool holder shop,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.vdiholder.ca/>. [Kasutatud 16. aprill, 2015].
- [34] K. AS, „Musta metalli ja romusõidukite baasostuhinnad,“ 14 aprill 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kuusakoski.com>. [Kasutatud 18. aprill, 2015].
- [35] Kuusakoski, „Värvilise metalli baasostuhinnad,“ 06 märts 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kuusakoski.com>. [Kasutatud 18. aprill, 2015].
- [36] „Palgakalkulaator 2015,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://palk.crew.ee/>. [Kasutatud 18. aprill, 2015].
- [37] „Exmet, tooted,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://exmet.ee>. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [38] „Guhring Spot Drill,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.guhring.com/documents/catalog/drills/ncspotdrills.pdf>. [Kasutatud 16. aprill, 2015].

- [39] „Mep Saws,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.mepsaws.it/catalogo/>. [Kasutatud 16. aprill, 2015].
- [40] „Sanistal, metall,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.sanistal.ee/et/tooted/metall.html>. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [41] A. C.M.Harris, Harris' Shock and vibration book, New York: McGrawHill, 2002, p. 1456.
- [42] Piesoelekter, „Wikipedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://et.wikipedia.org/wiki/Piesoelekter>. [Kasutatud 28. märts, 2015].
- [43] M. Tiidemann, Masinaelementide projekteerimise alused, Tallinn, 2010, p. 120.
- [44] Wikipedia, „Speed of sound,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound. [Kasutatud 01. märts, 2015].

LISAD

Lisa 1. Operatsiooniaegade normeerimine

Lisa 2. Al profiilide hinnad

Lisa 3. Standardsete toodete hinnad

Lisa 4. Kulutused lõikeinstrumentidele

Lisa 5. Raam

Lisa 6. Löögikatsetus laud

Lisa 7. Löögi haamer

Lisa 8. Haamri kinnituskese

Lisa 9. Haamri pea

Lisa 10. Laagrikorpuse alus

Lisa 11. Laagrikorpuse alus 2

Lisa 12. Haamri vars

Lisa 13. Alasi

Lisa 14. Haamri võll

Lisa 15. Jala toe plaat

Lisa 1. Operatsiooniaegade normeerimine

Haamri kinnituskese RS.01.00.01

Saagimine: toorik saetakse nelikant latist 80x80mm. Tooriku pikkus L=82 mm. Kasutades valemist 23 arvutatakse materjali eemaldamise määr:

$$Q_{\max} = 80 (1,54 - 1,13 \log 8) = 4156 \text{ cm}^2/\text{min}$$

Masinaaeg arvutatakse valemist 24:

$$T_m = 6400/4156 = 1,54 \text{ min}$$

Avade tsentreerimine (tsentripuur Ø14 mm) - masinaaeg leitakse valemist 25:

$$T_m = \frac{9(9+1)}{0,2 \times 1819} = 0,2474 \text{ min}$$

Avade Ø6,8 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{8(19+1)+2(16+1)}{0,17 \times 3745} = 0,3047 \text{ min}$$

Ava Ø10,2 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{25+1}{0,2 \times 2497} = 0,0521 \text{ min}$$

Keermestamine M8x1,25 (25):

$$T_m = \frac{8(15+1)+2(14+1)}{1,25 \times 796} = 0,1588 \text{ min}$$

Keermestamine M12x1,75 (25):

$$T_m = \frac{15+1}{1,75 \times 584} = 0,0157 \text{ min}$$

Tasku Ø30mm freesimine (25):

$$C = \pi d = \pi * 30 = 94,25 \text{ mm}$$

$$T_m = \frac{C \cdot n_x}{f_n \times n} = \frac{5+94,25 \cdot 4+1}{0,108 \cdot 3820} = 0,9283 \text{ min}$$

kus n_x - ringide arv;

C - ava ümbermõõt mm.

Külgede freesimine (25):

$$T_m = \frac{6 \cdot 2(80+104)}{0,4 \times 2165} = 2,5497 \text{ min}$$

Haamri pea RS.01.00.02

Saagimine (24):

$$T_m = 5026,5/4156 = 1,2095 \text{ min}$$

Otspinnatöötlus (25):

$$T_m = \frac{7(2+39+0,1)}{0,4 \times 898} = 0,8009 \text{ min}$$

Koorivtöötlus (25):

$$T_m = \frac{1+25+1}{0,4 \times 898} = 0,0752 \text{ min}$$

Puhastöötlus (25):

$$T_m = \frac{1+25+1}{0,2 \times 1061} = 0,1272 \text{ min}$$

Taskute Ø14mm freesimine (25):

$$T_m = \frac{2(13+43,98 \cdot 2+1)}{0,056 \cdot 3183} = 1,1440 \text{ min}$$

$$C = \pi d = \pi * 14 = 43,98 \text{ mm}$$

Ava Ø8,5mm tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{2(9,5+1)}{0,15 \times 2546} = 0,0550 \text{ min}$$

Ava Ø8,5mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{2(1+13+1)}{0,15 \times 2387} = 0,0838 \text{ min}$$

Laagrikorpuse alus RS.01.00.03

Saagimine (24):

$$T_m = 2400/4156 = 0,5775 \text{ min}$$

Külgede freesimine (25):

$$T_m = \frac{(271+104)6+(78+104)2}{0,4 \times 2165} = 3,0185 \text{ min}$$

Astme freesimine (25):

$$T_m = \frac{(78+104)6}{0,4 \times 1432} = 1,9064 \text{ min}$$

Avade tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{10(9+1)}{0,15 \times 2546} = 0,2618 \text{ min}$$

Avade Ø6,8mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{4(20+1)+4(17+1)}{0,17 \times 3745} = 0,2450 \text{ min}$$

Avade Ø12mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{2(34+1)}{0,3 \times 2917} = 0,0800 \text{ min}$$

Keermestamine M8 (25):

$$T_m = \frac{8(16+2)}{1,25 \times 796} = 0,1447 \text{ min}$$

Keermestamine M14 (25):

$$T_m = \frac{2(34+2)}{2 \times 387} = 0,0930 \text{ min}$$

Laagrikorpuse alus 2 RS.01.00.04

Saagimine (24):

$$T_m = 2400/4156 = 0,5775 \text{ min}$$

Külgede freesimine (25):

$$T_m = \frac{(191+104)6+(78+104)2}{0,4 \times 2165} = 2,4642 \text{ min}$$

Avade tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{6(9+1)}{0,15 \times 2546} = 0,1571 \text{ min}$$

Avade Ø6,8mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{4(20+1)}{0,17 \times 3745} = 0,1319 \text{ min}$$

Avade Ø12mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{2(34+1)}{0,3 \times 2917} = 0,0800 \text{ min}$$

Keermestamine M8 (25):

$$T_m = \frac{4(16+2)}{1,25 \times 796} = 0,0724 \text{ min}$$

Keermestamine M14 (25):

$$T_m = \frac{2(34+2)}{2 \times 387} = 0,0930 \text{ min}$$

Haamri vars RS.01.00.05

Saagimine (24):

$$T_m = 1200/4156 = 0,28889 \text{ min}$$

Otsade freesimine (25):

$$T_m = \frac{1+60+1}{0,108 \times 3820} = 0,1503 \text{ min}$$

Avade tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{(9+1)4}{0,15 \times 2546} = 0,1048 \text{ min}$$

Avade Ø8,5mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{4(1+20+5)}{0,15 \times 2387} = 0,2905 \text{ min}$$

Avade Ø40mm freesimine (25):

$$T_m = \frac{1+20+125,66 \cdot 5+1}{0,108 \cdot 3820} = 1,5763 \text{ min}$$

$$C = \pi d = \pi * 40 = 125,66 \text{ mm}$$

Painutamine (26):

$$T_m = 2 \cdot 50/14 = 14,28 \text{ sek} = 0,1191 \text{ min}$$

Mall RS.01.00.06

Laserlõikus (27):

$$T_m = \frac{1616}{140000} = 0,0115 \text{ min}$$

Avade tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{40(9+1)}{0,15 \times 2546} = 1,0474 \text{ min}$$

Avade Ø8,0 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{36(1+10+5)}{0,15 \times 2387} = 1,6087 \text{ min}$$

Avade Ø6,2 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{4(1+10+5)}{0,17 \times 3745} = 0,1005 \text{ min}$$

Keermestamine M8 (25):

$$T_m = \frac{4(1+10+2)}{1,25 \times 239} = 0,1741 \text{ min}$$

Alasi RS.01.00.07

Saagimine (24):

$$T_m = 960/4156 = 0,2310 \text{ min}$$

Külgede freesimine (25):

$$T_m = \frac{(75+104)6}{0,4 \times 1432} = 1,8750 \text{ min}$$

Avade Ø11,0 mm freesimine (25):

$$T_m = \frac{4(1+34,56 \cdot 5)}{0,056 \times 3183} = 3,8777 \text{ min}$$

$$C = \pi d = \pi * 11 = 34,56 \text{ mm}$$

Avade tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{4(7+1)}{0,15 \times 2546} = 0,0838 \text{ min}$$

Avade Ø6,4 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{4(1+4+2)}{0,1 \times 2984} = 0,1072 \text{ min}$$

Haamri võll RS.01.00.08

Saagimine (24):

$$T_m = 1256,64/4156 = 0,3024 \text{ min}$$

Otspinnatöötlus (25):

$$T_m = \frac{2(2+20+0,1)}{0,4 \times 898} = 0,1231 \text{ min}$$

Koorivtöötlus (25):

$$T_m = \frac{4(1+43)}{0,4 \times 898} = 0,4900 \text{ min}$$

Puhastöötlus (25):

$$T_m = \frac{2(1+43)}{0,2 \times 1061} = 0,4147 \text{ min}$$

Tihvt RS.01.00.09

Saagimine (25):

$$T_m = 50,27/4156 = 0,0121 \text{ min}$$

Otspinnatöötlus (25):

$$T_m = \frac{2(2+4+0,1)}{0,4 \times 898} = 0,0340 \text{ min}$$

Raskus RS.01.00.10

Saagimine (24):

$$T_m = 8171,28/4156 = 1,9662 \text{ min}$$

Otspinnatöötlus (25):

$$T_m = \frac{5(2+51+0,1)}{0,4 \times 898} = 0,7392 \text{ min}$$

Koorivtöötlus (25):

$$T_m = \frac{2(1+30+1)}{0,4 \times 898} = 0,1782 \text{ min}$$

Puhastöötlus (25):

$$T_m = \frac{1+30+1}{0,2 \times 1061} = 0,1508 \text{ min}$$

Ava tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{14+1}{0,2 \times 1819} = 0,0413 \text{ min}$$

Avade Ø13 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{1+14+5}{0,17 \times 1469} = 0,0801 \text{ min}$$

Resonantplaat RS.01.00.11

Külje freesimine (25):

$$T_m = \frac{1+1000 \cdot 2+1}{0,054 \times 12000} = 3,0895 \text{ min}$$

Avade tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{55(7+1)}{0,3 \times 6366} = 0,2304 \text{ min}$$

Avade Ø6,2mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{55(17+1)}{0,3 \times 6366} = 0,5184 \text{ min}$$

Keermestamine M6 helicoil (25):

$$T_m = \frac{55(14+1)}{1 \times 1857} = 0,4443 \text{ min}$$

Jala toe plaat RS.01.00.12

Saagimine (24):

$$T_m = 2827,43/4156 = 0,6803 \text{ min}$$

Otspinnatöötlus (25):

$$T_m = \frac{2+29+0,1}{0,4 \times 898} = 0,0866 \text{ min}$$

Koorivtöötlus (25):

$$T_m = \frac{(1+6+1)+(1+30 \cdot 3+0,1)}{0,4 \times 898} = 0,1924 \text{ min}$$

Puhastöötlus (25):

$$T_m = \frac{1+30+0,1}{0,2 \times 1061} = 0,1466 \text{ min}$$

Ava tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{13+1}{0,2 \times 1819} = 0,0385 \text{ min}$$

Avade Ø10,2 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{1+12+5}{0,2 \times 2497} = 0,0361 \text{ min}$$

Keermestamine M12 (25):

$$T_m = \frac{1+12+3}{1,75 \times 159} = 0,0575 \text{ min}$$

Nurga kinnitus 1 RS.01.00.13

Laserlõikus (27):

$$T_m = \frac{476}{140000} = 0,0034 \text{ min}$$

Avade tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{8(9+1)}{0,15 \times 2546} = 0,2095 \text{ min}$$

Avade Ø8,5 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{8(1+5+3)}{0,15 \times 2387} = 0,2011 \text{ min}$$

Painutamine (25):

$$T_m = 5/14 = 0,3571 \text{ min}$$

Nurga kinnitus 2 RS.01.00.14

Laserlõikus (27):

$$T_m = \frac{232}{140000} = 0,0017 \text{ min}$$

Avade tsentreerimine (25):

$$T_m = \frac{2(9+1)}{0,15 \times 2546} = 0,1048 \text{ min}$$

Avade Ø8,5 mm puurimine (25):

$$T_m = \frac{2(1+5+3)}{0,15 \times 2387} = 0,0865 \text{ min}$$

Painutamine (26):

$$T_m = 5/14 = 0,3571 \text{ min}$$

Koostu keevitamine RS.01.00.15

Keevisõmbluse kogupikkus L:

$$L = \pi \cdot D = \pi \cdot 40 = 125,66 \text{ mm}$$

Keevitamiseks kulv aeg (28):

$$T_m = 125,66/137,7 = 0,9126 \text{ min}$$

Eespool arvutatud masinaajad on ära toodud allolevas tabelis (Tabel 7).

Tabel 7

Ajakulu koondtabel

Detail	Arv	Operatsioon	T _p	T _a	T _{org}	T _{tehn}	T _v	T _{tk}	T _{e.l}	T _{kalk}	Kokku
Haamri kinnituskese RS.01.00.01	1	saagimine freesimine	1,5400 4,2567	0,2 0,15	0,01 0,02	0,04 0,03	0,06 0,2	1,85 4,6567	20 20	20,85 24,6567	20,85 24,6567
Kokku										45,5067	45,5067
Haamri pea RS.01.00.02	1	saagimine treimine freesimine	1,2095 1,0033 1,2828	0,2 0,2 0,15	0,01 0,02 0,02	0,04 0,03 0,04	0,05 0,04 0,05	1,5095 1,2933 1,5428	20 20 20	21,5095 21,2933 21,5428	21,5095 21,2933 21,5428
Kokku										64,3456	64,3456
Laagrikorpuse alus RS.01.00.03	1	saagimine freesimine	0,5775 5,7494	0,2 0,15	0,01 0,02	0,04 0,04	0,02 0,3	0,8475 6,2594	20 20	20,8475 26,2594	20,8475 26,2594
Kokku										47,1069	47,1069
Laagrikorpuse alus 2 RS.01.00.04	1	saagimine freesimine	0,5775 3,7186	0,2 0,15	0,01 0,02	0,04 0,03	0,02 0,1	0,8575 4,0186	20 20	20,8575 24,0186	20,8575 24,0186
Kokku										44,8761	44,8761
Haamri vars RS.01.00.05	2	saagimine freesimine painutamine	0,5777 2,1218 0,1191	0,2 0,15 0,2	0,01 0,01 0,01	0,03 0,02 0,02	0,02 0,08 0,01	0,8377 2,3818 0,3591	10 10 10	10,8377 12,3818 10,3591	21,6754 24,7636 20,7182
Kokku										33,5786	67,1572
Mall RS.01.00.06	1	laserlõikus freesimine	0,0115 2,9307	0,3 0,15	0,01 0,02	0,01 0,03	0,01 0,09	0,3415 3,2207	20 20	20,3415 23,2207	20,3415 23,2207
Kokku										43,5622	43,5622
Alasi RS.01.00.07	1	saagimine freesimine	0,2310 5,9437	0,2 0,15	0,01 0,02	0,02 0,03	0,01 0,3	0,471 6,4437	20 20	20,471 26,4437	20,471 26,4437
Kokku										46,9147	46,9147

Detail	Arv	Operatsioon	T _p	T _a	T _{org}	T _{tehn}	T _v	T _{tk}	T _{e.l}	T _{kalk}	Kokku
Haamri völli RS.01.00.08	1	saagimine treimine	0,3024 1,0278	0,2 0,2	0,01 0,02	0,02 0,02	0,01 0,04	0,5424 1,3078	20 20	20,5424 21,3078	20,5424 21,3078
Kokku										41,8502	41,8502
Tihvt RS.01.00.09	1	saagimine treimine	0,0121 0,0340	0,2 0,2	0,01 0,02	0,01 0,01	0,01 0,01	0,2421 0,274	20 20	20,2421 20,274	20,2421 20,274
Kokku										40,5161	40,5161
Raskus RS.01.00.10	2	saagimine treimine	1,9662 1,1895	0,2 0,2	0,01 0,02	0,03 0,02	0,08 0,06	2,2862 1,4895	10 10	12,2862 11,4895	24,5724 22,9790
Kokku										23,7757	47,5514
Resonantplaat RS.01.00.11	1	freesimine	4,2826	0,2	0,04	0,03	0,1	4,6526	20	24,6526	24,6526
Kokku										24,6526	24,6526
Jala plaat RS.01.00.12	6	saagimine treimine	0,6803 0,5576	0,2 0,2	0,01 0,01	0,02 0,02	0,01 0,01	0,9203 0,7976	4 4	4,9203 4,7976	29,5218 28,7856
Kokku										9,7179	58,3074
Nurga kinnitus 1 RS.01.00.13	4	laserlõikus freesimine painutamine	0,0034 0,7677 0,3571	0,3 0,15 0,2	0,01 0,02 0,01	0,01 0,02 0,02	0,01 0,01 0,01	0,3334 0,9677 0,5971	5 5 5	5,3334 5,9677 5,5971	21,3336 23,8708 22,3884
Kokku										16,8982	67,5928
Nurga kinnitus 2 RS.01.00.14	4	laserlõikus freesimine painutamine	0,0017 0,5484 0,3571	0,2 0,15 0,2	0,01 0,02 0,01	0,01 0,02 0,02	0,01 0,01 0,01	0,2317 0,7484 0,5971	5 5 5	5,2317 5,7484 5,5971	20,9268 22,9936 22,3884
Kokku										16,5772	66,3088
Keevitamine RS.01.00.15	2	koostamine keevitamine	0,16 0,9126	0,1 1	1 1	0,8 0,9	0,05 0,2	2,11 4,0126	10 10	12,11 14,0126	24,22 28,0252
Kokku										26,1226	52,2452
Kokku								57,8071		526,0013	758,4935

Lisa 2. Al profiili hinnad

Tabel 8

Alumiinium profiilide hinnad

Nimetus/tellimuskood	Ettevõte	Kogus	Hind €/tk	Hind kokku €
3842993130 L=1380mm	Teamster Drive Systems OÜ	2	33,28	66,56
3842993130 L=1300mm		4	31,09	124,36
3842993130 L=370mm		2	11,43	22,86
3842993130 L=260mm		2	9,25	18,5
3842993130 L=180mm		2	7,06	14,12
3842993130 L=1815mm		2	44,2	88,4
3842993130 L=1080mm		2	26,72	53,44
3842993130 L=560mm		2	15,80	31,6
3842993130 L=480mm		1	13,62	13,62
3842993130 L=640mm		2	17,99	35,98
3842993130 L=300mm		4	9,25	37
3842993130 L=320mm		1	11,43	11,43
3842993130 L=340mm		2	11,43	22,86
3842993130 L=190mm		2	7,06	14,12
3842993130 L=750mm		2	20,17	40,34
3842993130 L=1370mm		2	33,28	66,56

Kokku 661,75 €

Lisa 3. Standardsete toodete hinnad

Tabel 9

Standardsete toodete hinnad

Nimetus/tellimuskood	Ettevõte	Kogus	Hind €/tk	Hind kokku €
8 avaga nurga kinnitus (3842530360)	Teamster Drive Systems OÜ	9	9,32	83,79
2 avaga nurga kinnitus (3842529383)		54	3,31	178,74
T-soone mutter M8 (3842536603)		164	1,17	191,88
80x40 otsaplaat (3842536562)		6	8,74	52,44
M14x40 polt (33422)	Flint OÜ	4	0,4	1,6
M12x25 polt (33103)		12	0,43	5,16
M8x40 polt (33279)		8	0,11	0,88
M8x20 polt (33277)		222	0,11	24,42
M6x16 polt (33449)		4	0,08	0,32
M14 seib (33448)		4	0,25	1
M8 seib (33168)		230	0,02	4,6
M12 keermelatt (33679)		1	3,4	3,4
Laagrikomplekt SYJ 35 TF	SKF	2	40	80

Kokku 628,3 €

Lisa 4. Kulutused lõikeinstrumentidele

Tabel 10

Kulutused lõikeinstrumentidel

instrument	läbimõõt (mm)	Instrumenti mark	materjal	Hind €/tk
Koorivtöötlus	$\varphi=80^{\circ}$	CNMG120408-WF	GC4215	5
Koorivtöötlus	$\varphi=80^{\circ}$	CNMG120408-WF	GC2015	5
Puhastöötlus	$\varphi=55^{\circ}$	DNMG110408-PF	GC4215	6
Puhastöötlus	$\varphi=55^{\circ}$	DNMG110408-PF	GC2015	6
Tsentripuur	14	81951400	HSS	40
Tsentripuur	10	81951000	HSS	20
Puur	6,2	R840-0620-30-A0A	GC1220	30
Puur	6,4	R840-0640-30-A1A	GC1220	32
Puur	6,8	R840-0680-30-A1A	GC1220	38
Puur	8	R840-0800-30-A1A	GC1220	40
Puur	8,5	R840-0850-30-A1A	GC1220	60
Puur	10,2	R840-1020-30-A1A	GC1220	80
Puur	12	R840-1200-30-A0A	GC1220	85
Puur	13	R840-1300-30-A1A	GC1220	100
Keermelõikur	M8	EX01M86G	HSS	10
Keermelõikur	M12	EX01M126G	HSS	15
Keermelõikur	M14	E854M14	HSS	20
Keermelõikur	M6 helicoil	01414060152	HSS	20
Külginna frees	10	R216.32-10025-AK32A	GC1620	25
Külginna frees	10	R216.24-08050EAK19P	GC1620	60
Külginna frees	6	R216.24-06050CAK13P	GC1620	20
Laupfrees	$\varphi=90^{\circ}$	R290-12T308M-PM	GC1030	24
Saeleht	2910 x 27 x 0,9		M42	40