

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND

Füüsika Instituut

Mihkel Põldemaa

**MÜOMEETER MYOTON 3 MEHAANILISTE VIGADE
TUVASTAMINE KIIRENDUSKÕVERAL ESINEVATE
MÜRADE KAUDU**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: bioloogiadoktor
Arved Vain

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

allkiri, kuupäev

Tartu 2016

Müomeeter MYOTON 3 mehaaniliste vigade tuvastamine kiirenduskõveral esinevate mürade kaudu

Lühikokkuvõte

Lihashaiguseid peeti minevikus ravimatuteks, kuna nende avastamine toimus alles lihase töövõime vähenemisega, kui patoloogiline protsess oli tekitanud lihases juba pöördumatuid muutusi. Hiljuti on leiutatud meditsiiniline seade müomeeter, mis mõõdab pehmete bioloogiliste kudede karakteristiklike parameetreid nagu koe omavõnkesagedus, elastsus ja jäikus ning mille abil on võimalik varakult tuvastada lihashaiguseid [1]. Meditsiinis kasutavate seadmete puhul on oluline nende töökorrasolek, mistõttu teostatakse regulaarset kontrolli meditsiiniseadmetele. Müomeetritele teostatakse kontrolli iga kahe aasta tagant. Käesoleva töö eesmärk on uurida, kas MYOTON 3 kiirenduskõveral esineva müra kaudu on võimalik tuvastada mehaanilisi vigasid. Antud töö on oluline, kuna seda pole varem uuritud ning käesolevat tööd võib võtta aluseks müomeetrite kontrollimise ja parandamise kasutusjuhendi loomiseks. Töös kasutatakse kahte MYOTON 3, mis ei ole olnud kommertsiaalses kasutuses ning nendega sooritatakse kuni neli mõõtmisseeriat. Saadud mõõtmisseeriast arvatud variatsioonikordaja väärtuste võrdlemisel etteantud väärtustega ja kiirenduskõvera kaudu antakse hinnang müomeetrite töökorrasolekule. Tööst selgub, et kiirenduskõveral esinevate mürade kaudu on võimalik müomeetri konstruktsioonis tuvastada mehaanilisi vigasid. Mehaaniliste vigade parandamise järel kadusid mürad kiirenduskõveral, kuid tekkisid uued probleemid. Töös kasutatud müomeetreid on vaja edasi uurida, et tuvastada vead seadmete lõplikuks kordategemiseks.

Märksõnad: müomeeter, hindamine, korrasolek, mõõtemääramatus.

Tehnikateadused T115 Meditsiinitehnika

Identification of MYOTON 3 mechanical errors by noise on acceleration graph

Abstract

In the past muscle diseases were considered untreatable because they were discovered when muscle's ability to work had already decreased. When muscle diseases were discovered then the pathological process had done irreversible changes in the muscle structure. In order to find pathological changes in early stages in the muscle there has been recently developed a medical device called MYOTON which can measure soft biological tissues characteristic parameters like muscle's frequency, elasticity and stiffness [1]. It is very important that medical devices are "in order" and ready to be used. Therefore devices must have regularly controls performed. MYOTON has its controls performed once in every two years. The purpose of this thesis is to see if it is possible to identify MYOTON 3 mechanical errors by noise on acceleration graph. This thesis is important because this method hasn't been used to locate mechanical errors on MYOTON 3. Also this thesis can be taken as a guideline of developing a guide for performing controls and repairing MYOTON 3. Two MYOTON 3 devices are used which haven't been in commercial use for years and both MYOTON's perform four testseries. Statistical parameters are calculated from testseries. In order to decide if MYOTON is ready to be used commercially then statistical parameter like coefficient of variation is compared with given relative uncertainty values and acceleration graph compared with theoretical acceleration graph. This thesis shows that it is possible to locate mechanical errors by noise on acceleration graph. Testseries done after repairing mechanical errors show that noise on acceleration graph has disappeared, but new problems have risen. MYOTONs used in this thesis need further study in order to repair them fully and use commercially.

Keywords: myometer, assessment, working order, uncertainty

Technological Sciences T115 Medical Technology

Sisukord

Kasutatud lühendid	6
Sissejuhatus	7
1. Meditsiiniline seade	8
1.1. Müomeeter ja elektromüograaf	8
1.1.1. Müomeetrile esitatavad nõuded ja konstruktsioon	9
1.1.2. Tööpõhimõte	10
1.1.3. Usaldusväärsus	11
2. Müomeetri mõõtmisvead ja eksperimendi ülesehitus	13
2.1. Müomeetri mehaanilised vead	13
2.1.1. Müomeetriliste parameetrite mõõtmise piirid	17
2.1.2. Jäikuse, sageduse ja dekremendi arvutamise põhimõte	17
2.2. Eksperimendi ülesehitus	19
2.2.1. Mõõtmise protseduur	20
3. Mõõtmistulemused	23
3.1. Müomeeter 492	23
3.1.1. Müomeeter 492 mõõtmisseeriad peale andmete korrigeerimist	24
3.2. Müomeeter 508	25
3.2.1. Müomeeter 508 mõõtmisseeriad peale andmete korrigeerimist	26
4. Analüüs ja järeldused	27
4.1. Müomeeter 492	27
4.2. Müomeeter 508	31
4.3. Järeldused	37
Kokkuvõte	38
Tänuavaldused	39
Kasutatud kirjandus	40

Lisa 1. Müomeeter 492 mõõmisseeriad enne ja pärast seadme parandamist41

Lisa 2. Müomeeter 508 mõõtmisseeriad enne ja pärast seadme parandamist.....42

Kasutatud lühendid

USB – Universal Serial Bus – universaalne järjestiksiin

SQL – Structured Query Language – struktuurpäringukeel

CSV – Comma-separated values

Sissejuhatus

Lihashaiguseid peeti minevikus ravimatuteks, kuna nende avastamine toimus alles lihase töövõime vähenemisega, kui patoloogiline protsess oli tekitanud lihases juba pöördumatuid muutusi. Lisaks puudusid laialtkasutatavad meetodid, mis on lihtsad ja odavad lihaste muutuste jälgimiseks ning patoloogiate varajaseks avastamiseks. Hiljuti on välja töötatud meditsiiniline seade – müomeeter, mis mõõdab pehmete bioloogiliste kudede karakteristiklike parameetreid nagu omavõnkesagedus, elastsus ja jäikus ning mille abil on võimalik lihashaiguseid varajaselt tuvastada [1]. Seetõttu kasutatakse müomeetrit spordimeditsiinis, taastusravis, veterinaarias ja töötervishoius, kuna saadud mõõtmistulemuste põhjal on võimalik hinnata lihaste seisundit reaalselt. [2-4]

Diagnoosimisel on oluline vältida valet diagnoosi, kuna sellega võib patsiendi seisundit halvendada. Meditsiinis kasutatavate seadmete juures on oluline nende korrasolek, mistõttu teostatakse seadmetele regulaarset kontrolli. Müomeetrite korrasoleku kontroll toimub iga kahe aasta järel. Seadmete regulaarseks kontrollimiseks ja kasutusele võtmiseks on vaja teostada kontrollmõõtmised. Kui kontrollmõõtmistel saadud parameetrite variatsioonikoeffitsendid on lubatud vea piirides ja graafikutel ei esine süstemaatilisi mürasid, on tegemist töökorras seadmega. Vastasel korral on vaja seade lahti võtta ning uurida võimalikke esinevaid mehaanilisi vigasid. [4]

Töö eesmärgiks on müomeetril MYOTON 3 väljastatud kiirenduskõveral esinevate mürade abil mehaaniliste vigade tuvastamine. Antud töö on oluline, kuna seda ei ole varem uuritud ning müomeetrite kontrollimisel ei ole välja töötatud juhendit, mille põhjal kontrollida MYOTON 3 korrasolekut, kui seadme kiirenduskõveral esineb üks või mitu müra allikat. Antud töös kirjeldatavaid müomeetri mehaanilisi vigasid võib võtta kontrolljuhendi loomise aluseks. Töös kasutatakse kahte MYOTON 3 müomeetrit, mis ei ole olnud kommertsiaalses kasutuses. Mõlema müomeetriga sooritatakse kokku neli mõõtmisseeriat.

Töö jaguneb neljaks peatükiks. Esimeses peatükis seletatakse lahti meditsiinilise seadme mõiste, müomeetri mõiste ja konstruktsioon ning tööpõhimõtte. Teises peatükis tutvustatakse MYOTON 3 konstruktsioonis olevaid võimalikke mehaanilisi vigasid, karakteristiklike parameetrite arvutamise põhimõtet, suhtelise mõõtemääramatuse piire ja mõõteprotseduuri. Kolmandas peatükis on mõõtmistest saadud tulemused enne ja pärast müomeetrite parandamist. Neljandas peatükis on saadud mõõtmistulemuste analüüs, kus antakse hinnang töös kasutatud müomeetrite korrasolekule ja tehakse olulisemad järeldused.

1. Meditsiiniline seade

Meditsiinis kasutatavad seadmed on erineva kujuga ja keerukusega. Seadmed võivad olla oma ehituselt lihtsad nagu keele allasuruja või keerulise ehitusega nagu kompuutertomograaf [5]. Rahvusvahelisel tasandil on meditsiinilise seadme definitsioon standardiseeritud. Eestis on meditsiiniseadme mõiste defineeritud seadusaktiga järgnevalt: „... *Meditsiiniseade on instrument, aparaat, seade, tarkvara, materjal või muu toode, mida kasutatakse inimese puhul eraldi või kombinatsioonis, sealhulgas tootja poolt spetsiaalselt kas diagnostilistel või ravieesmärkidel kasutamiseks ette nähtud tarkvara, ja mille kavandatud põhitõime inimesele ei ole farmakoloogiline, immunoloogiline või ainevahetuslik, kuid mida kasutatakse: haiguste diagnoosimiseks, ärahoidmiseks, jälgimiseks, ravimiseks või leevendamiseks, vigastuse või puude diagnoosimiseks, jälgimiseks, ravimiseks, leevendamiseks või kompenseerimiseks kehaehituse või füsioloogilise protsessi uurimiseks või muutmiseks või kehaosa asendamiseks rasestumise soodustamiseks või ärahoidmiseks. ...*“ [6]

Meditsiinilisi seadmeid on võimalik klassifitseerida mitut moodi. Kõige levinum on seadmeid klassifitseerida nende funktsiooni kaudu. Seadmeid jaotatakse kahte kategooriasse: diagnostilisteks seadmeteks ja ravi eesmärgil kasutatavateks seadmeteks. Diagnostilisi seadmeid kasutatakse määramaks füüsilisi märke ja haigusi või vigastust, muutmata bioloogilise süsteemi struktuuri ja funktsiooni. Tihti nimetatakse diagnostilisi seadmeid ka jälgimisseadmeteks, mille funktsioon on määrata kindlaid füsioloogilisi parameetreid kindla aja vältel. Selliste seadmete puhul ei ole nende absoluutne täpsus nii oluline kui mõõtmisprotseduuri korratavus. [5]

Raviks kasutatavad seadmed on konstrueeritud sellel eesmärgil, et nad mõjutavad struktuurset või funktsionaalset muutust, mille tulemusena paraneb patsiendi üldtalitus [5]. Selleks võib olla näiteks magnetravis kasutatav alalis- või vahelduvvooluga magnet, mis alandab organismis turset ning kiirendab luumurde paranemist.

1.1. Müomeeter ja elektromüograaf

Müomeeter on meditsiiniline diagnostika seade, mis on mõeldud pehmete bioloogiliste kudede toonuse, jäikuse ja elastsuse mõõtmiseks. Mõõtmised ei ole invasiivsed ja seadmega on võimalik mõõta inimeste ning loomade pindmiseid kudesid. Seadme kaudu mõõdetavate suuruste abil on võimalik hinnata massaaživõtete efektiivsust, füsioteraapiliste protseduuride mõju kudedele, kvantitatiivselt patoloogiliste protsesside taset, määrata elundite geneetilisi

eeldusi, jälgida kirurgiliste operatsioonide järgselt kudede toonust ja hinnata pehmete kudede seisundit teistes meditsiinivaldkondades. [1]

Elektromüograaf on seade, millega on võimalik mõõta lihaste elektrilist aktiivsust toonuse (rahuloleku seisundi) ja kontraktsiooni korral. Elektromüograaf tuvastab rakus oleva elektripotentsiaali, kui rakk on elektriliselt või neuroloogiliselt aktiivne. Tänu elektromüograafidele on võimalik leida haigusi, mis kahjustavad lihast, närvide või lihase ja närvi omavahelist ühendust. Meditsiinis kasutatakse lihaste elektrilise aktiivsuse mõõtmiseks kas nõuelektroode või pindmiseid elektroode. Esimesel juhul on tegemist invasiivse mõõtmismeetodiga ja teisel juhul mitte. Lihase elektrilist aktiivsust on väga hea mõõta nõuelektroodidega, kuna sellega välistatakse mõõdetava lihase kõrval olevate teiste lihaste elektrilise potentsiaali mõõtmist. Pindmiste elektroodidega ei ole seda võimalik välistada. [5]

Müomeeter mõõdab lihase füüsilisi parameetreid, kuid ei mõõda lihase elektrilist aktiivsust, mida mõõdab elektromüograaf ja vastupidi. Selleks, et mõista lihase talitluse üldpilti on vajalik mõõta lihast elektromüograafiga ja müomeetriga.

1.1.1. Müomeetrile esitatavad nõuded ja konstruktsioon

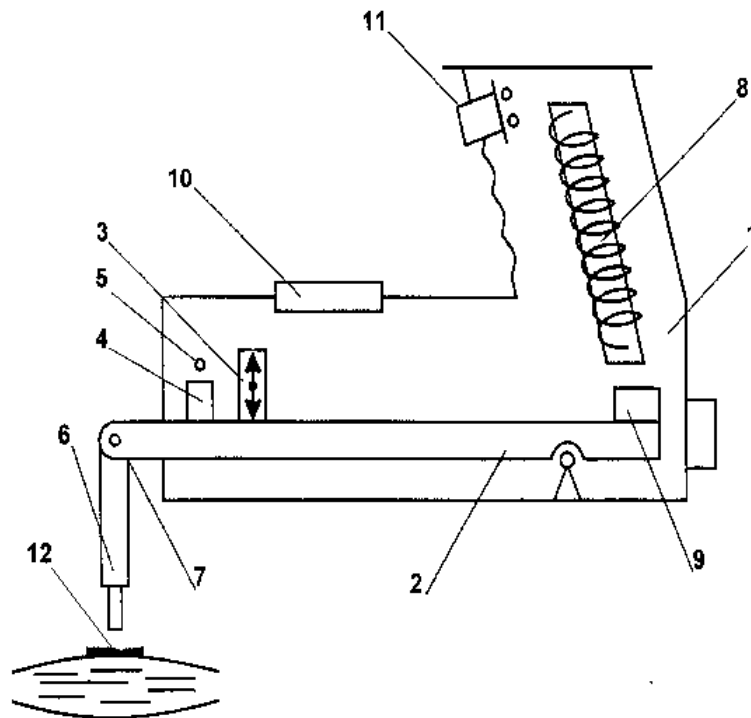
Müomeetri seadme loomisel on arvesse võetud põhimõtet, et uuritavas lihases võnkumist esilekutsuv mehaaniline löök peab olema niivõrd tugev, et löökotsiku poolt esilekutsutud võnkeprotsess kestaks vähemalt kaks täisvõnkeperioodi. Samas ei tohi mehaaniline löök olla nii tugev, et peale lööki kaotaks löökotsik kontakti naha pinnaga. Samuti ei tohi müomeetri mehaaniline löök tekitada bioloogilisele koele jääkdeformatsiooni. Vastasel korral ei vasta saadud kõver võnkuma pandud lihase omavõnkumisele. [7]

Lisaks on vajalik, et ühe lihase uuringule kuluv aeg oleks minimaalne. Järelikult ei tohi ühe mõõtmistulemuse saamiseks kuluda rohkem kui üks sekund. Samuti peab müomeetri kaal olema minimaalne, kuna mõõtja hoiab müomeetrit käes ning mõõtmisel tuleb seda erinevate mõõtepunktide vahel ümber paigutada. [7]

Löökotsiku ja kiirendusanduri mass peab olema minimaalne, et mõõtmise lähteasendis ei tekitaks löökotsiku asetus naha pinna kudedele olulist mehaanilist mõjutust. Väikene ärritus koel ei tekita mehaaniliste omaduste muutust ega reflektorseid reaktsioone, kuna ärritus on retseptorite tundlikkuse lävest väiksem. [7]

Mõõtmistulemuste jälgimiseks on testi läbiviijale oluline, et müomeetril oleks ekraan. [7]

Joonisel 1 on näidatud müomeetri konstruktsioonis olevad elemendid.



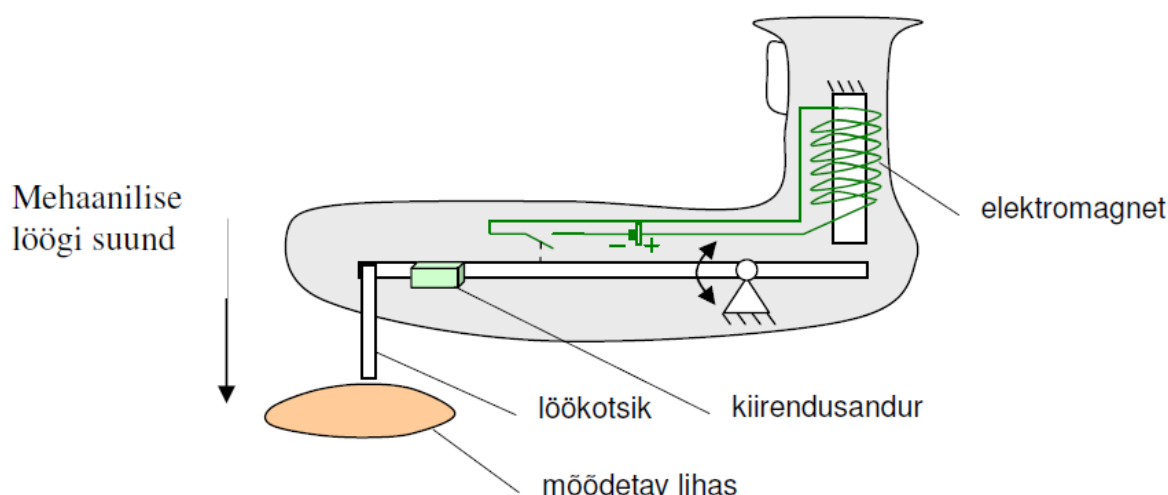
Joonis 1. Müomeetri skemaatiline konstruktsioon. Nummerdatud osad on 1. korpus, 2. kaheõlaline kang, 3. kiirendusandur, 4. asendianduri keel, 5. fotodiod ja fotoelement, 6. löökotsik, 7. liigend, 8. elektromagnet (solenoid), 9. elektromagneti raudsüdamik, 10. ekraan, 11. lüliti, 12. uuritav lihas. [7]

1.1.2. Tööpõhimõte

Müomeetri löökotsik asetatakse või kinnitatakse uuritava skeetilihase nahapinna kohale. Kui löökotsik on risti nahapinnaga ja kogu löökotsiku poolt tekitatav raskusjõud on suunatud risti tugipinnaga, siis tekib erisurve, mis tihendab lihase kohal paiknevad pehmed koed. Korpuse edasisel langetamisel ligineb müomeetrilise anduri löökotsikupoolses osas asendiandur, mis koosneb fotodiodist, fotoelemendist ja keelest, millest fotodiod ja fotoelement on kinnitatud emaplaadile, asendianduri keelele. Kui fotodiodist tuleva valguskiire levik fotoelemendile keele abil suletakse, sulgub ka vooluring ning käivitub elektromagnet (joonis 2). Selliselt on tagatud, et mõõtmisel sooritatakse löök alati elektromagneti südamikuga pooluste suhtes ühe ja sama asendi korral ning välditakse löögi tugevuse mõjutamist mõõtja poolt. Elektromagneti tööle lülitumisega tekitatakse mõne millisekundiline impulss, mis kandub kaheõlalise kangi kaudu löökotsikule, tekitades lühiajalise koedeformatsiooni [8]. Elektromagneti voolu välja

lülitamisega toimub löökotsiku kiire vabanemine ja elastse koe korral sumbuv võnkumine. Uuritava koe omavõnkumine registreeritakse kiirendusanduri abil 400 ms vältel. Kiirenduskõver salvestatakse sammuga 3200 punkti sekundis. [4][7]

Saadud kõver salvestatakse ja kõvera põhjal arvutatakse järgmised müomeetrilised parameetrid: omavõnkesagedus, mis kirjeldab lihase pingeseisundit, kustumise logaritmiline dekrement, mis kirjeldab lihase elastsust, ja dünaamiline jäikus, mis on lihase omadus avaldada vastupanu lihase kuju muutvale jõule. Tavaliselt on uuritava skeetilihase jäikus suurem kui naha ja nahaaluste kudede jäikus. Kui uuritav bioloogiline kude on ka elastne, siis müomeetri elektromagneti voolu katkestamisel tekib bioloogilise koe ja löökotsiku kustuv omavõnkumine. Mõõtmisprotsessi on võimalik korrata ühe sekundi järel. [7][8]



Joonis 2. Müomeetri konstruktsioon. [4]

Kaheõlalise kangi õlgade suhe on 1:5, mis tähendab, et müomeetri löökotsikuga esilekutsutud lokaalne deformatsioon on väike (kuni 3mm), kuna müomeetri elektromagnetiga tekitatud mehaanilise energia impulss on väike. Seega bioloogilist kudet deformeeriv jõud on väike (kuni 0,4 N) ning protseduur ei tekita uuritavale koele jääkdeformatsiooni [8].

Mõõtmisprotseduuri saab läbi viia toonilise pinge all (rahuoleku seisundis) oleval lihasel, etteantud koormuse hoidmisel ja maksimaalse tahtelise kontraktsiooni tingimustes [7].

1.1.3. Usaldusväarsus

Iga uue meditsiinilise seadme puhul on oluline selle valiidsus. Valiidsuse kaudu on võimalik kindlaks määrata täpsuse aste, mida vastav mõõteseadeldis peab mõõtma või mida ta

mõõtmisel väljastab. Selleks, et uut seadet lugeda usaldusväärseks, peavad uue seadmega saadud tulemused olema kooskõlas mõne teise meetodi abil saadud tulemustega. Mida paremini on nad omavahel kooskõlas, seda kõrgema valiidsusega on tegu. [9]

Uue seadmega sooritatud skeletilihaste jäikuse uuringu [10] põhjal võib öelda, et müomeeter on usaldusväärne seadeldis mõõtmaks lõdvestatud lihase dünaamilist jäikust. Lisaks tuleb uuringust [10] välja, et jõu ja lihase pikkuse suurendamisel muutub viskoelastne jäikus, mis viitab sellele, et mõõtmised on ka valiidsed. [10]

Võrreldes elektromüograafi mõõteseadme tulemusi müomeetri mõõtmistulemustega, on mõlema seadme tulemused korreleeruvad. Sellega jõutakse järelduseni, et müomeetri mõõtmistulemused on usaldusväärsed. [3]

2. Müomeetri mõõtmisvead ja eksperimendi ülesehitus

Füüsikalisi suurusi on võimalik mõõta teatud täpsusega, kuna mõõtmisel kasutatavad mõõteriistad ei ole absoluutselt täpsed. Mõõtmise veaks nimetatakse mõõtmistulemuse ja mõõdetava suuruse tegeliku väärtuse vahet. Kuna mõõdetava suuruse tegelikku väärtust ei ole võimalik määrata, siis on sobilikum rääkida mõõtemääramatusest.

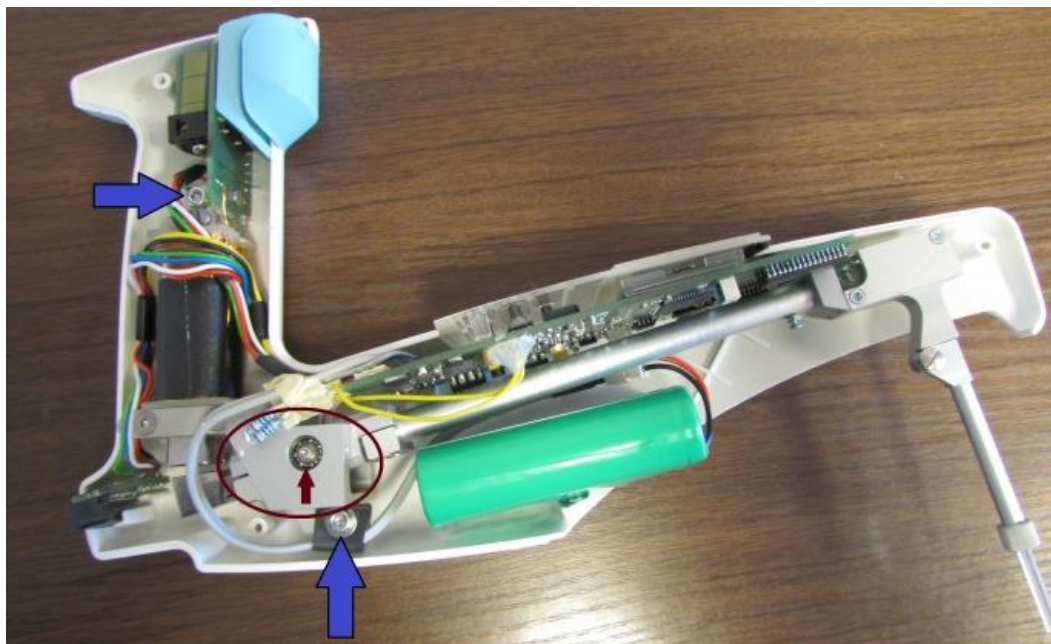
Vead jaotatakse omakorda kaheks: juhuslik viga ja süstemaatiline viga. Juhuslik viga ei ole järjepidev, ei kordu samasuguse amplituudiga või suunaga väljaarvatud oma juhuslikkusega. Juhusliku vea allikateks on välised tegurid, mõõtja kogemus või füüsikalise suuruse enda muutlikkus mõõtmisel. Mõõtmiste erinevused ei pruugi olla suured, kuid need on alati olemas. [11]

Süstemaatiline viga on viga, millel on järjepidev efekt. Süstemaatilist viga saab liigitada järgnevalt: viga, mille põhjus on teada ning suurusi on võimalik määrata; viga, mille põhjus on teada, kuid suurus mitte; viga mille olemasolu ei ole teada. Näiteks on teada, et kaal, millega mõõdetakse inimese massi, näitab mõõtmistel pidevalt inimese massiks 3 kilogrammi rohkem kui on tema tegelik mass. Süstemaatilisi vigasid on võimalik mõõtmisseadmetelt kõrvaldada kui on teada, mis selle vea põhjustab. [11]

Juhuslikud vead võivad vähendada mõõtmistulemuste ja teiste muutujate omavahelist korrelatsiooni, kuid süstemaatiline viga võib kahe muutuja vahelist korrelatsiooni nii suurendada kui ka vähendada [11].

2.1. Müomeetri mehaanilised vead

Müomeetril võivad esineda järgnevad mehaanilised vead: mõõteseadet plastikust korpuse külge fikseerivad kruvid on aja möödudes lõtvunud (joonis 3), löökotsikusse minevad juhtmed on liiga lühikesed, elektromagnetis olev raudsüdamik ei paikne elektromagneti pooluste suhtes sümmeetriliselt (joonis 4), kiirendusandur liigub oma pesas, kiirendusanduri sõlme ja kangi vahel on tekkinud lõtk (joonis 5), kaheõlalise kangi kuullaagrite ja ajami korpuse vahel on lõtk (joonis 3).

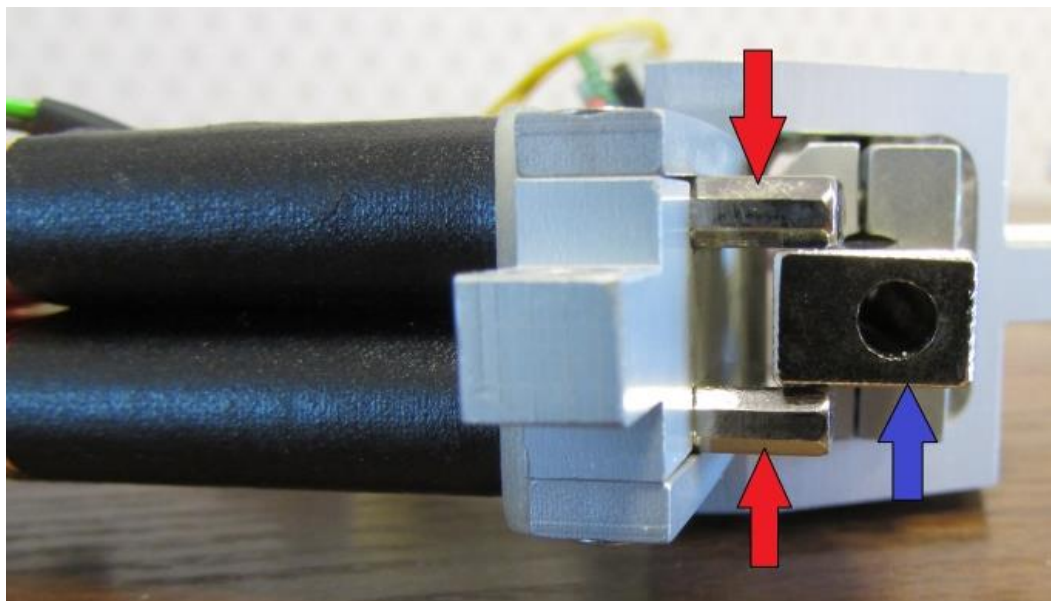


***Joonis 3.** Müomeetri konstruktsioon. Siniste nooltega on tähistatud mõõteseadet plastikust korpuse külge fikseerivad kruvid. Punase ringiga on tähistatud kaheõlalise kangi ja ajami korpuse vahelise lõtku kohta. Punase noolega on tähistatud kruvi, millega on võimalik ajami korpuse ja kangi vahelist lõtku eemaldada. Kui kruvi on kinni keeratud lõdvalt, tekib ajami korpuse ja kangi vahele lõtk.*

Müomeetri sisemised komponendid on paigaldatud plastikust korpusesse (joonis 3). Kinnituskruvide lõtvumine võib olla aja jooksul tekkinud korpuse deformatsiooni tulemus või olla ka liialt tugevasti keeratud kruvide ülepinge tulemus.

Kaheõlalise kangi kuullaagrite ja ajami korpuse vahelist lõtku on võimalik tuvastada võttes kangi ühest otsast kinni ning seda paremale ja vasakule nihutades on võimalik tunda liikumist (joonis 3). Kiirenduskõveral avaldub lõtku olemasolu ainult juhul, kui suure lõtkuga toimuva löögi ajal liigub elektromagneti raudsüdamik vastu elektromagneti poolust.

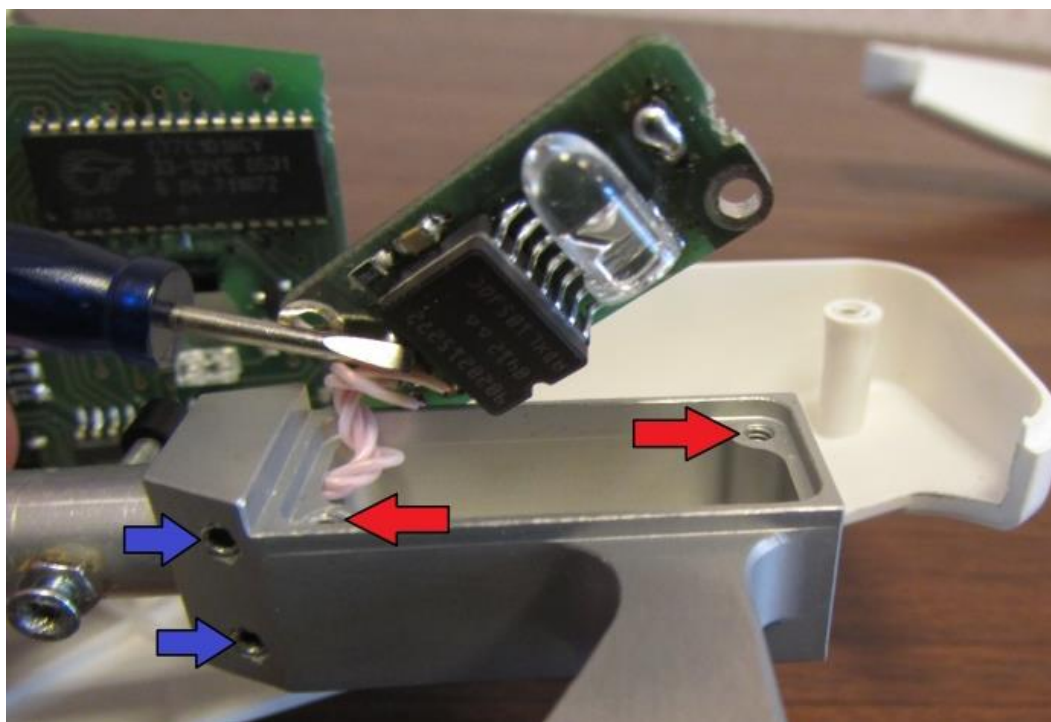
Samuti mõjutab löökotsiku kangi liikumist seadmes paiknevate juhtmete pikkus. Kui löökotsikult emaplaadile minevad juhtmed on liiga pikad või lühikesed, deformeeruvad need katsete sooritamise ajal ja tekitavad täiendavat hõõrdumist. See mõjutab löökotsiku liikumist ja kiirendusandur registreerib väikesed muutused. Graafikul esinevad sellised muutused mürana.



Joonis 4. Raudsüdamiku (sinine nool) paiknemine elektromagneti pooluste vahel (punased nooled). Raudsüdamik peab pooluste vahel vasakule-paremale vabalt liikuma ehk raudsüdamiku ja mõlema pooluse vahele peab vabalt vahele minema 0,1 mm paksune kaliiberleht.

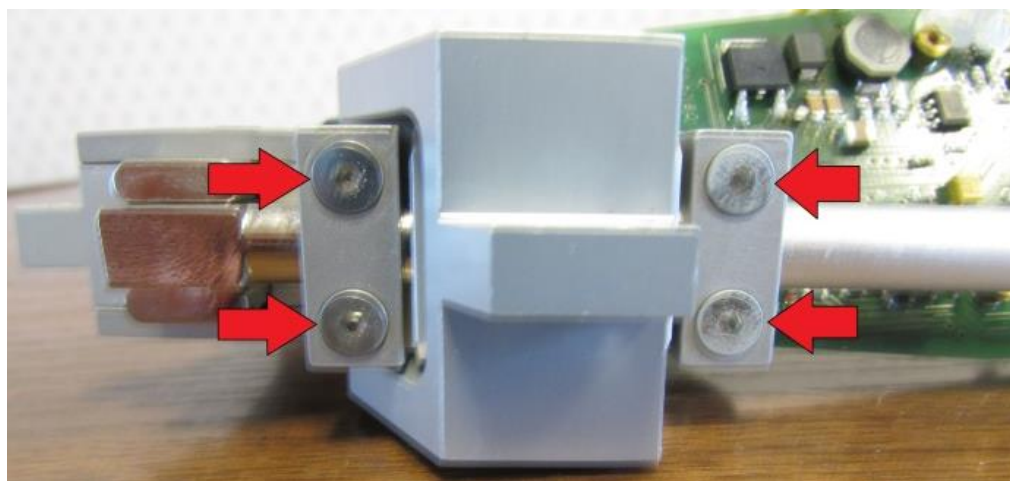
Elektromagnetis oleva raudsüdamiku sümmeetrilisust kontrollitakse lehtkaliibri abil, mille 0,1 millimeetri paksune leht paigutatakse elektromagneti pooluste ja kaheõlalisel kangil paikneva raudsüdamiku vahele (joonis 4). Kui mõlemale poole raudsüdamikku on võimalik asetada 0,1 millimeetri paksune kaliiberleht, on raudsüdamik elektromagneti suhtes sümmeetriline. Sümmeetrilisuse kalibreerimisel reguleeritakse kaheõlalist kangi kinni hoidvaid kuullaagrite kruve. Samas ei tohi kuullaagreid kinnihoidvaid kruve keerata kinni liiga kõvasti, kuna siis ei liigu kaheõlaline kang vabalt (joonis 3).

Kiirendusandurit hoiavad tema pesas kaks kruvi (joonis 5), kuid mõnedel vanematel mudelitel on andur kinnitatud ainult ühe kruvi ja liimiga. Mõõteseadme liigse pörutamise tulemusena võib kiirendusandur oma pesas liikuma hakata, mis registreeritakse graafikul mürana.



Joonis 5. Kiirendusanduri pesa. Kiirendusandur on kinnitatud oma pesasse kahe kruviga (punased nooled). Kiirendusanduri sõlme hoiab kinni 2 tihvtkrugi (sinised nooled).

Kaheõlalise kangi ühte otsa on kinnitatud kiirendusanduri sõlm kahe 1,3 mm läbimõõduga tihvtkruviga (joonis 5). Kangil on ümmargune ristlõige, kuhu ei ole puuritud kruvidele auke. Kangi otsast suruvad kruvid sõlme vastu kangi kahelt küljelt kangi vertikaaltelje suhtes ligikaudu 30 kraadise nurga all. Kruvide liigse pingutamise deformeerub kangi ots, mis surub kiirendusanduri sõlme kangi otsale lähemale. See tekitab kiirendusanduri ja kangi vahele lõtku. Samuti võivad aja jooksul lõtvuda kangi stabiilsena hoidvad kruvid, mida on näha joonisel 6.



Joonis 6. Kaheteljelist kangi kinnihoidvad kruvid (punased nooled).

2.1.1. Müomeetriliste parameetrite mõõtmise piirid

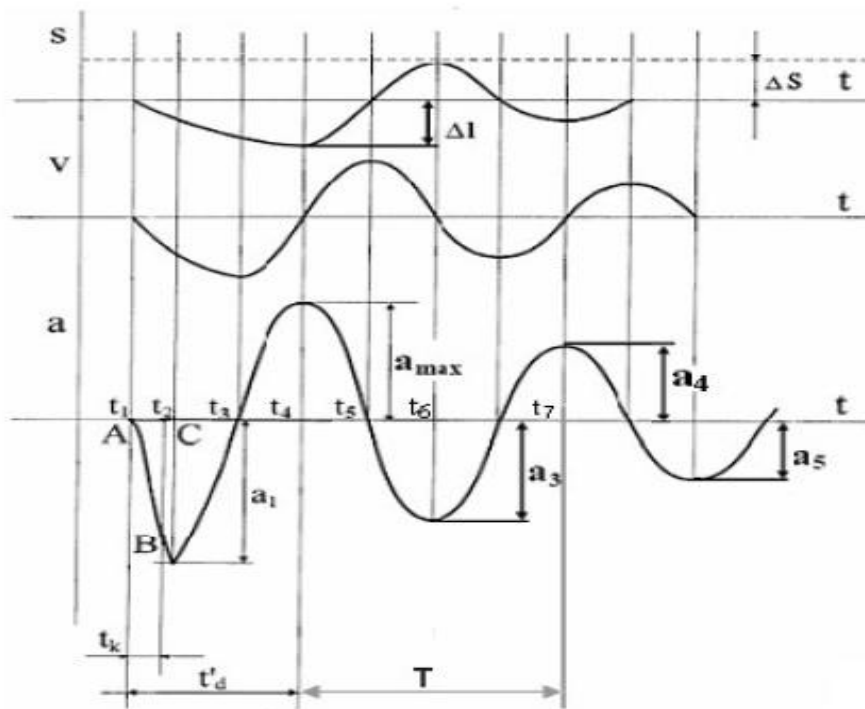
Müomeetril on seatud mõõtmistulemuste piirid, mis on sagedusel 8,00 – 50,00 Hz, dekremendil 0,300 – 3,000 ja jäikusel 100,0 – 1500,0 N/m. Mõõteseadme saab lugeda töökorras olevaks, kui uuritava objekti sageduse ja jäikuse maksimaalne suhteline mõõtemääramatus on 1% + 4%, kus 1% on mõõteseadme suhteline määramatus ja 4% on hästitreenitud operaatori poolt tekitatud subjektiivne suhteline määramatus ning sumbuvuse maksimaalne suhteline mõõtemääramatus on 2% + 8%, kus 2% on mõõteseadme suhteline määramatus ja 8% on hästitreenitud operaatori poolt tekitatud subjektiivne suhteline määramatus. [4]

Mõõteseadme kalibreerimisel jälgitakse, et 10 millisekundilise löögiimpulsi korral ei ületa kiirenduse maksimaalne väärtus 2,2 g (raskuskiirendus). Suurema kiirenduse korral võib löökotsiku ja kontraheerunud lihase omavaheline kontakt kaduda ning saadud kiirenduskõver ei vasta enam lihase omavõnkumisele.

Müomeetri asetamine katsestendile välistab mõõtja poolt tekitatava subjektiivse suhtelise määramatuse tekke. Samuti minimeeritakse sellega juhuslike vigade teke.

2.1.2. Jäikuse, sageduse ja dekremendi arvutamise põhimõte

Müomeetri löökotsikul asuva kiirendusanduri abil on võimalik registreerida uuritava lihase deformeerumise iseloomu ehk karakteristikat. Kui löökotsik on uuritava lihase kõige rohkem kokku surunud, vastab sellele kiirendus a_{max} , mis iseloomustab uuritava lihase pidurdusjõudu tema deformeerimisel Δl võrra. Lihase jäikuse annab $a_{max}/\Delta l$ suhe (joonis 7). Võnkumise kustumise kiirust ehk logaritmilist dekrementi on võimalik arvutada mehaaniliste võnkumiste teooria abil. [4]



Joonis 7. Sumbuva võnkumise nihke (s), kiiruse (v) ja kiirenduse (a) graafikud. [4]

Joonisel 7 on ajavahemikus t_1 kuni t_4 surutud löökotsik lihasesse. Sellele järgneb löökotsiku ja mõjutatud lihase vabavõnkumine. Ajahetkel t_5 saavutab löökotsik maksimaalse kiiruse, kui ta on lihast väljunud. Sellel ajahetkel on lihasel kuju taastamise kiirus maksimaalne. Ajahetkel t_6 on löökotsik ülemises asendis ja tema kiirus on 0. Edasi toimub löökotsiku poolt raskusjõu mõjul uuritava lihase uus deformeerimine ja antud tsükkel kordub kuni täieliku kustumiseni. [7]

Saadud kiirenduskõvera abil on võimalik mõõta võnkunud lihase omavõnkesagedus F . Dekrementi arvutatakse kahe kõrvalpiigi a_{max} ja a_4 abil. Jäikust arvutatakse, kui ajavahemikus 0 kuni t'_d integreeritakse kõvera alla jäävat osa kaks korda. [4]

Sagedust arvutatakse järgneval kujul

$$F = \frac{1}{t_7 - t_4} = \frac{1}{T}. \quad (1)$$

Dekrement arvutatakse

$$D = \ln\left(\frac{a_{max}}{a_4}\right). \quad (2)$$

Jäikus arvutatakse järgnevalt

$$S = \frac{a_{max} * m}{dL}, \quad (3)$$

kus m on löökotsiku mass ja dL on ajavahemikus 0 kuni t'_d läbitud teepikkus. Parameeter dL arvutatakse järgnevalt

$$dL = \sum_0^{t'_d} \left[\sum_0^{t'_d} \left(\frac{a_{max} * yG}{y_{max}} * 9,81 - nulljoon \right) * \frac{yG}{y_{max}} * 9,81 * 0,0003125^2 \right], \quad (4)$$

kus yG on signaalil olev jaotuste arv, mis vastab ühele Maa raskuskiirendusele, y_{max} on maksimaalne kiirendus suhtelistes ühikutes ja *nulljoon* on ajami töölepanemisel enne ajahetke t_l võetud paarikümne punkti põhjal määratud joon, mis tähistab kiirenduse väärtust 0.

2.2. Eksperimendi ülesehitus

Käesolevas töös uuritakse mõõtmisseadmest saadud signaalide korrapäratust ja karakteristikke parameetreid. Kui karakteristikke parameetrite statistilised väärtused ei lange kokku peatükis 2.1.1 etteantud suhtelise mõõtemääramatuse piiridega, sobitatakse saadud mõõtmistulemusi normaaljaotusega, et veenduda, kas saadud mõõtmistulemuste hulgas on eksed ning need seejärel eemaldada. Kõige suuremat tähelepanu pööratakse jäikuse leidmisele, kuna valemist 3 ja 4 on näha, et jäikuse arv väärtus saadakse kahekordse integreerimise teel. See muudab antud parameetri väga tundlikuks väikeste mürade osas, kuna integreerimisel silutakse müra kõrvalt, mis omakorda suurendab valemiga 4 arvutatud löökotsiku teepikkust. Töökorras seadmel tuleb mõõtmistest saadud jäikuse histogramm väga sarnane normaaljaotusega.

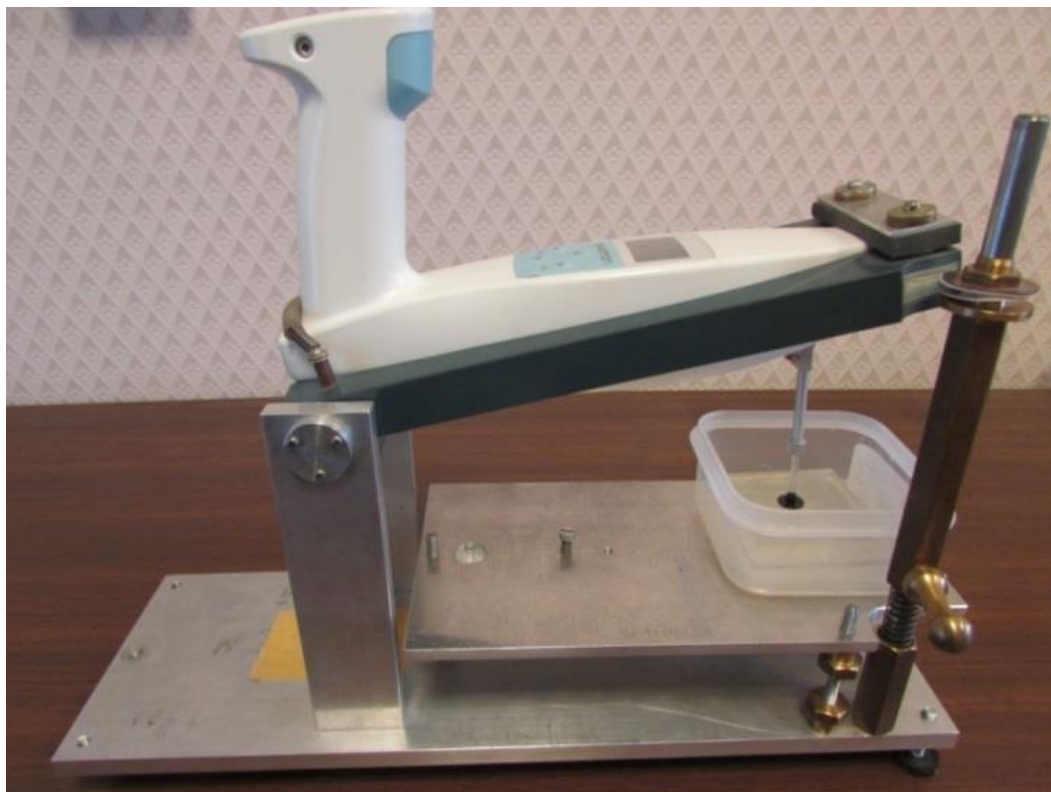
Kui mõõtmiste käigus esineb kiirenduskõveral korrapäratusi, võetakse müomeeter lahti ja uuritakse punktis 2.1 kirjeldatud võimalikke mehaanilisi vigasid. Mehaaniliste vigade parandamise järel sooritatakse uued mõõtmisseeriad. Saadud tulemustest veendutakse, kas müomeetrite kiirenduskõveral on korrapäratused kadunud ja hinnatakse seadmete töökorrasolekut. Mõõtmised on teostatud kahe erineva müomeetriga. Mõlema seadmega sooritatakse neli mõõtmisseeriat. Kaks esimest seeriat sooritatakse koheselt, kui mõõteseadmed ei ole olnud aastaid kasutuses ja kaks teist seeriat on teostatud seadme parandamise järel. Katsed on teostatud geeli laadsel ultrahelidiagnostikas kasutatavast materjalist SonarAid – Geistlich Pharma AG valmistatud testkehal. Katsete sooritamist SonaAid materjalil tingis ka asjaolu, et hetkel on probleeme leidmaks mõnda teist analoogset

sobilikku materjali, mille karakteristikad sarnanevad lihaste karakteristikatega ja mille peal müomeetriga katseid sooritada. Lisaks on SonarAidi kasutusjuhendis kirjas, et geel säilitab deklareeritud karakteristikad kaks aastat. Antud töö juures ei ole oluline võrrelda saadud tulemusi geeli karakteristikaga, vaid on oluline võrrelda saadud tulemusi omavahel.

2.2.1. Mõõtmise protseduur

Müomeeter fikseeritakse katsestendil kindlasse asendisse, nagu on näidatud joonisel 8. Sellega tagatakse, et mõõtjast tingitud juhuslikud korrapäratud on kiirenduskõveral minimaalsed. Seejärel ühendatakse müomeeter USB pordi kaudu arvutiga, lülitatakse müomeeter sisse ja avatakse programm Myoton. Programmi Myoton abil luuakse *multiscan* mõõtmisprotseduur, mis laetakse müomeetrile. Löökotsiku mass on 18 grammi ja ühe löögiimpulsi pikkuseks on valitud 10 ms. Ühes mõõtmisseerias on 20 mõõtmist. Enne mõõtmisi kinnitatakse löökotsiku otsa 12 mm läbimõõduga ringikujuline vahetükk, et mõõtmisseeriade sooritamisel ei tekiks katsekehale jäädavast deformatsiooni. Samuti jälgitakse, et löökotsik asetseks testkeha keskel. Lisaks veendutakse, et müomeetri aku pinge on vähemalt 3,8 V. Madalama pinge korral võivad peale mehaanilistele vigadele hakata esinema ka elektrilised vead. Näiteks müomeetri elektriskeemis olev kondensaator ei lae ennast piisavalt täis.

Mõõtmisprotseduuri alustamiseks vajutatakse müomeetri mõõteseadme lülitile 11 (joonis 1). Seadme ekraani esimesel real on näha mida mõõdetakse, teisel real on näha kas mõõdetakse lõtva lihast (R) või kontraheerunud lihast (C). Kolmandal ning neljandal real on näha mõõtmise järjekorranumbrit ja löögiimpulsi kestvust. Kuna müomeeter on fikseeritud katsestendile ja katsekeha on paigas, siis viiakse löökotsik sujuva liigutusega katseobjektile, kuni asendianduri keel 4 katab fotodiodi 5 eest valgusdiodilt tuleva kiire (joonis 1). Sellel hetkel sulgub vooluring ning 10 millisekundiks lülitub sisse elektromagnet 8, mis tõmbab jõuga F üles kaheõlalise kangi paremat õlga. Samaaegselt surutakse löökotsik 6 testkehasse jõuga $F/5$, mis peale 10 millisekundit vabastatakse. Sellele järgneb vabavõnkumine, mis registreeritakse 0,4 sekundi jooksul. [7]



Joonis 8. Müomeeter on asetatud katsestendi. Löökotsiku otsas on 12 mm läbimõõduga ringikujuline vahetükk. Katsekehaks on SonarAidi materjalist testkeha.

Mõõtmisseeriade sooritamise järel ühendatakse müomeeter USB kaudu uuesti arvutiga. Programmis Myoton vajutatakse *download* ning mõõtmistulemused laetakse SQL andmebaasi. Seejärel valitakse soovitud mõõtmised ning salvestatakse *.csv* failina.

Saadud mõõtmistulemuste andmed on töödeldud programmis MS Excel 2010 olevate funktsioonide abil. Samuti on võimalik arvutada vajalikud statistilised parameetrid programmis Myoton, kuid need arvutatakse nii, et mõõtmistest eemaldatakse alati kõige suurema ja kõige väiksema väärtusega tulemused.

Andmetöötluses võrreldakse erinevate mõõtmisseeriade vahel sageduse, logaritmilise dekremendi ja jäikuse statistilisi parameetreid. Võrreldakse aritmeetilist keskmist, mediaani, standardhälvet, variatsioonikordajat ja standardmääramatust. Variatsioonikordaja leitakse standardhälbe ja aritmeetilise keskmise suhtena. Käesolevas töös peegeldab standardmääramatus müomeetri korrasoleku määra. Kui standardmääramatused on väikesed, on müomeeter tehniliselt korras, suure arvvaartuse korral võib seadmes esineda rikkeid.

Normaaljaotust uuritakse histogrammi abil, mis kuvab mõõtmistulemused ja nende esinemissagedused tulpdiagrammina. Eksedeks loetakse kõik väärtused, mis erinevad aritmeetilisest keskmisest rohkem kui kaks standardhälvet.

3. Mõõtmistulemused

3.1. Müomeeter 492

Mõõtmised on sooritatud eelmises peatükis kirjeldatu põhjal. Mõõtmisseeriast saadud karakteristikud on välja toodud lisa 1. Tabelites 1 ja 2 on vastavate mõõtmisseeriaste karakteristiklikest parameetritest arvatud statistilised parameetrid.

Tabel 1. Esimese ja teise mõõtmisseeria statistiliste parameetrite tulemused.

Esimese mõõtmisseeria tulemused			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	16,97	0,46	268,75
Mediaan	17,00	0,46	265,50
Standardhälve	0,18	0,03	11,14
Variatsioonikordaja (%)	1,05	5,52	4,14
Standardmääramatus	0,04	0,01	2,49
Teise mõõtmisseeria tulemused			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	16,88	0,45	272,50
Mediaan	16,80	0,45	272,00
Standardhälve	0,16	0,02	12,80
Variatsioonikordaja (%)	0,97	4,58	4,70
Standardmääramatus	0,04	0,00	2,86

Tabel 2. Kolmanda ja neljanda mõõtmisseeria statistiliste parameetrite tulemused.

Kolmanda mõõtmisseeria tulemused			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	14,52	0,58	272,20
Mediaan	14,50	0,58	271,00
Standardhälve	0,06	0,01	5,42
Variatsioonikordaja (%)	0,40	1,68	1,99
Standardmääramatus	0,01	0,00	1,21
Neljanda mõõtmisseeria tulemused			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	14,50	0,59	277,25
Mediaan	14,50	0,59	273,00
Standardhälve	0,03	0,01	10,07
Variatsioonikordaja (%)	0,22	1,02	3,63
Standardmääramatus	0,01	0,01	2,25

3.1.1. Müomeeter 492 mõõtmisseeriad peale andmete korrigeerimist

Lisas 1 olevad andmed korrigeeritakse eksedest. Tabelites 3 ja 4 on korrigeeritud andmetega välja arvatud uued statistilised parameetrid.

Tabel 3. Korrigeeritud mõõtmisseeriade statistiliste parameetrite väärtused enne seadme parandamist.

Esimese seeria tulemused peale andmete korrigeerimist			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	16,95	0,46	266,61
Mediaan	17,00	0,46	265,00
Standardhälve	0,15	0,02	8,86
Variatsioonikordaja (%)	0,91	4,98	3,32
Standardmääramatus	0,04	0,01	2,09
Teise seeria tulemused peale andmete korrigeerimist			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	16,90	0,45	271,89
Mediaan	16,85	0,45	272,00
Standardhälve	0,16	0,02	10,81
Variatsioonikordaja (%)	0,93	4,06	3,98
Standardmääramatus	0,04	0,00	2,55

Tabel 4. Korrigeeritud mõõtmisseeriade statistiliste parameetrite väärtused peale seadme parandamist.

Kolmanda seeria tulemused peale andmete korrigeerimist			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	14,51	0,58	271,33
Mediaan	14,50	0,58	271,00
Standardhälve	0,04	0,01	2,81
Variatsioonikoefitsent (%)	0,29	1,55	1,03
Standardmääramatus	0,01	0,00	0,66
Neljanda seeria tulemused peale andmete korrigeerimist			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	14,49	0,59	277,74
Mediaan	14,50	0,59	273,00
Standardhälve	0,02	0,01	10,10
Variatsioonikoefitsent (%)	0,16	1,02	3,64
Standardmääramatus	0,01	0,00	2,32

3.2. Müomeeter 508

Mõõtmised on teostatud samades tingimuses, mis on kirjeldatud peatükkides 2.2 ja 2.2.1. Müomeetriga 508 mõõdetud karakteristiklikud parameetrid on lisas 2. Tabelis 5 on mõõtmisseeriade karakteristiklike parameetrite statistilised parameetrid enne seadme parandamist. Tabelis 6 on mõõtmisseeriade karakteristiklike parameetrite statistilised parameetrid peale seadme parandamist.

Tabel 5. Esimese ja teise mõõtmisseeria statistiliste parameetrite tulemused.

Esimese mõõtmisseeria tulemused			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	16,45	0,47	287,45
Mediaan	16,45	0,47	287,50
Standardhälve	0,07	0,01	2,95
Variatsioonikordaja (%)	0,43	1,45	1,03
Standardmääramatus	0,02	0,00	0,66
Teise mõõtmisseeria tulemused			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	16,54	0,46	287,80
Mediaan	16,50	0,46	290,00
Standardhälve	0,07	0,01	5,83
Variatsioonikordaja (%)	0,45	3,11	2,02
Standardmääramatus	0,02	0,00	1,30

Tabel 6. Kolmanda ja neljanda mõõtmisseeria statistiliste parameetrite tulemused.

Kolmanda mõõtmisseeria tulemused			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	14,33	0,49	265,05
Mediaan	14,3	0,5	262,50
Standardhälve	0,04	0,01	6,61
Variatsioonikordaja (%)	0,31	2,27	2,50
Standardmääramatus	0,01	0,00	1,56
Neljanda mõõtmisseeria tulemused			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	14,35	0,48	263,65
Mediaan	14,30	0,48	260,50
Standardhälve	0,06	0,01	7,89
Variatsioonikordaja (%)	0,42	1,44	2,99
Standardmääramatus	0,01	0,00	1,76

3.2.1. Müomeeter 508 mõõtmisseeriad peale andmete korrigeerimist

Lisas 2 olevad andmed korrigeeritakse eksesest. Korrigeeritud andmetest on vastavate mõõtmisseeriade statistiliste parameetrite tulemused esitatud tabelites 7 ja 8.

Tabel 7. Korrigeeritud mõõtmisseeriade statistiliste parameetrite väärtused enne parandamist.

Esimese seeria tulemused peale andmete korrigeerimist			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	16,45	0,47	287,45
Mediaan	16,45	0,47	287,50
Standardhälve	0,07	0,01	2,95
Variatsioonikordaja (%)	0,43	1,45	1,03
Standardmääramatus	0,02	0,00	0,66
Teise seeria tulemused peale andmete korrigeerimist			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	16,53	0,46	289,39
Mediaan	16,50	0,46	290,00
Standardhälve	0,07	0,01	3,31
Variatsioonikordaja (%)	0,40	3,23	1,14
Standardmääramatus	0,02	0,00	0,78

Tabel 8. Korrigeeritud mõõtmisseeriade statistiliste parameetrite väärtused peale parandamist.

Kolmanda seeria tulemused peale andmete korrigeerimist			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	14,33	0,49	263,61
Mediaan	14,30	0,50	262,00
Standardhälve	0,05	0,01	5,18
Variatsioonikordaja (%)	0,32	2,10	1,97
Standardmääramatus	0,01	0,00	1,22
Neljanda seeria tulemused peale andmete korrigeerimist			
	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
Keskmine	14,35	0,48	263,29
Mediaan	14,30	0,48	261,00
Standardhälve	0,06	0,00	6,87
Variatsioonikordaja (%)	0,44	0,92	2,61
Standardmääramatus	0,02	0,00	1,67

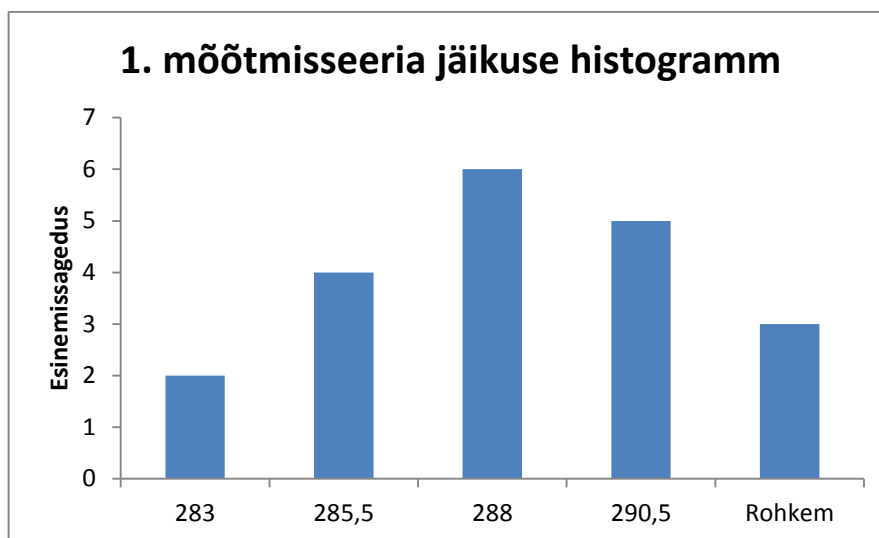
4. Analüüs ja järeldused

Müomeetrite kontrollimise eesmärgiks on välja selgitada, kas kontrollitava seadme parameetrite variatsioonikordajate väärtused vastavad peatükis 2.1.1 esitatud nõuetele. Kui mõõtmisseeriast arvatud variatsioonikordajad ei vasta etteantud nõuetele, tuleb hakata müomeetrit parandama ja kalibreerima.

Mõlemad uuritavad müomeetrid ei ole olnud kasutuses pikemat aega, mistõttu nende kasutusele võtmiseks on vajalik kontrolli teostamine. Selle tulemusena saadakse objektiivne hinnang seadmete töökorrasolekust. Peatükis 3 saadud mõõtmistulemuste põhjal on võimalik hinnata, kas mõõtmisseade vajab kalibreerimist ja parandamist või on töökorras. Müomeetrite töökorrasolekut hinnatakse eelkõige variatsioonikordaja kaudu, mida on seletatud peatükis 2.2.1. Saadud väärtuseid võrreldakse etteantud suhtelise mõõtemääramatuse piiridega, mis on toodud peatükis 2.1.1.

4.1. Müomeeter 492

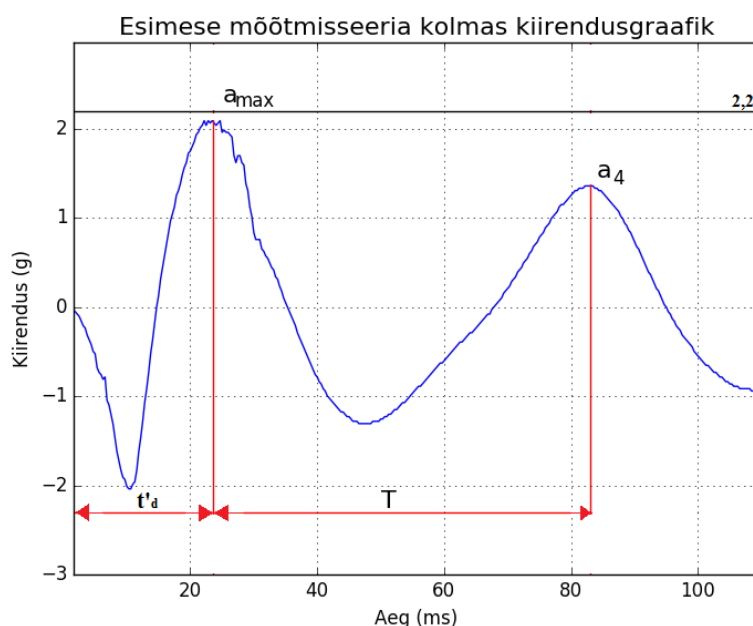
Müomeetriga 492 teostatud mõõtmisseeriast arvatud statistilised parameetrid on välja toodud peatükis 3.1 ja selle alapeatükis 3.1.1. Tabelites 1 ja 3 on mõõtmisseeriad enne müomeetri lahtivõtmist ning tabelites 2 ja 4 on mõõtmisseeriad peale müomeetri parandamist. Peatükis 3.1 olevate tabelite 1 ja 2 põhjal on näha, et seadme parandamise järel on sageduse ja dekremendi variatsioonikordajad nihkunud suhtelise mõõtemääramatuse lubatud piiridesse. Seevastu jäikuse variatsioonikordaja väärtused on endiselt suuremad kui lubatud. Histogrammiga on visualiseeritud erinevate mõõtmisseeriaste jäikuste jaotused. Saadud jäikuste jaotuste võrdlemisel joonisel 9 oleva normaaljaotusega selgub, et esimesel kahel seerial on tegemist asümmeetrilise normaaljaotusega. Teisel kahel mõõtmisseerial tekivad jaotustele kõrvalmaksimumid jaotuste ülemisele piirile ning tegemist ei ole normaaljaotusega. Saadud mõõtmisseeriad korrigeeritakse ekseedest ning uued statistiliste parameetrite arvutuste tulemused on toodud peatükis 3.1.1.



Joonis 9. Müomeeter 508 esimese mõõtmisseeria jäikuse histogramm.

Võrreldes müomeetri 492 statistiliste parameetrite täpsust, eelkõige variatsioonikordaja kaudu, peatükis 2.1.1 ja peatükis 3.1.1 tabeli 3 abil jõutakse järeldusele, et seade ei vasta etteantud nõudmistele, mis klassifitseeriks müomeetrit töökorras olevaks. Tabelis 3 on sageduse variatsioonikordaja etteantud suhtelise mõõtemääramatuse piirides, kuid dekremendi ja jäikuse variatsioonikordajad on märkimisväärselt suuremad kui punktis 2.1.1 etteantud piirid.

Peatükis 3.1.1 olevate karakteristiklike parameetrite arvutusvalemite analüüsimiseks on võetud illustratsiooniks esimesest kahest mõõtmisseeriast üks kiirenduskõver. Samuti uuritakse kiirenduskõveraid ja veendutakse, et mõõtmisest saadud kõverad oleksid samasuguse kujuga nagu joonisel 7 esitatud kiirenduskõver. Kõigi katsete kiirenduskõverad mõlemas mõõtmisseerias on sarnase kujuga nagu joonisel 10 kujutatud kiirenduskõver. Joonisel 10 on välja toodud müomeetri 492 karakteristiklike parameetrite arvutamiseks vajalikud muutujad ja maksimaalne lubatud kiirenduse väärtus. Muutujate tähistused on ära seletatud peatükis 2.1.2. Joonisel 10 ajahetkel 25 millisekundit, kui löökotsik on kõige sügavamal testkehas, esineb kiirendusgraafikul palju müra. Samas on näha, et löögitugevuse kiirendus jääb lubatud maksimaalse kiirenduse väärtuse piiresse, milleks loetakse 2,2 g.



Joonis 10. Müomeeter 492 esimese mõõtmisseries kolmas kiirenduskõver.

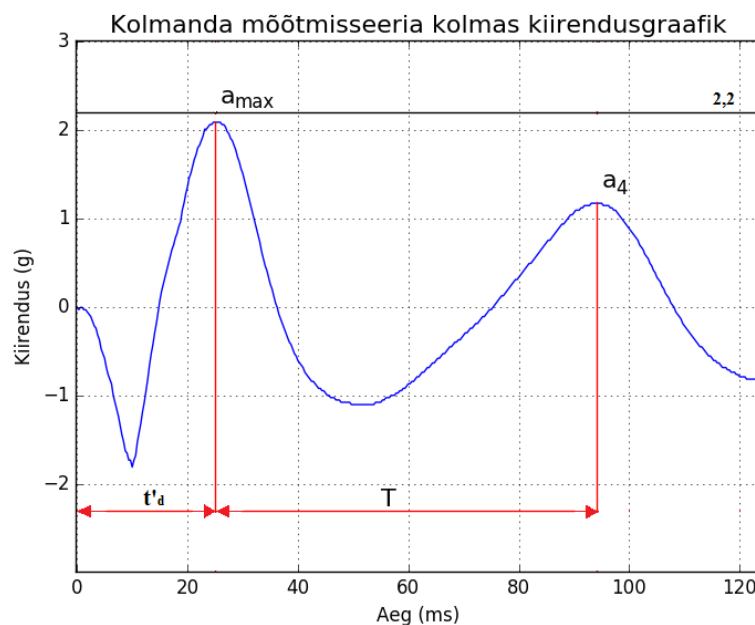
Tabelis 3 on sageduse variatsioonikordaja väärtused väikesed ja peatükis 2.1.1 esitatud mõõtmisvea piiridega lubatud vahemikus, kuna sageduse standardhälve on väike. Samuti näeb jooniselt 10, et sageduse väärtused arvutatakse peale esimest poolperioodi. Peale esimese poolperioodi esimest kolmandikku kiirendusgraafikul müra ei esine.

Kuna tabelis 3 on dekremendi väärtused väga lähedal peatükis 2.1.1 toodud alumisele mõõtmispiirile, siis muutused on väga suured. Tabelis 3 olevad dekremendi variatsioonikordajad on peatükis 2.1.1 toodud suhtelisest mõõtemääramatuse väärtustest suuremad. Dekremendi väärtused kõiguvad seetõttu, et valemis 2 määratakse a_{max} , mis on ebatäpne, kui kiirendusgraafikul esineb mürasid sellel ajahetkel, kui löökotsik on kõige sügavamal testkehas.

Põhjus, miks tabelis 3 on jääkuse variatsioonikordajad suuremad, on selles, et ajahetkeni t'_d on kiirenduskõver väga mürane ja jääkuse väärtus arvutatakse valemi 3 järgi, kus liige dL leitakse valemi 4 kaudu. Valemis 4 on kahekordne integreerimine rajadega ajahetkest 0 ms ajahetkeni t'_d ms (joonis 10). Mürase kõvera alla jääva pindala suurus mõjutab valemis 4 dL liikme väärtust. Seega valemis 3 on dL liige väga tundlik kiirenduskõveral olevale mürale. Joonisel 10 olevalt kiirenduskõveralt võib märgata, et ajahetkel 5 millisekundit esineb kerge häiritus, mis jääb esimese poolperioodi sisse. Seadme parandamise järel on see häiritus kadunud (joonis 11).

Müomeetri 492 lahtivõtmisel selgub, et peatükis 2.1 kirjeldatud mehaanilistest vigadest on seadmel elektromagneti raudsüdamik elektromagneti pooluste vahel mittesümmeetriline. Elektromagneti raudsüdamiku sümmetriseerimine on kirjeldatud peatükis 2.1. Müomeeter 492 kalibreerimiseks tuleb veel reguleerida katiku kõrgust.

Kordusseeriaste statistilised väärtused on esitatud tabelis 4. Tabelis 4 näeb, et variatsioonikordajate väärtused on vähenenud võrreldes tabeli 3 väärtustega. Tabelis 4 on mõlema mõõtmisseeria sageduse ja dekremendi variatsioonikordajad peatükis 2.1.1 esitatud suhtelise mõõtemääramatuse piires. Kolmandas seerias on jäikuse variatsioonikordaja lubatud piires, kuid neljandas seerias ei ole. Neljandas mõõtmisseerias jäikuse jaotuse visualiseerimisel histogrammiga on 5 mõõtmistulemust, mille väärtused moodustavad põhimaksimumi kõrvale kõrvalmaksimumi. Seetõttu on ka jäikuse variatsioonikordaja ligemale 3,5 korda suurem lubatud väärtusest. Tuleb välja, et sama olukord on ka kolmandas mõõtmisseerias, kuid kõrvalmaksimum ei ole nii intensiivne, mistõttu tekib petlik mulje, et müomeetrit 492 saab klassifitseerida töökorras olevaks. Saadud jaotused ei vasta aga normaaljaotusele.



Joonis 11. Müomeeter 492 kolmanda mõõtmisseeria kolmas kiirenduskõver.

Jooniseid 10 ja 11 omavahel võrreldes näeb, et müomeeter 492 kiirenduskõveral olnud mürad on seadme parandamise käigus kadunud. Jooniselt 11 näeb, et maksimaalne kiirenduse väärtus on väiksem kui peatükis 2.1.1 lubatud maksimaalne kiirenduse väärtus, et müomeeter

oleks töökorras. Samuti esineb peale parandamist probleeme variatsioonikordajate väärtuste saamisega lubatud suhtelise mõõtemääramatuse piiridesse. Kord on see võimalik, teinekord ei ole. Tabelis 4 variatsioonikordajate omavahelisel võrdlusel on näha, et mõõtekorratavusega on probleeme, kuna saadud väärtused erinevad üksteisest palju.

Kõike eelnevat arvestades antakse hinnang müomeeter 492 korraolekule. Müomeetril 492 olevate mehaaniliste vigade parandamise järel ei esinenud kiirenduskõveral korrapäratusi. Samas ei saa müomeetrit 492 klassifitseerida töökorras olevaks, kuna antud seadmel esineb probleeme mõõtmiskorratavusega. Arvatavasti on müomeetril 492 probleem elektromagnetajamiga.

4.2. Müomeeter 508

Müomeeter 508 mõõtmisseeriade põhjal välja arvutatud statistilised väärtused on välja toodud peatükis 3.2 ja 3.2.1.

Peatükis 3.2 tabelites 5 ja 6 olevate karakteristiklike parameetrite variatsioonikordajate ja peatükis 2.1.1 etteantud suhtelise mõõtemääramatuste väärtuste omavahelisel võrdlemisel näeb, et variatsioonikordajad on esimesel mõõtmisseerial lubatud piirides. Seevastu teises ja kolmandas mõõtmisseerias on dekremendi ja jäikuse variatsioonikordajad suuremad kui lubatud ning neljandas mõõtmisseerias on jäikuse variatsioonikordaja suurem kui lubatud suhtelise mõõtemääramatuse väärtus. Visualiseerides histogrammiga kõikide mõõtmisseeriade jäikuse jaotusi ja võrreldes neid normaaljaotusega on võimalik näha, et esimesel mõõtmisseerial on jäikuse jaotus sarnane normaaljaotusega (joonis 9). Seevastu teistest mõõtmistest saadud jäikuse jaotused ei sarnane normaaljaotusega, kuna jaotustele tekib kõrvalmaksimum. Lisas 2 olevad andmed korrigeeritakse ekседest ja arvutuste tulemusena saadud uued statistiliste parameetrite väärtused on toodud alapeatükis 3.2.1.

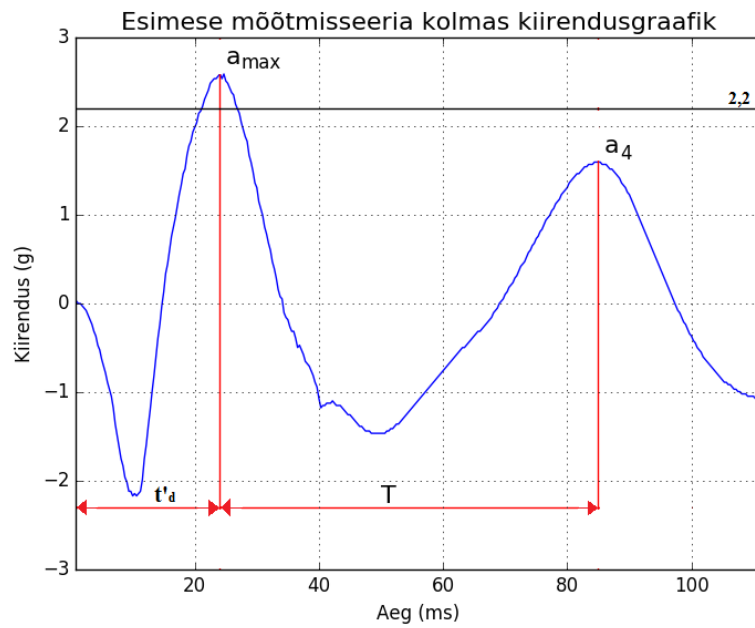
Peatükis 3.2.1 olevate tabelite 7 ja 8 põhjal arvutatud statistiliste parameetrite väärtustega antakse hinnang seadme korrasolekule. Statistiliste parameetrite omavahelisel võrdlemisel veendutakse mõõtmiste korratavuses.

Lisas 2 olevate andmete korrigeerimise järel näeb, et tabelis 7 esimese seeria karakteristiklike parameetrite variatsioonikordajate väärtused on peatükis 2.1.1 esitatud suhtelise mõõtemääramatuse piirides. Seevastu teises mõõtmisseerias on ainult dekremendi variatsioonikordaja ligemale 1,5 korda suurem kui lubatud maksimaalne väärtus. Mõõtmiste algandmeid vaadates on võimalik näha, et teises mõõtmisseerias on dekremendi väärtused

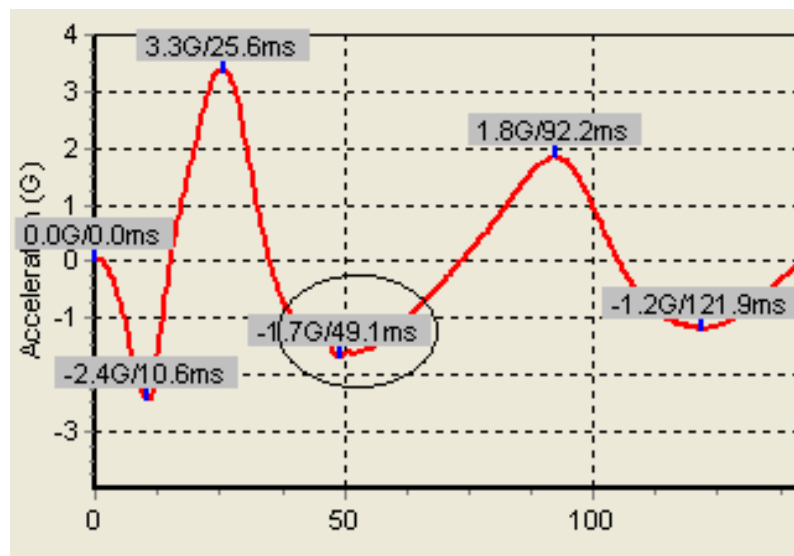
laiali hajunud. Kahe mõõtmisseeria vahel oli viie minutiline paus ja sellel ajal müomeetrit katsestendil ei mõjutatud. Esimese kahe seeria variatsioonikordajate erinevus viitab sellele, et müomeetril 508 on korratavusega probleeme.

Mõõtmisseeriatest saadud kiirenduskõvera illustatsiooniks on võetud esimese mõõtmisseeria kolmas katse, mis on toodud joonisel 12. Lisaks on joonisele märgitud maksimaalne lubatud kiirenduse väärtus ja muutujate suurused, mille järgi arvutatakse peatükis 2.1.2 olevate valemite järgi karakteristlikud parameetrid. Jooniselt 12 on näha, et ajahetkel 40 millisekundit esineb kiirenduskõveral häiritus, mis on vahetult enne, kui löökotsik on esimesel korral kõige kaugemas punktis testkehast. Sellist tüüpi häiritus esineb igas katses esimeses kahes mõõtmisseerias. Samuti näeb jooniselt 12, et müomeeter 508 löökotsiku maksimaalne kiirendus on suurem kui peatükis 2.1.1 etteantud maksimaalse kiirenduse väärtus.

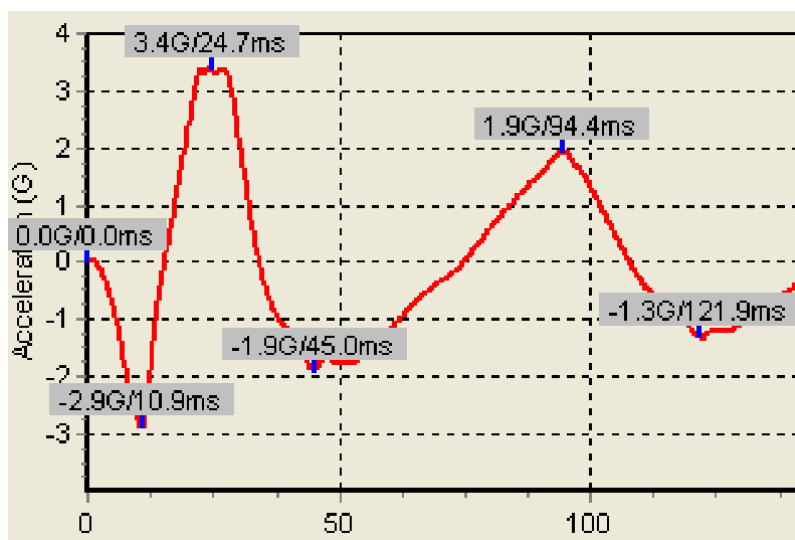
Vahetult enne seadme täielikku lahti võtmist kontrollitakse kiirendusanduri sõlme ja kangi omavahelist kinnitust, kus väikese jõuga painutatakse anduri sõlme paremale ja vasakule. Seda teostades on tunda, et kiirendusanduri sõlme ja kangi vahel on väike lõtk. Esialgu vaadatakse, kas lõtku on võimalik eemaldada nii, et surutakse anduri sõlme nii palju vastu kangi otsa kui võimalik. Seejärel kiirendusanduri sõlme liigutamisel ei ole tunda, et andur liigub kangi suhtes paremale-vasakule. Uus mõõtmiskatse teostatakse testimise moodis, mille tulemus on näha joonisel 13. Joonisel 13 on häirituse koht ära märgitud ringiga. Jooniste 12 ja 13 omavahelisel võrdlemisel on näha, et häiritus on ajas edasi nihkunud. Ajavahemikus 45-55 millisekundit, kui löökotsik on kõige kaugemal testkehast, näeb jooniselt 13, et graafik ei ole sujuv. See tähendab, et anduri sõlm ei ole kindlalt fikseeritud kangi külge ning sõlme ja kangi vahel on endiselt olemas lõtk. Lõtku eemaldamiseks tuleb müomeeter täielikult lahti võtta.



Joonis 12. Müomeeter 508 esimese mõõtmiseeria kolmas kiirenduskõver.



Joonis 13. Müomeetri 508 kiirenduskõver, kui kiirendusandur on jõuga fikseeritud. Musta ringiga on tähistatud kiirendusanduri liikumine kangi suhtes.



Joonis 14. Müomeeter 508 kiirenduskõver, kui kiirendusandur ei ole fikseeritud kangi otsas.

Joonisel 14 on näidatud kiirendusgraafik, kui kiirendusanduri sõlm liigub kangi otsas vabalt. Ajahetkel 25 millisekundit on võimalik näha, et löögijõud on „küllastunud“. „Küllastumine“ tekib seetõttu, et programmi Myoton poolt on lubatud maksimaalseks kiirenduse väärtuseks määratud 3,3 g. See tähendab, et löökotsiku löögitugevus on liiga suur ning suurema kiirenduse väärtuse korral kuvab Myoton programm kiirenduskõveral sirge pinna, mis on mürane. Ajavahemikus 45-55 millisekundit, kui löökotsik on kõige kaugemal testkehast näeb joonisel 14, et kiirendusandur liigub kangi otsas üles alla. Ajahetkest 56 millisekundit, kui algab löökotsiku teinekordne liikumine testkehasse, toimub löökotsiku liikumine lineaarselt ja järsult, mis ei ole omane testkeha võnkumisele. Testkeha sumbuvale võnkumisele on omane sinusoidne võnkumine, mida on näha joonisel 7. Ajahetkel 120 millisekundit näeb, et kiirendusandur liigub kangi suhtes.

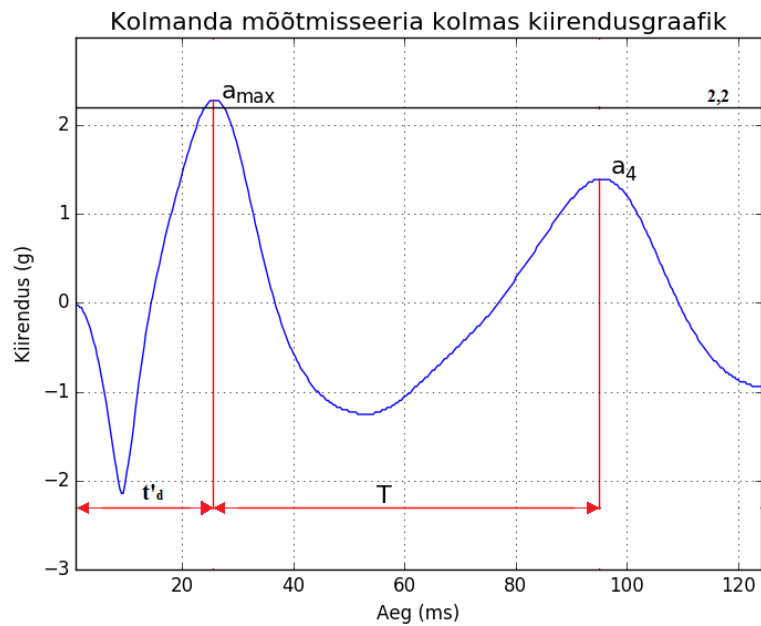
Müomeeter 508 lahtivõtmisel selgub, et anduri sõlme ja kangi vahel on väike lõtk, mis põhjustab sellise häirituse kiirenduskõveral nagu on näidatud joonistel 12, 13 ja 14. Lõtku eemaldamiseks tuleb kiirendusanduri sõlme kinni hoidvad kruvid oma pesast välja võtta ning uuesti kinni keerata (joonis 5). Muid mehaanilisi vigu otsides selgub, et mõõtes lehtkaliibriga raudsüdamikü sümmetrisust elektromagnetis ei ole raudsüdamik elektromagneti pooluste suhtes sümmetiline (joonis 4). Peatükis 2.1 on kirjeldatud raudsüdamikü sümmetrisuseks seadistamist. Samuti tuleb seadistada sobivale kõrgusele asendianduri keel, et mõõtmise ajal kiirenduse maksimaalne väärtus ei oleks suurem kui 2,2 g.

Uurides peale müomeeter 508 kokkupanekut saadud mõõtmisseeriade jäikuse jaotusi, on jaotustele tekkinud samuti kõrvalmaksimum nagu peale müomeeter 492 parandamist. Tabelis 8 olevate mõõtmisseeriast saadud parameetrite variatsioonikordajate võrdlemisel peatükis 2.1.1 esitatud suhtelise mõõtemääramatuse piiridega näeb, et jäikuse variatsioonikordajad ei ole lubatud piirides. Samuti ei ole lubatud piires kolmanda seeria dekremendi variatsioonikordaja väärtus. Teiste parameetrite variatsioonikordajate kohta võib öelda, et need on lubatud piirides. Tabelis 8 kahe seeria variatsioonikordaja väärtuseid omavahel võrreldes on näha, et mõõtekorratavusega on probleeme, kuna saadud väärtused erinevad üksteisest palju.

Mõõtmisseeriast saadud kiirenduskõvera uurimisel on näha, et ajahetkel 45 ms kiirendusanduri sõlme ja kaheõlalise kangi lõtku poolt tekitatud müra on kadunud (joonis 15). Jooniselt 15 näeb, et müomeetri asendianduri keele kõrgust on vaja veel kalibreerida, kuna maksimaalne kiirenduse väärtus on suurem kui lubatud.

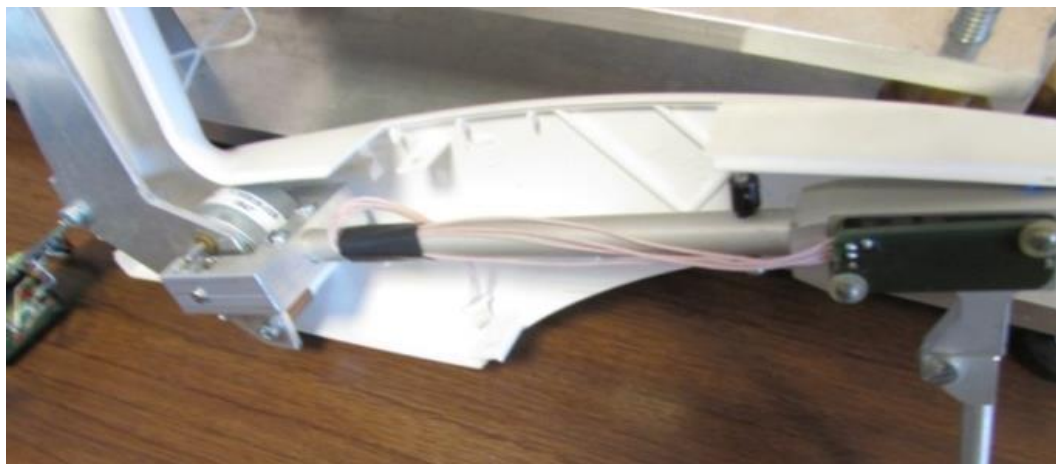
Enne müomeeter 508 parandamist ei olnud jäikuse väärtuste hajuvus nii suur kui seadme parandamise järel. Seega tekkisid arvatavasti mõned uued mehaanilised vead, mille põhjused ei ole teada.

Tuginedes väljatoodud asjaoludele antakse müomeetrile 508 järgmine hinnang: peale seadme parandamist on müomeetril 508 mehaanilistest vigadest põhjustatud korrapärased kiirenduskõveral kadunud. Müomeetrit 508 ei saa siiski klassifitseerida töökorras olevaks, kuna seadmel on jätkuvalt probleemid variatsioonikordajate väärtuse saamisega lubatud suhtelise mõõtemääramatuse piiridesse ja esineb probleeme mõõtmiskorratavusega. Arvatavasti on müomeetril 508 probleem elektromagnetajamis.



Joonis 15. Müomeeter 508 kiirenduskõver lõtku eemaldamise järel.

MYOTON 3 konstruktsioonis olevate mehaaniliste vigade tekkepõhjuste vähendamiseks on välja töötatud alternatiivne lahendus, milleks on elektromagnetilise löögisüsteemi (ajami) väljavahetamine samm-mootori vastu. Sellega elimineeritakse kohe üks tihti esinev ja kalibreerimist vajav viga, milleks on elektromagnetis oleva raudsüdamikuga sümmeetrilisuse nõue pooluste suhtes. Kui siiani võivad elektromagnetajamitega seadmete koostamisel tekkida mehaanilised vead, mida on hiljem keeruline tuvastada, siis samm-mootori kasutamisel selliste mehaaniliste vigade arv kaob. Joonisel 16 on illustreeriv pilt alternatiivsest lahendusest. Samm-mootori vastu vahetamisega tuleb arvatavasti kaasa seni tundmatuid vigu, mida on vaja hakata täpsemalt uurima.



Joonis 16. Samm-mootoriga müomeetri konstruktsioon.

4.3. Järeldused

Töö tulemusena selgub, et müomeeter 492 kiirenduskõveral esinenud mürade põhjal on võimalik tuvastada mehaanilisi vigasid. Nende vigade parandamise järel ei esinenud kiirenduskõveral mürasid. Siiski ei saa müomeetrit 492 klassifitseerida töökorras olevaks, kuna antud seadmel esines probleem mõõtmiskorratavusega.

Müomeeter 508 kiirenduskõveral esinenud mürade põhjal on võimalik tuvastada müomeetri konstruktsioonis mehaanilisi vigasid. Vigade parandamise järel ei esinenud kiirenduskõveral mürasid. Müomeetrit 508 ei saa klassifitseerida töökorras olevaks, kuna esineb probleeme variatsioonikordajate väärtuste saamisega etteantud suhtelise mõõtemääramatuse piiridesse ja käesolevas töös käsitletud mehaaniliste vigade parandamisega ei suudetud tagada mõõtmiskorratavust.

Antud töös leitakse, et elektromagnetiga ajamid tuleb välja vahetada samm-mootoriga ajamite vastu, kuna sellega eemaldatakse elektromagnetajamiga tekkivad vead. Samuti leitakse, et kiirendusanduri sõlme kinnitamine kahe kruviga vastu kaheteljelise kangi silindrilist pinda ei ole mõistlik, kuna kruvide liigsel pingutamisel deformeerub kangi pind.

Leidmaks vigasid müomeetrite 492 ja 508 konstruktsioonis, mis aitaksid need seada lõplikult töökorda ning võtta kasutusele, on vaja mõlema seadmega teostada täiendavaid uuringuid.

Kokkuvõte

Töö alguses püstitatud eesmärgiks oli MYOTON 3 kiirenduskõveral oleva müra põhjal mehaaniliste vigade tuvastamine. Töö eesmärk sai täidetud, sellepärast et MYOTON 3 kiirenduskõveral oleva müra põhjal on võimalik tuvastada mehaaniline viga müomeetri konstruktsioonis. Samas tuleks arvestada, et vigade parandamise käigus võisid tekkida uued vead, millele on nüüd vaja tähelepanu pöörata.

Töö käigus jõuti mõlemal müomeetril mõõtmisseeriade tulemuste ja kiirenduskõverate abil järeldusele, et töös kasutatud müomeetrid ei ole ka peale kirjeldatud mehaaniliste vigade parandamist töökorras ning vajavad täiendavat uurimist. Müomeeter 492 esimese kiirenduskõvera põhjal oli võimalik järeldada, et elektromagneti raudsüdamik ei olnud elektromagneti pooluste suhtes sümmeetriline. Parandamise järel oli kiirenduskõver korras, kuid siis tekkis probleem mõõtmiskorratavusega. Müomeeter 508 esimesel kiirenduskõveral oleva müra põhjal selgus, et müomeetri löökotsiku otsas oleva kiirendusanduri sõlme ja kangi vahel oli lõtk. Lisaks selgus, et elektromagneti raudsüdamik ei olnud elektromagneti pooluste suhtes sümmeetriline. Müomeeter 508 parandamise järel teostatud mõõtmisseeriade põhjal ei olnud seade ikka töökorras, kuna jäikuse variatsioonikordaja ei mahtunud etteantud suhtelise mõõtemääramatuse piiridesse ja jäi probleem mõõtekorratavusega. Arvatavasti on müomeetritel 492 ja 508 probleemid tingitud elektromagnetajamist, kuid seda tuleb täpsemalt uurida.

Konstruktsiooni täiustamine ja elektromagnetajami väljavahetamine samm-mootor ajami vastu on vajalik, kuna sellega eemaldatakse kõik elektromagnetajamist tingitud mehaanilised vead.

Mõlemal müomeetritel parandati teadaolevad mehaanilised vead, mille tulemusena kadusid kiirenduskõveratel olevad mürad. Samas ei võimaldanud teadaolevate mehaaniliste vigade parandamine klassifitseerida seadmeid töökorras olevateks. Seega võisid parandamise käigus tekkida uued vead või need vead eksisteerisid juba varem, kuid nende olemasolust ei olnud teadlikud. Töös kasutatud müomeetreid on vaja edasi uurida, et tuvastada vead seadmete lõplikuks kordategemiseks.

Tänuavaldused

Soovin tänada töö juhendajat Arved Vainu, kes andis aastate jooksul asjakohast nõu töö kirjutamisel ja sisulise osa läbivaatamiseks. Lisaks aitas ta hoida tööl fookust, et töö laiali ei valguks. Samuti soovin tänada enda häid kursusekaaslaseid ja perekonda, kes aitasid, toetasid ja andsid soovitusi bakalaureuseõppe jooksul.

Kasutatud kirjandus

1. A. Vain, Meetod ja seade pehmete bioloogiliste kudede omavõnkumise registreerimiseks – müomeeter. Patendikirjeldus, (1996), EE 03374 B1, patendiomanik Tartu Ülikool.
2. R. Viir, K. Laiho, J. Kramarenko, M. Mikkelsen, „*Repeatability of trapezius muscle tone assessment by a myometric method*“, Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 6, No 2, lk 215-228 (2006), <http://www.worldscientific.com/doi-abs/10.1142/S0219519406001856>, kättesaadavus 23.10.2013.
3. R. K. Korhonen, A. Vain, E. Vanninen, R. Viir, J. S. Jurvelin, „*Can mechanical myotonometry or electromyography be used for the prediction of intramuscular pressure?*“ Physiological Measurement, 26, lk 951-963 (2005), <http://iopscience.iop.org/0967-3334/26/6/006/>, kättesaadavus 23.10.2013.
4. Kasutusjuhend „*Myoton – 3*“, (2007), versioon „*Myoton3*[3.11.9.6]“.
5. A. Y. K. Chan, „*Biomedical device technology*“ Thomas Books (Springfield), (2008), lk 4-5, 281-293.
6. Meditsiiniseadme seadus, Riigiteataja paragrahv 3 <https://www.riigiteataja.ee/akt/MSS>, kättesaadavus 01.06.15.
7. A. Vain, „*Müomeetria*“, Tartu Ülikool, (2002), www.physic.ut.ee/instituudid/ef-ti/loengumaterjalid/myomeetria/myo.pdf, kättesaadavus 15.10.2013.
8. A. Vain, „*Biomehaanika alused ja biomaterjalid*“, TTÜ kirjastus, (2011), lk 118-127.
9. R. F. Schmidt, G. Thews, „*Inimese füsioloogia*“, Tartu, (1997), lk 701.
10. M. Bizzini, A. F. Mannion, „*Reliability of a new, hand-held device for assessing skeletal muscle stiffness*“, Clinical Biomechanics, 18, lk 459-461 (2003), <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268003303000421>, kättesaadavus 23.10.2013.
11. M. Viswanathan, „*What is measurement error?*“ raamatus *Measurement error and research design*, Sage Publications Inc, lk 98-106, (2005) <http://srmo.sagepub.com/view/measurement-error-and-research-design/n2.xml> kättesaadavus 01.06.15

Lisa 1. Müomeeter 492 mõõtmiseeriad enne ja pärast seadme parandamist

Tabel 9. Mõõteseadme 492 mõõtmiseeriad enne parandamist.

Esimene mõõtmiseeria			Teine mõõtmiseeria		
Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
17,0	0,42	258	17,2	0,45	257
16,8	0,44	279	17,0	0,47	267
16,8	0,45	257	16,9	0,44	258
16,8	0,44	254	16,7	0,47	265
17,1	0,47	264	16,6	0,40	255
16,8	0,50	288	17,1	0,46	293
17,4	0,47	298	16,8	0,41	258
17,2	0,46	277	16,8	0,45	279
17,0	0,46	270	16,8	0,44	266
17,0	0,43	271	16,8	0,47	287
16,8	0,47	262	17,2	0,46	275
16,7	0,44	262	16,8	0,46	301
16,9	0,52	278	16,9	0,46	279
17,2	0,49	273	17,1	0,46	278
17,0	0,49	271	16,9	0,43	273
16,8	0,46	266	16,9	0,44	271
17,0	0,44	256	16,8	0,42	278
17,1	0,49	261	16,8	0,42	259
16,9	0,47	265	16,7	0,45	265

Tabel 10. Müomeeter 492 mõõtmiseeriad peale parandamist.

Kolmas mõõtmiseeria			Neljas mõõtmiseeria		
Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
14,6	0,56	267	14,6	0,58	268
14,7	0,56	268	14,5	0,58	292
14,5	0,58	268	14,5	0,59	271
14,5	0,59	274	14,5	0,59	272
14,6	0,57	272	14,5	0,59	273
14,5	0,58	292	14,5	0,58	274
14,5	0,59	270	14,5	0,59	270
14,5	0,58	269	14,5	0,59	272
14,5	0,58	269	14,5	0,59	274
14,5	0,58	269	14,5	0,58	273
14,5	0,59	275	14,5	0,60	272
14,5	0,58	269	14,5	0,59	271
14,5	0,59	272	14,5	0,59	296
14,5	0,59	273	14,5	0,59	296
14,4	0,57	274	14,4	0,58	290
14,5	0,57	273	14,5	0,59	269
14,5	0,59	277	14,5	0,58	274
14,5	0,58	269	14,5	0,58	266
14,5	0,59	274	14,5	0,58	278
14,5	0,58	270	14,5	0,58	294

Lisa 2. Müomeeter 508 mõõtmisseeriad enne ja pärast seadme parandamist

Tabel 11. Mõõtmisseadme 508 mõõtmisseeriad enne parandamist.

Esimene mõõtmisseeria			Teine mõõtmisseeria		
Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
16,5	0,47	284	16,6	0,44	284
16,3	0,48	283	16,5	0,47	291
16,4	0,48	285	16,5	0,48	290
16,4	0,48	287	16,6	0,47	287
16,5	0,48	289	16,7	0,47	275
16,4	0,49	290	16,6	0,46	290
16,5	0,48	287	16,5	0,44	290
16,4	0,48	284	16,4	0,48	295
16,5	0,48	284	16,5	0,45	289
16,6	0,47	283	16,5	0,46	291
16,5	0,47	290	16,5	0,45	285
16,4	0,47	291	16,5	0,47	295
16,5	0,47	288	16,4	0,46	286
16,5	0,47	286	16,6	0,47	293
16,4	0,48	293	16,6	0,44	286
16,5	0,47	289	16,6	0,45	290
16,4	0,47	287	16,5	0,46	272
16,4	0,47	290	16,5	0,47	292
16,5	0,46	288	16,6	0,43	285

Tabel 12. Mõõtmisseadme 508 mõõtmisseeriad peale parandamist.

Kolmas mõõtmisseeria			Neljas mõõtmisseeria		
Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)	Sagedus (Hz)	Dekrement	Jäikus (N/m)
14,4	0,5	261	14,4	0,46	255
14,3	0,48	261	14,4	0,48	259
14,3	0,5	260	14,5	0,47	257
14,4	0,51	263	14,3	0,48	261
14,3	0,49	271	14,4	0,48	261
14,4	0,5	262	14,3	0,48	276
14,3	0,5	262	14,3	0,48	274
14,3	0,5	261	14,3	0,48	275
14,3	0,47	276	14,3	0,48	260
14,3	0,48	258	14,3	0,48	261
14,3	0,47	277	14,3	0,48	262
14,3	0,5	261	14,4	0,47	259
14,3	0,5	263	14,3	0,48	260
14,3	0,49	279	14,4	0,48	260
14,3	0,49	264	14,4	0,47	258
14,3	0,5	263	14,4	0,48	254
14,3	0,48	258	14,3	0,48	266
14,3	0,5	261	14,4	0,47	282
14,4	0,5	265	14,3	0,47	273
14,4	0,49	275	14,3	0,46	260

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mihkel Põldemaa (sünnikuupäev: 13.02.1992) annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Müomeeter MYOTON 3 mehaaniliste vigade tuvastamine kiirenduskõveral esineva müra kaudu“, mille juhendaja on Arved Vain,

- 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi Dspace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 27.05.2016