



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

PUKK-KRAANA KK20-32 ELEKTRILISE EFEKTIIVSUSE ANALÜÜS JA ELEKTRIAJAMITE MODERNISEERIMINE

ANALYSIS OF POWER EFFICIENCY AND MODERNIZATION OF ELECTRIC
DRIVES OF THE GANTRY CRANE KK20-32

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aleksandr Mogilenko

Üliõpilaskood: 155453

Juhendaja: dr Valery Vodovozov

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Aleksandr Mogilenko, 155453
Õppekava, peaariala: AAVB02/09 - Elektroenergeetika
Juhendaja: dr Valery Vodovozov, 620 3694
Konsultandid: Meelis Jõgevest, tehnilise toe talituse juhataja

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Pukk-kraana KK20-32 elektrilise efektiivsuse analüüs ja elektrijamite moderniseerimine.

(inglise keeles) Analysis of electrical efficiency and modernization of electric drives of the gantry crane KK20-32

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida pukk-kraana ajamimootorite ja reostaadide hetkeseisu;
2. Analüüsida energiatarbimine katse viidimise abil;
3. Uurida moderniseerimise võimalust.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Andmete kogumine ja analüüs	28.09.2018
2.	Teoreetilise osa kirjutamine	30.11.2018
3.	Katsete läbiviimine ja põhiosa kirjutamine	08.03.2019
4.	Kokkuvõtte kirjutamine ja vormistuse parandamine	10.05.2019
5.	Presentatsiooni loomine ja ettevalmistus kaitsmiseks	31.05.2019

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 24 mai 2019. a.

Üliõpilane: "....."201....a.
/allkiri/

Juhendaja: "....."201....a.
/allkiri/

SISUKORD

SISUKORD	4
EESSÕNA.....	5
SISSEJUHATUS.....	6
1. SEADE JA TÖÖ ANALÜÜS	7
1.1. Kirjeldus ja põhiomadused.....	7
1.2. Jõuvooluahel	8
1.3. Reostaatide andmed.....	11
2. KATSEANDMETE KOGUMINE JA ANALÜÜS.....	13
2.1. Katseandmete kogumise meetod	13
2.2. Analüsaatori parameetrid ja tööpõhimõte	13
2.3. Mootorite teoreetiliste parameetrite arvutamine	14
2.4. Libistuse ja momendi vahelise sõltuvuse graafikute koostamine	18
2.5. Katseandmete analüüs	19
2.5.1. Tühikäigurežiimi analüüs.....	19
2.5.2. Koormatud kraanaajamite töö analüüs.....	22
2.6. Mootorite kasuteguri arvutamine.....	25
3. UUENDUSVÕIMALUSTE UURIMINE JA NENDE TÕHUSUSE ANALÜÜS	29
3.1. Uuendusmeetodi kirjeldus.....	29
3.2. Uute asünkroonmootorite valimise kriteeriumid	30
3.2.1. Tõstemehhanismi mootori valimine	31
3.2.2. Lasti- ja käiguvankrite mootorite valimine	32
3.3. Sagedusmuundurite ehitus ja valimise kriteeriumid.....	33
3.4. Uute ajamite töö mudeldamine	36
3.4.1. Parameetrid uute ajamite töö mudeldamiseks	36
3.4.2. Mudeldamise tulemused.....	38
KOKKUVÕTE.....	42
SUMMARY	43
KASUTATUD KIRJANDUS	44
LISAD	45
LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	59
ABSTRACT.....	60

EESSÕNA

See töö ei ole äriline ja on kooskõlastatud ettevõttega AS E-Betonelement. Kogu teave on saadud eranditult üksnes tõstekraana KK20-32 moderniseerimisega seotud teadustöök.

Andmeid koguti ja mõned mõõtmised teostati tehnilise toe talituse juhataja Meelis Jõgevesti abiga. Kõik mõõtmised teostati mõõtmispiirkonnas kehtivate ohutusnõuete kohaselt.

Sissejuhatus

Käesoleva töö põhieesmärk on uurida pukk-kraana ajamimootorite hetkeseisu, analüüsida nende tõhusust, samuti uurida võimalusi nende ajakohastamiseks, et ettenähtud nimitõstevõime, lülituskestuse ja keskkonna kliimatingimuste korral vähendada energiakadusid ja suurendada kraana töö täpsust.

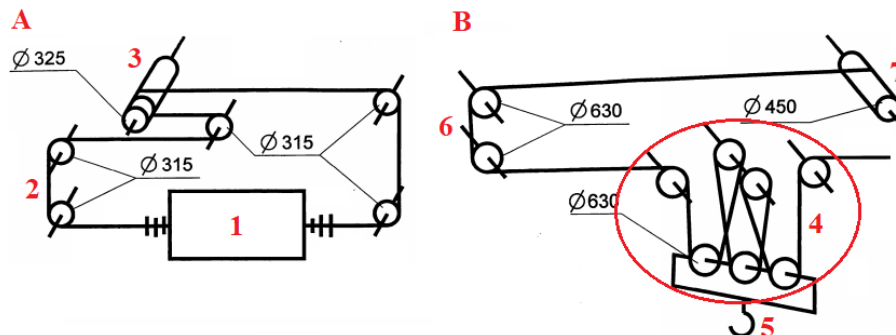
Esimeses tööosas toimub ajamite teoreetiliste andmete kogumine ja analüüs. Ajamid vastavad kraana elementide liikumistele ja koosnevad järgmistest komponentidest: reduktorid, pidurid ja mootorid. Kraana tehnilises passis on määratud kõik vajalikud andmed reduktorite ja pidurite kohta. Peamised uurimise objektid on faasirootoriga asünkroonmootorid MTF 412-8 ja MTF 211-6, mille kohta passis on ette antud ainult peamised parameetrid. Mootorite muude vajalike teoreetiliste andmete kogumine toimub teadusliku kirjanduse ja teatmike abil. Käivitusreostaadi parameetrid puuduvad, kuid nende takistuse võib leida nii arvutamise kui ka mõõtmise abil.

Teises tööosas leiab aset teoreetiliste ja mõõdetud andmete analüüs ja võrdlus ning mootorite kasuteguri arvutamine. Esmalt moodustatakse teoreetilised ja eksperimentaalsed libistuse pöördmomentist sõltuvuse graafikud teoreetiliste ja mõõdetud käivitusreostaatide takistuste põhjal. Katsemeetod põhineb andmete hankimisel erinevate mõõtmistega kraana käitamise ajal. Energia tarbimise analüüsiks on vaja läbi viia katseid tühikäigul ja töörežiimil. Kättesaadavatest seadmetest on mõõtmisteks kõige sobivam analüsaator FLUKE 434 Three-Phase Power Quality Analyzer, mille tagas mitteäriliseks kasutamiseks Tallinna Tehnikaülikool. Saadud andmete tulemusel on arvatud iga mootori kasutegur.

Viimases tööosas uuritakse mootorite kasuteguri suurendamist, kiiruse reguleerimise parendamist ja energia kadude vähendamist pukk-kraana elektriajamite ajakohastamisega. Eeldatava moderniseerimise käigus pakutakse käivitusreostaatide eemaldamine, sagedusemuundurite kasutuselevõtt ja faasirootoriga asünkroonmootorite asendus lühisrootoriga asünkroonmootoritega. Uute ajamite toimimne modelleeritakse programmis eDrive ja võrreldakse olemasolevate ajamitega. Saadud tulemustel arvutatakse aktiivvõimsuse tarbimise vahe.

Kokkuvõttes antakse hinnang olemasolevate mootorite seisundile ning nende moderniseerimise aktuaalsusele. Lisaks sellele toimub antud töö kõikide jagude ülevaade ja saadud peamiste tulemuste esile toomine.

erinevus erinevate lastihaardeelementidega tuleneb nende masside erinevusest. Tõstmise ja langetamise nimikiirus on töötamisel greiferiga 0,217 m/s ja töötamisel konksuga 0,073 m/s. Lastivankri ja polüspasti tõmbetrosside skeemid on esitatud joonisel 1.2. [1]



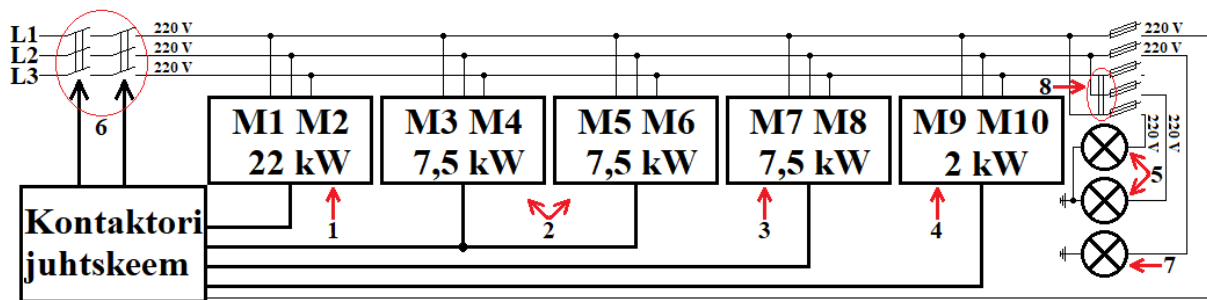
Joonis 1.2. Joonis A - Lastivankri tõmbetrossi skeem. Lastivanker (1), pingutustrumlid (2), mootoriga M7 ühendatud trummel (3). Joonis B - Tõstemehhanismi polüspasti skeem. Polüspasti skeem (4), lastihaardeelement (5), pingutustrumlid (6), mootoriga M1 ühendatud trummel (7). [1]

Kraanatoed hoiavad üleval silda ja toetuvad käiguvankritele, mida liigutatakse mootoritega M4 ja M5 ja pidurdatakse elektrohüdrauliliste piduritega M3 ja M6. Käiguvankrite liikumisel ja peatumisel töötavad mootorid ja pidurid sünkroonselt. Ajamite pöördemoment edastatakse kahele terasribidega käigurattale. Liikumise nimikiirus on 0,4 m/s.

Kuna oma suuruse tõttu on kraanal suur purjepind, on kaitseks tuulesurve eest kraanale paigaldatud kaitseüsteem, mida juhitakse mootoritega M9 ja M10. Kui kraana ei tööta, on käiguvankrite kaitseklemmid suletud, millega välditakse kraana ümberkukkumist, ning enne töö algust need lahutatakse. Töötamise ajal on maksimaalne lubatud tuulekiirus 10 meetri kõrgusel 15,5 m/s ja seisu ajal sisselülitatud kaitsega 33 m/s. [1]

1.2. Jõuvooluahel

Valgustus ja liigutamine toimib jõuvooluahela kaudu. See on ühendatud kolmefaasilise toitega ja sisaldab mootoreid, töötulesid ja kabiini valgustust. Releekontaktori juhtahel on ühendatud jõuvooluahelaga ja on esitatud lisas 1. See täidab kõiki jõuvooluahela elementide reguleerimis- ja juhtimisfunktsioone ning blokeerib ka kraana erinevaid elemente faaside katkemisel, lühiste tekkimisel, elementide liikumise lubatud piiride ületamisel ja muude tõrgete korral. Ahelate skeem on esitatud joonisel 1.3. [2]



Joonis 1.3. Jõuvoolu- ja juhtimisvooluahela vastasmõju üldskeem. Tõstemehhanismi mootor ja pidur (1), käiguvankrite mootorid ja pidurid (2), lastivankri mootor ja pidur (3), tuulekaitsemootorid (4), töötuled (5), jõuahela sisselülitamine (6), kabiini valgustus (7), kolmefaasilise võrgu sulavkaitse (8).

Jõuvooluahela täielik skeem on esitatud lisan 2. See sisaldab 6 mootorit, 8 töötuleprožektorit ja kabiini valgustust. Mootorid töötavad kolmefaasilisel pingel 220 V. Töötuledes kasutatakse ühefaasilist pinget 220 V ja kabiini valgustuseks kasutatakse ühefaasilist pinget 12 V.

Elektrijamite mootoritena M1, M4, M5, M7 kasutatakse faasirootoriga asünkroonmootoreid. Sellel mootoril on erinevalt lühisrootoriga asünkroonmootorist rootoriahelas täiendavad takistid – reostaadid. Need on vajalikud käivitusmomendi suurendamiseks ja pöörlemiskiiruse reguleerimiseks. Kuna kraanal on suur mass ja see töötab suurtel koormustel, peab käivitusmoment olema piisavalt suur. Erinevate kiiruste tõttu peab mootor sageli töötama ka väikestel pööretel, mis oleks lühisrootori puhul võimatu, sest rootori mähiste käivitus- ja kestusvool oleks liiga suur ja puuduks võimalus kiiruse reguleerimiseks. Kiiruse reguleerimise näitena on lisan 3 esitatud piduriga M2 viieastmelise mootori M1 teoreetiline käivituskarakteristik. Lisan on märgitud: käivitusreostaadid (1), reostaatide ühenduskontaktid (2), mootor M1 (3), elektrohüdrauliline pidur M2 (4), mootori M1 pöörlemissuuna muutmise kontaktid (5), kolmefaasiline automaatlüliti (6).

Kontaktide F3 sulgemine pingestab kogu ajami. Kontaktide K1 sulgemisega antakse toide mootorile M1. Käivitamise hetkel on see mõlemal graafikul punktis A. Momendi vähenemisel miinimumväärtuseni saavutab mootor olemasoleva töörežiimi maksimaalse kiiruse. Kontakti K15 sulgemisega (graafikutel punkt B) lülitatakse pool reostaadi R1 takistusest ahelast välja, mis põhjustab rootori mähiste voolu ja võlli pöördemomendi suurenemise. Selle tulemusena hakkab mootor kiirendama, kuni võlli pöördemoment jõuab jälle minimaalse väärtuseni. Järjestikku kontaktide K15–18 sulgemisel lülitatakse sellisel viisil reostaadid rootori ahelast välja ja kui jõutakse graafiku punkti E, on rootori mähised ühendatud otse võrku. Tabelis 1.1 on esitatud kõigi kraana elektrijamites kasutatavate mootorite põhiparameetrid. [3]

Tabel 1.1. Kraana KK 20-32 faasirootoriga asünkroonmootorite tehnilised andmed. Töörežiim lülitusajaga 40%. Aktiivtakistuste väärtused vastavad soojendatud olekule. [1][3]

Tähistus skeemil	M1	M4	M5	M7
Mudel	MTF 412-8	MTF 211-6	MTF 211-6	MTF 211-6
Nimivõimsus P_N , kW	22	7,5	7,5	7,5
Staatori nimipinge U_{N_S} , V	220	220	220	220
Staatori nimivool I_{S_N} , A	65	21	21	21
Staatori siseaktiivtakistus r_s , Ω	0,18	0,76	0,76	0,76
Staatori sisereaktiivtakistus x_s , Ω	0,31	1,05	1,05	1,05
Rootori nimivool I_{r_N} , A	58	21,7	21,7	21,7
EMJ avatud rootori rõngaste vahel E_{R_N} , V	248	236	236	236
Rootori siseaktiivtakistus r_r , Ω	0,10	0,49	0,49	0,49
Rootori sisereaktiivtakistus x_r , Ω	0,23	0,86	0,86	0,86
Tühijooksuvool I_{0_N} , A	49,6	18,0	18,0	18,0
Pinge transformatsioonikoefitsient k_e	2,03	1,93	1,93	1,93
Nimipöörlemissagedus n_N , p/min	715	915	915	915
Nimipöördemoment M_N , Nm	294,0	77,4	77,4	77,4
Kasutegur, (%)	83	75	75	75
$\cos(\varphi)$	0,70	0,72	0,72	0,72
Maksimaalse pöördemomendi ja nimipöördemomendi suhe k_M	3,0	2,5	2,5	2,5

Kraana osade inertsiga liikumise vältimiseks ja seiskamiseks avariiolekorras kasutatakse tavaliselt suletud tüüpi elektrohüdraulilisi pidureid. Need on ühendatud paralleelselt faasirootoriga asünkroonmootoritega ja lülituvad sisse mootori töö lõpuhetkel, mis väldib liikumise jätkumist inertsiga. Pidurdamine toimub piduriklotside hõõrde mõjul. Elektrohüdrauliliste pidurite tehnilised andmed on esitatud tabelis 1.2.

Tabel 1.2. Kraana KK 20-32 elektrohüdrauliliste pidurite tehnilised andmed. [1]

Pidur	Pidur mootoril	Jõud F_{stop} , N	Pidurdustee L_{stop} , m
M2	M1	490	0,1
M3	M4	245	0,25
M6	M5	245	0,25
M8	M7	245	0,2

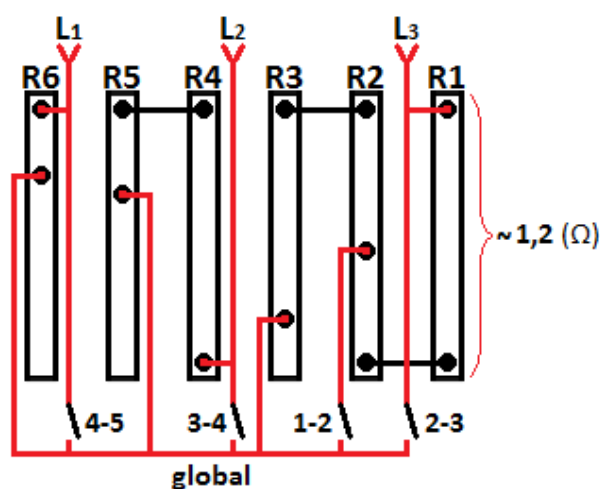
Reduktorite ülekandearvud on esitatud tabelis 1.3. Lisaks paigaldatud reduktoritele on käiguvankritel sisseehitatud reduktorid ülekandearvuga 2,9.

Tabel 1.3. Kraana KK 20-32 reduktorite ülekandearvud. Sulgudes on näidatud ülekandearvud seoses käiguvankrite sisseehitatud reduktoritega. [1]

Kasutatav mootor	M1	M4	M5	M7	M9	M10
Reduktori mudel	PM-650-40-22M	РЦД-400-31,5-22	РЦД-400-31,5-22	РЦД-400-40-22M	ПО2-10 ВК-28,2	ПО2-10 ВК-28,2
Ülekandearv i	40	31,5 (90,7)	31,5 (90,7)	40	28,2	28,2

1.3. Reostaatide andmed

Reostaadikastid on paigaldatud kraana sillale tõstemehhanismi ja lastikäru mootorite kõrvale. Kokku kasutatakse 2 reostaadikasti. Mootori MTF 412-8 rootoriahela takistust reguleeritakse reostaadiga ИРАК.434.334.001-42.



Joonis 1.4. Reostaadi ИРАК.434.334.001-42 takistite ja väljundite ühendusskeem.

Takistusi mõõdeti kohapeal digitaalse multimeetriga Fluke 17B Professional Digital Multimeter Measuring Tool. Mõõteriist oli tagatud tehase poolt, mõõtmistäpsus oli 0,01 Ω . Kaablipinna suure saastatuse, rooste ja keskkonnamõjude tõttu võivad mõõtmised olla teatud veaga. Takistuste määramiseks mõõdeti takistusi iga faasi sisendklemmi (L1, L2, L3) ja kõigi kaablite ühispunkti (global) vahel reostaadi taga. Rootoriahela kogutakistus $r_{extra\ q}$ määrati valemiga [3]:

$$r_{extra\ q} = \frac{r_{L1} + r_{L2} + r_{L3}}{N_L}, \quad (1.1)$$

kus r_{L1}, r_{L2}, r_{L3} – rootori faaside L1, L2, L3 reostaaditakistused, Ω ,

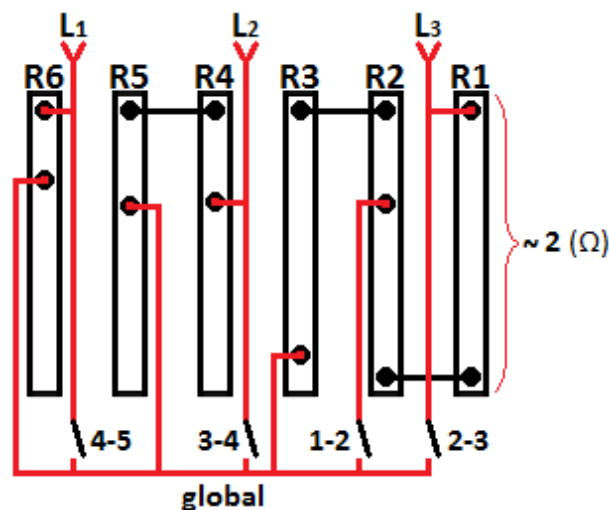
N_L – nullist erineva takistusega faaside arv.

Valemit saab kasutada reostaadi kogutakistuse arvutamiseks juhul, kui mootori libistus $S_q \leq 0,4$. Roori sellisel pöörlemissagedusel on erinevuste mõju arvatud takistustele minimaalne. [3]

Tabel 1.4. Reostaadi ИРАК.434.334.001-42 väljundite (astmete) vahelised takistused.

Reostaadi aste q	5	4	3	2	1
Faasitakistus r_{L1}, Ω	0	0,21	0,21	0,21	0,21
Faasitakistus r_{L2}, Ω	0	0	1,63	1,63	1,63
Faasitakistus r_{L3}, Ω	0	0	0	1,79	3,53
Takistus $r_{extra.1q}, \Omega$	0	0,21	0,92	1,21	1,79

Ülejäänud mootorite rootorimähiste takistuste reguleerimiseks kasutatakse reostaati ИРАК 434.331.003-08. Sellel on kolm eraldi sektsiooni ja iga sektsioon kuulub oma mootori juurde. Kõigi sektsioonide seaded on identsed, seega vaadeldakse ainult ühte sektsiooni, mida on skemaatiliselt kujutatud joonisel 1.5.



Joonis 1.5. Käigu- ja lastivankrite juurde kuuluva reostaadi ИРАК 434.331.003-08 sektsiooni skeem.

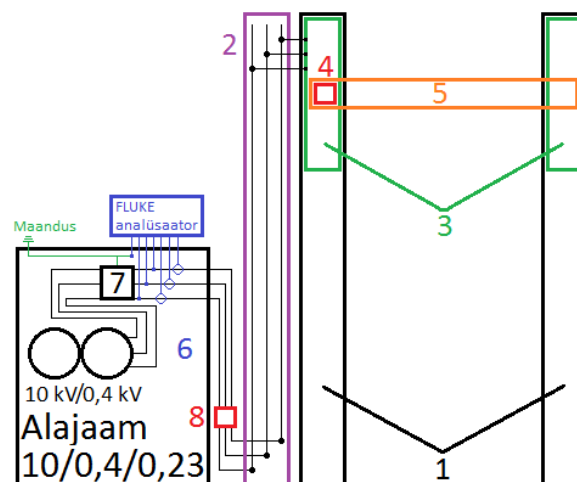
Tabel 1.5. Reostaadi ИРАК.434.334.001-42 väljundite (astmete) vahelised takistused.

Reostaadi aste q	5	4	3	2	1
Faasitakistus r_{L1}, Ω	0	0,52	0,52	0,52	0,52
Faasitakistus r_{L2}, Ω	0	0	1,30	1,30	1,30
Faasitakistus r_{L3}, Ω	0	0	0	3,22	5,98
Takistus $r_{extra.2q}, \Omega$	0	0,52	0,91	1,68	2,60

2. KATSEANDMETE KOGUMINE JA ANALÜÜS

2.1. Katseandmete kogumise meetod

Katsemeetod põhineb andmete hankimisel erinevate mõõtmistega kraana käitamise ajal. Katsed viidi läbi tühikäigul ja töörežiimil. Andmeid koguti mõõteseadme ühendamiseks kraanast toitava kaabli väljundklemmidega. Kaablite väljundid asuvad alajaamas tehase territooriumil. Toitekaabel kulgeb trafo sekundaarmähise klemmidelt alajaamas toite avariilülile ja on seejärel otse jäiga toe kaudu ühendatud kraanaga. Käiguvankrite liikumise ajal liigub kaabel spetsiaalses kaablikanalis koos vankriga. Kaablikanal on ette nähtud kaabli vaba liikumise ja mehaaniliste kahjustuste vältimiseks tööpiirkonnas. Muid kraana osasid toidetakse otse kraanale paigaldatud juhtmete kaudu. Mõõteseadme kraana ja alajaama vahelise paigutuse üldskeemi on kujutatud joonisel 2.1.



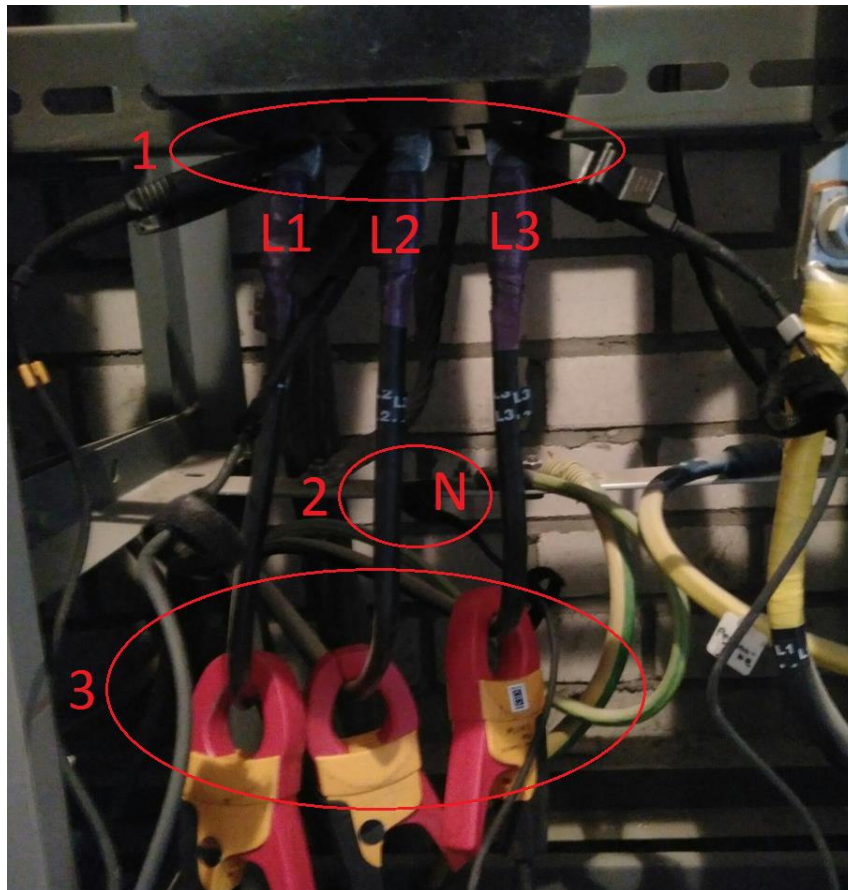
Joonis 2.1. Üldskeem. Rööpad (1), liigutatavad toitekaablid spetsiaalses kaablikanalis (2), käiguvankrid (3), kabiin (4), sild (5), analüsaatori lülitus (6), lüliti (7), avariilüliti (8).

2.2. Analüsaatori parameetrid ja tööpõhimõte

Kasutatud mõõteseadme põhiparameetrid on voolu efektiivväärtus, pinge efektiivväärtus, katsete sagedus ja teostamise aeg. Kättesaadavatest seadmetest on mõõtmisteks kõige sobivam analüsaator FLUKE 434 Three-Phase Power Quality Analyzer. Seadme tagas mitteäriliseks kasutamiseks Tallinna Tehnikaülikool. Lülitus toimus järgmiste etappide kaupa:

1. Kraana lülitati alajaama lülitiga välja;
2. Analüsaator maandati alajaama maandusega ühendamise teel;
3. Ühendati voolutangid faasijärjestuses L1, L2, L3;
4. Ühendati pingemõõtekrokodillid faasijärjestuses L1, L2, L3;
5. Pärast kõigi elementide ühenduste kontrollimist lülitati alajaama lülitiga kraana sisse.

Lahutamine toimus vastupidises järjestuses. Kõik ühendus- ja lahutustoimingud tegi tehnilise toe teenistuse juhataja Meelis Jõgevest. Joonisel 2.2. on kujutatud kõigi mõõteseadmete ühendused mõõtmiste ajal. [4]



Joonis 2.2. Analüsaatori ühendus kraana lülitiga. Mõõtekroodillide ühendus pinge mõõtmiseks (1), maandusühendus (2), voolutangide ühendus (3).

2.3. Mootorite teoreetiliste parameetrite arvutamine

Eksperimentaalsete andmete analüüsimiseks on vaja arvutada mootoripassides puuduvad tehnilised andmed, moodustada teoreetilised ja eksperimentaalsed libistuse pöördmomentid sõltuvuse graafikud ning neid võrrelda. Faasirootoriga asünkroonmootori tööpõhimõtte kirjelduses selgitati, et reguleerimine toimub rootori vooluahela takistuse muutmisega. Mida väiksem on takistus, seda suurem on mootori maksimaalsete ja minimaalsete momentide piires arendatav nurkkiirus. Näiteks vaadeldakse tabelis 1.1 esitatud parameetritega mootorit MTF412-8. Tabeli kohaselt on nimipöörlemiskiirused esitatud ühikutes p/min. Teisendus ühikutele rad/s toimub valemiga [3]:

$$\omega_N = \frac{n_N \cdot 2 \cdot \pi}{60}, \quad (2.1)$$

kus ω_N – niminurkkiirus, rad/s,
 n_N – nimipöörlemiskiirus, p/min.

Esiteks on vaja arvutada sünkroonkiirus ω_0 valemiga [3]:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (2.2)$$

kus f – sagedus, Hz,
 p – pooluspaaride arv.

Mootoril MTF412-8 on pooluspaaride arv 4, sünkroonkiirus on 78,54 rad/s ja niminurkkiirus on 74,96 rad/s. Nimilibistus S_N arvutatakse valemiga:

$$S_N = \frac{\omega_0 - \omega_N}{\omega_0}, \quad (2.3)$$

kus S_N – nimilibistus.

Seega on nimilibistus 0,047. Maksimaalne pöördemoment M_{max} arvutatakse kõigil astmetel nimipöördemomendist ja maksimaalse pöördemomendi ning nimipöördemomendi suhtest valemiga:

$$M_{max} = M_N \cdot k_M, \quad (2.4)$$

kus M_N – nimipöördemoment, Nm,
 M_{max} – maksimaalne pöördemoment, Nm,
 k_M – maksimaalse pöördemomendi ja nimipöördemomendi suhe.

Seega on nimipöördemomendi 294 Nm juures maksimaalne pöördemoment 882 Nm. Maksimaalse momendi korral arvutatakse kriitiline libistus valemiga [3]:

$$S_{maxQ} = \frac{r_r \cdot k_r}{\sqrt{r_s^2 + (x_s + x_r \cdot k_r)^2}}, \quad (2.5)$$

kus S_{maxQ} – viimase astme kriitiline libistus,
 r_r – rootori aktiivtakistus, Ω ,
 r_s – staatori aktiivtakistus, Ω ,
 x_r – rootori reaktiivtakistus, Ω ,
 x_s – staatori reaktiivtakistus, Ω ,
 k_r – takistuse transformatsioonikoefitsient.

Arvutuste järgi on reostaadi viimasel astmel maksimaalse pöördemomendi korral libistus 0,306. Ümberlülituskoefitsient λ valitakse olenevalt vajalikust arvust astmetest ja kriitilisest libistusest. See määrab libistuste ja pöördemomentide naaberastmete vahelised suhted ja määratakse valemiga [3]:

$$\lambda = \sqrt[Q]{\frac{1}{S_{maxQ}}}, \quad (2.6)$$

kus Q – reostaadi astmete arv,
 λ – ümberlülituskoefitsient.

Seega ümberlülituskoefitsient on 1,34. Minimaalne pöördemoment M_{min} määrab pöördemomendi, mille korral tuleb nurkkiiruse edasiseks suurendamiseks üle minna reostaadi järgmisele astmele, ja see arvutatakse valemiga [3]:

$$M_{min} = \frac{M_{max}}{\lambda}, \quad (2.7)$$

kus M_{min} – minimaalne pöördemoment, Nm.

Järgmises etapis arvutatakse reostaadiastmete ja rootori vooluahelate kogutakistuste väärtused. Rootori mähise ühe faasi takistus on esitatud mootori tehnilistes andmetes ja on sama nii teoreetiliste kui ka tegelike sõltuvusgraafikute moodustamisel. Arvutusteks tuleb see korrutada pinge transformatsioonikoefitsiendiga k_e ruudus, et leida staatorile taandatud rootori takistus. Töötamisel maksimaalsel astmel (kõigi mootorite puhul on see 5 aste) on reostaadi takistus null ja rootori mähised on lühistatud. Ülejäänud astmetel sõltub reostaadi takistus rootori takistusest ja astme ümberlülituskoefitsiendist ning arvutamine toimub valemitega:

$$r_Q = 0, \quad (2.8)$$

$$0 < q < Q, \quad (2.9)$$

$$r_{q_{theor}} = r_r \cdot k_e^2 \cdot (\lambda^{Q-q} - 1), \quad (2.10)$$

kus r_Q – reostaadi takistus viimasel astmel, Ω ,
 $r_{q_{theor}}$ – reostaadi teoreetiline takistus astmel q , Ω ,
 q – reostaadi astme number,
 k_e on pinge transformatsioonikoefitsient.

Reostaatide leitud takistuste järgi arvutatakse rootoriahela teoreetilised takistused:

$$R_Q = r_r \cdot k_e^2, \quad (2.11)$$

$$R_{q_{theor}} = R_Q \cdot \lambda^{Q-q}, \quad (2.12)$$

kus $R_{q_{theor}}$ – rootori ahela teoreetiline takistus astmel q , Ω ,
 R_Q – rootoriahela takistus viimasel astmel, Ω .

Tabelites 1.4 ja 1.5 on esitatud reostaadiastmete takistused arvestamata rootorimähiste takistusi.

Rootoriahela tegelik takistus R_q arvutatakse mootori MTF 412-8 puhul valemiga:

$$R_q = R_Q + r_{extra.1q} \quad (2.13)$$

ja mootori MTF 211-6 puhul valemiga:

$$R_q = R_Q + r_{extra.2q} \quad (2.14)$$

Kriitilised libistused ja neile vastavad nurkkiirused mootori maksimaalse pöördemomendi juures arvutatakse valemitega:

$$S_{max.teor\ q} = \frac{R_{q.theor}}{\sqrt{r_s^2 + (x_s + x_r \cdot k_r)^2}}, \quad (2.15)$$

$$S_{max\ q} = \frac{R_q}{\sqrt{r_s^2 + (x_s + x_r \cdot k_r)^2}}, \quad (2.16)$$

$$\omega_{max.teor\ q} = \omega_0 \cdot (1 - S_{max.teor\ q}), \quad (2.17)$$

$$\omega_{max\ q} = \omega_0 \cdot (1 - S_{max\ q}), \quad (2.18)$$

kus $S_{max\ q}/S_{max.teor\ q}$ – tegelik/teoreetiline kriitiline libistus astmel q ,

$\omega_{max\ q}/\omega_{max.teor\ q}$ – tegelik/teoreetiline nurkkiirus kriitilise libistuse korral astmel q , rad/s.

Tabelites 2.1 ja 2.2 esitatud arvutustulemuste põhjal võib järeldada, et mootorite MTF 211-6 parameetrite teoreetilised ja tegelikud väärtused on lähedased. Mootori MTF 412-8 parameetrite tegelikud väärtused erinevad teoreetilistest olulisel määral.

Tabel 2.1. Mootori MTF 412-8 puuduvate parameetrite arvutustulemused.

Aste q	1	2	3	4	5
Nimipöördemoment M_N , Nm	294,00				
Minimaalne pöördemoment M_{min} , Nm	658,21				
Maksimaalne pöördemoment M_{max} , Nm	882,00				
Astme ümberlülituskoefitsient λ	1,34				
Rootoriahela arvutatud takistus $R_{q.theor}; R_Q, \Omega$	1,33	0,99	0,74	0,55	0,41
Reostaadiastmete arvutatud takistus $r_{q.theor}; r_Q, \Omega$	0,92	0,58	0,33	0,14	0
Rootoriahela tegelik takistus $R_q; R_Q, \Omega$	2,20	1,62	1,33	0,62	0,41
Reostaadiastmete tegelik takistus $r_q; r_Q, \Omega$	1,79	1,21	0,92	0,21	0
Nimilibistus S_N	0,047				
Tegelik kriitiline libistus $S_{max\ q}$	1,74	1,27	1,032	0,48	0,32
Teoreetiline kriitiline libistus $S_{max.teor\ q}$	1	0,74	0,55	0,41	0,31
Tegelik nurkkiirus $\omega_{max\ q}$, rad/s	0	-21,21	-2,51	45,52	53,41
Teoreetiline nurkkiirus $\omega_{max.teor\ q}$, rad/s	0	20,42	35,34	46,34	54,20

Tabel 2.2. Mootori MTF 211-6 puuduvate parameetrite arvutustulemused.

Aste q	1	2	3	4	5
Nimipöördemoment M_N , Nm	77,40				
Minimaalne pöördemoment M_{min} , Nm	156,05				
Maksimaalne pöördemoment M_{max} , Nm	193,50				
Astme ümberlülituskoefitsient λ	1,24				
Rootoriahela arvutatud takistus $R_{q_{teor}}; R_Q, \Omega$	4,27	3,45	2,78	2,24	1,81
Reostaadiastmete arvutatud takistus $r_{q_{teor}}; r_Q, \Omega$	2,46	1,64	0,97	0,43	0
Rootoriahela tegelik takistus $R_q; R_Q, \Omega$	4,41	3,49	2,72	2,32	1,81
Reostaadiastmete tegelik takistus $r_q; r_Q, \Omega$	2,60	1,68	0,91	0,52	0
Nimilibistus S_N	0,085				
Tegelik kriitiline libistus S_{max_q}	1	0,80	0,65	0,52	0,42
Teoreetiline kriitiline libistus $S_{max.teor_q}$	1	0,81	0,63	0,53	0,42
Tegelik nurkkiirus ω_{max_q} , rad/s	0	20,94	36,65	50,26	60,74
Teoreetiline nurkkiirus $\omega_{max.teor_q}$, rad/s	0	21,2	37,81	49,31	60,74

2.4. Libistuse ja momendi vahelise sõltuvuse graafikute koostamine

Kõigi reostaadiastmete libistuse ja pöördemomendi vahelise sõltuvuse graafikud moodustatakse neljas alljärgnevalt loetletud etapis:

1. Esiteks moodustatakse maksimaalse, minimaalse ja nominaalse pöördemomendi sirged. Need on määratud koefitsientidega λ ja k_M . Olenevalt maksimaalse ja minimaalse momendi sirge suhtelisest asendist muudetakse astmete arvu. Teoreetilistel ja tegelikel graafikutel on need samad.
2. Seejärel moodustatakse loomulik karakteristik. Tegelike graafikute moodustamiseks kasutatakse valemeid [3]:

$$0 \leq S_Q \leq 1 \quad (2.19)$$

$$M_Q = M_{max} \cdot \frac{2+k_s}{\frac{S_Q}{S_{maxQ}} + \frac{S_{maxQ}+k_s}{S_Q}}, \quad (2.20)$$

$$k_s = \frac{r_s}{r_r \cdot k_r} \cdot 2 \cdot S_{maxQ}, \quad (2.21)$$

kus k_s – libistuskoefitsient,

M_Q – loomuliku karakteristiku pöördemoment libistuse S_Q , Nm,

S_Q – loomuliku karakteristiku libistus.

Moodustamine toimub libistusväärtuste S_Q sisestamisega valemisse ja neile vastavate pöördemomentide M_Q leidmisega.

3. Tegelike takistuste kunstlikud karakteristikud moodustatakse samal põhimõttel valemitega:

$$M_q = M_{max} \cdot \frac{2+k_s}{\frac{S_q}{S_{maxq}} + \frac{S_{maxq}}{S_q} + k_s}, \quad (2.22)$$

$$k_s = \frac{r_s}{r_r \cdot k_r} \cdot 2 \cdot S_{maxq}, \quad (2.23)$$

kus M_q – kunstliku karakteristiku pöördemoment libistusel S_q reostaadi astmel q , Nm,
 S_q – kunstliku karakteristiku libistus reostaadi astmel q .

Teoreetiliste graafikute puhul asendatakse neis valemities parameeter S_{maxq} parameetriga $S_{max.teorq}$. Pärast maksimaalse pöördemomendini jõudmist libistuse suurenemisel pöördemoment väheneb.

4. Moodustamise õigsuse kontrollimiseks võib tõmmata sirged läbi punktide, kus karakteristikud lõikuvad minimaalse momendiga ja puutuvad maksimaalse momendiga. Kõik sirged lõikuvad punktis Z, kus libistus on null.

Saadud sõltuvuse graafikut on lisal 4 ja 5. Mootorite MTF 211-6 puhul reaalsete ja teoreetiliste takistustega graafikud üksteisest peaaegu ei erine. See tähendab, et rootoriahel on projekteeritud õigesti ja kui kraana kõik osad töötavad normaalselt, reguleeritakse kiirust saadud sõltuvusgraafikute kohaselt. Mootori MTF 412-8 graafikute korral on teoreetiliste ja tegelike karakteristikute vahel olulised erinevused. See võib olla põhjustatud juhtmete kahjustustest või lühistest, muudatustest juhtimisahelas või tahtlikust reguleerimisest tööks antud vahemikus, et vähendada nurkkiirust.

Töötamisel lastiga ei tohi tööpunkti langetada alla libistussirge S_{maxq} , et vältida mootori seiskumist liiga väikese pöördemomendi tõttu. Seetõttu tuleb kiiruse vähendamiseks üle minna reostaadi eelmisele astmele. Kiiruse sujuva reguleerimisvõimaluse puudumine koos väikese reguleerimisulatusega on faasirootoriga asünkroonmootorite tõsine puudus.

2.5 Katseandmete analüüs

2.5.1 Tühikäigurežiimi analüüs

Tühikäigurežiimis liigutavad mootorid kraanat ja selle osi koormamata. See katse on vajalik energia tarbimise ja kvaliteedi määramiseks ilma lastita ja võrdlemiseks tööga koormusrežiimil. Tühikäigu andmete kogumiseks viidi läbi kokku 15 katset – iga ajami kohta 5.

Iga mehhanismi liigutati kõigis katsetes sama eelmääratud kauguse võrra. Liigutamist viidi läbi reostaadi ainult ühel astmel, mis oli igas katses erinev. Analüsaatoriga saadud andmetest kasutati

järgmisi andmeid: tööaeg, keskmine, maksimaalne ja minimaalne aktiivvõimsus, keskmine reaktiivvõimsus, keskmine pinge ja keskmine $\cos(\varphi)$ väärtus. Liikumiskiirus arvutati valemiga:

$$V_q = \frac{L}{t_q}, \quad (2.24)$$

- kus V_q – liikumiskiirus reostaadi astmel q , m/s,
 t_q – vahemaa L läbimiseks kulunud aeg reostaadi astmel q , s,
 L – kraana või selle osa läbitud vahemaa, m.

Töötamise ajal liigutas iga ajam teatud massi, mis arvutati lasti ja kraanaelementide kaalu alusel ja mis on esitatud tabelis 2.3.

Tabel 2.3. Tööseisukorras kraana ja selle mõnede elementide mass. [1]

Element	Elemendi mass m , t
Tööseisukorras kraana	39,00
Lastivanker	1,15
Konksuhoidik	0,690
Traaversid	0,670

Käiguvankri ajamimootorite 211-6 MTF töö analüüsimiseks läbis kraana erinevate kiirustega vahemaa 10 meetrit. Kuna kraanat liigutati kahe mootoriga, saadi võimsuse väärtused korruga kahele mootorile. Kraana liikus tegelikult umbes 9,5 meetrit ja ülejäänud osa teest läbis kraana pidurdamise ajal inertsiga. Katsed näitasid, et kiirus reostaadi astmel 5 vastab kraana passis esitatud väärtusele (0,413 m/s), kõigi astmete ja faaside pinge on vahemikus 225 kuni 232 V ja $\cos(\varphi)$ – keskmine väärtus on vahemikus 0,30 kuni 0,32. Lisal 6 (seksioon A) esitatud graafikutel on näha aktiivvõimsuste võnkumist. Aktiivvõimsuse hüpe mootori käivitamise ajal on tingitud käivitusvoolust. Aktiivvõimsuse olulised kõikumised käivitus- ja seiskamishetkede vahel on tingitud kraana ja mootorite endi vibratsioonist, rööbaste või käigurataste defektidest ning teiste liikuvate osade või lasti inertsist. Käiguvankri ajamite aktiivvõimsuse kõikumised on põhjustatud eelkõige kraana liikumisest ja teguritest, mis kutsuvad esile võnkumisi, mis mõjuvad kogu tarindile. Kõigi katsete ajal registreeriti faasil L1 pidevalt võimsus 0,73 kW. See on tingitud asjaolust, et see faas toidab juhikabiini ja releekontaktori juhtahelat. Tabelis 2.4. on esitatud käiguvankrite ajamimootorite MTF 211-6 andmed tühikäigul.

Tabel 2.4. Käiguvankrite ajamimootorite MTF 211-6 andmed tühikäigul reostaadi erinevatel astmetel.

Astme number q	1	2	3	4	5
Vahemaa L , m	9,50				
Liikumiskiirus V_q , m/s	0,244	0,297	0,380	0,413	0,413
Katse aeg t_q , s	39	32	25	23	23
Nimivõimsus P_N , kW	15,00				
Maksimaalne aktiivvõimsus $P_{max,q}$, kW	11,12	12,10	14,67	16,08	18,24
Keskmine aktiivvõimsus $P_{avg,q}$, kW	7,64	7,45	7,47	7,56	7,34
Minimaalne aktiivvõimsus $P_{min,q}$, kW	6,71	7,46	6,56	7,06	6,50
Keskmine reaktiivvõimsus $Q_{avg,q}$, kVar	26,18	26,35	25,17	26,76	24,99
Keskmine pingeväärtus $U_{avg,q}$, V	227,8	227,9	227,8	227,9	227,6
Keskmine vooluväärtus $I_{avg,q}$, A	40,67	40,62	40,58	40,56	40,43
Keskmine $\cos(\varphi)$ -väärtus	0,30	0,31	0,32	0,30	0,31
Liigutatav mass m , t	39,00				

Järgmise viie katse eesmärk oli uurida lastivankri ajamimootori MTF 211-6 tööd. Vahemaa oli ilma pidurdusteeta samuti 9,5 meetrit. Liikumiskiirus reostaadi viimasel astmel on peaaegu võrdne nimiväärtusega (0,4 m/s) ja $\cos(\varphi)$ ning pingeväärtused on peaaegu identsed käiguvankrite ajamimootorite andmetega. Reostaadiastmete ümberlülitamisel kiirus peaaegu ei muutunud. See tähendab et tühikäigul katse ajal lastivankri kiiruse reguleerimine praktiliselt puudus ja oli lähedal nimikiirusele. Lisas 6 (seksioon B) on esitatud lastivankrite ajamite graafikud.

Tabel 2.5. Lastivankri ajamimootori MTF 211-6 andmed tühikäigul reostaadi erinevatel astmetel.

Astme number q	1	2	3	4	5
Vahemaa L , m	9,50				
Liikumiskiirus V_q , m/s	0,365	0,380	0,396	0,396	0,396
Katse aeg t_q , s	26	25	24	24	24
Nimivõimsus P_N , kW	7,50				
Maksimaalne aktiivvõimsus $P_{max,q}$, kW	5,95	5,80	5,67	5,64	6,25
Keskmine aktiivvõimsus $P_{avg,q}$, kW	3,80	3,47	3,55	3,41	3,56
Minimaalne aktiivvõimsus $P_{min,q}$, kW	3,48	3,22	3,42	3,11	3,18
Keskmine reaktiivvõimsus $Q_{avg,q}$, kVar	11,41	11,29	11,43	11,45	11,72
Keskmine pingeväärtus $U_{avg,q}$, V	228,7	228,5	228,6	228,5	229,1
Keskmine vooluväärtus $I_{avg,q}$, A	17,93	17,63	17,85	17,80	18,13
Keskmine $\cos(\varphi)$ -väärtus	0,33	0,31	0,31	0,30	0,29
Liigutatav mass m , t	2,51				

Tõstemehhanismi ajamimootor on kõige võimsam ja selle graafikud (lisa 6, seksioon C) näitavad kõige märgatavamalt erinevust reostaadi erinevate astmete kasutamisel. Kui käigu- ja lastivankrite eelnevas käsitletud ajamiparameetrid peaaegu ei olenenud liikumissuunast, siis tõstemehhanismil oli lasti langetamiseks vaja palju vähem energiat kui tõstmiseks.

Katse tegemisel konksuhoidiku ja traaversite liikumise analüüsimiseks valiti vahemaa 5,8 meetrit. Katsel reostaadi viiendal astmel tõsteti lasti kiirusega, mis oli peaaegu võrdne nimikiirusega (0,73). Kõigil astmetel ja faasidel oli pinge vahemikus 226 V kuni 230 V. Reostaadiastmete ümberlülitamine langetamise ja tõstmise kiirust oluliselt ei mõjutanud.

Tabel 2.6. Tõstemehhanismi lastivankri ajamimootori MTF 412-8 andmed tühikäigul reostaadi erinevatel astmetel.

Astme number q	1	2	3	4	5
Vahemaa L , m	5,70				
Liikumiskiirus V_q , m/s	0,066	0,070	0,069	0,071	0,071
Liikulissuund	Üles	Alla	Üles	Alla	Üles
Katse aeg t_q , s	86	81	83	80	80
Nimivõimsus P_N , kW	22,00				
Maksimaalne aktiivvõimsus $P_{max\,q}$, kW	15,25	13,48	11,17	10,14	9,44
Keskmine aktiivvõimsus $P_{avg\,q}$, kW	7,27	5,69	6,96	5,71	6,88
Minimaalne aktiivvõimsus $P_{min\,q}$, kW	6,70	5,57	6,78	5,54	6,80
Keskmine reaktiivvõimsus $Q_{avg\,q}$, kVar	30,39	30,05	29,87	30,68	30,56
Keskmine pingeväärtus $U_{avg\,q}$, V	228,3	225,9	227,3	229,3	228,8
Keskmine vooluväärtus $I_{avg\,q}$, A	45,80	45,05	45,31	45,88	46,04
Keskmine $\cos(\varphi)$ -väärtus	0,23	0,2	0,23	0,19	0,23
Liigutatav mass m , t	1,36				

Mõõtmistulemused on väga sarnased, kuna ajamid töötasid minimaalsete koormustega. Pöördemomendi M sõltuvus aktiivvõimsusest P konstantsel nurkkiirusel ω_{const} määrati valemiga:

$$M = \frac{P}{\omega_{const}} \quad (2.25)$$

Tühikäigul on mootorite pöördemoment nominaalsest oluliselt väiksem. Lisadelt 4 ja 5 on näha, et mida väiksem on pöördemoment, seda väiksem on libistuse muutus ja selle tulemusena seda väiksem on kiiruse muutus. Mootori reaktiivvõimsus jäi reostaadi kõigil astmetel samaks, kuid tühikäigul oli nominaalsest mitu korda väiksem.

2.5.2 Koormatud kraanaajamite töö analüüs

Teisaldatava lastina kasutati betoonkatust, mille mass oli 4,9 tonni. Suurema massiga lasti ei saanud kasutada, kuna sagedased järsud peatamised võivad põhjustada lasti ohtlikku juhitud inertsliikumist ja kahjustada ettevõtte vara. Töörežiimis viidi läbi 30 katset – igal ajal 10.

Võrreldes tühikäigurežiimiga ilmneseid töörežiimis suurimad muutused tõstemehhanismi ajamimootoris MTF 412-8, kui lasti teisaldati 3,8 m võrra. lisalt 7 järeldeb, et tõstmisel osutub aktiivvõimsuse väärtus märkimisväärselt suuremaks kui langetamisel, sest langetamisel kulub energiat ainult lasti kukkumise vältimiseks raskusjõu mõjul. Lasti langetamise kiirus astmel 1, 2 ja 3 oli nimikiirusest veidi suurem. Tühikäigurežiimist väiksema aktiivvõimsuse komponendi tõttu oli $\cos(\varphi)$ väiksem kui katsel koormuseta.

Kiiruse erinevus käikude 2 ja 3 ning käikude 4 ja 5 vahel peaaegu puudus. Sellest võib järeldada, et mootor kasutas 5 asemel tegelikult vaid 3 töökäiku. Aktiivvõimsuse suurema tarbimise tõttu on energia kvaliteet võrreldes tühikäigurežiimiga märkimisväärselt kasvanud. Reaktiivvõimsus jäi kõigis katsetes ligikaudu samaks ja pinge oli vahemikus 224 V kuni 233 V. Kiiruse kõikumised katse ajal olid ebaolulised.

Tabel 2.7. Tõstemehhanismi ajamimootori MTF 412-8 andmed töörežiimis reostaadi erinevatel astmetel.

Astme number q	1	2	3	4	5
Vahemaa L , m	3,80				
Liikumiskiirus V_q , m/s	0,057 0,076	0,062 0,076	0,064 0,076	0,069 0,073	0,070 0,072
Liikumissuund	Üles Alla				
Katse aeg t_q , s	67 50	61 50	60 50	55 52	54 53
Nimivõimsus P_N , kW	22,00				
Maksimaalne aktiivvõimsus $P_{max\,q}$, kW	12,39 10,76	16,61 10,34	18,57 7,12	17,61 7,25	14,35 7,13
Keskmine aktiivvõimsus $P_{avg\,q}$, kW	10,68 2,48	10,49 2,31	10,20 2,28	10,35 2,31	10,33 2,28
Minimaalne aktiivvõimsus $P_{min\,q}$, kW	10,35 2,07	10,25 1,88	10,05 1,95	10,00 1,88	10,00 1,92
Keskmine reaktiivvõimsus $Q_{avg\,q}$, kVar	29,94 30,93	29,55 31,10	29,02 30,53	30,13 31,45	29,99 31,57
Keskmine pingeväärtus $U_{avg\,q}$, V	228,6 228,1	228,1 228,1	228,0 228,0	228,7 228,0	228,0 228,9
Keskmine vooluväärtus $I_{avg\,q}$, A	46,58 45,38	46,68 45,74	45,16 45,78	46,86 45,94	45,48 46,53
Keskmine $\cos(\varphi)$ -väärtus	0,34 0,09	0,32 0,08	0,33 0,08	0,33 0,08	0,33 0,08
Liigutatav mass m , t	6,26				

Katsete ajal teisaldasid käiguvankrite ajamimootorid MTF 211-6 46,41 tonnise massi 9,5 meetri kaugusele ja nende pingete ning aktiiv- ja reaktiivvõimsuste graafikud esitatud lisas 8 (seksioon A). Erand oli katse, kus liiguti tagasi reostaadi esimesel astmel (mootorid töötasid liikumisel 10,5 m kaugusele). Liikumise kiirus ja $\cos(\varphi)$ -väärtus reostaadi eri astmetel ei muutunud. Reaktiivvõimsus on tühikäigu väärtustega peaaegu sama. Töö käigus esinesid olulised kõikumised, mis olid seotud lasti kõikumisega liikumisel.

Tabel 2.8. Käiguvankrite ajamimootorite MTF 211-6 töö andmed töörežiimis reostaadi erinevatel astmetel.

Astme number q	1	2	3	4	5
Vahemaa L , m	9,5 10,5	9,5			
Liikumiskiirus V_q , m/s	0,306 0,300	0,306 0,306	0,317 0,317	0,327 0,327	0,339 0,339
Liikumissuund	Edasi Tagasi				
Katse aeg t_q , s	31 35	31 31	30 30	29 29	28 28
Nimivõimsus P_N , kW	15,00				
Maksimaalne aktiivvõimsus P_{max_q} , kW	14,00 16,41	16,72 18,05	23,29 14,06	13,15 16,78	15,84 19,02
Keskmine aktiivvõimsus P_{avg_q} , kW	7,72 7,84	7,62 7,91	7,20 7,27	7,01 7,34	7,05 7,56
Minimaalne aktiivvõimsus P_{min_q} , kW	6,36 6,11	6,01 5,78	5,22 5,98	5,64 5,42	5,23 5,32
Keskmine reaktiivvõimsus Q_{avg_q} , kVar	27,29 26,00	27,24 26,56	26,03 26,32	26,83 26,01	26,68 26,94
Keskmine pingeväärtus U_{avg_q} , V	226,8 225,1	227,7 228,2	228,2 226,5	227,9 228,7	226,3 228,3
Keskmine vooluväärtus I_{avg_q} , A	41,44 40,38	40,82 40,42	41,47 40,21	40,85 41,01	40,29 41,71
Keskmine $\cos(\varphi)$ -väärtus	0,27 0,26	0,25 0,28	0,26 0,27	0,25 0,28	0,26 0,26
Liigutatav mass m , t	46,41				

Käiguvankri ajamimootor MTF 211-6 tekitab 7,41-tonnise massi 8,5 meetri kaugusele. Teisalduskaugust vähendati lasti tugeva kõikumise tõttu. Liikumiskiirused muutusid reostaadi erinevatel astmetel ebaolulisel määral. Energia kvaliteet samuti peaaegu ei muutunud. Võimsuse suured kõikumised on seotud lasti kõikumisega ja vaadeldakse lisa 8 (sektioon B).

Tabel 2.9. Lastivankri ajamimootori MTF 211-6 töö andmed töörežiimis reostaadi erinevatel astmetel.

Astme number q	1	2	3	4	5
Vahemaa L , m	8,5				
Liikumiskiirus V_q , m/s	0,327 0,327	0,340 0,340	0,340 0,340	0,354 0,340	0,354 0,354
Liikumissuund	Paremale Vasakule				
Katse aeg t_q , s	26 26	25 25	25 25	24 25	24 24
Nimivõimsus P_N , kW	7,50				
Maksimaalne aktiivvõimsus $P_{max\,q}$, kW	6,93 6,48	5,23 5,67	4,68 5,01	5,27 6,14	6,18 5,26
Keskmine aktiivvõimsus $P_{avg\,q}$, kW	4,01 4,12	3,74 4,00	3,62 3,68	3,79 3,81	3,67 3,84
Minimaalne aktiivvõimsus $P_{min\,q}$, kW	3,12 3,05	2,67 3,06	2,52 2,86	2,77 2,69	2,49 2,69
Keskmine reaktiivvõimsus $Q_{avg\,q}$, kVar	11,80 11,60	11,20 11,20	10,99 10,88	11,20 11,28	11,60 11,52
Keskmine pingeväärtus $U_{avg\,q}$, V	229,8 227,6	227,5 229,4	229,4 227,4	227,9 228,7	227,9 228,1
Keskmine vooluväärtus $I_{avg\,q}$, A	18,30 17,30	17,49 18,17	17,64 17,69	17,92 17,75	17,41 17,92
Keskmine $\cos(\varphi)$ -väärtus	0,31 0,32	0,29 0,33	0,31 0,31	0,29 0,33	0,31 0,31
Liigutatav mass m , t	7,41				

2.6. Mootorite kasuteguri arvutamine

Mootori kasutegur on mootori rootorimähiste aktiivvõimsuse ja võrgust saadud aktiivvõimsuse suhe. Seega kasutatakse lasti tõstmisel ja vankrite liigutamisel mootori kasuteguri η_q arvutamiseks valemit:

$$\eta_q = \frac{P_{efficient\,q}}{P_{avg\,q}} \cdot 100, \quad (2.26)$$

kus $P_{efficient}$ – rootorimähiste aktiivvõimsus astmel q , kW,

η_q – mootori kasutegur astmel q , %.

Aktiivvõimsuse kaod olenevad libistusest, mida katsete ajal ei registreeritud, mistõttu kasutati mootori MTF 412-8 libistuse arvutamiseks valemit:

$$S_q = \frac{n_0 - \frac{k_{burton} \cdot L \cdot 60}{\pi \cdot D_1 \cdot t_q} \cdot i_1}{n_0}, \quad (2.27)$$

kus n_0 – mootori sünkroonpöörlemiskiirus, p/min,

k_{burton} – polüspasti kordsus,

D_1 on trumli läbimõõt, m,

i_1 – tõstemehhanismi mootori reduktori ülekandearv.

Käiguvankrite mootorite MTF 211-6 puhul arvutatakse libistus valemiga:

$$S_q = \frac{n_0 \frac{L \cdot 60}{\pi \cdot D_2 \cdot t_q} \cdot i_2}{n_0}, \quad (2.28)$$

kus D_2 – käiguvankrite rataste läbimõõt, m,

i_2 – käiguvankrite mootorite reduktorite ülekandearv.

Lastivankrit liigutatakse trossiga, seetõttu arvutatakse libistus valemiga:

$$S_q = \frac{n_0 \frac{L \cdot 60}{\pi \cdot D_3 \cdot t_q} \cdot i_3}{n_0}, \quad (2.29)$$

kus D_3 – trossi trumli läbimõõt, m,

i_3 – lastivankri mootori reduktori ülekandearv.

Roorimähiste võimsuse arvutamiseks on vaja leida rootori EMJ. Staatori ja rootori EMJ on omavahel seotud ning olenevad pinge transformatsioonikoefitsiendist k_e ja libistusest S_q . Esmalt arvutatakse staatori pinget ja voolu vaheline nurk kasutades valemit:

$$\varphi_1 = \cos^{-1} \left(\frac{P_{avgq}}{\sqrt{P_{avgq}^2 + Q_{avgq}^2}} \right), \quad (2.30)$$

kus φ_1 – pinget U_{sq} ja voolu I_{avgq} vaheline nurk, °,

P_{avgq} – keskmine staatori aktiivvõimsus astmel q , kW,

Q_{avgq} – keskmine staatori reaktiivvõimsus astmel q , kVar.

Staatori EMJ arvutatakse valemiga [5]:

$$E_{sq} = -U_{sq} + I_{avgq} \cdot \sqrt{r_s^2 + x_s^2} \quad (2.31)$$

kus E_{sq} on staatori EMJ astmel q , V.

Roori mähiste vool indutseeritakse staatori EMJ-ga ja arvutatakse valemiga [5]:

$$I_{rq} = \frac{\frac{E_{sq}}{k_e} \cdot S_q}{\sqrt{(R_q^2 + (x_r \cdot S_q)^2)}} \quad (2.32)$$

kus I_{rq} – rootori mähiste vool reostaadi astmel q , A.

Nüüd saab arvutada rootori mähiste aktiivvõimsuse valemiga [5]:

$$P_{efficient\ q} = 3 \cdot I_{r_q}^2 \cdot R_q \cdot C \cdot \frac{(1-S_q)}{S_q} \quad (2.33)$$

Tabel 2.10. Arvutatud kasutegurid lasti tõstmisel mootoriga MTF 412-8.

Aste q	1	2	3	4	5
Rootoriahela takistus R_q, Ω	2,20	1,62	1,33	0,62	0,41
Libistus S_q	0,23	0,15	0,14	0,061	0,044
Mootori kasutegur $\eta_{el}, \%$	36,17	41,55	43,19	49,68	52,25

Kui energiat tarbiti võrgust, suurenes lasti tõstmisel mootori kasutegur rootoriahela takistuse vähenemise tõttu. Kraana kasutegur reostaadi maksimaalsel astmel jäi väikese koormuse tõttu üsna väikeseks.

Tabel 2.11. Arvutatud kasutegurid lasti teisaldamisel edasi mootoritega MTF 211-6.

Aste q	1	2	3	4	5
Rootoriahela takistus R_q, Ω	4,41	3,49	2,72	2,32	1,81
Libistus S_q	0,34	0,34	0,31	0,29	0,27
Mootori kasutegur $\eta_{el}, \%$	42,93	58,28	59,80	67,98	73,98

Tabel 2.12. Arvutatud kasutegurid lasti teisaldamisel tahapoole mootoritega MTF 211-6.

Aste q	1	2	3	4	5
Rootoriahela takistus R_q, Ω	4,41	3,49	2,72	2,32	1,81
Libistus S_q	0,35	0,34	0,31	0,29	0,27
Mootori kasutegur $\eta_{el}, \%$	42,98	57,37	59,95	66,10	71,20

Mehaanilise osa kasutegurit mõjutab oluliselt rööbaste kalle, mida mööda liiguvad käiguvankrid. Seetõttu kulus liikumisel edasi teatud kalde tõttu vähem energiat.

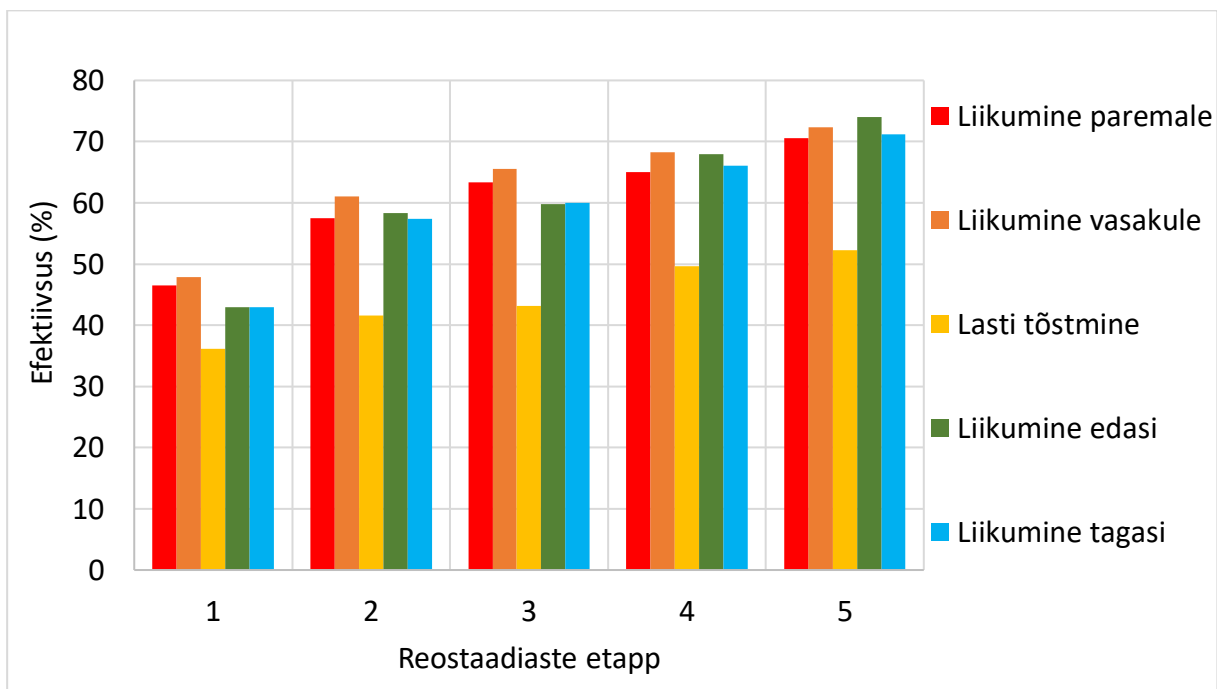
Tabel 2.13. Arvutatud kasutegurid lasti teisaldamisel paremale poole mootoriga MTF 211-6.

Aste q	1	2	3	4	5
Rootoriahela takistus R_q, Ω	4,41	3,49	2,72	2,32	1,81
Libistus S_q	0,32	0,30	0,30	0,27	0,27
Mootori kasutegur $\eta_{el}, \%$	46,45	57,51	63,32	65,02	70,54

Tabel 2.14. Arvutatud kasutegurid lasti teisaldamisel vasakule mootoriga MTF 211-6.

Aste q	1	2	3	4	5
Rootoriahela takistus R_q, Ω	4,41	3,49	2,72	2,32	1,81
Libistus S_q	0,32	0,30	0,30	0,27	0,27
Mootori kasutegur $\eta_{el}, \%$	47,85	61,09	65,54	68,23	72,36

Lastivanker liigub samuti teatud kaldel, mis samuti mõjutab seda liigutava ajamimootori kasuteguri väärtust. Mootorite kasutegurit erinevatel reostaadiastmetel on kujutatud joonisel 2.3.



Joonis 2.3. Mootorite kasuteguri sõltuvus reostaadiastmest erinevates liikumissuundades.

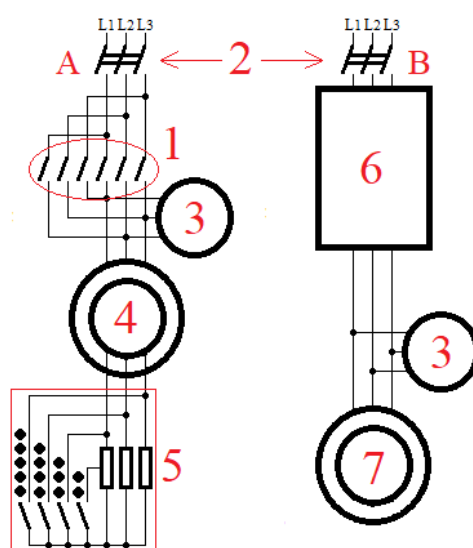
Selle peatüki kokkuvõtteks võib öelda, et faasirootoriga mootorid töötavad reostaadi madalatel astmetel väikese kasuteguriga. Madal kasutegur on seotud samuti ebapiisava koormusega. Väikese koormuse korral kiiruse reguleerimine peaaegu puudub, mistõttu kraana uuendamine võimaldab märkimisväärselt vähendada energiakulu ja tagada paindlikuma juhtimise.

3. UUENDUSVÕIMALUSTE UURIMINE JA NENDE TÕHUSUSE ANALÜÜS

3.1 Uuendusmeetodi kirjeldus

Jõuahela põhiprobleem on faasirooriga asünkroonmootorite kasutamine. Erinevalt lühisrootoriga asünkroonmootoritest, on nende rootoritel täielik kolmefaasiline mähis. Sellepärast on sellist tüüpi mootorite aktiiv- ja induktiivtakistused palju suuremad ning selle tulemusena energia kvaliteet palju madalam ja $\cos(\varphi)$ väiksem. Faasirootori mähiste otsad on ühendatud võllile kinnitatud kontaktrõngastega, mis on isoleeritud nii üksteisest kui ka võllist. Rootori mähistega on kontaktrõngaste ja harjade kaudu ühendatud reguleerimisreostaadid. Reostaate on vaja vajaliku pöördemomendi tagamiseks võllil ja pöörlemiskiiruse reguleerimiseks, kuid töö käigus suurendavad need oluliselt aktiivvõimsuse kadusid tarbitava energia osalise soojuseks muundumise tõttu. [6]

Lühisrootoriga asünkroonmootoritel on paremad energiakvaliteedi näitajad ja nende puhul on energiakadu väiksem, kuid neid ei saa otse kasutada kraanaajamitel nende ebapiisava käivitusmomendi ja kiiruse reguleerimise võimaluse puudumise tõttu. Selle probleemi lahendamiseks kasutatakse tänapäeva tööstustehnikas sagedusmuundureid. Nende abil saab muundada voolu, sageduse ja pinget nii, et mootor töötab vajaliku pöördemomendi ja pöörlemiskiirusega. Seega tuleb energiakvaliteeti parandamiseks ja aktiivvõimsuse kadude vähendamiseks moderniseerida kraanaajamid, kus kasutatakse faasirooriga mootoreid. Alljärgnevalt on käsitletud võimalust asendada seda tüüpi mootorid lühisrootoriga asünkroonmootoritega ja mootoriparameetrite kohaste sagedusmuunduritega. Lisal 9 on kujutatud modernisatsioonitav täis jõuahela skeem.



Joonis 3.1. Olemasoleva (A) ja uue (B) ajami skeem. Mootori pöörlemissuuna lüliti (1), toitelüliti (2), elektrohüdrauliline pidur (3), faasirooriga asünkroonmootor (4), käivitusreostaatide süsteem (5), sagedusmuundur (6), lühisrootoriga asünkroonmootor (7).

Olemasoleva mudeli korral juhitakse ajameid releekontaktori ahelaga. Pärast nende ajamite moderniseerimist juhitakse neid sagedusmuunduritega. Nii välditakse volukadu releekontaktori ahelas, suurendatakse reguleerimistäpsust ja võimaldatakse seadistada mootorite kõiki võimalikke töörežiime. Sellise juhtimise realiseerimiseks on vaja muuta juhikabiini juhtseadmeid ja ühildada juhtimisahela elementide töö sagedusmuundurite tööga. Sel juhul käitatakse töötulesid, tuulekaitsemootoreid, juhikabiini näidikuid ja toite sisselülitamist releekontaktori ahelaga, aga peamootorite töörežiimi juhitakse sagedusmuunduritega.

Pidurimehhanismid töötavad vastuvõetaval tasemel, mistõttu neid ei ole vaja asendada. See vähendab moderniseerimiskulusid ja lihtsustab arvutusi. Ajamireduktorid tuleb välja vahetada ainult siis, kui seoses uute paigaldatavate mootoritega on vaja muuta ülekandearvu.

3.2 Uute asünkroonmootorite valimise kriteeriumid

Moderniseerimiseks on uuritaval tõstekraanal vaja vahetada 4 mootorit. Ajamimootorid tuleks valida nii, et nende parameetrid ühilduksid voluvõrgu parameetritega ega vähendaks kraana tõstevõimet ja kraanaosade liikumiskiirust. Pingete ja sageduste väärtused peaksid jääma samaks nagu olemasolevatel mootoritel. Võimsus peab olema olemasolevaga võrdne või sellest suurem. Käiturile ülekantav uus pöördemoment peab olema sama või suurem kui olemasoleval mootoril ja reduktoril.

Nimipöördemoment ja nurkkiirus on omavahel seotud. Mida väiksem on püsivõimsusel nurkkiirus, seda suurem on pöördemoment. Sel põhjusel valmistatakse kraanamootorid suure momendi tagamiseks suure pooluspaaride arvuga. Momendi suurendamiseks kasutatakse ka reduktoreid, mis vähendavad nurkkiirust ja suurendavad momenti. Kuid pooluspaaride suurema arvu puhul halveneb energia kvaliteet. Valitakse suurima kasuteguriga ja energia kvaliteediga mootor, võrreldakse nurkkiirust ja pöördemomenti nimiväärtustega ning vajadusel valitakse teine reduktor, et tagada olemasolevad vajalikud nurkkiirused ja momendid. Olemasolevate mootorite parameetrid on esitatud tabelis 1.1.

Kõrge lülitussageduse tõttu tuleb kraanamootorite puhul järgida spetsiaalset kuumuskindluse klassi. Olenevalt tegevuse liigist omistatakse igale mootorile oma klass, mida tavaliselt tähistab mootori nime viimane täht. Uuritud kraana mootorite puhul kasutatakse klassi F (sobib ka kõrgem klass H), mille lubatud temperatuur on 145 °C (klassi H puhul on lubatud temperatuur 180 °C). [7]

Mootorid asuvad käiguvankritel ja kraanasillal, mis asub katmata laos. See tähendab, et mootorid on vahetult allutatud keskkonnamõjudele ja kaitse puudumisel põhjustab see mootorite kahjustusi või tõrkeid. Vältimaks võõrkehade ja vedelike sattumist mehhanismidesse, tuleb järgida rahvusvahelist IP-

kaitse standardit. Kraana käitamistingimustele sobib kaitsetase IP55. Sellel tasemel on seadmel tolmuaitse. Mõningal määral tolmu võib siseneda, kuid see ei häiri seadme tööd. Samuti on tagatud kaitse vihma ja mis tahes suunast tuleva veejoa eest. [8]

Mootorite tööd mõjutab välistemperatuur. Kui mootorile seatud piirväärtused ületatakse, võib mootor töötada valesti või saada kahjustusi. Eesti jaoks on kõige sobivam mõõdukas kliimaklass, mille korral on lubatud töötada välistemperatuuri vahemikus -40 °C kuni $+40\text{ °C}$.

3.2.1 Tõstemehhanismi mootori valimine

Olemasoleva tõstemehhanismi mootori suurim võimsus on 22 kW ja see sooritab töö kõige olulisemat osa – tõstab ja langetab lasti. Parameetrite esmauuringu kohaselt on kõige sobivam lühisrootoriga asünkroonmootor – M2AA 200 MLB tootjalt ABB Asea BrownBoveri Ltd. See mootor sobib sageduse, pinge ja voolu järgi ning sellel on parimad kasuteguri ja energia kvaliteedi näitajad. Mootoril on kaitsetase IP55 ja kuumuskindluse klass F, mis samuti vastab kraanamootorile esitatavatele nõuetele. Korpuse teostus vastab kliimatingimuste mõõdukale klassile. [9]

Selle mootori nurkkiirus 969 p/min on olemasoleva mootori nurkkiirusest 715 p/min suurem, mis tähendab, et tuleb vahetada reduktor. Olemasolevas mootoris kasutatakse silindrilist kaheastmelist horisontaalset tüüpi reduktorit PM-650-40-22M. Selle ülekandearv on 40. Uue reduktori valimiseks tuleb arvutada väljundvõlli nurkkiirus valemiga:

$$n_2 = \frac{n_1}{i_{old}}, \quad (3.1)$$

kus n_1 – sisendvõlli nurkkiirus, p/min,

n_2 – väljundvõlli nurkkiirus, p/min,

i_{old} – olemasoleva reduktori ülekandearv.

Seega on sisendnurkkiiruse 715 p/min ja ülekandearvu 40 korral väljundvõlli nurkkiirus 17,88 p/min.

Nende andmete põhjal saab valida uue reduktori vajalik ülekandearv, mis arvutatakse valemiga:

$$i_{new} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (3.2)$$

kus i_{new} – uue reduktori ülekandearv.

Arvutustulemuste kohaselt on ülekandearv 54,19. Kõige sobivam on spetsiaalne kraana silindriline kolmeastmeline reduktor BKY-765-56-22M tootjaettevõttelt ООО Редуктор. Selle ülekandearv on 56, väljundvõlli maksimaalne pöördemoment on 14,9 kNm ja sisendvõlli maksimaalne nurkkiirus 1000 p/min. Väljundvõlli nimipöördemoment töörežiimis 40% lülitusajaga on 11,87 kNm. Valemiga 3.1 arvutati väljundvõlli uus nurkkiirus 17,30 p/min. Reduktori väljundvõlli nimipöördemoment arvutatakse valemitega [10]:

$$M_{nom2} = M_{nom1} \cdot i, \quad (3.3)$$

$$M_{nom1} = M_N, \quad (3.4)$$

kus M_{nom1} – reduktori sisendvõlli nimipöördemoment, Nm,

M_{nom2} – reduktori väljundvõlli nimipöördemoment, Nm,

i – reduktori ülekandearv.

Olemasoleva mootori puhul on nimipöördemoment 294 Nm ja reduktori väljundpöördemoment on 11,76 kNm. Uue mootori nimipöördemoment on 216 Nm ja reduktori väljundpöördemoment on 12,10 kNm. Täis uue reduktori parameetrid asuvad lisas 11.

Tabel 3.1. Olemasolevate ja uute mootorite ja reduktorite parameetrite võrdlus. [1][9][10]

Mootori mudel	MTF 412-8	M2AA 200 MLB
Sagedus f , HZ	50	50
Staatori nimivool I_{Ns} , A	65,0	46,7
Staatori nimipinge V_{Ns} , V	220	220
Nimivõimsus P_N , kW	22	22
Reduktori sisendnurkkiirus n_1 , p/min	715	969
Mootori nimipöördemoment M_N , Nm	294	216
Reduktori ülekandearv i	40	56
Reduktori väljundpöördemoment M_{nom2} , kNm	11,76	12,10
Reduktori väljundvõlli nurkkiirus n_2 , p/min	17,88	17,30
Kasutegur, %	83,0	90,7
$\cos(\varphi)$	0,70	0,76
Maksimaalse pöördemomendi ja nimipöördemomendi suhe k_M	3,0	2,3

Arvutustulemuste põhjal võib öelda, et uuel mootoril on paremad kasuteguri, energia kvaliteedi ja väljundpöördemomendi näitajad. Kokkuvõtteks võib öelda, et see mootor sobib edasiseks kasutamiseks kraana moderniseerimisarvutustes.

3.2.2 Lasti- ja käiguvankrite mootorite valimine

Nii lasti- kui ka käiguvankreid liigutatakse erinevate reduktoritega sama tüüpi mootoritega. Käiguvankrite ajamites kasutatakse reduktoreid ПЦД-400-31,5-22, mille ülekandearv on 31,5, ja vankritesse sisseehitatud reduktoreid, mille ülekandearv on 2,9. Seega on kogu ülekandearv ligikaudu 90,7. Lastivankrisse on paigaldatud reduktor ПЦД-400-40-22M, mille ülekandearv on 40. Asendamiseks kõige sobivam on tootja „ABB Asea Brown Boveri Ltd“ mootorimudel M2AA 132 MLA 6. Mootoritel on kaitseaste IP55 ja kuumakindlusklass F. Kliimatingimuste klass on mõõdukas.

Sellel mootoril on olemasoleva mootori nurkkiirusega 915 p/min praktiliselt sama nurkkiirus (940 p/min), mis tähendab, et reduktoreid ei ole vaja asendada. Valemiga 3.1 arvutati olemasoleva

käiguvankri reduktori väljundvõlli nurkkiirus 29,05 p/min ja lastivankri reduktori väljundvõlli nurkkiirus 22,88 p/min. Uute reduktorite puhul on need väärtused 29,84 p/min ja lastivankri korral 23,5 p/min.

Valemiga 3.3 leiame, et olemasolevate reduktorite nominaalsed väljundpöördemomendid on käiguvankrite puhul 2438,1 Nm ja lastivankri puhul 3096,0 Nm. Käiguvankrite uute reduktorite puhul on moment 2394,0 Nm ja lastivankri uue reduktori puhul 3040 Nm. Uute ja vanade andmete võrdlus on esitatud tabelis 3.2. Kõik mootorid valitud kataloogist (lisa 10).

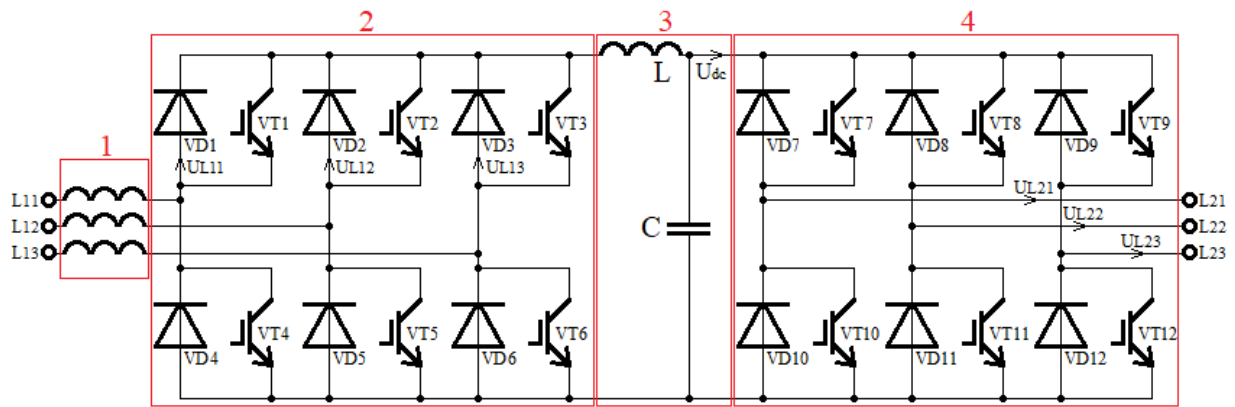
Tabel 3.2. Olemasolevate ja uute mootoriparameetrite võrdlus. Kaldkriipsust vasakul on olemasolevad parameetrid ja paremal uued. [1][9]

Olemasoleva mootori mudel	MTF 211-6	MTF 211-6
Uue mootori mudel	M2AA 132 MLA 6	M2AA 132 MLA 6
Paigalduskoht	Käiguvanker	Lastivanker
Sagedus f , HZ	50	50
Staatori nimivool I_{N_s} , A	21 / 17.3	21 / 17.3
Staatori nimipinge V_{N_s} , V	220	220
Nimivõimsus P_N , kW	7.5 / 7.5	7.5 / 7.5
Reduktori sisendnurkkiirus n_1 , p/min	915/940	915/940
Mootori nimipöördemoment M_N , Nm	77,4/76,0	77,4/76,0
Reduktori ülekandearv i	90,7	40
Reduktori väljundpöördemoment M_{nom_2} , kNm	2438,1/ 2394,0	3096,0/ 3040,0
Reduktori väljundvõlli nurkkiirus n_2 , p/min	29,05/29,84	22,88/23,5
Kasutegur, %	75,0/84,1	75,0/84,1
$\cos(\varphi)$	0,72/0,78	0,72/0,78
Maksimaalse pöördemomendi ja nimipöördemomendi suhe k_M	2,5/1,9	2,5/1,9

Mootorite parameetrite võrdlus näitas, et väljundpöördemomendid ja väljundnurkkiirused on praktiliselt identsed. Seega kasutatakse neid mootoreid ja reduktoreid edasistes arvutustes. Pärast uute mootorite valimist on vaja valida sobivate parameetritega sagedusmuundurid.

3.3. Sagedusmuundurite ehitus ja valimise kriteeriumid

Sagedusmuundurit kasutatakse vooluvõrgu kolmefaasilise 50 Hz sagedusega vahelduvvoolu muundamiseks vajaliku sagedusega kolmefaasiliseks vahelduvvooluks. Selle seadme põhiosad on sisendpaispool, alaldussild, filter ja inverter. Seadme kõigi osade paigutus ja ühendused on näidatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Sagedusmuunduri ahel. Sisendpaispool (1), aktiivalaldi (2), filter (3), inverter (4).

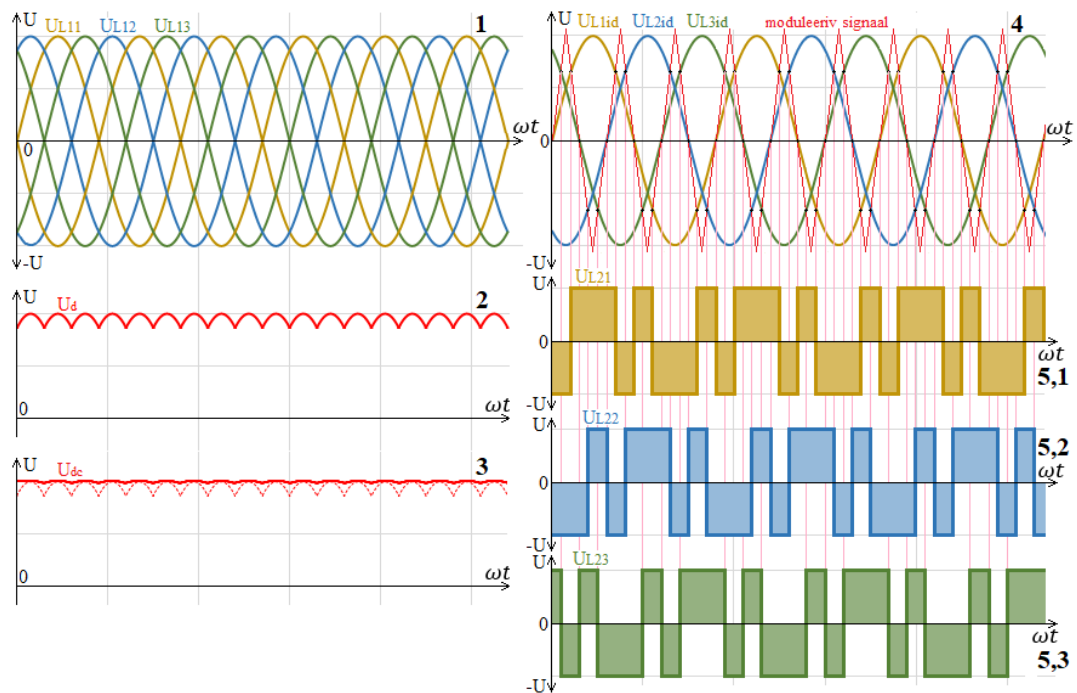
Seadme ühendamisel vooluvõrku läbib faaside L11, L12 ja L13 sisendvool sisendpaispooli. See element on ette nähtud maksimaalse voolukoormuse piiramiseks sisselülitamise hetkel ja toimib sisendfiltrina. Pärast paispooli vool alaldatakse. Dioode VD (1 – 3) läbib ainult voolusinusoidi positiivne komponent ja dioode VD (4 – 6) ainult voolusinusoidi negatiivne komponent. Diodid valitakse olenevalt sagedusmuunduri nimivõimsusest.

Voolude ja pingete silumiseks pärast alaldit kasutatakse LC-filtrit. See koosneb järjestikusest induktiivtakistist L ja paralleelsest mahtuvustakistist C. Pinge poollaine ajal toimub reaktiivelementide laadimine ning voolu ja pinge puudumisel nende tühjenemine läbi koormuse. Väljundis on väikeste lubatud kõikumistega positiivne alalispinge. [11]

Saadud alalispinge muundatakse inverteris pulsilaiusmodulatsiooniga (PLM) vajaliku sagedusega vahelduvpingeks. IGBT-tüüpi transistorid VT (7 – 12) töötavad võtmerežiimis (ei edasta pinget või edastavad selle maksimaalset väärtust). Need moodustavad erineva täituvusteguriga (impulsi perioodi ja impulskestuse suhe) ristkülikukujulised impulsid, mis võimaldab genereerida sel viisil faaside L21, L22 ja L23 väljundites vajaliku vahelduvpinge. Transistorite sisenditesse saabuval signaalil määrab moduleeriv signaal ja etalonpinge. Sagedusmuundur valib etalonpinge olenevalt kraana käitaja määratud töörežiimist. Joonisel 3.3 on kujutatud faaspingete muutumist muundamise kõigis etappides.

Uue ajami projekteerimisel on parem kasutada ühe ettevõtte komponente. Mootorid valiti ettevõttelt ABB Asea Brown Boveri Ltd, mis toodab ka sagedusmuundureid. Erinevalt enamikust teistest mudelitest on nende ACS-seeria sagedusmuunduritel IGBT-tüüpi transistorid VT (1 – 6), mis töötavad võtmerežiimis. Kui mootor enam energiat ei tarbi ja hakkab seda võrku andma (näiteks koormuse langetamisel), toimivad diodid VD (7 – 12) alaldina ja transistorid VT (1 – 6) teisendavad sisendalalispinge PLM-iga võrgusagedusega vahelduvpingeks. Seega hakkab mootor töötama

genereerimisrežiimis, toitevõrk toimib tarbijana ja sagedusmuunduriahel töötab vastupidi tavarežiimile. Selles režiimis töötamine vähendab oluliselt energiakulu ja -kadu. [12]



Joonis 3.3. Pinge ja sageduse muutumine muundamise erinevates etappides. Pinge alaldi diodidel (1), alaldatud pinge pärast diodisilda (2), filtriga silutud pinge (3), moduleeriva signaali interaktsioon (punane) etalonpingetega (kollane, sinine, roheline) (4), väljundpinged pärast PLM-modulatsiooni faasidel L21 (5.1), L22 (5.2), L23 (5.3).

Uuritava kraana puhul on vaja valida 4 sagedusmuundurit: tõstemehhanismi mootorile, käiguvankrite kahele mootorile ja lastivankri mootorile. Põhiparameetrid on nimivõimsus, staatori nimipinge ja nimivool suure koormusega töörežiimi korral, samuti sagedus ja seadme keskkonnamõjude kaitseaste.

Suure koormusega töörežiimi iseloomustab pidev töö nimikoormuse lähedase massiga, suurtel kiirustel, suure lülitussagedusega ja suure suhtelise lülituskestusega. Sagedusmuundurite kõigi valitud mudelite tavarežiimi nimivoolud, -pinged ja -võimsused on palju suuremad kui suure koormusega töörežiimis. Kraanamootorite puhul on oluline järgida parameetrite nimiväärtusi mis tahes töörežiimis, nii et seadmed valitakse vastavalt kõige raskematele töötingimustele.

Kõigi vaadeldavate ajamite puhul kasutatakse ettevõtte ABB Asea Brown Boveri Ltd toodetud sagedusmuundurite tüüpi ACS550-01. Nende kaitseaste on IP55 ja lubatud välistemperatuuri vahemik $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (härmatise moodustumine ei ole lubatud) kuni $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kuna kraan asub väljas võib talvel välistemperatuur langeda alla $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, mistõttu korpus valmistatakse eritellimusel. Kõik sagedusmuundurid tuleb paigaldada mootoritele võimalikult lähedale, et vähendada energiakadusid

juhtmetes ja maksimeerida energia ülekande täpsust mootoritele. Toitekaablid tuleb ühendada kolmefaasiliste lülitite kaudu sagedusmuunduritega ning need omakorda mootori staatorite faasimähiste klemmidega. Juhtimine toimub kaugjuhtimisega või kaabelühendustega muundurite ja juhikabiini kontrollerite vahel. Ajamis mootoriga M2AA 200 MLB kasutatakse sagedusmuunduri mudelit ACS550-01-072A-4. [13]

Tabel 3.3. Mootori M2AA 200 MLB ja sagedusmuunduri ACS550-01-072A-4 parameetrite võrdlus. [13]

Seade	M2AA 200 MLB	ACS550-01-072A-4
Sagedus, Hz	50	50
Nimivool suure koormusega töörežiimis, A	46,7	59,0
Pinge, V	220	220
Nimivõimsus suure koormusega töörežiimis, kW	22,0	30,0

Tabelist 3.3 nähtub, et need seadmed ühilduvad nimipinge ja sageduse järgi. Sagedusmuunduri nimivool ja -võimsus on usaldusväarsuse suurendamiseks valitud varuga, sest nende parameetrite väärtused võivad mootori käivitamisel ja kiirendamisel suureneha hüppeliselt. Võib järeldada, et see seade sobib tõstemehhanismi ajamile. Kõik sagedusmuundurid valitud kataloogist (lisa 12).

Käigu- ja lastivankrite ajamitele valiti uued identsed mootorid M2AA 132 MLA 6, mistõttu nende jaoks kasutati kolme identset sagedusmuundurit ACS550-01-031A-4.

Tabel 3.4. Mootori M2AA 132 MLA 6 ja sagedusmuunduri ACS550-01-031A-4 parameetrite võrdlus. [13]

Seade	M2AA 132 MLA 6	ACS550-01-031A-4
Sagedus, Hz	50	50
Nimivool suure koormusega töörežiimis, A	17,3	23
Pinge, V	220	220
Nimivõimsus suure koormusega töörežiimis, kW	7,5	11

Sagedusmuundurite parameetrid ühilduvad vaadeldavate ajamimootoritega ning neil on piisavad nimivõimsuse ja -voolu näitajad, seega need sobivad kasutamiseks.

3.4. Uute ajamite töö mudeldamine

3.4.1. Parameetrid uute ajamite töö mudeldamiseks

Uute ajamite töö mudeldamiseks kasutati programmi eDrive ja sisendparameetritena kasutati uute mootorite passiandmeid, olemasolevate mootorite katsetes rakendatud koormuste andmeid ja sagedusmuundurite passiandmeid. Iga etapi tööaeg on identne ajaga olemasolevate mootorite

katsetes ja seetõttu on läbitud vahemaa sama. Kõnealuste mootorite passiandmed on programmi eDrive kataloogis, nii et kõik andmed sisestatakse automaatselt ja need on esitatud tabelis 3.5. [14]

Tabel 3.5. Mudeldamisel kasutatavate mootorite passiandmed. [9][14]

Mootor	M2AA 200 MLB	M2AA 132 MLA 6
Nimivõimsus P_N , kW	22	7,5
Niminurkkiirus ω_N , rad/s	102	101
Inertsmoment J , kg · cm ²	4300	890
Nimipöördemoment M_N , Nm	214	74
Maks. pöördemoment M_{max} , Nm	577,8	207,2
Staatori nimipinge U_{N_s} , V	230	230
Nimivool I_n , A	43	15,4
Käivitusvool I_{start} , A	309,6	103,2

Koormusparameetrid hõlmavad koormuse inertsimomenti, koormuse pöördemomenti mootori võllil ja mootori võlli pöörlemiskiirust. Kuna koormuse inertsimoment ei ole teada, eeldatakse, et see on võrdne mootori inertsimomendiga.

Uue mootori võlli pöörlemiskiirus tuleb valida nii, et reduktori väljundvõllil oleks see sama, mis vastavates katsetes olemasolevate mootoritega. See arvutatakse olemasolevate mootorite libistustest ja nende sünkroonsetest nurkkiirustest valemiga:

$$\omega_q = (1 - S_q) \cdot \omega_0 \cdot \frac{i_{new}}{i_{old}} \quad (3.5)$$

kus ω_q – nurkkiirus astmel q, rad/s,

ω_0 – sünkroonne nurkkiirus, rad/s.

Seda valemit kasutatakse kõigi mootorite nurkkiiruse arvutamiseks, mis arvutatakse eraldi igale reostaadiastmele. Koormuse pöördemoment mootori võllil oleneb pöörlemise nurkkiirusest ja efektiivvõimsusest ning arvutatakse valemiga:

$$M_q = \frac{P_{efficient q}}{\omega_q} \quad (3.6)$$

kus M_q – koormuse pöördemoment mootori võllil reostaadiastmel q, Nm.

Kraana tööd lasti langetamisel ei mudeldatud andmete puudumise tõttu ja seetõttu, et kasutatud programmis sellise mudeldamise võimalus puudus. Moderniseerimiseks valitud sagedusmuundurites liigub vool mõlemas suunas, seega on ka lasti langetamisel energia tagastamine tõhusam kui olemasolevate mootorite puhul.

Tabel 3.6. Koormusparameetrid tõstmisel.

Liikumissuund	Üles				
Aste q	1	2	3	4	5
Koormuse inertsimoment J , kg·cm ²	4300				
Koormuse pöördemoment M_q , Nm	45,6	46,9	46,6	49,8	51,4
Nurkkiirus ω_q , rad/s	84,7	93,0	94,6	103,2	105,1

Tabel 3.7. Käiguvankri ühe mootori koormusandmed liikumisel edasi või tagasi.

Liikumissuund	Edasi					Tagasi				
Aste q	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Koormuse inertsimoment J , kg·cm ²	890									
Koormuse pöördemoment M_q , Nm	23,9	29,9	31,2	33,4	33,9	24,8	30,2	31,2	33,6	35,0
Nurkkiirus ω_q , rad/s	69,5	69,5	71,8	74,3	76,9	68	69,5	71,8	74,3	76,9

Tabel 3.8. Koormusandmed liikumisel paremale või vasakule.

Liikumissuund	Paremale					Vasakule				
Aste q	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Koormuse inertsimoment J , kg·cm ²	890									
Koormuse pöördemoment M_q , Nm	26,3	25,3	31,1	32,1	33,7	26,4	30,7	32,7	33,9	36,2
Nurkkiirus ω_q , rad/s	70,8	73,7	73,7	76,7	76,7	70,8	73,7	73,7	76,7	76,7

Mudeldamisel kasutati sagedusmuundurite andmeid, mis on esitatud tabelites 3.3 ja 3.4. Sagedusmuundurite töö põhineb PID-reguleerimisel. Proportsionaal-, integraal- ja diferentsiaalkomponendi valik toimub automaatselt.

3.4.2. Mudeldamise tulemused

Sagedusmuundurid võimaldavad saavutada mootorile edastatava energia peaaegu maksimaalse kvaliteedi, seetõttu $\cos \varphi \approx 1$. Mudeldamise tulemused on esitatud olemasolevate ja uute mootorite aktiivvõimsuste graafikute ja tabelite kujul. Käsitletakse ainult koormatud kraanaajamite tööd. Kõigile mudeldamisel saadud võimsuse väärtustele lisati konstant 0,73 kW, mida tarbitakse pidevalt releekontaktori süsteemi ja juhikabiini töö tagamiseks. [12]

Tabel 3.9. Käiguvankrite ajamite kahe mootori M2AA 132 MLA 6 ja sagedusmuunduri ACS550-01-031A-4 töö mudeldamise tulemused.

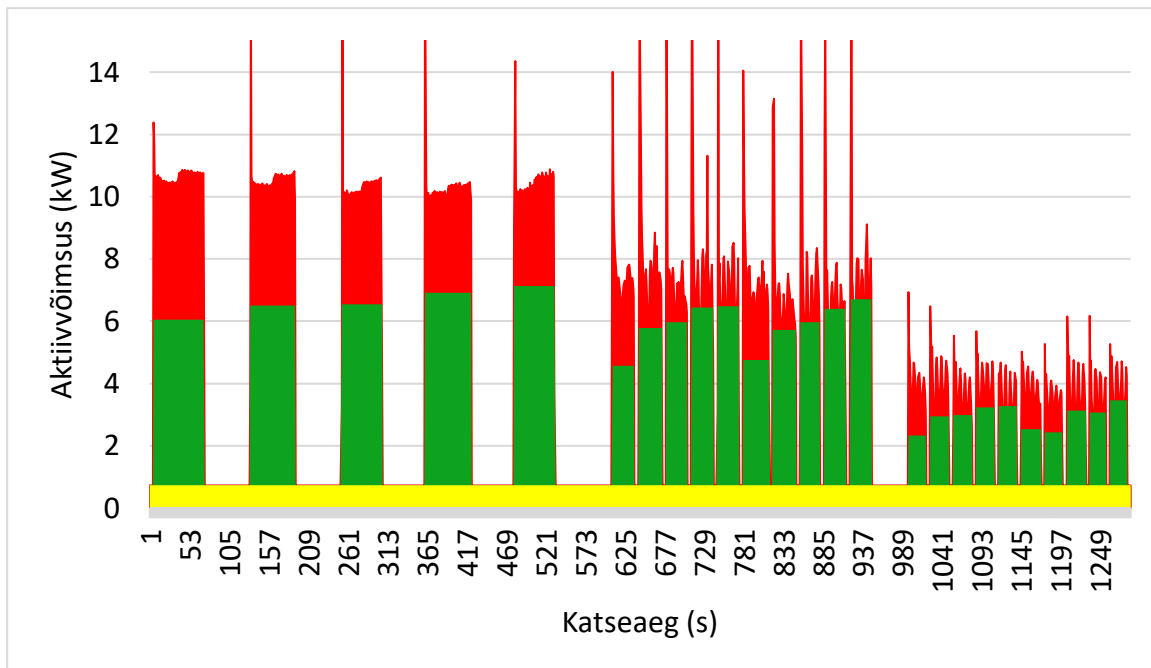
Liikumissuund	Aste q	Käivitusvoolu I_{max} väärtus, A	Kiirendusaeg t_{start} , s	Aktiivvõimsus pärast kiirendamist $P_{stable\ q}$, kW
Edasi	1	299,0	0,2	4,57
	2	301,1	0,25	5,72
	3	311,5	0,25	5,97
	4	321,1	0,25	6,39
	5	333,5	0,25	6,49
Tagasi	1	293,2	0,20	4,75
	2	301,3	0,25	5,78
	3	312,9	0,25	5,97
	4	324,3	0,25	6,44
	5	337,4	0,25	6,70

Tabel 3.10. Lastivankri ajami mootori M2AA 132 MLA 6 ja sagedusmuunduri ACS550-01-031A-4 töö mudeldamise tulemused.

Liikumissuund	Aste q	Käivitusvoolu I_{max} väärtus, A	Kiirendusaeg t_{start} , s	Aktiivvõimsus pärast kiirendamist $P_{stable\ q}$, kW
Paremale	1	152,3	0,2	2,32
	2	158,9	0,25	2,42
	3	160,3	0,25	2,98
	4	166,8	0,25	3,07
	5	168,6	0,25	3,27
Vasakule	1	152,3	0,2	2,53
	2	159,0	0,25	2,94
	3	160,2	0,25	3,13
	4	166,9	0,25	3,24
	5	168,5	0,25	3,46

Tabel 3.11. Tõstemehhanismi ajami mootorite M2AA 200 MLB ja sagedusmuundurite ACS550-01-072A-4 töö mudeldamise tulemused.

Liikumissuund	Aste q	Käivitusvoolu I_{max} väärtus, A	Kiirendusaeg t_{start} , s	Aktiivvõimsus pärast kiirendamist $P_{stable\ q}$, kW
Üles	1	911,8	0,2	6,05
	2	1001,2	0,2	6,50
	3	1019,0	0,2	6,55
	4	1111,2	0,25	6,91
	5	1132,0	0,25	7,13



Joonis 3.4. Olemasolevate mootorite (punane) ja uute mootorite (roheline) toite aktiivvõimsuse tarbimise võrdlus. Kollane näitab 0,73 kW püsitarbimist.

Joonisel 3.4 esitatud diagrammidest nähtub, et olemasolevate mootorite ja reostaatide asendamisel uute mootorite ja sagedusmuunduritega vähendab oluliselt aktiivvõimsuse tarbimist ja viib reaktiivkomponendi miinimumini.

Faasirootoriga asünkroonmootorite konstruktsioonilise eripära tõttu nurkkiiruse muutumisel tarbitav aktiivvõimsus peaaegu ei muutu. Sagedusmuundurite puhul toimub reguleerimine pulsilaiusmodulatsiooniga, seetõttu on tarbitud energia kogus otseselt koormusest ja nurkkiirusest. Tabelites 3.12-14 on näidatud olemasolevate ja uute mootorite tarbitava võimsuse väärtused ning tarbimise vahe on arvatud valemiga:

$$P_{save_q} = P_{avg_q} - P_{stable_q} \quad (3.7)$$

kus P_{save_q} – olemasolevate ja uute mootorite võimsuse tarbimise vahe reostaadiastmel q, kW.

Tabel 3.12. Tõstemehhanismi olemasoleva ja uue mootori aktiivvõimsuse tarbimise võrdlus.

Liikumissuund	Reostaadi aste q	P_{avg_q} , kW	P_{stable_q} , kW	P_{save_q} , kW
Üles	1	10,68	6,05	4,63
	2	10,49	6,50	3,99
	3	10,20	6,55	3,65
	4	10,35	6,91	3,44
	5	10,33	7,13	3,20

Tabel 3.13. Käiguvankrite olemasoleva ja uute mootorite aktiivvõimsuse tarbimise võrdlus.

Liikumissuund	Reostaadi aste q	$P_{avg,q}$, kW	$P_{stable,q}$, kW	$P_{save,q}$, kW
Edasi	1	7,72	4,57	3,15
	2	7,62	5,72	1,90
	3	7,20	5,97	1,23
	4	7,01	6,39	0,62
	5	7,05	6,49	0,56
Tagasi	1	7,84	4,75	3,09
	2	7,91	5,78	2,13
	3	7,27	5,97	1,30
	4	7,34	6,44	0,90
	5	7,56	6,70	0,86

Tabel 3.14. Lastivankri olemasoleva ja uue mootori aktiivvõimsuse tarbimise võrdlus.

Liikumissuund	Reostaadi aste q	$P_{avg,q}$, kW	$P_{stable,q}$, kW	$P_{save,q}$, kW
Paremale	1	4,01	2,32	1,69
	2	3,74	2,42	1,32
	3	3,62	2,98	0,64
	4	3,79	3,07	0,72
	5	3,67	3,27	0,40
Vasakule	1	4,12	2,53	1,59
	2	4,00	2,94	1,06
	3	3,68	3,13	0,55
	4	3,81	3,24	0,57
	5	3,84	3,46	0,38

KOKKUVÕTE

Kokkuvõtteks võib öelda, et kõik uurimistöo etapid olid edukalt täidetud. Esimeses osas oli edukalt saadud käivitusreostaadide takistuste näidud ning vajalikud mootorite parameetrid. Lisaks selle oli selgitatud faasirootoriga asünkroonmootori tööpõhimõte.

Teises osas moodustatud libistuse pöördmomentist sõltuvuse graafikutest olid leitud tõstemehhanismi mootori käivitusreostaatide sätetes kalduvused. Teoreetiliste andmete kogumine ja analüüs võimaldas tuvastada peamised puudused:

1. Mootori nurkkiiruse reguleerimine on ebapraktiline reostaatide kasutamise tõttu rootoriahelas. Töö jooksul koormuseta või väikese massiga koormusega täiturseadmete liikumiskiiruse reguleerimine praktiliselt puudub.
2. Piisav pöördmoment tekitatakse rootoriahela täiendavate takistitega, mis põhjustab töö jooksul väikesel kiirusel olulisi soojuskadusid ja jõudluse vähenemist.
3. Tõstemehhanismi mootori MTF 412-8 reostaadi takistused erinevad oluliselt arvatud väärtustest. See võib kaasa tuua maksimaalse koormusega astmel 1 mootori vääratumise.
4. Automaatse kiiruse reguleerimise puudumise tõttu ilmnevad pidevad võnkumised ja täiturseadmete ebaühtlane liikumine, mis vähendab lasti liigutamise täpsust.

Arvestades kõiki ülalnimetatud puudusi, kolmandas osas käsitleti võimalust asendada olemasolevad ajamid uutega. Moderniseerimise korral tuleb reostaadid täielikult eemaldada ja paigaldada sagedusmuundurid. Olemasolev mootor MTF 412-8 tuleb asendada mootoriga M2AA 200 MLB ja sagedusmuunduriga ACS550-01-072A-4. Olemasolevate ja uute mootorite nurkkiiruste erinevuse tõttu on vaja asendada reduktor PM-650-40-22M reduktoriga BKY-765-56-22M. Käigu- ja lastivankrite mootorid MTF 211-6 võib asendada mootoritega M2AA 132 MLA 6 ja sagedusmuunduritega ACS550-01-031A-4. Mudeldustulemuste kohaselt annab mootorite väljavahetamine järgmised eelised:

1. Tööga seotud energiakulud vähenevad märkimisväärselt nii väikeste kui ka suurte nurkkiiruste korral.
2. Mootorite toitmisel sagedusmuundurite kaudu suureneb energia kvaliteet tänu reaktiivkomponendi peaaegu täielikule puudumisele mootorite töö ajal.
3. Suureneb kõigi mootorite töö täpsus, mis lihtsustab kraana käitaja tööd ja võimaldab liigutada lasti kiiremini ja täpsemalt. Samuti rakendatakse kraana kaugjuhtimine.

Võttes arvesse kõik läbiviidud uuringud, võib öelda, et kraana edasise pikaajalise kasutamise korral on kraana moderniseerimine aktuaalne ja soovitatav. Moderniseerimise puudustest võib välja tuua võrdlemisi kõrget hinda ja selle moderniseerimise käigus tuleb ette raskusi toodete laadimisega veoautodesse.

SUMMARY

In conclusion, all stages of the graduate were successfully completed. In the first part, the resistance of the starting rheostats and the required engine parameters were successfully obtained. In addition, the operation of the asynchronous motor with a phase rotor was explained.

In the second part the theoretical and real torque-slip dependences were built. The collection and analysis of theoretical data allowed to identify the main weaknesses:

1. Adjusting the motor angular velocity is impractical due to the use of rheostats in the rotor circuit. There is almost no opportunity for the crane elements to control speed regardless of load during operation.
2. Required value of torque is regulated by additional resistance in the rotor circuit. This type of torque control cause significant active power losses during the operation at low speed.
3. The motors MTF 412-8 rheostat resistance stage values differ significantly from the calculated values. This can lead to a misalignment in case of maximum load at first rheostat stage.
4. Lack of automatic speed control leads to continuous oscillations and uneven crane elements movement, which reduces the accuracy of moving the load.

In case of all mentioned disadvantages, the third part was aimed at possibility of modernization by replacing existing drives with new ones. It was decided to dismantle the starting rheostats. The existing motor MTF 412-8 was necessary to be replaced with the M2AA 200 MLB and the ACS550-01-072A-4 frequency converter. Due to the difference between the angular velocities of existing and new engines, it is necessary to replace the gearbox PM-650-40-22M with the gear unit BKV-765-56-22M. The gear and trolley motors MTF 211-6 may be replaced with motors M2AA 132 MLA 6 and ACS550-01-031A-4 frequency converters. According to the modeling results, the replacement of the motors have following advantages:

1. Active power consumption was significantly reduced at both low and high angular speeds.
2. Powering motors through frequency converters increased the energy quality due to the almost complete absence of the reactive component.
3. Increased accuracy of the performance of all engines, which allowed to operate on higher speeds and with greater accuracy. Remote control could also be applied.

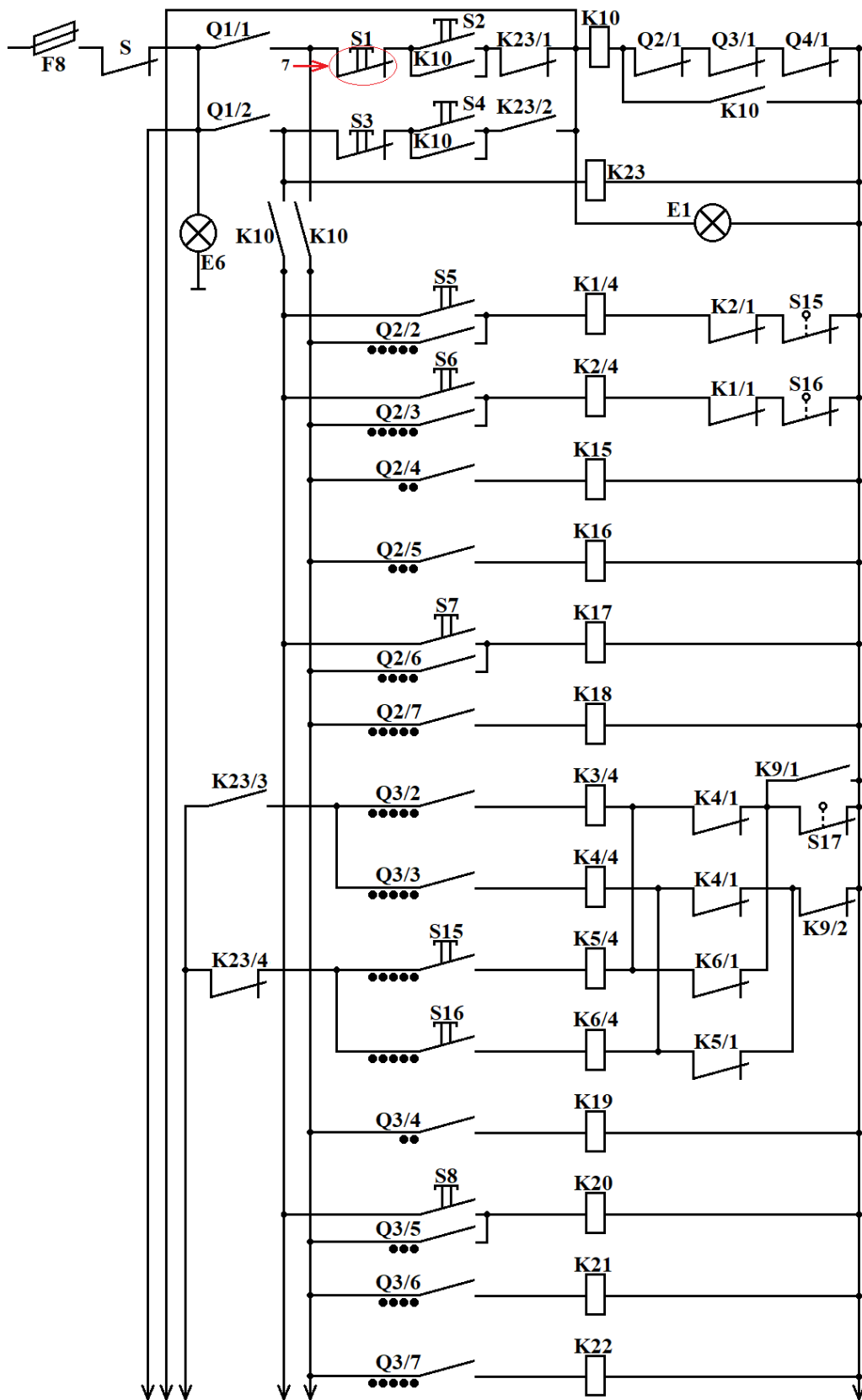
Based on the above received information, it can be concluded, that in case of long-term use of the crane, modernization is actual and recommended. The disadvantages of modernization are: the relatively high price, futhermore, during the modernization a logistics difficulties could appear.

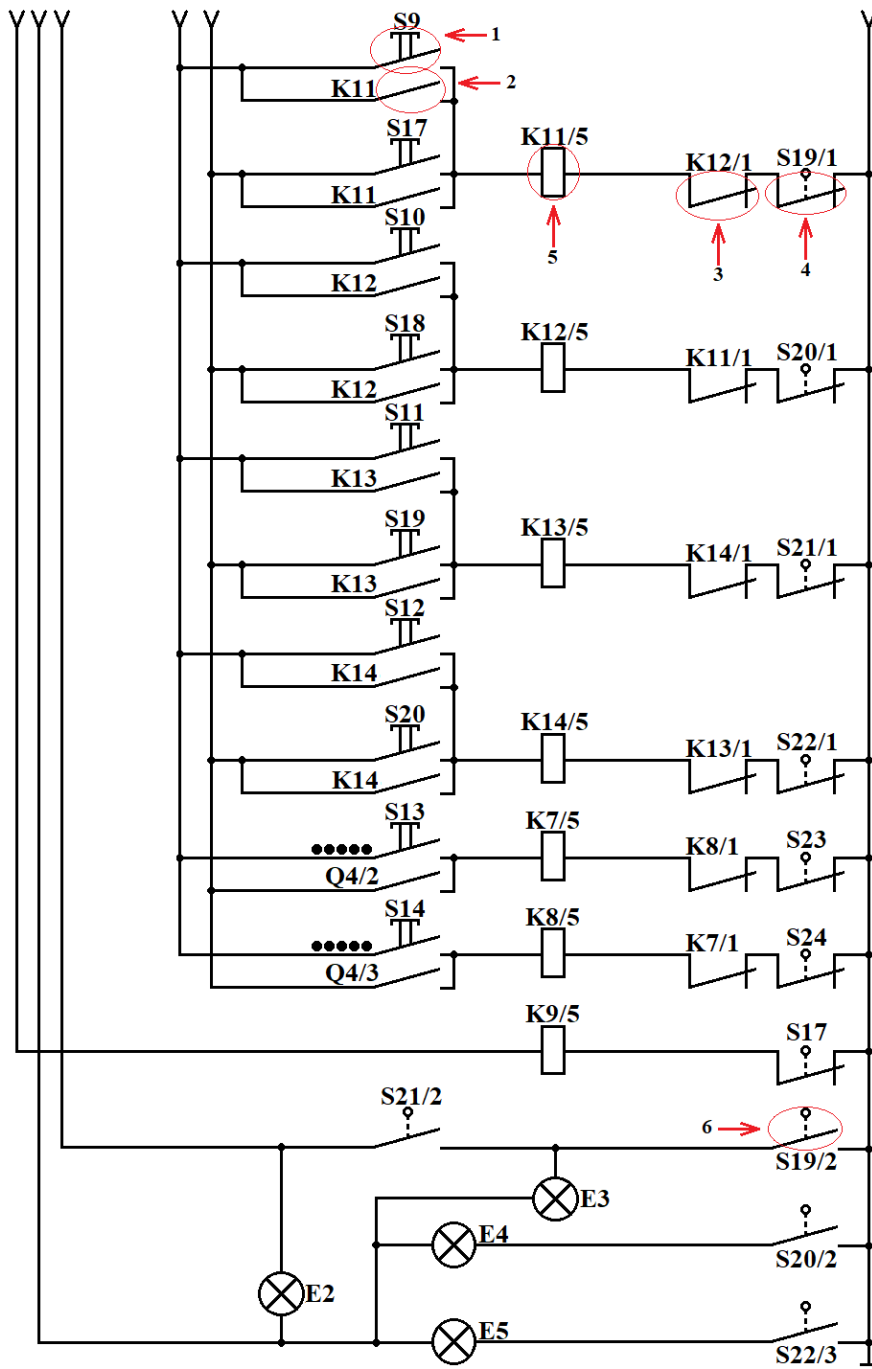
KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Министерство энергетики и сертификации СССР, Краана КК20-32 pass, registreerimisnumber 9908, 1987.
- [2] Александров М. П., Колобков Л. Н., Лобов Н. А., Грузоподъемные машины, Moskva: kirjastus Машиностроение, 1986.
- [3] Вешеневский С.Н., Характеристики двигателей в электроприводе, Moskva: kirjastus ЭНЕРГИЯ, 1977.
- [4] Fluke, "Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer Users Manual," 2008. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umeng0300.pdf. [Kasutatud 08. 11. 2018].
- [5] Вольдек А.И., Попов В.В., Электрические машины. Машины переменного тока, Peterburi: kirjastus Питер, 2010.
- [6] Мальц Э. Л., Мустафаев Ю. Н., Электротехника и электрические машины, Moskva: КОРОНА-Век kirjastus, 2010.
- [7] Hammond Power Solutions, "What is meant by "Class" in insulation," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.hammondpowersolutions.com/faq/what-is-meant-by-class-in-insulation/>. [Kasutatud 27. 02. 2019].
- [8] ANSI/IEC 60529-2004, "Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)," kirjastus: National Electrical Manufacturers Association, 2004.
- [9] ABB as, "Низковольтные электродвигатели общего назначения," [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.com-sol.ru/katalog/elektrodvigateli/abb/kat/nv_dvigateli_obschego_naznacheniya.pdf. [Kasutatud 01. 03. 2019].
- [10] ООО Редуктор, "Основные технические данные редуктора ВКУ-765," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://reductory.ru/reduktor/kranovie-v-vk-vku/vku-765>. [Kasutatud 04. 03. 2019].
- [11] Vodovozov V., Jansikene R., Power Electronic Converters, Tallinn: TalTech Kirjastus, 2004.
- [12] Vodovozov V., Introduction to Power Electronics, Tallinn: TalTech Kirjastus, 2010.
- [13] ABB as, "ABB general purpose drives," [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://library.e.abb.com/public/6989497f2ebc4a25889b36d5ca17cbbf/ACS550_catalog_EN_3AFE64792857_RevS_lowres.pdf. [Kasutatud 03. 03. 2019].
- [14] Vodovozov V., Electronic Systems of Motor Drive Using eDrive, Tallinn: TalTech Kirjastus, 2008.

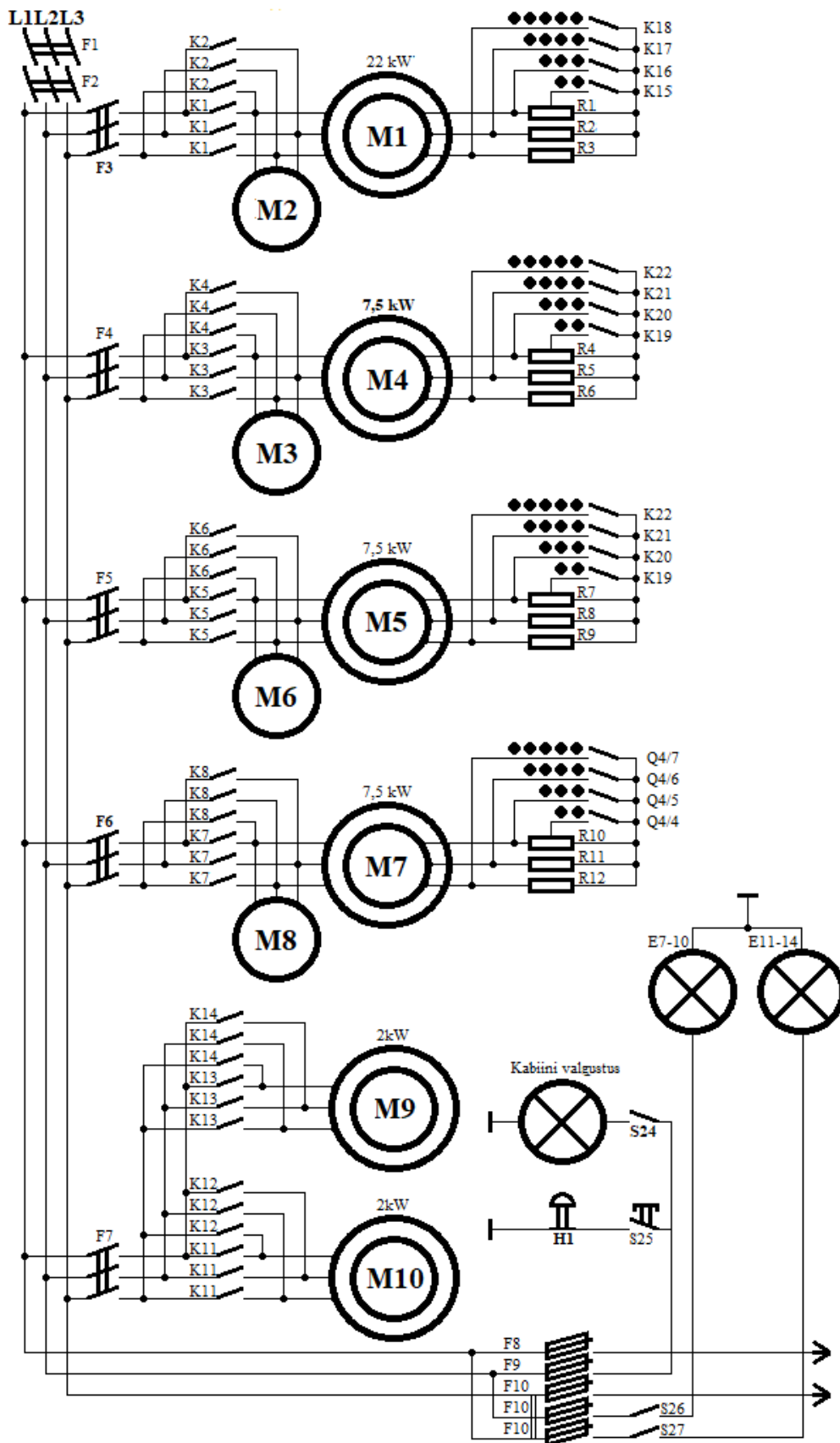
LISAD

Lisa 1. Kraana KK 20-32 releekontaktorite juhtahel (2 lehed).

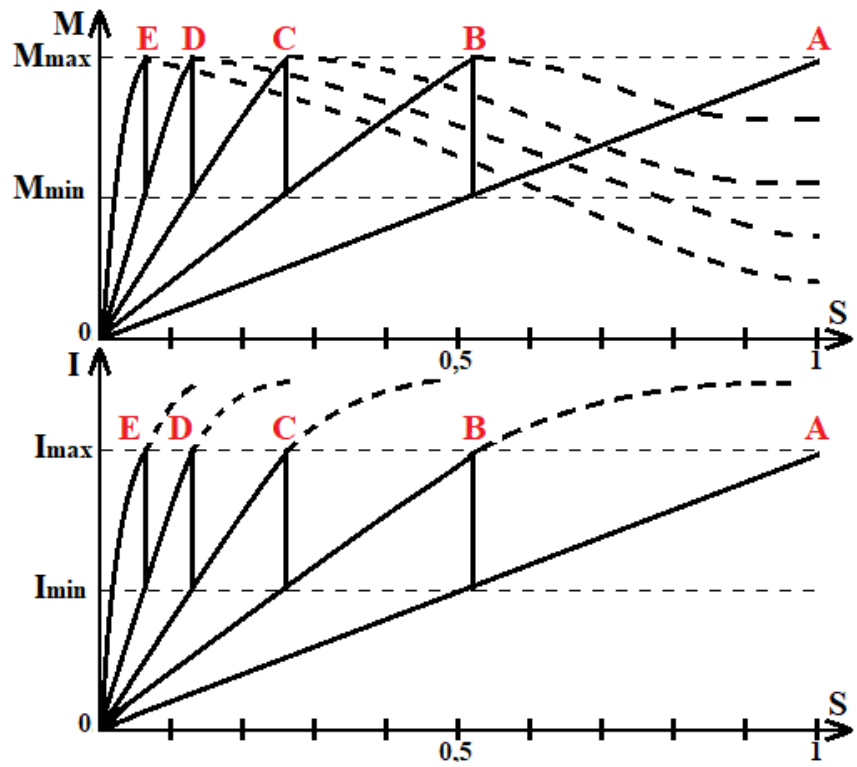
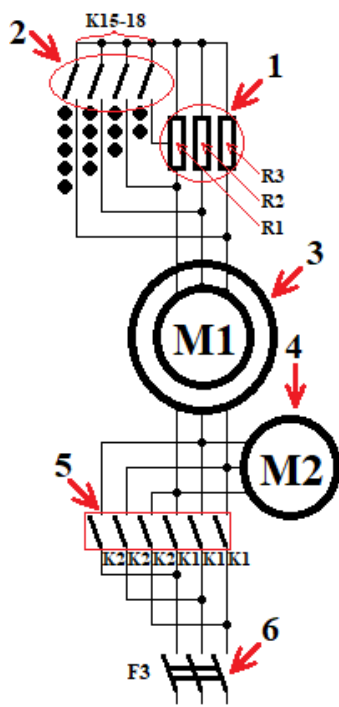




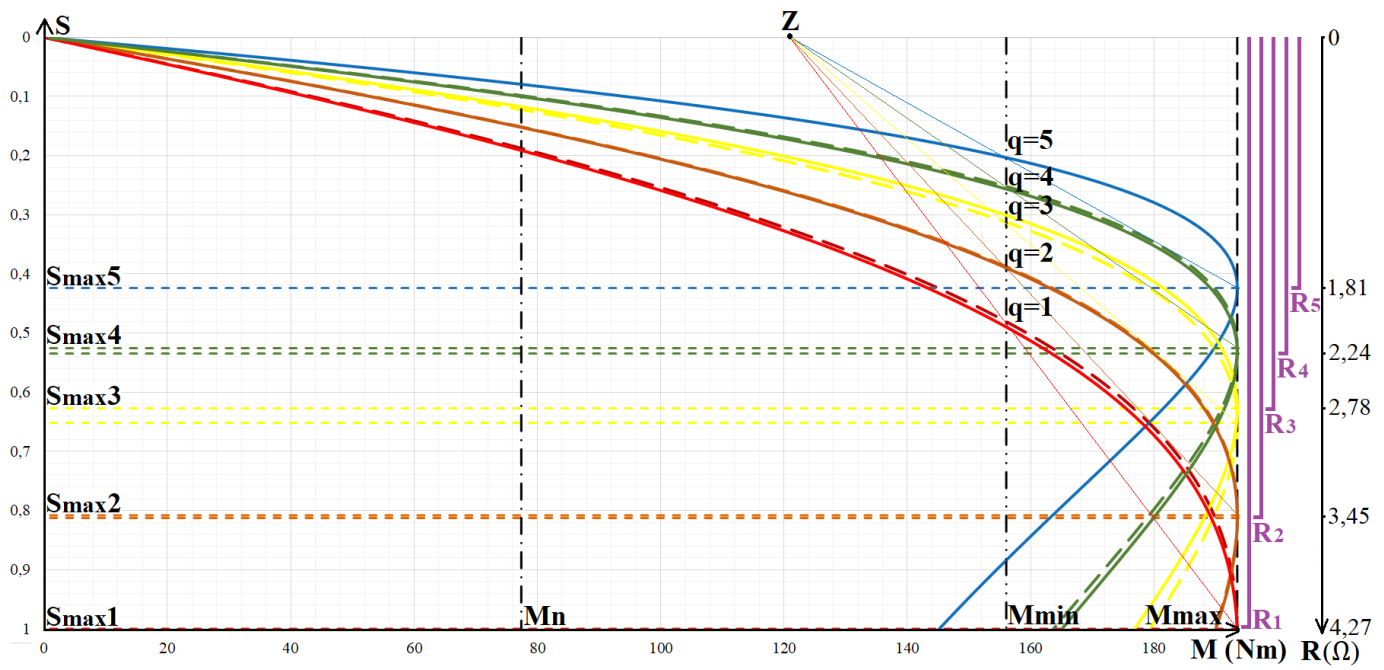
Lisa 2. Kraana KK 20-32 olemasoleva jõuvooluahela skeem.



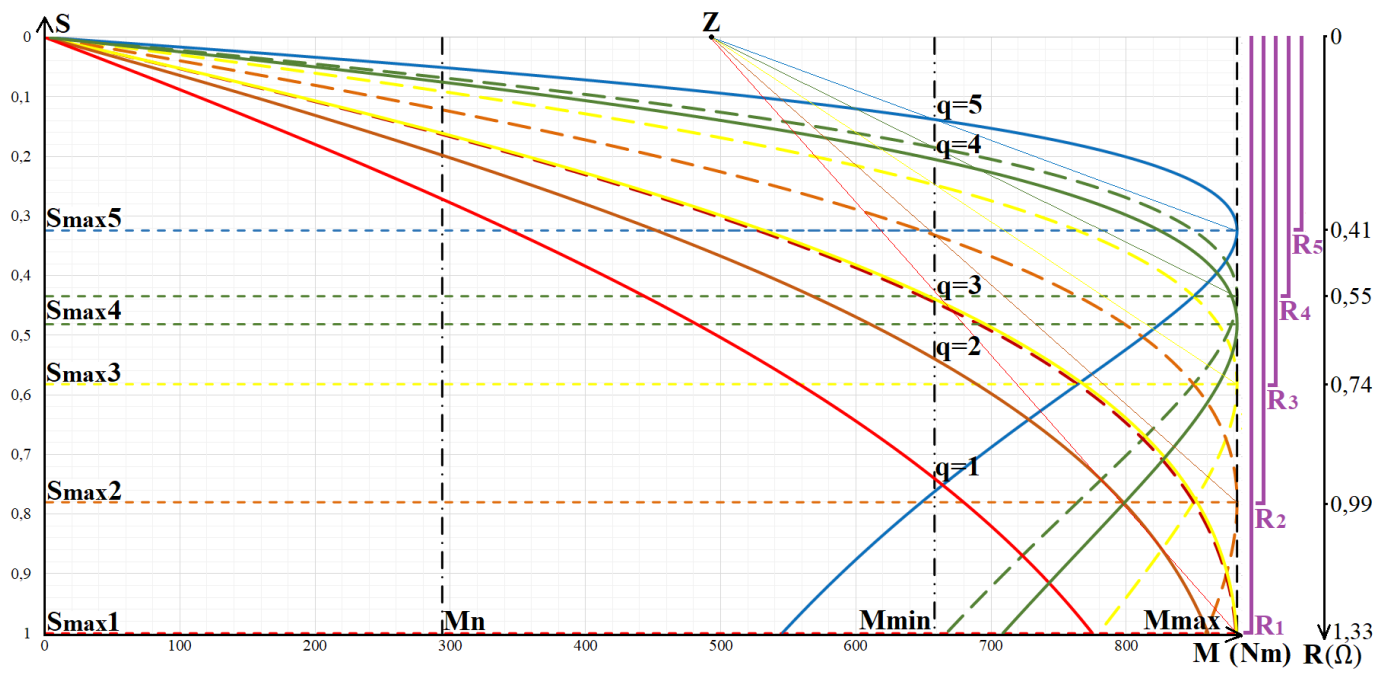
Lisa 3. Mootori M1 ja elektrohüdraulilise piduri M2 lülituskeem voluvõrku (vasakul). Rootori momendi, voolu ning libistuse vahelise sõltuvuse graafikud (paremal).



Lisa 4. Mootori MTF 412-8 libistuse ja pöördemomendi sõltuvuse graafik erinevatel astmetel.

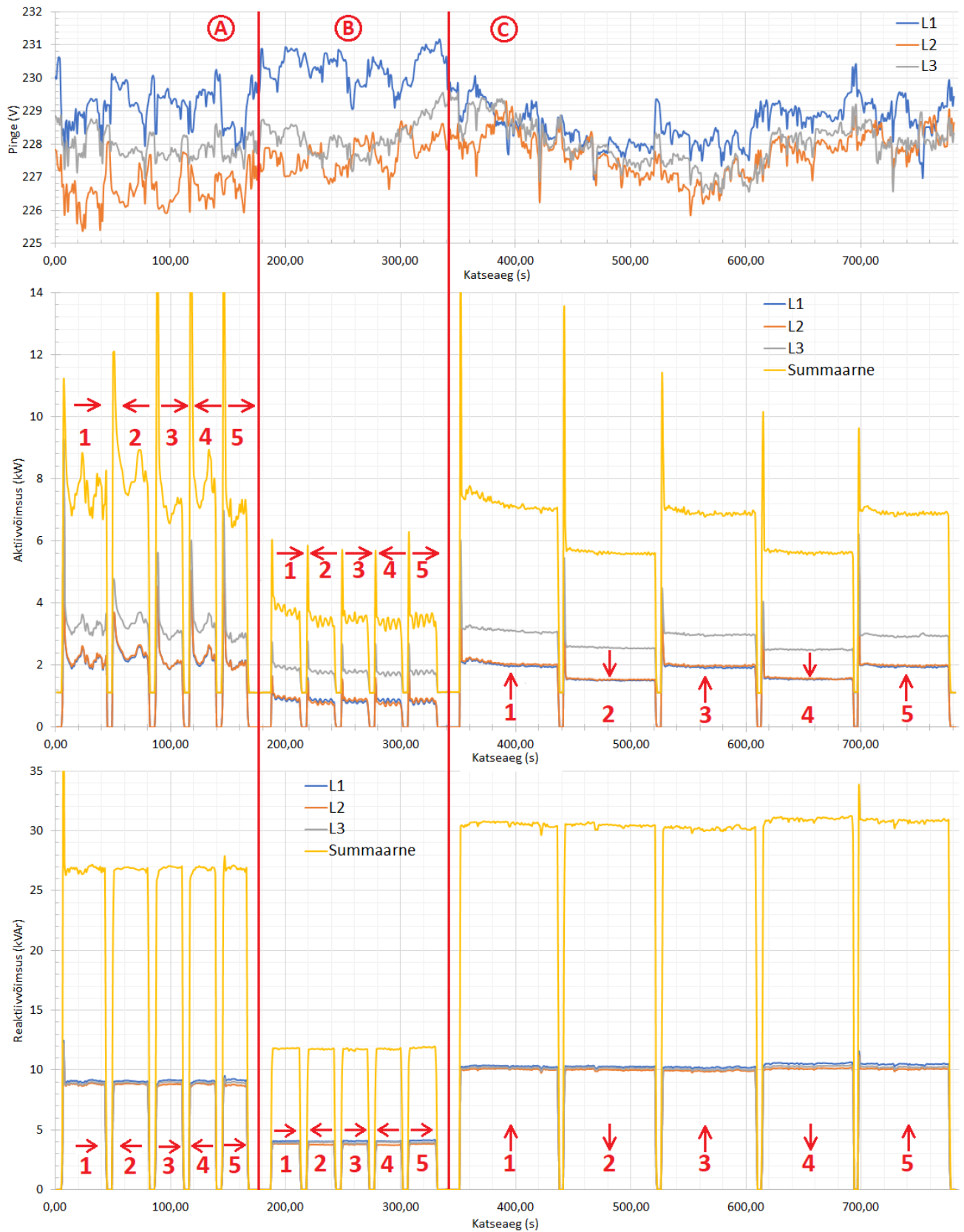


Lisa 5. Mootori MTF 211-6 libistuse ja pöördemomendi sõltuvuse graafik erinevatel astmetel.

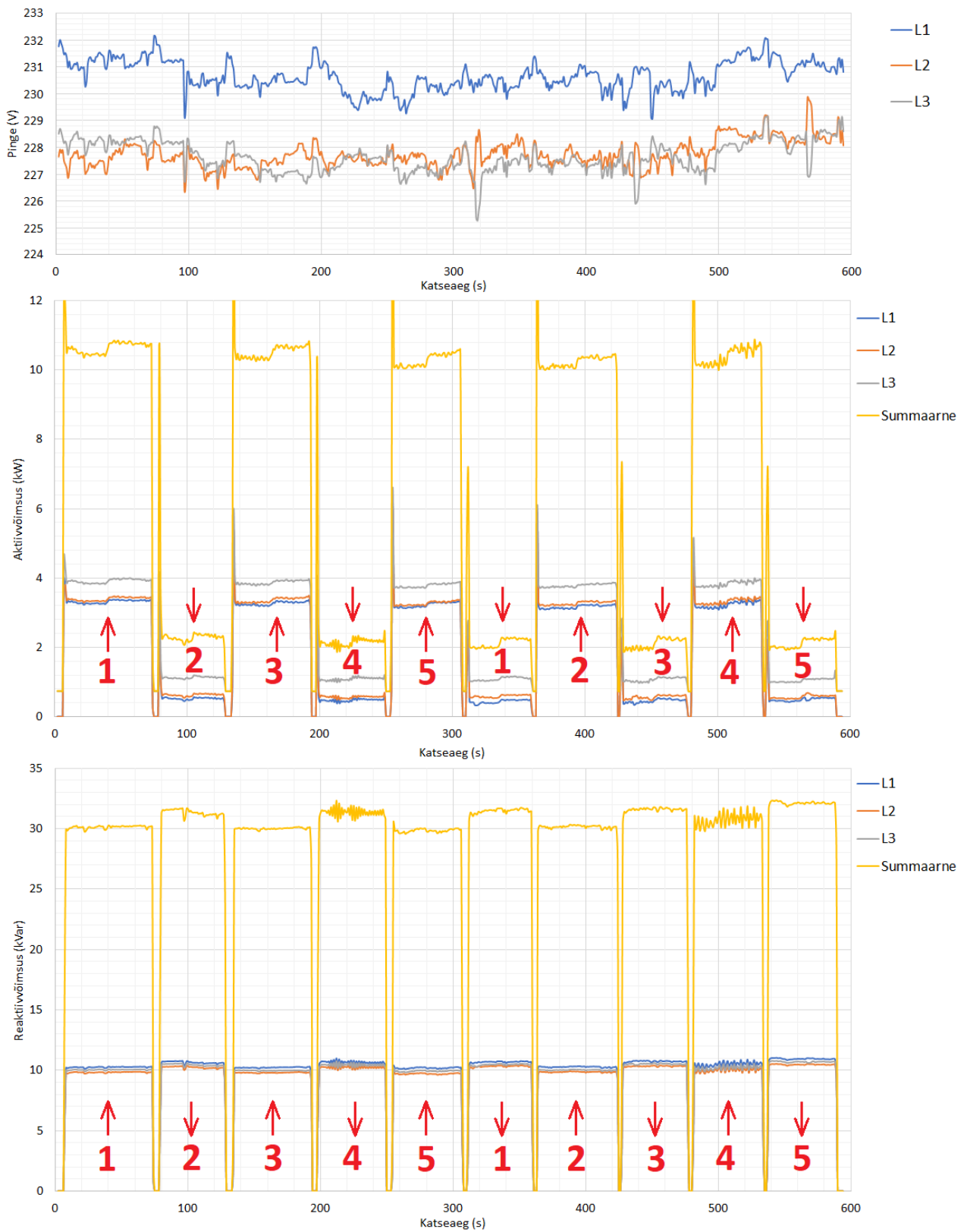


Lisa 6. Pinge ning aktiiv- ja reaktiivvõimsuse graafikud. Käiguvankrite ajamite graafikud (seksioon

A), lastivankri ajamite graafikud (seksioon B), tõstemehhanismi ajamite graafikud (seksioon C)



Lisa 7. Mootori MTF 412-8 pingete ja aktiiv- ning reaktiivvõimsuste graafikud. Numbrid näitavad reostaadiastmete arvu ja nooled liikumissuunda (nool osutab üles – tõstmine, nool osutab alla – langetamine)



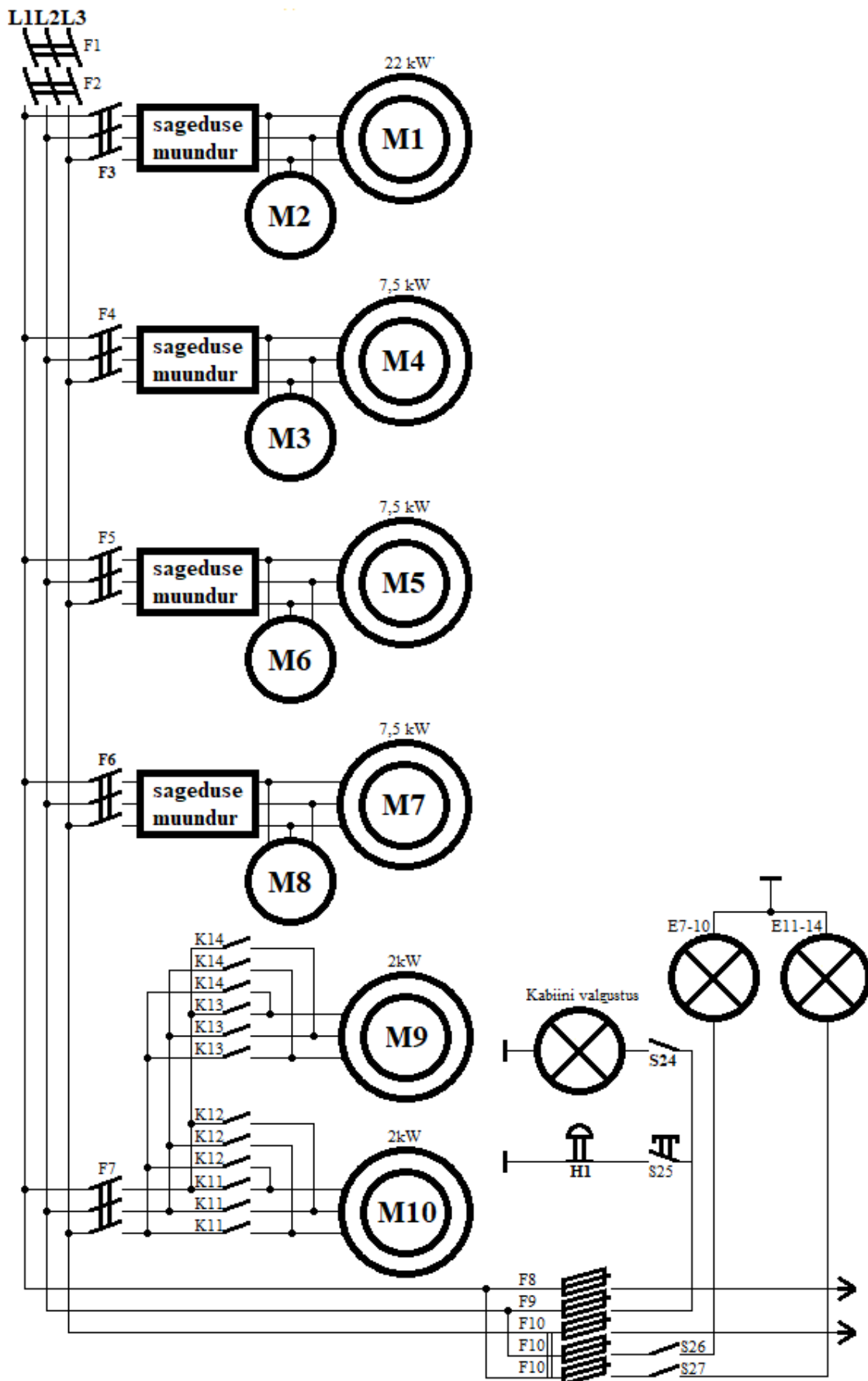
Lisa 8. Mootorite MTF 211-6 pingete ning aktiiv- ja reaktiivvõimsuste graafikud. Joonise seksioonis

A on esitatud käiguvankrite ajamite viie astme graafikud. Joonise seksioonis B on esitatud

lastivankrite ajamite viie astme graafikud.



Lisa 9. Kraana KK 20-32 moderniseeritud jõuvooluahela skeem.



Lisa 10. Moderniseerimiseks valitud mootorite parameetrite tabel.

IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B
IE1 efficiency class according to IEC 60034-30; 2008

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-2-1; 2007			Power factor cos φ	Current		Torque			Moment of inertia J = 1/4 GD ² kgm ²	Weight kg	Sound pressure level L _{PA} dB
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I _N A	I _s / I _N	T _N Nm	T _l / T _N	T _b / T _N			
1000 r/min = 6-poles			400 V 50 Hz			CENELEC-design									
0.09	M2AA 63 A	3GAA 063 001-••C	910	47.1	42.5	32.1	0.56	0.49	2.1	0.9	2.1	2.1	0.0002	4	38
0.12	M2AA 63 B	3GAA 063 002-••C	910	57.5	54.0	46.2	0.58	0.51	2.1	1.3	2.1	2.1	0.00027	4.5	38
0.18	M2AA 71 A	3GAA 073 001-••E	895	60.4	60.0	55.0	0.73	0.58	3.1	1.9	1.9	2.0	0.00092	5.5	42
0.25	M2AA 71 B	3GAA 073 002-••E	895	64.0	63.6	59.5	0.71	0.79	3.3	2.6	2.2	2.2	0.0012	6.5	42
0.37	M2AA 80 A	3GAA 083 001-••E	910	69.9	71.4	68.8	0.73	1.04	3.6	3.8	1.6	2.0	0.002	9	47
0.55	M2AA 80 B	3GAA 083 002-••E	905	72.1	73.4	71.2	0.69	1.59	3.3	5.8	1.8	1.9	0.0026	10	47
0.75	M2AA 90 S	3GAA 093 001-••E	925	71.5	70.9	65.9	0.64	2.3	3.6	7.7	2.1	2.4	0.0032	13	44
1.1	M2AA 90 L	3GAA 093 002-••E	915	72.9	73.4	70.0	0.63	3.4	3.2	11.4	1.9	2.1	0.0043	16	44
1.5	M2AA 100 L	3GAA 103 001-••E	950	79.6	79.9	77.5	0.69	3.9	4.2	15.0	2.0	2.3	0.0082	23	49
2.2	M2AA 112 M	3GAA 113 101-••E	960	82.8	82.5	79.5	0.66	5.8	5.1	21.8	2.3	2.8	0.01	28	54
3	M2AA 132 S	3GAA 133 001-••E	960	82.5	82.9	80.9	0.68	7.7	4.3	29.8	1.8	2.3	0.031	39	57
4	M2AA 132 MA	3GAA 133 002-••E	965	83.6	83.2	80.8	0.65	10.6	5.1	39.5	2.1	2.5	0.038	46	61
5.5	M2AA 132 MB	3GAA 133 003-••E	960	83.8	84.3	82.9	0.71	13.3	5.3	54.7	2.0	2.4	0.045	54	57
7.5	M2AA 160 MLA	3GAA 163 041-••G	968	85.4	86.3	85.8	0.77	16.4	6.4	73.9	1.8	3.0	0.071	84	61
11	M2AA 160 MLB	3GAA 163 042-••G	968	87.0	87.7	87.0	0.77	23.7	7.7	108	2.1	3.2	0.102	110	61
15	M2AA 180 MLA	3GAA 183 041-••G	968	88.1	88.6	87.7	0.75	32.7	7.7	147	2.3	3.8	0.139	137	61
18.5	M2AA 200 MLA	3GAA 203 041-••G	975	89.1	90.0	89.9	0.77	38.9	5.9	181	1.9	2.5	0.218	186	65
22 ¹⁾	M2AA 200 MLB	3GAA 203 042-••G	969	89.3	90.5	90.7	0.76	46.7	5.4	216	1.8	2.3	0.218	198	65
30	M2AA 225 SMA	3GAA 223 041-••G	985	90.6	91.0	90.4	0.83	57.5	7.0	290	2.4	2.8	0.547	257	65
37	M2AA 250 SMA	3GAA 253 041-••G	985	91.2	91.6	91.0	0.82	71.4	6.7	358	2.3	2.7	0.728	291	65
1000 r/min = 6-poles			400 V 50 Hz			High-output design									
7.5	M2AA 132 SMA	3GAA 133 006-E	950	84.7	86.1	86.3	0.73	17.5	4.9	75.3	1.7	2.1	0.0485	88	69

¹⁾ Temperature rise class F

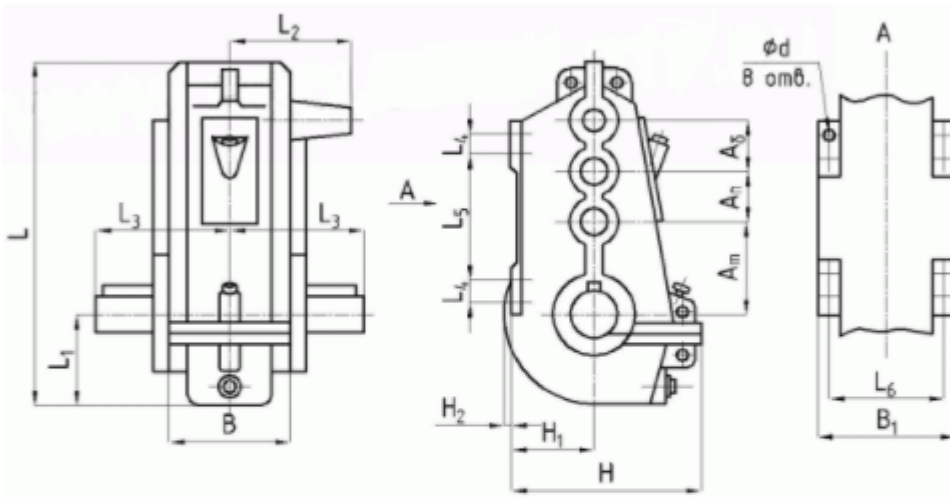
The two bullets in the product code indicate choice of mounting arrangements, voltage and frequency code (see ordering information page).

I_s / I_N = Starting current
T_l / T_N = Locked rotor torque
T_b / T_N = Breakdown torque

Основные технические данные редуктора ВКУ-765

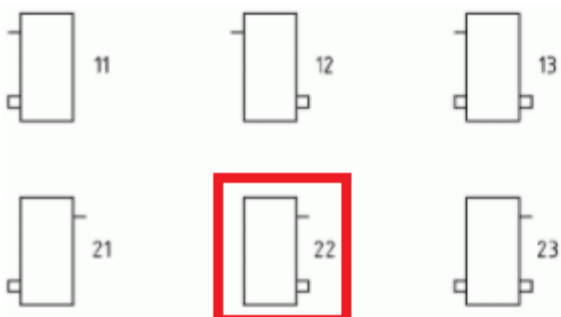
Номинальное передаточное отношение	18; 20; 22.4; 25; 28; 31.5; 35.5; 40; 45; 50; 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 125; 140			
Продолжительность включения (ПВ, %)	60	15	25	40
Номинальный крутящий момент на тихоходном валу, Н?м, min / max	7150/9850	14600/14900	12200/14900	8500/11870
Номинальная передаваемая мощность, кВт, min / max	44.3 / 7.8	92.3 / 12	75.5 / 12	52.6 / 10
Масса, кг, не более	820			

Габаритные размеры редуктора ВКУ-765



Типоразмер редуктора	A ₅	A ₆	A ₇	B	B ₁	H	H ₁	H ₂	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	d	Масса
	мм																кг
ВКУ-765	200	250	315	435	445	675	290	-	1220	284	370	440	110	440	385	26	820

Варианты сборки редуктора ВКУ-765



Lisa 12. Moderniseerimiseks valitud sagedusmuundurite parameetrite tabel.

3-phase supply voltage 380 to 480 V							
Wall-mounted units							
Ratings						Type designation	Frame size
Normal use			Heavy-duty use				
P_N (kW)	P_N (hp)	I_{2N} (A)	P_{hd} (kW)	P_{hd} (hp)	I_{2hd} (A)		
1.1	1.5	3.3	0.75	1	2.4	ACS550-01-03A3-4	R1
1.5	2	4.1	1.1	1.5	3.3	ACS550-01-04A1-4	R1
2.2	3	5.4	1.5	2	4.1	ACS550-01-05A4-4	R1
3	4	6.9	2.2	3	5.4	ACS550-01-06A9-4	R1
4	5.4	8.8	3	4	6.9	ACS550-01-08A8-4	R1
5.5	7.5	11.9	4	5.4	8.8	ACS550-01-012A-4	R1
7.5	10	15.4	5.5	7.5	11.9	ACS550-01-015A-4	R2
11	15	23	7.5	10	15.4	ACS550-01-023A-4	R2
15	20	31	11	15	23	ACS550-01-031A-4	R3
18.5	25	38	15	20	31	ACS550-01-038A-4	R3
22	30	45	18.5	25	38	ACS550-01-045A-4	R3
30	40	59	22	30	45	ACS550-01-059A-4	R4
37	50	72	30	40	59	ACS550-01-072A-4	R4
45	60	87	37	60	72	ACS550-01-087A-4	R4
55	100	125	45	75	96	ACS550-01-125A-4	R5
75	125	157	55	100	125	ACS550-01-157A-4	R6
90	150	180	75	125	156	ACS550-01-180A-4	R6
110	150	205	90	125	162	ACS550-01-195A-4	R6
132	200	246	110	150	192	ACS550-01-246A-4	R6
160	200	290	132	200	246	ACS550-01-290A-4	R6

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Aleksandr Mogilenko	<i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö
<i>Töö pealkiri:</i> Pukk-kraana KK20-32 elektrilise efektiivsuse analüüs ja elektriajamite moderniseerimine	
<i>Kuupäev:</i> 24.05.2019	<i>60 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)</i>
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dr Valery Vodovozov	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Meelis Jõgevest	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva töö põhieesmärk oli pukk-kraana ajamimootorite hetkeseisu uurimine, kogutud andmete analüüs, katsete läbiviimine pukk-kraana mootorite hetkeolukorra ja toimimise mõõtmise andmete kogumiseks. Uuringu kohaselt pakutakse võimalust moderniseerimiseks.</p> <p>Kogutud ja analüüsitud teoreetiliste andmete kaudu moodustatakse libistuse ja pöördemomendi vahelise sõltuvuse teoreetilised ja tegelikud graafikud. Mootorite koormuskatsete ajal ilmnisid lasti- ja käiguvankrite mootorites aktiivvõimsuse tugevad kõikumised. Eksperimendid näitasid, et energia kvaliteet oli halb, puudus sujuva kiiruse reguleerimine ja oli suured aktiivvõimsuse kaod käivitusreostaatides. Oli otsustatud demonteerida käivitusreostaadid. Olemasolevad faasirootoriga asünkroonmootorid tuleb asendada oravkäru mootorite ja sagedusmuunduritega.</p> <p>Võttes arvesse kõik läbiviidud uuringud, võib öelda, et kraana moderniseerimine on aktuaalne ja soovitatav. Moderniseerimise juhul tööga seotud energiakulud oluliselt vähenevad, võimsuse reaktiivkomponent peaaegu eemaldatakse ja suurendatakse kõigi mootorite töö täpsus.</p>	
<i>Märksõnad:</i> moderniseerimine, ajam, sagedusmuundur, pukk-kraan, faasirootor, asünkroonmootor, käivitusreostaadid, eDrive.	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Aleksandr Mogilenko	<i>Type of the work:</i> Bachelor
<i>Title:</i> Analysis of Power Efficiency and Modernization of Electric Drives of the Gantry Crane KK20-32	
<i>Date:</i> 24.05.2019	<i>60 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> : dr Valery Vodovozov	
<i>Consultant(s):</i> Meelis Jõgevest	
<i>Abstract:</i> <p>The main purpose of the graduate work was to collect data about the power condition of the gantry crane drives, then to analyze collected data, and to study motors performance experimentally. As a result of the research, modernization was offered.</p> <p>Using the collected and analyzed experimental and analytical, theoretical and real torque-slip dependences were built. During the motors performance experiments on the load, there were observed strong oscillations of active power and load of the trolley motors. Experiments showed that the crane motors have the poor energy quality, lack of smooth speed adjustment, and huge losses of active power in starting rheostats. It was decided to dismantle the starting rheostats. The existing asynchronous motors with phase rotors have to be replaced by the squirrel-cage motors and frequency converters.</p> <p>In conclusion, according to the results of the graduate work the modernization of crane drives is relevant. It will significantly reduce active power consumption, almost completely eliminate the consumption of reactive power, and improve the smoothness and accuracy of control due to the accurate speed control.</p>	
<i>Keywords:</i> modernization, drive, frequency converter, gantry crane, phase rotor, asynchronous motor, starting rheostats ,eDrive.	