

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

ATM70LT

Harri Laks

VAHELDUVVOOLUMASINATE SÜNTEETILISE KOORMUSE ANALÜÜS JA VÕRDLUS

Magistritöö

Instituudi direktor prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja tead. Anton Rassõlkin

Lõpetaja Harri Laks

Tallinn 2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsenseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 30.05.2016

..... Harri Laks

ATM70LT

Vahelduvvoolumasinate sünteetilise koormuse analüüs ja võrdlus

Harri Laks, üliõpilaskood 153633AAAM, mai 2016. – 50 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, elektriagamite ja jõuelektronika õppetool

Töö juhendaja: Anton Rassõlkin

Võtmesõnad: Sünteetiline koormus, elektrimootorid, konstantse kiiruse meetod, kahekordse sageduse meetod, pritsimissageduse meetod

Referaat:

Lõputöö on 50 lehel, sisaldab 1 tabelit, 17 illustratsiooni ja 15 joonist.

Lõputöö eesmärgiks on uurida erinevaid sünteetilise koormuse meetodeid elektrimootorite koormamiseks.

Töö alguses kirjeldatakse üldisemalt elektrimootorite liigitusest, ajaloost ja põhikomponentidest. Seejärel vaadeldakse kolme erinevat sünteetilise koormuse meetodit:

- Konstantse kiiruse meetod
- Kahekordse sageduse meetod
- Pritsimissageduse meetod

Järgmiseks teostati MATLAB/Simulink keskkonnas elektrimootori sünteetilise koormuse katsed. Antud keskkonnas koostati iga sünteetilise koormuse meetodi jaoks eraldi tööskeem ning juhtimisahel.

Lõpetuseks tehakse sünteetilise koormuse katsete analüüs ja võrdlus.

ATM70LT

Анализ и сравнение синтетической нагрузки машин переменного тока.

Харри Лакс, код студента 153633АААМ мая 2016 г. - 50 с.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ * Энергетический факультет

Электротехнический институт

Кафедра электропривода и силовая электроника

Руководитель работы: Антон Расылкин

Ключевые слова: Синтетическая нагрузка, электродвигатели, метод постоянной скорости, метод двойной частоты, метод впрыскивания частоты

Реферат:

Диссертация на 50 страницах, включает 1 таблицу, 17 иллюстраций и 15 рисунков.

Цель диссертации состоит в том, чтобы исследовать различные методы синтетической нагрузки для нагрузки электродвигателей .

Работа начинается с изложением общей классификации электродвигателей, истории и основных компонентов. Затем рассматривается трёх различных методов синтетической нагрузки:

* метод постоянной скорости

* метод двойной частоты

* метод впрыскивания частоты

Затем проводили в среде MATLAB/Simulink тесты синтетической нагрузки электродвигатели. В этой среде подготовили для каждого метода синтетической нагрузки отдельную рабочую схему и цепи управления.

Наконец сделали анализ и сравнение тестов синтетической нагрузки.

ATM70LT

Synthetic load methods for AC machines, analysis and comparison.

Harri Laks, student code 153633AAAM, May 2016. – 50 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY * Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Drives and Power Electronics

Tutor of the work: scientist Anton Rassolkin

Key words: synthetic load, electric motors, constant speed method, dual frequency method, sweep frequency method.

Summary:

The master's thesis is 50 pages, includes 1 table, 17 illustrations and 15 figures.

The aim of master's thesis is to explore a different methods of synthetic load for loading electric motors.

The work begins by outlining the general classification of the electric motors, the history and the basic components. Then review at three different synthetic load method:

- Constant speed method
- Double-frequency method
- Sweep frequency method

Next, synthetic load test for electric motor were made in MATLAB/Simulink environment. In this environment were made a separate scheme and control circuit for each of synthetic load method.

Finally, I made a synthetic load testing analysis and comparison.

SISUKORD

Magistritöö ülesanne -----	7
1. Eessõna -----	8
2. Sissejuhatus -----	9
3. Elektrimasinad-----	11
3.1. Elektrimootorid ja nende liigitus -----	11
3.2. Elektrimootorite ajalugu -----	12
3.3. Elektrimootori konstruktsioon -----	14
3.4. Elektrimasinates kasutatavad materjalid-----	16
4. Sünteetiline koormus -----	18
4.1. Konstantse kiiruse meetod-----	19
4.2. Kahekordse sageduse meetod -----	20
4.3. Pritsimissagedus -----	23
5. Katsete teostamine -----	25
5.1. MATLAB/Simulink keskkond-----	25
5.2. Mootori nimiandmed-----	28
5.3. Konstantse kiiruse meetod-----	31
5.4. Kahekordse sageduse meetod -----	35
5.5. Pritsimissageduse meetod -----	38
5.6. Tulemuste analüüs -----	41
6. Tulevikuvisioon -----	45
7. Kokkuvõte-----	47
Kasutatud kirjandus -----	49

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2016

Magistritöö ülesanne

Harri Laks, üliõpilaskood 153633AAAM

Magistritöö teema: Vahelduvoolumasinate sünteetilise koormuse analüüs ja võrdlus.

Ülesanne: Välja uurida asünkroonmotorite katsetamise võimalused. Kirjeldada sünteetilise koormuse juhtimise algoritmid ja koostada MATLAB/Simulink mudelid.

Lähteandmed:

1. Asünkroonmotor ABB AXH 112M 4/8 B3

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Anna ülevaade sünteetilise koormuse tüüpidele ja juhtimise algoritmidele;
2. Lahendada juhtimise algoritmi valik ning koostada juhtimise algoritmi MATLAB/Simulink mudelit.

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 03.06.2016

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Professor A. Rassõlikn

Üliõpilane H. Laks.....

1. EESSÕNA

Lõputöö teema on välja antud Tallinna Tehnikaülikooli energetikateaduskonna elektrotehnikainstituudi algatusel. Töö teostamine toimus koostöös teadur Anton Rassõlkiniga, kelle juhendamisel toimus töö vormistamine ja katsetamine.

2. SISSEJUHATUS

Antud töö eesmärgiks on hinnata asünkroonmootori efektiivsust kasutades sünteetilist koormust. Töö sisuks on kolm erinevat sünteetilise koormuse meetodit: konstantse kiiruse meetod, kahekordse sageduse meetod ja pritsimissageduse meetod. Vastavate meetoditega simuleeritakse katsed ning teostatakse võrdlusanalüüs sobivaima meetodi leidmiseks. Lisaks katsetele on töös lühike ülevaade uuritud elektrimootorite ehitusest ning sünteetilise koormuse meetodite teoreetilisest taustast.

Tänapäeva maailma üheks suurimaks probleemiks on keskkonna reostamine. Elektrienergia tootmiseks kasutatakse fossiilseid kütuseid, mis reostavad meie keskkonda päris kõvasti, kuid muidugi on ka alternatiivseid võimalusi, aga nende osakaal on suhteliselt väike. Kuna elektrimootoreid kasutatakse tänapäeval juba pea igas valdkonnas, siis ettevõtted on suure tähelepanu alla võtnud efektiivse tootmise. Elektrienergia tarbimist saab vähendada efektiivsemate elektrimootorite kasutamisega ning üheks võimalikuks viisiks elektrimootori efektiivsuse määramiseks on sünteetilise koormuse meetoditega testimine.

Levinuim elektrimootori liik on kolmefaasiline lühisrootoriga asünkroonmootor. Selle mootori rootorimähis kujutab endast massiivseid uuretes paiknevaid vask- või alumiiniumvardaid, mis mõlemast otsast on ühendatud lühisrõngastega. Alumiiniumi kasutamise korral moodustatakse kogu mähis tervikuna enamasti survevalu teel. Staatori pöörlev magnetväli indutseerib rootorimähises voolu, mille koostoime staatori magnetväljaga paneb rootori pöörlema.

Elektrimootoreid kasutatakse paljudes seadmetes, mis mõjutavad ja teevad lihtsamaks meie elu. Neid kasutatakse kodumasinates, elektrilistes tööriistades, tööpinkides. Kuna tänapäeval ei kujuta elu ilma arvutiga ettegi, siis kasutatakse elektrimootorid arvuti puhurites ja kõvaketastes. Samuti leiab väiksemaid elektrimootoreid käekellades ja mobiiltelefonides. Üheks uuemaks ning järjest arenevaks elektrimootorite kasutamise alaks on elektri- ja hübriidautod. Kõige suuremad elektrimootorid leiavad kasutust laevade liigutamiseks, torujuhtmete survestamiseks ja vee pumpamiseks elektrienergia salvestamiseks mõeldud hüdroelektrijaamades. Nenede mootorite võimsused võivad ulatuda miljonite vattideni. Elektrimootoreid saab toita alalisvooluga, selle näiteks on akutoitel kaasaskantav seada või mootorsõiduk ja vahelduvvooluga elektrivõrgust või inverterist. Elektrimootoreid jaotatakse kasutatava energia, rakenduse, ehituse või liikumisviisi järgi.

Antud töös on välja toodud kolm erinevat sünteetilise koormuse meetodit. Iga meetodiga on võimalik määrata elektrimootori efektiivsust. Need kolm meetodit erinevad üksteise poolest ainult nende juhtimisskeemist. Elektrimootori koormus tekitakse arvutiga, seega selle jaoks pole vaja eraldi lisaseadmeid peale inverteri.

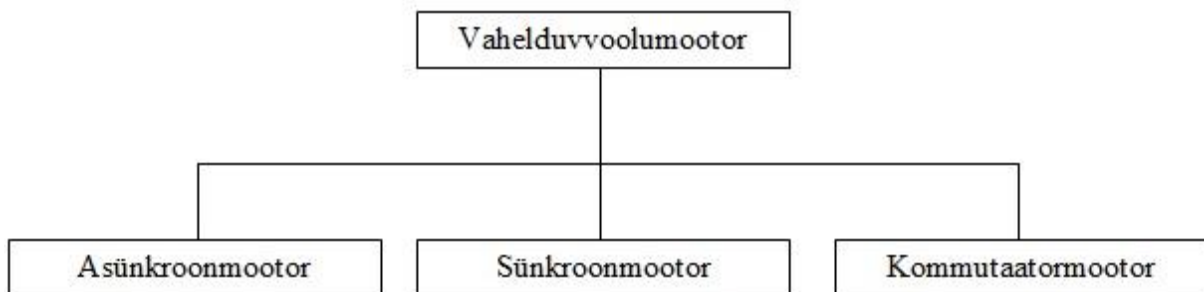
3. ELEKTRIMASINAD

3.1. Elektrimootorid ja nende liigitus

Elektrimootoriks nimetatakse seadeldist, mis muundab elektrienergia mehaaniliseks tööks. Elektrimootoreid liigitatakse näiteks voolu liigi järgi või siis nende töö põhimõtte järgi. Sõltuvalt voolu liigist jagatakse elektrimootorid alalisvoolu- ja vahelduvvoolumootoriteks. Suurem osa elektrimootoritest töötab elektromagnetismi nähtusel. Samuti on olemas elektrimootoreid, mille tööpõhimõtte aluseks on teised elektromagnetilised nähtused, näiteks elektrosaatilistel jõududel või piesoelektrilisel efektil.

Vahelduvvoolumootoreid on olemas ühe-, kahe-, kolme- ja kuuefaasilisi. Kodudes kasutatakse enamasti ühefaasilisi vahelduvvoolumootorid. Tööstus kasutatakse enamasti kolmefaasilisi vahelduvvoolumootorid, kuna need on palju võimsamad kui ühefaasilised elektrimootorid. Kahe- ja kuuefaasilisi vahelduvvoolumootoreid kasutatakse ainult eriotstarbeks [1].

Kolmefaasilisi vahelduvvoolumootoreid liigitatakse kolme põhirühma, mis erinevad teineteisest konstruktsioonilt.



Joonis 3.1. Kolmefaasiliste vahelduvvoolumootorite liigitus

Asünkroonmootori rootor pöörleb pöördmagnetvälja suhtes mittesünkroonselt ehk asünkroonselt, millest ongi tingitud selle mootori nimetus. Asünkroonmootoreid kasutatakse põhiliselt mootoritena ja enamik tööstuses kasutatavaist elektrimootoritest ongi asünkroonmootorid [1].

Normaaltüüpi sünkroonmootoritel pöörleb rootor pöördmagnetväljaga samas suunas ja sama kiirusega. Seega pöörleb rootor pöördmagnetväljaga samas taktis ehk sünkroonselt, millest tuleneb ka selle mootori nimetus. Sünkroonmootoreid kasutatakse kõigepealt generaatoritena

ning peaaegu kõigis vahelduvvoolu-elektrijaamades on üles seatud just sünkroongeneraatorid. Üha enam kasutatakse sünkroonmasinaid ka mootoritena [1].

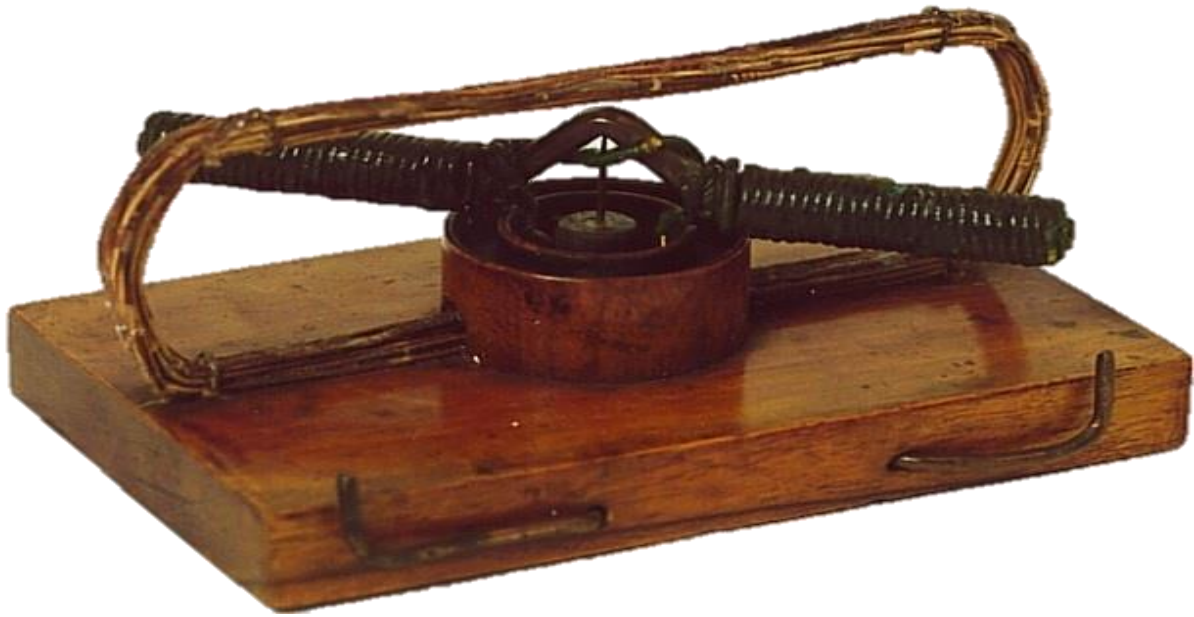
Vahelduvvoolu-kommutaatormasinade rootorid pöörlevad magnetvälja suhtes samuti mittesünkroonselt, olles selles suhtes asünkroonmootorid. Et neil on aga kommutaator, mis tingib tööprotsessi iseärasusi, siis eraldatakse need masinad vahelduvvoolumasinate erirühma. Kõige rohkem kasutatakse vahelduvvoolu-kommutaatormasinaid mootoritena. Nende kasutusala on aga piiratud, mistõttu põhilised vahelduvvoolumootorid on siiski asünkroon- ja sünkroonmootorid [1].

3.2. Elektrimootorite ajalugu

Ilmselt esimesed elektrimootorid on loodud ühe Šotimaa munga Andrew Gordoni poolt aastal 1740, need olid oma olemuselt lihtsad elektrostaatiliselt seadmed [2]. Teoreetiline põhimõte mehaanilise jõu saamiseks elektrienergia ja magnetvälja vastasmõjul ehk Ampère'i jõu seadus, avastati aastal 1820 prantsuse füüsiku ja matemaatiku André-Marie Ampère'i poolt.

Elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks elektromagnetiliste vahendite abil demonstreeriti esimest korda Briti teadlase Michael Faraday poolt aastal 1821. Vabalt rippub juhe kasteti elavhõbedaga täidetud anumasse, mille keskele oli paigaldatud püsिमagnet. Kui juhtmest lasti vool läbi, hakkas juhe magneti ümber ringlema. See näitas, et elektrienergia tekitab juhtme ümber ümmarguse nägematu magnetvälja [3].

Järgmiseks arenguetapiks elektrimootori väljatöötlemisel võib tuua aasta 1827, mil Ungari füüsik Anyós Jedlik leiutas kommutaatori, mis lahendas rootori pideva pöörlemise probleemid ning see seadles töötab tänaseni (Joonis 3.2). Aasta hiljem demonstreeris ta esimest seadeldist, mis sisaldas kolme põhilist alalisvoolumootri komponenti. Nendeks osadekes on staator, rootor ja kommutaator [4].



Joonis 3.2. Jedliku algne mootori illustratsioon [5]

Esimene alalisvoolumootor, millel tegelikult oli märkimsväärne väljundvõimsus, leiutati aastal 1834 Moritz von Jacobi poolt. Neli aastat hiljem töötas ta välja veel võimsama mootori, mida kasutati paadimootorina. See mootor oli piisavalt võimas, et suutis vedada 14 inimest üle laia jõe. Esimene kommutaatoriga alalisvoolumootori leiutas Briti teadlane William Sturgeon aastal 1832 [6]. Sturgeoni tööd jälgides leiutas Thomas Davenport mootori, mille pöörlemiskiirus oli juba 600 pööret minutis ning seda kasutati toleaeagsetes printimis masinates [7].

Vahelduvvoolumootorite võimule tulek saab alguse aastal 1879, mil Walter Baily demonstreeris esimest primitiivset asünkroonmootorit [8]. Järgnevatel aastatel püüdisid teadlased välja töödelda töötavat vahelduvvoolumootorit kuna vahelduvvool on alalisvoolust pikkadel liinidel etem ning suudab taluda rohkem koormust . Aastal 1885 demonstreerisid Galileo Ferraris ja Nikola Tesla esimest töötavat kommutaatorita vahelduvvoolu asünkroonmootorit (Joonis 3.3). Esimese kolmefaasilise vahelduvvoolu mootori leiutas Mikhail Dolivo-Dobrovolsky aastal 1889 [9]. Uute materjalide kasutamine tänapäeval on selgesti parandanud asünkroonmootorite mõõtmeid, sest täna on 100-hobujõuline asünkroonmootor samade mõõtmetega, mis oli 7,5-hobujõuline mootor aastal 1897 [10].



Joonis 3.3. Nikola Tesla esimene asünkroonmootor [11]

3.3. Elektrimootori konstruktsioon

Vahelduvvoolu mootori liikumatut osa nimetatakse staatoriks (Joonis 3.4.) ja see kinnitatakse mootori kere külge. Staatorisüdamikud valmistatakse elektrotehnilise terase lehtedest või püsिमagnetitest. Elektrotehnilised terase lehed kaetakse tavaliselt mõlemalt poolt õlikampol-isoleerlakiga enne südamiku koostamist. Südamik koosneb paljudest õhukestest elektrotehnilise terase lehtedest, mis on üksteise peale laotud. See meetod vähendab energiakadusi võrreldes, kui kasutada üht tervet metalli tükki staatorisüdamikus. Mõnikord valmistatakse väikese võimsusega mootorite staatorsüdamikud lakk-katteta teras lehtedest, sest loomulik või kunstlikult tekitatud oksiidikiht osutub küllaldaseks isolatsiooniks [1].



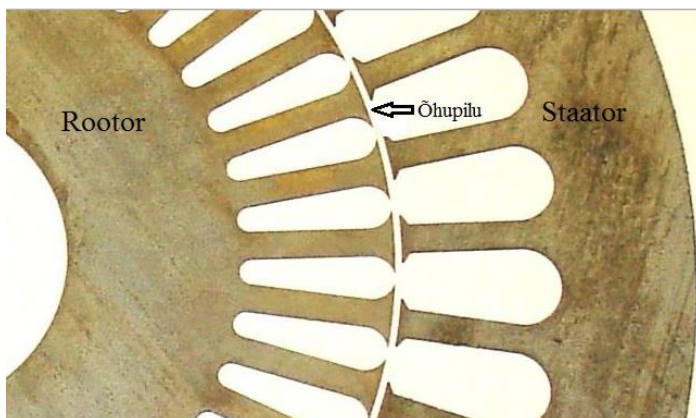
Joonis 3.4. Elektrimootori staatorisüdamik [12]

Elektrimootori liikuvat osa nimetatakse rootoriks (Joonis 3.5.). Samuti rootorisüdamik koosneb elektrotehnilise terase lehtedest, mis on kaetud vastava isoleerlakiga. Rotorisüdamik kinnitatakse võllile, mille otstes on laagrid, mis on paigutatud, kas staatori kere külge kinnitatud laagrikilpidesse või eraldiseisvatsse laagripukkidesse. Rotor ise asetseb staatori sees ning staatormähises loodav magnetväli panebki rootori pöörlema, sest induksiooni teel tekib rootori lühismähises vool [1] [13].



Joonis 3.5. Elektrimootori rootor [14]

Õhupiluks (Joonis 3.6.) nimetatakse staatori ja rootori omavahelist kaugust. Õhupilu tehakse võimalikult väike, kui seda võimaldab töökindlus ning tehnoloogia. Kui õhupilu on väga minimaalne, siis see võib tekitada ebaloosuliku müra ning võib lõhkuda staatori või rootori. Samas, mida suurem on õhupilu, seda väiksem on mootori võimsustegur, sest õhupilu suurus mõjutab magnetimisvoolu. Normaalne õhupilu suurus sõltub mootori võimsusest, mõnekilovatise mootori õhupilu suurus on 0,4..0,5 millimeetrit, suure võimsusega mootoritel võib see küündida paari millimeetrini [1].



Joonis 3.6. Illustreeriv pilt õhupilust [15]

3.4. Elektrimasinates kasutatavad materjalid

Elektrimasinates kasutatavad materjalid jaotatakse kolme erinevasse gruppi: isoleer-, konstruktsioon- ja aktiivmaterjalid.

Isoleermaterjale kasutatakse voolu juhtivate osade ja mähiste isoleerimiseks. Samuti tarvitatakse neid ka magnetsüdamiketes kasutatava elektrotehnilise teras lehtede teineteisest isoleerimiseks. Eraldi grupi moodustavad materjalid, mida kasutatakse elektrimasinate harjade valmistamiseks. Harjad on mõeldud voolu ära juhtimiseks elektrimootori liikuvatelt osadelt [1].

Elektrimasinates kasutatavatele isoleermaterjalidel peab olema võimalikult suur mehaaniline tugevus, kuumuskindlus, elektriline läbilöögitugevus ja soojusjuhtivus, kuid väike hügrokoopus. Väga tähtis on võimalikult õhuke isolatsiooni kiht, sest selle paksuse suurendamine halvendab soojuse ülekandmist ja vähendab uurde täitetegurit. See aga põhjustab masina nimivõimsuse vähenemise. Isoleermaterjalid võivad olla vedelad, gaasilised ja tahked. Kõige enam kasutatakse vedeldielektrikut trafodes mineraalõlina. Gaasilised isolatsioonmaterjalid on tavaliselt vesinik ja õhk. Tahked isoleermaterjalid on looduslikud orgaanilised kiudmaterjalid, sünteetilised materjalid, anorgaanilised materjalid ja mitmesugused lakid, emailid ning komponendid sünteetilise ja looduslike materjalide baasil [1].

Konstruktsioonmaterjale kasutatakse elektrimasina selliste elementide valmistamiseks, millede ülesandeks on mehhaaniliste koormuste ülekandmine ja vastuvõtmine. Nendeks on näiteks erinevad kinnitusdetailid, võllid, laagripüksid ja kered. Konstruktsioonimaterjalid peavad vastama ehitus nõuetele, mis on ette antud vastava seadusega. Enim kasutatavad materjalid on: teras, malm, plastmass ja värvilisi metalle ning nende erinevaid sulameid [1].

Aktiivmaterjalid jagatakse magnet- ja juhtmematerjalideks. Neid kasutatakse magnetsüdamike ja mähiste valmistamiseks. Juhtmematerjaline kasutatakse elektrolüütilist vaske ning viimasel ajal ka rafineeritud alumiiniumi, sest neil on hea elektrijuhtivus ja need on suhteliselt odavad. Samuti kasutatakse mähiste valmistamiseks vase- ja alumiiniumsulameid. Voolu juhtivate konstruktsioonide, näiteks kontakt poldid ja seibid, valmistamiseks kasutatakse vasesulameid, kuid mehaanilise tugevuse suurendamiseks ja värviliste metallide säästimiseks tehakse need tavaliselt terasest [1].

Magnetmaterjale kasutatakse elektrimasinate magnetahelate valmistamiseks. Nende osade valmistamiseks kasutatakse elektrotehnilist lehtterast, valuterast, konstruktsiooniterast ja malmi. Malmi kasutatakse harva, sest tal on madalad magnetilised omadused. Kõige tähtsama magnetiliste materjalide klassi moodustavad elektrotehnilise lehtterase mitmesugused sordid. Hüstereesi- ja pöörisvoolukao vähendamiseks lisatakse elektrotehnilise terase koostisesse räni. Niisugused lisandid nagu süsinik, hapnik ja lämmastik halvendavad elektrotehnilise terase kvaliteeti. Suurt mõju elektrotehnilise terase kvaliteedile avaldab ka terase valmistamise tehnoloogia. Harilikku elektrotehnilist terast saadakse kuumvaltsimisega. Viimastel aastatel on kiiresti kasvanud külmalt valtsitud tekstuurterase kasutamine, mille magnetilised omadused piki valtsimissuunda on tunduvalt paremad kui harilikul kuumalt valtsitud elektrotehnilisel terasel [1].

Elektrimootorite harjad jagatakse kahte gruppi: süsigrafiit harjad ja metallgrafiit harjad. Levinumad on esimese grupi harjad. Esimese grupi harjade valmistamiseks kasutatakse tahma, peenestatud looduslikku grafiiti ja antratsiiti ning sideainena kivisöevaiku. Harjade toorikud lõõmutatakse. Lõõmutusrežiim määrabki grafiidi kristallide kuju tootes. Kõrgetel lõõmutustemperatuuridel muundub tahmas ja antratsiidis olev süsinik grafiidiks, mille tagajärjel niisugust lõõmutusprotsessi nimetatakse grafiteerimiseks. Teise grupi harjad sisaldavad, nagu nimigi ütleb, metalle. Nendeks on näiteks vask, pronks või hõbe [1].

4. SÜNTEETILINE KOORMUS

Peamine sünteetilise koormuse põhimõte on elektriliselt veenda elektrimasinat, et ta töötab täis koormusega ja mähist läbib nimivool. Tavaline koormus katse eeldab, et testitavale mootorile ühendatakse järgi, kas mehaaniline koormus, dünamomeeter või siis generaator. Sünteetilise koormuse katse kutsub esile asünkroonmootori rootori perioodilise kiirendamise ja aeglustamise vastava mootori nimipöörlemiskiiruseni. Kui asünkroonmootori rootor kiirendab sünteetilise koormuse katse ajal, siis energia võetakse vooluallikast. Aga kui toimub mootori aeglustamine, siis see tekitab negatiivse pöördemomendi, seega mootor töötab nagu generaator ning toodetakse energiat, mis juhitakse tagasi algsesse vooluallikasse. Kui mootor töötab pidevalt sellise tsükliga, et kiirendab ja aeglustab, siis keskmine voolutugevus ja võimsus kasvab [16].

Sünteetiline koormus kasutab rootori enda inertsimomenti koormusena, see tuleneb jõumomendi valemist (4.1) [16].

$$T_e = (T_L = 0) + J * \frac{d\omega}{dt} + D\omega , \quad (4.1)$$

kus T_e – elektriline väändemoment,

T_L – mehaanilise koormuse väändemoment,

J – rootori inertsimoment,

D – hõõrdetegur,

ω – rootori nurkkiirus.

Kuna puudub mehaaniline koormus, seega kui nurkkiirus pidevalt muutub, siis termin $(J * \frac{d\omega}{dt})$ muutub pidevalt, järelikult on vaja elektrilist pöördemomenti rakendada. Selle elektrilise pöördemomendi suund peab olema rootori kiirendamise suunaline. See tähendab, et positiivse pöördemomendi korral rootor kiirendab ning negatiivse pöördemomendi korral rootor aeglustub. Seega, kui mootori elektriline ergastamine põhjustab elektrilise pöördemomendi pideva võnkumise, siis rootor kiirendab ja aeglustub korduvalt [16].

Hoolikalt valitud sisend tigmustega saab toota mootori nominaalset pinget ja voolutugevust üheaegselt. Kui nimivool on saavutatud, siis peaksid eksisteerima ka vases koed süsteemis. Samamoodi kui on saavutatud nimipinge, siis eeldatakse et süsteemis on ka rauaskaod. Kui sünteetilise koormuse katse all töötab elektrimootor väikese libisemise piirkonnas, siis sellega kaasnevad ka hõõrdumise ja mähise kaod. Kuna alguses oli sünteetilise koormuse katse mõeldud temperatuuri tõusu karakteristikute tekitamiseks, kui mootorile oli rakendatud täielik mehaaniline koormus. Selle katsega sai hinnata mootori efektiivsust, kui mootor töötas oma töötemperatuuril [17].

Seega, kuna on võimalik saavutada kõik nimitingimused, eeldatakse, et süsteemis esinavad kõik nominaalsed kaod, kui testmootor töötab sünteetilise koormuse all. Seetõttu, mõõtes elektrilise sisendi parameetreid ning määrates mootori kasutatav võimsus vastavalt mootori iga sünteetilise koormuse tsükli vältel, saab määrata elektrimootori kogu kaod [16].

4.1. Konstantse kiiruse meetod

Konstantse kiiruse meetodi korral tekitab sünteetiline koormus magnetvälja, mis pöörleb ühtlase kiirusega. Kui rootor pöörleb samal kiirusel kui magnetväli, siis rootoris ei indutseerita nii pinget kui ka voolu, sest puudub magnetvoog rootori mähises. Kui aga magnetvoo amplituud muutub ajas, siis rootori mähises indutseeritakse elektromotoorjõud ning läbib vool. Elektromotoorjõud indutseeritakse nii, et ta on rootori mähise magnetvooga vastassuunaline. Indutseeritud rootorivool ja pöörleva magnetvälja koostöö põhjustab pöördemomendi tekkimise ja rootor hakkab pöörlema. Kuna ergastus tekitab konstantsel kiirusel magnetvälja vahelduval võnkumisel, siis indutseeritud vool on samuti võnkuv, seega tekitatakse võnkuv pöördemoment ning selle tulemuseks on sünteetiliselt koormatud induksioon mootor [18].

Püsikiirusega pöörleva magnetvälja sünteetilise koormuse mõiste on sarnane trafo mõistega, kus priimarpinge amplituudi muutmine põhjustab sama sagedusega magnetvoo võnkumise trafode südamikus ja seega indutseerib elektromotoorjõud trafo sekundaarmähises. Kui trafo sekundaarmähis on lühistatud või koormatud, siis tekitakse sekundaarne vool [16].

Sünteetilise koormuse konstantse kiiruse meetodi kasutamist elektrimootorite efektiivsuse hindamiseks on saanud kinnitust. Kasutades arvutiga modelleerimise ja simulleerimise tehnikat, on võimalik täpselt tuvastada testitava mootori kaod. See sünteetilise koormuse

meetod võimaldab mootoreid testida otse töökohas, see tähendab, et neid mootoreid ei pea kuhugi liigutama. Efektiivsuse hindamine toimub kiiresti ja lihtsalt, selle jaoks on vaja ainult testitava mootori nimipinget ning normaalset töötemperatuuri [16].

Vastavat katseseadeldist on väga lihtne üles seada, see nõuab ainult mootori klemmide ühendamist kolmefaasilise inverteri väljundiga. Kuna sünteetilise koormuse katse ei vaja eraldi koormuse ühendasmist testitava mootoriga, seega katsesendi ülesseadmiseks ei kulu eriti aega, mis annab suure eelise just suurte mootorite katsetamisele. Kuna puudub vajadus mõõta rootori pöörlemiskiirust, siis see vähendab katseseadmete keerukust. Seiresüsteemi võib ühendada ka püsivalt, kasutades väga kiireid ning täpseid mõõteandureid ja digitaalseid signaalitöötluste võimeid ning algoritme, mis jälgivad ning kaitsevad katseseadeldist [16].

Üheks suureks sünteetilise koormuse eeliseks mootorite efektiivsuse hindamiseks on selle võimalus testida mootoreid sõltumata nende orientatsioonist. Sünteetilise koormusega on vertikaalseid mootoreid testida sama lihtne kui horisontaalseid mootoreid. Varem oli vertikaalseid mootoreid väga keerukas testida, sest raskus oli leida sobivat vertikaalset koormust. Samuti on üheks eeliseks veel suhteliselt väike energiatarbimine. Sünteetilise koormuse kasutamisel on see palju väiksem, kui see on kasutades mehaanilist koormust [16].

4.2. Kahekordse sageduse meetod

Kahekordse sageduse meetod sünteetilise koormuse tekitamiseks avastati aastal 1921 Ytterbergi poolt. Tol ajal puudusid veel pingemuundurid ning seda katset oli väga raske teostada. Nüüd, kasutades pingemuundurit, on sünteetilise koormuse tekitamine kahekordse sageduse meetodi abil väga lihtne [19].

Kahekordse sageduse meetodi põhimõte on toota toitepinge, mis sisaldab kahte erinevat sagedust. Moodus selle jaoks on tekitada kaks eraldi seisvat magnetvälja, mida eristab üksteisest erinev pöörlemiskiirus. Kuna mootori võlli kiirust ei saa järsku muuta, siis mootori tööpõhimõte muutub pidevalt, ühel perioodil töötab ta mootorina ning teisel perioodil töötab ta generaatorina. Selle tulemusena suureneb mootori vool võrreldes mootori tühijooksu vooluga [20].

Ytterbergi meetodi kohaselt on koormataval masinal kaks kolmefaasilist sümmeetrilist toiteallikat, millel on erinevad sagedused. Ühel toiteallikal on fikseeritud sagedus f_1 ning seda

nimetatakse baasallikaks ja teisel toiteallikal on muutuv sagedus f_2 , mida nimetatakse ka abistavaks allikaks. Muutuv sagedus f_2 on tavaliselt väiksem kui fikseeritud sagedus f_1 . Elektromagnetvälja tekkimise kahest vastavast toiteallikast võib kirjutada valemitega [19]:

$$u_1 = \sqrt{2} * U_1 * \sin(\omega_1 * t) , \quad (4.2)$$

kus u_1 – esimese toiteallika pinge hetkväärtus,

U_1 – esimese toiteallika pinge amplituud,

ω_1 – rootori nurkkiirus fikseeritud sagedusega,

t – aeg.

Ning valem teise sageduse kohta

$$u_2 = \sqrt{2} * U_2 * \sin(\omega_2 * t) , \quad (4.3)$$

kus u_2 – teise toiteallika pinge hetkväärtus,

U_2 – teise toiteallika pinge amplituud,

ω_2 – rootori nurkkiirus muutuva sagedusega.

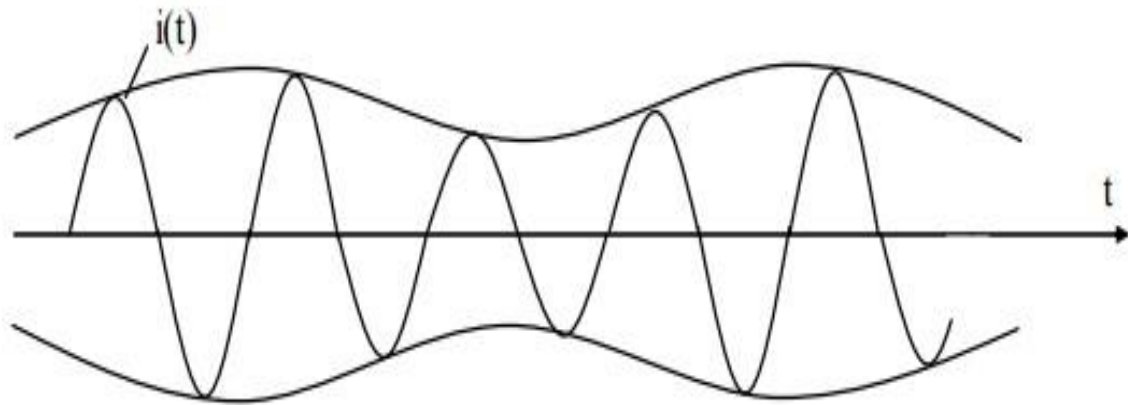
Seega saadud sageduse signaali amplituud on võrdeline sageduse f_1 ja f_2 vahe suurusega. Pöörlevas rootori mähises on indutseeritud pinget, mis tuleneb sagedusest, mille suurus on võrdeline f_1 ja f_2 vahelise suurusega. Omavahline mõju rootorivoolu ja pöörlev magnetväli südamikus tekitab elektromagnetilise pöördemomendi, kus esimesel pool-perioodil toimub kiirendamise pöördemoment ning pöörleva rootori kiirus suureneb ja teises pool-perioodil toimub genereeriv pöördemoment, vähendades pöörleva rootori kiirust. See tähendab, et esimesel pool-perioodil kasutab mootor aktiivvõimsust otse toiteallikast, aga teisel pool-perioodil toimub generaatori tööpõhimõte, ehk genereeritakse aktiivvõimsust, mis suunatakse tagasi toiteallikasse. Saadud pinget iseloomustab järgmine valem: [19]

$$u(t) = \sqrt{2} * U_1 * \sin(\omega_1 * t) + \sqrt{2} * U_2 * \sin(\omega_2 * t) , \quad (4.4)$$

$$u(t) = \sqrt{2} * (U_1 - U_2) * \sin(\omega_1 * t) + \sqrt{2} * U_2 * [\sin(\omega_1 * t) + \sin(\omega_2 * t)] , \quad (4.5)$$

Kus $u(t)$ – mootori sisendpinge hetkväärtus .

Vastavat voolu tunnusoont mootori mähises on näha (Joonis 4.1)



Joonis 4.1. Vool hetkväärtus sünteetilise koormuse ajal [19]

Järgmiseks võetakse kasutusele järgmised tähistused lihtsustamiseks:

$$\alpha = \omega_1 - \omega_2 \quad (4.6)$$

$$\beta = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} \quad (4.7)$$

Kombineerides valemid (4.6) ja (4.7) saamaks valemi (4.8)

$$(\beta + 1) * \alpha = 2 * \omega_1 \quad (4.8)$$

Asendades need valemisse (4.9)

$$u(t) = \sqrt{2} * \left[(U_1 - U_2) + U_2 * \cos \frac{\alpha * t}{2} \right] * \sin \left(\frac{\alpha * \beta}{2} * t \right), \quad (4.9)$$

Kus $u(t)$ – sisendpinge hetkväärtus,

U_1 – esimese toiteallika pinge amplituud,

U_2 – teise toiteallika pinge amplituud,

ω_1 – rootori nurkkiirus fikseeritud sagedusega,

ω_2 – rootori nurkkiirus muutuva sagedusega,

t – aeg,

α – lihtsustamise tähis,

β – lihtsustamise tähis.

Võime täheldada, et see pinge erineb perioodiliselt sagedusest ω_1 ja on moduleeritud sagedusega $\frac{\alpha}{2}$ [19].

4.3. Pritsimissagedus

Kuna antud meetodi kohta on vähe informatsiooni ning ei leidnud vastavat tähendust inglisekeelsele nimetusele, siis nimetasin antud meetodi pritsimissageduse meetodiks. Selline nimi sellepärast, et antud meetod puhul toimub kõrgemate harmoonikute sissepritsimine siinussignaali.

Paljud tööstused, kus kasutatakse elektrimootoreid, on hakanud uurima võimalusi enegriatõhusamate elektrimootorite kasutamist ja ka kulude kokkuhoid on märkimisväärne. On selge, et energiatõhusus on kõrge prioriteet paljude riikide ja tööstuste jaoks. Antud meetod parandab oluliselt kolmefaasilise asünkroonmootori efektiivsuse testimise võimalust [21].

Pritsimissagedus on meetod, millega on võimalik määrata elektrimootori kogu kaod, kui see töötab täiskoormusel. Täiskoormusel töötamiseks pole vaja elektrimootorile järgi ühendada mehaanilist koormust, dünomomeetrit ega ka generaatorit. Täiskoormuse tekitamiseks tuleb testitava mootori külge ühendada ainult elektrijuhtmed, sellega vähenab ka testimise keerukus elektrimootori efektiivsuse hindamiseks. Katse sooritamiseks pole eraldi seisvaid masinaid vaja, kuna inverter on vooluallikaks ning seda on võimalik juhtida arvutiga, kus saab kiiresti muuta vastavaid sisend tingimusi [20].

Pritsimissagedus meetod kasutab sünteetilise koormuse tekitamiseks üht toitepinge sagedust. Selle meetodi põhimõte on toitepinge sagedust väikeste vahemikkudega kiiresti muuta ning selle vahemiku keskmeks on nominaalne sagedus. See meetod põhjustab samuti elektrimootori töötamise vaheldumisi, nii elektrimootorina kui ka generaatorina. Seda sünteetilise koormuse meetodit ei saa rakendada kasutades elektrimasina toiteallikana tavalist toitepinget, kuna sellega pole võimalik tekitada vastava meetodi jaoks sageduse kiiret moduleerimist. Siiski kasutades DSP juhitatavat inverterit on võimalik saavutada sageduse vajalik moduleerimine [20].

Pritsimissageduse sünteetilise koormuse perioodid määratakse sisend tigituste järgi. Tsükli periood on valitud „pritsimis“ sagedus, mille puhul pöörlev magnetväli staatormähises pühib maksimumist miinimumini ja tagasi. Mõlema meetodi puhul on vaja teada perioodi selleks, et arvutada võimsuse efektiiv ja keskmine väärtus. Keskmine tarbitav võimsus kogu katse vältel on inverteri kaod ja testitava masina kogu kaod kokku arvestatult. Vastava meetodi sünteetiline koormus põhjustab keskmise võimsuse, mida mõõdetakse ja arvutatakse igal aja hetkel, sest positiivse keskmise võimsuse korral rootor kiirendab ning negatiivse keskmise võimsuse ajal rootor aeglustub [20].

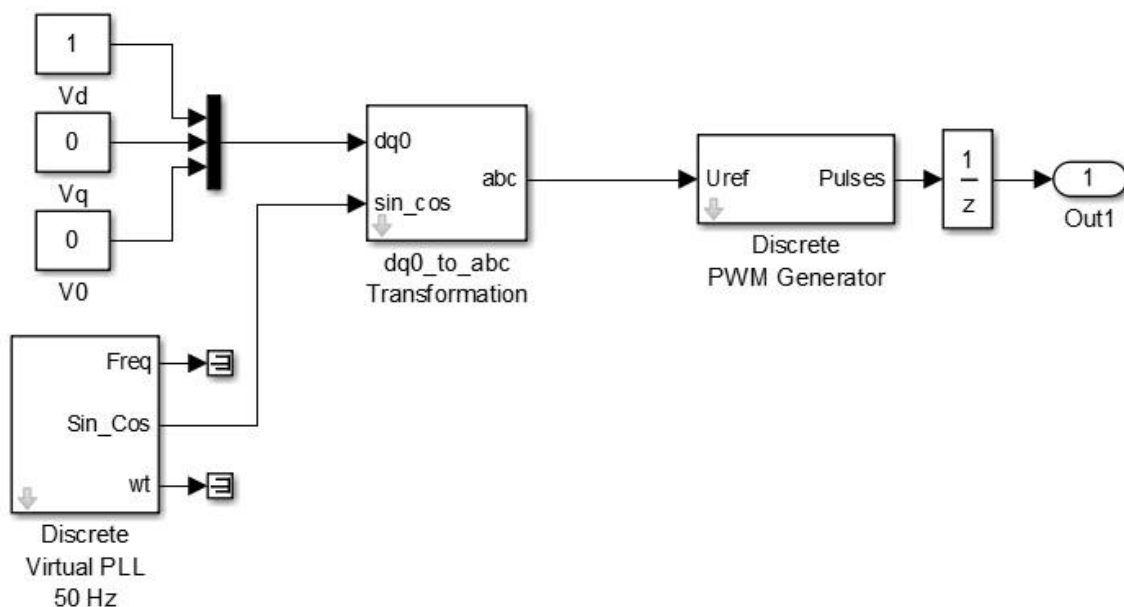
5. KATSETE TEOSTAMINE

Selleks, et uurida täpsemalt sünteetilist koormust, simuleeriti katsetused arvutiprogrammi MATLAB/Simulink keskkonnas. Selles keskkonnas koostati skeem, mille abil sai hinnata mootori väljund parameetrid, kui mootorit koormati sünteetilise koormusega.

MATLAB platvorm on optimeeritud lahendama inseneri ja teaduslikke probleeme. Maatriksitel põhinev MATLAB-i keel on maailmas kõige loomulikum viis väljendada arvutuselementide matemaatikat. Sisseehitatud graafilise funktsiooniga on võimalik saadud tulemusi lihtsalt visualiseerida ning teha selle põhjal järeldused. Selles keskkonnas on olemas suur hulk eelnevalt loodud tööriistakastid, mis lihtsustavad algoritmide koostamist. Kuna need MATLAB-i tööriistad ja võimed on kõik rangelt kontrollitud ja disainitud koos töötama, siis seda keskkonda kasutatakse masina tunnusjoonte õppimisel, signaalitöötluses, pilditöötluses, arvutilinvistikas, robotikas ja paljudes teistes valdkondades.

5.1. MATLAB/Simulink keskkond

Katsete simuleerimiseks MATLAB/Simulink keskkonnas on koostatud vastavad skeemid. Sünteetilise koormus katsete juhtimiseks on koostatud juhtimisskeem (Joonis 5.1). Juhtimisskeemi põhiosadeks on Park'i transformaator ja pulsilaiusmodulatsiooni generaator.



Joonis 5.1. Juhtimisskeemi näidis

Elektrotehnikas on Park'i transformatsioon matemaatiline teisendus, mis pöörab kolmefaasilise taustsüsteemi püüdes lihtsustada kolmefaasiliste ahelate analüüsi. Antud katsetes kasutatakse (pikitelje, ruuttelje ja null-jada komponente ehk dq0) transformaatorit. See transformaator on äärmiselt sarnane transformaatorile, mille 1929. aastal Robert H. Park välja töötas, sellepärast nimetataksegi seda transformaatorit sageli Park'i transformaatoriks. Antud töös kasutatakse (dq0-to-abc) transformaatorit (Joonis 5.2), see tähendab, et dq0 süsteemist transformeeritakse abc süsteem. Selline süsteemi muutus on väga laialdaselt levinud just kolmefaasiliste elektrimasinate mudelites. See mudel muundab kolme vektori teljelise süsteemi (pikitelje, ruuttelje ja null-jada komponendid) mille väljundiks on kahe vektori telje taustsüsteem. Seda transformatsiooni esitatakse järgmiste valemitega (valem 5.1) [22]:

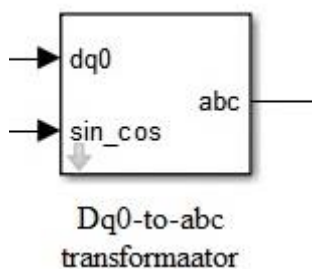
$$V_a = V_d * \sin \omega t + V_q * \cos \omega t + V_0 \quad (5.1)$$

$$V_b = V_d * \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_q * \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_0$$

$$V_c = V_d * \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_q * \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_0,$$

Kus V – vektor,

ω – nurkkiirus.

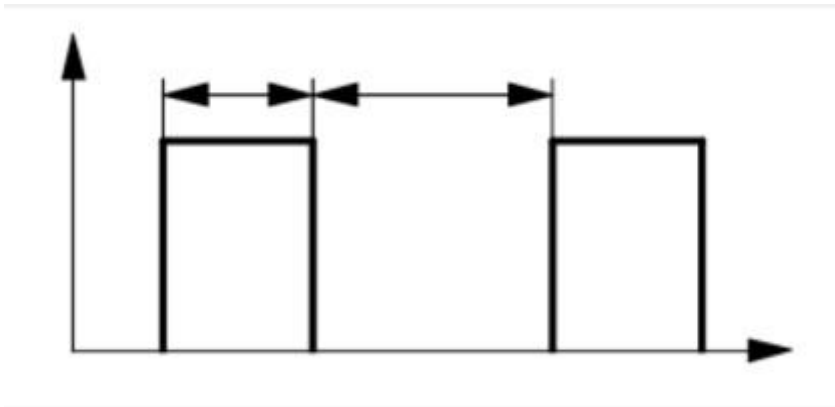


Joonis 5.2. Dq0-to-abc transformaator

Juhul, kui on tegemist balanseeritud kolmefaasiliste ahelatega, siis dq0 transformaator vähendab kolm vahelduvvoolu signaali kaheks alalisvoolu signaaliks. Lihtsustatud arvutusi saab välja tuua läbi alalisvoolu koguste abil enne pöördtransformatsiooni, mis taastab tegelikud kolmefaasilise vahelduvvoolu tulemused. Sageli kasutatakse seda selleks, et lihtsustada kolmefaasiliste sünkroonmasinate analüüsimiseks või lihtsustada arvutusi kolmefaasiliste inverterite kontrollimiseks. Kolmefaasilise asünkroonmasina analüüsis

transformaator edastab kolmefaasilise staatori ja rootori kogused ühte pöörlevasse taustsüsteemi, et kaotada aja mõjul muutuva induktiivsuse [22].

Pulsilaiusmoodul on modulatsioonitehnika, mida kasutatakse pulseeriva signaali kodeerimiseks. Pulsilaiusmodulatsioon (PWM) ühendab endas väljundi pinget ja sageduse juhtimist, mida tänapäeval kasutatakse rohkesti vahelduvjuhtimiseks. Pulsilaiusmodulatsiooni väljundiks on elektriliste impulsside jada, millel on konstantne amplituud. Muutes impulsside kestust (laiust) konstantse perioodi korral saadakse vajaliku kujuga signaal. Kaasaegsetes muundurites on võimalik kasutada pulsilaiusmodulatsiooni sagedust mõnedest kilohertsidest kuni megahertsidesse vastavalt vajadusele. Pulsi laiusega saab reguleerida mõjuva pinget efektiivväärtust (Joonis 5.3) [23].



Joonis 5.3. Pulsi efektiivsuse illustatsioon [23]

Pinget efektiivväärtus ühe perioodi jooksul arvutatakse [23]

$$U_{eff} = U * \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}},$$

Kus U – pinget,

t – aeg.

Sagedusmuunduri alalisvoolu vahelüli pinget pole sageli juhitav. Reguleeritavat väljundpinget on võimalik saada kasutades pulsilaiusmodulatsiooni, kus toimub transistoride lülitus. Kõige tihedamini leiab kasutust siinuseline pulsilaiusmodulatsioon, kuid on olemas ka teisi pulsilaiusmodulatsiooni liike. Samuti kasutatakse pulsilaiusmodulatsiooni kolmefaasilise vahelduvpinge tekitamiseks, kus ühe siinussignaali seadme asemel kasutatakse kolme siinussignaali seadet. Ideaalse sinusoidi saamiseks tuleb kasutada kõrgemat kandevsignaali (kolmnurksignaali) sagedust. Seadesignaali (siinussignaali) sageduse reguleerimisega

reguleeritakse väljundpinge sagedus. Sellise moodusega juhitakse asünkroon- ja sünkroonmootoreid [24].

Pulsilaiusmodulatsiooni peamine eelis on see, et võimsuse kadu lülitusseadmetel on väga madal. Kui lüliti on välja lülitatud siis vool praktiliselt puudub ja kui see on sisse lülitatud ning võimsus on kantud koormusele, siis lülitil ei teki märkimisväärset pingelangu [24].

Igal sünteetilise koormuse meetodil on erinevad juhtimisskeemid. Nende erinevus seisneb selles, et Park'i transformaatorisse tuleb igal meetodil üks sisend mis erineb teise meetodi sisendist. Näiteks konstantse kiiruse meetodi puhul on üheks sisendiks siinuseline laine, kahekordse sageduse meetodi erinevaks sisendiks on kahekordse sageduse modulaator ja pritsimissageduse erinevuseks on eraldi plokk kõrgemate harmooniliste jaoks.

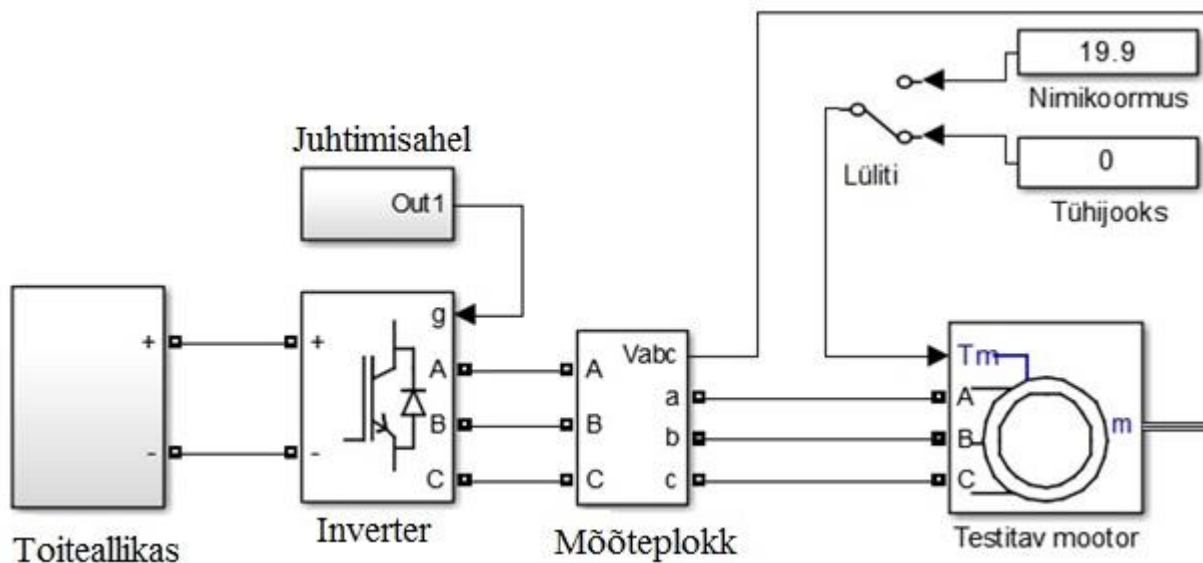
5.2. Mootori nimiandmed

Kõik katsed simuleeriti asünkroonmootoriga, mille nimiandmed on tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Mootori nimiandmed

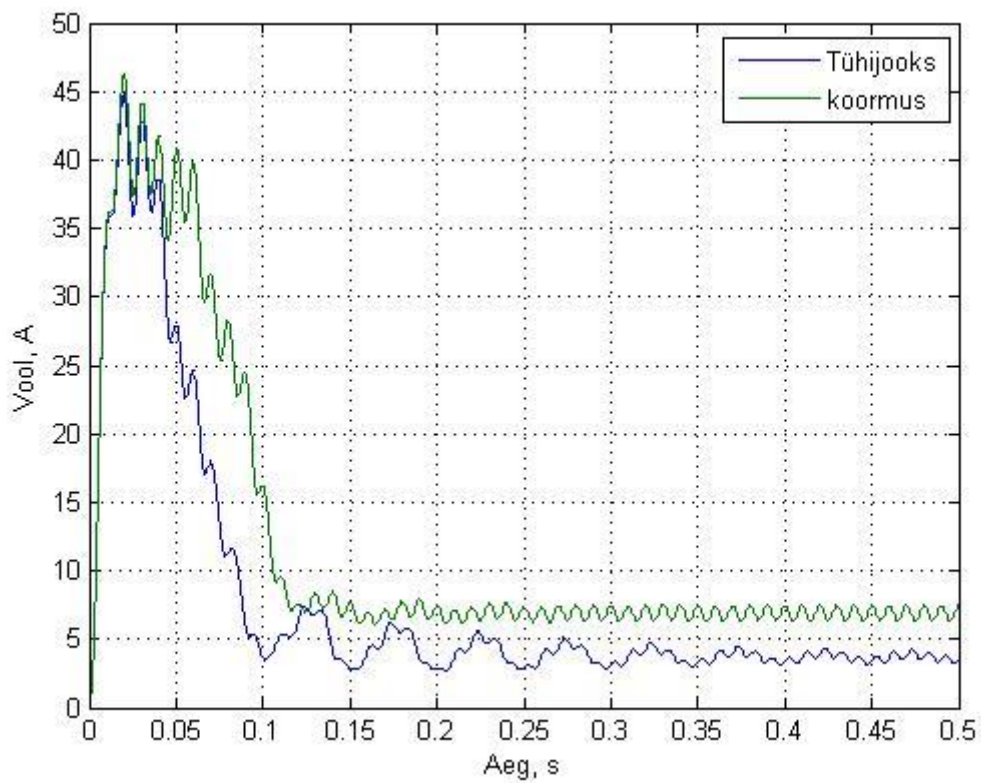
Nimiandmed	Nimisuurus
Võimsus P_N, kW	3,0
Pöörlemiskiirus $n, p/min$	1435
Voolutugevus I_N, A	6,8
Võimsustegur $\cos \phi$	0,86
Pöördemoment T_N, Nm	19,9

Joonisel (5.4) on välja toodud mootori simuleerimise skeem MATLAB/Simulink keskkonnas. Antud skeemiga on võimalik simuleerida mootori tühijooksu katset ja nimikoormus katset. Mootori tühijooksu katse toimib nii, kui lüliti on lülitatud tühijooksu peale. Mootori nimikoormus katse toimib nii, kui lüliti on lülitatud nimikoormuse peale. Antud mootori nimikoormuse väärtus on toodud tabelis (5.1). samuti on sealt tabalist antud skeemi sisse kantud mootori nimisuurused, mis kajastuvad plokis testitav mootor.

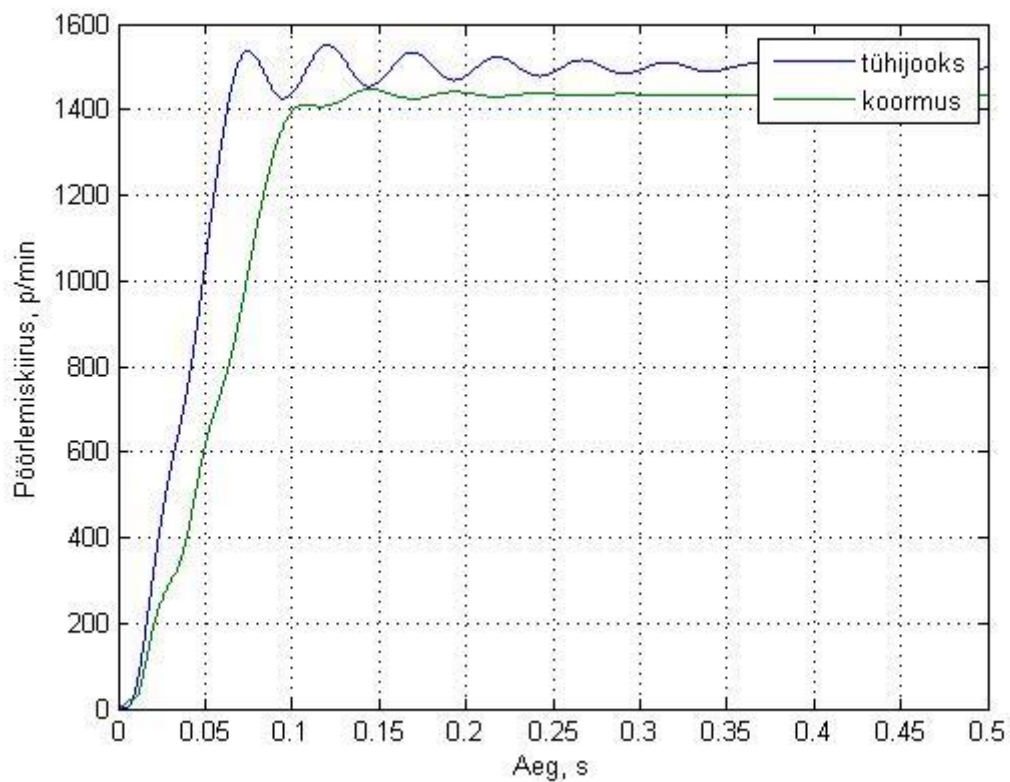


Joonis 5.4. Mootori katsetamise skeem

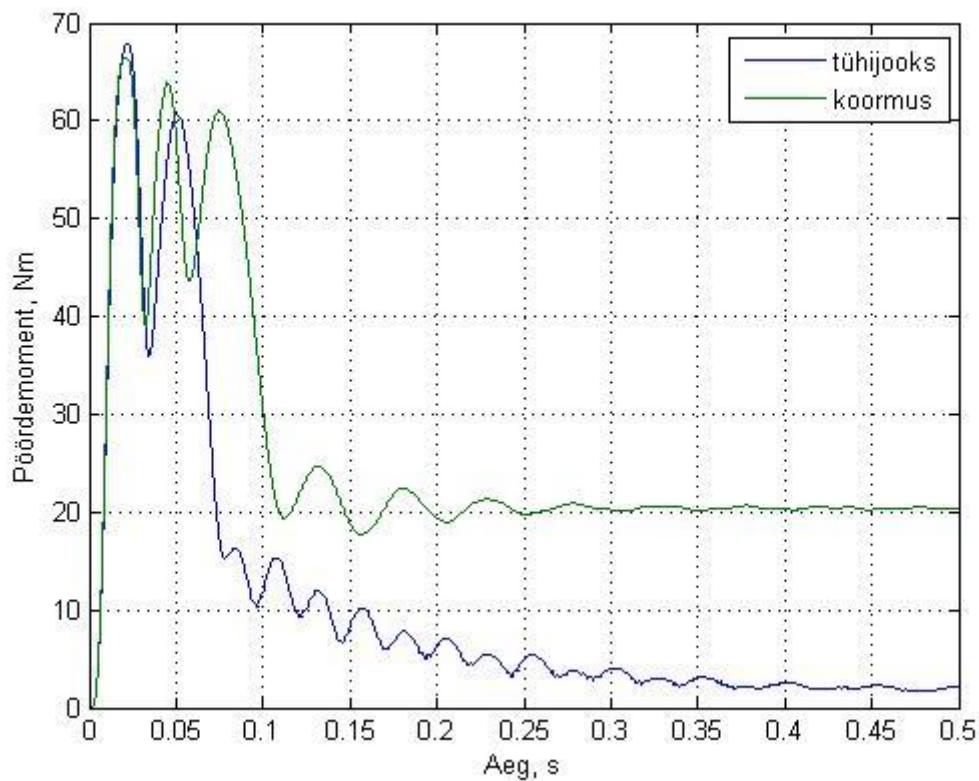
Alguses simuleerisin mootori tühijooksu, et vaadata mootori väljund parameetreid ning kontrollida, kas vastav skeem toimib korrektselt. Seejärel teostasim katse nimikoormusega, mis peab andma mootori väljund parameetriteks samaväärsed tulemused mootori nimiandmetega. Vastavad parameetrite suurused on toodud joonistel (5.5, 5.6, 5.7). esiteks vaatame joonist (5.5), kus on välja toodud voolutugevuse karakteristik. Jooniselt on näha, et käivitusmomendil on umbes 7-kordne nimivool, mis on mootori käivitusel loomulik nähtus. Samuti lagneb voolutugevus suhteliselt kiiresti nimivoolu väärtuseni, mis näitab, et vastav mootor töötab nimikoormusel. Järgmiseks vaatame mootori pöörlemiskiirust, mis on toodud joonisel (5.6). Jooniselt on näha, et pöörlemis kiirus kasvab järsult nimipöörlemiskiiruseni, natuke aega võngub vähesel määral ning siis jääb mootor ühtlase kiirusel tööle. Viimaseks vaatame pöörlemomendi karakteristikut, mis on toodud joonisel (5.7). Alguses tõuseb pöörlemomendi väärtus mitmekordseks ning siis langeb järsult nimiväärtuseni.



Joonis 5.5. Mootori voolutugevuse karakteristikud tühjooksu ja koormus katsel



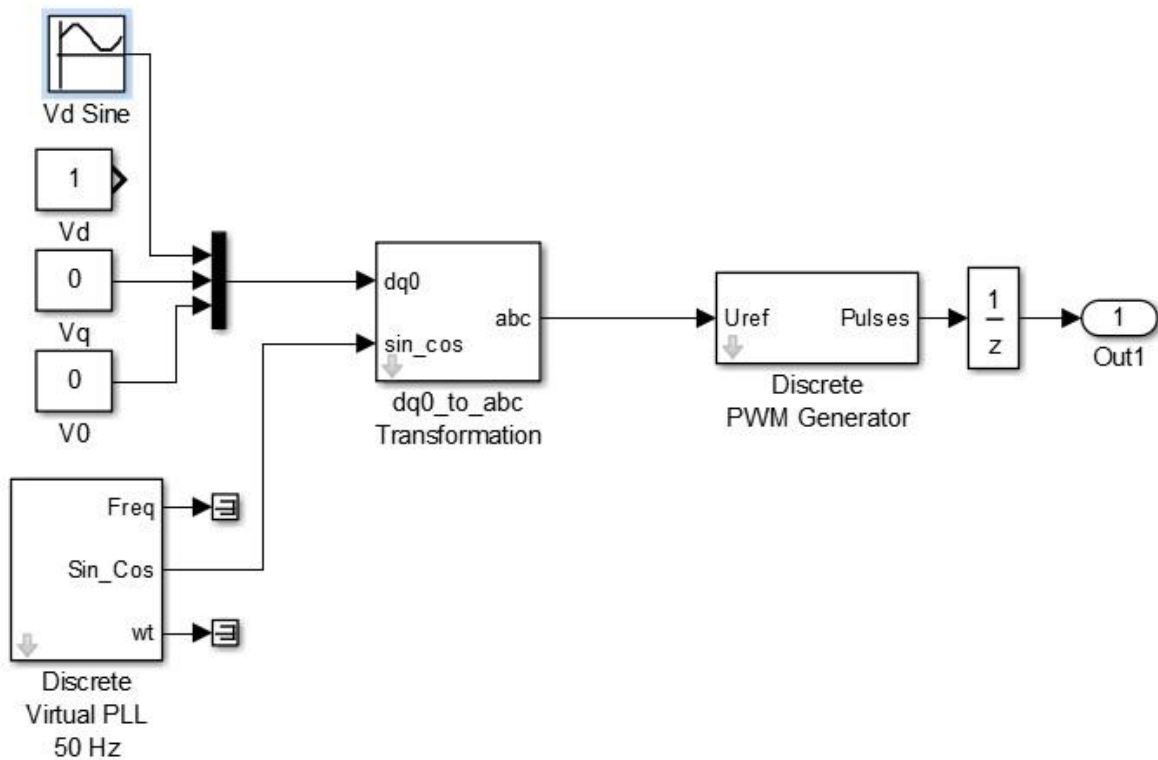
Joonis 5.6. Mootori pöörlemiskiiruste karakteristikud tühjooksu ja koormus katsel



Joonis 5.7. Mootori pöördemomendi karakteristikud tühijooksu ja koormus katsel

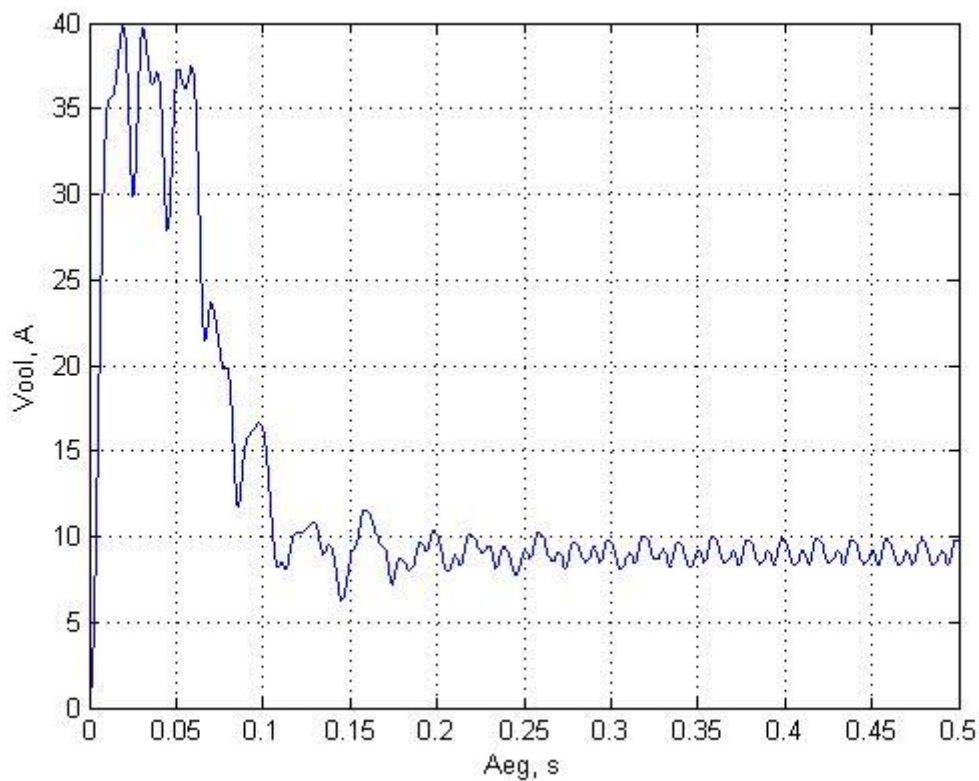
5.3. Konstantse kiiruse meetod

Kuna kõikidel sünteetilise koormuse meetodil on erinev juhtimisahel, siis konstantse kiiruse meetodi oma erineb teistes selle poolest, et selle üheks Park'i transformaatori sisendiks on siinuseline signaal (Joonis 5.8). Kõik muu juhtimisahel on sama, mis oli tavalise meetodi korral. Nagu nimigi ütleb toimib see meetod nii, et magnetväli pöörleb konstantsel kiirusel. Konstantse kiiruse meetodi simuleerimisel tõin välja järgnevad mootori karakteristikud: voolutugevus, väljund võimsus ja pöördemoment.



Joonis 5.8. Konstantse kiiruse meetodi juhtahel

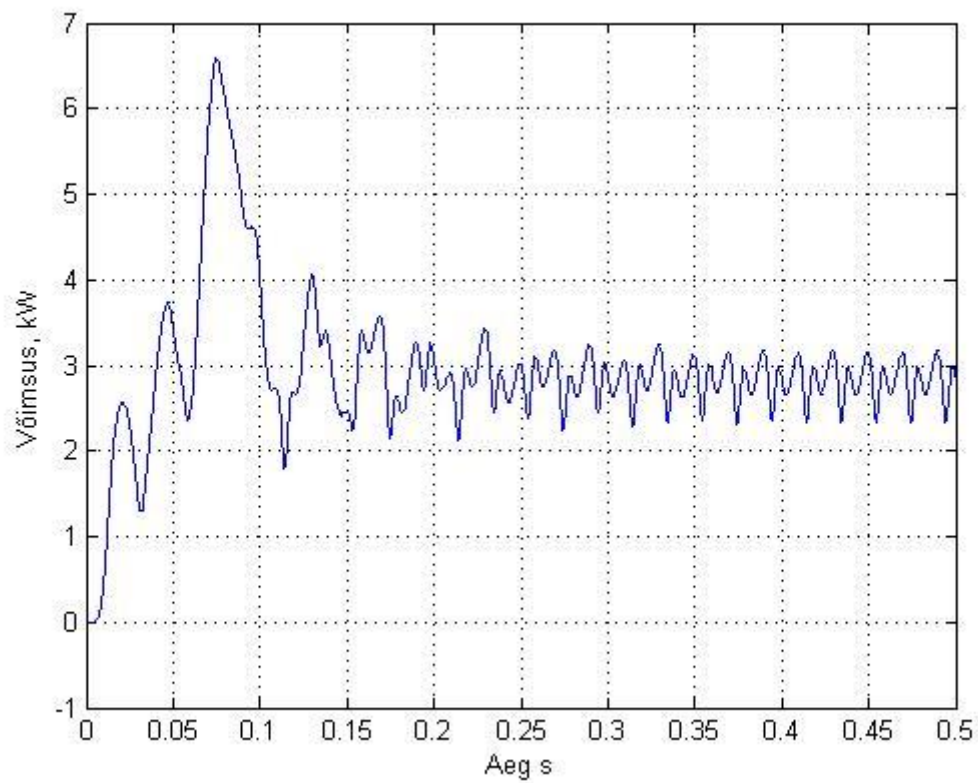
Antud meetodi voolutugevuse karakteristik on välja toodud joonisel (5.9). Jooniselt on näha, et käivitusmomendil on umbes 6-kordne nimivool, mis on mootori käivitusel loomulik nähtus. Samuti lagneb voolutugevus suhteliselt kiiresti nimivoolu suuruse ligidale, kuid on natuke kõrgem kui nimivool. See tähendab, et antud mootor töötab lubatust voolutugevusest suurema vooluga, mis ongi antud meetodi tööpõhimõte. Voolutugevuse karakteristik on selline sakiline sellepärast, et antud meetodi puhul mootor töötab pool perioodi mootori tööpõhimõttene ning teine pool perioodi generaatori tööpõhimõttena. See tähendab, et mootor kiirendab ning voolutugevus tõuseb ja siis mootor pidurdab ning voolutugevus langeb.



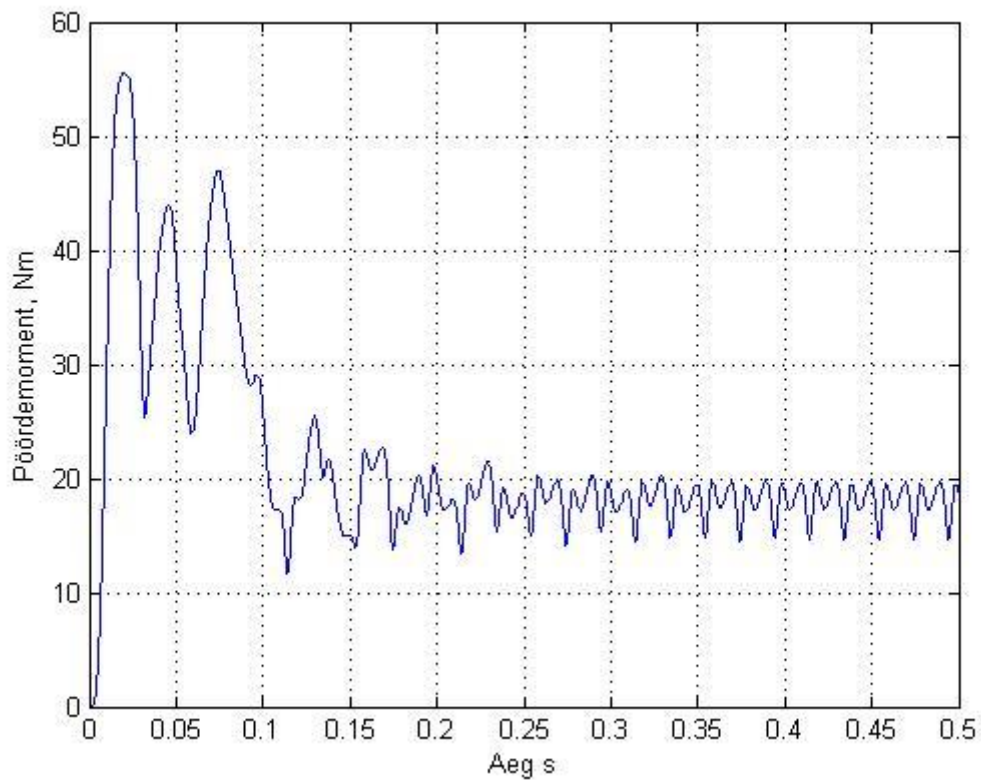
Joonis 5.9. Konstantse kiiruse meetodi voolutugevuse karakteristik

Järgmiseks vaatame antud meetodi väljund võimsuse karakteristikut, mis on välja toodud joonisel (5.10). Sealt on näha, et mootori käivitamisel tõuseb võimsus mitmekordseks, mis on loomulik ning siis langeb allapoole sisend võimsuse väärtusest. Vaadates joonist, siis kahe võimsuse erinevus on umbes 300 vatti, see tuleneb sellest, et mootoris on tekkinud kaod. Antud karakteristik on selline sakiline sellepärast, et voolutugevuse muutus mõjutab väljundvõimsuse karakteristikut.

Joonisel (5.11) on välja toodud konstantse kiiruse meetodi mootori pöördemomendi karakteristik. Antud karakteristik on sakiline sellepärast, et kuna antud meetodi puhul testitav mootor perioodiliselt kiireneb ning aeglustab. Mootori kiirendades pöördemoment kasvab ning mootori aeglustades pöördemoment lagneb ning selle tulemuseks on vastav karakteristik sakiline.



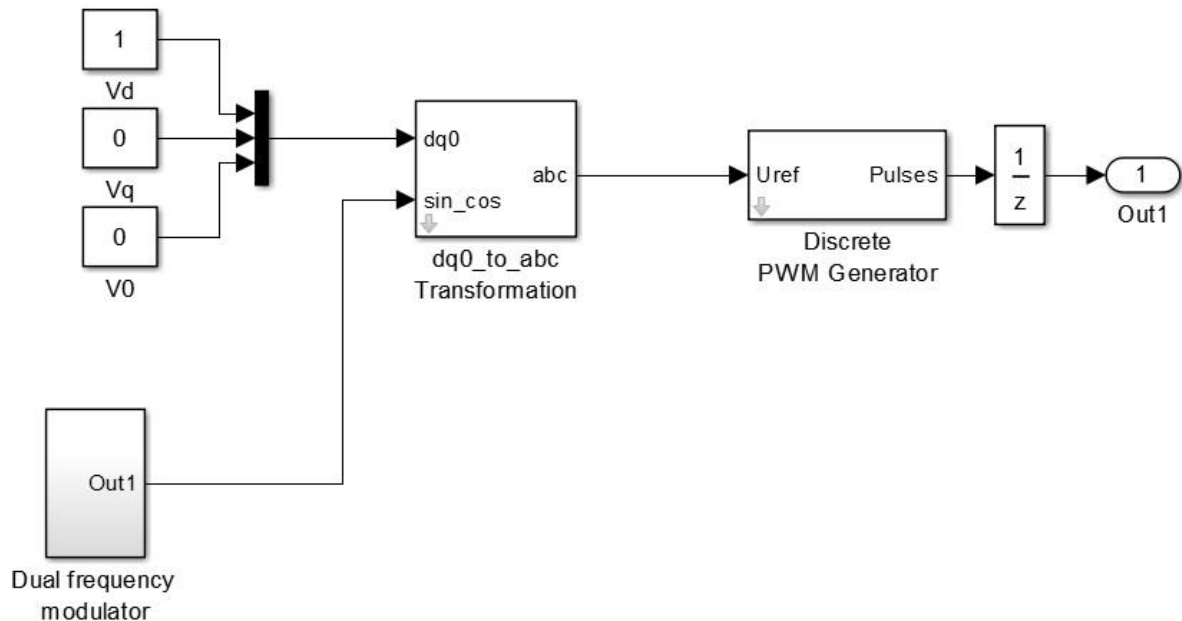
Joonis 5.10. Konstantse kiiruse meetodi väljundvõimsuse karakteristik



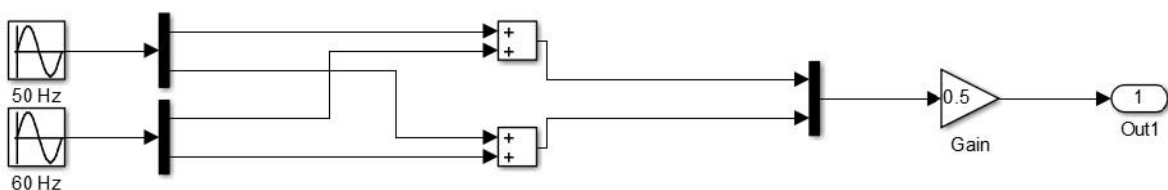
Joonis 5.11. Konstantse kiiruse meetodi pöördemomendi karakteristik

5.4. Kahekordse sageduse meetod

Süntheetilise koormuse kahekordse sageduse meetod erineb teistest meetoditest selle poolest, nagu nimigi ütleb, et sellel meetodil on kaks erinevat sagedust. See tähendab, et Park'i transformaatori üheks sisendiks on kahekordse sageduse modulaator (Joonis 5.12), mis genereerib antud juhtahelas kaks erinevat sagedust (Joonis 5.13). Simuleeritud katses genereerib kahekordse sageduse modulaator viiekümne ja kuuekümne hertsised sagedused.



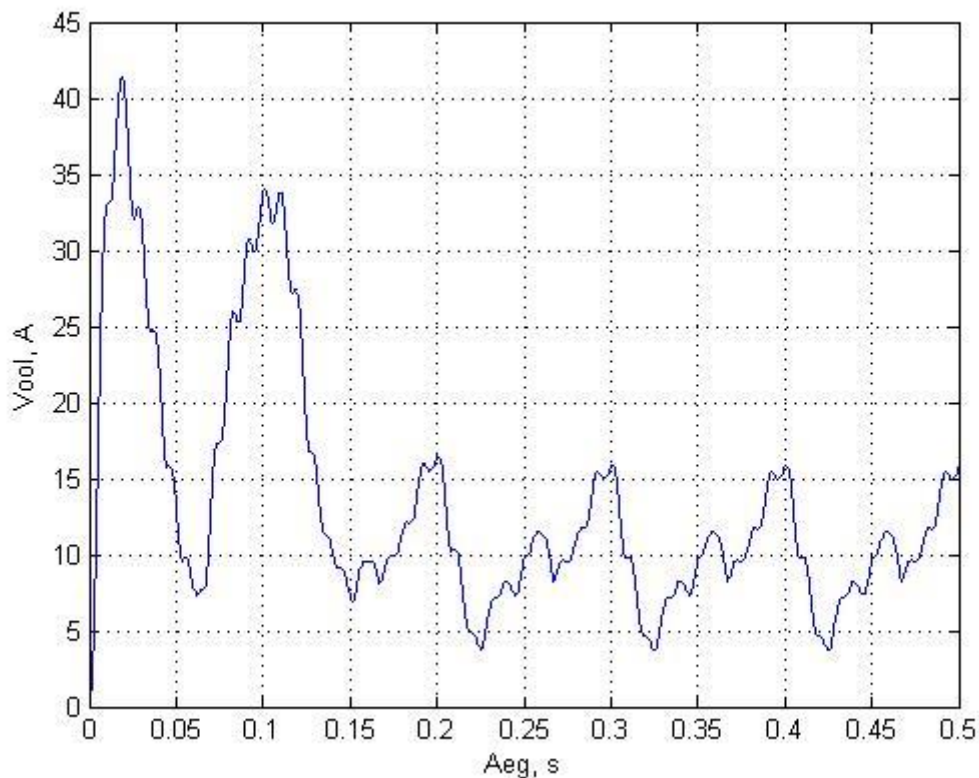
Joonis 5.12. Kahekordse sageduse meetodi juhtahel



Joonis 5.13. Kahekordse sageduse ahel

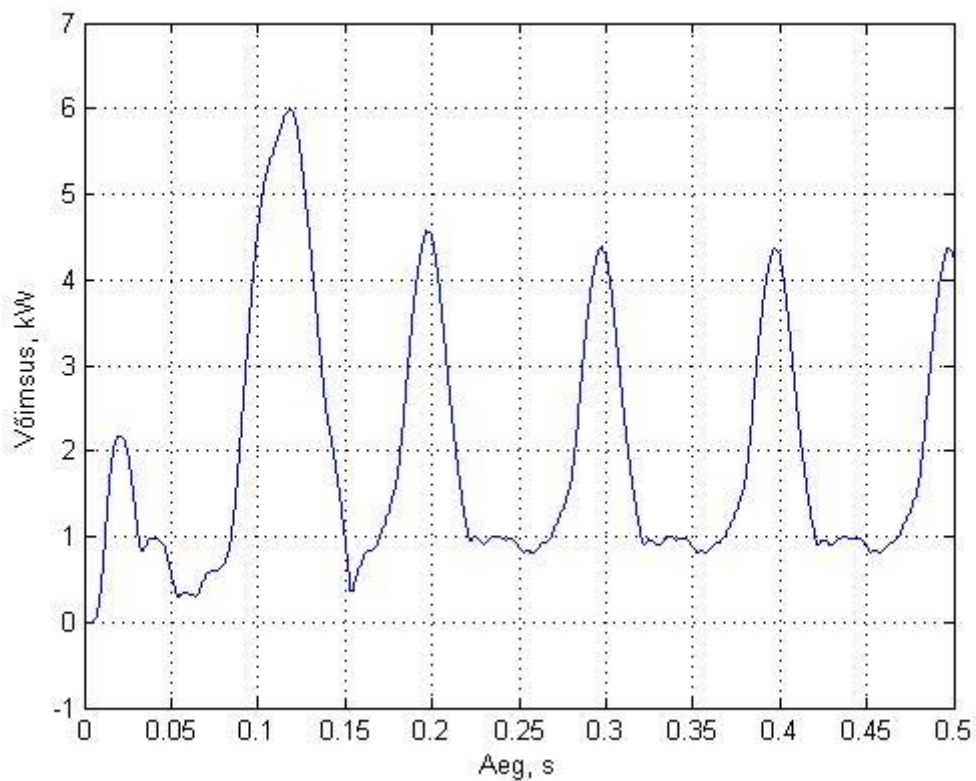
Antud meetodi voolutugevuse karakteristik on välja toodud joonisel (5.14). Jooniselt on näha, et käivitusemomendil on umbes 6-kordne nimivool, mis on mootori käivitusel loomulik nähtus. Samuti lagneb voolutugevus suhteliselt kiiresti nimivoolu suuruse ligidale, kuid on natuke kõrgem kui nimivool. See tähendab, et antud mootor töötab lubatust voolutugevusest suurema vooluga kuid see jääb lubatud piiridesse. Lubadust suurem voolutugevus kiirendab mootori soojenemise kiirust, aga antud katse kestab ainult pool sekundit ning see ei tohiks mõjutada

liigselt vastava mootori väljund parameetreid. Voolutugevuse karakteristik on selline sakiline sellepärast, et antud meetodi puhul mootor töötab pool perioodi mootori tööpõhimõttene ning teine pool perioodi generaatori tööpõhimõttena. See tähendab, et mootor kiirendab ning voolutugevus tõuseb ja siis mootor pidurdab ning voolutugevus langeb.



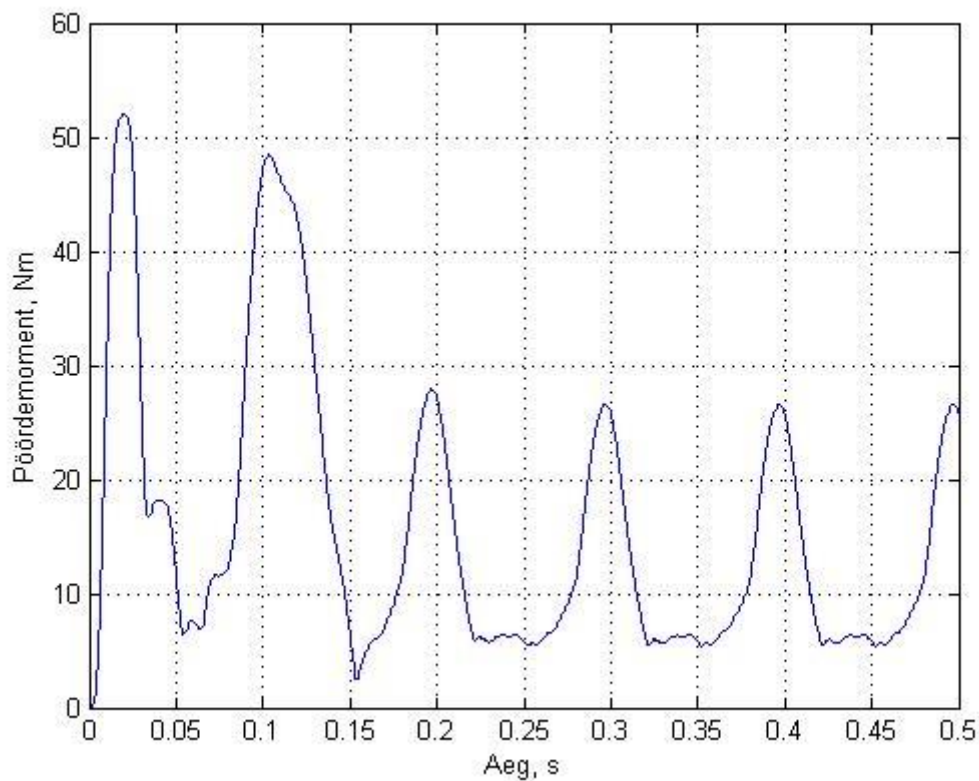
Joonis 5.14. Kahekordse sageduse meetodi voolutugevuse karakteristik

Järgmiseks vaatame antud meetodi väljund võimsuse karakteristikut, mis on välja toodud joonisel (5.15). Sealt on näha, et mootori käivitamisel tõuseb võimsus mitmekordseks, mis on loomulik ning siis langeb allapoole sisend võimsuse väärtusest. Vaadates joonist, siis selgesti näha, kuidas antud meetod töötab, et pool perioodi mootor kiirendab ning teine pool perioodi mootor aeglustab. Sellest tulenevalt kõigub ka väljund võimsuse karakteristik. Mootorit kiirendades tõuseb mootori võimsus ning aeglustades mootori võimsus langeb.



Joonis 5.15. Kahekordse sageduse meetodi väljundvõimsuse karakteristik

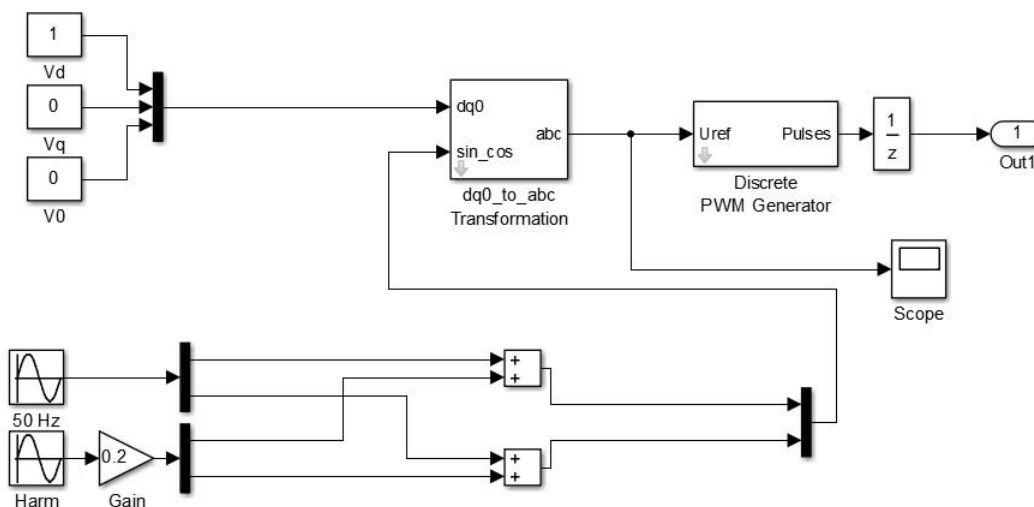
Joonisel (5.16) on välja toodud kahekordse sageduse meetodi mootori pöördemomendi karakteristik. Antud karakteristik on sakiline sellepärast, et kuna antud meetodi puhul testitav mootor perioodiliselt kiirenab ning aeglustab. Mootori kiirendades pöördemoment kasvab ning mootori aeglustades pöördemoment lagneb ning selle tulemuseks on vastav karakteristik sakiline.



Joonis 5.16. Kahekordse sageduse meetodi pöördemomendi karakteristik

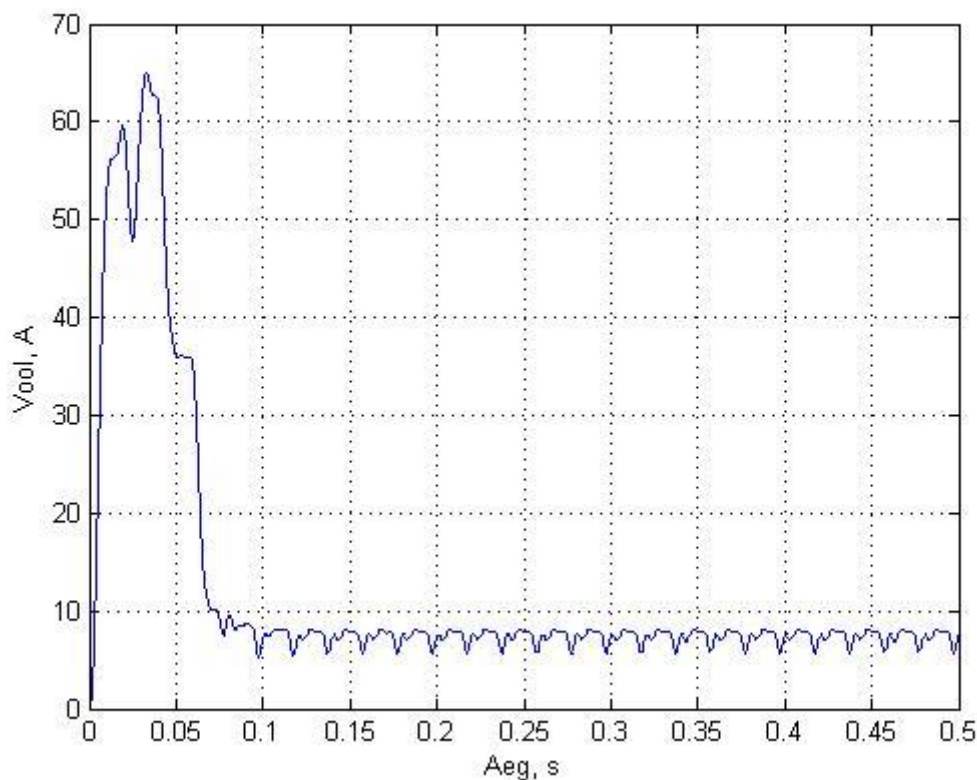
5.5. Pritsimissageduse meetod

Süntheetilise koormuse pritsimissageduse meetod erineb teistest meetoditest selle poolest, et Park'i transformaatori üheks sisendiks on kõrgemate harmooniliste sissepritsimise ahel (Joonis 5.17).



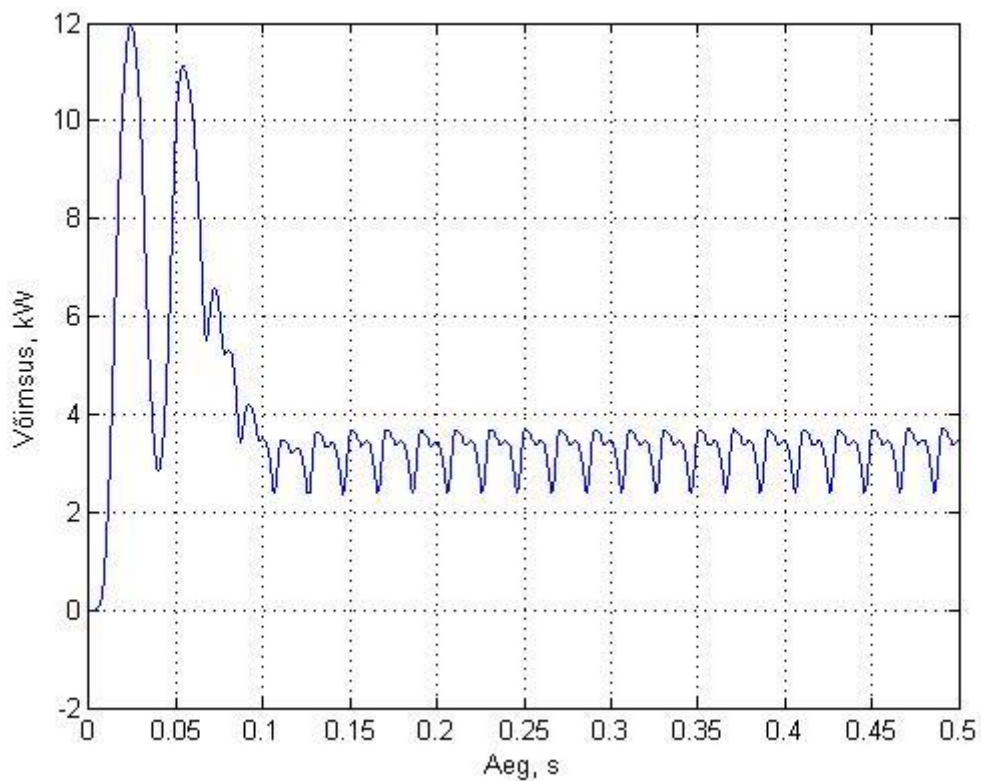
Joonis 5.17. Pritsimissagedus meetodi juhtahel

Antud meetodi voolutugevuse karakteristik on välja toodud joonisel (5.18). Jooniselt on näha, et käivitusmomendil on ligikaudu 10-kordne nimivool, mis on mootori käivitusel maksimaalne voolutugevus. Samuti lagneb voolutugevus suhteliselt kiiresti nimivoolu suuruse ligidale ning hakkab kõikumama nimivoolu piirides. Voolutugevuse karakteristik on selline sakiline sellepärast, et antud meetodi puhul mootor töötab pool perioodi mootori tööpõhimõttene ning teine pool perioodi generaatori tööpõhimõttena. See tähendab, et mootor kiirendab ning voolutugevus tõuseb ja siis mootor pidurdab ning voolutugevus langeb.



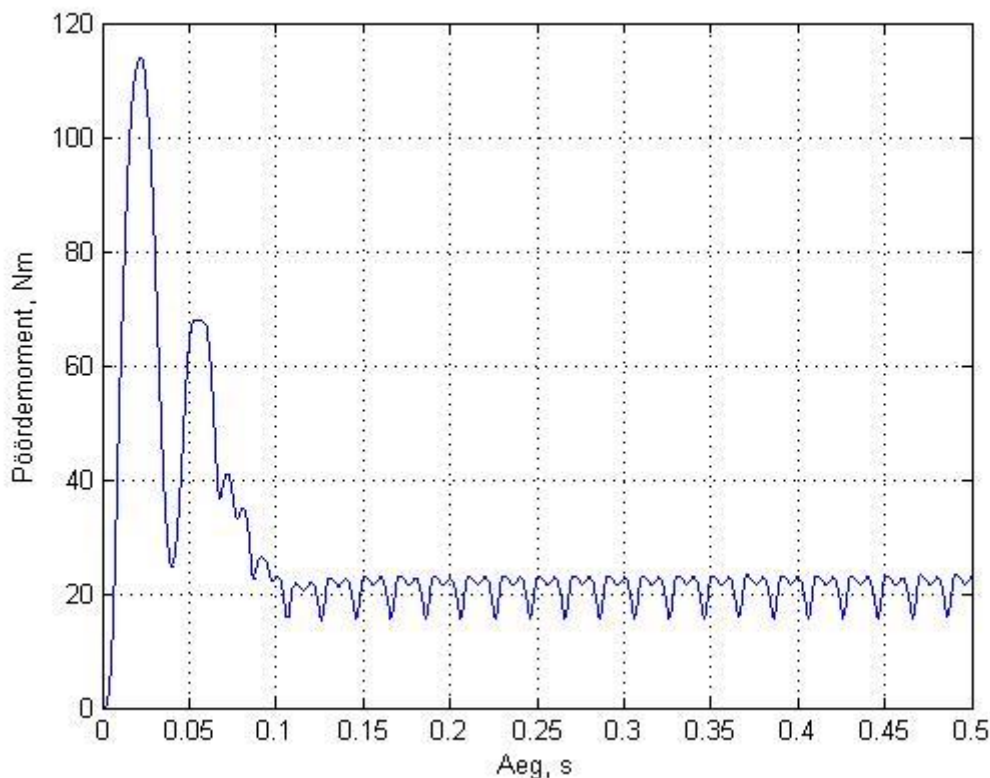
Joonis 5.18. Pritsimissagedus meetodi voolutugevuse karakteristik

Järgmiseks vaatame antud meetodi väljund võimsuse karakteristikut, mis on välja toodud joonisel (5.19). Sealt on näha, et mootori käivitamisel tõuseb võimsus mitmekordseks, mis tuleneb voolutugevuse tõusust mootori käivitusel. Peale käivitusmomenti langeb väljund võimsuse väärtus sisend võimsuse väärtuseni ning hakkab seal kõikumama. Vaadates joonist, siis selgesti näha, kuidas antud meetod töötab, et pool perioodi mootor kiirendab ning teine pool perioodi mootor aeglustab. Sellest tulenevalt kõigub ka väljund võimsuse karakteristik. Mootorit kiirendades tõuseb mootori võimsus ning aeglustades mootori võimsus langeb.



Joonis 5.19. Pritsimissagedus meetodi väljundvõimsuse karakteristik

Joonisel (5.20) on välja toodud pritsimissageduse meetodi mootori pöördemomendi karakteristik. Jooniselt on näha, et mootori käivitusmomendil pöördemoment tõuseb nimisuurusest kõvasti suuremaks, aga peale seda langub umbes nimisuuruseni ning hakkab kõikumama. Antud karakteristik on sakiline sellepärast, et kuna antud meetodi puhul testitav mootor perioodiliselt kiirenab ning aeglustab. Mootori kiirendades pöördemoment kasvab ning mootori aeglustades pöördemoment lagneb ning selle tulemuseks on vastav karakteristik sakiline.



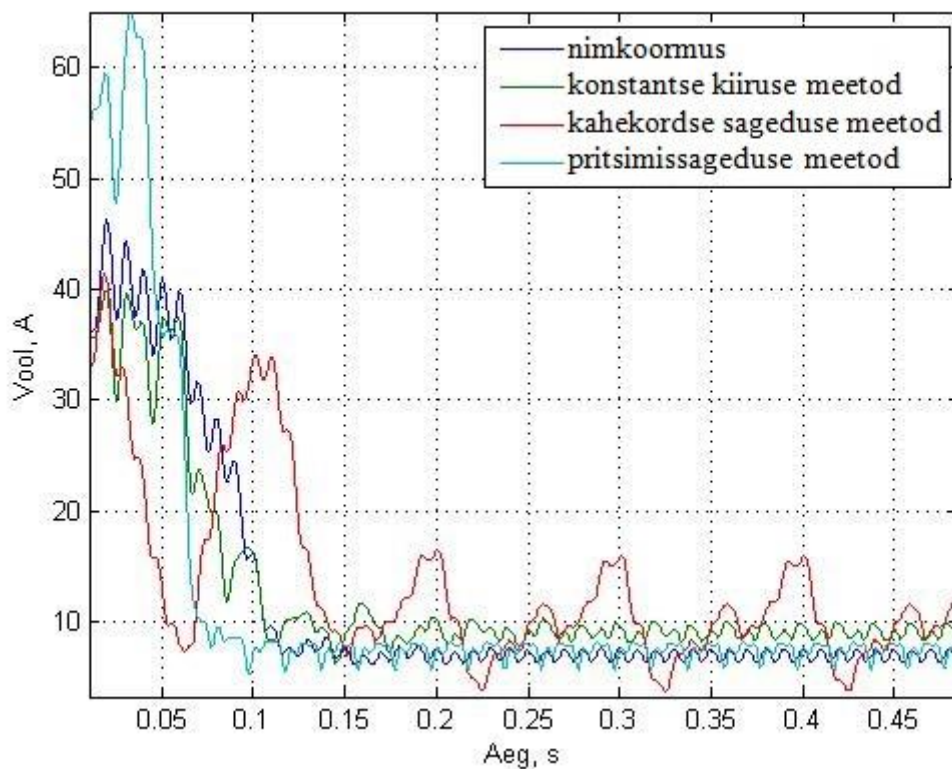
Joonis 5.20. Pritsimissagedus meetodi pöördemomendi karakteristik

5.6. Tulemuste analüüs

Kõikide sünteetilise koormuse meetodite katsetamise tulemuseks on töökarakteristikud, mis iseloomustavad elektrimootori töökäiku. Antud töös on välja toodud kolm elektrimootori töökarakteristikut, milleks on: voolutugevuse, väljundvõimsuse ja pöördemomendi karakteristikud.

Joonisel (5.21) on välja toodud elektrimootori voolutugevuse muutus sünteetilisel koormamisel. Sinine joon iseloomustab elektrimootori voolutugevuse muutust nimikoormusel. Nagu jooniselt on näha, siis käivitusmomendil mootori vool mitmekordistub ning pärast 0,1 sekundilist ajaperioodi voolutugevus stabiliseerub käitudes vastavalt ette antud töörežiimile. Vaadates nüüd sünteetilise koormuse pritsimissageduse meetodi karakteristikud, mis on tähistatud helesinise joonega, siis see käitub üpriski sarnaselt nimikoormuse omale. Erinevus seisneb selles, et käivitusmomendil tõuseb voolutugevus peaaegu 10-kordseks, aga stabiliseerub umbes sama aja jooksul. Samuti erineb see selle poolest, et vastav juhtimisahel lisab teatud perioodil kõrgemaid harmoonilisi, mis muudavad siinussignaali kuju. Sellega muutub ka vastava meetodi voolutugevuse karakteristik. Rohilise joonega on tähistatud

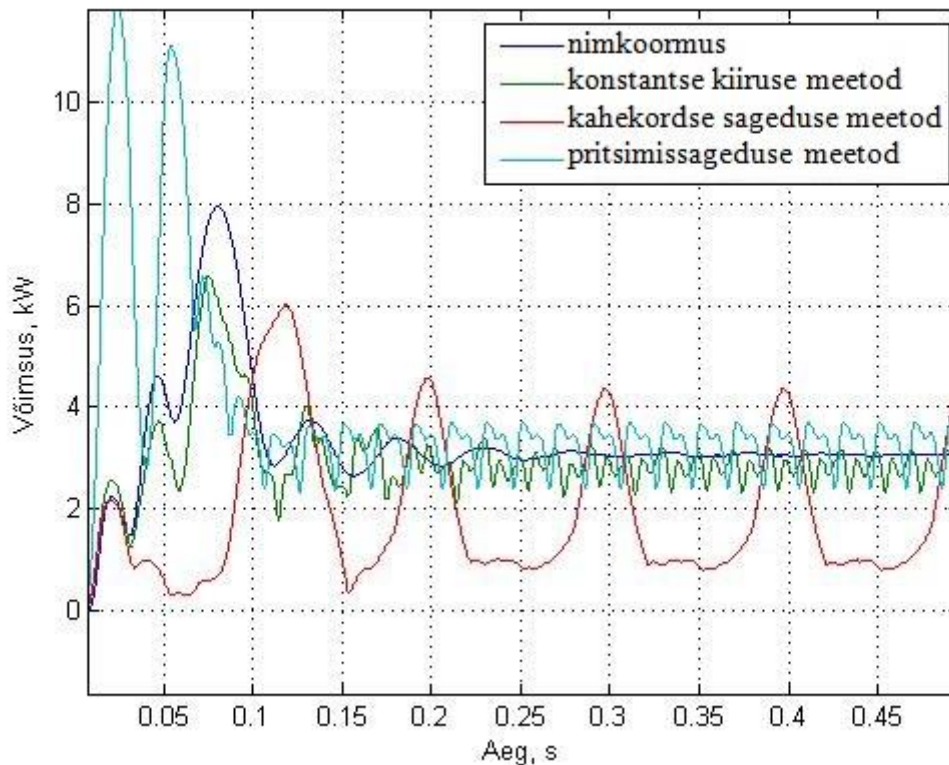
konstantse kiiruse meetodi voolutugevuse karakteristik. Nagu näha, siis mootori käivitusmomendil tõuseb voolutugevus mitmekordseks ning stabiliseerub 0,1 sekundi jooksul. Peale seda jääb mootor tööle vastavalt ette antud töörežiimile, mis kõigutab mootori koormust pidevalt ning sellest tulenevalt muutub ka voolutugevuse karakteristik. Viimasena vaatame kahekordse sageduse meetodit. Nagu jooniselt on näha siis see erineb teistest märgatavalt. Käivitusmomendil tõuseb voolutugevust mitmekordseks, aga stabiliseerumiseks kulub rohkem aega. Kuna selles töörežiimis on kaks sagedust, siis pikeneb ka tööperiood, mida on selgest näha antud joonisel.



Joonis 5.21. Sünteetiliste meetodite voolutugevuste karakteristikud

Joonisel (5.22) on välja toodud elektrimootori väljundvõimsuse muutus sünteetiliselt koormamisel. Sinine joon iseloomustab elektrimootori väljundvõimsuse muutust nimikoormusel. Nagu jooniselt on näha, siis käivitusmomendil mootori väljundvõimsus mitmekordistub ning pärast 0,1 sekundilist ajaperioodi väljundvõimsus stabiliseerub käitades vastavalt ette antud töörežiimile. Konstantse meetodi korral tõuseb väljundvõimsuse väärtus mootori käivitus hetkel mitmekordseks ning stabiliseerub peale 0,1 sekundilist ajaperioodi. Antud meetodi puhul jääb väljundvõimsuse suurus väiksemaks, kui seda on mootori

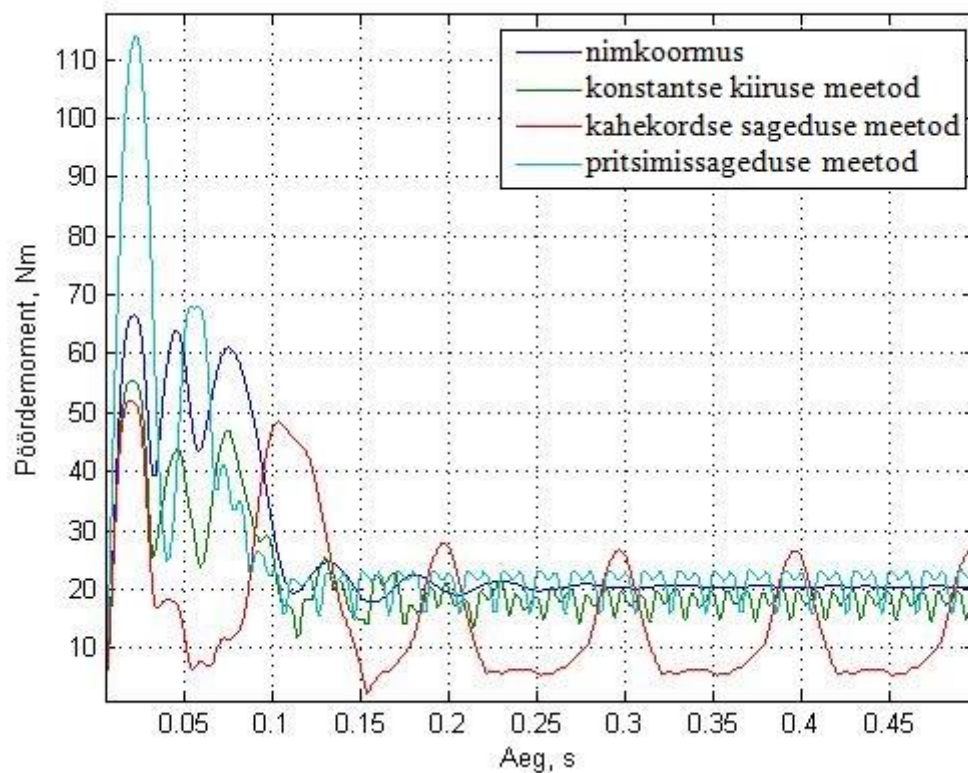
nimivõimsuse suurus. Kahekordse sageduse sageduse meetodi korral on mootori käivitusmoment pikem ning väljundvõimsuse suurus peale stabiliseerumist jääb kõikumise vahemikus 1,7-4,7 kilovatti. See tuleneb sellest, et süsteemis kasutatakse kaht erinevat sagedust. Pritsimissageduse meetodi puhul tõuseb väljundvõimsuse väärtus käivitusmomendil suurusjärgus 4-kordseks ning peale 0,1 sekundilist ajaperioodi stabiliseerub vastavalt töörežiimile.



Joonis 5.22. Sünteetiliste meetodite väljundvõimsuste karakteristikud

Joonisel (5.23) on välja toodud elektrimootori pöördemomendi muutus sünteetisel koormamisel. Sinine joon iseloomustab elektrimootori pöördemomendi muutust nimikoormusel. Nagu jooniselt on näha, siis käivitusmomendil mootori pöördemoment mitmekordistub ning pärast 0,1 sekundilist ajaperioodi pöördemomendi suurus stabiliseerub käituses vastavalt ette antud töörežiimile. Konstantse meetodi korral tõuseb pöördemomendi väärtus mootori käivitus hetkel mitmekordseks ning stabiliseerub peale 0,1 sekundilist ajaperioodi. Antud meetodi puhul jääb pöördemomendi suurus väiksemaks, kui seda on mootori nimipöördemomendi väärtus. Kahekordse sageduse sageduse meetodi korral on mootori pöördemoment alguses nimiväärtusest mitu korda suurem ning peale lühikest

ajaperioodi see stabiliseerub ning käitub vastavalt töörežiimile. Pritsimissagedus meetodi puhul tõuseb pöördemomendi väärtus käivitusmomendil üle neljakordse nimipöördemomendi ning peale seda jääb kõikuma nimipöördemomendi väärtuse juures.



Joonis 5.23. Sünteetiliste meetodite pöördemomendi karakteristikud

6. TULEVIKUVISIOON

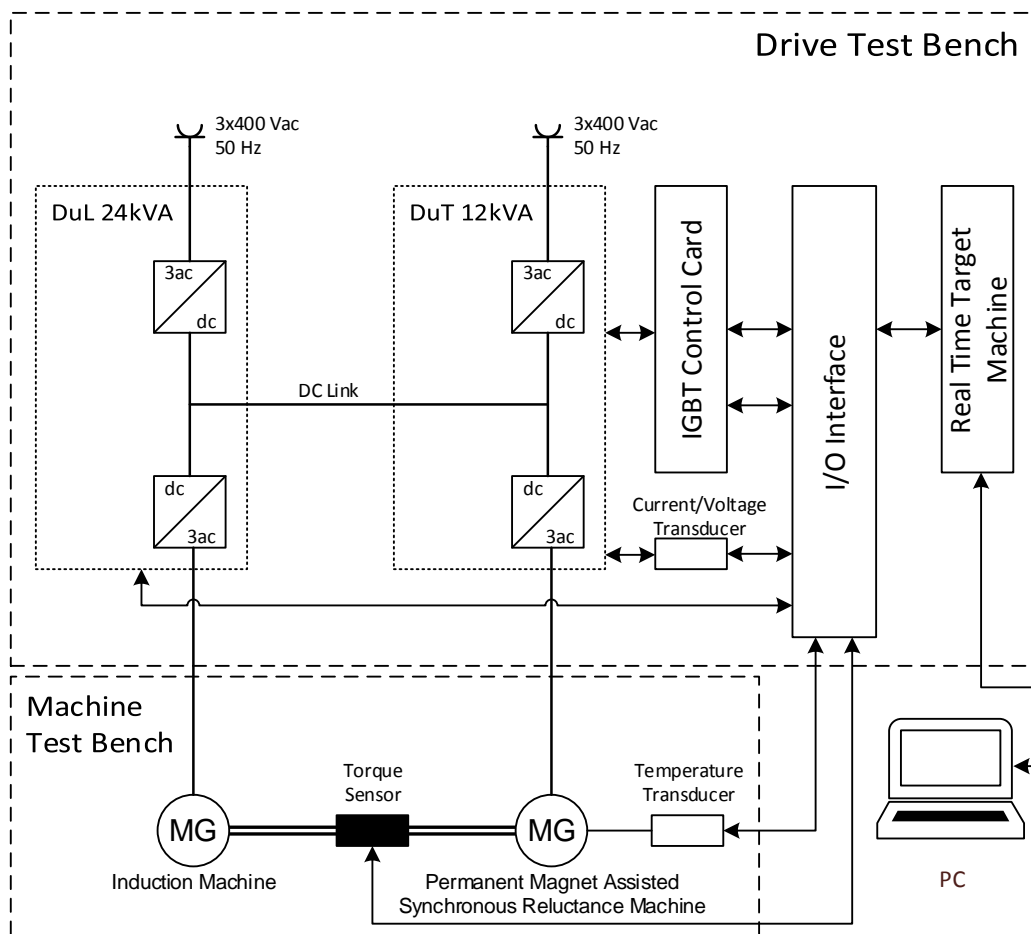
Käesolevat lõputööd on võimalik edasi arendada ning vastavaid sünteetilise koormuse meetodeid on võimalik testida reaalse mootoriga. Vastav katsestend (Joonis 6.1) on valmimisjärgus TTÜ elektrimasinate teaduslaboris. Kuna algselt oli plaanis teostada katsed ka reaalse mootoriga, et veenduda kas simuleeritud tulemused vastavad reaalsete tulemustega. Katsestendi ülesseadmisega tekkis probleem, kuna osad komponendid ei jõudnud õigeaegselt kohale. Sellepärast ei olnud piisavalt aega, et seadistada katsestendi ning jäidki katsetused tegemata.



Joonis 6.1. Katsestend sünteetilise koormus testimiseks

Katsestend koosneb kahest osast. Esimeseks osaks on testitav ajam, mis saab oma toite ABB ACS880 sagedusmuundurist. Sagedusmuundur on ühendatud IGBT juhtimiskaardiga. Teiseks osaks on koormusajam, mis saab oma toite ABB ACSM1 sagedusmuundurist. Mõlemad

sagedusmuundurid on ühendatud pinge ja voolu mõõteseadmetega ning liidestuslülitusega ühendamaks süsteemi Speedgoat-iga. Speedgoat on ühendusliides, mille abil on võimalik ühendada kogu süsteem arvutiprogrammiga MATLAB/Simulink. Katsestendiga on võimalik ühenda koormusajam testitava ajamiga läbi pöördemomendi anduri. Pöördemomendi andur on paigaldatud nii, et koormusajamit oleks võimalik ühendada selle abil testitava ajamiga. Katsestend võimaldab käivitada, kontrollida ja testitavat ajamit koormata ning mõõdab vajalikud tulemsed sobiva täpsusega. Süsteem salvestab katseandmed arvutisse ning võimaldab katseandmete kontrollimist ja programmeerimist otse läbi arvuti.



Joonis 6.2. Katsestendi skeem

7. KOKKUVÕTE

Antud lõputöös uuriti ning katsetati elektrimootori koormamist sünteetilise koormusega. Käesoleva töö käigus sai uuritud kolme erinevat sünteetilise koormuse meetodit, milleks olid: konstantse kiiruse meetod, kahekordse sageduse meetod ja pritsimissageduse meetod. Katsetulemuste teostamiseks kasutati arvutiprogrammi nimega MATLAB/Simulink. Töö esimeses pooles anti ülevaade elektrimootorite ja sünteetilise koormuse taustast ja töö teises pooles teostati katsetused.

Lõputöö esimeses peatükis on lühidalt kirjeldatud elektrimootoritest ning nende ajaloost. Esimesed elektrimootorid pärinevad 18. sajandi keskpaigast ning esimene kommutaatorita asünkroonmootori leiutati aastal 1885. 20. sajandi alguses olid elektrimootorid väga nõrgad ning mõõtmelt väga suured. Tänapäeval on 100-kilovatine elektrimootor samade mõõtmega, kui oli 20. sajandil 7-kilovatine mootor.

Edasi on teoreetiliselt uuritud elektrimootori põhikomponente (staator, rootor, õhupilu) ja elektrimootoris kasutatavate materjalide liikidest (isoleermaterjal, aktiivmaterjal, konstruktsioonmaterjal, magnetmaterjal). Selles peatükis on välja toodud eelnimetatud komponentide lühikirjeldus ning kus ja miks neid elektrimootoris kasutatakse.

Järgnevates peatükkides on uuritud lähemalt kolme sünteetilise koormuse meetodit: konstantse kiiruse meetod, kahekordse sageduse meetod ja pritsimissageduse meetod. Antud sünteetilise koormuse meetoditega teostati ka katsetused. Katsete käigus simuleeriti elektrimootorit sünteetilise koormusega ning hinnati kuidas vastav testitav elektrimootor käitub. Antud sünteetilise koormuste meetoditega teostati elektrimootori voolutugevuse, väljundvõimsuse ja pöördemomendi katsetused.

Kõik katsetused toimusid MATLAB/Simulink keskkonnas. Selles keskkonnas koostati üldskeem kõigi meetodite jaoks. Samuti koostati iga sünteetilise koormuse meetodi jaoks eraldi juhtimisahel. Üldosa juhtimisahelast on neil kõikidel sama, aga erinevus tekib iga meetodi ühest Park'i transformatori sisendist, mis muudab kogu juhtimisahelat.

Töö lõpus on analüüsitud katsetulemusi. Selgus, et kõik sünteetilise koormuse meetodid toimivad ning testitavat mootorit tõepoolest koormati. Kuna kõikide meetodite põhimõte on selline, et ühel aja poolperioodil töötab testitav mootor mootori tööpõhimõttega ning teine poolperiood generaatori tööpõhimõttena. Selle tulemusega testitav mootor pidevalt kiirendab

ja piduradab, seega tulevad ka vastavad töökarakteristikud sellised sakilised. Kõige rohkem sarnaneb nimikoormus režiimile konstantse kiiruse meetod.

Lõpetuseks võin öelda, et lõputöö teostamine pakkus autorile põnevust ja oli päris huvitav, sest polnud varem kokkupuutunud sünteetilise koormuse meetoditega. Uurimuse ja katsetuste käigus saadud informatsioon ja kogemus oli minu jaoks midagi uut ja huvitavat. Oleksin küll soovinud teostada katsetused katsestendis reaalse mootoriga, mis oleks andnud paremad tulemused, kuid võib-olla just seetõttu tekkis huvi seda valdkonda põhjalikumalt uurida.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Voldek, A. Elektrimasinad II. – Tallinn: Valgus, 1973. – lk 479.
2. McNally, T. The Sixth Scottish University. Šotimaa: BRILL, 2012. – lk 115.
3. Jenkins, J. Where Discovery Sparks Imagination. USA: SparkMuseum, 2013
4. Blundel, Stephan J. Magnetism A Very Short Introduction, Oxford University Press, 2012, lk 36.
5. http://www.omikk.bme.hu/archivum/angol/htm/jedlik_a.htm
6. Gee, W. William Sturgeon (1783–1850), Oxford Dictionary of National Biography, Oxford University Press, 2004
7. Garrison Ervan G. A History of Engineering and Technology: Artful Methods, CRC Press, 2009.
8. Babbage, C; Herschel, J. F. W. Account of the Repetition of M. Arago's Experiments on the Magnetism Manifested by Various Substances during the Act of Rotation, Philosophical Transactions of the Royal Society, 2012. – lk 467.
9. Hubbell, M.W. The Fundamentals of Nuclear Power Generation Questions and Answers. Authorhouse, 2011. – lk 27.
10. Alger, P.L.; Arnold, R.E. The History of Induction Motors in America, IEEE, 2005. – lk 1380...1383.
11. Teslasociety kodulehekülg <http://www.teslasociety.com>. Vaadatud 24.04.2016
12. Xylem kodulehekülg <http://www.xylem.com>. Vaadatud 08.03.2016
13. Lahtmets, R. Elektrotehnika alused – Tallinn: TTÜ elektriamite ja jõuelektronika instituut, 2001. – lk. 114...128.
14. Electronics stackexchange kodulehekülg <http://www.electronics.stackexchange.com>. Vaadatud 15.03.2016
15. Encyclopedia magnetica kodulehekülg <http://www.encyclopeida-magnetica.com>. Vaadatud 21.03.2016
16. McKinnon, D.J.; Grantham, C. On-site efficiency evaluation of three-phase induction motors using synthetic loading methods. – Austraalia: University of NSW. – lk 291...296.
17. H. R. Schwenk, “Equivalent loading of induction machines for temperatures tests”, Trans. IEEE, Vol. PAS-96, N04, pp 1126-1131, JulyiAugust (1977).

18. M. Sheng, and C. Grantham. Synthetic loading of three-phase induction motors by magnetic field magnitude modulation. IEE Proceedings - Electric Power Applications. 1994 – lk. 95...100.
19. Deaconu, S.I.; Tutelea, L.N.; Popa, G.N.; Latinovic, T. Artificial loading for rotating electric machines. International Journal Of Engineering. 2011 – lk. 213...215.
20. McKinnon, D.J.; Grantham, C. Efficiency evaluation of three-phase induction motors using dual-frequency and sweep-frequency methods of synthetic loading. – Australia: University of NSW. – lk. 799...804.
21. J.J. Stroker. What's the real cost of higher efficiency. IEEE IAS Magazine. 2003 – lk. 32...37.
22. Park, R.H. Two reaction theory of synchronous machines. AIEE Transactions 48:716-730.
23. Brindfeldt, E.; Lepiksoo, U. Mehhatroonikaseadmed – Tallinn: Tallinna Tööstushariduskeskus, 2011.
24. Barrgroup kodulehekülg <http://barrgroup.com>. Vaadatud 21.05.2016