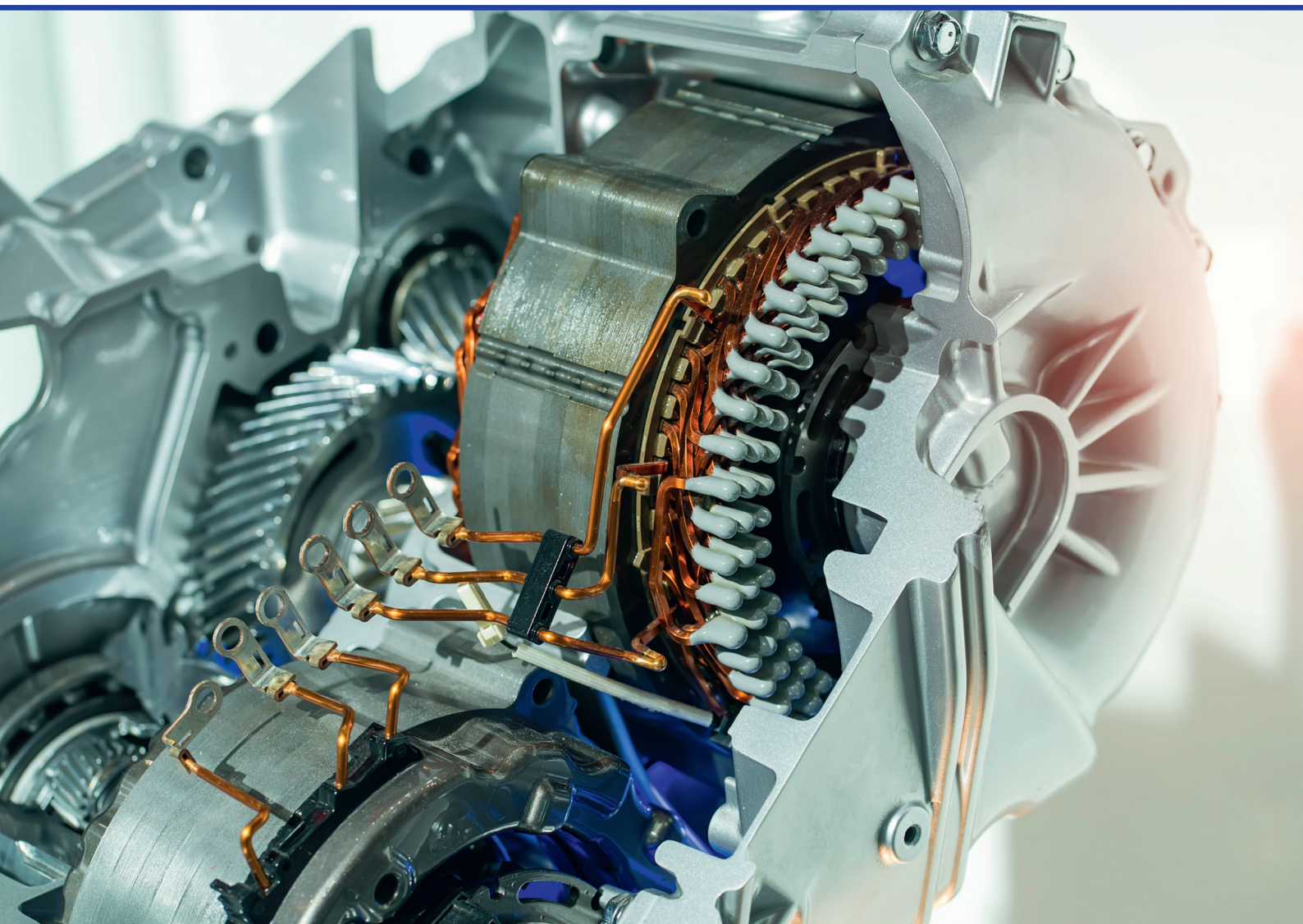


**Jaroslavs Zarembo**

## **VILCES ELEKTROPIEDZIŅAS AR SINHRONO RELUKTANCES DZINĒJU IZPĒTE UN IZSTRĀDE**

Promocijas darba kopsavilkums



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte  
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

**Jaroslavs Zarembo**

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**VILCES ELEKTROPIEDZIŅAS AR SINHRONO  
RELUKTANCES DZINĒJU IZPĒTE UN IZSTRĀDE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
LEONĪDS RIBICKIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Zarembo J. Vilces elektropiedziņas ar sinhrono reluktances dzinēju izpēte un izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 44 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-14” 2022. gada 21. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 210.11.

<https://doi.org/10.7250/9789934227837>  
ISBN 978-9934-22-783-7 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 16. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 212. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Janis Dirba,  
Rīgas Tehniskā universitāte

*Dr. sc. ing.* Svetlana Orlova,  
Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

*Ph. D. Alecksey Anuchin,*  
Maskavas Enerģētikas institūts, Krievija

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Jaroslavs Zarembo ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 58 attēli, 12 tabulu, divi pielikumi, kopā 80 lappušu, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 40 nosaukumu.

## Saturs

Ievads .....	6
1. Trolejbusu vilces prasību analīze .....	10
1.1. Trolejbusa dinamikas prasības .....	10
1.2. Iestatījuma vilces raksturlīknes veidošana .....	11
2. <i>SynRM</i> vilces piedziņas konstrukcija .....	13
2.1. <i>SynRM</i> darbības princips .....	13
2.2. Galvenie parametri un konstrukcijas ierobežojumi .....	14
2.3. Statora konstrukcija .....	14
2.4. Rotora konstrukcija .....	15
2.5. Projektētā motora parametri .....	15
2.6. Izstrādātā motora vilces raksturlīkne .....	16
3. Vadības algoritma un modeļa izstrāde .....	18
3.1. <i>SynRM</i> matemātiskais modelis .....	18
3.2. Vilces piedziņas vadības algoritma izstrāde .....	19
3.3. <i>SynRM</i> vadības algoritms .....	20
3.4. Elektriskās vilces piedziņas <i>Simulink</i> modelis .....	21
3.4.1. Augsta līmeņa algoritma pārskats .....	22
3.4.2. Trolejbusa matemātiskais modelis .....	22
4. <i>SynRM</i> vilces piedziņas eksperimentāla izpēte .....	25
4.1. <i>SynRM</i> vilces piedziņas ražošanas process .....	25
4.2. Izstrādātās <i>SynRM</i> vilces piedziņas laboratoriskā testēšana .....	27
4.2.1. Laboratorijas aprīkojums .....	27
4.2.2. <i>SynRM</i> vilces raksturlīkne .....	29
4.3. D un q ass induktivitātes .....	30
5. <i>SynRM</i> vilces piedziņas vadības sistēmas darbības pārbaude .....	32
5.1. <i>SynRM</i> un <i>IM</i> veiktspējas izpēte vilces sistēmā .....	32

5.1.1.	Maksimālā griezes momenta iespēju salīdzinājums .....	32
5.1.2.	Efektivitātes rādītāju salīdzinājums .....	33
5.1.3.	<i>IM</i> un <i>SynRM</i> zudumu sadalījums .....	35
5.1.4.	Jaudas koeficienta salīdzinājums .....	36
5.1.5.	Salīdzinājuma kopsavilkums .....	36
5.2.	<i>SynRM</i> vilces piedziņas <i>Simulink</i> modeļa pārbaude .....	36
5.2.1.	Paātrinājums līdz maksimālajam ātrumam .....	36
5.2.2.	Modeļa veiktspējas pārbaude trolejbusa piedziņā .....	37
	Secinājumi .....	39
	Izmantotās literatūras un avotu saraksts .....	41

# Ievads

## Tēmas aktualitāte

Mūsdienu pasaulē ekoloģijas un siltumnīcefekta gāzu emisiju problēma ir kļuvusi ļoti aktuāla. Pilsētās transports ir lielākais CO<sub>2</sub> un citu emisiju avots. Viens no globālās problēmas risinājumiem varētu būt lielpilsētas transporta sistēmas pāreja uz elektrisko piedziņu. Elektrotransports samazina trokšņa līmeni, novērš izplūdes gāzu radīto piesārņojumu un palīdz pārvarēt atkarību no naftas, jo ļauj izmantot elektroenerģiju, ko savukārt var iegūt no alternatīviem avotiem. Lai risinātu šo jautājumu, ir pieņemta īpaša ES programma par siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanu pilsētu transportā par 60 % līdz 2050. gadam [1].

Viens no esošajiem transporta veidiem, ko var izmantot šī mērķa sasniegšanai, ir trolejbusi. Pirmā trolejbusu līnija tika atklāta 1882. gadā, kad Dr. Ernsts Verners Siemens Berlīnes priekšpilsētā sāka darbināt jaunu transportlīdzekli. Jau 1901. gadā Bīlatālē, Vācijā, kursēja pasaulē pirmais trolejbusi, kas pārvadāja pasažierus. Tomēr vēlāk, ņemot vērā naftas pārpilnību un vides aizsardzības noteikumu trūkumu, pilsētas elektrotransports kļuva mazāk ekonomiski izdevīgs un galu galā daudzās pilsētās to pārtrauca izmantot. Fosilais kurināmais bija lēts, un tika uzskatīts, ka gaisvadu elektrotīkla vadi bojā skatu un prasa dārgu apkopi [2]. Mūsdienās trolejbusu infrastruktūra saglabājusies aptuveni 300 pasaules pilsētās, taču vides politikas dēļ pēdējās desmitgadēs ir mainījusies, un trolejbusi atkal ir sava vieta jaunās zaļās pilsētas infrastruktūrā.

Ir veikti daudzi pētījumi, lai rastu jaunus risinājumus trolejbusa darbības uzlabošanai. Galvenās tendences bija nodrošināt iespēju braukt autonomi dažos maršruta posmos un taupīt enerģiju, uzstādot transportlīdzeklī enerģijas uzkrāšanas ierīces. Uzkrājumu sistēmas, kuru pamatā ir superkondensatori vai baterijas, ir pierādījušas savu efektivitāti, tomēr to uzstādīšana ievērojami sadārdzina elektroiekārtu komplekta izmaksas [3]. Alternatīva varētu būt pilnīga trolejbusu aizstāšana ar elektrobusiem, taču tas nozīmē pilnīgu pilsētas infrastruktūras pārstrukturēšanu, lai nodrošinātu ātru uzlādi. Cits risinājums varētu būt hibrīda trolejbusu sistēma ar uzlādi kustībā ierobežotā sliežu ceļa posmā [4]. Apkopojot visus variantus, var secināt, ka vispārējā trolejbusu attīstības tendence ir uzstādīt uz transportlīdzekļa iebūvētas enerģijas uzkrāšanas ierīces.

Līdz ar transportlīdzekļu ar iebūvētiem enerģijas avotiem parādīšanos aktuāls kļūst jautājums par jaudas rezervi. Mobilās enerģijas uzkrāšanas ierīces ar lielu ietilpību, piemēram, litija jonu akumulatori, kurināmā elementi un superkondensatori, ir dārgākā elektriskās piedziņas daļa, tāpēc vissvarīgākais vilces sistēmas uzdevums ir augsta efektivitāte. Neatkarīgi

no izmantotā enerģijas avota kopējā patērētā enerģija transportlīdzekļa kustībai ir tieši atkarīga no motora efektivitātes visā darba diapazonā.

Lielākajā daļā mūsdienu trolejbusu vilces sistēmās tiek izmantoti tradicionālie asinhronie motori (*IM*). *IM* piedziņas priekšrocības ir uzticamība, salīdzinoši zemas komplekta izmaksas, kā arī izturīga un pārbaudīta vadības sistēma, lai gan mūsdienās šāda veida piedziņas sistēmas neatbilst augstām efektivitātes prasībām. Vēl viens risinājums ir pastāvīgo magnētu sinhronā motora (*PMSM*) piedziņa, kas nodrošina labākus jaudas un masas attiecības rādītājus, kā arī labāku iespējamo efektivitāti [5]. *PMSM* trūkumi ir pastāvīgo magnētu augstās izmaksas, kā arī atkarība no monopola piegādātāja. Abas šīs iespējas jau ir labi zināmas un tiek plaši izmantotas. Tomēr, ieviešot alternatīvas vilces motoru piedziņas topoloģijas, varētu optimizēt darba parametrus konkrētam izmantošanas gadījumam.

Potenciāli daudzsolos risinājums ir izmantot sinhronus elektromotorus bez aktīviem elementiem rotorā. Šī pieeja samazina materiālu izmaksas, palielina efektivitāti, jo rotorā nav vara zudumu, un vienkāršo ražošanas procesu. Visbiežāk sastopamās topoloģijas ir sinhronais induktordzinējs (*SRM*) un sinhronais reluktances dzinējs (*SynRM*).

*SRM* mūsdienās kļūst arvien populārāks, taču tam ir vairāki trūkumi, piemēram, relatīvi zems griezes momenta blīvums, lielākas griezes momenta svārstības un akustiskais troksnis [6]. Akustiskais troksnis un griezes momenta pulsācijas ir šā tipa elektromotoru attīstību kavējošie faktori. *SynRM* ir mazāk pakļauts *SRM* raksturīgajiem trūkumiem. Turklāt elektromotora statorā izmanto sadalīto tinumu, kas tradicionāli tiek izmantots *IM* un kas ļauj saglabāt sprieguma invertora topoloģiju [7]. Tomēr raksturlielumu nelinearitātes dēļ *SynRM* projektēšanas process un šādu mašīnu vadības sistēmas izstrāde ir sarežģītāki uzdevumi.

Vilces iekārtās *SynRM* ir laba alternatīva asinhroniem motoriem. Lai gan tā tika ieviesta 1923. gadā, tikai mūsdienās, pateicoties mikroprocesoru skaitļošanas jaudas uzlabojumiem un sarežģītākām datorizētas analīzes metodēm, tā kļūst arvien izplatītāka [8].

### **Darba mērķis un uzdevumi**

Promocijas darba galvenais mērķis ir uz *SynRM* un divlīmeņu frekvences pārveidotāja bāzes izstrādāt un testēt elektropiedziņas vilces sistēmu.

Galvenie darba uzdevumi

- Elektromotora konstrukcijas analīze
- Elektromotora prototipa izgatavošana
- Vadības sistēmas izveide *Matlab Simulink* vidē
- Vilces piedziņas vadības programmatūras izstrāde



- Izgatavotās elektropiedziņas sistēmas testēšana laboratorijas apstākļos

### **Darba novitāte**

Stabila un precīza *SynRM* vilces piedziņas vadības algoritma izveide.

Promocijas darbā izstrādātie inovatīvie risinājumi

- *SynRM* rotora ģeometrijas aprēķina algoritma izveide, ievērojot šķērsmagnētiskā piesātinājuma efektu.
- Trolejbusa *SynRM* vilces piedziņas un tās vadības algoritma matemātiskais modelis, kas ir pārbaudīts laboratorijas apstākļos.
- Vilces piedziņas vadības programmatūra ar iespēju ievērot šķērsmagnētiskā piesātinājuma efektu, kas ļauj realizēt precīzu motora vadību.

### **Darba praktiskā nozīme**

Pētījums veikts saistībā ar AS “RER” Eiropas projektu. Uzņēmumam darbu mērķu īstenošana ļāva gūt pieredzi jauna tipa elektromotoru ražošanas tehnoloģijā.

Pētījuma gaitā izstrādāts, izgatavots un izpēģināts elektromotors, kas atbilstu esošā sērijveida *IM* izmēriem trolejbusam. Darbu sākšanas brīdī AS “RER” ražoja tikai vilces asinhronos elektromotorus. Pētījumu rezultātā tika izstrādāts un testēts jauns vilces sistēmas *SynRM* modelis ar vadības sistēmu trolejbusu piedziņai.

Izstrādātos matemātiskos modeļus un vadības programmatūru var izmantot piedziņas jaunu modeļu izstrādei.

### **Pētījuma līdzekļi**

Promocijas darbā ir izmantota *Comsol* programmatūra, lai izveidotu optimālu *SynRM* rotora ģeometriju, *Matlab Simulink* programmatūra, lai izveidotu trolejbusa *SynRM* vilces piedziņas un vadības matemātiskos modeļus, *LabVIEW* programmatūra, lai izveidotu grafisko vadības paneli laboratorijas izmēģinājumiem, un *CCSTUDIO IDE* programmatūra (ar *TI Digital Motor Control* bibliotēku), lai izveidotu vilces piedziņas vadības programmatūru.

### **Autora publikācijas**

1. Dvornikovs, M. Marinbahs, J. Zarembo, E. Groza and K. Ketners, "Investigation of traction motor dynamic using computer simulation and method of mutual loading of two pair motors," in *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Varna, Bulgaria, 2019.
2. K. Gulbis, U. Brakanskis, E. Kamoliņš and J. Zarembo, "Parameter Calculation Method of Synchronous Reluctance Motor Including Cross Magnetic Saturation," in *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2020.
3. V. Burenin, J. Zarembo, A. Žiravecka and L. Ribickis, "Model of Laboratory Test Bench Setup for Testing Electrical Machines," in *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2020.
4. G. Kobenkins, M. Marinbahs, V. Burenin, J. Zarembo, A. Bizans, O. Sliskis, "Determination of the Level of Own Vibration of Geared Motor Boxes in Industrial Conditions," in *2021 IEEE 62st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Riga, 2021.
5. V. Burenin, J. Zarembo, O. Krievs and L. Ribickis, "Comparison of Synchronous Reluctance Motor and Induction Motor Efficiency Maps for Traction Application," in *RTUCON 2021*, Riga, Latvia, 2021.
6. G. Kobenkins, M. Marinbahs O. Sliskis, V. Burenin, J. Zarembo, "Carry Out of Strength Tests of Geared Motor Box as Part of a Frequency-Controlled Traction Electric Drive," in *17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA 2021)*, Sofia, Bulgaria, 2021.
7. Potapovs, U. Brakanskis, M. Gorobece, K. Gulbis, E. Kamoliņš, K. Sejejs, V. Burenin, J. Zarembo, "180 kW Synchronous Reluctance Motor for Mass Transit Electrical Traction Application," in *23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, Brussels, Belgium, 2021.
8. K. Gulbis, U. Brakanskis, E. Kamolins, M. Gorobece, A. Potapovs, K. Sejejs, J. Zarembo and V. Burenin, "Analysis of Test Results of Developed Synchronous Reluctance Motor for Public Transport Application," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2021.

# 1. Trolejbusu vilces prasību analīze

Elektriskās piedziņas projektēšanas procesā ir jāizprot aplūkojamā transportlīdzekļa dinamika, lai pareizi noteiktu vilces kritērijus dažādos transportlīdzekļa ātrumos. Šajā nodaļā aprakstītas pamatprasības trolejbusa dinamikai un vilces raksturlīknes veidošanai.

## 1.1. Trolejbusa dinamikas prasības

Šajā pētījumā aplūkots transportlīdzeklis ir trolejbuss. Trolejbusa tehnisko specifikāciju nodrošina ražotājs, un tā ir redzama 1.1. tabulā. Viensekcijas trolejbusa garums ir 12 m.

1.1. tabula

Trolejbusa dati

Parametrs	Mērvienība	Vērtība
Pilna masa	[tonnas]	18,9
Reduktora koeficients		9,84
Reduktora efektivitāte	%	97
Riteņa diametrs	[m]	0,88 (275/70R22.5)
Maksimālais darba ātrums, vismaz	[km/st]	60
Paātrinājums līdz 45 km/h, ne vairāk kā	[s]	18
Maksimālais paātrinājums, ne vairāk kā	[m/s <sup>2</sup> ]	1,2
Maksimālais ātruma samazinājums, ne vairāk kā	[m/s <sup>2</sup> ]	0,8
Gaisvadu līniju nominālais spriegums	[VDC]	550
Gaisvadu līniju minimālais spriegums	[VDC]	400
Gaisvadu līniju maksimālais spriegums	[VDC]	700

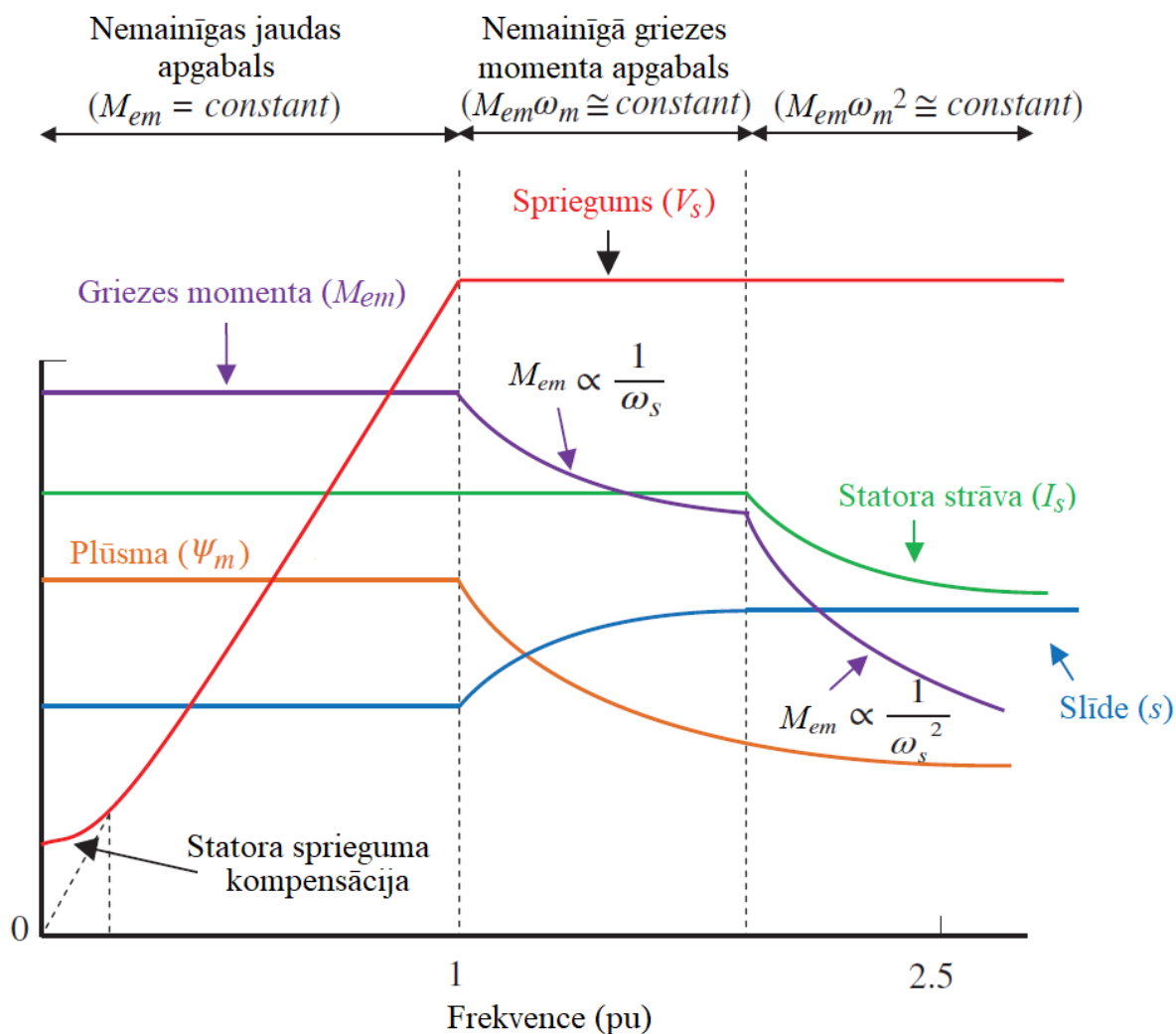
Papildus 1.1. tabulā minētajām prasībām trolejbusam attiecībā uz dinamiku jāievēro šādas papildu prasības:

- elektropiedziņai jāspēj uzturēt nemainīgu nominālo griezes momentu līdz 50 Hz nominālajai frekvencei;
- trolejbusam jāspēj uzturēt un sasniegt ātrumu 45 km/h pie 12 % ceļa slīpuma;
- braucot ar maksimālo ātrumu, 60 km/h elektropiedziņai jābūt vismaz par 10 % lielākam atlikušajam vilces spēkam nekā kustības pretestības spēkam;

Ņemot vērā visas minētās prasības transportlīdzekļa dinamikai, tiek konstruēta vilces raksturlīkne, kas tiks izmantota projektēšanas procesā un elektriskās piedziņas ar *SynRM* laboratoriskajā validācijā.

## 1.2. Iestatījuma vilces raksturlīknes veidošana

Kopumā vilces raksturlīkne sastāv no trim apgabaliem: nemainīgs griezes moments; nemainīga jauda ( $M_{elm} \cdot \omega_m \cong const.$ );  $M_{elm} \cdot \omega_m^2 \cong const.$ , apgabalu sadalījums redzams 1.1. attēlā [9]. Ņemot vērā šīs zināšanas, trolejbusa vilces raksturlīkne tiek konstruēta, pamatojoties uz dinamiskajām prasībām un diviem pārejas punktiem, no kuriem viens ir 50 Hz, savukārt otrs izvēlēts tā, lai maksimālā ātrumā tiktu izpildīta prasība par atlikušo griezes momentu.



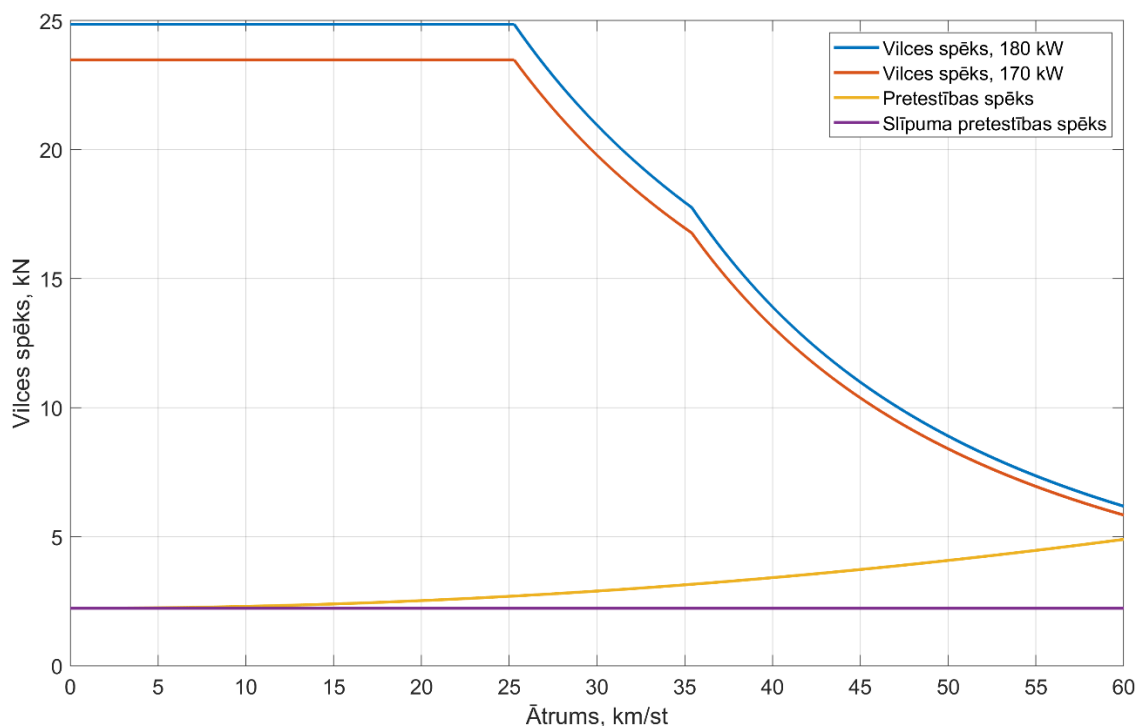
1.1. att. Motora darbības apgabali.

Prasības attiecībā uz paātrinājumu nav ļoti stingras, tāpēc definētajām dinamiskajām prasībām ir vairāki piemēroti risinājumi. Divi optimālie risinājumi ir izklāstīti 1.2. tabulā. Pirmais risinājums trolejbusam nodrošina lielāku kustības veiklību uz lielākas izejas jaudas rēķina, otrs piedāvātais risinājums nodrošina mazāku transportlīdzekļa paātrinājumu ar iespēju samazināt motora izmērus.

Iestatījuma vilces raksturlīknes risinājumi

	1. risinājuma variants	2. risinājuma variants
$P_N$ , kW	180	170
	Horizontāls ceļš	
Laiks līdz 45 km/h, s	16,24	17,42
$a_{max}$ , m/s <sup>2</sup>	1,02	0,96
Atlikušais spēks pie 60 km/h	26,3 %	19,3 %
Maksimālais ātrums, km/h	64,6	63,4
	12 ‰ slīpums	
Laiks līdz 45 km/h, s	19,27	20,99
$a_{max}$ , m/s <sup>2</sup>	0,92	0,86
Atlikušais spēks pie 54 km/h	23,2 %	13,6 %
Maksimālais ātrums, km/h	56,9	55,7

Abi risinājumi atbilst pārvietošanās prasībām. Pirmajam risinājumam ir lielāka darbības rezerve, tas pat spēj paātrināties līdz 45 km/h nepilnu 18 sekunžu laikā uz slīpa ceļa, savukārt otrajam risinājumam ir daudz mazāka rezerve.



1.2. att. Iestatījuma vilces raksturlīkņu grafiskais attēlojums.

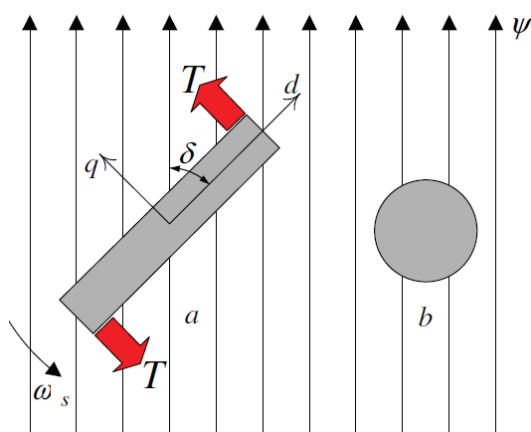
1.2. attēlā grafiski attēlotas iestatījuma vilces raksturlīknes ar kustības pretestības spēku un gravitācijas spēkiem slīpuma dēļ.

## 2. *SynRM* vilces piedziņas konstrukcija

*SynRM* prototipa projektēšana un ražošana notiek saistībā ar Eiropas projektu. Projektēšanas process ir publicēts “Latvijas Fizikas un Tehnisko Zinātņu Žurnālā” [10]. Savukārt pilns projektēšanas un testēšanas procesa apraksts tika prezentēts 23. Eiropas energoelektronikas konferencē [11]. Šajā nodaļā īsi aprakstīts projektēšanas process ar ievades datiem un rezultātiem.

### 2.1. *SynRM* darbības princips

*SynRM* darbības pamatā ir atšķirīgas rotora tiešās un kvadrātiskās ass inductivitātēs. Šo principu var izskaidrot, izmantojot 2.1. attēlā redzamos objektus [12]. Attēlā objektam “a” ar anizotropu magnētisko materiālu ir dažādas (ģeometriskās) pretestības d-asi un q-asi. Savukārt izotropā magnētiskā materiāla ģeometrijai objektā “b” ir vienāda pretestība visos virzienos.



2.1. att. Objekts ar anizotropu (a) un izotropu (b) ģeometriju.

Magnētiskais lauks  $\psi$ , kurā tiek ievietots anizotropisks objekts, rada griezes momentu, ja starp d asi un lauku ir leņķa starpība ( $\delta \neq 0$ ) vai ja objekta “a” d ass nav izlīdzināta ar lauku [12].

*SynRM* laukā  $\psi$  veido sinusoidāli sadalīts tinums ar spraugām statorā, un tas savieno statoru un rotoru ar nelielu gaisa spraugu, tieši tāpat kā tradicionālajā asinhronā motorā. Lauks griežas ar sinhronu ātrumu,  $\omega_s$ , un var pieņemt, ka tam ir sinusoidāls sadalījums. Tādējādi vienmēr veidosies griezes moments, kas darbojas, lai samazinātu visas sistēmas potenciālo enerģiju, samazinot izkropļojuma lauku  $q$  asi, ( $\delta \rightarrow 0$ ). Ja  $\delta$ , slodzes leņķis, ir nemainīgs, tad elektromagnētiskā enerģija nepārtraukti tiek pārveidota mehāniskajā enerģijā.

Tāpēc divi svarīgākie parametri ir attiecīgi tiešās un kvadrātiskās ass inductivitātes  $L_d$  un  $L_q$ . Sinhronās magnētiskās pretestības mašīnas jaudu iegūst no slodzes leņķa vienādojuma (2.1.) [13].

$$P = 3U_s^2 \frac{L_d - L_q}{2\omega_s L_d L_q} \sin 2\delta = \frac{3U_s^2}{2\omega_s} \left( \frac{1 - \frac{L_q}{L_d}}{L_q} \right) \sin 2\delta, \quad (2.1.)$$

kur:  $U_s$  – statora fāzes spriegums;

$L_d$  un  $L_q$  –  $d$  un  $q$  ass induktivitātes;

$\delta$  – slodzes leņķis;

$\omega_s$  – sinhronais leņķiskais ātrums.

Teorētiski dzinējs var sasniegt maksimālo griezes momentu pie slodzes leņķa  $\delta = 45^\circ$ . Tērauda piesātinājums un citas parādības var izraisīt šķietamas novirzes no šīs vērtības [14].

## 2.2. Galvenie parametri un konstrukcijas ierobežojumi

Izmēru noteikšana ir balstīta uz ražošanā esošo trolejbusam paredzēto asinhrono motoru (izgatavotājs AS “RER”). *SynRM* tika izstrādāts, lai aizstātu *IM*, tāpēc bija jāņem vērā korpusa izmērs, elektriskās padeves parametri, mehāniskie parametri un ražotāja konstrukcijas iespējas (gaisa spraugas platums  $\delta$ ).

*SynRM* nominālais punkts ir izvēlēts tāds pats kā asinhronam motoram, jo tas ir labi piemērots izvēlētajai vilces raksturlīknei. Nominālais punkts un izmēra ierobežojumi ir norādīti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

*SynRM* nominālais punkts un izmēra ierobežojumi

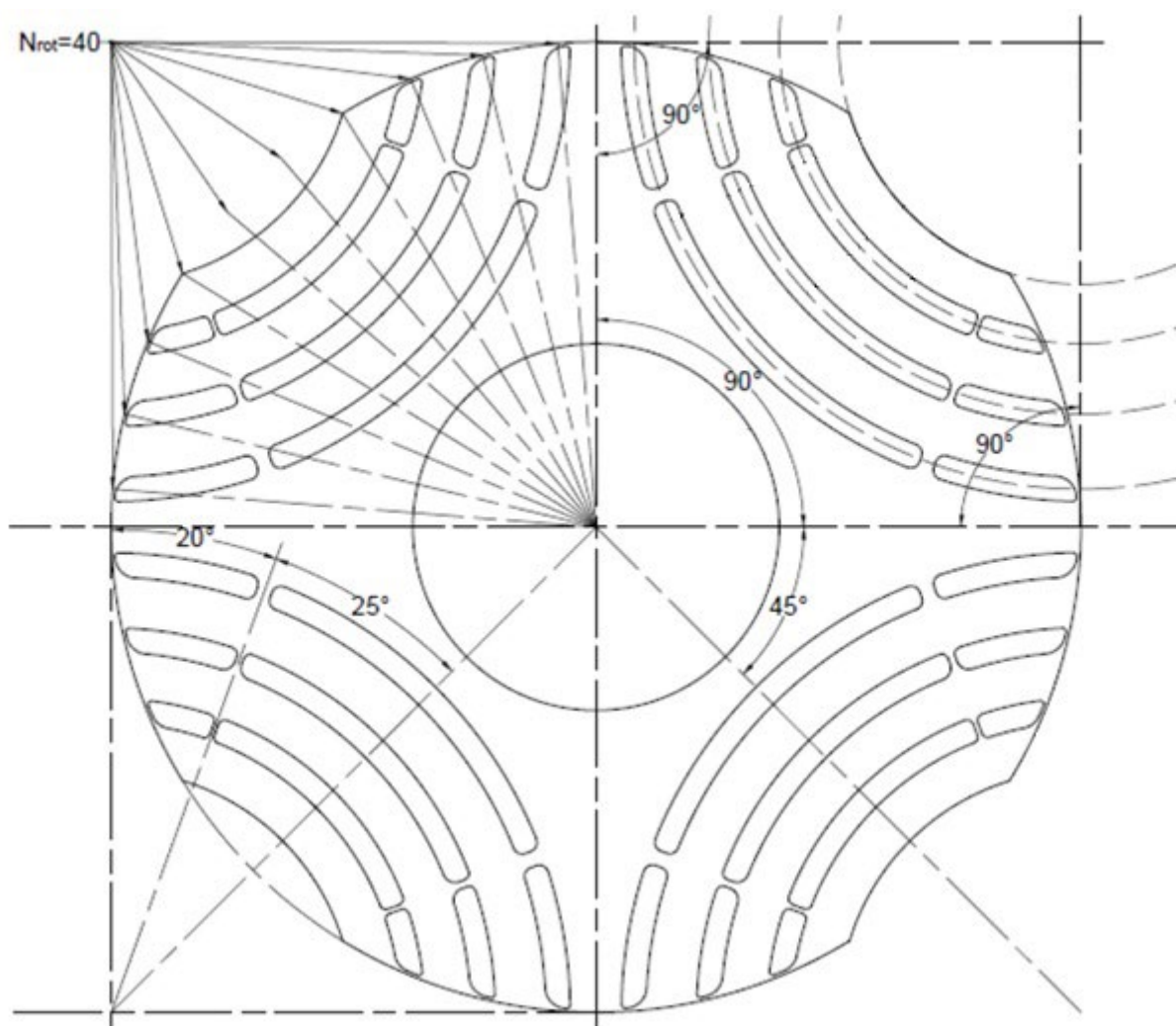
Parametrs	Mērvienība	Vērtība
Nominālā izejas jauda	$P_n$ [kW]	180
Nominālais spriegums	$U_n$ [V]	420
Nominālā frekvence	$f_1$ [Hz]	50
Polu pāru skaits		2
Fāžu skaits		3
Darbības režīms		S2–60 min
Statora ārējais diametrs	$D_{os}$ [mm]	493
Statora krāvuma garums	$L$ [mm]	290
Gaisa spraugas platums	$\delta$ [mm]	1.2

## 2.3. Statora konstrukcija

Statora konstrukcija tika izstrādāta, veicot aprēķinus, kas aprakstīti literatūras avotos [15], [16], [13] un [17], papildus veicot magnētiskā lauka matemātisko modelēšanu, izmantojot galīgo elementu modelēšanas metodi (*FEM*).

## 2.4. Rotora konstrukcija

Rotors tika projektēts, izmantojot *FEM* magnētiskā lauka modelēšanu dažādiem rotora modeļiem. Svarīgākie parametri tika izvēlēti, pamatojoties uz literatūrā sniegtajiem ieteikumiem. Plūsmas barjeru skaits un to izvietojums tika izvēlēts, izmantojot metodi, kas aprakstīta [18], un [19]. Rotora barjeru un plūsmas ceļu platums tika izvēlēts, ņemot vērā [20] ieteikumus. Projektēta rotora ģeometrija redzama 2.2. attēlā.



2.2. att. *SynRM* rotora ģeometrija.

## 2.5. Projektētā motora parametri

Lai novērtētu projektēšanas procesu, zudumi tika sadalīti sastāvdaļās. Norādītās vērtības ir pie nemainīgas 50 Hz frekvences. 2.2. tabulā apkopots projektēto *SynRM* un *IM* testa rezultātu salīdzinājums.



*SynRM* (*FEM* modelēšana) un *IM* testa rezultātu salīdzinājums

Parametrs	Mērvienība	Dizains	<i>IM</i>
Barošanas strāva	$I_1$ [A]	392,4	309
Barošanas spriegums	$U_1$ [A]	420	420
Jaudas koeficients	$\cos \varphi$	0,663	0,85
Barošanas jauda	$P_{ie}$ [W]	189200	191400
Mehāniskā jauda	$P_{iz}$ [W]	179144	177989
Rotora leņķiskais ātrums	$n$ [apgr/min]	1500	1471
Mehāniskais griezes moments	$M_2$ [W]	1141	1156
Statora tinumu zudumi	$\Delta P_{el1}$ [W]	5637	5017
Rotora tinumu zudumi	$\Delta P_{el2}$ [W]	–	3580
Zudumi tēraudā	$\Delta P_{mag}$ [W]	2873	1940
Mehāniskie zudumi	$\Delta P_{meh}$ [W]	544	960
Papildu zudumi	$\Delta P_{pap}$ [W]	1002	1914
Kopējie zudumi	$\Sigma \Delta P$ [W]	10056	13411
Efektivitāte	$\eta$ [%]	94,69	92,99

*SynRM* jaudas koeficients (0,663) ir zems, salīdzinot ar *IM* (0,89), tāpēc strāva ir lielāka. Projektējot *SynRM*, neizbēgams ir kompromiss starp jaudas koeficientu un griezes momenta jaudu. Pētījuma galvenais mērķis bija iegūt vajadzīgo griezes momentu un efektivitātes samazināšanas iespēju jaudas koeficienta optimizācijai.

## 2.6. Izstrādātā motora vilces raksturlīkne

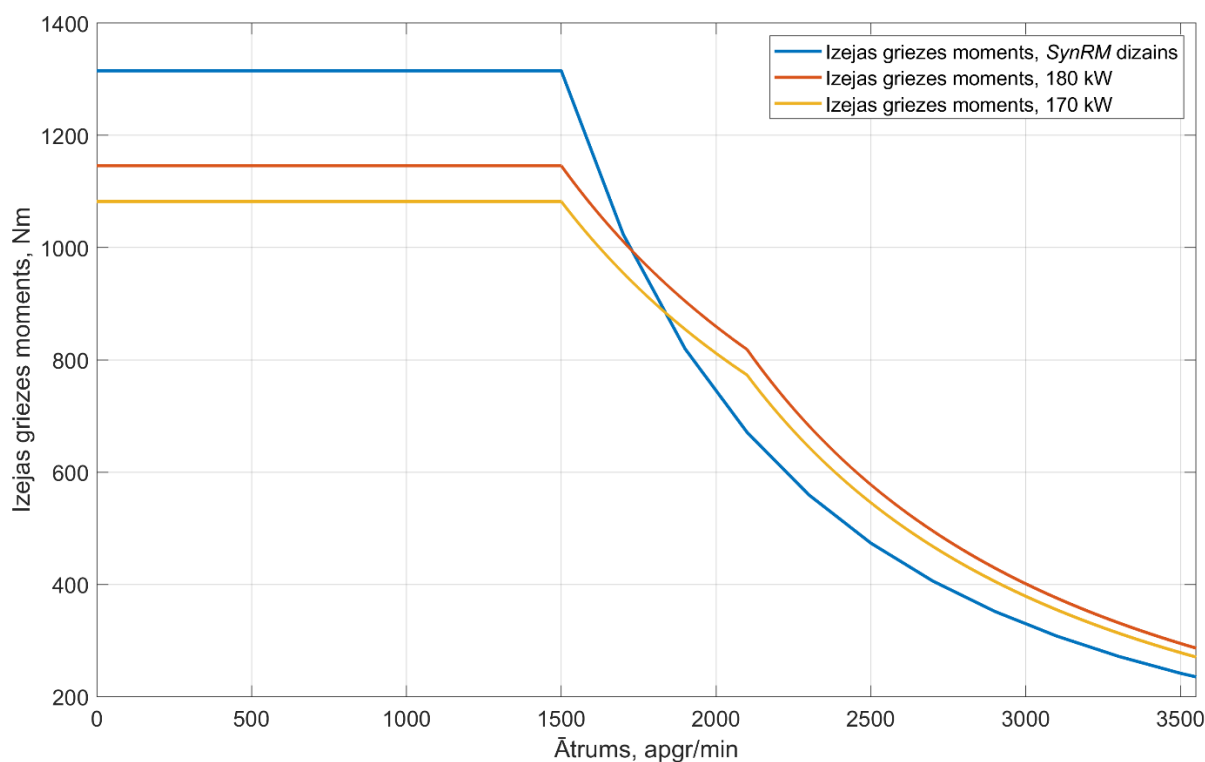
Pēc motora projektēšanas veikti parametru aprēķini dažādos darbības punktos, lai noskaidrotu, vai projektētais motors spēj radīt vajadzīgo griezes momentu, un paātrināt trolejbusa kustību vajadzīgajā laikā.

Tāpēc ir izstrādāts algoritms, lai aprēķinātu sinhronās reluktances mašīnas (*SynRM*) parametrus un konstruētu motora raksturlielumus, ņemot vērā šķērsmagnētiskā piesātinājuma efektu. Algoritms ietver skaitlisko aprēķinu daļu un galīgo elementu metodes (*FEM*) aprēķinu daļu. *FEM* tiek veikts, definējot trīsfāžu strāvas tinumā un risinot magnetostatikas modeli.

Algoritms ir izstrādāts motora režīmam pie sinusoidāla maiņstrāvas sprieguma, lai gan praksē *SynRM* gandrīz vienmēr ir savienots ar frekvences pārveidotāju. Motora konstrukcijas aprēķini parasti tiek veikti, pieņemot, ka darbību nodrošina sinusoidāls maiņstrāvas spriegums [15]. Izstrādātais algoritms atšķiras no Kampera metodes [21] ar to, ka magnētiskās pretestības tiek noteiktas, aprēķinot elektromagnētisko griezes momentu ar *FEM*, un saskaņā ar *SynRM* vektoru diagrammu tiek noteiktas enkuru tiešās ass un perpendikulārās ass magnētiskās pretestības. Līdzīgs algoritms ir asinhronās mašīnas režīma noteikšanai, kas ietver *FEM*

aprēķinus reaktīvās pretestības aprēķināšanai ar spriegumu un fāzes leņķi kā gala kritērijiem, kā parādīts [22]. Detalizētāk izstrādātā metode un aprēķinu posmi aprakstīti publikācijā [23].

Kopumā algoritmā kā ievades dati ir  $d$  un  $q$  ass strāvas un lauka frekvence (rotācijas ātrums), no kuriem iteratīvi tiek aprēķināti citi parametri līdz noteiktai precizitātei. Ieejas strāvas tiek pielāgotas, lai nepārsniegtu sprieguma robežu. 2.3. attēlā redzama projektējamā *SynRM* vilces raksturlīkne un iestatījuma raksturlīkne.



2.3. att. Izstrādātā *SynRM* vilces raksturlīknes.

Pēc aprēķiniem tiek iegūta vilces raksturlīkne no 20 Hz (600 apgr./min) līdz 120 Hz (3600 apgr./min, kas atbilst 65 km/h) ar maksimālo iegūstamo griezes momentu, ko ierobežo 420 V nominālais spriegums.

### 3. Vadības algoritma un modeļa izstrāde

Elektriskās piedziņas veiktspēja un stabilitāte ir būtiski atkarīga no vadības sistēmas. *SynRM* radītā griezes momenta pretestība ir ļoti nelineāra, tāpēc vadības algoritma izstrāde ir sarežģīts uzdevums. Izstrādātā vadības sistēma ir balstīta *SynRM* fundamentālajos vienādojumos, kas tika ieviesti lauku orientētā vadības (*FOC*) algoritmā. Vadības sistēmas verifikācijai tika izveidots *Matlab/Simulink* modelis.

Šajā nodaļā aprakstīts *SynRM* matemātiskais modelis, *SynRM* vadības pieeja un vadības sistēmas modelēšana *Simulink*.

#### 3.1. *SynRM* matemātiskais modelis

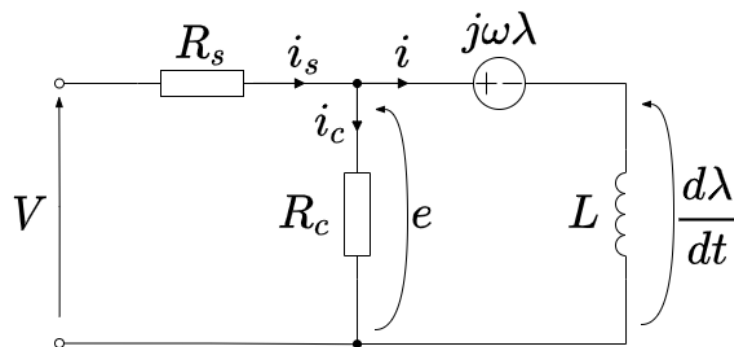
*SynRM* pēc būtības nevar darboties bez frekvences pārveidotāja, un precīzai vadībai galvenokārt tiek izmantotas divas vadības metodes: uz lauku orientēta vadība vai tiešā griezes momenta vadība. Abas metodes nodrošina atsevišķu motora magnetizācijas un griezes momenta vadību. Šīs metodes balstās motora matemātiskajos modeļos rotējošās koordinātēs. Sprieguma komponentu  $v_{ds}$  un  $v_{qs}$  momentānās vērtības apraksta šādi vienādojumi [24]:

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_{ds} - \omega_s L_q i_{qm} + L_d \frac{di_{dm}}{dt}, \\ v_q &= R_s i_{qs} + \omega_s L_d i_{dm} + L_q \frac{di_{qm}}{dt}, \end{aligned} \quad (3.1.)$$

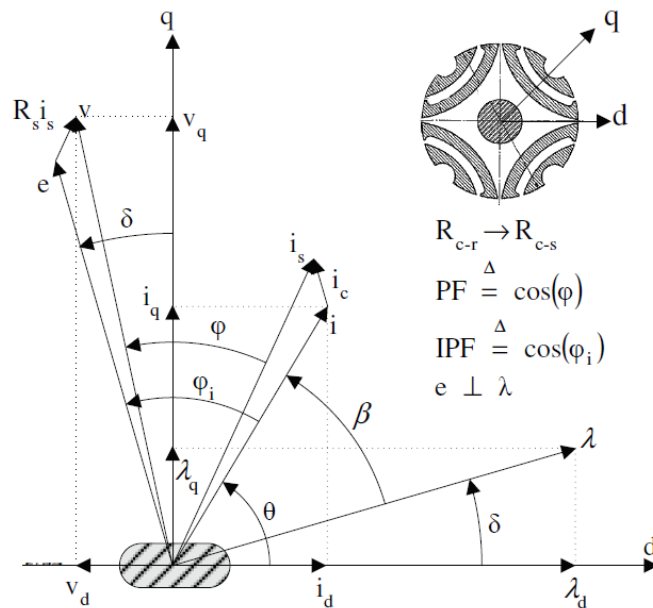
kur:  $i_{ds}$  un  $i_{qs}$  – statora strāvas  $d$  un  $q$  ass komponentes;

$R_s$  – statora tinuma pretestība.

Matemātiskais modelis ir atvasināts no *SynRM* ekvivalentās shēmas, kas redzama 3.1. attēlā, un *SynRM* vektoru diagrammas vienmērīgā stāvoklī (3.2. att.) [12].



3.1. att. *SynRM* ekvivalenta shēma, ieskaitot zudumus tēraudā.



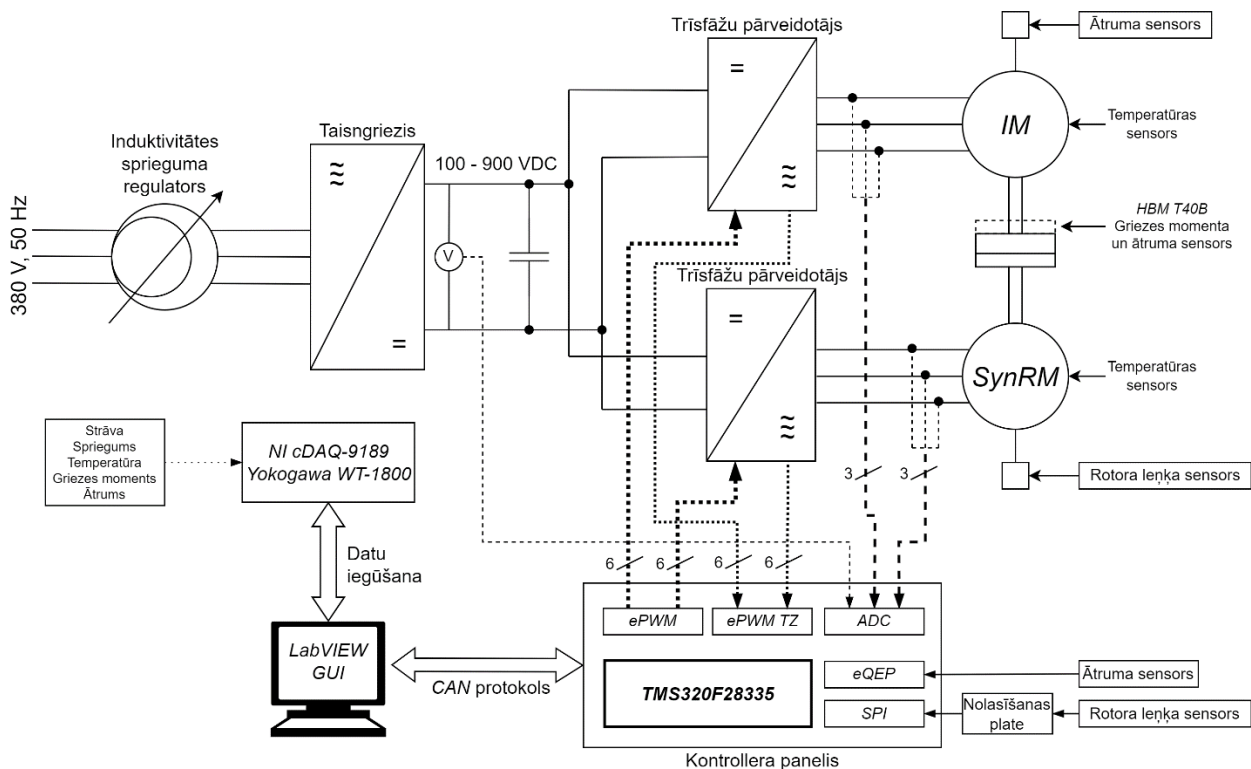
3.2. att. *SynRM* vektoru diagramma vienmērīgā stāvoklī, kur  $\delta$  – slodzes leņķis,  $\theta$  – strāvas leņķis,  $\beta$  – griezes leņķis,  $\varphi$  un  $\varphi_i$  – leņķi, kas atbilst attiecīgi jaudas koeficientam un iekšējam jaudas koeficientam.

Leņķi atšķiras dzelzs un vara zudumu dēļ.

### 3.2. Vilces piedziņas vadības algoritma izstrāde

Motora vadības sistēma tika izstrādāta uz vadības plates ar *MCU TI TMS320F28335*. Vadības bloks ir īpaši izstrādāts invertoriem ar līdzstrāvas mezgla spriegumu līdz 1 kV un nominālo jaudu līdz 350 kW. Invertora pārslēgšanās frekvence ir 2 kHz.

Vadības sistēmas struktūra redzama 3.3. attēlā. *MCU* no ātruma sensora saņem septiņus analogos strāvas signālus, vienu analogo sprieguma signālu un ātruma sensora signālu. *IGBT* vadības signālus ģenerē *EPWM* modulis. *IGBT* vadītāju kļūdu signāli ir savienoti ar *EPWM TZ* moduli, lai nodrošinātu ātru reakciju. *SPI* sērijveida sakaru perifērija ir konfigurēta, lai sazinātos ar rotora pozīcijas leņķa nolasīšanas bloku. *CAN* modulis ir atbildīgs par datu apmaiņu ar vadības datoru (komandu saņemšanu un datu pārraidi).



3.3. att. Vadības struktūrshēma.

Iebūvētā pārveidotāja vadības programmatūra rakstīta *C* valodā. Motoru vadības programmatūrai kā matemātiskie pamatbloki izmantotas funkcijas no *TI Digital Motor Control* [25] bibliotēkas. Projekta gaitā funkcijas tika pārveidotas, lai tās pielāgotu konkrētajam lietojumam.

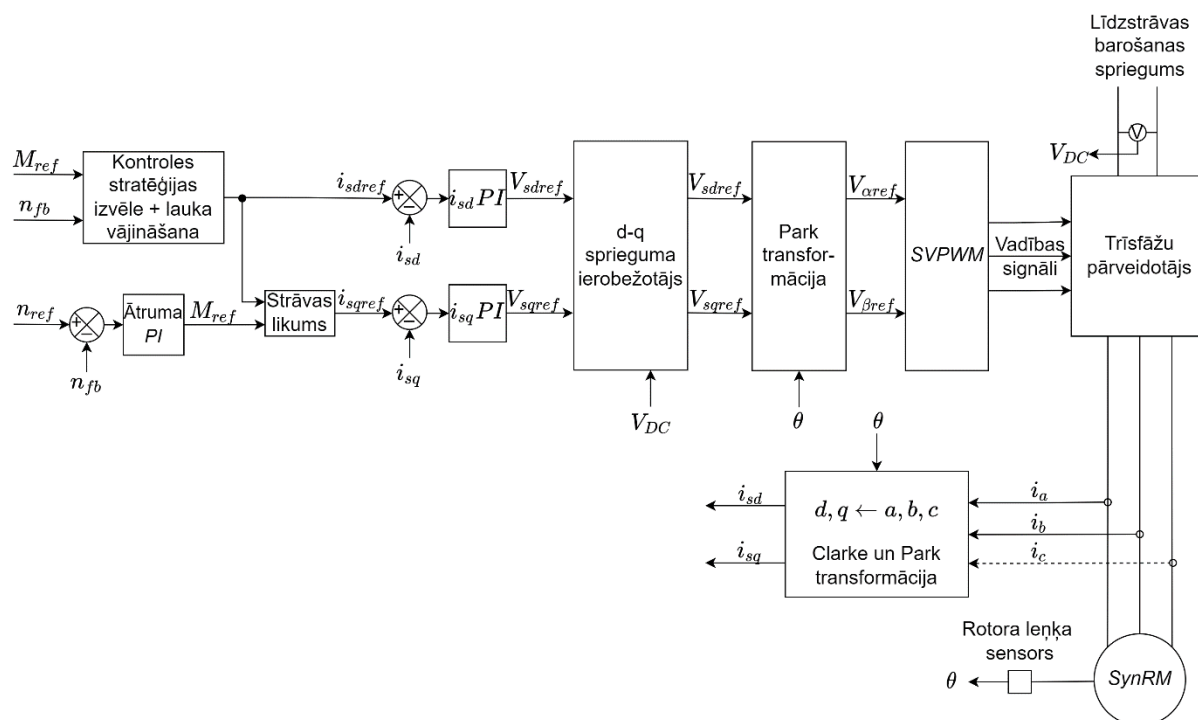
### 3.3. *SynRM* vadības algoritms

Lielākā daļa mūsdienu maiņstrāvas motoru izmanto frekvenču pārveidotājus ar tiešo griezes momenta vadību vai vektoru vadību, jo īpaši – vilces iekārtās. Šajā pētījumā izmantota uz lauku orientēta vadība (*FOC*).

*SynRM* piedziņas frekvenču pārveidotāji ļauj izmantot rotoru ar plūsmas virzošām barjerām efektīvai sinhronajai darbībai. Rotoru ģeometrija nodrošina augstāku attiecības koeficientu starp induktīvām pretestībām  $X_d$  un  $X_q$ , kas uzlabo mašīnas efektivitāti. Turklāt *SynRM* rotora samazinātā inerce uzlabo pārejas reakcijas laiku. *SynRM* stators ir identisks asinhronās mašīnas statoram, un tās vadības sistēma sastāv no līdzīgiem blokiem.

Vektoru vadības sistēmai nepieciešams izmantot *SynRM* divu asu modeli rotora atskaites sistēmā. Tas tiek panākts ar statora strāvu  $d$ - $q$  transformācijām, izmantojot informāciju par rotora leņķi. Sinhroniem motoriem ērtākais risinājums ir rotora pozīcijas leņķa devējs.

Šīs vadības stratēģijas balstās uz strāvas leņķa  $\theta$  vadību, un atbilstošais strāvas leņķis tiek izvēlēts, pamatojoties uz vēlamajiem veikspējas apsvērumiem [14], [12].



3.4. att. *SynRM* vilces piedziņas vektoru vadības sistēmas blokhēma.

3.4. attēlā redzama vispārēja *SynRM* piedziņas vektoru vadības blokhēma, kur griezes momenta vadību blokā var īstenot, izmantojot dažādas tālāk minētās pieejas.

*SynRM* piedziņas vadībā kontrolei visbiežāk tiek izmantotas šādas [26] pieejas:

- pastāvīga d ass strāvas vadība (*CDAC*);
- maksimālā griezes momenta izmaiņu ātruma (*MRCT*) vadība;
- maksimālā jaudas koeficienta vadība (*MPFC*);
- maksimālā griezes momenta strāvas vienībā (*MTPA*) vadība.

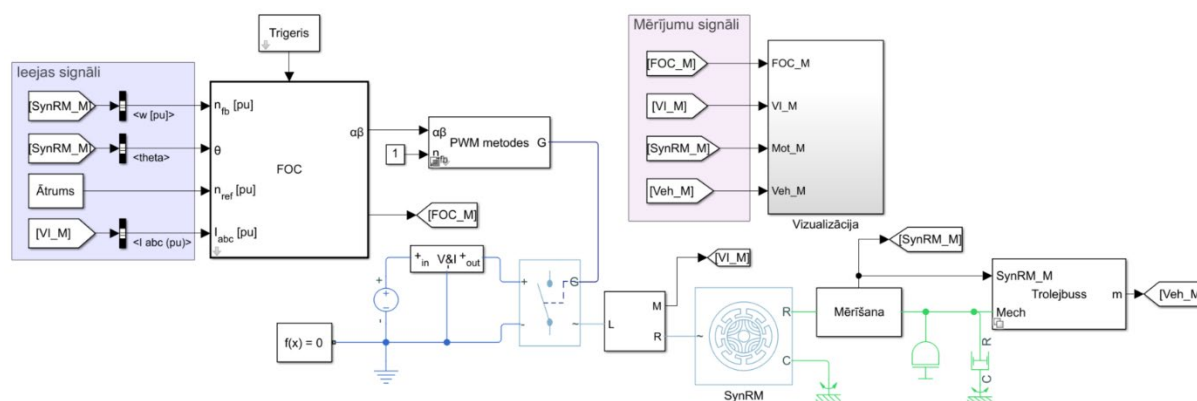
### 3.4. Elektriskās vilces piedziņas *Simulink* modelis

Pirmais vadības sistēmas verifikācijas posms pirms tās izmantošanas reālā vidē ir testēšana ar matemātisko modeli. Turklāt modelēšana var palīdzēt izpētīt darbības galējos gadījumus un ļauj pārbaudīt ar transportlīdzekli savienoto piedziņu, ko parasti nav iespējams veikt laboratorijas izmēģinājumu stendā.

Trolejbusa *SynRM* elektriskās piedziņas matemātiskais modelis ir izveidots *Matlab Simulink* vidē. Šis modelis ir turpinājums darbam, kas izklāstīts publikācijā [27].

### 3.4.1. Augsta līmeņa algoritma pārskats

Lai izprastu *SynRM* elektriskās piedziņas *Simulink* modeļa iekšējo darbību, nepieciešams pārskats par loģiskajiem savienojumiem un signālu maršrutiem augstākajā līmenī. Augsta līmeņa pārskats redzams 3.5. attēlā.



3.5. att. Elektriskās piedziņas vadības modeļa augsta līmeņa algoritma struktūra.

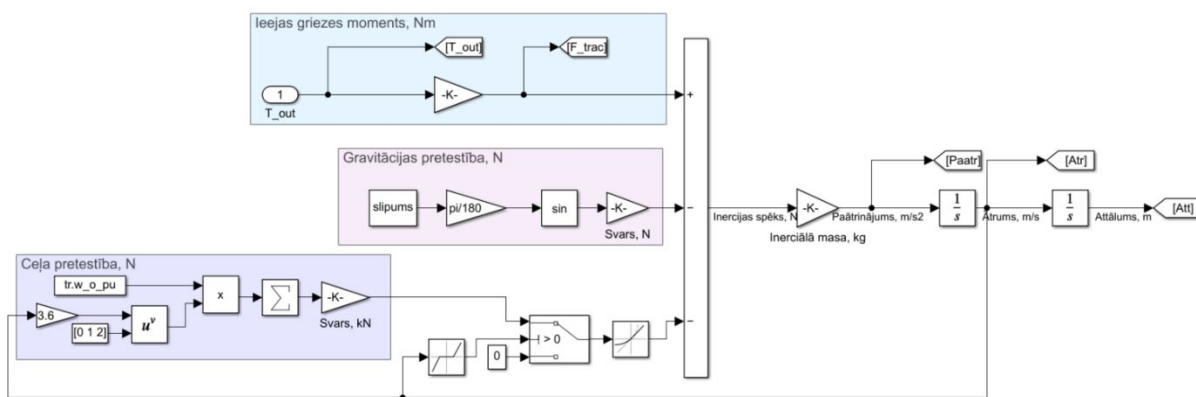
Sistēmas palaišanas laikā modelis tiek inicializēts ar programmatūru, kas ietver konstantes un pārlūktabulas pareizai darbībai. Izmantotās vērtības tiek iegūtas, pamatojoties uz zināšanām par *SynRM*, transportlīdzekli un testa stenda parametriem. Turklāt modelis var būt iestatīts darbībai testa stenda režīmā (konstanta slodze, maza inerce) vai transportlīdzekļa režīmā.

Augstākā līmeņa modelis ir sadalīts vairākās apakšsistēmās jeb sadaļās. Tie ir uz lauku orientēta vadība (*FOC*), impulsu platumu modulācijas (*PWM*) ģenerators (atbalsta vairākas modulācijas pieejas), vilces invertors ar līdzstrāvas sprieguma avotu, statora strāvas un sprieguma mērīšanas bloks, *SynRM*, rotora vārpstas mērījumi (rotora pozīcijas, izejas griezes moments, rotora ātrums) un slodzes apakšsistēma.

Ātrumu var iestatīt kā jebkuru ātruma un laika funkciju. Ceļu profila testēšanai tiek izmantota *WLTP* pirmā klase.

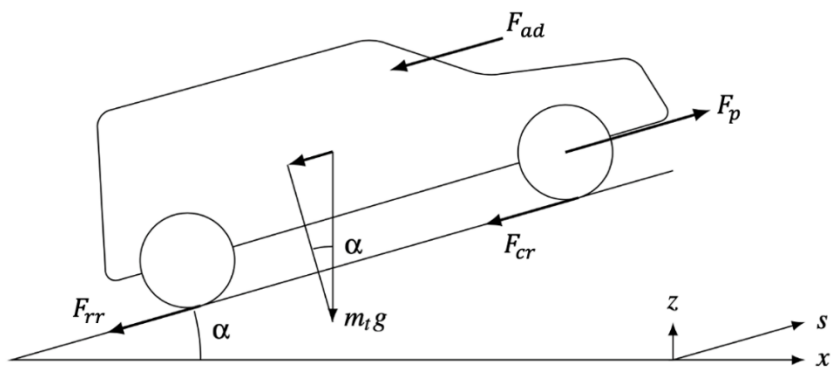
### 3.4.2. Trolejbusa matemātiskais modelis

Būtiska atšķirība no laboratorijas testa stenda ir transportlīdzekļa modeļa klātbūtne, kas šajā gadījumā ir trolejbuss. Modeļa pamatā ir kustīgā objekta lineārais modelis. Trolejbusa modeļa shēma redzama 3.6. attēlā.



3.6. att. Trolejbusa modeļa blokshēma.

No dinamikas viedokļa spēkus, kas iedarbojas uz kustībā esošu transportlīdzekli, nosaka Ņūtona otrais likums, un tos var attēlot, kā redzams 3.7. attēlā [28].



3.7. att. Spēku, kas iedarbojas uz kustībā esošu transportlīdzekli, attēlojums.

3.7. attēlā  $F_{ad}$  – gaisa pretestības spēks [N],  $F_{cr}$  – pagriezienu pretestības spēks [N],  $F_{rr}$  – rites pretestības spēks [N],  $\alpha$  – virsmas slīpums [%],  $m_t$  – transportlīdzekļa kopējā faktiskā masa [kg].

Transportlīdzekļa kopējā efektīvā masa atšķiras no faktiskās masas ar korekcijas koeficientu  $1 + \gamma$ , un tā atspoguļo rotējošo daļu kopējās inerces ietekmi. Šo koeficientu var iegūt, veicot aplēses testus vai aprēķinus, zinot transportlīdzekļa konstrukciju. Trolejbusam inerciālās masas korekcijas koeficients ir 0,15–0,20 [29] (modelī izmantots 0,17).

Gaisa pretestībai, griezes pretestībai un pretestībai pagriezienos ir atbilstošas aprēķina formulas, bet, ņemot vērā to, ka tās apraksta sarežģītas fizikālas parādības, to novērtēšana ir apgrūtināta. Praktiskajos aprēķinos šo spēku aprakstīšanai parasti izmanto empīriski iegūtas sakarības.



Šādu sakarību iegūst, transportlīdzeklim uzņemot ātrumu, pēc tam ļaujot tam braukt pa līdzenu, garu, taisnu ceļu bez vēja. Šajā testā tiek novērots ātruma palēninājums, un pēc tam šī ātruma izmaiņa tiek izteikta, izmantojot otrās kārtas polinomu. Vispārējā tuvināšana ir parādīta šādā vienādojumā [28], [29], [30]:

$$F_{res}(t) = C_0 + C_1 v(t) + C_2 v(t)^2, \quad (3.2.)$$

Konkrētā modeļa gadījumā kā tuvinājums tiek izmantots vienādojums no [29], [30]:

$$w = 12 + 0.004 \cdot v^2, \quad (3.3.)$$

$$F_{res} = w \cdot mg, \quad (3.4.)$$

kur:  $v$  – km/h;  $w$  – N/kN vai relatīvā vērtība uz kN spēka. Lai to pārveidotu absolūtajās vērtībās, to reizina ar transportlīdzekļa svaru.

## 4. *SynRM* vilces piedziņas eksperimentāla izpēte

Elektriskās mašīnas ražošanas precizitāti un kvalitāti atspoguļo tās parametri, modelēšanas un testēšanas rezultātu salīdzināšana. Svarīgs pētījuma posms ir elektromotora matemātiskā modeļa korekcija atbilstoši eksperimentālas pārbaudes rezultātiem. Šajā nodaļā ir aprakstīts elektriskās mašīnas ražošanas process, laboratorijas un mērinstrumenti un parādīti testu rezultāti.

### 4.1. *SynRM* vilces piedziņas ražošanas process

*SynRM* prototipa izgatavošana tika veikta AS “RER”.

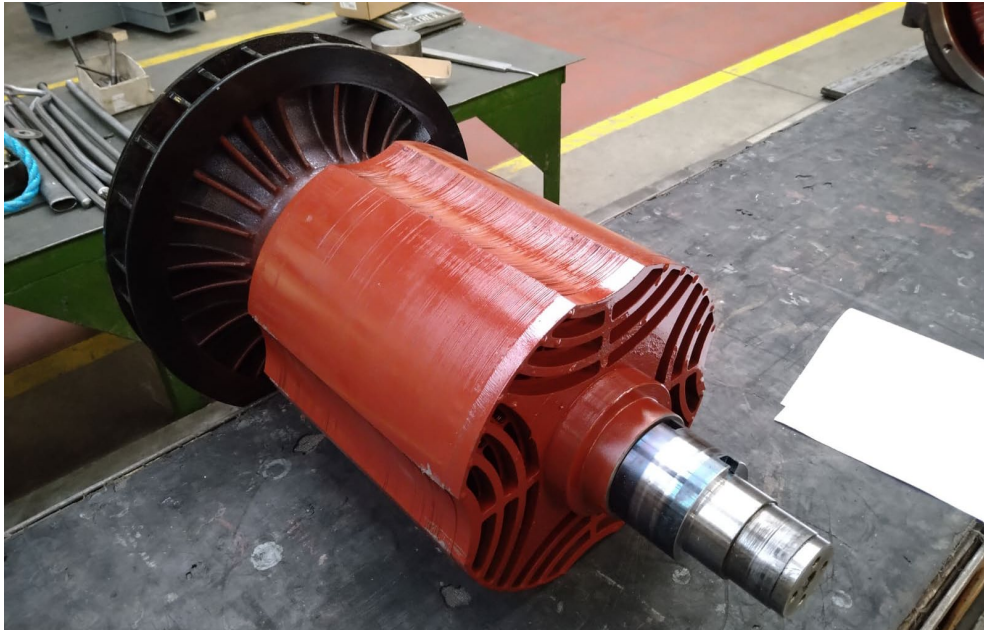
Motors sastāv no divām galvenajām montāžas vienībām – statora un rotora.

Elektromotora statora izgatavošana sākas ar motora korpusu. *SynRM* prototipa korpusi ir metināti no mazākām montāžas vienībām. Korpusi sastāv no čaulas, poliem, divām sānu plāksnēm, kas ir savstarpēji savienotas ar diviem tērauda švelleriem. Šīs detaļas ir metinātas kopā un apstrādātas atbilstoši rasējumam. Poli ir mehāniski apstrādāti atbilstoši statora tērauda lokšņu izmēram, kakliņi atbilstoši gala vairogiem, korpusa iekšpusē ir izfrēzēta atslēgas sprauga, lai nostiprinātu statora tērauda loksnes.

Pēc tam korpusā iespiež serdi, kas izgatavota no elektrotehniskā tērauda loksniem. Statora serdenis ir ievietots korpusā, vadoties pēc segmenta atslēgām, kas piemetinātas pie ārējā statora gredzena.

Pēc tam statorā tiek ievietotas satītās spoles, kas ir savienotas saskaņā ar projektēšanas posmā izstrādāto elektrisko savienojumu shēmu. Visbeidzot stators tiek piesūcināts ar speciālu maisījumu, lai nodrošinātu strukturālo integritāti un izolāciju, pēc tam tas tiek izžāvēts un sagatavots montāžai.

*SynRM* rotors ir tērauda vārpsta, uz kuras uzvērtas rotora tērauda loksnes. Šis motors ir izgatavots kā eksperimentāls prototips, tāpēc bija lietderīgi izgatavot rotora un statora loksnes, izgriežot tās ar lāzeru, nevis pasūtīt dārgu tehnoloģisko aprīkojumu štancēšanai.



4.1. att. Montētais rotora korpuss.

Pēc uzvēršanas procesa rotors tiek saspīests un impregnēts līdzīgā procesā kā stators, mehāniski apstrādāts (slīpēts) un pēc tam tiek uzstādīts ventilators. Pēdējā posmā rotors tiek dinamiski līdzsvarots. Pabeigtais krāsotais rotors redzams 4.1. attēlā.



4.2. att. *SynRM* vilces piedziņa uz testa stenda.

Pabeigts un uzstādīts motors uz testēšanas stenda *SynRM* redzams 4.2. attēlā.

## 4.2. Izstrādātās *SynRM* vilces piedziņas laboratoriskā testēšana

Izstrādātā un izgatavotā prototipa vispusīga laboratoriskā testēšana ir izšķirošs elements elektrotransporta *SynRM* elektropiedziņas pētniecībā un izstrādē.

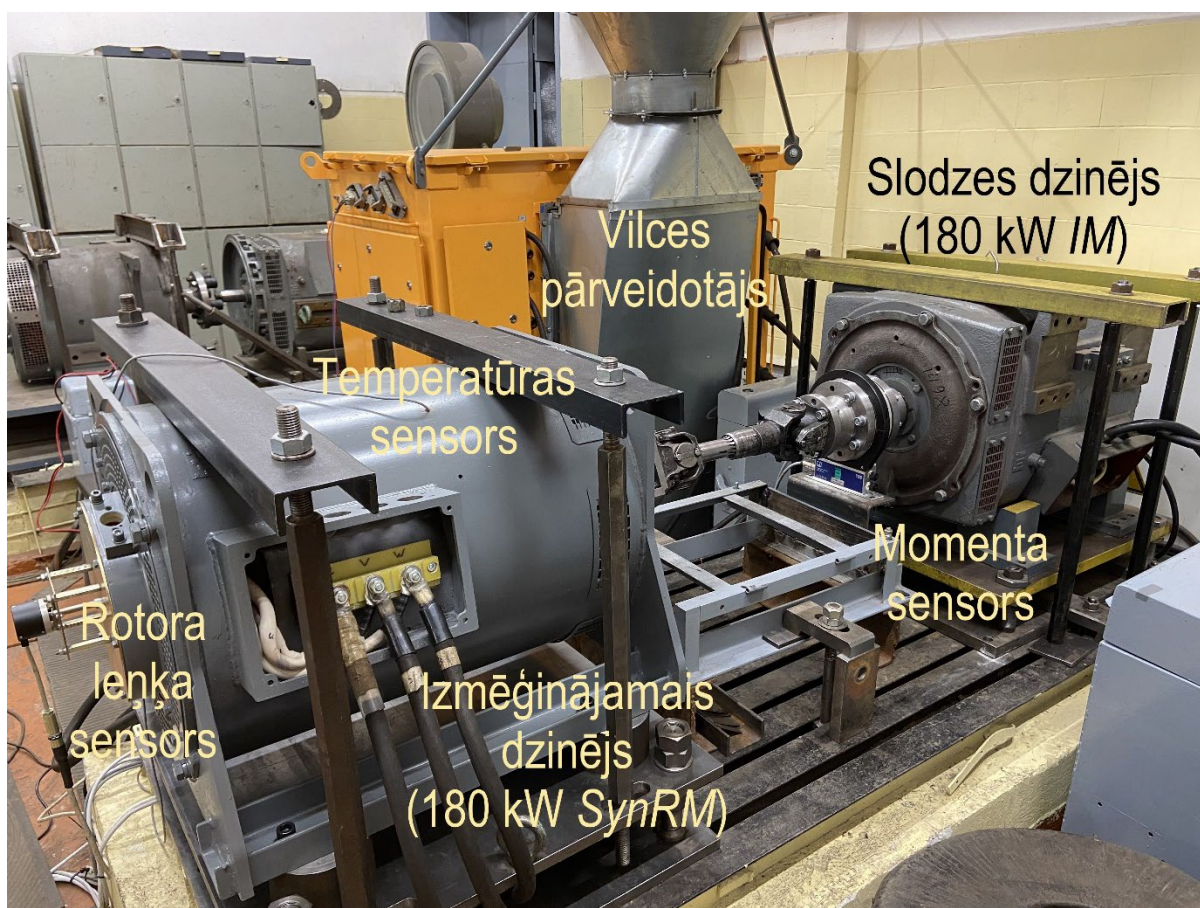
Izgatavotā parauga testi tika veikti vienā no AS “RER” vilces laboratorijām. Autors piedalījās arī pašizgāzēja elektroiekārtu komplekta testos [31], kā arī elektrovilcienu elektromotoru vibrāciju pētījumos [32], [33].

### 4.2.1. Laboratorijas aprīkojums

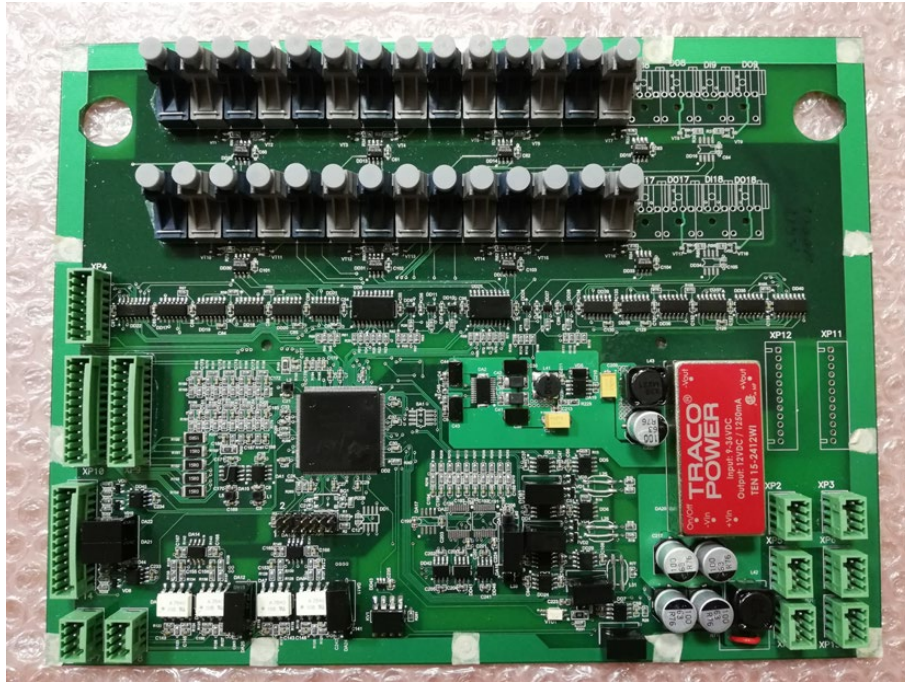
#### Testēšanas konfigurācija

Izgatavotā *SynRM* prototipa laboratoriskai testēšanai izveidots laboratorijas testēšanas stends ar atbilstošu mērīšanas un kontroles aprīkojumu.

Laboratorijas testi tika veikti ar pilsētas transportlīdzekļu elektrisko piedziņu līdz 1 kV laboratorijas testēšanas stendā AS “RER” telpās [27]. Testēšanas stenda konfigurācija redzama 4.3. attēlā, invertora vadības plate – 4.4. attēlā.



4.3. att. Laboratorijas testēšanas stenda fotogrāfija ar iekārtu apzīmējumiem.



4.4. att. Laboratorijas invertora vadības plate *MCU TI TMS320F28335*.

Testa un slodzes motori ir nekustīgi savienoti, izmantojot kardāna savienojumu, un savstarpēji noslogoti. Dzinējus vada vilces pārveidotājs, ko baro no 1 kV līdzstrāvas mezgla sprieguma avota. Vadības sistēma ir ieprogrammēta *TMS320F28335* signālu procesorā. Motoru vadība balstās uz signāliem no strāvas un sprieguma sensoriem, kā arī no rotora stāvokļa sensora *SynRM* gadījumā un ātruma sensora asinhronam motoram. Ieejas parametru iestatīšana vadības sistēmai laboratorijā tiek veikta no grafiskās lietotāja saskarnes (*GUI*), saziņa ar *DSP* notiek, izmantojot *CAN* kopni.

#### **Mērīšanas aprīkojums**

Papildus laboratorijas testēšanas stendam tika izmantota arī mērījumu un datu analīzes iekārta, kas ļauj iegūt, vizualizēt un saglabāt visus pētniecībai nepieciešamos datus. Tāpēc vadības un mērījumu rezultātu kvalitāti apstiprina verificēti sensori un mēriekārtas.

Izvades griezes momentu un rotācijas ātrumu mēra, izmantojot *HBM* griezes momenta sensoru *T40B* 5 kN·m. Strāvas vērtības tiek mērītas ar *ABB ES2000* Holla sensoriem, spriegums – ar *Yokogawa WT1800 Precision Power Analyzer*.

Datu pirmapstrāde un reģistrēšana no griezes momenta sensora un temperatūras sensora tiek reģistrēta, izmantojot *NI* mērījumu komplektu. *NI cDAQ-9189* šasija tiek izmantota kopā ar *NI9361*, *NI9215* un *NI9216* moduļiem, šasija ir savienota ar apstrādes datoru ar *Ethernet* savienojumu.

#### 4.2.2. *SynRM* vilces raksturlīkne

Lai noteiktu projektētā un izgatavotā *SynRM* vilces ierobežojumus, tiek veikta plaša eksperimentālā pārbaude pie un zem 420 V dažādos ātrumos.

##### Nominālo darba punktu salīdzinājums

Projektētais motors un izgatavotais motors tiek salīdzināti nominālajā darba punktā, lai noteiktu to savstarpējo atbilstību pie dažādiem parametriem.

4.1. tabulā apkopots salīdzinājums projektētā motora nominālajā darba punktā (1500 apgr./min) un pie nominālās izejas jaudas (180 kW). Redzams, ka projekta un prototipa efektivitāte ir ļoti līdzīga, savukārt jaudas koeficients ir zemāks, un tā rezultātā palielinās nepieciešamā statora strāva. Turklāt, lai sasniegtu tādu pašu barošanas sprieguma vērtību, prototipā ir mazāka magnetizācijas strāva  $i_d$ , tas nozīmē, ka mašīnas induktivitātes ir nedaudz atšķirīgas.

4.1. tabula

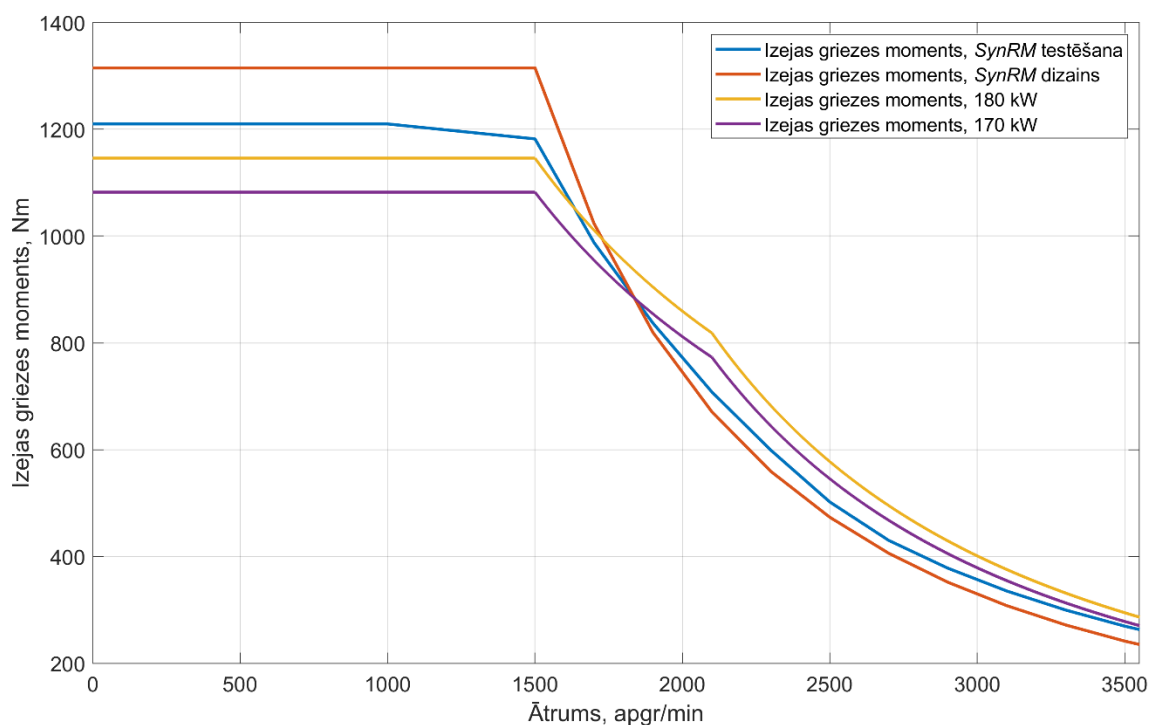
Projektētā un prototipa *SynRM* salīdzinājums nominālajā darba punktā

Parametrs	Mērvienība	Dizains	Prototips
Barošanas strāva	$I_1$ [A]	392,4	374,6
Barošanas spriegums	$U_1$ [A]	420	417,1
Jaudas koeficients	$\cos \varphi$	0,663	0,699
Barošanas jauda	$P_{ie}$ [W]	189200	189034
Mehāniskā jauda	$P_{iz}$ [W]	179144	179546
Rotora leņķiskais ātrums	$n$ [RPM]	1500	1498
Mehāniskais griezes moments	$M_{iz}$ [N · m]	1141	1144,8
Statora tinumu zudumi	$\Delta P_{el1}$ [W]	5637	4409
Zudumi tēraudā	$\Delta P_{mag}$ [W]	2873	2390
Mehāniskie zudumi	$\Delta P_{meh}$ [W]	544	810
Papildu slodzes zudumi	$\Delta P_{pap}$ [W]	1002	1890
Kopējie zudumi	$\Sigma \Delta P$ [W]	10056	9488
Efektivitāte	$\eta$ [%]	94,69	94,99
$d$ ass strāva	$i_d$ [A]	205,8	180,5
$q$ ass strāva	$i_q$ [A]	526	501

##### Vilces raksturlīkne

Izgatavotais *SynRM* tika testēts zem 1500 apgr./min ar nominālo un palielinātu griezes momentu, savukārt virs 1500 apgr./min tika testēts pie 420 V līdz maksimāli sasniedzamajam griezes momentam.

4.5. attēlā redzams grafiskais, 4.2. tabulā – skaitliskais projektēto, izgatavoto un standarta griezes momenta raksturlīkņu salīdzinājums.



4.5. att. *SynRM* testētā, projektētā un iestatītā griezes momenta raksturlīkņu salīdzinājums.

4.2. tabula

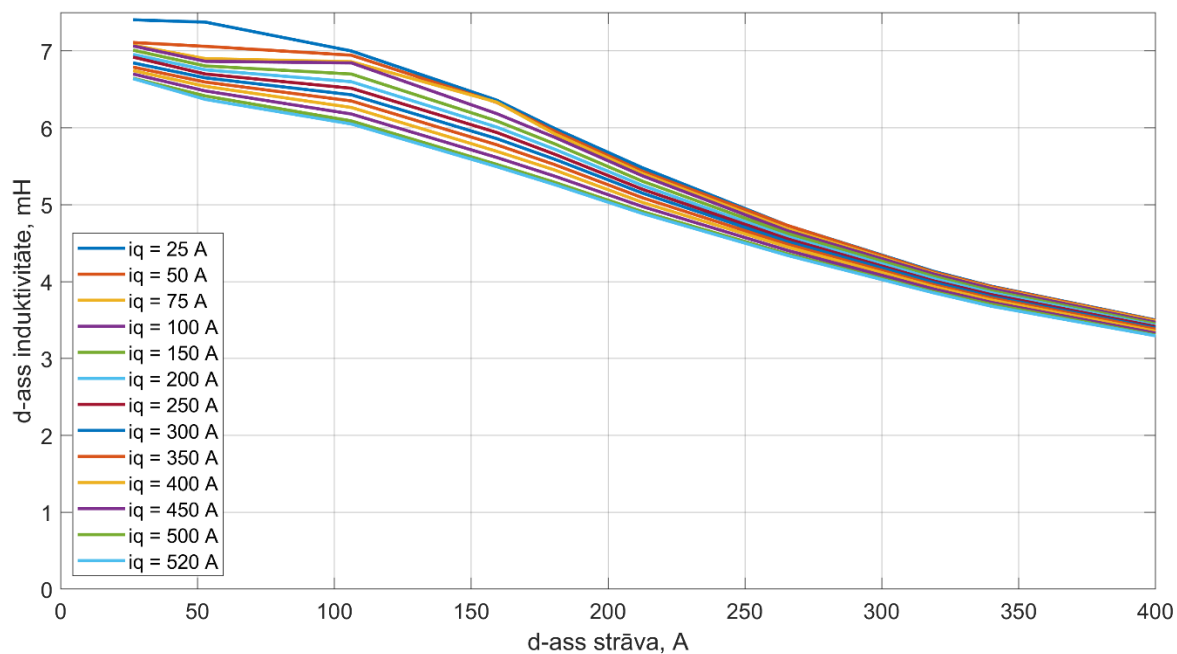
Trolejbusa veiktspējas salīdzinājums ar projektēto un izgatavoto *SynRM*

	Projektētais <i>SynRM</i>	Izgatavotais <i>SynRM</i>
Horizontāls ceļš		
Laiks līdz 45 km/h, s	17,36	17,32
$a_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	1,19	1,09
Atlikušais spēks pie 60 km/h	3,7 %	16,8 %
Maksimālais ātrums, km/h	60,7	63,1
12 ‰ slīpums		
Laiks līdz 45 km/h, s	21,98	21,37
$a_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	1,09	0,99
Atlikušais spēks pie 54 km/h	–	6,0 %
Maksimālais ātrums, km/h	52,9	54,8

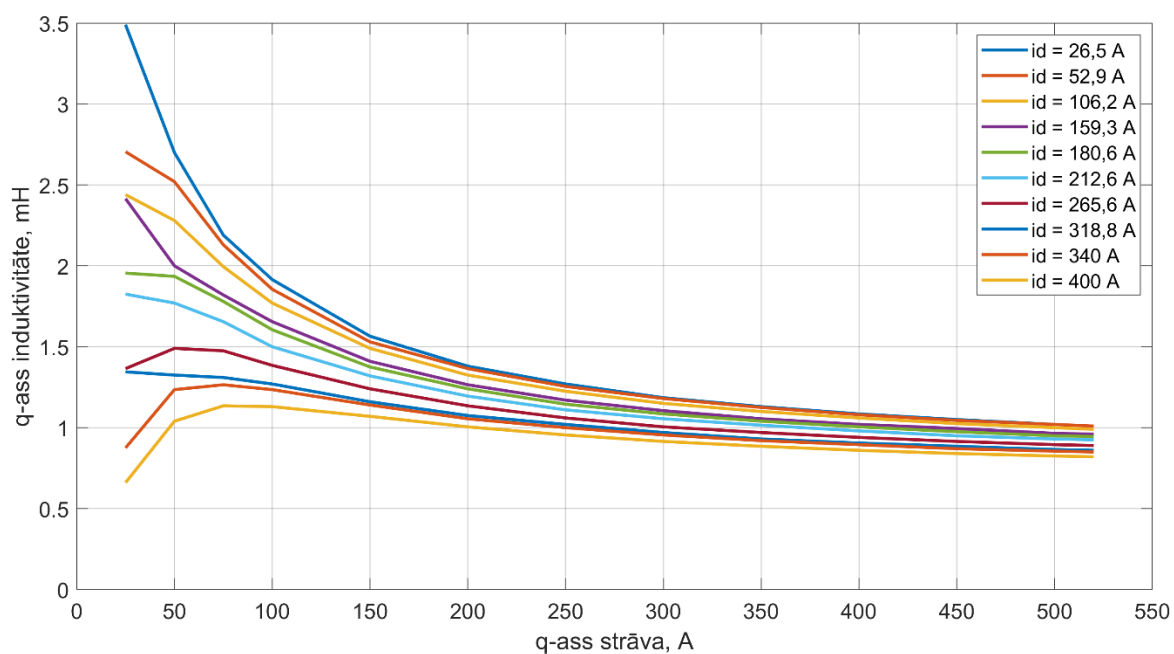
### 4.3. D un q ass induktivitātes

Svarīgākās vērtības *SynRM* vadībai un modelēšanai ir d un q ass induktivitātes (attiecīgi –  $L_d$  un  $L_q$ ) un to noteikšanas metodes. Daudziem matemātiskajiem modeļiem pietiek ar

informāciju par parametriem nominālajā punktā, taču vilces piedziņā ir svarīgi zināt to vērtības visos vilces iekšējās raksturlīknes punktos, kā arī iekšējo griezes momenta robežu pie noteikta sprieguma.



4.6. att.  $L_d$  atkarības no  $i_d$  strāvas raksturlīknes.



4.7. att.  $L_q$  atkarības no  $i_q$  strāvas raksturlīknes.

Ekspimentāli tiek atrastas  $L_d$  un  $L_q$  vērtības un to atkarība no strāvas komponentēm  $i_d$  un  $i_q$ .  $L_d$  un  $L_q$  atkarības redzamas 4.6. un 4.7. attēlā.



## 5. *SynRM* vilces piedziņas vadības sistēmas darbības pārbaude

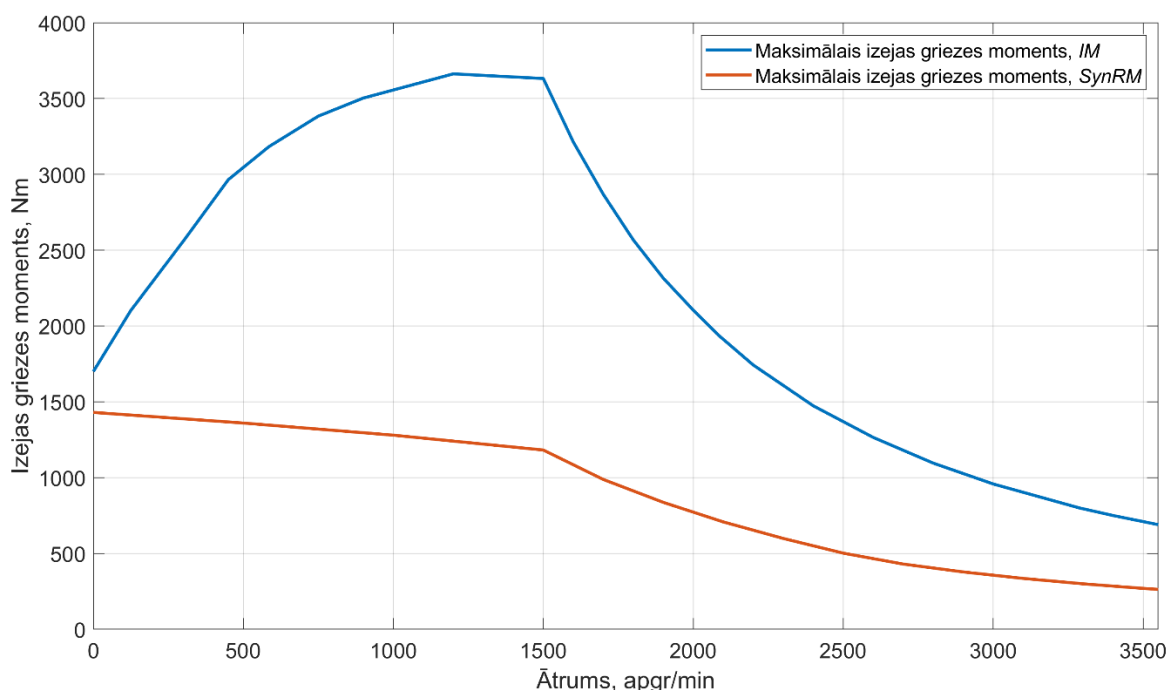
Vadības sistēmas darbības pārbaude ļauj izdarīt secinājumus par izstrādāto produktu un sniedz informāciju turpmākajiem uzlabojumiem. Verifikācija tiek veikta, veicot laboratorijas stenda testēšanu dažādos stacionāros un pārejas režīmos. Modeļa testēšana ļauj prognozēt vadības sistēmas darbību reālā transportlīdzeklī robežgadījumos, lai nodrošinātu stabilu darbību. *SynRM* vilces piedziņas veiktspēja ir salīdzināta arī ar klasisko *IM* vilces piedziņu.

### 5.1. *SynRM* un *IM* veiktspējas izpēte vilces sistēmā

#### 5.1.1. Maksimālā griezes momenta iespēju salīdzinājums

Maksimālā griezes momenta koeficients uzrāda elektromotora spēju nodrošināt nepieciešamo griezes momentu pie pazemināta barošanas sprieguma. Transportlīdzekļos, ko darbina līdzstrāvas vilces tīkls, šis rādītājs ir ļoti svarīgs, jo ekspluatācijas laikā tīkla spriegums var samazināties par 30 % no nominālā.

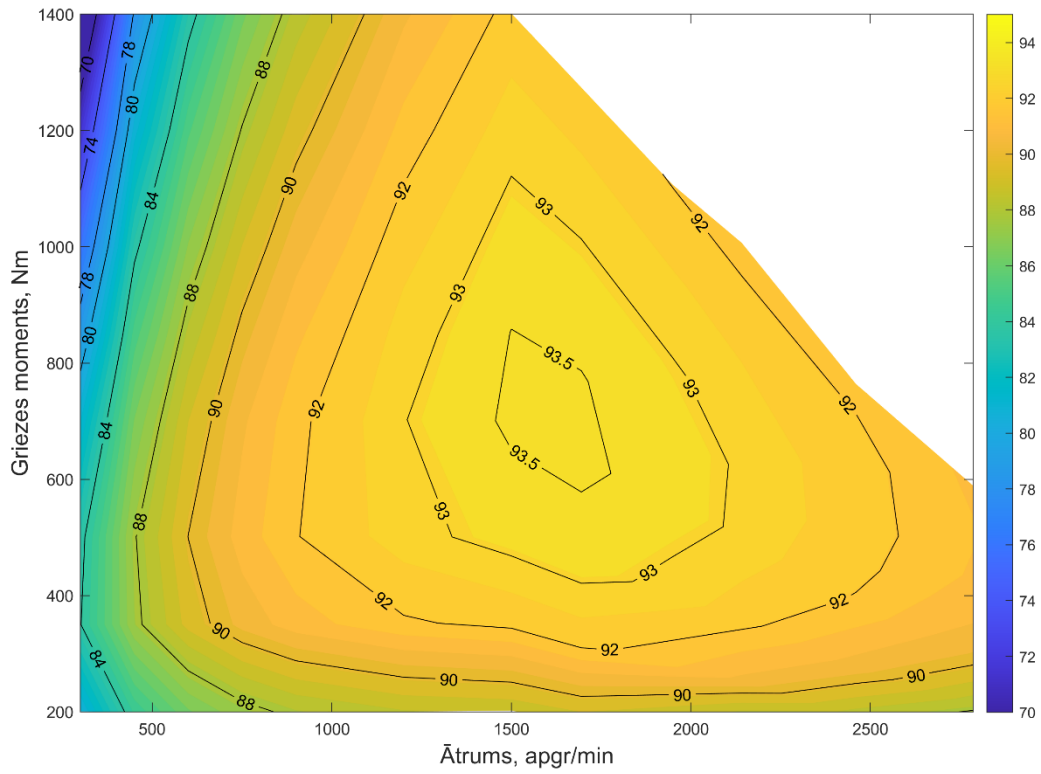
5.1. attēlā redzama trolejbusam izmantotā 180 kW asinhronā motora vilces raksturlīkne un *SynRM* vilces raksturlīkne. Attēlā var redzēt, ka *IM* maksimālais griezes moments ir ievērojami lielāks nekā *SynRM* maksimālais griezes moments. Turklāt asinhronais motors var nodrošināt vajadzīgo griezes momentu ar 50 % rezervi pie maksimāli nepieciešamā ātruma.



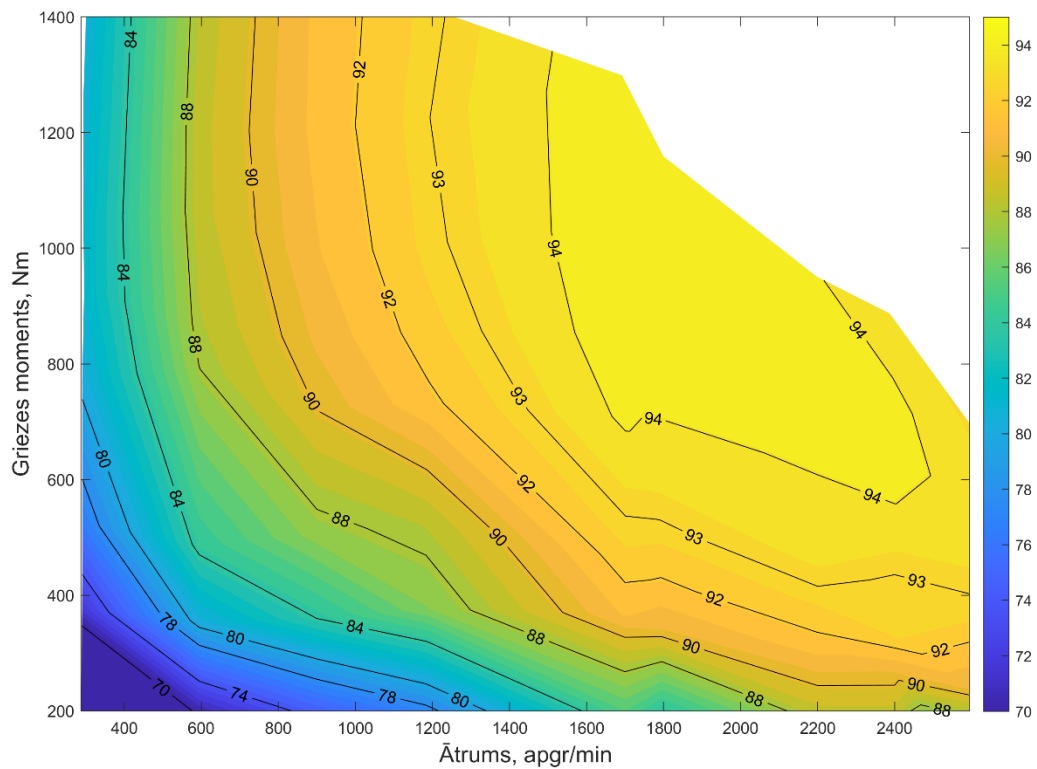
5.1. att. *SynRM* un *IM* maksimālo izejas griezes momentu raksturlīknes.

### 5.1.2. Efektivitātes rādītāju salīdzinājums

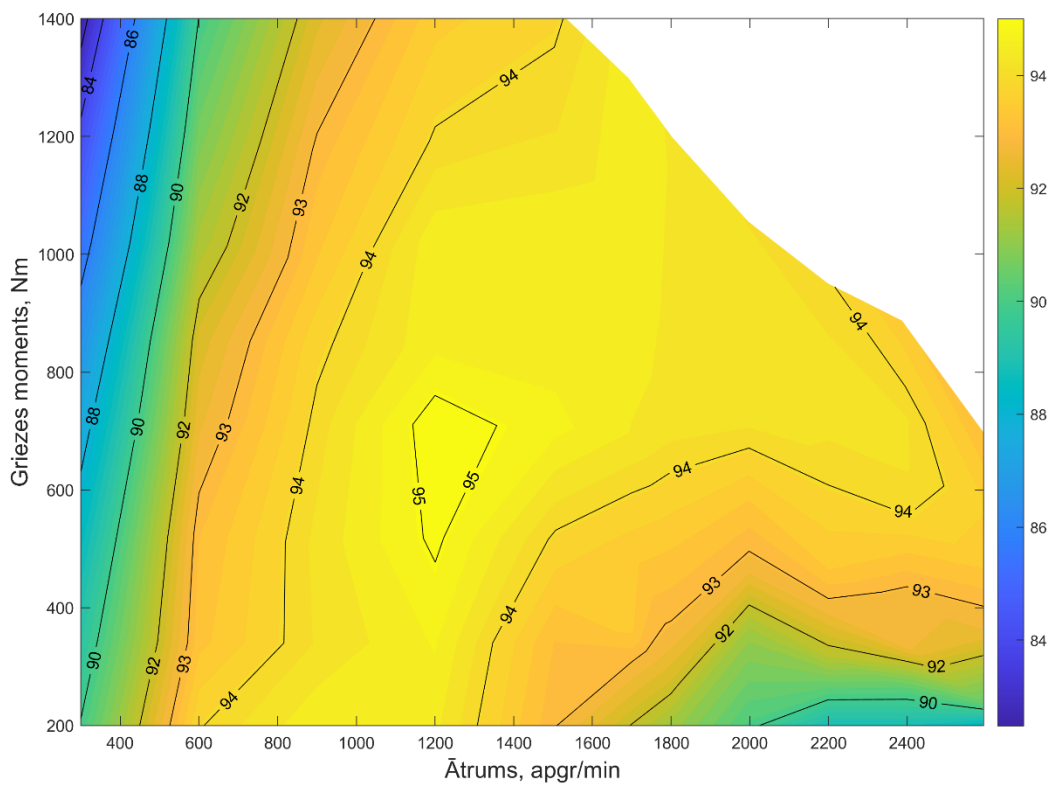
Vilces lietojumiem ir ērti izmantot efektivitātes karti, jo motors darbojas dažādos režīmos. Pilns procesa apraksts publicēts *RTUCON 2021* konferencē [34].



5.2. att. *IM* efektivitātes karte ar  $i_d = const.$



5.3. att. *SynRM* efektivitātes karte ar  $i_d = const$ .



5.4. att. *SynRM* efektivitātes karte ar *MTPA* vadību.

*IM* un *SynRM* efektivitātes karšu sākotnējais salīdzinājums ir veikts, izmantojot identiskās vadības metodes, t. i., ar nemainīgu  $d$  ass strāvu. Rezultāti redzami 5.2. un 5.3 attēlā.

Motora raksturlīknes tika pierakstītas gan zem nominālā punkta, gan virs tā (lauka vājināšanas apgabalā).

Savukārt 5.4. attēlā redzama *SynRM* efektivitātes karte ar *MTPA* vadību. *MTPA* metode tiek izmantota līdz 520 V robežai, kas ir mašīnas nominālais spriegums. Kad nominālais spriegums tiek sasniegts, turpmāka *MTPA* vadība nav iespējama, tāpēc vadība tiek pārslēgta uz  $i_d = const$  metodi.

Var redzēt, ka visos ekspluatācijas punktos, kur ir iespējams izmantot *MTPA*, mašīnas efektivitāte ir ievērojami uzlabojusies. Turklāt *SynRM* efektivitātes karte ar *MTPA* vadības metodi ir daudz lēzenāka, kur minimālā vērtība ir 82,48 % pie 300 apgr./min un 1400 N·m, maksimālā vērtība ir 95,21 %. Pie  $i_d = konst$  vadības *SynRM* efektivitātes kartes minimālā vērtība samazinās līdz 60 % pie 300 apgr./min un 200 N·m, maksimālā līdz 94,71 %. Salīdzinājumam *IM* pie  $i_d = konst$  vadības efektivitātes kartes minimālā vērtība ir 66,53 % pie 300 apgr./min un 1400 N·m, maksimālā – 93,61 %.

### 5.1.3. *IM* un *SynRM* zudumu sadalījums

Sīkāka informācija rūpīgai motoru analīzei tiek iegūta, izmantojot zudumu sadalījumu ar katru no vadības stratēģijām. Kopsavilkuma rezultāti apkopoti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Motora zudumu sadalījums stabilā stāvoklī nominālajā punktā

Parametrs	Mērvienība	<i>IM</i>	<i>SynRM</i> <i>CDAC</i>	<i>SynRM</i> <i>MTPA</i>
Statora strāva	V	529	522	481,2
Statora strāva	A	229,4	370,5	350,6
Jaudas koeficients		0,905	0,575	0,664
Ieejas jauda	W	197276	193657	191451
Rotācijas ātrums	Apgr./min	1500	1500	1500
Izejas jauda	W	180000	180000	180000
Izejas griezes moments	N·m	1145,9	1145,9	1145,9
Statora Cu zudumi	W	4688	6176	5501
Rotora Cu zudumi	W	4055	–	–
Zudumi tēraudā	W	5760	4863	3354
Papildu zudumi (1 % no ieejas jaudas)	W	1973	1937	1915
Mehāniskie zudumi	W	800	681	681
Kopējie zudumi	W	17276	13657	11451
Efektivitāte	%	91,24	92,95	94,02

#### 5.1.4. Jaudas koeficienta salīdzinājums

Arī jaudas koeficienta vērtības ir iegūtas visā ātruma diapazonā. *IM* jaudas koeficients  $\cos \varphi = 0,67 - 0,7$ , *SynRM*  $\cos \varphi = 0,85 - 0,9$ . Šīs atšķirības pamatā ir mašīnas fizikālās īpašības, un jau projektēšanas posmā, pamatojoties uz teorētiskiem aprēķiniem, tika paredzēts zemāks jaudas koeficients.

#### 5.1.5. Salīdzinājuma kopsavilkums

Pēdējā laikā ir veikti vairāki pētījumi, kuros salīdzinātas *SynRM* un *IM* īpašības [35], [36], [37]. Tomēr minētajos pētījumos tika izmantoti vispārēji rūpnieciski elektromotori, un vilces spēju jautājums netika analizēts. Šajā pētījumā pārbaudīti visi parametri, kas nepieciešami vilces iekārtām.

Pēc laboratorijas pārbaudēm un salīdzinošās analīzes var secināt, ka izstrādātā un izgatavotā sinhronā reluktances motora galvenā priekšrocība, salīdzinot ar asinhrono motoru, ir efektivitāte. Izstrādātā motora lietderības koeficients ir augsts, un tā raksturlīkne ir daudz lēzenāka ne tikai nominālajā punktā un tā tuvumā, bet arī citos darbības režīmos.

No otras puses, vēlme palielināt efektivitāti negatīvi ietekmēja *SynRM* griezes momenta rezervi. Lai nodrošinātu nepieciešamo griezes momentu, bija nepieciešams paaugstināt magnētisko indukciju tēraudā attiecībā pret indukciju *IM*, kas ir galvenais griezes momenta veidošanās veids *SynRM*. Rezultātā *SynRM* nodrošināja nepieciešamo griezes momentu līdz nominālajam ātrumam, bet nespēja izpildīt papildu prasības elektromotoru vilces lietojumam. Nepietiekama griezes momenta rezerve pasliktina transportlīdzekļa dinamiskās īpašības ekspluatācijas laikā un atstāj ļoti mazu atlikušo griezes momentu pie maksimālā ātruma.

Vēl viens *SynRM* trūkums ir zems jaudas koeficients. Jaudas koeficients neietekmē motora veiktspēju vai efektivitāti, taču prasa lielāku strāvu statora tinumos. Tā rezultātā palielinās zudumi frekvenču pārveidotājā, kā arī palielinās prasības attiecībā uz maksimālo strāvas lielumu elektropiedziņas sistēmā. Šis trūkums var nebūt tik būtisks, ja pārējam elektropiedziņas aprīkojumam ir augsta efektivitāte.

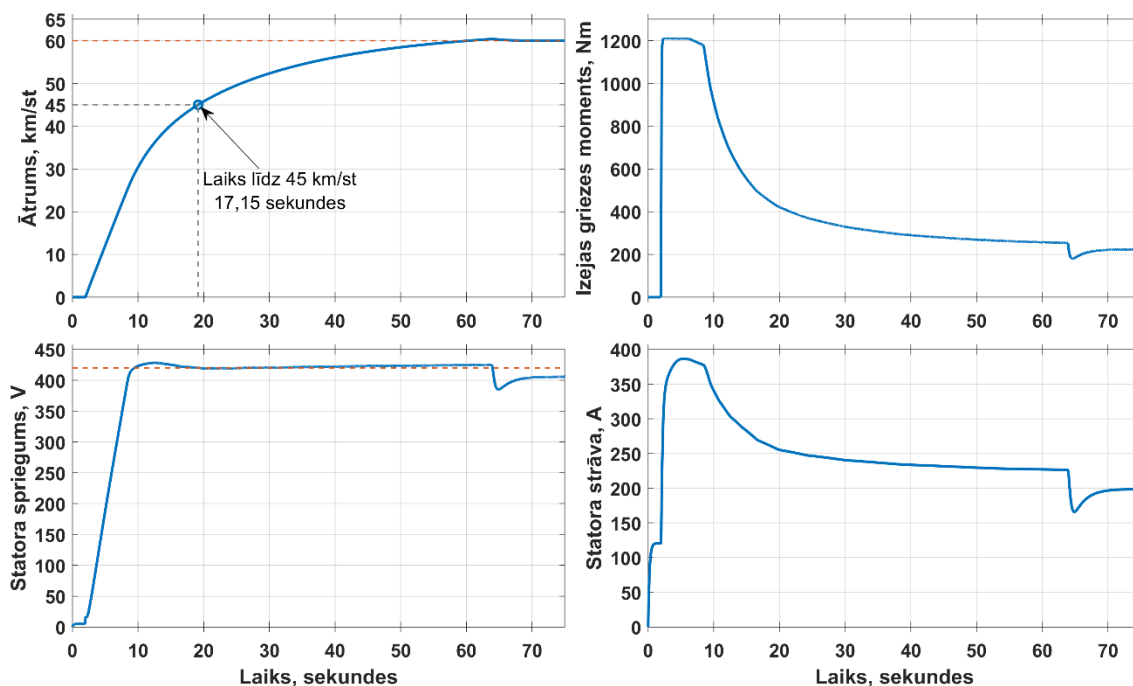
## 5.2. *SynRM* vilces piedziņas *Simulink* modeļa pārbaude

*Simulink* modeļa darbības pārbaudei tika veikti vairāki testi. Trolejbusa veiktspēja tika novērtēta, pamatojoties uz dinamikas prasībām.

### 5.2.1. Paātrinājums līdz maksimālajam ātrumam

Lai pārbaudītu spēju noturēt maksimālās vilces raksturlīknes vērtības un to, vai pilnībā noslogots trolejbuss var sasniegt dinamiskās prasības, veikts paātrinājuma tests līdz maksimālajam ātrumam. Iestatītā ātruma vērtība – 60 km/h. 5.5. attēlā redzamas izejas

raksturlīknes testa laikā. Redzams, ka paātrinājums līdz 45 km/h aizņem 17,15 sekundes, kas ir maksimāli pieļaujamā laika robežās (1.1. nodaļa). Turklāt maksimālais ātrums 60 km/h tiek veiksmīgi sasniegts ar 12,2 % atlikušo spēku ( $M_{iz.maks.}$  pie 60 km/h ir 254 N·m,  $M_{iz.}$  Pie 60 km/h ir 223 N·m).



5.5. att. *SynRM* vilces piedziņas palaišanas procesa raksturlīknes.

### 5.2.2. Modeļa veiktspējas pārbaude trolejbusa piedziņā

*Simulink* vilces piedziņas modeļa veiktspēja pārbaudīta ar standartizētu brīvi pieejamu ceļa profilu. Modeļu testēšanai tika izvēlēta Apvienoto Nāciju Organizācijas Eiropas Ekonomikas komisijas *WLTP* testa procedūra [38].

Šis cikls atspoguļo jauktu kustību pilsētvidē. Turklāt šī testa procedūra tika izvēlēta tāpēc, ka tā ir piemērota pilsētas transportam un trolejbusa jaudas un masas attiecība ir atbilst *WLTP* cikla pirmās klases ceļa profila prasībām [38].

#### Enerģijas patēriņš

5.2. tabulā apkopota kopējā braukšanas cikla laikā patērētā enerģija kWh. Rekuperācija netiek ņemta vērā, un tiek pieņemts, ka visa bremzēšanas enerģija vienkārši tiek pārvērsta siltumā. Iestatītā pārveidotāja efektivitāte –  $\eta_{conv} = 97,5 \%$ .

No kopējiem patērētās enerģijas rezultātiem var redzēt, ka enerģijas zudumi motorā ar pārveidotāju ir 0,65 kWh *SynRM CDAC*, *SynRM MTPA* – 0,45 kWh, kas nozīmē, ka 30,7 %

motora zudumu samazinājumu var panākt tikai ar izstrādāto vadības metodi, saglabājot dinamisko veiktspējas līmeni.

5.2. tabula

Enerģija *WLTP* ciklā dažādām piedziņām

	Vērtība [kWh]
Enerģija uz riteņa	4,04
Ieejas enerģija ( <i>SynRM CDAC</i> )	4,69
Ieejas enerģija ( <i>SynRM MTPA</i> )	4,49
Ieejas enerģija ( <i>IM CDAC</i> )	4,67

Savukārt vilces piedziņa ar asinhrono motoru uzrāda gandrīz tādu pašu enerģijas patēriņu kā *SynRM* ar *CDAC* vadību (3,2 % vairāk nekā ar *SynRM*), un par 40 % lielāku enerģijas zudumu starpību, salīdzinot ar *MTPA* vadību.

## Secinājumi

Promocijas darba rezultātā izstrādāts eksperimentāls vilces sistēmas *SynRM* prototips, kas atbilst esošā *IM* izmēriem. Tika izstrādāta programmaparatūra, lai vadītu piedziņu. Vadības sistēmas darbība pārbaudīta ar *Matlab Simulink* matemātisko modeli. Lai apstiprinātu aprēķinu un simulāciju rezultātus, veikti eksperimentālie laboratorijas testi.

*SynRM* piedziņās laboratorijas testi parādīja augstu rezultātu konvergenci ar aprēķinātajām vērtībām pie nominālā ātruma. Lielākā atšķirība bija statora strāvā, kas liecina par neatbilstību starp vērtībām  $L_d$  un  $L_q$  pie nominālā ātruma. Induktivitātes vērtību noteikšana ir vissarežģītākais izstrādes uzdevums, jo tas var būt ļoti atkarīgs no magnētiskās shēmas materiāla parametru viendabīguma un precizitātes, kā arī no motora izgatavošanas kvalitātes.

Arī testēšanas laikā iegūtās griezes momenta robežvērtības visā ātruma diapazonā atšķiras no prognozētajām, jo aprēķinātās induktivitātes līknes  $L_d(I_d)$  un  $L_q(I_q)$  atšķiras no izmērītajām. Testos ir konstatētas zemākas maksimālā griezes momenta vērtības pie nominālā sprieguma, augstākas – lauka vājināšanas režīmā. Laboratorijas testu laikā izmantotas izmērītās  $L_d(I_d, I_q)$  un  $L_q(I_d, I_q)$  līknes, lai koriģētu aprēķinātos koeficientus. Veiktas vairākas dizaina iterācijas, ņemot vērā materiālu specifiku un ražošanas novirzes.

*SynRM* vadības sistēma izstrādāta *Matlab Simulink* vidē un pārbaudīta reālā laboratorijas invertorā. Par pamatu tika izmantots uz lauku orientētas vadības (*FOC*) algoritms. Vadības sistēma izmanto statora strāvu momentānās vērtības un rotora stāvokļa leņķi, lai aprēķinātu vajadzīga sprieguma atskaites vērtību. Lai precīzi noteiktu griezes momentu, vadības sistēmā tika ievadītas  $L_d(I_d)$  un  $L_q(I_q)$  raksturlīkņu vērtības, izmantojot pārlūktabulas. Strāvas, griezes momenta un ātruma regulēšana tika veikta, izmantojot *PI* kontrolierus. Simulācijas laikā un laboratorijas apstākļos vadības sistēma droši un stabili izpildīja komandas griezes momenta vadības un ātruma regulēšanas režīmos. Izstrādātā vadības sistēma ļauj veikt visus plānotos testus, kas bija nepieciešami, lai apstiprinātu piedziņas darbību un stabilitāti.

Trolejbusa kustības dinamikas simulācija ar izstrādāto *SynRM* vilces piedziņu parādīja, ka piedziņa atbilst paātrinājuma prasībām, braucot pa nogāzi pie nominālā sprieguma. Piedziņa veic visus *WLTP* ciklā noteiktos paātrinājumus un palēninājumus. Izgatavotās *SynRM* piedziņas trūkums ir nelielā maksimālā griezes momenta rezerve, kas īpaši ietekmē piedziņas veiktspēju, kad barošanas spriegums samazinās zem nominālās vērtības. Lai arī saskaņā ar *WLTP* testa cikla prasībām maksimālais griezes moments nekad netiek sasniegts, tomēr reālais ekspluatācijas kustības režīms var būt intensīvāks un tāpēc var pieprasīt lielākus griezes momentus.



Salīdzinot *SynRM* vilces piedziņu un klasisko *IM* vilces piedziņu, testos apstiprinājās pētījumu laikā deklarētais efektivitātes pieaugums. Pie nominālā ātruma efektivitāte palielinājās par 2 %. Reģionā zem nominālā ātruma *SynRM* vilces piedziņas efektivitāte pasliktinās daudz lēnāk nekā *IM* piedziņas efektivitāte. Savukārt *SynRM* piedziņas jaudas koeficients, salīdzinot ar *IM* piedziņu, samazinās par 0,2, kas palielina statora un invertora strāvu. Ja invertora efektivitāte ir augsta, jaudas koeficienta starpība būtiski neietekmē piedziņas kopējo efektivitāti.

Pētījumu rezultātā var secināt, ka *SynRM* vilces piedziņa var būt alternatīva *IM* vilces piedziņai. Tomēr sākotnējā piedziņas izstrādē ir svarīgi ņemt vērā zemu kritiskā griezes momenta rezervi un zemu jaudas koeficientu.

## Izmantotās literatūras un avotu saraksts

- [1] *WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:EN:PDF.>, 2011.
- [2] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, 2nd Edition, Wiley, 2012.
- [3] "Possibilities of energy demand reduction in trolleybus transportation," CIVITAS, Brno, 2014.
- [4] W. Backhaus, A. Bätzner, J. Kohout, E. Lenz, R. Kayser and D. S. Röhlig, "Knowledge Brief, Infrastructure for In Motion Charging Trolleybus System," Knowledge Brief of UITP, the International Association of Public Transport, Brussels, July, 2021.
- [5] R. R. Moghaddam, S. Nategh, J. Islam and A. Boglietti, "Different Traction Motor Topologies Used in E-Mobility : Part II: Magnet-based Solutions," in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2020.
- [6] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour and B. Fahimi, "Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 58-75, March 2017.
- [7] Heidari, H.; Rassölkin, A.; Kallaste, A.; Vaimann, T.; Andriushchenko, E.; Belahcen, A.; Lukichev, D.V., "A Review of Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements," *Sustainability*, 2021.
- [8] J. K. Kostko, "Polyphase reaction synchronous motors," *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 42, no. 11, pp. 1162-1168, 1923.
- [9] G. Abad, *Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications*, Chichester: Wiley, 2017, p. 630.
- [10] K. Gulbis, U. Brakanskis, E. Kamolins, M. Gorobecs, A. Potapovs, K. Sejejs, J. Zarembo and V. Burenin, "Analysis of Test Results of Developed Synchronous Reluctance Motor for Public Transport Application," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2021.

- [11] A. Potapovs, U. Brakanskis, M. Gorobecs, K. Gulbis, E. Kamoliņš, K. Sejejs, V. Burenin, J. Zarembo, "180 kW Synchronous Reluctance Motor for Mass Transit Electrical Traction Application," in *23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, Brussels, Belgium, 2021.
- [12] R.-R. Moghaddam, *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications*, Stockholm: The Royal Institute of Technology, 2011, p. 260.
- [13] J. Pyrhonen, T. Jokinen and V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, Chichester: Wiley, 2014, p. 584.
- [14] J. Pyrhonen, V. Hrabovcova and R. S. Semken, *Electrical Machine Drives Control*, Chichester: Wiley, 2016, p. 504.
- [15] I. Boldea, *Reluctance Synchronous Machines and Drives*, Oxford: Clarendon Press, 1996.
- [16] I. Boldea and S. A. Nasar, *The Induction Machines Design Handbook*, CRC Press, 2009.
- [17] И. П. Копылов, *Электрические Машины: Учебник для вузов*, Москва: Энергоатомиздат, 1986.
- [18] A. Vagati, M. Pastorelli, G. Franceschini and S. C. Petrache, "Design of Low-Torque-Ripple Synchronous Reluctance Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 4, 1998.
- [19] A. Vagati, "Synchronous Reluctance Electrical Motor Having A Low Torque-Ripple Design". Patent 5818140A, 6 October 1998.
- [20] T. A. Lipo and T. Matsuo, "Rotor design optimization of synchronous Reluctance machine," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 9, no. 2, 1994.
- [21] M. Kamper, A. F. Volsdhenk, "Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on  $L_d$  and  $L_q$  inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor," in *IEEE Proceedings - Electric Power Applications, Volume 141, Issue 4*, July 1994.
- [22] A. Podgornovs and R. Geidarovs, "Induction machine mode determination using vectograms and magnetic field calculation results," in *2017 IEEE 58th*

*International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, 2017.

- [23] K. Gulbis, U. Brakanskis, E. Kamoliņš and J. Zarembo, "Parameter Calculation Method of Synchronous Reluctance Motor Including Cross Magnetic Saturation," in *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2020.
- [24] K. Yahia, D. Matos, J. O. Estima and A. J. M. Card, "Modeling synchronous reluctance motors including saturation, iron losses and mechanical losses," in *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, 2014.
- [25] "Digital Motor Control. Software Library: Target Independent Math Blocks," Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications, 2013.
- [26] A. J. P. Ortega, Design and Comparison of Induction Motor and Synchronous Reluctance Motor for Variable Speed Applications: Design Aided by Differential Evolution and Finite Element Analysis, The Ohio State University, 2013.
- [27] V. Burenin, J. Zarembo, A. Žiravecka and L. Ribickis, "Model of Laboratory Test Bench Setup for Testing Electrical Machines," in *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2020.
- [28] A. Sciarretta and A. Vahidi, Energy-Efficient Driving of Road Vehicles, Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 294.
- [29] Л. Байрыева и В. Шевченко, Электрическая тяга. Городской наземный, Москва: Транспорт, 1986, p. 206.
- [30] В. Розенфельд и И. Исаев, Теория Электрической Тяги, Москва: Транспорт, 1995, p. 294.
- [31] I. Dvornikovs, M. Marinbahs, J. Zarembo, E. Groza and K. Ketners, "Investigation of traction motor dynamic using computer simulation and method of mutual loading of two pair motors," in *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Varna, Bulgaria, 2019.
- [32] G. Kobenkins, M. Marinbahs O. Sliskis, V. Burenin, J. Zarembo, "Carry Out of Strength Tests of Geared Motor Box as Part of a Frequency-Controlled Traction

- Electric Drive," in *17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA 2021)*, Sofia, Bulgaria, 2021.
- [33] G. Kobenkins, M. Marinbahs, V. Burenin, J. Zarembo, A. Bizans, O. Sliskis, "Determination of the Level of Own Vibration of Geared Motor Boxes in Industrial Conditions," in *2021 IEEE 62st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Riga, 2021.
- [34] V. Burenin, J. Zarembo, O. Krievs and L. Ribickis, "Comparison of Synchronous Reluctance Motor and Induction Motor Efficiency Maps for Traction Application," in *RTUCON 2021*, Riga, Latvia, 2021.
- [35] H. Kärkkäinen, L. Aarniovuori, M. Niemelä, J. Pyrhönen and J. Kolehmainen, "Technology comparison of induction motor and synchronous reluctance motor," in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017.
- [36] A. V. Zakharov, S. I. Malafeev and A. L. Dudulin, "Synchronous reluctance motor: Design and experimental research," in *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, 2018.
- [37] A. Rassolkin, H. Heidari, A. Kallaste, T. Vaimann, J. P. Acedo and E. Romero-Cadaval, "Efficiency Map Comparison of Induction and Synchronous Reluctance Motors," in *2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*, 2019.
- [38] United Nations, "Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, Addendum 15," United Nations, 2019.



**Jaroslavs Zarembo** dzimis 1990. gadā Liepājā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura grādu elektrozinātnē (2012) un maģistra grādu enerģētikā un elektrotehnikā (2014). Kopš 2013. gada strādā AS "Rīgas elektromašīnbūves rūpnīca", kur patlaban ieņem galvenā konstruktora vietnieka amatu. Zinātniskās intereses saistītas ar elektriskās piedziņas vadību, invertoru un vilces elektrodzinēju projektēšanu.