

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Ilja Dvornikovs

Doktora studiju programmas “Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

TRANSPORTLĪDZEKĻU AR KOMBINĒTU VILCES ELEKTROPIEDZINU VIRTUĀLI FIZIKĀLIE IZMĒĢINĀJUMI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
KĀRLIS KETNERS

Zinātniskais konsultants
pētnieks *Dr. sc. ing.*
OĻEGS SĻISKIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Dvorņikovs, I. Transportlīdzekļu ar kombinētu vilces elektropiedziņu virtuāli fizikālie izmēģinājumi. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021, 44 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-14" 2020. gada 8. oktobra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.1/2.

<https://doi.org/10.7250/9789934226212>

ISBN 978-9934-22-621-2 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 18. jūnijā plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Mesnajevs,
Western Norway University of Applied Sciences, Norvēģija

Profesors *Ph. D. Anton Rassõlkin*,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

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.

Ilja Dvorņikovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 50 attēlu, sešas tabulas, kopā 111 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 97 nosaukumu.

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	5
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	6
Darba aktualitāte.....	6
Darba hipotēze, mērķis un uzdevumi	6
Promocijas darba zinātniskā novitāte	7
Izmantotās metodes un rīki.....	7
Promocijas darba praktiskā nozīme.....	7
Pētījumu rezultātu aprobācija	8
1. KOMBINĒTĀS ENERGOIEKĀRTAS FUNKCIONALITĀTES ANALĪZE.....	10
1.1. Pētniecības un izmēģinājumu instrumentu izstrāde	10
1.2. Izmēģinājumu līdzekļi	11
1.3. Spēka iekārtas un spēka pārvada matemātiskais modelis.....	11
1.4. AD vektoru vadības princips	12
1.5. Novērotāja modelēšana uz adaptīva modeļa pamata (MRAS algoritmi)	14
Pirmās nodaļas nobeigums	16
2. VIRTUĀLI FIZISKO IZMĒĢINĀJUMU SISTĒMAS.....	17
2.1. Kombinētās sistēmas	17
2.2. Pilnībā virtuālas sistēmas	19
2.3. Virtuāli fizisko izmēģinājumu sistēmu izveidošanas metodika TL ar KEI izpētei un izstrādei.....	20
2.3.1. Laboratorijas izmēģinājumu sistēmas, kas savieno virtuālo un fizisko objektu (kombinētās sistēmas).....	20
2.3.2. Laboratorijas izmēģinājumu sistēmas, kas dublē fiziskos objektus (pilnībā virtuālas sistēmas)	23
Otrās nodaļas nobeigums.....	28
3. KEI KOMPONENŠU IZPĒTE UN DARBA ALGORITMI.....	29
3.1. TL izmēģinājumu algoritmu sistēma.....	29
3.2. KEI virtuāli fizikālās testēšanas laboratorijas sistēmas izstrāde	32
3.4. Eksperimenti laboratorijā	32
3.5. Vektoru vadības izpēte programmā <i>Simulink</i>	34
3.6. Rezultātu salīdzinājums	39
NOBEIGUMS UN REZULTĀTI	40
LITERATŪRAS SARAKSTS	43

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

KEI – kombinētās energoiekārtas

TL – transportlīdzeklis

AD – asinhronais dzinējs

IIP – impulsu ilguma pārveidošana

IIM – impulsu ilguma modulācija

IDD – iekšdedzes dzinējs

SVĢ – sinhronais vilces ģenerators

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor (izolēta aizvara bipolārais tranzistors)

MRAS – Model Reference Adaptive System (modelēšana uz adaptīvas sistēmas)

FOC – Field-Oriented Control (dzinēja vektoru vadības princips)

KF – Kalmana filtrs

PID – proporcionāli integrāli diferenciālais regulators

IPM – impulsu platuma modulācija

FP – frekvences pārveidotājs

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Kombinētās energoiekārtas (KEI) ir viena no transportlīdzekļa (TL) vadības efektivitātes paaugstināšanas tehnoloģijām, kas intensīvi attīstās. Tās ir sistēmas, kas kombinē iekšdedzes dzinēju (IDD) ar elektriskās piedziņas komponentēm un mehāniskās transmisijas agregātiem.

KEI potenciāla realizācija ir savdabīgs uzdevums ar vairākiem aspektiem, no kuriem katrs nosaka transportlīdzekļa īpašības:

- KEI optimālās struktūras un shēmas un tās komponentu parametru izvēle;
- jaudas vadība KEI;
- asinhronā dzinēja (AD) parametru identifikācija.

Šāda uzdevuma risināšanai un komponentu izvēlei ir nepieciešama izpratne par KEI tehnoloģijām, kas iespējama tikai tad, ja ir pieejams izpētes un izstrādes teorētiskais un eksperimentālais instrumentārijs. Esošo instrumentu attīstība un jaunu radīšana ir aktuāli virzieni, kuros strādā zinātniskās, inženieru un ražošanas organizācijas, kuru darbība ir saistīta ar KEI. Šo darbu ir motivējusi jautājuma nozīmīguma izpratne un autora veikto pētījumu rezultātu kombinācija, kas ļauj piedāvāt zinātniski pamatotus pilnveidojumus un jaunus instrumentus, kas ir praktiski noderīgi aprēķiniem piedziņu ar kombinētajām elektroiekārtām izstrādes un attīstības stadijā.

Darba hipotēze, mērķis un uzdevumi

Darba hipotēze

Izstrādātās KEI parametru verifikācijas metodes izmantošana saīsina izstrādes un laboratorijas izmēģinājumu laiku un nodrošina jaunas produkcijas industriālo pasūtījumu izpildīšanu īsos terminos.

Darba mērķis

Darba mērķis ir pilnveidota KEI izpētes instrumentārija izveidošana, pamatojoties uz virtuāli fizikālo izmēģinājumu tehnoloģijām. Lai to realizētu, ir nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

- izstrādāt virtuāli fizikālo sistēmu izveides metodiku, kas ļauj veikt energoiekārtas darba režīmu un komponentu parametru identifikāciju pēc eksperimentālajiem datiem un paplašina energoiekārtu izmēģinājumu funkcionālās iespējas laboratorijas apstākļos uz agregātu stendiem;
- izstrādāt KEI komponentu un transportlīdzekļa matemātiskos modeļus, kas ļauj analizēt enerģijas plūsmas KEI;
- izstrādāt un izmēģināt enerģijas plūsmas organizācijas un KEI energoefektivitātes izpētes metodi, izmantojot virtuāli fizikālo modelēšanas līdzekļus;

- izmēģināt un analizēt virtuāli fizikālo izmēģinājumu sistēmu, kas paplašina energoiekārtu izpētes funkcionālās iespējas uz agregātu stendiem.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

- Izstrādāta metodika un virtuāli fiziskās energoiekārtas ar noslēgtu automātiskās regulēšanas sistēmu izveidošanas starpniecību, kas sasaista un sinhronizē pētījuma objekta fizisko un virtuālo daļu.
- Metodikas ietvaros sniegts slodzes imitācijas veida zinātniskais pamatojums virtuāli fiziskajos izmēģinājumos, piedāvāta un praktiski realizēta pilnveidota virtuāli fizisko objektu izveides metode energoiekārtu izmēģinājumiem ar vairākiem spēka agregātiem.
- Izveidoti virtuālie transportlīdzekļu modeļi ar KEI, kas ietver ārējo faktoru ietekmi, kustības apstākļus un KEI enerģētiskos parametrus. Modeļi ietver KEI mehānisko un elektrisko īpašību matemātiskos procesus. Modeļu atbilstību apstiprina salīdzinājums ar eksperimentālajiem datiem.
- Izpētīta transportlīdzekļa dinamikas modeļa ietekme uz KEI darba režīmu (griezes momentu uz riteņiem). Noteikti visbūtiskākie parametri, kuru ievērošana nodrošina identifikācijas korektumu.

Izmantotās metodes un rīki

Darbā izmantotas šādas pētniecības metodes un līdzekļi:

- *MATLAB/Simulink 2017* interaktīvā vide: intensīvai skaitļošanai, datu analīzei un to vizuālai attēlošanai, diferencu vienādojumu atrisināšana;
- *Microsoft Excel 2017* programmnodrošinājums datu analīzei un diagrammu veidošanai;
- *Texas Instruments Code Composer Studio v6.2* – vadības ierīce uzraudzībai un kontrolei;
- *Texas Instruments Control SUITE v3.4.5* funkciju bibliotēka un apakšprogrammas;
- *Motor Solve AD* elektromagnētisko parametru noteikšanai;
- *app.diagrams.net v13.9.7* diagrammu un loģisko ķēžu zīmēšanas rīks.

Promocijas darba praktiskā nozīme

MATLAB/Simulink programmatūrā izstrādātos matemātiskos modeļus, kas realizē TL kustību spēka iekārtu, KEI un energoiekārtu komponentu darbību, var izmantot virtuālo izmēģinājumu veikšanai, kas ir daļa no TL ar KEI un to vadības sistēmu izstrādes un izpētes procesa. Šie modeļu rezultāti ir svarīgi, izvēloties KEI komponentus un izstrādājot tās vadības sistēmu. Darbā izstrādātie virtuāli fizikālo izmēģinājumu algoritmi aprobēti uz *BELAZ 75580* tipa pašizgāzēja autonomas vilces elektropiedziņas izmēģinājumu iekārtas.

Iegūtos rezultātus var izmantot transportlīdzekļu vadības sistēmu izstrādē, tie ļauj paaugstināt to funkcionēšanas efektivitāti, būtiski samazināt izstrādes izmaksas, saglabājot augstus precizitātes un kvalitatīvos raksturojumus. Izstrādātos izmēģinājumu algoritmus var izmantot, izstrādājot vadības sistēmas, kas ir adaptīvas ceļa profila īpašībām. Piedāvātajiem algoritmiem ir zemas prasības pret skaitļošanas resursiem, un tie ļauj samazināt TL vadības sistēmu aprēķina izstrādes izmaksas.

Pētījumu rezultātu aprobācija

1. Sļiskis O., **Dvornikovs I.**, Marinbahs, M., Mārks, J., Groza, E. Investigation of Electrical Bus Traction Motor Dynamic Using Methods of Physical and Computer Simulation. No: 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Bulgārija, Varna, 6.–8. jūnijs, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, 1.–4. lpp. ISBN 978-1-7281-1414-9. e-ISBN 978-1-7281-1413-2. Pieejams: doi:10.1109/ELMA.2019.8771668 **SCOPUS**.
2. **Dvornikovs I.**, Marinbahs, M., Zarembo, J., Groza, E., Ketners, K. Investigation of Traction Motor Dynamic Using Computer Simulation and Method of Mutual Loading of Two Pair Motors. No: 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA 2019), Bulgārija, Varna, 6.–8. jūnijs, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, 1.–4. lpp. ISBN 978-1-7281-1414-9. e-ISBN 978-1-7281-1413-2. Pieejams: doi:10.1109/ELMA.2019.8771668. **SCOPUS**.
3. **Dvornikovs I.**, Marinbahs, M., Sļiskis, O., Ketners, K. Investigation of Autonomous Traction Motor Dynamic Using Method of Mutual Loading and Computer Simulation. No: 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018): Conference Proceedings, Latvija, Rīga, 12.–14. novembris, 2018. Piscataway: IEEE, 2018, 1.–4. lpp. ISBN 978-1-5386-6904-4. e-ISBN 978-1-5386-6903-7. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON.2018.8659827. **SCOPUS**.
4. **Dvornikovs I.**, Sļiskis, O., Ketners, K. Computer Analysis of Lightning Surge Propagation on Overhead Transmission Line Towers. No: 54th International Scientific Conference of Riga Technical University: Digest Book and Electronic Proceedings, Latvija, Rīga, 14.–16. oktobris, 2013. Rīga: RTU, 2013, 19.1.–19.4. lpp. ISBN 9789934104701.
5. **Dvornikovs I.**, Sļiskis, O., Ketners, K. Computer Simulation of Lightning Surge Propagation on Power Transmission System Metal Constructions. No: CIGRE International Colloquium on Lightning and Power Systems, Francija, Lyon, 12.–14. maijs, 2014. Paris: 2014, 1.–7. lpp.
6. Sļiskis O., **Dvornikovs I.**, Ketners K., Sobolevskis D. Specification of Transmission Tower Structure for Following Surge Protection Simulation. No: 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2015), Čehija, Kouty nad Desnou, 20.–22. maijs, 2015. Piscataway: IEEE, 2015, 137.–

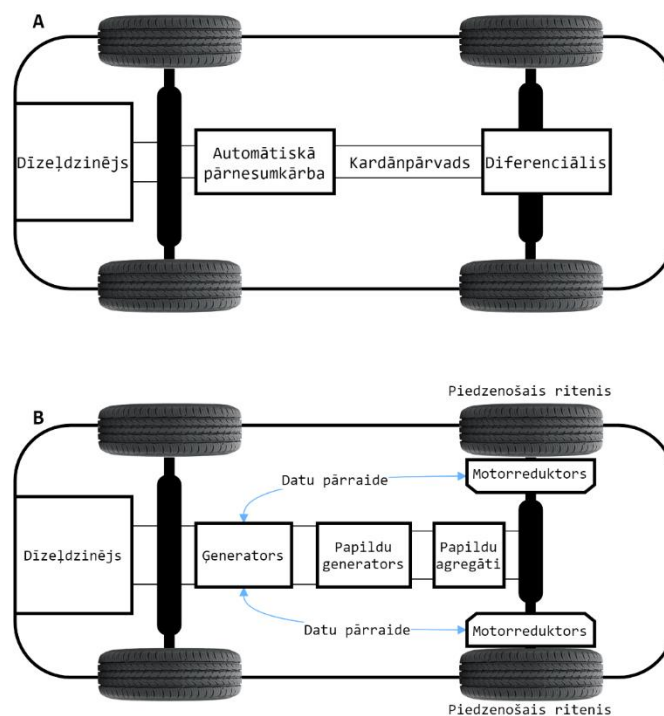
140. lpp. ISBN 978-1-4673-6789-9. e-ISBN 978-1-4673-6788-2. Pieejams: doi:10.1109/EPE.2015.7161151. **SCOPUS**.

7. Sļiskis, O., **Dvornikovs I.**, Ketners, K. Lightning Performance on Transmission Line Towers. No: 7th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT-2012): Proceedings, Lietuva, Kaunas, 3.–4. maijs, 2012. Kaunas: Technologija, 2012, 157.–160. lpp. ISSN 1822-5934. **SCOPUS**.

1. KOMBINĒTĀS ENERGOIEKĀRTAS FUNKCIONALITĀTES ANALĪZE

1.1. Pētniecības un izmēģinājumu instrumentu izstrāde

Kombinētās energoiekārtas (KEI) galvenais darba režīms ir kombinētais režīms, kurā degvielas enerģija pārvieto transportlīdzekļa (TL) masu, to paātrinot, vai uztur pašreizējo enerģijas līmeni, uzturot pastāvīgu ātrumu, kompensējot zaudējumus no pretestības spēku kustībai darbības. Optimālā darba režīma izvēle attiecas nevis uz iekšdedzes dzinēju (IDD), bet uz visu energoiekārtu, un tiek formulēta kā KEI maksimālās enerģētiskās efektivitātes nodrošināšana, ar to aprīkotajam automobilim atbilstot definētajam darba režīmam. IDD darba režīma nodrošināšana var tikt realizēta ar 1.1. attēla shēmā redzamo līdzekļu starpniecību. Šāda shēma ar KEI mūsdienās tiek realizēta sērijveida transportlīdzekļos. 1.1. attēla ietvarā ar nosaukumu “Papildu agregāti” tiek apzīmēta elektropiedziņa, kurā ietilpst elektrodzinējs, spēka pārveidotājs (invertors) u. c.



1.1. att. Karjera pašizgāzēja transmisijas kinemātiskā shēma: a) hidromehāniskā transmisija bez KEI; b) elektromehāniskā transmisija ar KEI.

Vilces piedziņas režīmi nav definēti ar laika funkciju, jo ir atkarīgi no darba apstākļiem, piemēram, paātrinājuma, pagrieziena, braukšanas kalnā, bremzēšanas režīmu secības. Bez ekspluatācijas apstākļiem mašīnas mezglu darba drošumu ietekmē klimatiskie faktori. KEI lielākā vai mazākā mērā nodrošina IDD darba režīma neatkarību no automobiļa kustības apstākļiem. Galvenās atšķirības starp tiem ir enerģijas plūsmu organizēšanā, proti, tajā, pa kādiem ceļiem un cik efektīvi tie nodod un izmanto IDD izstrādājamo enerģiju. Viens no galvenajiem KEI izstrādes un izpētes aspektiem ir jaudas plūsmu organizēšana.

1.2. Izmēģinājumu līdzekļi

Virtuālie līdzekļi

Virtuālie līdzekļi – vispieejamākais TL ar KEI izpētes un izstrādes instruments. Modelis ar minimāliem sākuma datiem praktiski vienmēr ir pirmais un bieži vienīgais instruments jaunu sistēmu izstrādes pirmajā posmā. Nākamajos posmos var tikt veikti TL, uz kura pamata tiek radītas KEI, un energoiekārtas komponentu izmēģinājumi izejas datu precizēšanai un izstrādātā modeļa adekvātuma apstiprināšanai.

Fizikālie līdzekļi

Laboratorijas izmēģinājumi ir visērtākais KEI un ar tām aprīkoto transportlīdzekļu eksperimentālās izpētes veids, jo īpaši – izpildot braukšanas ciklus. To priekšrocības ir atkārtojamība, plašas dažādu mainīgo mērījumu iespējas, neatkarība no sezonas un laika apstākļiem. Jo īpaši aktuāli tas ir, radot jaunas KEI, kad eksperimentāli tiek apstrādāti inženiertehniski risinājumi un vadības sistēmas elementi, ko nevar iegūt ar matemātiskās modelēšanas palīdzību vai ko nav lietderīgi atspoguļot modelī, lai to pārlietu nesarežģītu.

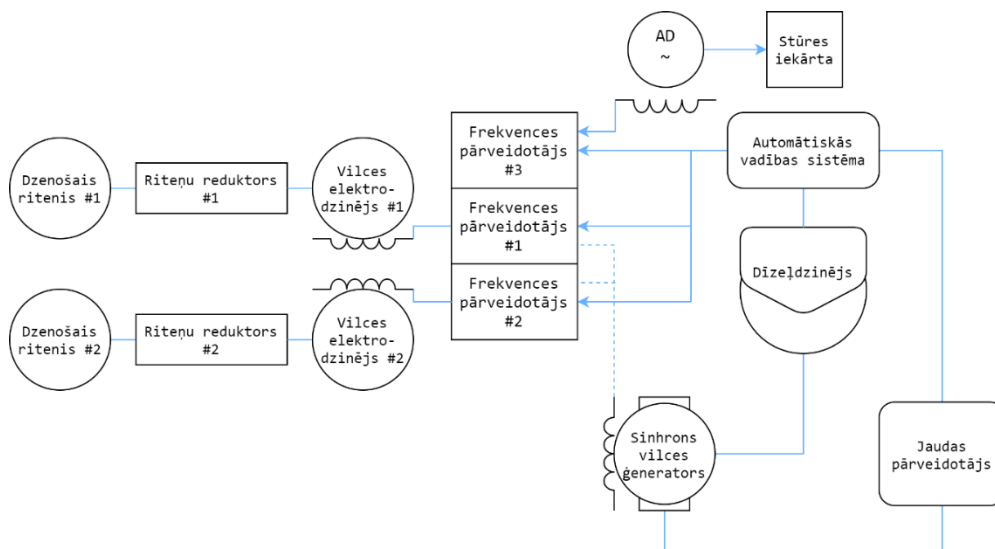
Lauka jeb poligona izmēģinājumi

Visbiežāk izmēģinājumi laukā tiek veikti ar mērķi noteikt kontroles rādītājus, kas raksturo tās vai citas transportlīdzekļa īpašības, piemēram, bremsēšanu. Tomēr pētniecības darbi paredz arī citu izmēģinājumu uzdevumu: izejas datu iegūšanu pētāmā objekta matemātiskajam modelim un modelēšanas atbilstības pārbaudei.

1.3. Spēka iekārtas un spēka pārvada matemātiskais modelis

Mūsdienu elektromehāniskās transmisijas ir būvētas, izmantojot vilces asinhronos maiņstrāvas elektrodzinējus, sinhronos maiņstrāvas ģeneratorus un spēka pusvadītāju frekvences pārveidotājus. Maiņstrāvas elektromehāniskās transmisijas vispārinātā shēma redzama 1.2. attēlā.

Ir izmantoti šādi apzīmējumi: vilces elektrodzinēji, kam ir kinemātiska saite ar dzenošajiem riteņiem #1 un #2 ar sekundāro (riteņu) reduktoru starpniecību; sinhronais vilces ģenerators, kam ir kinemātiska saite ar dīzeļdzinēja vārpstu. Automātiskās vadības sistēmas bloks iedarbojas uz vilces ģeneratora ierosmes tinumu ar spēka pārveidotāja starpniecību, uz vilces un stūres dzinējiem ar frekvences pārveidotāju #1–#3 starpniecību, savukārt uz IDD elementiem – tieši.



1.2. att. Vispārinātā maiņstrāvas elektromehāniskās transmisijas TL shēma.

1.4. AD vektoru vadības princips

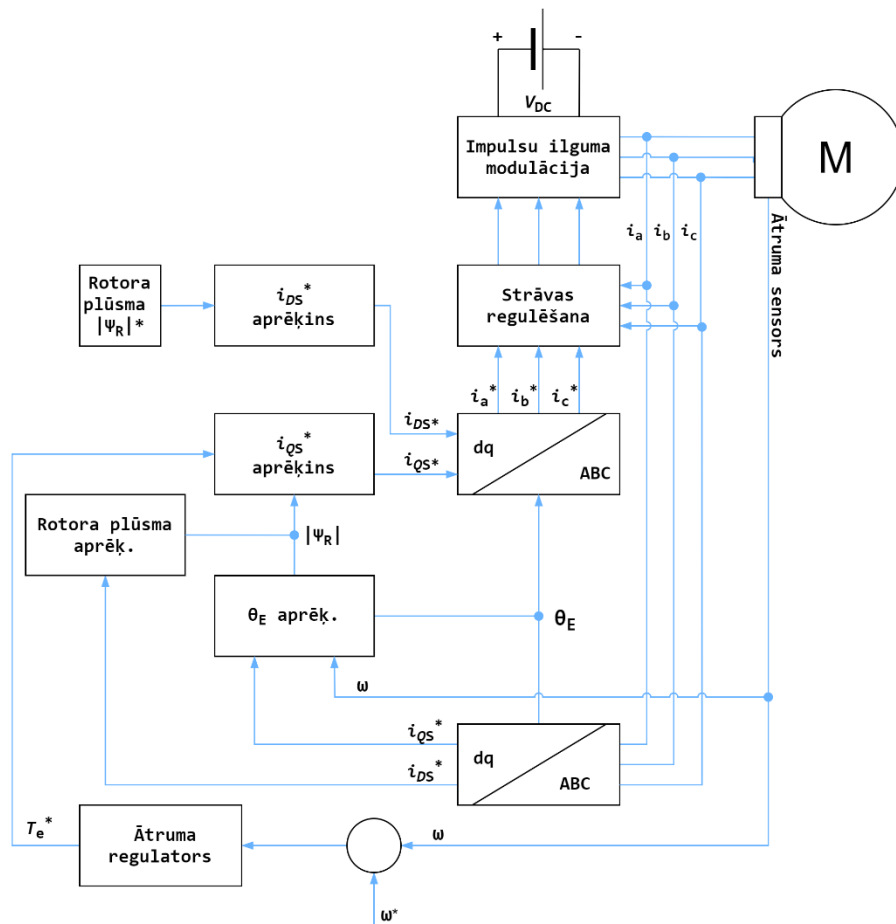
Pašlaik maiņstrāvas mašīnu ātruma kontrole tiek veikta ar frekvences pārveidotāju, kas izgatavots, izmantojot ciparu signālu procesorus. Augstsprieguma elektriskajās piedziņās tiek izmantoti daudzpakāpju sprieguma pārveidotāji, ko visbiežāk veido vairāki H -tilti, no kuriem katrs tiek darbināts no savas izolētās līdzstrāvas daļas. Pārslēgšanai šādos pārveidotājos tiek izmantoti jaudīgi $IGBT$ tranzistori. Vektora piedziņas vadības sistēmas sintēzes principi balstās uz Parka–Goreva vienādojumiem, kas sastādīti asinhronajam dzinējam ar īsslēgtu rotoru attiecībā pret statora un rotora plūsmas saķēdējums sinhronā ortogonālā koordinātu sistēmā (d, q) , kas orientēti gar rotora plūsmas vektoru. Ar magnētisko lauku sinhroni rotējošas mašīnas koordinātu sistēmā visi elektromagnētiskie mainīgie ir pastāvīgi, tāpēc statisko modeli var iegūt, izmantojot šos vienādojumus [16]:

$$\begin{cases} R_s i_{sd} - \omega_\psi L_{\sigma e} i_{sq} = u_{sd}; \\ R_s i_{sq} + \omega_\psi \left(L_{\sigma e} i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \psi_r \right) = u_{sq}; \\ L_m i_{sd} = \psi_r; \\ L_m i_{sq} = \omega_s T_r \psi_r; \\ \gamma_\psi = \gamma_{\psi 0} + \int (\omega_e + \omega_s) dt; \\ M_e = c \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sq}, \end{cases} \quad (1.1.)$$

kur

$\omega_s = \omega_\psi - \omega_e$ ir slīdes frekvence;

γ_ψ – statora saķēdējuma vektora rotācijas leņķis.



1.3. att. Asinhronā dzinēja vektoru vadības shēma. Pieņemtie apzīmējumi: M – asinhronais dzinējs; dq/ABC – koordināšu pārveidotāji, kas veic šādus pārveidojumus: statora strāvu pārveidojumus no trīsfāžu sistēmas A, B, C uz nekustīgo Dekarta koordināšu sistēmu (α , β); statora strāvu pārveidojums no koordināšu sistēmas (α , β), uz koordināšu sistēmu (d , q), izmantojot tiešo lauka orientēšanu.

Analizējot 1.1. vienādojumu sistēmas pēdējo un trešo vienādojumu, var secināt, ka statora strāvu vektora gareniskā komponente i_{sd} nosaka mašīnas magnētisko stāvokli, kas raksturojas ar r , bet šķērsvirziena strāva i_{sq} , reizinot ar plūsmas saķēdējuma pašreizējo vērtību, rada AD elektromagnētisko momentu. Tāpēc i_{sd} dēvē par statora strāvu vektora magnetizējošo komponenti (magnetizējošo strāvu), savukārt i_{sq} par aktīvo vai momentu veidojošo komponenti (aktīvo vai momentu veidojošo strāvu). Uz šo secinājumu balstās tā dēvētais dzinēja vektoru vadības princips (*Field-Oriented Control, FOC*) [1], kuram [15] interpretācijā ir šāds formulējums.

Uz AD pamata radītas frekvences regulējamās elektropiedziņas vadības likumi var tikt sintezēti uz metodiska pamata, kas ir zināms no teorijas par līdzstrāvas elektropiedziņu ar neatkarīgu ierosmi, ja vadošās iedarbības uz regulējamo strāvas vai sprieguma avotu formē rotējošā koordinātu sistēmā, kas orientēta pēc rotora plūsmas saķēdējuma vektora, pēc tam tās pārveidojot nekustīgā (fāžu) sistēmā. Turklāt AD ir jāaplūko kā divkanālu vadības objekts.

Iedarbība uz AD statora strāvu vektora šķērsvirziena komponenti jāizmanto elektromagnētiskā momenta vadībai elektropiedziņas mehāniskās kustības koordinātu regulēšanas kanālā (līdzīgi līdzstrāvas dzinēja enkura strāvai).

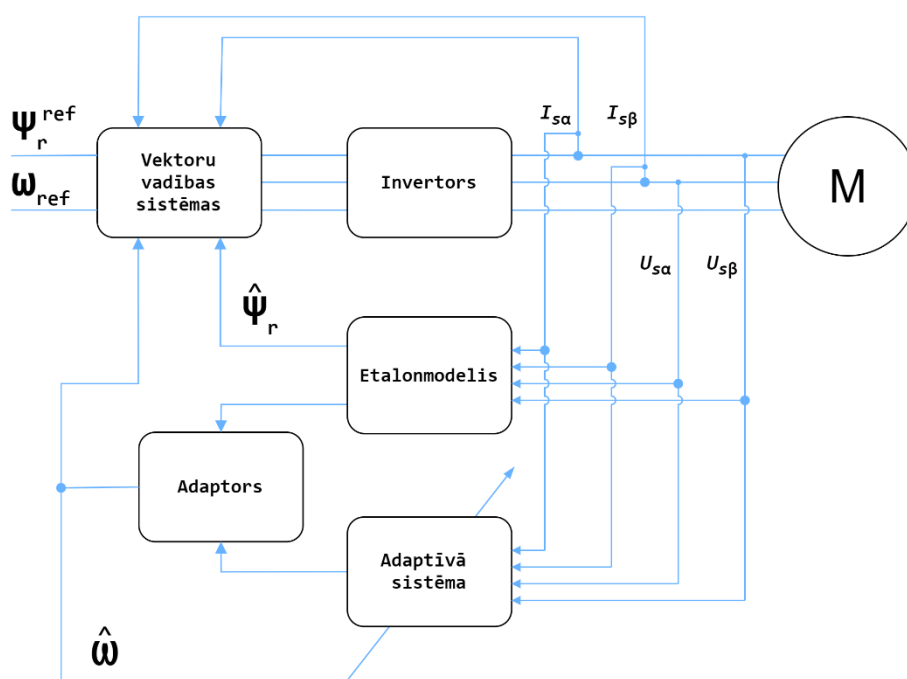
Iedarbība uz statora strāvas garenisko komponenti jāizmanto mašīnas magnētiskā stāvokļa (magnētiskās plūsmas) vadībai ar mērķi nodrošināt racionālus enerģijas elektromehāniskās pārveidošanas režīmus (līdzīgi līdzstrāvas dzinēja ierosmes strāvai).

No pirmajiem diviem 1.1. vienādojumu sistēmas vienādojumiem var secināt, ka, pievadot barošanu dzinējam no regulējama sprieguma avota, statora strāvu vektora šķērsvirziena komponente ir jāregulē ar spriegumu vektora projekcijas uz q asi starpniecību. Strāvas garenisko komponenti regulē spriegumu vektora projekcija uz asi i_d .

1.5. Novērotāja modelēšana uz adaptīva modeļa pamata (MRAS algoritmi)

Mūsdienās visizplatītākās AD rotora griešanās frekvences pasīvās novērtēšanas sistēmas [11] gan teorētiskajos, gan arī inženiertehniskajos lietojumos ir *MRAS* (*Model Reference Adaptive System*) tipa algoritmi – adaptīvā sistēma ar definējamu vai etalonmodeli. Visu šo algoritmu izejas signāli ir plūsmas saķēdējuma vektora un asinhronās mašīnas rotora griešanās elektriskās frekvences parametri.

Colin Schauder pirmo reizi piedāvātie *MRAS* tipa identifikatori savā struktūrā ietver divus dažādus modeļus, kas izskaitļo viena un tā paša (vispārējā gadījumā – vektora) stāvokļa mainīgā, piemēram, rotora plūsmas saķēdējuma vektora parametrus. Viens modelis, kas nesatur nenoteiktu parametru, ir pirmdēvējs, un ar tā palīdzību izskaitļotais mainīgais ir etalons. Otrs modelis, kas ir atkarīgs no nenoteikta parametra, ir regulējams, turklāt tā adaptācija tiek veikta nenoteiktā, izskaitļojamā mainīgā izmaiņas ceļā. *MRAS* algoritma, kas noved līdz nullei rotora plūsmas saķēdējumu vektoru reizinājumu, kas iegūts no AD statora ķēdes modeļa, kas tiek pieņemts par etalonu, un AD rotora ķēdes modeļa, kas ir regulējams, vienādojumiem ir šāda sintēzes procedūra. Algoritma struktūrshēma redzama 1.4. attēlā [29].



1.4. att. *MRAS* vadības algoritma principiālā shēma.

Lai sastādītu rotora griešanās frekvences identifikatoru, pamatojoties uz *MRAS* metodi, tiek izmantots AD matemātiskais modelis stāvokļa koordinātēs nekustīgajā Dekarta koordinātu sistēmā (α, β) kas ir stingri saistīta ar statoru:

$$\begin{cases} L_{\sigma e}^s I_s = -R_s I_s - \frac{L_m}{L_r} \dot{\Psi}_r + U_s; \\ \dot{\Psi}_r = \frac{L_m}{T_r} I_s + \omega_r D\Psi_r - \frac{1}{T} \Psi_r. \end{cases} \quad (1.2.)$$

Statora ķēdes modelis satur tikai vienu nezināmo lielumu – rotora plūsmas saķēdējuma vektoru, tāpēc tā atrašanai var izmantot:

$$\dot{\Psi}_r = \frac{L_r}{L_m} \left(-L_{\sigma e}^s I_s + \int (U_s - R_s I_s) dt \right). \quad (1.3.)$$

Ja ir precīza informācija par dzinēja parametriem, statora ķēdes modeli var pieņemt kā etalona modeli. Rotora ķēdes modelis satur regulējamu parametru – mašīnas vārpstas griešanās elektrisko frekvenci. AD rotora ķēdes matemātisko modeli un regulējamu modeli var izteikt:

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_r = \dot{\Psi}_r^{\text{etal}} = \frac{L_m}{T_r} I_s + \omega_e D\Psi_r - \frac{1}{T_r} \Psi_r; \\ \dot{\Psi}_r^H = \frac{L_m}{T_r} I_s + \hat{\omega}_e D\Psi_r - \frac{1}{T_r} \hat{\Psi}_r^H. \end{cases} \quad (1.4.)$$

Atskaitot no AD rotora ķēdes modeļa vienādojumiem regulējamā modeļa vienādojumus, tiek iegūts vienādojums novirzēm:

$$\dot{\varepsilon}_\psi = \omega_e D\varepsilon_\psi + \delta D\hat{\Psi}_r^H - \frac{1}{T_r} \varepsilon_\psi, \quad (1.5.)$$

kur

$$\varepsilon_\psi = \hat{\Psi}_r^H - \Psi_r = \hat{\Psi}_r^H - \Psi_r^{\text{etal}} - \text{rotora plūsmas saķēdējuma novērojuma kļūda.}$$

Statora ķēdes modelis ir neitrāli stabils, jo tā struktūrā esošie divi integratori, ko neaptver atgriezeniskā saite, nosaka raksturīgā 2. kārtas vienādojuma nulles sakni. Lai identifikatoru padarītu stabilu, nepieciešams stabilizēt statora ķēdes modeli. Statora ķēdes modeļa stabilizāciju tiek veikta, aptverot integratoru ar negatīvu atgriezenisko saiti un ievietojot tajā PI regulatoru [11], kas nodrošinās identifikatora nejutīgumu pret signālu nulļu nobīdēm no strāvas un sprieguma devējiem. Arī saskaņā ar darbiem [8], [13] adaptīvie algoritmi, tajā skaitā arī *MRAS*, ir jutīgi pret AD parametru novirzēm no to reālajiem lielumiem, ar kuriem operē skaitļotājs. Šīs novirzes var būt saistītas gan ar kļūdainu informāciju par parametriem, kas iegūta to iepriekšējās identifikācijas posmā, gan arī ar to, ka tiem elektropiedziņas darba procesā izmainās elektriskie parametri, konkrēti, mašīnas sakaršanas rezultātā mainoties statora un rotora aktīvajai pretestībai.

Pirmās nodaļas nobeigums

Pirmajā nodaļā sniegts KEI un tās galveno komponentu testēšanas koncepcijas un metožu apraksts, asinhronās mašīnas kā vadības objekta frekvences regulējamā elektropiedziņā un pārējo pilnīgai KEI testēšanai nepieciešamo aparātu matemātiskais apraksts. Uz tā pamata izveidoti AD matemātiskie modeļi un formulēti AD vektoru vadības principi koordinātēs, respektīvi “statora strāva – rotora plūsmas saķēdējums”. Dotas metodes mehānisko robežraksturlīkņu konstruēšanai vilces elektriskajām piedziņām, lai analizētu iespēju izmantot šāda tipa elektrisko piedziņu ar noteiktiem vilces raksturlīknes parametriem, piemēram, maksimālajam pārvaramajam ceļa slīpumam un maksimālajam ātrumam. Šie kritēriji nosaka projektējamā TL dinamiskās īpašības. No dažādām vadības metodēm tika izvēlēts *MRAS* tipa algoritms, jo šobrīd tas ir visizplatītākais gan teorētiskajos, gan inženiertehniskajos lietojumos ar AD rotora griešanās frekvences novērtējumu.

2. VIRTUĀLI FIZISKO IZMĒĢINĀJUMU SISTĒMAS

Nodaļā aplūkoti vairāki uzdevumi, kas saistīti ar TL ar KEI izpēti un izstrādi instrumentārija attīstību. Pirmais uzdevums ir izstrādāt KEI un tās komponentu darba rādītāju identifikācijas metodi pēc pašas energoiekārtas vai ar to aprīkota TL izmēģinājumu rezultātiem ierobežotu mērījumu iespēju apstākļos. Otrais uzdevums ir KEI laboratorijas izmēģinājumu funkcionālo iespēju paplašināšana ar sistēmu palīdzību, kas imitē energoiekārtas darbu dažādos TL kustības apstākļos.

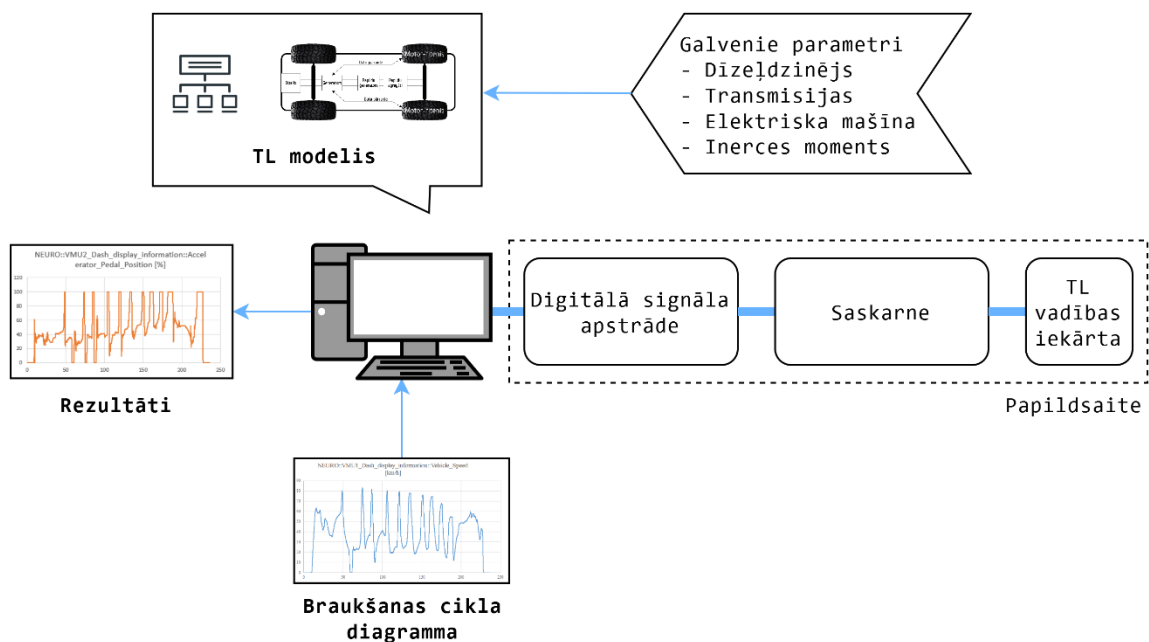
Lai iegūtu eksperimentālos datus, nepieciešama piekļuve sērijveida TL izstrādei vai ir jāizpēta pašu izstrādāta energoiekārta. Ja ir iespējas izmēģināt TL modeļus ar KEI, var iegūt plašu un noderīgu materiālu analīzei. Tomēr pastāv sērijveida transportlīdzekļa programmatūras slepenības problēma: KEI vadības algoritms parasti ir nezināms, tāpēc analizēt izmēģinājumu rezultātus ar virtuālo modeļu palīdzību ir visai problemātiski.

Abu uzdevumu risinājumu var panākt ar fizisku izmēģinājumu metožu kombinēšanu ar skaitļošanas eksperimentiem, kas tiek veikti ar virtuālajiem modeļiem. Pirmajā uzdevumā virtuālajam objektam ir jāatveido fiziskais, proti, tas “jādublē”, esot sinhronizētam ar to pēc mērāmajiem mainīgajiem, un attēlo tos mainīgos, kas netiek novēroti fiziskajā objektā. Otrajā uzdevumā virtuālajam objektam ir jāatveido tā izmēģinājumu objekta daļa, kas fiziski nav laboratorijā. Virtuālā un fiziskā objekta mijiedarbība ir jānodrošina tādā veidā, lai to kombinācija atveidotu vienotu sistēmu, respektīvi, transportlīdzekli ar KEI – un apstākļus, kuros tiek veikti to izmēģinājumi. Tas prasa virtuālās un fiziskās daļas sinhronizāciju reālā laikā.

2.1. Kombinētās sistēmas

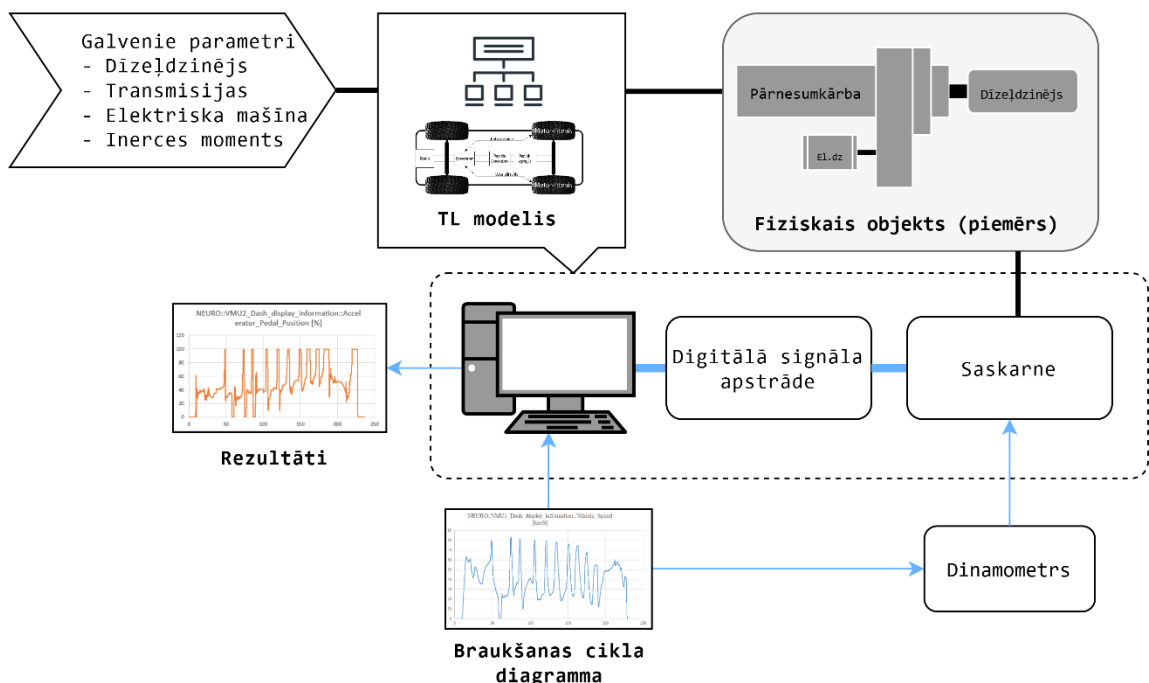
Vadības sistēmas tiek izstrādātas ar dažādu programmatūras līdzekļu palīdzību, un to savietošana ar modelēšanas vidi, nodrošinot informācijas aizsardzību, ir darbietilpīgs uzdevums, un tas nav TL ražotāja pienākums. Pieņemama izmantošanas metode ir virtuāli fiziskās modelēšanas tehnoloģijas – *HiL (Hardware in the Loop)*. Tā tiek izmantota kā aparātu kontrolleru testēšanas instruments dažādās tehnikas jomās un balstīta uz kontrollera vadītā objekta un apkārtējās vides, ar ko mijiedarbojas vadāmais objekts, aizstāšanu ar virtuālo modeli. Kontrolleris, izmantojot saskarni, apmainās signāliem ar modeli, kas ir sinhronizēts reālajā laikā tā, it kā tas notiktu fiziskā objektā.

KEI aparātu kontrolleris attēlā redzams ar *VCU (vehicle control unit)* bloku. Virtuālā TL ātruma regulēšanu veic tā dēvētais vadītāja modelis. Šim nolūkam tas atbilstoši braukšanas cikla operāciju kartei un TL pašreizējam ātrumam definē akceleratora un bremzes pedāļu nospiešanas signālus un nosūta tos uz *VCU*. Ņemot vērā KEI shēmu un komponentu daudzveidību, kā arī izstrādāto modeļu uzdevumus izmantošanai sērijveida izmēģinājumu līdzekļiem, tiem ir paaugstinātas prasības arhitektūras elastīguma, komponentu unifikācijas un saskarnes organizēšanas aspektos, ar kuru palīdzību tiek atveidots virtuālais TL ar KEI un definēti tā parametri. Kā modeļu radīšanas sistēmu veidojošā metode tiek izmantoti saišu grafi ar programmu arhitektūras realizāciju, kas ir analogiska modelēšanas sistēmai *Argonne Autonomie* vai *MATLAB/Simulink*.



2.1. att. *HiL* tehnoloģijas izmantošana kravas automobiļu un autobusu ar KEI virtuāli fiziskajiem izmēģinājumiem.

Otrs procedūru variants paredz pilna komplekta KEI stenda izmēģinājumus ar tās darba atveidošanu pie TL kustības braukšanas ciklā. Tam tiek izmantota virtuāli fizisko izmēģinājumu sistēma, kuras shēma redzama 2.2. attēlā.



2.2. att. Transportlīdzekļu ar KEI virtuāli fizisko izmēģinājumu sistēma.

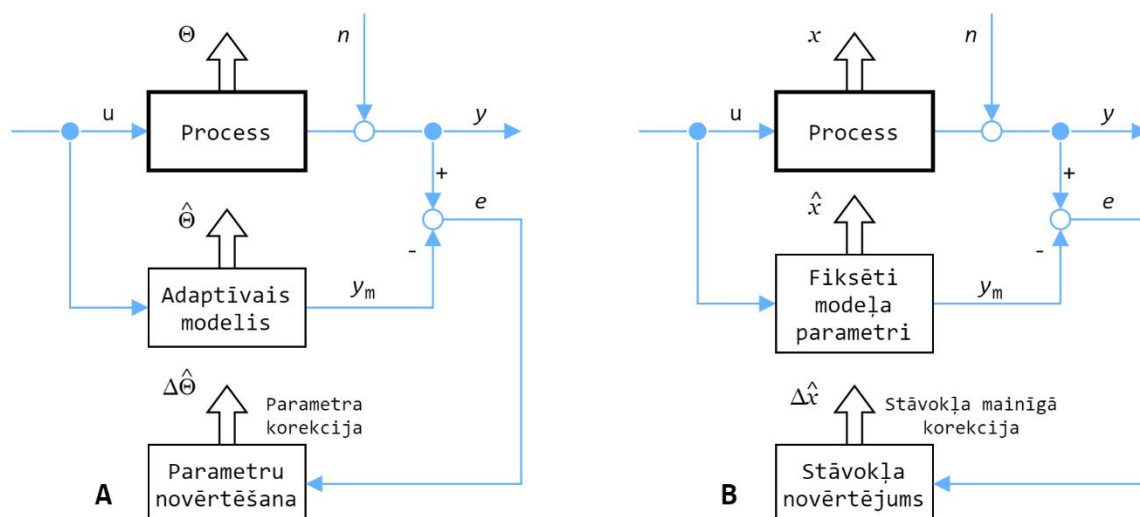
Slodze uz izmēģināmās KEI izejas vārpstas tiek radīta ar dinamometra palīdzību; tomēr inerces slodze, kas atveido TL masu, nav paredzēta – to imitē tas pats dinamometrs, kura vadība tiek veikta ar izmēģinājuma objekta virtuālās daļas – TL dinamikas modeļa –

palīdzību. TL ātrums ir uzdevuma signāls, ko izpildot, dinamometrs rada slodzi uz energoiekārtas vārpstas. Lai TL modelis iesāktu kustību, tiek izmantots ar dinamometru izmērītais griezes momenta signāls. Šādā veidā organizētā sistēma ļauj imitēt jebkuras masas TL (noslogojošās iekārtas iespēju robežās), neizmantojot tradicionālos spararatus.

2.2. Pilnībā virtuālas sistēmas

Pastāv arī tādas virtuālās sistēmas, kas dublē fiziskos objektus un sistēmu automātiskās vadības teorijā izmanto fiziskā objekta signālus tā nemaināmo parametru noteikšanai, tādu sistēmu sauc par novērotāju (*observer*). Aprakstāmie novērotāji tiek izveidoti gan uz tehnisko sistēmu klasisko dinamikas modeļu bāzes, gan arī izmantojot relatīvi jaunas modelēšanas metodes – faziloģiku un mākslīgos neironu tīklus.

Atkarībā no izpildāmajām funkcijām novērotājus var iedalīt divos tipos: objekta fiziskos vai konstruktīvos parametrus identificējošajos; objekta stāvokļa mainīgo identificējošajos. 2.3. attēlā parādītas abu tipu sistēmu blokshēmas [7].



2.3. att. Fiziskā objekta nenovērojamo rādītāju identifikācijas sistēmu organizācija ar to dublējošā modeļa novērotāja palīdzību. A – fizisko un/vai konstruktīvo parametru identifikācija; B – stāvokļa mainīgo identifikācija [7].

Fiziskais objekts parasti ir vadāms. Signāls u ir izmērāmo vadības iedarbju vektors. Tiek mērīts arī objekta izejas mainīgo vektors y . Uz objektu iedarbojas ierosa n , kas ir nenovērojams gadījuma process. Objekta parametru Θ identifikācija tiek izpildīta ar novērotāja palīdzību, kas ir tā modelis, kura attiecīgie parametri var tikt noregulēti darba procesā. Regulēšanu veic identifikācijas bloks. Šim nolūkam tas izmanto novērojumu kļūdu e , kas ir izmērīto fiziskā objekta izejas signālu un modeļa y_m izejas signālu, kas iegūti, uz to iedarbojoties tai pašai (izmērītajai) vadībai u , starpība. Lai veiktu šo operāciju, modelim ir jābūt sinhronizētam ar novērojamo objektu, proti, jādarbojas reālā laikā. Identifikācijas blokā novērojumu kļūda tiek izmantota kā arguments funkcijā, kas aprēķina parametru $\Delta\hat{\Theta}$ vai stāvokļa $\hat{x}$ vērtējumu koriģējošās vērtības (“^” – vērtējuma rezultāts).

2.3. Virtuāli fizisko izmēģinājumu sistēmu izveidošanas metodika TL ar KEI izpētei un izstrādei

Lai atrisinātu KEI izpētes uzdevumus ar papildinošiem izpētes stendiem, izveidota virtuāla sistēma, kas atveido laboratorijā fiziski klāt neesošo izmēģinājumu objekta daļu. Tajā ietilpst transportlīdzeklis (ar riteņiem), kā arī energoiekārtas, spēka iekārtas vai šasijas mezgļi, kuru nav izmēģinājumu fiziskajā daļā. Virtuālā un fiziskā sistēma ir savienota gan ar informatīvām, gan arī ar spēka saitēm. To darbs tiek sinhronizēts reālajā laikā, kas nozīmē, pirmkārt, speciālu reālā laika datormodelēšanas programmu līdzekļu izmantošanu. Divas sistēmas veido noslēgtu kontūru, proti, starp tām ir realizēta divpusēja mijiedarbība. To kombinācija atveido visu TL ar KEI un apstākļus, kuros tā tiek izmēģināta.

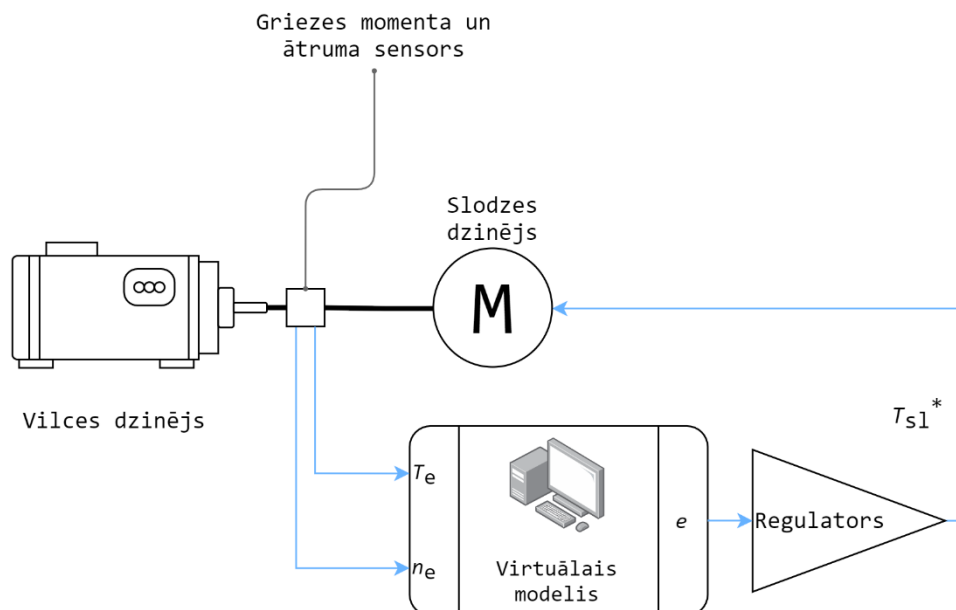
Savukārt uzdevumu tipam, kur paredzēta pietiekami pilnas KEI funkcionēšanas ainas atveidošana, attēlo tās komponentu režīma punktu masīva veidā ierobežota izejas datu apjoma apstākļos, kas tiek ņemti no energoiekārtas komponentu rādītāju mērījumiem, kas tiek iegūti laboratorijas vai gaitas izmēģinājumos. Eksperimentālo datu sastāvs ir atkarīgs no izmantojamo mērīšanas sistēmu iespējām un to vai citu energoiekārtas mainīgo novērojamības. Lai atrisinātu nenovērojamo vai neizmērāmo rādītāju pabeigšanas uzdevumu, tiek izveidota virtuālā sistēma – novērotājs, kas dublē fizisko izmēģinājumu objektu (pieprasītās detalizācijas robežās) gan struktūras un īpašību, gan arī izturēšanās ziņā. Izmēģinājumu objekta struktūra un īpašības tiek atveidotas ar tā matemātiskā modeļa starpniecību, izturēšanās – virtuālā un fiziskā objekta sajūgšanas un sinhronizācijas ceļā reālā vai mašīnlaikā. Dinamiskās identifikācijas uzdevums neparedz virtuālā objekta ietekmi uz fizisko, proti, to apvienošanu noslēgtā sistēmā. Tāpēc sajūgšanai un sinhronizācijai tiek izmantotas tikai informācijas saites, kas ir fiziskā objekta rādītāju mērīšanas sistēmu signāli.

Matemātisko modeļu sastāvu un detalizācijas līmeni, uz kuriem ir balstīti virtuālie objekti, nosaka individuāla pētījuma prasības, risināmā uzdevuma tips (identifikācija vai laboratorijas izmēģinājumi) un tam atbilstošais mijiedarbības veids ar fizisko objektu.

2.3.1. Laboratorijas izmēģinājumu sistēmas, kas savieno virtuālo un fizisko objektu (kombinētās sistēmas)

Virtuāli fiziskā objekta pamats laboratorijas izmēģinājumiem ir noslēgta sistēma, kas sastāv no spēka agregāta ar vienu izejas vārpstu, virtuālā modeļa un tos savienojošām informatīvajām-spēka saskarnēm (2.4. att.). Atkarībā no izmantojamā modeļa šī sistēma var atveidot visu TL vai atsevišķas ass/riteņa spēka piedziņu.

Spēka agregāta slodzes režīma imitāciju realizē ierīce, ko sauc par dinamometru, kas var būt, piemēram, elektriskā mašīna. Griezes momenta un griešanās frekvences devējs tiek uzstādīts vietā, kur beidzas izmēģinājumu objekta fiziskā daļa un sākas virtuālā. Lai modelēšana būtu korekta, fiziskajai daļai pilnībā jābūt novietotai līdz devēja uzstādīšanas vietai. Dinamometram un visām iekārtām, kas saskaņo slodzes režīmu, jābūt uzstādītām pēc devēja.



2.4. att. Virtuāli fizisko izmēģinājumu bāzes sistēmas shēma.

Sākotnējā darbība, kas iedarbina sistēmu, ir spēka agregāta vārpstas griešanās sākums pēc vadības signāla pienākšanas tajā (piemēram, akseleratora pedāļa nospiešanas). Paralēli tam sistēmas virtuālā daļa vēl ir nekustīga, un tās vārpstas, kas ir spēka agregāta daļa, griešanās frekvence n^* ir vienāda ar nulli. Devēja izmērītā fiziskās vārpstas griešanās frekvence n_e jau ir atšķirīga no nulles, tāpēc fiziskās un virtuālās daļas kinemātiskās sistēmas izlāgojums rada regulēšanas starpību: $e = n_e^* - n_e$. Tā tiek nodota uz dinamometra regulatoru, kas aprēķina griezes momentu $T_{sl}^* = f(e)$, kas to kompensē. Šo momentu rada slodzes iekārta uz spēka agregāta vārpstas, un to izmēra devējs. Pēc tam tas signāla T_e veidā tiek pārraidīts uz virtuālo modeli, kas sāk kustību. Tādā veidā tiek radīta noslēgta sistēma ar informācijas un mijiedarbības spēka kanālu, kas sinhronizē izmēģinājumu objekta virtuālo un fizisko daļu.

Viens no spēka agregāta slodzes režīma imitācijas jautājumiem ir proporcija starp slodzes inerces daļu un momentu, ko rada dinamometrs. Lai noteiktu inerces lomu, kas saistīta ar dinamometru, jāaplūko slodzes struktūra, kas tiek radīta divu tipu izmēģinājumos: bez TL riteņu izskrējuma atveidošanas un ar slīdēšanu. Tiek pieņemts, ka:

- spēka agregāta savienojuma ar noslogojošo iekārtu stingrums netiek ņemts vērā;
- visas slodzes modelī ir pieliktas pie spēka agregāta vārpstas.

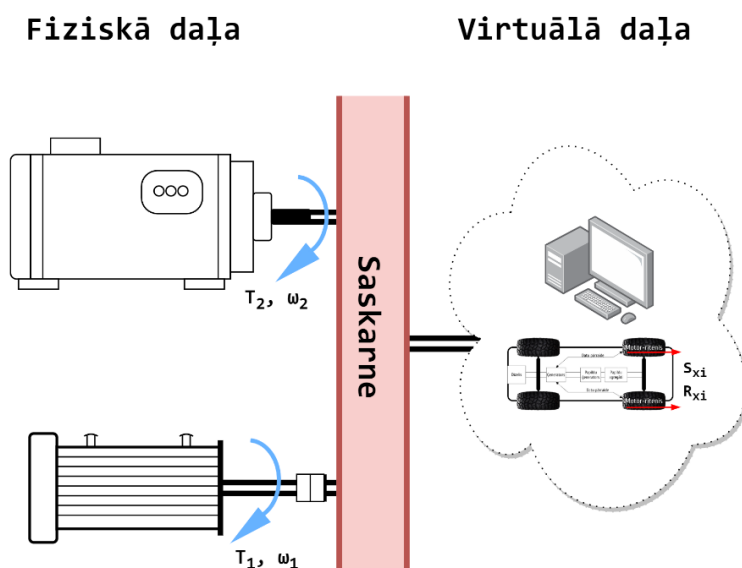
Momentu līdzsvara vienādojumi izmēģinājuma objekta fiziskajā un virtuālajā daļā gadījumam bez riteņu slīdēšanas sniegti 2.1. sistēmā, ar slīdēšanu – 2.2. sistēmā.

$$\begin{cases} T_e = T_{sl} + M_{j,din}; \\ T_e = M_{j,auto} + M_{\psi}; \\ M_{j,din} < M_{j,auto}; \end{cases} \quad (2.1.)$$

$$\begin{cases} T_e = T_{sl} + M_{j,din}; \\ T_e = M_{j,k} + M_{Rx}; \\ M_{j,din} > M_{j,auto}. \end{cases} \quad (2.2.)$$

Fiziskajā daļā devēja uzstādīšanas vietā no vienas puses darbojas spēka agregāta griezes moments T_e , no otras – ar to vienāds moments T_{sl} , ko rada dinamometrs, un rotējošo dinamometra daļu, kā arī citu ar to mehāniski savienotu ierīču reducētā inerces momenta $M_{j,din}$ summa. Automašīna modelī, kas neņem vērā riteņu slīdēšanu, pretestības spēku moments M_ψ darbojas uz masu, kas var tikt reducēta līdz ekvivalentam spararatam, kas rada inerces momentu $M_{j,auto}$. Šo momentu summu virtuālajā modelī līdzsvaro griezes moments T_e , ko mēra devējs uz vārpstas. Tādējādi 2.1. sistēmas pirmā un otrā vienādojuma daļa ir vienādas. Ja dinamometram nav pievienots papildu spararats, tā inerce būs ievērojami mazāka par TL ekvivalento inerci. Inerces slodzes trūkumu kompensēs dinamometra regulators, un tas iedarbosies momentā T_{sl} . Modelējot paātrinātu TL kustību, imitējamā masa palielinās vajadzīgo dinamometra bremzes momentu, savukārt pie palēninājumiem to vai nu samazinās, vai arī pārslēgs dinamometru vilces režīmā. Ilgstošos izmēģinājumos ar paātrinātas TL kustības atveidošanu, piemēram, braukšanas ciklos, TL masas imitācija prasīs ievērojama ģenerētās enerģijas daudzuma novadīšanu. Ja laboratorijā nav tehnisku iespēju enerģiju atgriezt elektriskajā tīklā vai novirzīt uz uzkrājēju, tai tādā vai citā veidā ir jātiek izkliedētai.

Tālāk tekstā aprakstīta energoiekārtu izmēģinājumu sistēmas vadības metode ar vairākiem spēka agregātiem, kas piedzen dažādas TL asis vai riteņus. Visvienkāršākajā gadījumā – TL kustības modelēšana, neņemot vērā riteņu slīdēšanu – slodzes saskaņošana dažādu asu piedziņās tiek realizēta ar kinemātisko proporciju palīdzību starp tām. Ja modelis ņem vērā riteņu saķeres īpašības, saskaņošana notiek veidā, kā to ilustrē 2.5. attēls, izmantojot pilnpiedziņas TL taisnvirziena kustības piemēru. Ar bloku “saskarne” 2.5. attēlā ir apzīmēts mērīšanas, informatīvo un spēka iekārtu kopums, kas sinhronizē izmēģinājumu objekta fiziskās un virtuālās daļas darbu.



2.5. att. Virtuāli fizisko izmēģinājumu bāzes sistēmas shēma.

Mainīgais slodzes vadībā ir spēka agregāta vārpstas griešanās frekvence. To nosaka TL riteņa vai ass leņķiskais ātrums virtuālajā modelī, kas ietver slīdēšanu S_{xi} . Pieskares reakcija R_{xi} , kas iedarbojas uz riteni, tiek definēta tā izslīdēšanas funkcijas veidā. Realizējot modeļa aprēķināmo spēka agregāta vārpstas griešanās ātrumu, noslogojošā iekārta rada momentu, kas līdzsvaro aprēķina pieskares reakciju. Pieskares reakcijas ir kopīgi spēka faktori riteņu dinamikas modelim un TL, tāpēc TL virtuālais modelis kļūst par savienojamo posmu izmēģinājuma objekta fiziskās daļas spēka agregātu slodzes režīmu koordinācijas ķēdē.

2.3.2. Laboratorijas izmēģinājumu sistēmas, kas dublē fiziskos objektus (pilnībā virtuālas sistēmas)

Virtuālā (dublējošā) objekta savienošanas un sinhronizācijas metodi ar fizisko (identificējamo) var uzskatīt par vienu no pieejām TL, tam pārvietojoties ar definētu ātrumu, piemēram, braukšanas ciklā, dzinēja darba režīma noteikšanas (ar modeļa palīdzību) uzdevuma atrisināšanai. Kā zināms, tam var tikt izmantotas divas modelēšanas metodes: dinamikas apgrieztā uzdevuma atrisināšana un dinamikas tiešā uzdevuma atrisināšana [5], [10], [14].

Pirmā metode paredz spēka agregāta slodzes un ātruma režīma aprēķinu pēc definētas TL ātruma un paātrinājuma cikla. 2.7. attēlā redzama to ilustrējošā blokshēma. Blokā “Automobiļa modelis” atrodas tā taisnvirziena kustības dinamikas vienādojums, kas atļauts attiecībā uz riteņu griezes momentu:

$$T_k = f(V_x, \dot{V}_x, a), \quad (2.3.)$$

kur

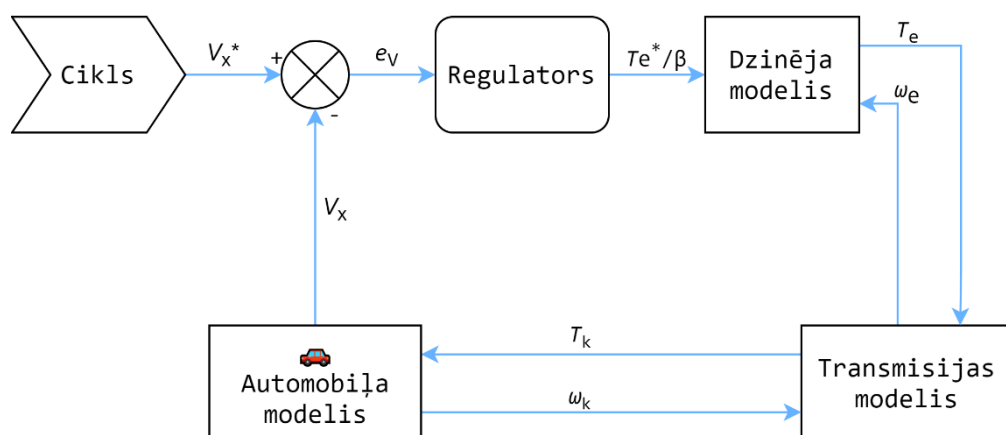
V_x – TL taisnvirziena kustības ātrums, kas tiek definēts ar braukšanas ciklu;

a – transportlīdzekļa parametru vektors, kas nepieciešams pretestības spēku kustības aprēķinam.

Moments T_k , kā arī dzenošo riteņu leņķiskais ātrums ω_k , ir TL “pretējā” modeļa izejas mainīgie. Bloks “Transmisijas modelis” ietver tās spēka un kinemātisko pārnese funkcijas, kas ir dotas tādā veidā, ka bloka izejas signāli ir dzinēja griezes moments (T_e) un tā vārpstas leņķiskais ātrums (e).

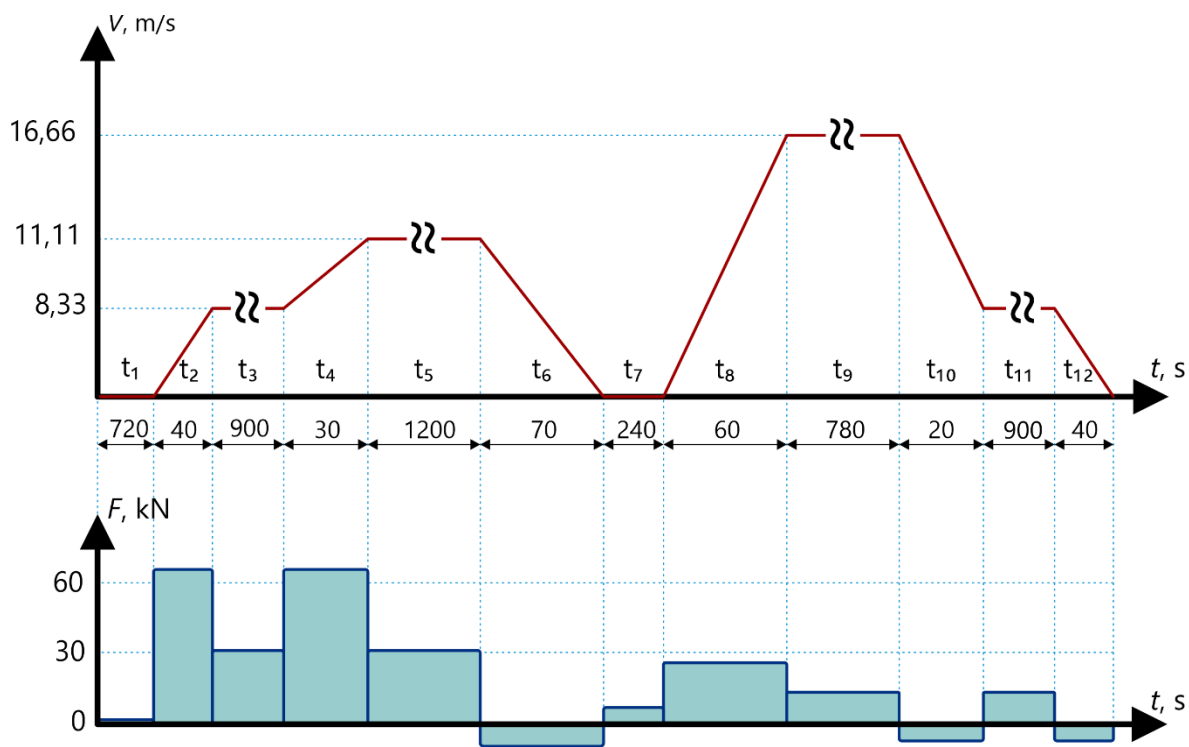
2.6. attēlā vadošā iedarbība T_k ir dzinēja griezes momenta T_e pārveidojuma rezultāts ar tiešo transmisijas pārnese funkciju. Lai šis modelis izpildītu cikla ātruma režīmu, tas tiek aprīkots ar regulatoru, kas kompensē modeļa V_x ātruma novirzi e_v no ātruma, ko definē cikls V_x^* pašreizējam laika momentam. Šajā nolūkā tas ģenerē uzdošanas signālu vai tieši dzinēja momentu T_e^* , vai akseleratora pedāļa stāvokli β . 2.6. attēlā redzamajā modelī vadošie, pēc tam – arī spēka, mainīgie tiek nodoti no vadības sistēmas uz TL riteņiem, savukārt kinemātiskie – pretējā virzienā. Tas ir tipisks “tiešo” dinamikas modeļu priekšstats, tostarp pie to formalizācijas ar saišu grafu teorijas palīdzību [4]–[6], [12]. Tas ir saistīts ar modeļos izmantojamo diferenciālvienādojumu skaitlisko integrēšanu. Kinemātiskie mainīgie ir stāvokļa mainīgie, kuru atvasinājumi atrodas vienādojumu kreisajās pusēs. To vērtības no iepriekšējās iterācijas tiek izmantotas nepārtrauktai integrēšanai un spēka mainīgo

aprēķinam, kas ir to funkcijas. Spēka mainīgie, ko definē vadības signāli, tiek aprēķināti un darbojas dotajā solī.



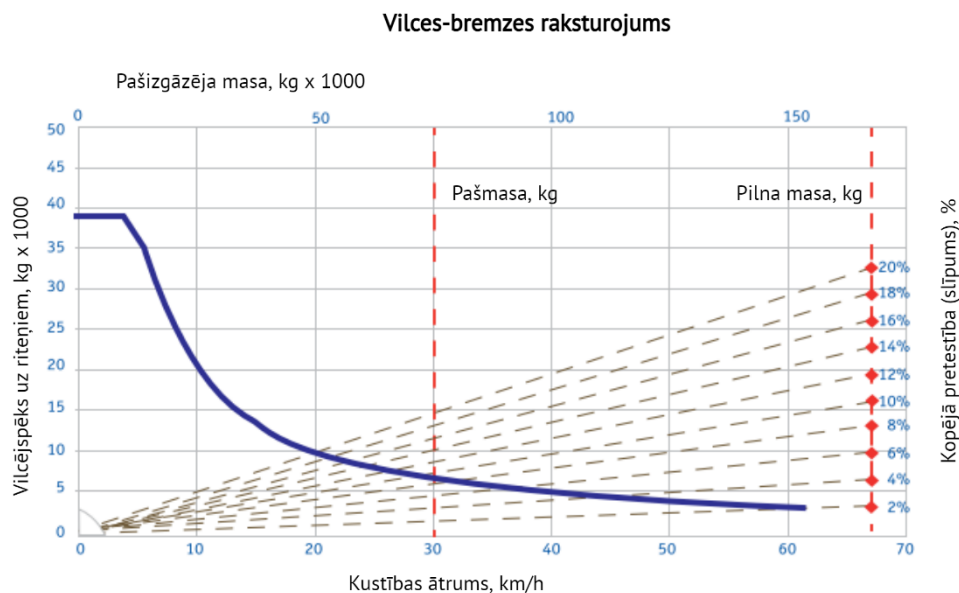
2.6. att. Automobiļa kustības modeļu ar definēta ātruma režīmu un ar ātruma regulatoru blokshēmas.

Transportlīdzekļa kustības modelēšanas uzdevumā definēto ātrumu var izmantot nevis cikla operatīvo karti, bet TL ātruma mērījuma ierakstu, kas iegūts tā izmēģinājumos stendā ar skrejveltniem vai uz ceļa. Šajā gadījumā tiks risināts spēka agregāta darba režīma identifikācijas uzdevums pēc eksperimentālajiem datiem. Lai adekvāti un precīzi atveidotu šo izmēģinājumu, ir nepieciešams noteikt tā noslodzes režīmu. Šim nolūkam modelī ir jābūt ieguldītiem eksperimentāli iegūtiem pretestības spēkiem, TL masai un spēka piedziņas lietderības koeficientam. TL darba režīmu izmēģinājumu veikšanai tiek izveidota dzinēja slodžu karte (diagramma), kurā būs ņemti vērā visi iespējamie kustības režīmi: TL kustības sākšana, kustība kalnup, nobraukšana pa nogāzi, transporta noturēšana, kā arī galvenais faktors – pārvadājamās kravas masa un aprēķinātais dinamiskā faktora lielums, kas ir atkarīgs no īpatnējām pretestībām TL kustībai. Eksperimentālie dati rāda, ka pašizkrāvēja kustības ātrums ir sarežģīts komplekss parametrs, kas ir atkarīgs no pārvadājamās kravas masas, radušā pašizkrāvēja vilcējspēka un dinamiskā faktora, ko nosaka īpatnējās ceļa pretestības, kas redzamas 2.7. attēla grafikā, līdz ar dinamiskā faktora palielināšanos pašizkrāvēja kustības ātrums pazeminās.

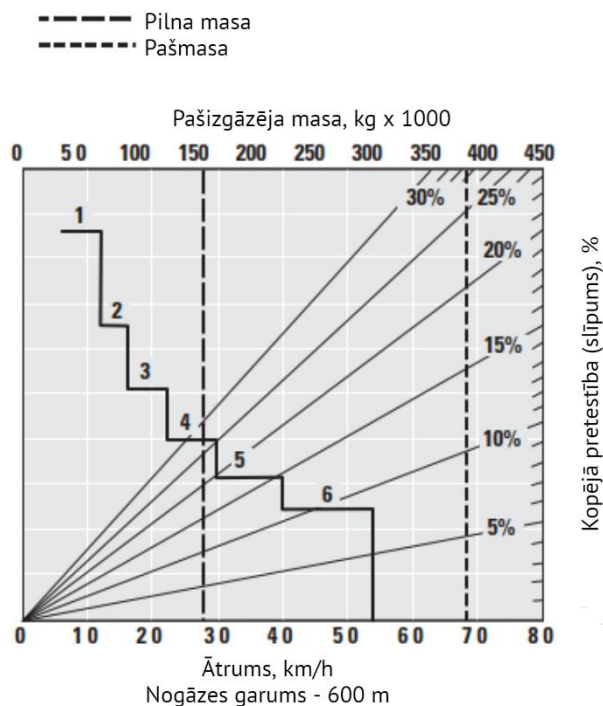


2.7. att. Ceļa slīpuma un transportlīdzekļa piekrāvuma ietekme uz tā ātrumu.

TL kustības ātruma, vilcējspēka un dinamiskā faktora saistības teorētiskā noteikšana ir visai apgrūtināta. Praksē lieto šo raksturojumu noteikšanas grafu analītisko metodi, izmantojot konkrēta tipa un izmēra pašizkrāvēja izgatavotājrūpnīcas nomogrammas. Šādu nomogrammu piemērs redzams 2.8. un 2.9. attēlā.

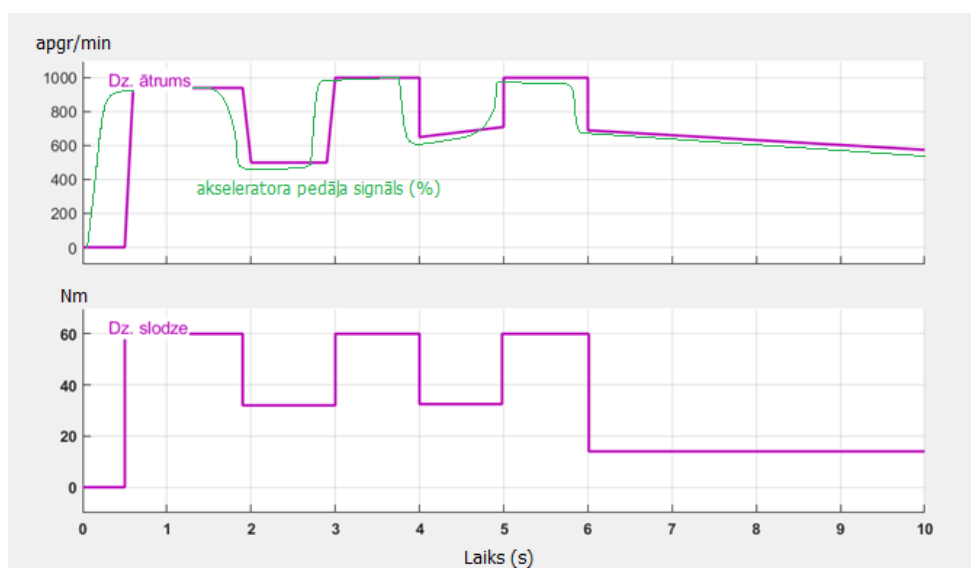


2.8. att. Karjera pašizkrāvēja *Belaz-75581* vilces raksturojumu piemērs pārvaramā pacēluma lieluma noteikšanai no attiecīgo ražotāju brošūrām.



2.9. att. Karjera pašizgāzēja CAT 793D vilces-bremzes raksturojumu piemērs pārvaramā pacēluma lieluma noteikšanai no attiecīgo ražotāju brošūrām.

Piemēram, programmā *MATLAB* dzinēja vadība tiek definēta ar diviem parametriem – apgriezienu ātrumu un slodzi uz dzinēju. Tiek veidotas tamlīdzīgas vilces-bremzēšanas diagrammas – grafiki AD noslodzei, kas imitēs dažādus TL darba režīmus (2.10. att.). Vilces-bremzēšanas līkņu konstruēšana un identifikācija ir vissvarīgākais uzdevums TL AD darbaspējas novērtēšanai visos darba režīmos virtuālajā vidē.



2.10. att. Bloks *Signal Builder*, kurā ir konstruētas līknes, kas ir AD vadības regulējošie argumenti.

Identifikācijas uzdevumu var vispārināt spēka agregātam ar vairākiem KEI spēka agregātiem. Tamlīdzīgu uzdevumu atrisināšanai visērtākā šķiet tiešā pieeja. Lai to realizētu, ir nepieciešams pieslēgt regulatoru katram agregāta modelim, kura darba režīmu nepieciešams identificēt, un piešķirt tam vadāmu modeļa mainīgo pēc atgriezeniskās saites tipa, kura nepieciešamā vērtība tiek mērīta energoiekārtas vai ar to aprīkota TL izmēģinājumos. Identifikācijas korektumu nosaka pretestības spēku atveidojuma precizitāte un energoiekārtas komponentu lietderības koeficients, kā arī komponentu modelēšanas kvalitāte. Modelēšanas kļūdas kompensēs regulatori, kas padarīs mazāk adekvātu to izpildāmo spēka agregātu darba režīmu identifikāciju. Lai samazinātu kļūdas, ir vēlams eksperimentāli noteikt energoiekārtas komponentu raksturojumus un veikt šo komponentu atbilstības un precizitātes atsevišķu novērtējumu.

Kā gadījuma traucējumu kompensācijas līdzekli var piedāvāt *Luenberger* novērotāju ar mazu pastiprinājuma koeficientu, kas neizkropļos matemātisko modeli un griezes momenta identifikācijas rezultātus.

Tādējādi tiek izveidots virtuālais modelis, kas dublē izmēģināmo TL un ir ar to saistīts ar noslēgtu vadības sistēmu starpniecību, kas izmanto fiziskā objekta signālus un līkņu grafikus un atbilstošos modeļa signālus spēka agregātu darba režīmu identifikācijai.

Lai apstiprinātu spēka agregātu darba režīmu identifikācijas korektumu, var piedāvāt divas metodes. Pirmā ir apstiprinājums ar griezes momenta mērījumu datiem kādos citos tā paša vai analogiska objekta izmēģinājumos. Otrā metode ir vairāku netiešu apstiprinošu pazīmju analīze: identificētā momenta atbilstība zināmiem agregāta darba režīmiem; pēc citām pazīmēm, kas ir atkarīgas no zināšanām par pētāmo objektu.

Lai rekonstruētu mehāniskās bremzēšanas sistēmas darbu, ir nepieciešama elektrodzinēja griezes momenta un momentu, ko rada bremžu mehānismi uz katra riteņa, identifikācija. Šī gadījuma specifika ir tajā, ka, lai atrisinātu momentu identifikācijas uzdevumu uz atsevišķām asīm vai riteņiem, ir nepieciešams izmantot modeli, kurā tie nav apvienoti ar automobiļa masu, bet tiem ir pašiem savas brīvības pakāpes.

Modeļa atbilstība tiek apstiprināta ar tā rezultāta salīdzinājuma ar kontroles mainīgajiem starpniecību, kas arī tiek mērīti izmēģinājumu laikā: TL ātrums un paātrinājums. Identifikācijas kvalitāti nosaka slodzes faktoru atveidošanas precizitāte, no kuriem galvenās ir uz riteņiem iedarbojošās pieskares reakcijas. Tās ir atkarīgas no normālajām reakcijām un riepu saķeres ar balsta virsmu koeficienta. Lai noteiktu normālās reakcijas, ir jābūt izmērītiem TL parametriem: masai; svāra sadalījumam pa riteņiem; masu centra koordinātām. Saķeres koeficientu aprēķina riepas modelis. Tā parametri tiek identificēti pēc eksperimentālajiem datiem. Galvenie faktori riepas saķeres īpašību modelēšanā ir saķeres koeficienta maksimālā vērtība un tam atbilstošā riteņa slīdēšana.

Realizējot identifikācijas modeli datorvidē, tā sinhronizācijas līdzekļi ar fizisko objektu – regulatori, signāli no devējiem un atgriezeniskās saites – var tikt organizēti vienas apakšsistēmas ietvaros, kas modelim izpilda kontrollera funkciju. Ja KEI pētniekam vai izstrādātājam ir jāsalīdzina energoiekārtas darba režīmi sērijveida TL ar viņa radītā kontrollera darba rezultātiem, tad tam var izmantot to pašu KEI modeli, aizstājot identificējamo bloku ar jaunu vadības sistēmu. TL ar KEI “tiešā” modeļa izmantošana, kas

organizēta atbilstoši saišu grafu teorijai [4]–[6], [12], ļaus tajā viegli aizstāt arī energoiekārtas komponenti vai tās shēmu ar mērķi, lai novērtētu šo izmaiņu efektu salīdzinājumā ar sērijveida sistēmu uz tā paša TL vienādos izmēģinājuma apstākļos.

Otrās nodaļas nobeigums

Otrajā nodaļā veikti detalizēti apraksti un sniegti paskaidrojumi par AD darba eksperimentālo izpēti un aprīkojumu ar tā komponentēm pilnvērtīgai KEI, kā arī par nepieciešamību izmantot laboratorijas izmēģinājumu sistēmu ar plašāku funkcionalitāti nekā tradicionālajām. Šo sistēmu izmantošanai ir jāaizstāj būtiskus “lauka” izmēģinājumus ar eksperimentu laboratorijā. Tāpēc tām ir jāatveido energoiekārtas darbs visos režīmos, kas tiek realizēti tikai izmēģinājumos uz ceļa (ar riteņu slīdēšanu, uz virsmām ar dažādām saķeres īpašībām, braucot kalnā un lejup no kalna utt.). Sistēmām ar paplašinātu funkcionalitāti jāļauj veikt arī energoiekārtu izmēģinājumus ar vairākiem agregātiem, tajā skaitā – ar mehāniski nesaistītiem.

KEI darba rādītāju identifikācijas metodes izveide un KEI laboratorijas izmēģinājumu funkcionālo iespēju paplašināšana var tikt panākta, kombinējot fizisko izmēģinājumu metodes ar skaitļošanas eksperimentiem, kas tiek veikti ar virtuālajiem modeļiem. Pirmajā uzdevumā virtuālajam objektam bija jāatveido fiziskais – tas “jādublē”, esot ar to sinhronizētam pēc izmērāmiem mainīgajiem un rekonstruējot tos mainīgos, kas netiek novēroti fiziskajā objektā. Otrajā uzdevumā virtuālajam objektam jāatveido tā izmēģinājumu objekta daļa, kas laboratorijā nav fiziski klātesoša. Virtuālā un fiziskā objekta mijiedarbībai ir jābūt nodrošinātai tādā veidā, lai to kombinācija atveidotu vienotu KEI sistēmu un apstākļus, kuros tiek veikti tās izmēģinājumi. Tas prasa virtuālās un fiziskās daļas sinhronizāciju reālā laikā.

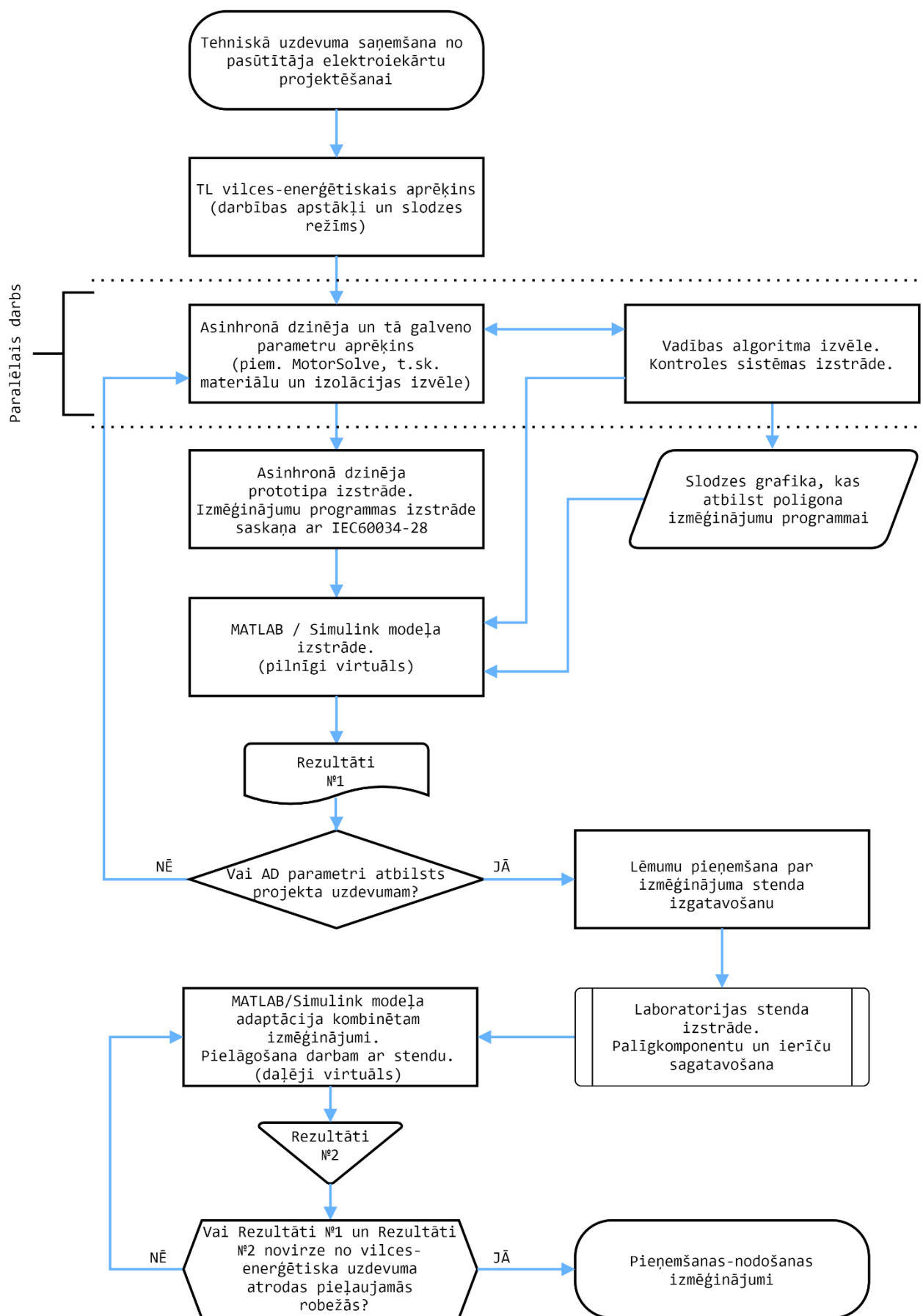
3. KEI KOMPONENŠU IZPĒTE UN DARBA ALGORITMI

Pētāmais KEI objekts un energoiekārtas darba režīmu identifikācijas līdzekļi ir dinamiskas sistēmas, tās var darboties reālā laikā, būdamas sinhronizētas ar izmēģināmo objektu ar programmaparatūras saskarnes starpniecību. Šajā pētījumā modelēšana un izmēģinājumi tiek veikti iepriekš, un reālais objekts ir pārstāvēts ar mērījumu ierakstiem, kas izpildīti, veicot izmēģinājumus.

3.1. TL izmēģinājumu algoritmu sistēma

Saskaņā ar šī darba 2. nodaļā aprakstīto virtuāli fizisko sistēmu izveides principu uz energoiekārtu ar vairākiem spēka agregātiem bāzes šo agregātu slodzes režīmu koordinēšana tiek veikta ar tiem kopīgo virtuālo TL, izmantojot riteņu piedziņu virtuālām daļām un ar tām saistītām noslogojošām ierīcēm. Izmēģinājumu sistēmas shēma, kas izveidota pēc šī principa pētāmai KEI, redzama 3.1. attēlā. Tajā ir parādītas tikai tās darbības un darbi, kas ir svarīgi sistēmas darbības izmēģinājumam. Algoritma darbības iedalīta divos zaros – virtuālajā (*MATLAB* vidē) un fiziskajā (laboratorijā). Abi zari sākas kopējā blokā, kurā tiek veidoti sākotnējie TL dati – masa, kustības ātrums, darbības apstākļi, pamata gabarītmēri utt. Šī informācija kalpo par pamatu transportlīdzekļa izstrādē, un komponenti tiek izstrādāti tieši TL pienācīgas darbības nodrošināšanai. Fiziskās un virtuālās daļas paralēlā izstrāde nekrustojas līdz attiecīgiem laboratorijas testu un modelēšanas posmiem. Pirms tam virtuālajā daļā tiek noteikti un aprēķināti galvenie KEI komponentu vilces un enerģētiskie parametri un svarīgie mainīgie. Fiziskajā daļā tiek atrisināti TL vadības sistēmas un vadības algoritma jautājumi, jo tas nosaka komponentu nepieciešamību visas sistēmas tālākai izstrādei. Virtuālajā daļā šādas vajadzības nav, visi komponenti var tikt modelēti, tāpēc šis posms ir īpaši svarīgs tieši fiziskajai daļai. Pēc vadības sistēmas apstiprināšanas sākas asinhronā dzinēja prototipa izstrādes posms. Ir jāņem vērā gan vilces un enerģētiskie, gan temperatūras raksturlielumi. Pēc tam transportlīdzekļa KEI stenda izmēģinājumu laboratorijā visi svarīgie komponenti tiek salikti vienotā slodzes stenda sistēmā atklūdošanai un testiem.

Virtuālajā daļā tiek izstrādāts aprēķinātais virtuālais modelis, kas kalpos kā virtuālās slodzes stends ar elektrodzinējiem, un KEI elektroiekārtas. TL modeļa aprēķinātās shēmas tiek izmantotas vispārējam kustības gadījumam – taisnai kustībai, tomēr atkarībā no izpildāmo izmēģinājumu tipa modelis var tikt modificēts un var apaugt ar papildu blokiem, piemēram, ar riepu bloku un virsbūves bloku. Gatavu virtuālo modeli, ja nepieciešams, pieslēdz stendam, sinhronizējot sistēmas fizisko un virtuālo daļu, tādējādi ar stenda palīdzību iegūstot nenovērojamo mainīgo vērtību rezultātus. Dažos gadījumos tas palīdz atklūdot vadības sistēmu un algoritmu, jo sensori var nebūt visur un nav iespējams saņemt atgriezenisko saišu signālus.



3.1. att. TL izmēģinājumu algoritms.

Šajā algoritmā tiek realizēta AD testēšana ar savstarpējās slodzes metodi. Cietā sakabe ar uznavas palīdzību tiek izmantota divu AD tiešai savienošanai. Pirmais M1 dzinējs var darboties kā vilces dzinējs un reproducēt slodzes ar TL patvaļīgas masas imitāciju un, izmantojot cieto sakabi, ir savienots ar otro dzinēju, kas jau darbojas ģeneratora režīmā. Šo metodi sauc arī par divu vienādu mašīnu metodi. 3.2. attēlā redzama aprakstītā stenda fotogrāfija. Divi dzinēji M1 un M2, kas ir mehāniski savienoti, tiek pieslēgti trīsfāžu sprieguma avotiem, no kuriem viens spēj mainīt barošanas frekvenci. Uz dzinēju M1 tiek padots spriegums, dzinējs M2 tiek pārvests ģeneratora režīmā, samazinot barošanas frekvenci. Izmēģinājums ir jāsāk ar frekvenci, kurā strāva dzinējā M1 ir 150 % no nominālās vērtības. Pakāpeniski palielinot M2 barošanas frekvenci, dzinēju M1 pārved ģeneratora režīmā, savukārt ģeneratoru M2 – dzinēja režīmā.

Izmēģinājums ir jābeidz, kad dzinēja barošanas strāva ir vienāda ar 150 % no nominālās vērtības. Izmēģinājuma laikā ir jāveic strāvu, spriegumu, ieejas un izejas jaudu un tinumu pretestību mērījumi apkārtējās vides temperatūrā un tad, kad tie ir sasiluši. Jāatzīmē arī tas, ka pirms izmēģinājumu sākuma jāizmēra mehāniskie zudumi un tērauda zudumi. Papildus diviem minētajiem zudumiem AD ir papildu zudumi, kas neietilpst tiešam aprēķinam pieejamo zudumu kategorijā.



3.2. att. Divu AD – vilces dzinēja un ģeneratora režīmā –, kas savienoti ar cieto sakabi, darbības stendu fotogrāfija.

Rezumējot var atzīmēt vairākas šī KEI izstrādes un testēšanas metodikas algoritma priekšrocības.

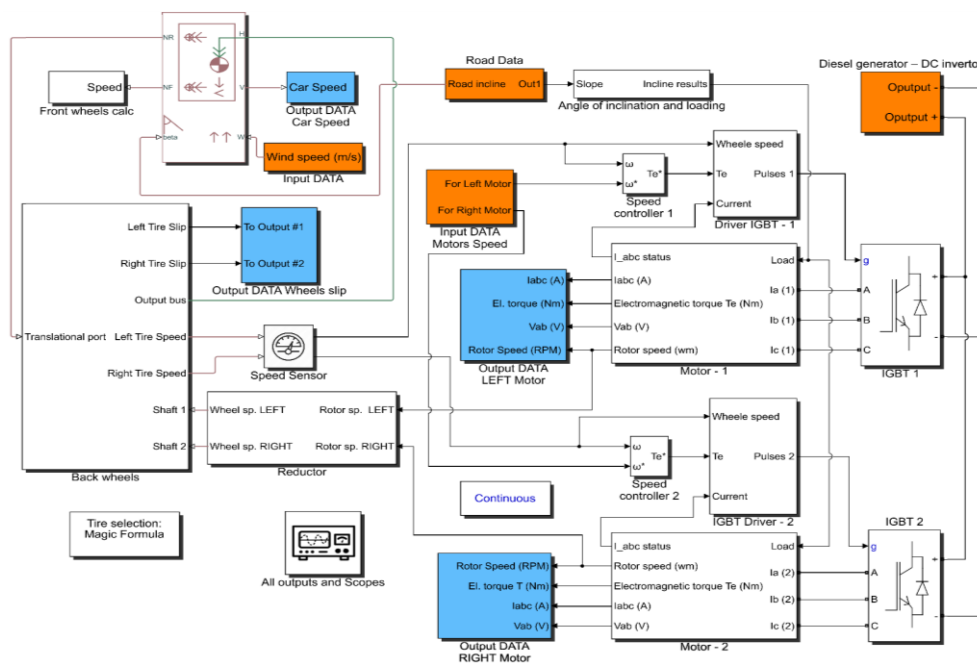
1. Ļauj testēt un izstrādāt sistēmas ar dažādu ražotāju elektroiekārtu komponentēm, kas atšķiras pēc parametriem. Šāds algoritms ļauj, mainot tikai ierīces parametrus, izpētīt šo aparātu, neveicot izmaiņas vadības sistēmas struktūrā.
2. Energoiekārtu agregātu stendu izmēģinājumu funkcionālo iespēju paplašināšana, izmantojot sistēmas ar virtuāliem objektiem. Šo objektu sintēzei ir iespējama

vispārinātā pieeja, kas sastāv no slēgtu automātiskās vadības sistēmu virtuālās un fiziskās daļas kā sinhronizācijas līdzekļu izmantošanas.

3. Šis algoritms var samazināt laiku stenda izmēģinājumu sistēmas izpētei un taupa laboratorijas, kurās tiek veikts pētījums, elektrisko enerģiju. Šādi veicot izmēģinājumus, var pārbaudīt divu agregātu darbību vienlaikus.

3.2. KEI virtuāli fizikālās testēšanas laboratorijas sistēmas izstrāde

Lai realizētu TL un energoiekārtas matemātiskos modeļus, tika veikta to diskretizācija. 3.3. attēlā redzamās apakšsistēmas pārstāv pētāmā objekta mezglus un agregātus. Apakšsistēmās atrodas dažādas modeļu sastāvdaļas (diferenciālvienādojumi, loģiskie bloki, tabulu veidā definētas funkcijas), kas grupētas pēc piederības principa pie tā vai cita TL vai tā energoiekārtas komponenta. Ar oranžo krāsu apzīmēti objekti, kuros ir nepieciešams ievadīt datus, ar gaišzilo krāsu – bloki ar izejas (*output*) informāciju. Dzinēja modeļa ieejas un izejas mainīgo sastāvu nosaka tā saites ar citām energoiekārtas un TL modeļa komponentēm un dzinēja rādītājiem, ko nepieciešams aprēķināt, lai atrisinātu pētījuma uzdevumus.



3.3. att. Pētāmā TL matemātiskā modeļa un mainīgo identifikācijas sistēmas realizācija *MATLAB/Simulink*.

3.4. Eksperimenti laboratorijā

Laboratorijas stendu izmēģinājumu sistēmas izveidošana, kas paredzēta raksturojumu izpētei un to atbilstības apstiprināšanai KEI projektētam un tās vadības sistēmas testēšanai energoiekārtas darba imitācijas ceļā, ir primārais uzdevums. KEI izmēģinājumu programmas prioritārie kustības režīmi ir TL ieskriešanās/bremzēšana, braukšana kalnā/no kalna ar

slīpumu no 0 % līdz 18 %, savukārt paātrinājums atbilstu reāla transportlīdzekļa paātrināšanai līdz 90 km/h.

KEI stenda izmēģinājumi realizēti uz AS “Rīgas elektromašīnbūves rūpnīca” agregātu laboratorijas bāzes. Vilces aprīkojuma izmēģinājumu stenda kopskats laboratorijā redzams 3.4. attēlā. Tika izstrādāti un uzstādīti pārbaudes stendi, uz viena no tiem tika izvietota energoiekārta, kas realizē dīzeļģeneratora darbu.

KEI agregātu mijiedarbību ar izmēģinājumu objekta virtuālo daļu nodrošināja slodzes iekārtas, kas savienotas ar stingro sakabi, izmantojot uzmavu.



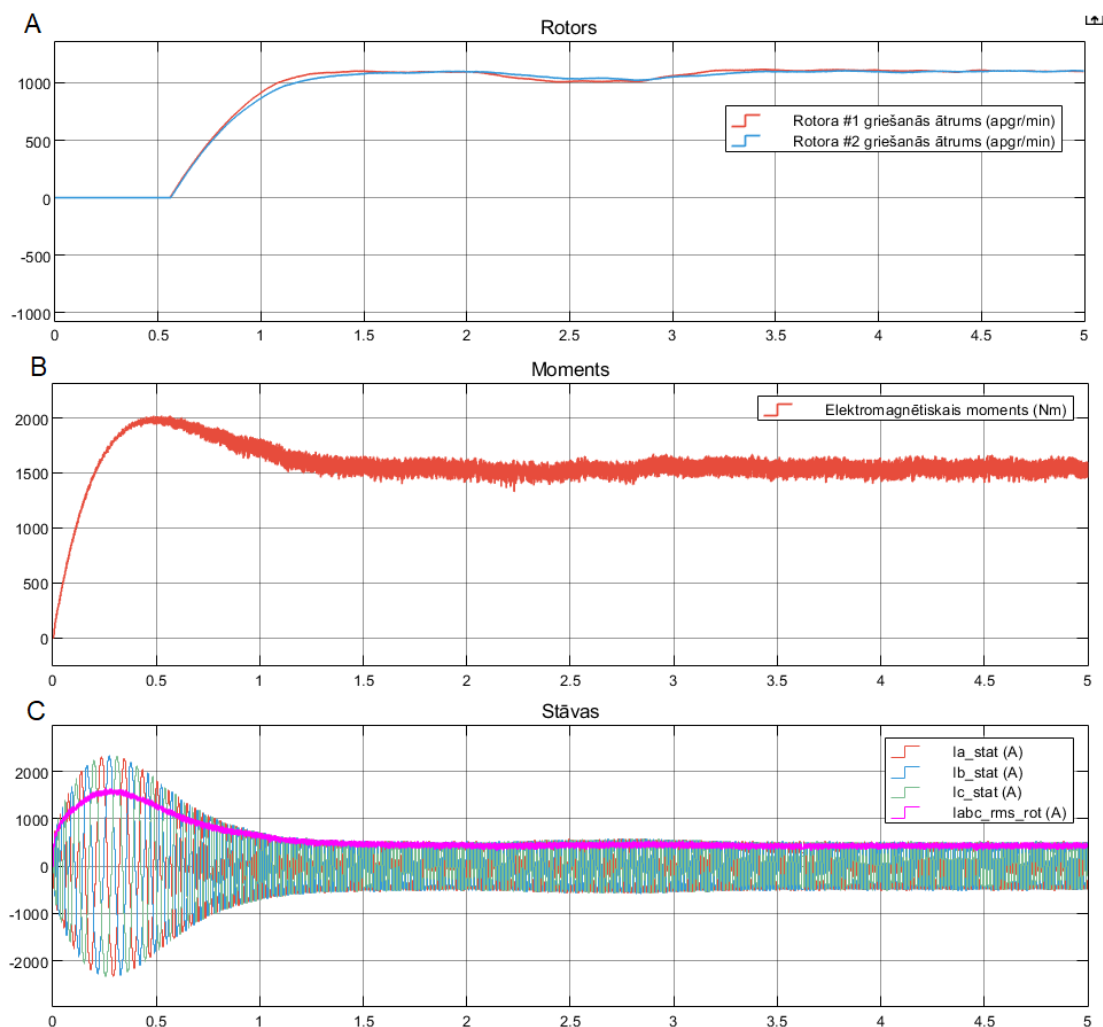
3.4. att. AS “Rīgas elektromašīnbūves rūpnīca” agregātu laboratorija.
Laboratorijas kopskats.

3.5. attēlā redzamajos grafikos virzienā no augšas uz leju parādīti šādi mainīgie:

- rotora griešanās ātrums (n);
- AD momentānā jauda;
- statora strāvas AD1 un AD2.

KEI rādītāji, kas iegūti no CAN kopnes:

- griešanās frekvences pēc devēja rādījumiem uz automātiskās pāresumkārbas (APK) izejas vārpstas;
- akseleratora pedāļa signāls (aks.), ko uz KEI kontrolleri pārraida vadītāja modelis;
- kopnes spriegums;
- iekšdedzes dzinēja (IDD) vārpstu griešanās frekvences (n).



3.5. att. Virtuālā TL ar fizisko KEI ieskrējiena modelēšanas rezultāti: A – ir vilces dzinēja un dzinēja balsta slodzē apgriezieni ģenerators režīmā; B – elektromagnētiskais moments M ; C – statora fāzes strāva I_s , rotora fāzes reducētā strāva $I_{abc_rms_rot}$.

Veiktie izmēģinājumi parādīja, ka noslēgtā vadības sistēma ar diviem kontrolleriem, kas savieno fizisko un virtuālo objektu, ir darbaspējīga un stabila. Noslogojošās iekārtas kontrolleris nodrošināja pieņemamu modeļa definētā vārpstas leņķiskā ātruma izsekošanas kvalitāti. “Vadītāja” modelis kopumā nodrošināja pieņemamu cikla izpildes kvalitāti: griešanās ātruma vidējā novirze no definētā bija ap 2 %. Paaugstinātās novirzes galvenokārt ir saistītas ar elektromašīnas atbildes aizturēm [2], [3].

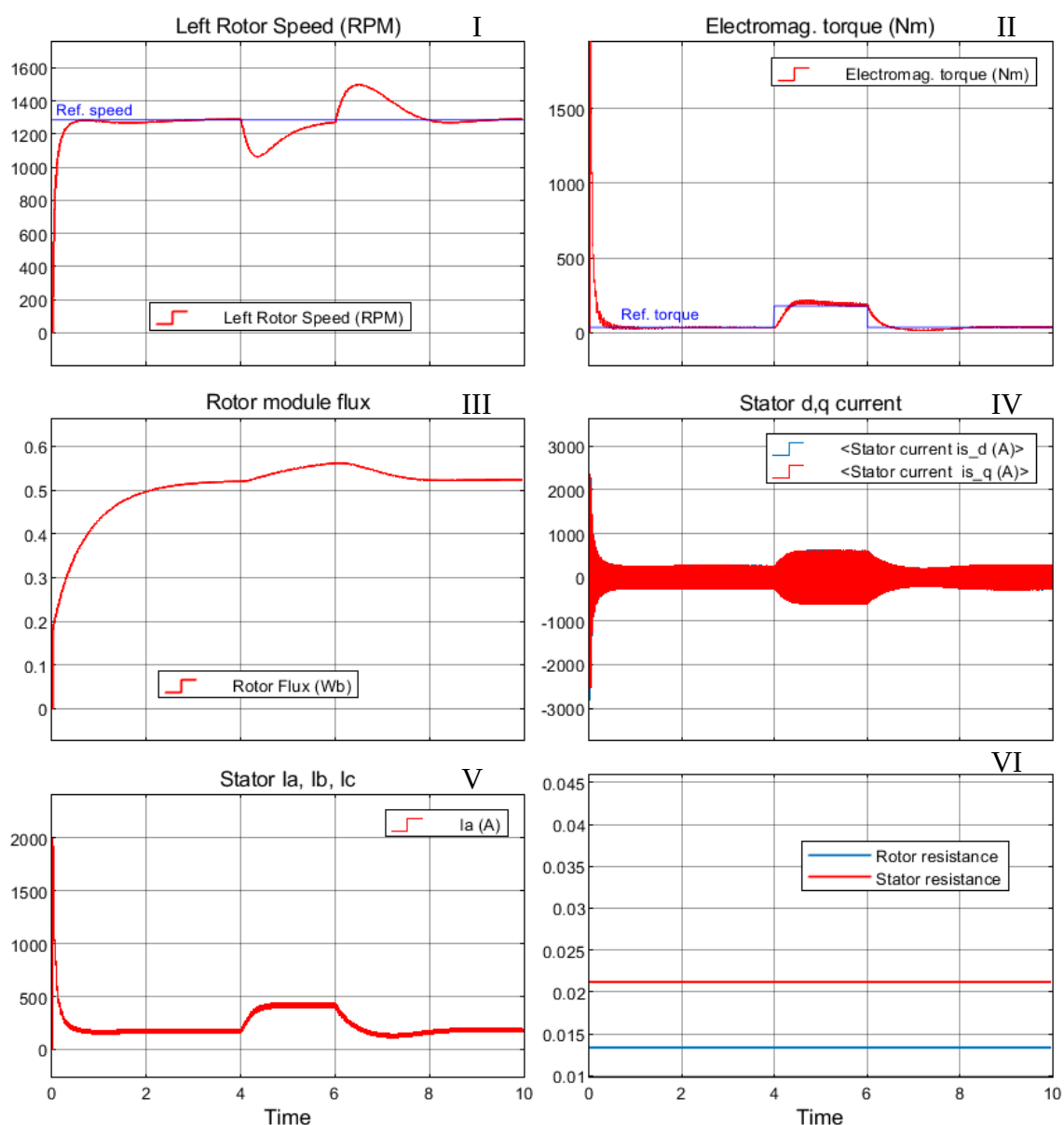
3.5. Vektoru vadības izpēte programmā *Simulink*

Modelēšana tika veikta *Simulink* vidē atbilstoši 3.9. attēlā redzamajai shēmai (izvērstā versija – pielikumā). Vektoru vadības sistēmas novērtējamais ātrums ω tika izmantots atgriezeniskās saites signāla vietā no rotora stāvokļa devēja. Modelī izmantotajiem dzinēja parametri redzami 3.1. tabulā.

AD bezdevēju vektoru vadības sistēmas ciparu modelēšanas rezultāti (3.6. att.) ir parādīti ar PI regulatoru.

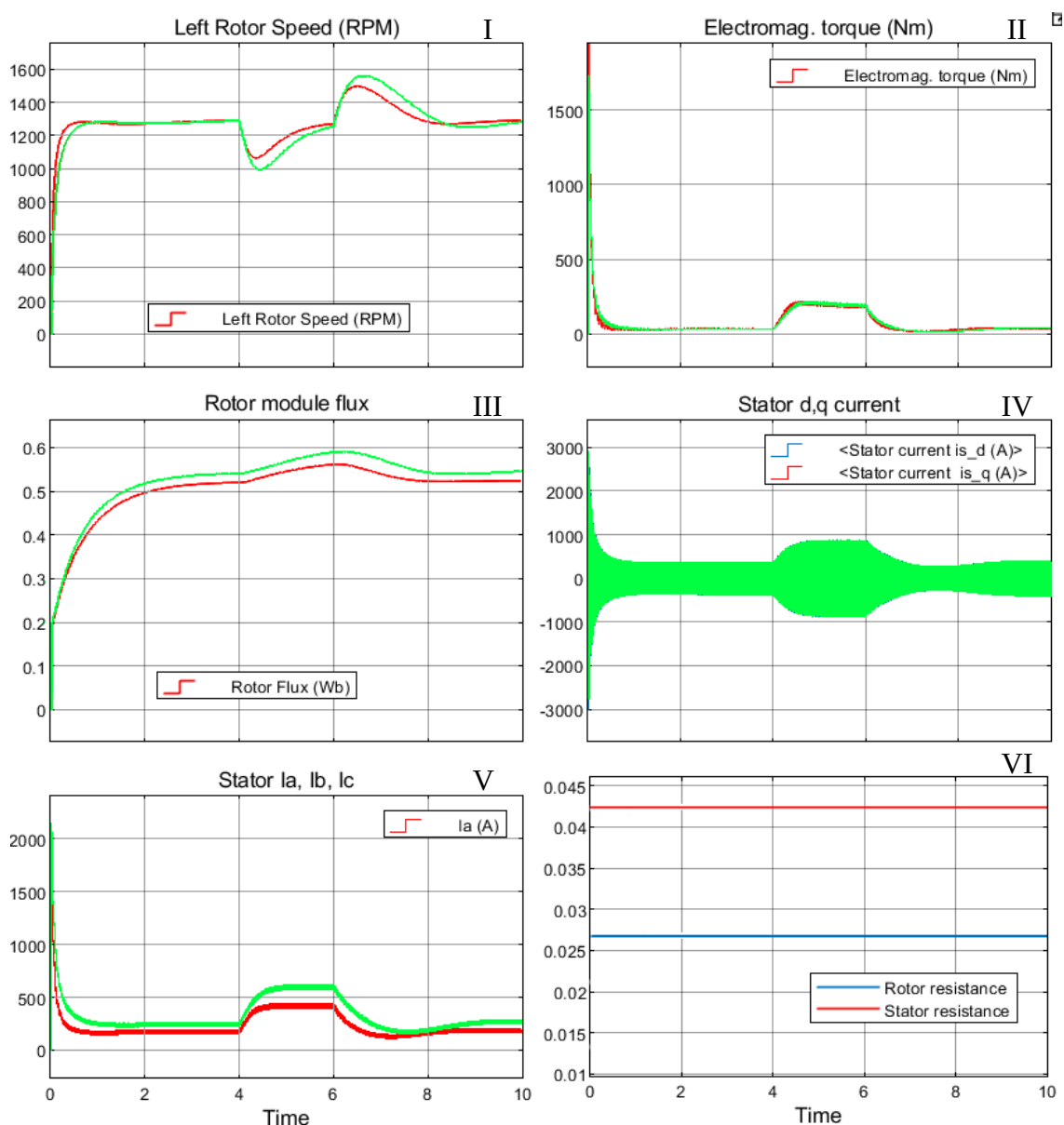
Pētāmā elektrodzinēja parametri

Nominālā jauda P	170 kW	R_s	0,030 854 Ω
Nominālais fāzes spriegums	530 V	R_r	0,0222 Ω
Polu skaits	3	L_s	0,000 616 H
Strāvas frekvence	43 Hz	L_r	0,000 527 H
Nominālais apgriezienu skaits	4500 apgr/min	L_m	0,016 718 H



3.6. att. Pārejas procesi sistēmā ar PI regulatoru, palaižot AD ar nominālo griešanās frekvenci (palaišana, slodzes uzmetums, slodzes noņemšana): I – atkarībā no griešanās frekvences; II – atkarībā no elektromagnētiskā momenta; III – rotora plūsmas saķēdējuma vektora modulis; IV – atkarībā no strāvas d un q asīs; V – atkarībā no statora fāžu strāvas; VI – rotora un statora aktīvās pretestības.

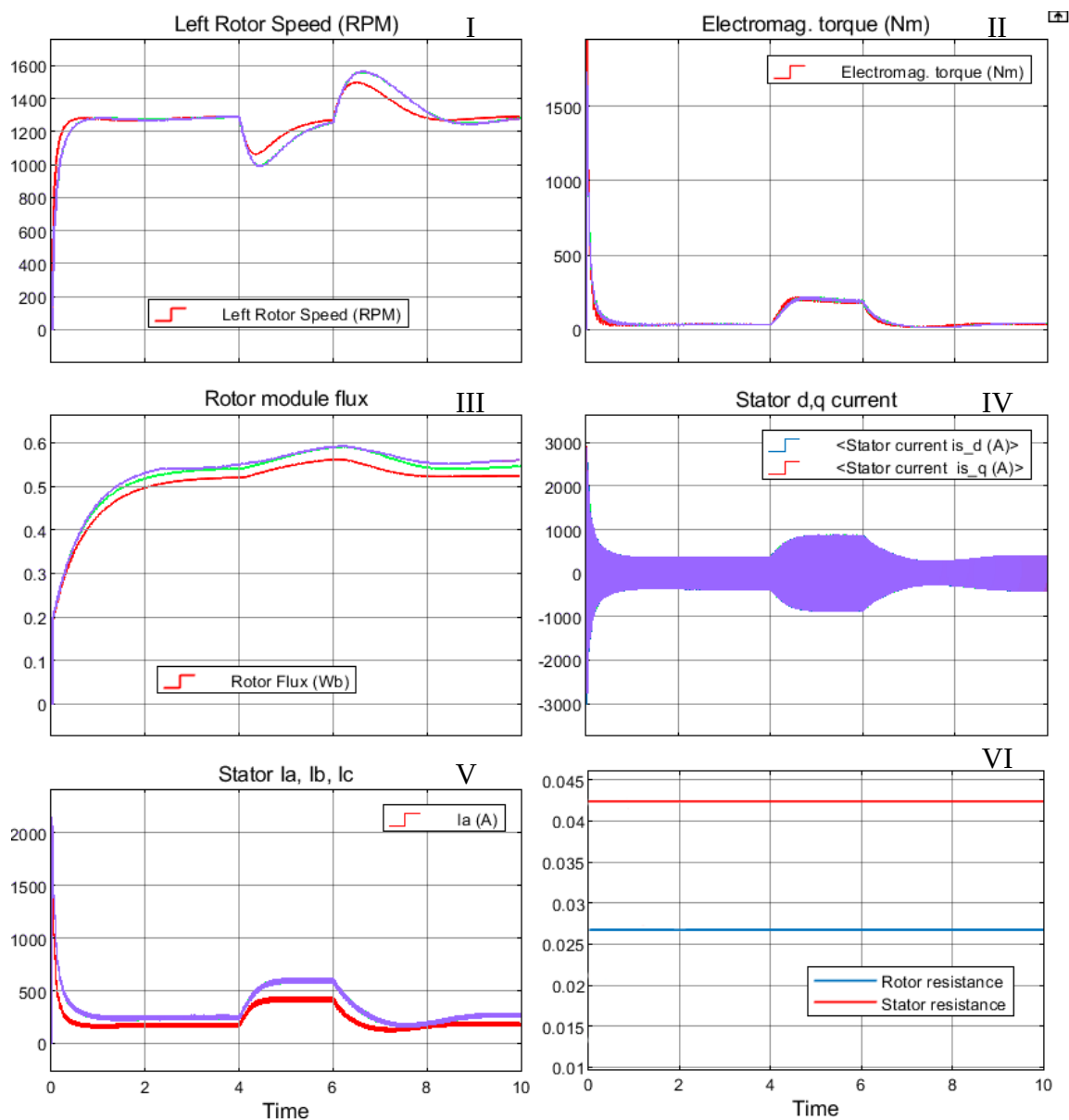
Reālā vektoru vadības sistēmā nav iespējams precīzi definēt dzinēja parametrus, turklāt daži no tiem darba procesā izmainās, piemēram, statora un rotora aktīvās pretestības termiskā izmaiņa var veidot vairāk nekā 50 % no nominālās (3.6. attēlā redzamā grafika rezultāti pret 3.7. un 3.8. attēlā redzamo grafiku rezultātiem). Tāpēc tika veikta sistēmas nejutīguma novērtējuma modelēšanas pārbaude, izmainoties dzinēja parametriem, un divas reizes tika palielināta rotora un statora aktīvā pretestība. Citos vektoru vadības sistēmas izmēģinājumos tika konstatēts, ka pretestības izmaiņas līdz 50 % ir niecīgas, līdz ar to aprēķinu var reducēt līdz mērījumu kļūdai, tomēr, izmainot pretestību par vairāk nekā 50 %, rezultāts kļūst acīmredzamāks (rezultāti attēloti 3.7. att. (ar zaļo līkni)).



3.7. att. Rotora un statora aktīvo pretestību divkārtšā izmaiņa.

Kā var secināt pēc 3.7. attēlā redzamajām oscilogrammām, aktīvās pretestības divkārtšā izmaiņa praktiski neietekmē tā griešanās ātrumu. Apgrīzieni joprojām atjaunojas pareizi, rotora moments atbilst definētajam, ir mainījies tikai strāvas patēriņš, kas ir labi redzams

oscilogrammās, tāpēc var teikt, ka parametru izmaiņas ietekmei uz vektoru vadības sistēmas darbaspēju kopumā ir nenozīmīgs raksturs. Ir jāņem vērā arī tas, ka vektoru vadības sistēmā reālajā laikā var izsekot dzinēja parametru izmaiņām ar devēju palīdzību un ievadīt korekcijas. 3.8. attēlā redzama aprēķinātā vektoru vadības shēma, ņemot vērā pretestību izmaiņas elektrodzinējā (violetā krāsā), kur pēc oscilogrammu rezultātiem ir redzama vienīgā nozīmīgā izmaiņa rotora references plūsmu saķēdējumā $|\psi_r|^*$.



3.8. att. Shēmas aprēķina rezultāti ar izmaiņām adaptīvajā rotora un statora pretestību vektoru vadības modelī.

Ir izpētītas AD griešanās ātruma novērošanas sistēmu konstruēšanas bāzes metodes, kas izmanto novērotāju uz adaptīvā modeļa pamata. Kā liecina pētījumi [2], [3], [11], šādu sistēmu tradicionālās konstruēšanas metodes izrādās darbnespējīgas mazu un nulles ātrumu apgabalā nelineārās saites dēļ starp ātruma novērojuma kļūdu un mainīgo stāvokļu

atjaunošanās kļūdu. Kā parādīja modelēšana, šī metode izrādījās pietiekami nejutīga pret AD parametru izmaiņām, izņemot statora aktīvo pretestību. Augstais sistēmas jutīgums pret R_s ir saistīts ar to, ka šis parametrs ietilpst integrēšanas operācijā (integrēšanas operācijai piemīt īpašība uzkrāt kļūdu) šī novērotāja etalonmodeļa vienādojumā. Pie ievērojamas tā izmaiņas tiek ietekmēti atkarīgie aprēķini: rotora plūsmas saķēdējuma modulis un stāvoklis Θ_e ir nepieciešami koordinātu, kas tiek ģenerētas no rotora ātruma ω_m un slīdes frekvences ω_{sl} , pārveidošanai. Šīs metodes priekšrocība izmantošanai vektoru vadības sistēmās ir tās nesarežģītā vadība un izpratnes vienkāršums. Tomēr, lai šāda sistēma būtu darbaspējīga, ir nepieciešams statora aktīvās pretestības identifikācijas mehānisms. Līdz ar to, risinot diferenciālvienādojumus, kas ietilpst novērotāja matemātiskajā aprakstā uz adaptīvā modeļa pamata, tiek izmantota integrēšanas operācija, kas rada noteiktus sarežģījumus aprēķinos. Biežai integrēšanai piemīt aprēķinos integrēt kļūdu no neprecizitātes parametru uzdošanā.

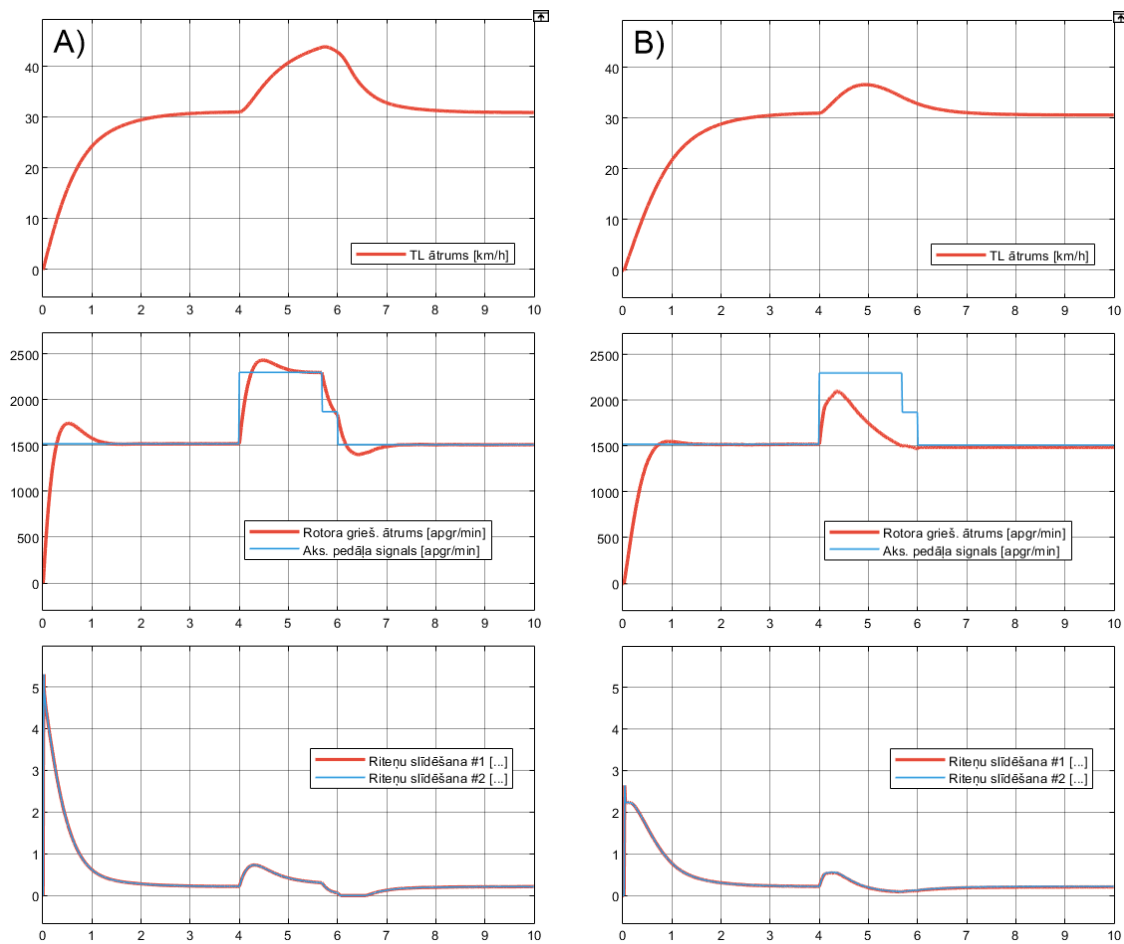
Modelim tiek pievienots arī TL virsbūves ķermeņa bloks, kas ir automobiļa divasu virsbūve garenvirziena kustībā. Modeļa transportlīdzeklī ir četri vienādi riteņi katrā ass galā, ir arī smaguma centrs, kas atrodas kustības plaknē. Bloks ņem vērā ķermeņa masu, aerodinamisko pretestību, ceļa slīpumu un svara sadalījumu starp asīm ieskrējiena un ceļa profila dēļ. Blokam ir iespēja iekļaut ārējo masu un ārējo inerci. Reaģējot uz sistēmas izmaiņām, modelēšanas gaitā transportlīdzekļa virsbūves masa, inerce un smaguma centrs var mainīties. Obligāta ir arī frontālā platība – efektīvais šķēsgriezuma laukums, kad transportlīdzeklis atrodas garenvirziena kustībā. Bloks izmanto šo vērtību, lai aprēķinātu transportlīdzekļa aerodinamiskās pretestības spēku. Turklāt pastāv arī aerodinamiskās pretestības koeficients. Bloks izmanto arī šo vērtību, lai aprēķinātu transportlīdzekļa aerodinamiskās pretestības spēku. 3.2. tabulā redzamas galvenās vērtības, ko izmanto transportlīdzekļa virsbūves bloks.

3.2. tabula

Transportlīdzekļa parametri

Nosaukums	Vērtība
Automobiļa pilna masa	164 000 kg
Asu skaits	2
Horizontālais attālums no smaguma centra līdz priekšējai asij	3,29 m
Horizontālais attālums no smaguma centra līdz aizmugurējai asij	1,41 m
Smaguma centra augstums virs zemes	1,175 m
Kabīnes frontālā platība	28,84 m ²
Aerodinamiskās pretestības koeficients	0,9

Fiziski attīstāmu KEI spēka agregātu momentu iedarbībā notiek virtuālā transportlīdzekļa paātrināšanās, ko pavada riteņu slīdēšana un normālo reakciju pārdale. Ievērojama slīdēšana ir novērojama uz riteņiem, kam tiek pievadīta lielākā griezes momenta daļa, ko attīsta energoiekārtas virtuālie agregāti, kustības sākumā. 3.9. attēlā redzams virtuālā automobiļa ieskrējiena modelis.



3.9. att. Virtuālā transportlīdzekļa ieskrējiena (10 sekunžu laikā) modelēšana ar vienādu akseleratora pedāļa līkni: A) TL nav noslogots; B) TL ir noslogots. Parādīti: TL ātrums, dzinēja rotora apgriezieni, riteņu slīdēšana.

3.6. Rezultātu salīdzinājums

Atšķirību starp eksperimentālajiem un skaitļošanas eksperimentu rezultātos iegūtajiem datiem var noteikt pēc momentu identifikācijas regulatoru darba kļūdas. Regulatora darba precizitāti nosaka koeficientu lielumi, kuru regulējumiem savukārt ir jānodrošina līdzsvars starp pašu uzdevuma signāla izsekošanas precizitāti un tā dēvēto regulatora stingrumu. Regulators ar lielu pastiprinājuma koeficientu var nodrošināt augstu precizitāti, tomēr kompensējošajām reakcijām uz vadāmā signāla novirzi no definētā var būt pārāk liela amplitūda, izraisot kompensējošās iedarbības svārstības plašā diapazonā, padarot sarežģītu attiecīgā komponenta darba režīmu identifikāciju. Lai novērstu šo trūkumu, pastiprinājuma koeficienti tiek samazināti, kas zināmā pakāpē pazemina regulēšanas precizitāti. Pie otrā kļūdu tipa pieder modeļa kļūdas, proti, tā izejas mainīgo atbildes neprecizitātes uz ieejas darbībām. Ieejas signālus ģenerē identificējošie regulatori, tāpēc regulatoru kļūdas tiek pievienotas modelēšanas kļūdām.

Skaitļošanas eksperimentos vidēji kvadrātiskās regulēšanas kļūdas veidoja: AD griešanās frekvencēm – 0,05...0,94 %, strāvas stiprumam – 1,5...7,0 %. Modelēšanas kļūdas spriegumam – 0,44...4,50 %.

NOBEIGUMS UN REZULTĀTI

Darbā sniegta divu KEI testēšanas metožu – pilnībā virtuālās *MATLAB/Simulink* sistēmas un kombinētās sistēmas – analīze laboratorijas apstākļos, dots salīdzinājums. Ir izstrādāta KEI virtuāli fizisko instrumentu izpētes metodika. Metodikas iespējams izmantot rūpnieciskos izmēģinājumos, kur pamatā kā sinhronizācijas līdzekļi tiek lietotas noslēgtu automātiskās regulēšanas sistēmu virtuālās un fiziskās daļas. Šī pieeja nodrošina divu tipu izpētes uzdevumu atrisināšanu:

- AD vai KEI izmēģinājumos neizmērāmu mainīgo identifikācija ar virtuālā objekta starpniecību;
- energoiekārtu izmēģinājumu funkcionālo iespēju paplašināšana uz agregātu stendiem ar virtuālo objektu (piemēram, kustības apstākļi un noslodze) palīdzību.

Sistēmas fiziskās un virtuālās daļas darba saskaņošana atbilstoši piedāvātajai metodikai ļauj adekvāti atveidot KEI darbu režīmus, kas atbilst transportlīdzekļa kustībai, kas raksturojas ar riteņu kinemātisku griešanos.

Promocijas darbā apskatīti mūsdienu efektīvākās vilces elektropiedziņas sistēmu radīšanas un izmēģinājumu jautājumi. Darbā sniegta vilces elektropiedziņas komplekso izmēģinājumu analīze no efektīvas ražošanas tehnoloģijas viedokļa.

Izstrādātie vilces elektroaprīkojuma izmēģinājumu paņēmieni ļauj kompleksā veidā paaugstināt tās drošumu. Izstrādātās testēšanas metodikas ļauj detalizētāk analizēt elektroaprīkojuma atbilstību projektēšanas sākuma prasībām.

Detalizētai abpusējās slodzes shēmas darbības analīzei programmas *MATLAB (SIMULINK)* bloku bibliotēka) vidē izveidots sistēmas asinhronais dzinējs – asinhronais ģenerators modelis. Modelis sastāv no: trīsfāžu maiņstrāvas avota, kura iestatījumu logā tiek iestatīti amplitūdas un frekvences parametri; frekvences pārveidotāja ar līdzstrāvas posmu, kas sastāv no vadāma taisngrieža un invertora; asinhronajām mašīnām, kurām iestatījumu logā ir uzdots rotora tips, nominālie parametri (jauda, spriegums, frekvence, polu pāru skaits) un ekvivalentās shēmas parametri (aktīvās un induktīvās pretestības), kā arī mehāniskās daļas raksturlīknes (inerces un berzes momentiem). Mašīnu slodzi modelē momenta uzdošanas bloks, spriegumu, strāvu, momentu un ātrumu mērījumus veic mainīgo stāvokļu mērījumu bloks un mēraparāti. Asinhrono vilces elektrodzinēju ekvivalentās shēmas parametri ir aprēķināti, pamatojoties uz nominālajiem datiem.

Elektromehāniskie procesi asinhronajās mašīnās ar kopīgu vārstu ir savstarpēji saistīti, jo mašīnu elektromagnētiskos momentus nosaka kopīgais slodzes moments uz kopīgās vārpstas. Asinhrono mašīnu ar kopīgo vārpstu modelēšana ir jāveic, matemātiski aprakstot vienlaikus abas mašīnas, ņemot vērā abu mašīnu magnētiskās ķēdes piesātināšanu, mašīnu momentu savstarpējo sakarību, vienlaikus ņemot vērā abu mašīnu parametru maiņu, mainoties darbības režīmiem pie iespējamās sprieguma nesinusoiditātes.

Izstrādātais algoritms divu mašīnu sistēmas, kas sastāv no asinhronā vilces dzinēja un asinhronā slodzes dzinēja ar kopēju vārpstu, pārbaudei pēc savstarpējās slodzes metodes ar asinhronā dzinēja barošanu no regulējamās frekvences un sprieguma un asinhronā slodzes dzinēja darbības pārveidotāja uz nemainīgās sprieguma frekvences līdzstrāvas posmu ļauj

veikt elektromehānisko procesu eksperimentālos pētījumus asinhronajās mašīnās ar kopīgu vārpstu. Izstrādātā metodika, algoritms un datorprogramma ļauj veikt elektromehānisko raksturlielumu eksperimentālos pētījumus automatizētā režīmā.

Elektromehānisko procesu aprēķināto un eksperimentālo pētījumu rezultātu salīdzinājums divu mašīnu agregāta izmēģinājumu sistēmā un enerģijas rekuperāciju slēgtā ķēdē parāda, ka ticamākie aprēķinātie rezultāti ar kļūdu, kas nepārsniedz 5 %, nodrošina aprēķina metodikas izmantošana ar tiešiem savstarpēji saistītu elektromagnētisko lauku aprēķiniem dzinējā un ģeneratorā ar kopsakarību pēc vārpstas elektromagnētiskā momenta. Secīga modeļa izmantošana elektromehānisko procesu izpētei šādās elektromehāniskajās sistēmās var izraisīt mašīnu elektromehānisko procesu noteikšanas kļūdas dinamiskajos darbības režīmos, kas pārsniedz 30 %.

Konstatēts, ka asinhronā dzinēja darbība no regulējamās frekvences pārveidotāja ar sprieguma impulsu ilguma modulāciju divu mašīnu agregāta sastāvā, izmēģinot ar savstarpējas slodzes metodi, salīdzinot ar dzinēja sinusoidālās formas sprieguma barošanu, izraisa dzinēja patērējamās aktīvās jaudas palielināšanos par 5–7 % un reaktīvās jaudas palielināšanos par 6–8 %.

Izstrādāta izmēģināmo virtuāli fizisko objektu sistēmas radīšanas metode, kas vienlaikus ir vilces elektropiedziņu izpētes un izstrādes instruments. Šo objektu sintēze ir iespējama automātiskās vadības slēgto sistēmu virtuālo un fizisko daļu kā sinhronizācijas līdzekļu izmantošanas ietvaros. Šī pieeja nodrošina divu veidu pētījumu uzdevumu atrisināšanu:

- vilces elektrisko dzinēju izmēģinājumu laikā neizmērāmo, piemēram, griezes momentu, identifikācija, izmantojot virtuālo objektu, kas dublē fizisko; identifikācijas metode tiek realizēta, nosakot transportlīdzekļa dinamiku, ar operatora modeli izmēģinot mainīgos ar regulatoriem, kas iedarbina pētāmā objekta modeli, automātiski nosakot nezināmos griezes momentus spēka elektropiedziņā;
- energoiekārtu izmēģinājumu agregātu standos funkcionālo iespēju, izmantojot sistēmas ar virtuālo objektu (transportlīdzeklis, kustības apstākļi), kas papildina fizisko objektu, paplašināšana; ir pamatots slodzes radīšanas princips šāda veida sistēmās.

Identifikācijas procedūras rezultātu verifikācija, kas izpildīta, praktiski realizējot asinhronā dzinēja vektoru vadības sistēmas, izmantojot identificēto parametru vērtības, apstiprina, ka izstrādātais algoritms nodrošina parametru noteikšanas nepieciešamo precizitāti. Vienlaikus tiek nodrošināti dinamiskie un statistiskie vadības kvalitātes rādītāji, kas neatšķiras no teorētiskajiem par vairāk nekā 5 %. Izstrādātie algoritmi nodrošina daudz ātrāku veikspēju, salīdzinot ar izmantojamiem sērijveida izstrādājumos, kas ļauj precizēt AD parametrus ražošanas tehnoloģiskajā procesā.

Piedāvātās metodikas un aprēķinu modeļus var izmantot, lai prognozētu elektromehāniskos procesus vilces elektropiedziņā, lai novērstu vilces elektroiekārtu bīstamus darbības režīmus ekspluatācijas laikā.

Darba pamatrezultāti

- Izstrādāta elektropiedziņas darbības novērtēšanas metodika, ņemot vērā vilces pārveidotāja ierobežojumus, kas ļauj noteikt nepieciešamo jaudu un regulēšanas diapazonu vilces elektriskajam mašīnām, respektīvi, asinhronajiem elektrodzinējiem.
- Izstrādāts uz laboratorijas stendiem aprobēts jaudas plūsmu vadības algoritms hibrīda transmisijai, kas darbojas transmisijas līdzsprieguma ķēdē un nodrošina izmēģinājumu aprīkojuma autonomu darbību un stabilu enerģētisko bilanci starp jaudas avotu un patērētāju.
- Aprīkojumam ir izstrādāts virtuāli fiziskā izmēģinājuma izstrādes algoritms, ko var izmantot vilces aprīkojuma vadības funkcijas testēšanai un atestācijai.
- Izstrādāts programmaparatūras vilces elektropiedziņas izstrādes un vadības funkcijas darbības analīzes un prototipēšanas komplekss, tajā skaitā – bāzes struktūru piemēri asinhronajiem vilces elektrodzinējiem.

Darba izstrādē iegūtā pieredze ļauj veikt vilces elektroaprīkojuma komplektu un vadības algoritmu projektēšanu īsos termiņos, nodrošinot transmisijas un tās elementu darbības diagnostiku, drošus izmēģinājumus laboratorijās un pie nodošanas ekspluatācijā.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Blaschke F. *Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen*. Siemens Zeitschrift, 1971. Bd. 757.–760. lpp.
- [2] Dvorņikovs I., Marinbahs, M., Sļiskis, O., Ketners, K. *Investigation of Autonomous Traction Motor Dynamic Using Method of Mutual Loading and Computer Simulation*. 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. RTUCON 2018.
- [3] Dvorņikovs I., Marinbahs, M., Zarembo, J., Groza, E., Ketners, K. *Investigation of Traction Motor Dynamic Using Computer Simulation and Method of Mutual Loading of Two Pair Motors*. 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems. IEEE ELMA 2019.
- [4] Fredriksson J., Silberholz G., Six C. *Final report of the Research Program (VTP1) on an Emissions and CO2 Test Procedure for Heavy Duty Hybrids (HDH). Final Report*. TNO report, TU Graz, Chalmers Univ. of Technology, IFA, 2013. 136 lpp.
- [5] Guzzella L., Sciarretta A. *Vehicle Propulsion Systems. Introduction to Modeling and Optimization*. Third Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 409 lpp.
- [6] Halbach S., Sharer P., Pagerit S., Folkerts C., Rousseau A. *Model Architecture, Methods, and Interfaces for Efficient Math-Based Design and Simulation of Automotive Control Systems*. SAE Technical Paper. – 2010. – no. 2010-01-0241. 11 lpp.
- [7] Isermann R. *Mechatronic Systems Fundamentals*. Springer-Verlag London Limited, 2005. 19.–21., 293.–331. lpp.
- [8] Mohamed S. Z. *A stable adaptive flux observer for a very low speed-sensorless induction motor drives insensitive to stator resistance variations*. Faculty of Engineering, Minoufiya University, Egypt 2011. 5.–7. lpp.
- [9] Ohyama K., Asher G., Sumner M. *Comparative Analysis of Experimental Performance and Stability of Sensorless Induction Motor Drives*. IEEE Trans. Indus. Electr. – February 2006. – vol. 53, no. 1., 178.–186. lpp.
- [10] Rousseau, A., Sharer, P., and Besnier, F. *Feasibility of Reusable Vehicle Modeling: Application to Hybrid Vehicles*. SAE Technical Paper. – 2004. – no. 2004-01-1618.
- [11] Schröder Dierk. *Elektrische. Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*. München, 2009.
- [12] Six C., Silberholz G., Fredriksson J., Geringer B., Hausberger S. *Development of an exhaust emission and CO2 measurement test procedure for heavy-duty hybrids (HDH). Final Report of the Institutes*. Vienna University of Technology, Institute for Powertrains & Automotive Technology IFA, 2014, – 118 lpp.

- [13] Диаб А. А. Заки. *Векторное управление асинхронными электроприводами на основе прогнозирующих моделей*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск 2014. 49.–50. lpp.
- [14] Куликов И. А., Селифонов В. В. *Математическое моделирование движения автомобиля с гибридной силовой установкой параллельного типа*. НАМИ. – 2009. – выпуск 242.
- [15] Панкратов В. В. *Векторное управление асинхронными электроприводами*. Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. 66 lpp.
- [16] Панкратов В. В., Котин Д. А. *Принципы векторного управления и алгоритмы ориентирования по полю в синхронизированном синхронном электроприводе*. Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2010. – № 4. 46.–51. lpp.