

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Jūlija MAKSIMKINA

Doktora studiju programmas «Enerģētika un elektrotehnika» doktorante

**LIELJAUDAS ASINHRONO DZINĒJU DINAMISKO REŽĪMU
PĒTĪŠANA, IEVĒROJOT VIRSMAS EFEKTU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Profesors *Dr. habil. sc. ing.*,
I. RAŅĶIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2015

Maksimkina J. Lieljaudas asinhrono dzinēju **dinamisko** režīmu pētīšana, ievērojot virsmas efektu. Promocijasdarba kopsavilkums.– R.:RTU Izdevniecība, 2015.– 35 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta 2015. gada 4.septembra lēmumu, protokols Nr.56.

Izsaku dziļu pateicību mana disertācijas darba pirmajam vadītājam asoc.prof. **Andrejam Zviedrim** par interesantās darba tēmas definēšanu un ievadīšanu doktora darba izpildes procesā.

Izsaku sirsnīgu pateicību prof.**Ivaram Raņķim** par darba vadību.

Izsaku dziļu pateicību prof.**Kārlim Ketneram** par konsultācijām un vērtīgo palīdzību asinhrono dzinēju nestacionāro režīmu modelēšanas jautājumos.

Izsaku lielu pateicību lekt.**Uldim Brakanskim** par vērtīgo palīdzību asinhrono dzinēju projektēšanas un pētīšanas jautājumos.

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. g. 17. decembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Vadošais pētnieks *Dr. habil. sc. ing.* Vladislavs Pugačevs
Latvijas Zinātņu akadēmija, Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Gasparjans
Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Algirdas Smilgevičius
Vilniaus Gedimino technikos universitetas

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu patstāvīgi izstrādājusišo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Jūlija Maksimkina(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, nobeigums, literatūras saraksts, 61 zīmējums un ilustrācija, 18 tabulu, kopā 128 lappuses. Literatūras sarakstā ir 130 nosaukumu.

DARBA AKTUALITĀTE

Elektrotehniskā literatūra un mana darba problēmai veltīto zinātnisko rakstu lielais skaits pēdējā laika izdevumos [3, 4, 6, 11–15] liecina par asinhrono dzinēju parametru operatīvo aprēķinu zinātnisko pētījumu aktualitāti arī šodien. Esošajos darbos gan nav stingra analītiskā risinājuma, kā apskatīt virsmas efekta ietekmi uz rotora aktīvo un induktīvo pretestībām. Tikušas izveidotas vairākas neatkarīgas aprēķina metodes, katrai no tām ir savas īpašības un iespējas, kā arī trūkumi. Tādējādi nav izveidojusies korekta procesu aprēķinu metode asinhronajiem dzinējiem ar mainīgiem, no rotora elektromagnētiskajiem procesiem atkarīgiem rotora parametriem dinamisko procesu gaitā [24, 40, 41].

Elektrisko mašīnu pētījumu metodes nepārtraukti paplašinās un pilnveidojas. Izmantoto metožu kvalitātes uzlabošanu var sasniegt, tikai pamatojoties uz mūsdienu datortehnoloģiju plašu izmantošanu. Datorākorekti realizētu matemātisko modeļi var uzskatīt par visuniversālāko pētniecības instrumentu. Šis modelis nodrošina dažādu uzdevumu atrisinājumu, dažādusvarīgāko faktoru ievērošanu, dod iespēju iegūt priekšstatu par parādībām, kas visvairāk atbilst procesiem, kas ir faktiski novēroti izpētes objektā.

Elektrisko mašīnu datoru matemātisko modeļu izstrāde un izpēte atver jaunas perspektīvas elektrisko mašīnu pētījumos ar skaitliskajām metodēm. Elektrisko mašīnu fizikālie pētījumi pieprasa izveidot eksperimentālos paraugus, lielas finanšu izmaksas un nenodrošina tās iespējas, ko sniedz skaitļošanas eksperiments. Skaitļošanas eksperiments ir paredzēts tādiem sarežģītu daudzparametru nelineāru procesu pētījumiem un optimizācijai, kam tradicionālās pētījumu metodes ir pārāk sarežģītas vai nav iespējamās. Iespēja aizstāt reālo objektu ar tā matemātisko modeļi elektrisko mašīnu pētījumos sniedz lielas priekšrocības.

Ņemot vērā iepriekš izklāstīto, promocijas darba tēma par asinhrono elektrodzinēju pārejas procesu pētījumiem ar virsmas efekta ietekmē mainīgiem rotora parametriem motoru dinamiskajos režīmos ir aktuāla un svarīga.

DARBAPĒTĪJUMA OBJEKTS, MĒRĶI UN UZDEVUMI

Promocijas darba pētījuma objekts ir asinhronais dzinējs, pārsvarā gan – ar nominālo jaudu virs 10kW (lieljaudas asinhronais dzinējs).

Promocijas darba **mērķis**: ņemot vērā rotora virsmas efekta ietekmi, izveidot un izpētīt asinhronā dzinēja matemātiskos modeļus statiskajos un dinamiskajos režīmos, kas atbilst mūsdienīgām matemātiskās modelēšanas iespējām.

Lai sasniegtu šo mērķi, darbā ir izvirzīti un atrisināti šādi galvenie **uzdevumi**:

1. izveidot asinhronā dzinēja matemātisko modeli ar virsmas efekta ievērošanu;
2. izstrādāt algoritmus un programmas mainīgo rotoraparametru noteikšanai;
3. veikt asinhronā dzinēja dinamikas aprēķinus, ņemot vērā virsmas efekta ietekmi rotorā;
4. pārbaudīt iegūto modeļu un aprēķinu rezultātuuzticamību.

PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES

1. Asinhronā dzinēja pārejas procesu teorijas pamatnostādņu izpēte darba uzdevumu, mērķu un risināšanas metožu definēšanai.
2. Starptautisko konferenču materiālu, kā arī dažādu ārzemju publikāciju, kas veltīti virsmas efekta rotora rievās ietekmei, analīze.
3. Matemātiskie aprēķini, izmantojot programmu kompleksu *QuickField 5.7*, *MS Excel*, *Fortran* programēšanas valodu, *Power Simulation (PSIM)* modelēšanas datorprogrammas kompleksu.
4. Matemātisko modelēšanu asinhronā dzinēja mainīgo parametru un pārejas procesu aprēķinos.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Promocijas darbā izstrādāta asinhronā dzinēja rotora mainīgo parametru aprēķināšanas metodika, ņemot vērā rotora virsmas efekta ietekmi.

DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS

Autores ierosinātā datorprogramma dod iespēju aprēķināt asinhronā dzinēja pārejas procesu gan ar rotora nemainīgiem parametriem, gan arī ar dažādiem rotora mainīgo parametru izmaiņu veidiem pārejas procesu gaitā. Autores ierosināto metodiku var izmantot ne tikai esošo dzinēju rotora parametru aprēķināšanai (precizēšanai), bet arī **projektējot jaunus** asinhronos dzinējus ar **patvaļīgu** rotora rievās **konfigurāciju**.

DARBA APROBĀCIJA

1. 14th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering & Doctoral School of Energy and Geotechnology II», Pērnava, Igaunija, 13.–18.01.2014.
2. 12th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development», Jelgava, 23.–24.05.2013.
3. 8th International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas, Lietuva, 02.–03.05.2013.
4. 15th International Conference Maritime Transport and Infrastructure, Latvian Maritim Academy, Rīga, 25.–26.04.2013.
5. 43th International Scientific Conference Power and Electrical Engineering, RTU, Rīga, 2002.
6. 42th International Scientific Conference Power and Electrical Engineering, RTU, Rīga, 11.–13.10.2001.

AUTORES PUBLIKĀCIJAS

1. Zviedris A., Maksimkina J. Influence of variable parameters of asynchronous drives on the transient//Proceeding of the 3rd Research Symposium of Young Scientists, Actual problems of electrical drives and industry automation, TTU, Tallinn, Estonia, 2001. pp.50–53.
2. Zviedris A., Maksimkina J., Maņņitko A. Asinhrono dzinēju katalogu datu izmantošana pārejas procesu parametru noteikšanai// Scientific Journal of RTU. Power and Electrical Engineering, 2002. 4. series, 7. iss., pp.10–16.
3. Звиедрис А., Максимкина Ю. Система алгоритмов для расчета параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором// Proceeding of Elektros enerģētika ir tehnoloģijas, KTU, Kaunas, Lietuva, 2004. pp. 195–200.
4. Zviedris A., Maksimkina J. Inventory of different methods of rotor's parameters influence of starting process of induction motor// Scientific Journal of RTU. Power and Electrical Engineering, 2006. 4.series, 18. iss., pp. 45–50.
5. Maksimkina J. The Research of the Processes of the Squirrel-cage Induction Motor's Direct Start-up in the Setting of the Rotor's Variable Parameters// Scientific Journal of RTU. Power and Electrical Engineering, 2012.4. series, 30. iss., pp. 53–58.

6. Maksimkina J. The Research of the Processes of the Squirrel-cage Various Power Induction Motor's Direct Start-up//Proceeding of International Conference on Maritime Transport and Infrastructure, 2013. p. 18.
7. Maksimkina J. Direct Start-up of the Squirrel-cage Induction Motor at Variable Parameters of the Rotor// Latvian Journal of Physics and Technical sciences, 2013. № 1, vol. 50, pp. 10–21.
8. Maksimkina J. The Need to consider the Skin Effect in the Study of Direct Start-up of the Squirrel-cage Induction Motor// Proceeding of International Conference on Electrical and Control Technologies, Technologija, Kaunas, Lietuva, 2013. pp. 106–110.
9. Maksimkina J. Methods for Calculation of the Variable Parameters of a Rotor of the Cage Induction Motor// Proceeding of International Conference on Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Elektrijs, Pärnu (Pernava), Igaunija, 2014. pp. 106–111.

DARBA SATURS

Ievads

1. Rotora mainīgo parametru aprēķināšanas metodes
2. Rotora mainīgo parametru aprēķins ar dažādām metodēm
3. Asinhronā dzinēja ar īsslēgtu rotoru matemātiskie modeļi un to lietošana pārejas procesu pētīšanai ar rotora strāvas izspiešanas parādību
4. Asinhronā dzinēja pārejas procesu aprēķins ar rotora mainīgiem parametriem

Secinājumi par darbu

Nobeigums

Izmantotie informācijas avoti

IEVADS

Pašlaik asinhronais dzinējs ir galvenā elektriskā mašīna, kas tiek izmantota kā piedziņas dzinējs vairākumam mehānismu (ap 90 % visu dzinēju, ko izmanto tautsaimniecībā, ir asinhronais dzinējs) [19, 22, 30].

Nepārtrauktas drošas elektroenerģijas piegādes nepieciešamība pamudināja ekspertus pievērst uzmanību īstermiņa pārejas procesiem, kas rodas elektriskajās mašīnās un elektriskajos tīklos pēkšņu traucējumu gadījumā, kas rodas gan ieslēgšanas procesā, gan stacionārā darba režīmā [16].

Kopīga iezīme šiem procesiem ir tāda, ka strāvas un griezes momenta vērtības ievērojami atšķiras no vērtībām (strāvas un griezes momenta), kas raksturīgas stacionāram režīmam ar konstantu griešanās ātrumu [10, 17, 26]. Turklāt griezes momenti un strāvas var sasniegt ļoti lielu vērtību, un īpaši nelabvēlīgos gadījumos moments var sasniegt līdz pat 15 reizēm lielāku vērtību par nominālo, savukārt strāva – trīs reizes stacionāra stāvokļa īsslēguma strāvu [34, 39, 43].

Pētot asinhrono mašīnu pārejas procesus, aktīvajām pretestībām ir svarīgāka nozīme [7, 12, 42]. Iemesls tam ir tas, ka asinhronās mašīnas aktīvajai pretestībai ir būtiska nozīme griezes momenta radīšanā un pārejas procesu pētījumos tā parasti tiek uzskatīta par nemainīgu procesa gaitā [39]. Analizējot asinhrono motoru pārejas procesus pie procesu gaitā nemainīgas rotora aktīvās pretestības, var iegūt tikai kvalitatīvu ainu, kas bieži, it īpaši – attiecībā uz griezes momentu, var izrādīties kļūdaina.

Lai panāktu labu lietderības koeficientu, asinhronajiem dzinējiem pie nominālās slodzes jādarbojas ar mazu slīdes vērtību ($s_N = 0,02 \div 0,05$) un tiem tādējādi jābūt ar cietām mehāniskām raksturlīknēm ($s_N = 0,06 \div 0,15$), ko nodrošina mazas rotora aktīvās pretestības [47–49]. Šis pieprasījums īsslēgtajam dzinējam ar nemainīgiem parametriem ir pretrunā ar dzinēja pietiekamas palaišanas momenta vērtības prasībām, jo asinhronā dzinēja palaišanas moments pieaug līdz ar rotora aktīvās pretestības pieaugumu, bet, ja saglabātos stacionārajam režīmam atbilstošie rotora parametri, dzinēja palaišanas moments ar šādu rotora tinuma pretestību būs ievērojami mazāks nekā nominālais [20, 32]. Tas novērš iespēju palaist darbā šādus dzinējus ar konstantu un nominālajai tuvu slodzi. Griezes momenta līknes izkropļojums lauka augstākās harmonikas ietekmes dēļ var radīt grūtības, palaižot dzinējus arī ar nelielu slodzi. Tāpēc vispārējās nozīmes dzinēji ar īsslēgto rotoru tiek būvēti vienīgi kā dzinēji ar mainīgiem parametriem [28, 29]. Lai palielinātu rotora aktīvo pretestību R_2 un līdz ar to palielinātu momentu M_p palaišanas brīdī, tiek izmantota virsmas efekta vai rotora tinuma strāvas izspiešanas parādība. Šī problēma tiek atrisināta, izmantojot rotora tinumu īpašu konstrukciju [6, 19, 40, 41]. Jāatzīmē, ka asinhronā

dzinēja ātruma raksturlīknes veidošanās pārejas procesā ir atkarīga arī no rotora induktīvās pretestības [5, 15, 42]. Lai veiktu korektus asinhronās elektriskās piedziņas dinamiskos aprēķinus, **noteikti nepieciešams ievērot rotora parametru izmaiņas** pie dažādām slīdēm procesu gaitā.

Promocijas darba **mērķis** ir, ņemot vērā rotora virsmas efektai etekmi, izveidot un izpētīt asinhronā dzinēja matemātiskos modeļus statistiskajos un dinamiskajos režīmos, kas atbilst mūsdienīgām matemātiskās modelēšanas iespējām.

Lai sasniegtu šo mērķi, darbā izvirzīti un atrisināti šādi galvenie **uzdevumi**:

1. izveidot asinhronā dzinēja matemātisko modeli ar virsmas efekta ievērošanu;
2. izstrādāt algoritmus un programmas mainīgo rotorparametru noteikšanai;
3. veikt asinhronā dzinēja dinamikas aprēķinus, ņemot vērā virsmas efektaietekmi rotorā;
4. pārbaudīt iegūto modeļu un aprēķinu rezultātu uzticamību.

Promocijas darba 1. nodaļā aplūkotas dažādas eksistējošās metodes, kā arī autores ierosinātās metodikas rotora virsmas efekta ievērošanai asinhrono dzinēju dinamiskajos procesos.

Darba 2. nodaļā atspoguļoti darba rezultāti pie asinhronā dzinēja ar mainīgiem rotora parametriem matemātiskā modeļa un parametru izmaiņas ietekmes novērtēšanas algoritmu izveides.

Darba 3. nodaļā atspoguļoti asinhronā dzinēja dinamisko procesu aprēķinu rezultāti ar pārejas procesos mainīgiem rotora parametriem.

Darba 4. nodaļa veltīta dinamisko procesu ar mainīgiem rotora parametriem eksperimentālai izpētei.

1. ROTORA MAINĪGO PARAMETRU NOTEIKŠANAS METODES PĀREJAS REŽĪMOS

Kā zināms [5, 17, 19], asinhronā dzinēja ar īsslēgtu rotoru palaišanas brīdī, kad rotora frekvence ir liela ($f_2 = f_1$), rotora stieņa strāva tiek izspiesta gaisa spraugas virzienā, kas būtībā ir virsmas efekta izpausme vadītājos. Dzinēja palaišanas brīdī aktīvi darbojas tikai augšējā stieņa daļa, un tā darba šķērsgriezums samazinās, kas izraisa R_2 pieaugumu. Vienlaikus ar strāvas izspiešanu tiek samazināta stieņa izkliedes induktīvā pretestība, kas kopā ar R_2 pieaugumu palielina starta griezes momentu.

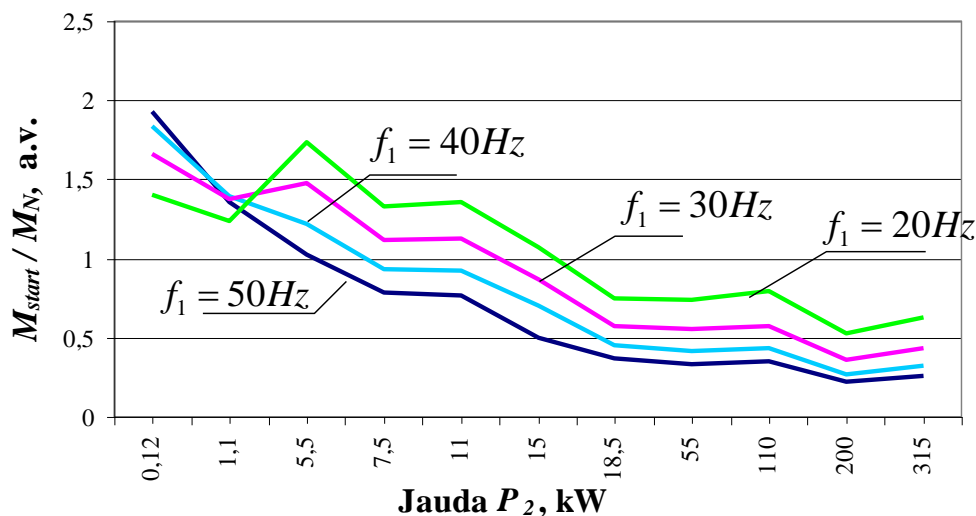
Palaišanas gaitā dzinēja rotora strāvas frekvence samazinās, un, kad dzinējs sasniedz nominālo griešanās ātrumu, tā kļūst ļoti maza ($f_2 = s_N f_1$) $\leq 1 - 3$ Hz. Turklāt strāvas izspiešanas

parādība praktiski pazūd, un strāva tiek sadalīta vienmērīgi pa stieņa šķērsriezumu. Stieņa aktīvā pretestība ir kļuvusi maza, un dzinējs darbojas ar labu lietderības koeficientu.

1.1. No rotoraparametru izmaiņas (virsmas efekta ietekmē) atkarīgo pētāmo motoru diapazona noteikšana

Lai noteiktu rotora parametru izmaiņas ietekmes pētāmo zonu, tika aprēķinātas plaša jaudu diapazona A4 sērijas asinhrono īsslēgto motoru ar $p = 2$ [32] palaišanas momentu un nominālo momentu attiecības M_{start}/M_N pie dažādām motoru barojošā sprieguma frekvencēm f_1 un katalogos nominālajam režīmam dotajiem aizvietošanas Γ veida shēmas parametriem $R'_1, X'_1, R''_2, X''_2, X_\mu$, kas doti attiecinātās vienībās (a. v.) [32].

Norādītajiem motoriem iegūtās sakarības $M_{start}/M_N = f(P_2)$ attēlotas 1.1. att., kur P_2 ir motora nominālā jauda. Ja šādā veidā aprēķinātā palaišanas momenta vērtība ir lielāka par nominālo, tad šeit akceptēts, ka virsmas efekta ietekme būs maza un šādi motori nav jāpakļauj izpētei.



1.1. att. Aprēķinu sakarības M_{start}/M_N atkarībā no motora nominālās jaudas P_2 pie dažādām barojošā sprieguma frekvencēm f_1 , kas atbilst rotora nominālajiem parametriem

Iegūtās sakarības (1.1. att.) ļauj izdarīt šādus secinājumus aplūkotajiem A4 tipa ar $p = 2$ asinhronajiem īsslēgtajiem motoriem ar jaudu diapazonu no 0,12 – 315 kW. Strāvas izspiešanas efektu rotora rievās ir jāņem vērā tikai **lieljaudas** dzinējiem (pie 50 Hz virs 10 kW). **Mazjaudas** dzinējiem šo parādību var neņemt vērā. Jo mazāka par 50 Hz ir lieljaudas dzinēja darba frekvence, jo pētījumu diapazons ir mazāks, kas norāda, ka pie frekvenču regulēšanas rotora parametru izmaiņas nav būtiskas.

1.2. Rotora parametru noteikšana, izmantojot Filda koeficientus

Saskaņā ar metodi, ko piedāvāja F. Emde [1] un A. Filds [2], taisnstūra stieņa aktīvo un induktīvo pretestību aprēķina pēc strāvas iespiešanās nosacītā dziļuma h_r , un induktīvo pretestību — pēc dziļuma h_x :

$$h_r = \frac{h_{stien}}{\varphi(\xi)}, \quad h_x = h_{stien} f(\xi), \quad (1.1)$$

kur h_{stien} — vadītāja (stieņa) kopējais augstums.

Aprēķinos izrādījās ērtāk noteikt nevisstieņa aktīvās un induktīvās pretestības pie nevienmērīga strāvas blīvuma, bet to relatīvās izmaiņas saskaņā ar virsmas efekta iedarbību. Šīs izmaiņas tiek novērtēti ar koeficientiem k_r un k_x .

Analītiskās izteiksmes, kas nosaka koeficientus k_r un k_x , iegūtas taisnstūra stieņim, pieņemot nemainīgu īpatnējo pretestību stieņa materiālam pa visu tā šķērgriezuma laukumu un bezgalīgi lielu magnētisko caurlaidību magnētvida tēraudam un izkliedes plūsmas magnētiskās līnijas rievā aizstājot ar taisniem posmiem, ir:

$$k_r = \xi \cdot \frac{sh2\xi + \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi} = \varphi(\xi)$$

$$k_x = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{sh2\xi - \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi} = f(\xi) \quad (1.2)$$

Šajos vienādojumos ξ ir tā sauktais reducētais stieņa augstums – bezdimensijas lielums, kura vērtību nosaka pēc formulas:

$$\xi = 2\pi h_{stien} \sqrt{\frac{f_2}{\rho} \cdot \frac{b_{stien}}{b} \cdot 10^{-7}}; \quad (1.3)$$

kur h_{stien} — stieņa augstums rievā;

b_{stien} un b — stieņa un rievas platums; rotora tinumu parasti izgatavo bez izolācijas, tāpēc $b_{stien} = b$;

f_2 — rotora strāvas frekvence aprēķina režīmā;

ρ — stieņa materiāla īpatnējā pretestība pie aprēķina temperatūras.

Isslēgtā rotora fāzes aktīvā pretestība no (6–164) [30]:

$$R_2 = k_r R_{stien} + \frac{2R_{gr}}{\Delta^2}, \quad (1.4)$$

kur R_{stien} — tinuma stieņa rievas zonas pretestība;

R_{gr} — noslēgtā gredzena zonas aktīvā pretestība;

Δ — strāvas gredzenā reducēšanas koeficients uz strāvu stienī (6–72) [30]:

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \quad (1.5)$$

Īsslēgtā rotora fāzes inductīvā pretestība no (6–173) [30]:

$$X_{\sigma 2} = 7,9 \cdot 10^{-6} f_1 l_{\delta} (k_x \lambda'_{stien} + \lambda_f + \lambda_d), \quad (1.6)$$

kur λ'_s — stieņa magnetiskās vadītspējas koeficients pēc tab. 6–23 [30];

λ_f — frontālas izkliedes magnetiskās vadītspējas koeficients pēc (6–176) [30];

λ_d — diferenciālās izkliedes magnētiskās vadītspējas koeficients pēc (6–174) [30];

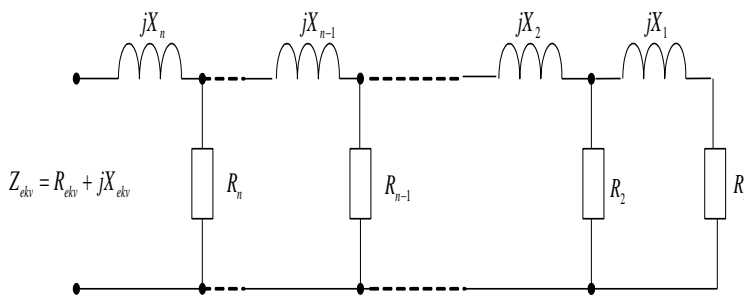
f_1 — barojošā sprieguma frekvence;

l_{δ} — gaisa spraugas garums.

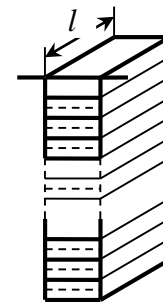
Šī metode ir matemātiski sarežģīta un ļoti aptuvena, koeficienti ir fizikāli nepamatoti, tā neļauj pētīt procesus dažādas formas rievām, slikti izmantojama mūsdienu datorprogrammās.

1.3. Rotora parametru noteikšana, pamatojoties uz daudzposmu ķēdi

Autore pieņēmusi, līdzīgi kā [30], ka rotora ķēdes ekvivalentā shēma ar virsmas efekta ietekmē mainīgiem parametriem var tikt attēlota kā daudzposmu ķēde ar pastāvīgām, no strāvas izspiešanas neatkarīgām pretestībām (1.2. att.).



1.2. att. Rotora stieņa daudzposmu shēmu



1.3. att. Masīva stieņa sadalījums elementāros slāņos

Tāpēc autores piedāvātā rotora daudzposmu shēmas pretestību aprēķinu metode ir balstīta uz šādiem pieņēmumiem.

Uzskatot izkliedes plūsmas magnētisko līniju konfigurāciju rievā par zināmu, iedomājamies masīvu vadītāju (īsslēgtā rotora tinumu stieni) sadalītu liela skaita elementāros slāņos, kas izolēti viens no otra ar bezgalīgi plānu izolācijas slāni (1.3. att.). Pieņemsim, ka lauks

rievā ir plakanparalēls un strāvas blīvums gar spēka līnijām nav mainīgs. Pie pietiekami maza elementāro slāņu augstuma šie pieņēmumi nesniedz ievērojamu kļūdu aprēķinos.

Ņemot vērā veiktos pieņēmumus, par daudzposmu shēmas parametriem (1.2. att.), varam uzskatīt šādas pretestības:

– i -tā elementāra slāņa aktīvā pretestība (uz garuma vienību)

$$R_i = \rho_i / q_i, \quad (1.6)$$

kur ρ — stieņa materiāla īpatnēja pretestība pie aprēķinu temperatūras;

$q_i = h_i b_i$ — i -tā elementāra slāņa šķērsgriezuma laukums;

b_i — i -tā elementārā slāņa vidējais platums;

$h_i = h_{pos} / n_{pos}$ — i -tā elementārā slāņa augstums;

h_{pos} — rievas homogēna posma augstums;

n_{pos} — rievas homogēna posma elementāro slāņu skaits.

– i -tā elementāra slāņa induktīvā pretestība (uz garuma vienību)

$$X_i = \omega_2 \mu_0 \lambda_i = 2\pi f_1 s \mu_0 \lambda_i, \quad (1.7)$$

kur ω_2 — strāvas leņķiskā frekvence rotora rievā;

$\lambda_i = h_i / b_i$ — ģeometriskās caurules magnētiskā vadītspēja, kuras robežas nosaka i -tais elementārais slānis;

μ_0 — magnētiskā konstante, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Tādējādi nosakot rotora ekvivalento pretestību Z_{ekv} , rezultātā iegūstam rotora stieņa aktīvo $R_{ekv} = R_{stien}$ un induktīvo $X_{ekv} = X_{stien}$ pretestības.

1.4. Rotora parametru noteikšana ar programmu kompleksu

QuickField 5.7 palīdzību

Viens no veidiem, kā norādīt rotora parametrus, var būt daudzfunkcionāls programmu komplekss *QuickField 5.7*, kas paredzēts magnētisko lauku aprēķiniem (matemātiskai modelēšanai) ar galīgo elementu metodi. Šajā darbā tiek atrisināts plakanparalēlais magnētiskā laukauzdevums: «Maiņstrāvu magnētiskais lauks».

Par konkrētu rievu *QuickField 5.7* vidē tika izveidots topoloģiskais modelis. Modeļa izveide notiek trīs etapos.

1. Aprēķina apgabala topoloģiskā modeļa konstruēšana un aprakstīšana — tiek norādītas virsotnes un šķautnes, kas aptver blokus ar dažādiem fizikāliem parametriem (vides īpašībām, lauka avotiem), rezultāts tiek ievietots datubāzē ar paplašinājumu ***mod*.

2. Vides īpašības, lauka avotus un robežnosacījumus norādīšana, piešķirot šiem elementiem identifikatorus. Šie uzdevumu parametri tiek saglabāti datubāzē ar paplašinājumu **.dhe.

Materiālu (vides) īpašības tiek definētas visiem modeļiem (**bloku identifikatori**):

– gaisa sprauga ar magnētisko caurlaidību (divas komponentes plakanparalēlam laukam)

$$\mu_x = 1 \text{ un } \mu_y = 1;$$

– rotora serdes tērauds ar nelineāru magnētisko caurlaidību. Nelineārā vidē magnētiskās caurlaidības μ vietā jānorāda materiāla magnetizēšanas līkne $B = f(H)$;

– «vāveres rata» stieņa materiāls — alumīnijs — ar magnētisko caurlaidību (divas komponentes plakanparalēlam laukam) $\mu_x = 1$ un $\mu_y = 1$ un īpatnējo vadītspēju $g = 20,5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$.

Par lauka avotu visos modeļos ir pieņemts rotora stienis. Masīvā vadītājā kopējā strāva ir norādīta, turklāt strāvas lielums tiek pieņemts patvaļīgi, kas nerada ietekmi uz noteiktajiem parametriem (aktīvo un induktīvo pretestību).

Topoloģiskā modeļa **šķautnes identifikatora** parametri ir pirmā veida robežnosacījums. Pirmā veida jeb Dirihlē robežnosacījums ir uz robežas zināma vektoriālā potenciāla skaitliskā vērtība $A_0 = 0$.

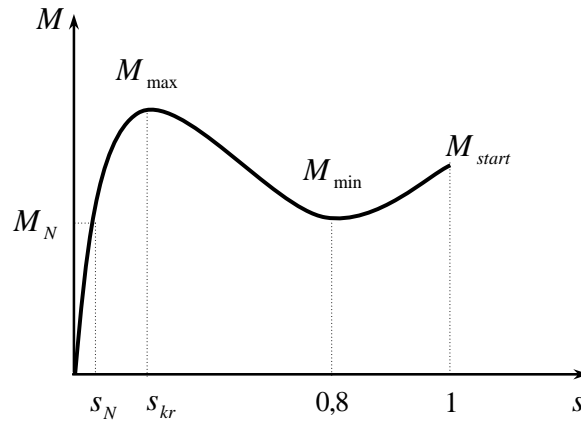
3. Galīgo elementu režģa ģenerēšana. Šajā darba izmantots automātiskais režīms, kurā atkarībā no topoloģiskā modeļa elementu izmēriem tiek noteikta vienmērīga pāreja no smalkāka režģa uz retāku režģi.

Uzdevuma *QuickField 5.7* atrisināšanas procesā tiek radīts vēl viens fails, kurā tiek rakstīti aprēķina rezultāti, rezultātu fails ar paplašinājums **.res.

1.5. Rotora parametru noteikšana, izmantojot kataloga datus

Šajā sadaļā aprakstīta autores izveidota metode, kas ļauj noteikt no slīdes atkarīgus rotora parametrus, izmantojot asinhronajā dzinēja kataloga datus [32]. Par šādiem datiem var uzskatīt: statora aktīvo un induktīvo pretestību R_l un X_l , ka arī griezes momenta vērtību M_i , kas atbilst noteiktiem fiksētām slīdes s_i vērtībām. Nominālai slīdes vērtībai s_N atbilst nominālais moments M_N , kritiskai slīdei s_{kr} — maksimālais moments M_{max} , slīdes vērtībai $s = 0,8$ — minimālais moments M_{min} (atsevišķos gadījumos minimālais moments var tikt norādīts ar citu slīdes vērtību diapazonā $0,7 \leq s \leq 0,9$), slīdes vērtībai $s = 1$ — palaišanas moments M_{start} (1.4. att.).

Nosakot rotora parametrus, par pamatu tiek pieņemta zināmā [19] asinhronā dzinēja griezes momenta izteiksme (1.8)



1.4. att. Asinhronā dzinēja ar īsslēgtu rotoru griezes momenta atkarība no slīdes

$$M = \frac{pm_i}{\omega_1} \frac{U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{\left(R_1 + c_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + c_1 X_2')^2} \quad (1.8)$$

kas gan tiek lietota pārveidotā veidā:

$$m = \frac{M}{M_N} = \frac{R_{2e}/s}{(R_1 + R_{2e}/s)^2 + (X_1 + X_{2e})^2} \quad (1.9)$$

Katalogā dota informācija par raksturlīknes $M=f(s)$ (1.4. att.) izteiktajiem punktiem, bet rotora parametrus R_{2e} un X_{2e} jānosaka lielākam punktu daudzumam, tāpēc sakarību $M = f(s)$ būtu nepieciešams aproksimēt ar kādu matemātisko izteiksmi:

- Intervālā $0 < s \leq s_{kr}$ ar trešās pakāpes polinomu

$$m = a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s, \quad (1.10)$$

- intervālā $s_{kr} \leq s \leq s_1$ ar ceturtais pakāpes polinomu

$$m = b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0. \quad (1.11)$$

Polinomu (1.10) un (1.11) koeficientus var noteikt pēc kataloga, izmantojot informāciju par momentu M_i raksturīgajos slīdes punktos s_i . Lai noteiktu trīs koeficientus a_3, a_2, a_1 izteiksmē (1.10) un piecus koeficientus b_4, b_3, b_2, b_1, b_0 izteiksmē (1.11), nepieciešami attiecīgi trīs un pieci vienādojumi. Tādēļ papildus jāizmanto no dotajām izteiksmēm atvasinātās izteiksmes, t. i.,

$$\frac{dm}{ds} = 3a_3 s^2 + 2a_2 s + a_1 \quad (0 < s \leq s_{kr}), \quad (1.12)$$

$$\frac{dm}{ds} = 4b_4 s^3 + 3b_3 s^2 + 2b_2 s + b_1. \quad (s_{kr} \leq s \leq s_1), \quad (1.13)$$

pie tam jāatzīmē, ka punktos $s = s_{kr}$ un $s = 0,8$ atvasinājums $dm/ds = 0$.

Izsakot no (1.9) pretestību X_{2e} , iegūstam

$$X_{2e} = \sqrt{\frac{1}{m} \frac{R_{2e}}{s} - \left(R_1 + \frac{R_{2e}}{s}\right)^2} - X_1 \quad (1.14)$$

Pēc pārveidojumiem iegūstam

$$\frac{dm}{ds} = \frac{4m \left(R_1 + \frac{R_{2e}}{s}\right) \left(\frac{dR_{2e}}{ds} s - R_{2e}\right)}{s^2 \left(1 - m \frac{R_{2e}}{s}\right)}. \quad (1.15)$$

Sākumā nosakam no izteiksmes (1.15) atvasināto dR_{2e}/ds :

$$\frac{dR_{2e}}{ds} = \frac{\frac{dm}{ds} \frac{s}{4m} \left(1 - m \frac{R_{2e}}{s}\right)}{R_1 + \frac{R_{2e}}{s}} + \frac{R_{2e}}{s}. \quad (1.16)$$

Risinot (1.16), var izmantot Eilera metodi, pēc kuras ikvienai slīdes s_i vērtībai atbilstošu rezistances vērtību var noteikt kā

$$R_{2e,i} = R_{2e,i-1} + \Delta R_{2e,i} \quad (1.17)$$

kur

$$\Delta R_{2e,i} = \left(\frac{dR_{2e}}{ds}\right)_{i-1} (s_i - s_{i-1}). \quad (1.18)$$

pie tam izteiksmē (1.18) lielumu $(dR_{2e}/ds)_{i-1}$ nosaka no vienādojuma (1.16) labās puses, ievietojot attiecīgi lielumus $(dm/ds)_{i-1}$, M_{i-1} , R_{2e} un s_{i-1} , kas iegūti iepriekšējā solī i .

Aplūkosim risināšanas algoritmu, kas balstīts uz šādiem aprēķiniem. Pie mazas slīdes strāvas izspiešanas efekts rotora rievās faktiski nav novērojams, rotora rezistence ir konstanta un tādēļ vienādojumā (1.16) var pieņemt $dR_{2e}/ds = 0$, un pieņemtai slīdei s_0 nosakam m_0 — pēc (1.10), $(dm/ds)_{s=s_0}$ — pēc (1.12). Tad (1.16) pārvēršas algebriskā vienādojumā, un tā risinājums dod lielumu $R_{2e,0}$, kas atbilst kaut kādai sākotnējai slīdei $s_{i-1} = s_0$ (vēlams, ka $s_0 \leq 0,01$). Un pēc tam pārējus parametrus, kas atbilst s_0 : izmantojot (1.14), nosakam attiecīgo ekvivalento induktīvo pretestību $X_{2e,0}$ un $M_0 = m_0 M_N$ — pēc (1.9).

Viss slīdes izmaiņu diapazons $[s_0; 1,0]$ tiek sadalīts k vienādās daļās ar soli $h = (1,0 - s_0)/k$, un tā rezultātā iegūstam argumentu $s_i = s_0 + ih$ ($i = 0, 1, 2, \dots, k$). Tad nākamā slīdes vērtība tiek aprēķināta šādi: $s_I = s_0 + 1h$.

Meklējam parametrus, kas atbilst s_I : m_I — pēc (1.10) vai (1.11), $(dm/ds)_{s=s_I}$ — pēc (1.12) vai (1.13). Izmantojot (1.18), nosakam attiecīgo $\Delta R_{2e,1}$, rotora ekvivalento aktīvo pretestību $R_{2e,1}$ — pēc (1.17), attiecīgo ekvivalento induktīvo pretestību $X_{2e,1}$ pēc (1.14), $M_I = m_I M_N$ — pēc (1.9). Un aprēķins arkārtojas.

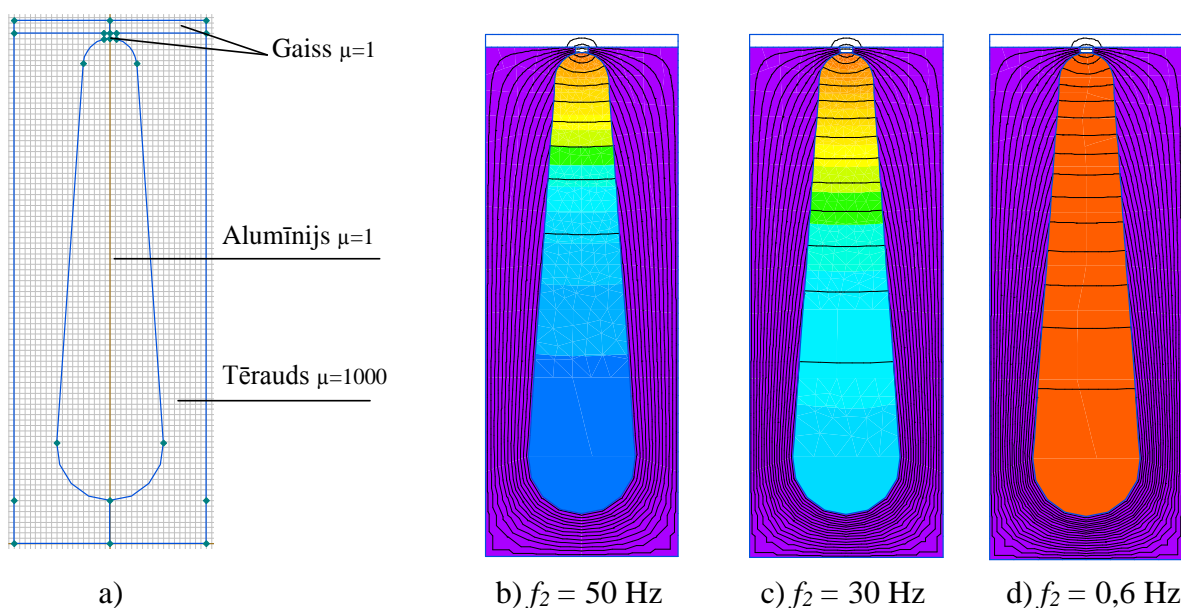
Metožu apskats norāda uz daudzām iespējām risināt doto uzdevumu, izmantojot dažādas metodes. Formulētās metodes norāda nepieciešamību ievērot rotora rievas formu. Autores izveidotās aprēķinu metodes ar daudzposmu ķēdes rezistanču aprēķinu un parametru noteikšanu pārejas procesos pēc kataloga datiem ir labas alternatīvas citu autoru ieteiktajiem risinājumiem, un ir nepieciešama šo autores ieteikto metožu precizitātes vispusīga pārbaude.

2. ROTORA MAINĪGO PARAMETRU APRĒĶINS, IZMANTOJOT DAŽĀDAS METODEDES

Šajā nodaļā, pamatojoties uz 1. Nodaļas ierosinātajām metodēm, izraudzītajiem A4 sērijas lieljaudas 4AH355S4V3 315 kW un mazjaudas 4A90L2V3 3 kW dzinējiem un dažādām rievu konfigurācijām tiks veikts rotora mainīgo parametru aprēķins, izvērtēta dažādu aprēķinu metožu precizitāte un to izmantošanas iespējas.

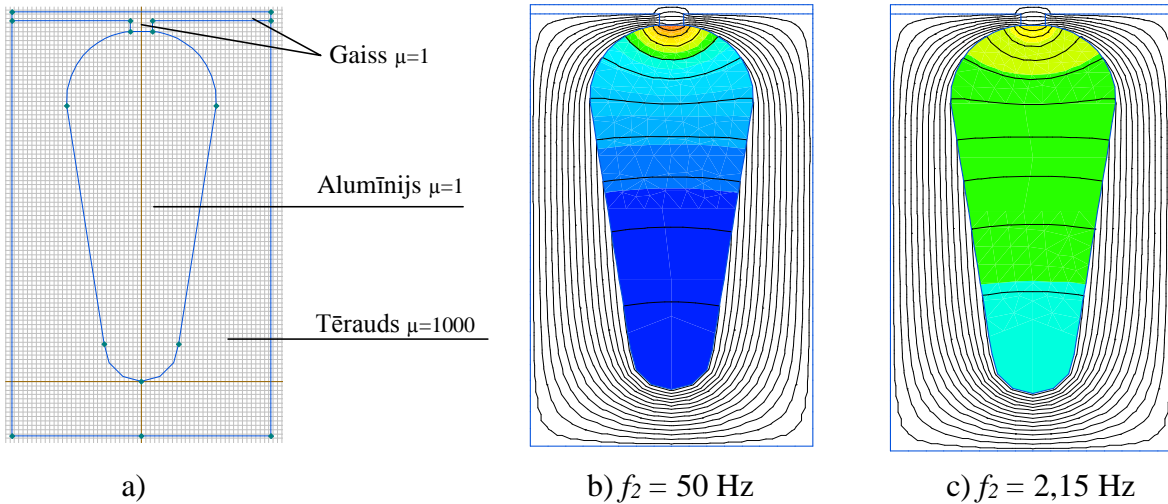
Izraudzītajam dzinējam ar programmu *QuickField 5.7* tiek izveidoti topoloģiskās rievu modeli un magnētiskā lauka ainas pie dažādām frekvencēm, kas parādītas 2.1. un 2.2. att.

Lieljaudas AD iegūtās laukuainas (2.1. att.) skaidri liecina, ka pie slīdes s vērtībām, tuvas vieniniekam, spēka līniju koncentrācija ir vērsta uz rievas virsmu. Līdz ar to strāvas blīvums šajos rievas slāņos ir augstāks. Mazajām slīdes s vērtībām lauka spēka līnijas un tajā pašā laikā strāvas blīvums vienmērīgāk sadalīts visā rievas augstumā.



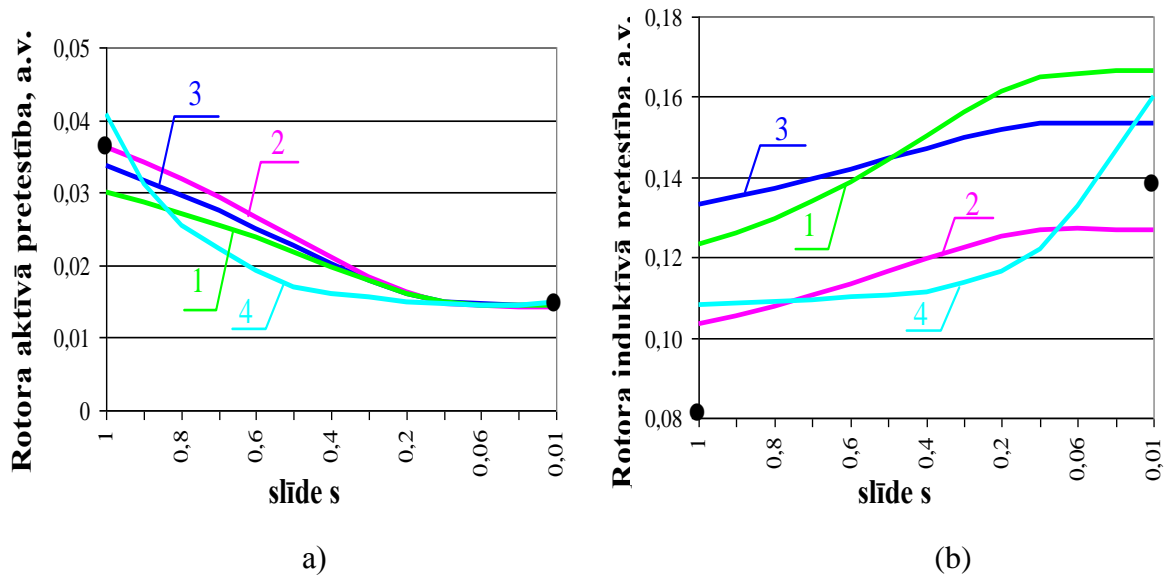
2.1. att. Dzinēja 4AH355S4V3 315 kW topoloģiskais rievas modelis (a); lauka sadalījums rievē pie dažādām frekvencēm b)–d)

Bet **mazjaudas** AD (2.2. att.) spēka līnijas praktiski vienmērīgi tiek sadalītas visā rievas augstumā, kas ļauj secināt, ka magnētiskās plūsmas sadalījums palaišanas gaitā nav atkarīgs no virsmas efekta rotora rievās.



2.2. att. Dzinēja 4A90L2Y3 3 kW topoloģiskais rievas modelis (a); lauka sadalījums rievā pie dažādām frekvencēm b)–c)

Izraudzītajam dzinējam tika veikts aktīvās un induktīvās pretestības aprēķins, izmantojot dažādas metodes. Grafiskās atkarības $R'_2 = f(s)$ un $X'_2 = f(s)$ a. v. parādītas 2.3. att.



2.3. att. AD 4AH355S4Y3 315 kW aprēķina aktīvā (a) un induktīvā (b) pretestības palaišanas brīdī:

- 1 — ar Filda koeficientiem; 2 — pēc daudzposmu shēmas;
- 3 — ar programmu *Quick Field*; 4 — aprēķins pēc kataloga datiem

No iegūtajām atkarībām (2.3. att. a) ir redzams, ka palaišanas brīdī, kad $f_2 = 50 \text{ Hz}$ ($s = 1$), rotora aktīvā pretestība sasniedz maksimālo vērtību. Palaišanas gaitā slīdes vērtība samazinās, kā arī samazinās rotora aktīvā pretestība, sasniedzot nominālo vērtību.

AD 4AH355S4Y3 315 kW ar dažādām metodēm iegūto aktīvo pretestību salīdzinājums (a. v.) ar kataloga datiem parādīts tabulā 2.1. Visprecīzāko rezultātu dod metode, kuras pamatā ir rotora rievas daudzposmu aizvietošanas shēma. Vismazāk precīzais rezultāts tika iegūts, izmantojot metodi ar Filda koeficientiem.

2.1. tabula

4AH355S4Y3 315 kW AD ar dažādām metodēm iegūto aktīvo pretestību salīdzinājums ar kataloga datiem

Parametrs	Darba režīms			
	palaišanas	novirze %	nominālais	novirze %
Rotora aktīvā pretestība, a. v.				
Pēc kataloga datiem	0,038		0,014	
Ar Filda koeficientiem	0,03	21,05	0,01437	2,64
Ar daudzposmu shēmu	0,03613004	4,92	0,0143268	2,33
Ar <i>QuickField 5.7</i>	0,0337	11,3	0,01442	3
Aprēķins pēc kataloga datiem	0,041	7,89	0,015	7,14

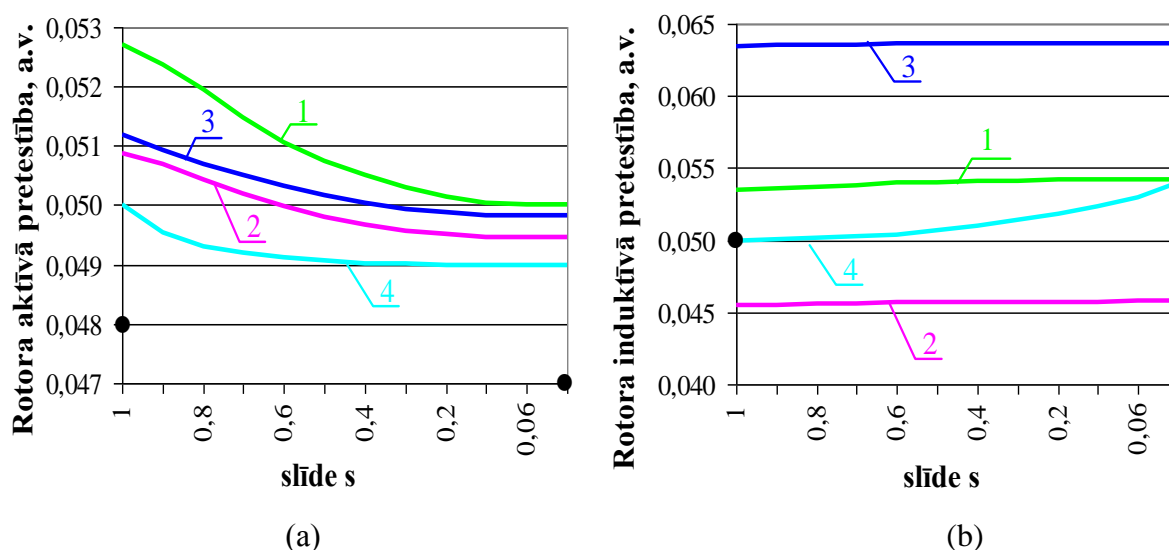
No iegūtajām atkarībām (2.3. att. b) ir redzams, ka palaišanas brīdī, kad $f_2 = 50 \text{ Hz}$ ($s = 1$), rotora induktīvā pretestība sasniedz minimālo vērtību. Palaišanas gaitā slīdes vērtība samazinās, pie tam rotora induktīvā pretestība pieaug.

Ar dažādām metodēm iegūto induktīvo pretestību salīdzinājums (a. v.) ar kataloga datiem 4AH355S4Y3 315 kW AD parādīts tabulā 2.2. Visprecīzāko rezultātu dod metode, kuras pamatā ir rotora rievas daudzposmu aizvietošanas shēma.

4AH355S4V3 315 kWAD ar dažādām metodēm iegūto induktīvo pretestību salīdzinājums ar kataloga datiem

Parametrs	Darba režīms			
	palaišanas	novirze %	nominālais	novirze %
Rotora induktīvā pretestība, a. v.				
Pēc kataloga datiem	0,08		0,14	
Ar Filda koeficientiem	0,1231	53,87	0,166367	18,83
Ar daudzposmu shēmu	0,103647	29,55	0,127417	8,9
Ar <i>QuickField 5.7</i>	0,1334	65,75	0,154	10
Aprēķins pēc kataloga datiem	0,108	35	0,16	14,29

AD 4A90L2V3 3 kW ar dažādām metodēm iegūto aktīvās un induktīvo pretestību salīdzinājums parādīts 2.4. att.



2.4. att. AD 4A90L2V3 3 kW aprēķina aktīvā (a) un induktīvā (b) pretestības palaišanas brīdī:
 1 — ar Filda koeficientiem; 2 — pēc daudzposmu shēmas;
 3 — ar programmu *Quick Field*; 4 — aprēķins pēc kataloga datiem

No iegūtajām atkarībām (2.4. att. a) ir redzams, ka palaišanas brīdī, kad $f_2 = 50$ Hz ($s = 1$), rotora aktīvā pretestība sasniedz maksimālo vērtību. Palaišanas gaitā slīdes vērtība samazinās, kā arī **niecīgi** samazinās rotora aktīvā pretestība, sasniedzot nominālo vērtību.

No iegūtajām atkarībām (2.4. att. b) ir redzams, ka palaišanas brīdī, kad $f_2 = 50$ Hz ($s = 1$), rotora induktīvā pretestība sasniedz minimālo vērtību. Palaišanas gaitā slīdes vērtība samazinās, pie tam rotora induktīvā pretestība **niecīgi** pieaug.

Ar dažādām metodēm iegūto aktīvo pretestību salīdzinājums (a. v.) ar kataloga datiem *4A90L2V3* 3 kW AD parādīts tabulā 2.3. Visas izmantotas rotora parametru aprēķināšanas metodes dod rezultātu ar gandrīz vienādu precizitāti.

2.3. tabula

4A90L2V3 3 kWAD ar dažādām metodēm iegūto aktīvo pretestību salīdzinājums ar kataloga datiem

Parametrs	Darba režīms			
	palaišanas	novirze %	nominālais	novirze %
Pēc kataloga datiem	0,048		0,047	
Ar Filda koeficientiem	0,0527	9,79	0,0501	6,59
Ar daudzposmu shēmu	0,050872	5,98	0,04955	5,42
Ar <i>QuickField</i> 5.7	0,05119	6,65	0,04982	6
Aprēķins pēc kataloga datiem	0,05	4,17	0,049	4,26

Ar dažādām metodēm iegūto induktīvo pretestību salīdzinājums (a. v.) ar kataloga datiem *4A90L2V3* 3 kW AD parādīts tabulā 2.4. Palaišanas un nominālo režīmu aprēķināšanai visprecīzāko rezultātu dod metode, izmantojot Filda koeficientus.

Rotora aktīvās un induktīvās pretestības aprēķinu rezultāti ļauj akceptēt to, ka, aprēķinot mainīgos rotora parametrus, strāvas izspiešanas efektu rotora rievās ir jāņem vērā tikai **lieljaudas** dzinējiem. **Mazjaudas** dzinējiem šo parādību var neņemt vērā. Autora ierosinātai metodei rotora parametru aprēķināšanai, pamatojoties uz **rievas daudzposmu shēmu**, ir augsta aprēķinu precizitāte, un šo metodi var izmantot ne tikai esošo dzinēju rotora parametru aprēķināšanai (precizēšanai), bet arī **projektējot jaunus AD ar patvaļīgu rotora rievas konfigurāciju**.

4A90L2Y3 3 kW AD ar dažādām metodēm iegūto induktīvo pretestību salīdzinājums ar kataloga datiem

Parametrs	Darba režīms			
	palaišanas	novirze %	nominālais	novirze %
Rotora induktīvā pretestība, a. v.				
Pēc kataloga datiem	0,053		0,1	
Ar Filda koeficientiem	0,053527	0,99	0,054231	
Ar daudzposmu shēmu	0,04551	14,10	0,04578	
Ar <i>QuickField 5.7</i>	0,06348	19,77	0,06368	
Aprēķins pēc kataloga datiem	0,05	5,66	0,054	

3. ASINHRONĀ DZINĒJA AR ĪSSLĒGTU ROTORU MATEMĀTISKIE MODEĻI UN TO PIELIETOŠANA PĀREJAS PROCESU PĒTĪŠANAI AR ROTORA STRĀVAS IZSPIEŠANAS PARĀDĪBU

Šī nodaļa veltīta asinhronā dzinēja pārejas procesu aprēķinam, ievērojot rotora mainīgos parametrus, pieņemamo matemātisko modeļu apskatam, koordināšu sistēmas un bāzes parametru izvēlei.

Parādības, kas pavada pārejas procesus elektriskās mašīnās, ir ārkārtīgi sarežģītas. Izveidot matemātiskas sakarības un likumsakarības, kas pilnīgi pakārtojas pārejas procesu gaitai, ir praktiski neiespējami sakarā ar lielajām matemātiskām grūtībām un apgrūtinošām formulām [49].

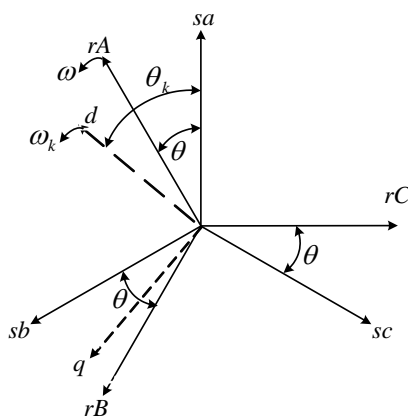
Tāpēc matemātiskajā modelēšanā jāņem vērā tikai galvenie faktori [16, 31]. Šim nolūkam apskata idealizēto EM, kurai magnētiskā ķēde nav piesātināta; histerēzes parādība un zudumi teraudā (t. i., virpuļstrāvas) netiek apskatīti; magnetizējošā spēka (m. s.) un indukcijas izplatīšanās telpā pieņemta sinusoidāla (augstākās harmonikas nav ievērotas); izkliedes induktīvās pretestības tiek pieņemtas neatkarīgi no rotora stāvokļa. Vienkāršības labad parasti tiek uzskatīts, ka parametri nav atkarīgi no EM strāvas un rotācijas ātruma, kā arī aktīvās pretestības — no temperatūras.

Matemātiskajā modelēšanā tiek apskatīta asinhronā mašīna (AM), kurai statora un rotora tinumi ir trīsfāžu; rotora tinumi tiek uzskatīti par reducētiem uz statora tinumiem; tinumu savienojums ir «zvaigzne/zvaigzne»; trīsfāžu AM tinumi ir nobīdīti par leņķi 120 el. grad.; gaisa sprauga ir vienmērīga; rotors ir simetrisks; statora tinumi ir simetriski [27, 31, 49].

AM sprieguma vienādojums tiks rakstīts, ņemot par pozitīvo enerģijas virzienu no tīkla uz vārpstu. Tas atbilst AM dzinēja darba režīmam.

Šajā darbā pārejas procesu aprēķinam tika pieņemts izmantot attiecinātās vienības, kā arī formulēti statora un rotora ķēdes bāzes lielumi.

Darbā sastādīta AM diferenciālvienādojumu nelineārā sistēma fāžu koordinātēs ar periodiskiem koeficientiem. Lai iegūtu vienādojumu sistēmu ar konstantiem koeficientiem, veikta koordināšu transformācija pa divām perpendikulārām asīm. Tās rezultātā asinhronā dzinēja modelis sastādīts koordinātēs $d, q, 0$, kura ass ir nekustīga attiecībā pret rotoru un rotē attiecībā pret statoru ar rotora rotācijas ātrumu, t. i., $\omega_k = \omega_r = \omega$. Tas ļauj to izmantot pārejas procesu aprēķinam ar mainīgiem rotora parametriem [35, 38]. Asinhronā dzinēja $d, q, 0$ koordinātu sistēma parādīta attēlā 3.8.



3.8. att. Asinhronā dzinēja $d, q, 0$ koordinātu sistēmā

AD pārejas procesu aprēķināšanai lieto vienkāršāko algoritmu, kas rakstīts matricu formā un ļauj izmantot integrēšanas standarta procedūras.

AD pārejas procesu aprēķināšanai jāatrisina vienādojumus (3.1) un (3.3) [27]

$$\frac{d}{d\tau}[I] = [A]^{-1} \cdot [D], \quad (3.1)$$

kur matricas

$$[A] = \begin{bmatrix} X_s & 0 & X_{ad} & 0 \\ 0 & X_s & 0 & X_{ad} \\ X_{ad} & 0 & X_r & 0 \\ 0 & X_{ad} & 0 & X_r \end{bmatrix}; \quad [I] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix};$$

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix}; \quad [D] = \begin{bmatrix} u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_k \Psi_{sq} \\ u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_k \Psi_{sd} \\ -R_r i_{rd} + (\omega_k - \omega) \Psi_{rq} \\ -R_r i_{rq} - (\omega_k - \omega) \Psi_{rd} \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = [X_{ad}(i_{rd}i_{sq} - i_{rq}i_{sd}) - M_{sl}] / T_M, \quad (3.3)$$

kur M_{sl} — slodzes pretestības moments, ko nosaka piedziņa;

T_M — AD un piedziņas inerces konstante sinhronajās sekundēs.

Matricā $[A]$ ietilpst rotora mainīgā **induktīvā pretestība** X_r , bet matricā $[D]$ — rotora mainīgā **aktīvā pretestība** R_r .

Otrajā nodaļā veiktie aprēķini ļāva atrast visērtāko un precīzāko metodi rotora parametru aprēķinam matricās $[A]$ un $[D]$. Tā ir autora paša izstrādātā metode uz daudzposmu shēmas pamata, kuru arī turpmāk izmantosim minēto rotora matricu parametru aprēķinam asinhronā dzinēja pārejas procesu laikā, t. i., lai risinātu vienādojumus (3.1).

Autore izveidojusi asinhronā dzinēja pārejas procesa aprēķina ar mainīgiem rotora parametriem blokshēmu un datorprogrammu.

4. ASINHRONĀ DZINĒJA PĀREJAS PROCESU APRĒĶINS AR ROTORA MAINĪGIEM PARAMETRIEM

4.1. Aprēķins, izmantojot autoresi zveidoto programmu

Šī nodaļa ir veltīta izvēlēto asinhrono dzinēju pārejas procesu aprēķinam. 2. nodaļas rotora aktīvās un induktīvās pretestības aprēķinu rezultāti ļauj akceptēt, ka, aprēķinot mainīgos rotora parametrus, strāvas izspiešanas efektu rotora rievās ir jāņem vērā tikai **lieljaudas** dzinējiem. **Mazjaudas** dzinējiem šo parādību var neņemt vērā. Tādēļ pārejas procesu aprēķins tiek veikts šādam 4A serijas 4AH355S4V3 315 kW tipa dzinējam. 3. nodaļā tika sastādīti vienādojumi AD pārejas procesu aprēķināšanai attiecinātās vienībās (a. v.). Iepriekšminētajos vienādojumos rotora aktīvā un induktīvā pretestības ir mainīgie parametri. AD pārejas procesu aprēķins tiek veikts, izmantojot 1. nodaļā izklāstītās rotora parametru aprēķinu metodes.

Izraudzīto AD pārejas procesu aprēķinam ar mainīgiem rotora parametriem autore ir izstrādājusi datorprogrammu. Par aprēķinu sākotnējiem datiem tika izraudzīti šādi parametri:

U_1 un I_1 — statora fāzes spriegums [V] un strāva [A];

f_l — bārošanas tikla frekvence [Hz];

R_l — statora tinumu aktīvā pretestība a. v.;

X_l — statora tinumu induktīvā pretestība a. v.;

$X_\mu = X_{ad}$ — magnetizēšanas ķēdes induktīvā pretestība a. v.;

rotora rievu forma un izmēri [mm];

ρ — rotora tinumu materiāla īpatnēja pretestība [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$].

Ventilatora slodzes modelēšana attiecinātās vienībāstika veikta šādi:

$$M_{load} = M_c + k\omega^2 \quad (4.1)$$

kur $M_c = 0$ — statiskais moments;

$k = 0,702$ — koeficients.

Inerces moments J [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] tiek modelēts ar mehāniskās laika konstantes T_M palīdzību:

$$T_M = \frac{Jn_N}{9,55M_N} \cdot 314,159 \quad (4.2)$$

Dzinējam 4AH355S4V3 315 kW:

$$T_M = \frac{Jn_N}{9,55M_N} \cdot 314,159 = \frac{5,8 \cdot 1500}{9,55 \cdot 2032} \cdot 314,159 = 0,448 \cdot 314,159$$

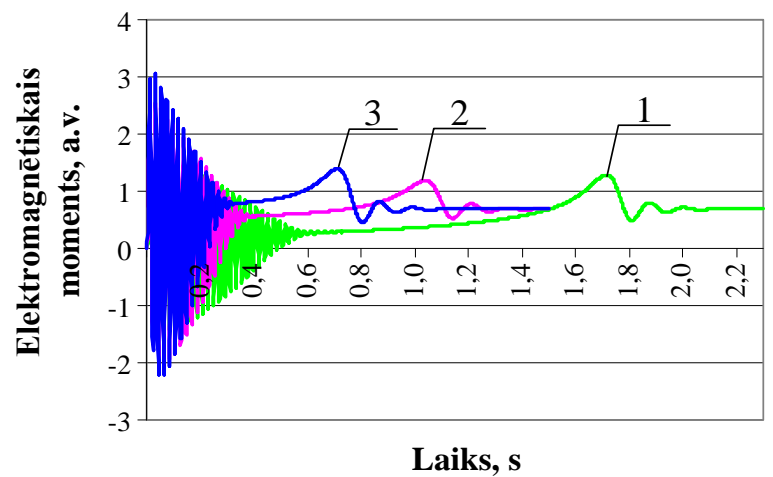
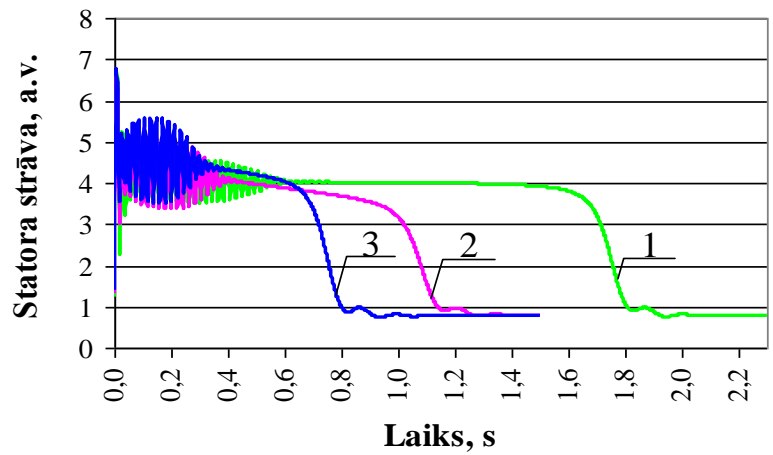
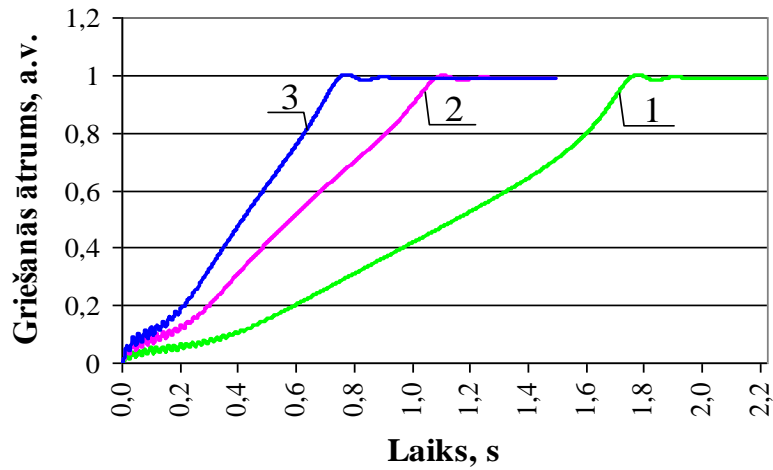
Pārejas procesu aprēķinu rezultātā tiks iegūtas šādas palaišanas (dinamiskās) raksturlīknes:

$$I = f(t), M_{em} = f(t), n = f(t).$$

Lieljaudas 4AH355S4V3 315 kW AD dinamiskās raksturlīknes ($I = f(t)$, $M_{em} = f(t)$, $n = f(t)$) pie dažādām aktīvās un induktīvās pretestības aprēķinu metodēm parādītas 4.1. att.

4AH355S4V3 315 kW AD palaišanas un nominālas vērtības kārtība, ka arī palaišanas procesa ilgums atkarībā norotora mainīgo parametru aprēķinu metodēm (ar dažādām metodēm iegūto rezultātu salīdzinājums) parādītas tabulā 4.1.

Veiktie aprēķini parāda, ka rotora mainīgie parametri **ievērojami** ietekmē lieljaudas AD pārejas procesus.



4.1. att. 4AH355S4V3315 kWAD dinamiskās raksturlieknes pie dažādām rotora pretestības aprēķinu metodēm:

- 1 — pie nemainīgām rotora pretestībām $R_{2N}^{\prime} = 0,014$ a. v. un $X_{2N}^{\prime} = 0,14$ a. v. nominālā režīmā;
- 2 — pie mainīgāmpēc Filda koeficientiem rotora pretestībām R_2^{\prime} un X_2^{\prime} ;
- 3 — pie mainīgāmpēc rievas augstuma no slīdes vērtības (pēc daudzposmu shēmas) rotora pretestībām R_2^{\prime} un X_2^{\prime}

4.2. AD pārejas procesu aprēķins ar *PSIM* programmas kompleksu

AD *4AH355S4U3* 315 kW pārejas procesa modelēšana ar **nemainīgiem (nominālajiem) rotora parametriem** $R'_{2N} = 0,014$ a. v. un $X'_{2N} = 0,14$ a. v. [32] notiek pēc shēmas, kas parādīta 4.3. att. b). AD parametri, kas izmantoti modelēšanai, arī parādīti 4.2. att.a) [32].

Programmā *PSIM* aprēķini tiek veikti fiziskās vienībās. Autores ierosinātā programmā aprēķini tiek veikti attiecinātās vienībās. Lai veiktu aprēķinus pie vienādas slodzes, koeficientu $k = 0,702$, kas bija izmantots autores programmā, nepieciešami reducēt pie *PSIM* programmas šādi:

$$k = \frac{0,702M_N}{\omega^2} = \frac{0,702 \cdot 2032}{155^2} = 0,059$$

$$U_l = 660V$$

$$f = 50Hz$$

$$R_1 = 22.42m\Omega$$

$$L_1 = 0.4134mH$$

$$R'_{2N} = 16.52m\Omega$$

$$L'_{2N} = 0.525mH$$

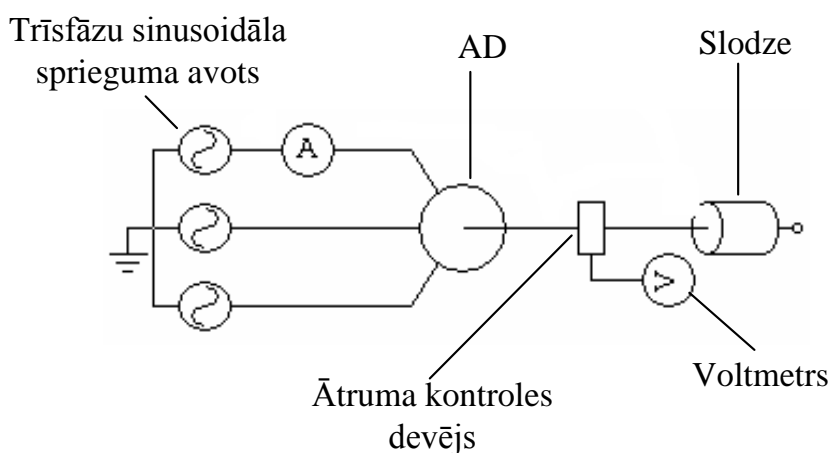
$$L_\mu = 17.29mH$$

$$2p = 4$$

$$J_{d.r.} = 5,8kg \cdot m^2$$

$$M_{sl} = k\omega^2 = 0,059\omega^2$$

a)



b)

4.2. att. AD *4AH355S4V3* 315 kW norādītie parametri a) un pārejas procesa modelēšanas shēma ar nemainīgiem rotora parametriem b)

Lieljaudas *4AH355S4V3* 315 kW AD iegūtas dinamiskas raksturlīknes ($I = f(t)$, $M_{em} = f(t)$, $n = f(t)$) tiek parādītas 4.4. (a) att.

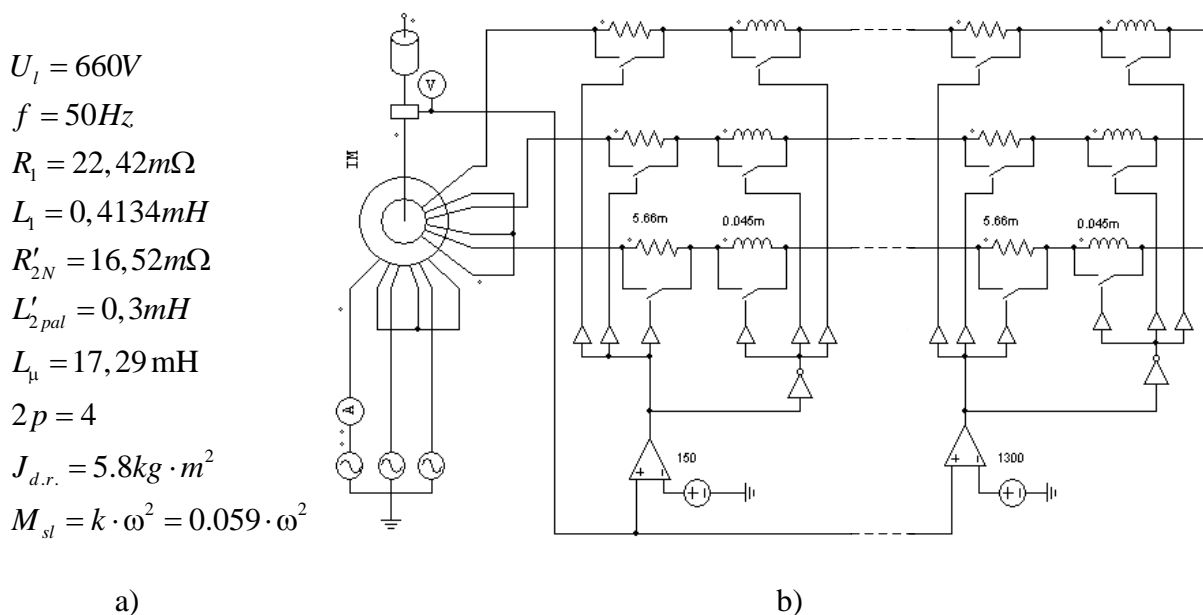
AD pārejas procesa modelēšana ar **mainīgiem rotora parametriem** tiek veikta, balstoties uz 4.2. att parādītās shēmas.

Katrās rotora fāzes ķēdēs tiek ieviesti pieci posmi, kas satur aktīvo pretestību (5,66 mΩ) un induktivitāti (0,045 mH). AD pārejas procesa modelēšanas shēma ar mainīgiem rotora parametriem parādīta 4.3. att.

Uz palaišanas brīdi tiek iestatīta nominālā pretestība 16,52 mΩ un palaišanas režīma induktivitāte 0,3 mH. Rotora griešanās ātruma kontroles devēji tiek ieviesti rotora ķēdē. Kad dzinējs sasniedz noteiktu griešanās ātrumu (150, 350, 600, 900, 1300 apgr/min), rotora ķēdē tiek

ievesta induktivitātes pakāpe, bet aktīvai pretestībai – pakāpes īsslēgums. Tādējādi notiek rotora aktīvās pretestības samazināšanas un induktivitātes palielināšanas modelēšana AD palaišanas laikā.

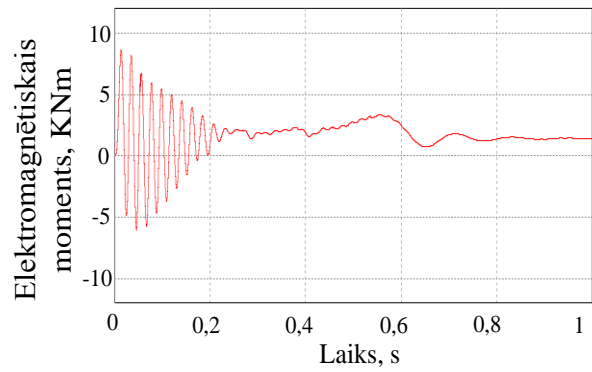
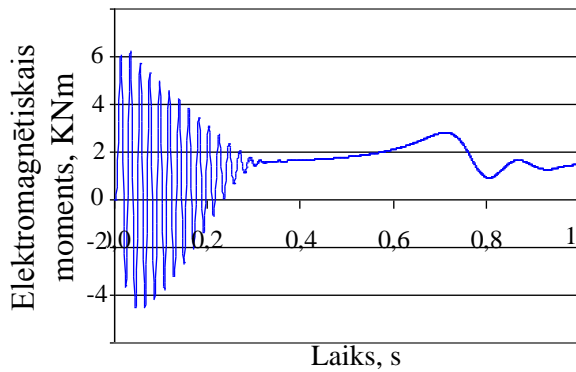
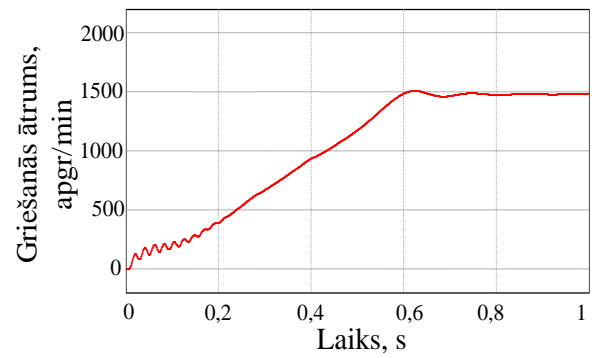
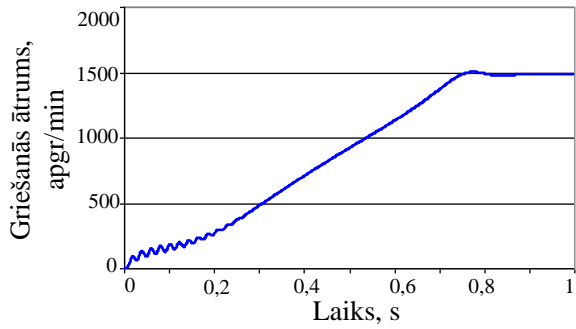
Lai pārbaudītu aprēķinu precizitāti, tika sastādīta modelēšanas shēma ar deviņiem regulēšanas posmiem. Iegūtie rezultāti liecinā, ka palaišanas (I_{pal} , M_{pal} , t_{pal}) un nominālie (I_N , M_N) parametri nav atkarīgi no izvēlēto posmu skaita. AD pārejas procesa modelēšanu ar mainīgiem rotora parametriem var veikt ar shēmu, kurā ir pieci regulēšanas posmi.



4.3. att. AD 4AH355S4V3 315 kW uzdotie parametri a) un pārejas procesa modelēšanas shēma ar mainīgiem rotora parametriem b)

Lieljaudas 4AH355S4V3 315 kW AD dinamiskās raksturlīknes ($M_{em} = f(t)$, $n = f(t)$) pie dažādām aktīvās un induktīvās pretestības aprēķinu metodēm (pēc autores programmas a) un pēc PSIM programmas b)) parādītas 4.4. att.

Pēc PSIM programmas iegūtie modelēšanas rezultāti labi sakrīt ar datoraprēķinu rezultātiem pēc autores izveidotajām parametru izmaiņu uzskaites metodēm. Par to skaidri liecina 4AH355S4V3 315 kW AD dinamiskās raksturlīknes (4.4. att.).



a)

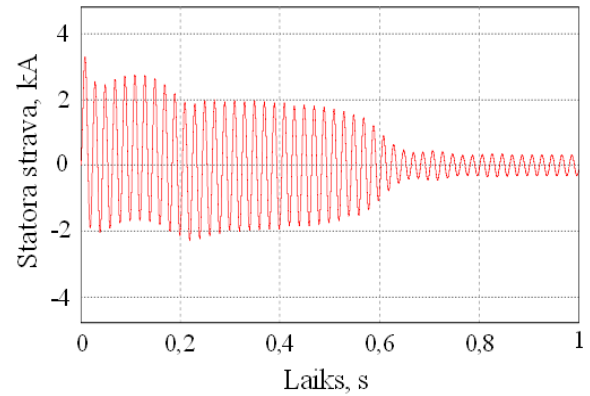
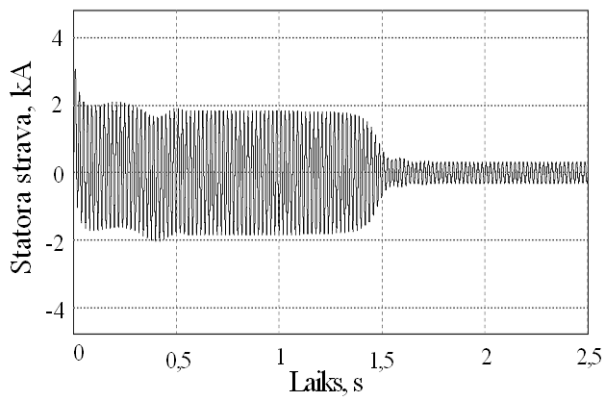
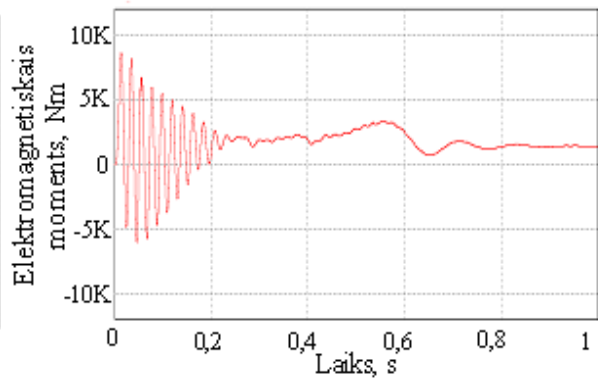
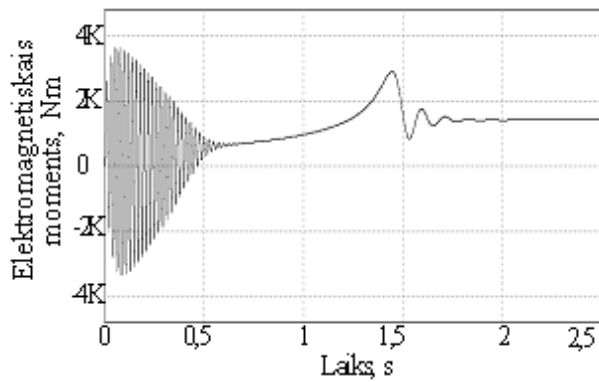
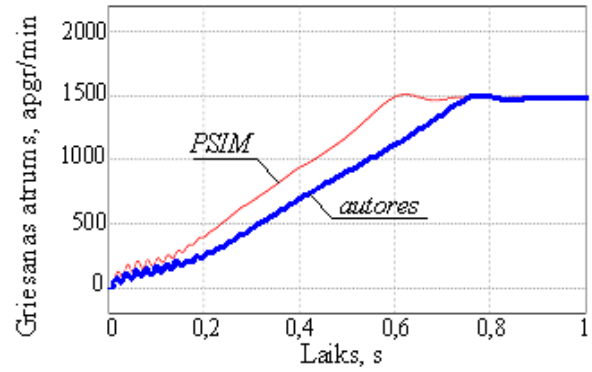
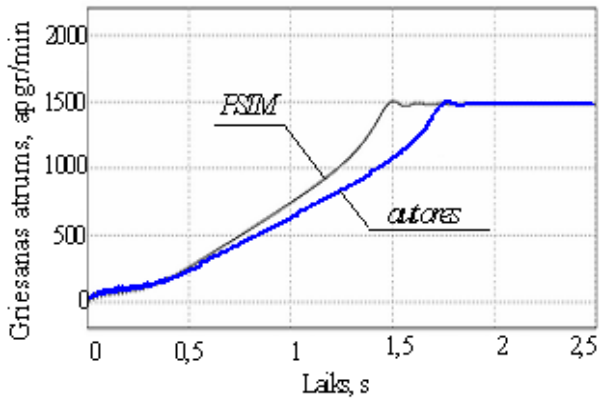
b)

4.4. att. **4AH355S4Y3 315 kW** AD dinamiskās raksturlīknes pie dažādām rotora pretestības aprēķinu metodēm:

- a) — pie mainīgām pretestībām pēc autores programmas;
- b) — pie mainīgām pēc *PSIM* programmas

4AH355S4U3 315 kW AD dinamiskās raksturlīknes ar nemainīgiem (pēc shēmas 4.2. att.) un ar mainīgiem rotora parametriem (pēc shēmas 4.3. att.) tiek parādītas 4.5. att.

Pēc *PSIM* programmas iegūtas raksturlīknes (4.5. att.) liecina, ka palaišanas procesa ilgums, kā arī palaišanas moments M_{pal} un palaišanas strāva I_{pal} , ir atkarīgi no rotora mainīgiem parametriem.



a)

b)

4.5. att. 4AH355S4V3 315 kW AD dinamiskas raksturliķnes pie nemainīgiem pēc nominālā režīma (a) un mainīgiem (b) rotora parametriem (pēc PSIM programmas)

4AH355S4U3 315 kWAD palaišanas parametru salīdzinājums darba režīmos ar nemainīgiem un mainīgiem rotora parametriem parādīts 4.5. tabulā.

Ar dažādām metodēm iegūto rezultātu salīdzinājums

4AH355S4U3 315 kW	Parametrs	Palaišanas momenta kārtņība	Palaišanas strāvas kārtņība	Palaišanas ilgums
		$\frac{M_{start}}{M_N}$	$\frac{I_{start}}{I_N}$	t_{start}, s
Ar autores datorprogrammu	Ar nemainīgiem parametriem	2,28	8,75	2,09
	Ar Filda koeficientiem	3,69	8,53	1,4
	Ar daudzposmu shēmu	4,45	8,77	0,85 ÷ 0,9
Ar programmu <i>PSIM</i>	Ar nemainīgiem parametriem	2,54	9,78	1,5 ÷ 1,7
	Ar 5 regulēšanas posmiem	6,02	9,93	0,85 ÷ 0,9
	Ar 9 regulēšanas posmiem	6,34	9,58	0,85 ÷ 0,9

SECINĀJUMI

1. Rotora aktīvās un induktīvās pretestības aprēķinu rezultāti ļauj akceptēt, ka, aprēķinot mainīgos rotora parametrus, strāvas izspiešanas efektu rotora rievās ir jāņem vērā tikai **lieljaudas** dzinējiem (pie 50 Hz virs 10 kW). **Mazjaudas** dzinējiem šo parādību var neņemt vērā. Jo mazāka par 50 Hz ir lieljaudas dzinēja darba frekvence, jo pētījumu diapazons pēc motoru jaudas ir mazāks, un tas norāda, ka pie frekvenču regulēšanas rotora parametru izmaiņas nav būtiskas.
2. Programmas kompleksa *QuickField 5.7* izmantošana rotora parametrus aprēķināšanai ir apgrūtināta, jo tā pieprasa rievās ar patvaļīgu konfigurāciju topoloģiskā modeļa darbietilpīgu veidošanu un rotora strāvas frekvences **manuālu** ievadi. Tas padara neiespējamu turpmāk izmantot aprēķinātos parametrus AD rotora pārejas procesu modelēšanai.
3. Autores ierosinātajai rotora parametru aprēķināšanas metodei, kas pamatojas uz **rievas daudzposmu shēmu**, ir pietiekama aprēķinu precizitāte: aktīvās pretestības vērtības novirze (relatīvā kļūda) no kataloga datiem ir $2,33 \div 4,95 \%$, induktīvās pretestības vērtības novirze ir $8,9 \div 29,55 \%$.
4. Autores ierosinātās datorprogramma pamatojoties uz **rievas daudzposmu shēmu** dod iespēju **laideni** mainīt rotora parametrus procesu gaitā. Tas padara pārejas procesa aprēķinu atbilstošu realitātei. Metodes var izmantot ne tikai esošo dzinēju rotora parametru aprēķināšanai (precizēšanai), bet arī **projektējot jaunus AD ar patvaļīgu rotora rievās konfigurāciju**.
5. Autores ierosinātajai rotora parametru aprēķināšanas metodei, kas pamatojas uz kataloga datiem, ir pietiekama aprēķinu precizitāte. Tomēr šo metodi var izmantot tikai jau izstrādātiem dzinējiem, kā arī šo AD pārejas procesu modelēšanai.
6. Izveidota *PSIM* programmas kompleksa AD pārejas procesu modelēšanas shēma ar rotora mainīgiem parametriem.
7. Pēc *PSIM* un autores ierosinātās datorprogrammas veiktie aprēķini parāda, ka lieljaudas AD 315 kW, ievērojot strāvas izspiešanas efektu, pārejas procesu ilgums samazinās no vērtības $1,5 \div 2,09$ slīdz $0,85 \div 0,9$ s, palaišanas momenta kārtņība palielinās no vērtības 2,54 a. v. līdz 6,34 a. v. pēc *PSIM* modelēšanas rezultātiem ($2,28 \div 4,45$ a. v. pēc autores ierosinātās datorprogrammas), palaišanas strāvas kārtņība gandrīz nav atkarīga no rotora parametru aprēķinu metodes.

NOBEIGUMS

Promocijas darbā izveidotā rotora parametru aprēķinu metode faktiski izpētīta izmantošanai tikai lieljaudas asinhrono īsslēgto dzinēju tiešai palaišanai ar slodzes ventilatora momentu, kas mūsdienu situācijā nav praksē raksturīgs paņēmieni. Arī slodzes veidi varētu būt citādi — kompresora slodze, konstantā momenta u. c. Vajadzētu turpināt pētījumus modernākiem vai praksē vairāk izmantotiem šādu dzinēju dinamiskajiem režīmiem — piemēram, zvaigznes-trīsstūra palaišanai vai motoru palaišanai ar «*soft starting*» metodi, kad pie nemainīgas statora sprieguma frekvences motora palaišanas strāvas tiek ierobežotas, ar tīristoru palīdzību plūstoši mainot statora spriegumu. Tomēr šādu režīmu pētījumi stipri palielinātu promocijas darba apjomu un pētījumu izpildes laiku, un tas varētu būt autores nākamo pētījumu objekts. Vajadzētu pētīt arī citu reālu dinamisko procesu gaitu (reversēšana, bremzēšana, darbs ar citām slodzēm), izmantojot autores izstrādāto rotora parametru dinamiskās novērtēšanas metodi, kas uzrāda labas funkcionālās izmantošanas iespējas.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Emde F. Einseitige Stromverdrängung in Ankernuten, E. und M., 1908, Bd. 24, p. 703–707.
2. Field A. B. Eddy currents in large slot-wound conductors, Trans AIEE, vol. 24, p. 761.
3. Ikeda M., Hiyama T. Simulation Studies of the Transients of Squirrel-cage Induction Motors//Energy Conversion, IEEE, 2007, № 22, p. 233–239.
4. Köhring P. Closed solution of the transient skin effect in induction machines// Electrical Engineering, 2009, № 91, pp. 263–272.
5. Ku Y. H., Transient analysis of alternating current machinery, Trans. AIEE, 1929, v. 48, p. 707.
6. Levy W., Landy C. F. Уточненная модель для расчета глубокопазных асинхронных двигателей, Электротехника, 1991, № 8.
7. Li J., Xu L. Investigation of Cross-saturation and Deep Bar Effects of Induction Motors by Augmented dq Modeling Method//Industry Applications Conference, IEEE, 2001, pp. 745–750.
8. Lin D., Zhou P. An Improved Dynamic Model for the Simulation of Three-phase Induction Motors with Deep Rotor Bars//Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008. International Conference on, p. 3810–3814.
9. Liwshitz-Garik M. Calculation skin effect squirrel-cage rotors. Trans. AIEE T, 1955, v. 74, III A, p. 768–771.
10. Lyon W. V., Transient analysis of alternating current machinery (book), 1954.
11. Meng D., Xia Y., Yang X. Dynamic Impedance Calculation for High-Voltage Motor in Starting Process// Industrial Engineering and Management Science, Pennsylvania, USA, 2013, p. 66–71.
12. Pedra J., Sainz L. Parameter estimation of squirrel-cage induction motors without torque measurements//IEE Electric Power Applications, 2006, vol. 153, № 2, p. 87–94.

13. Repo A.-K., et al. Dynamic Electromagnetic Torque Model and Parameter Estimation for a Deep-bar Induction Machine//IET Electric Power Applications, 2008, № 2, p. 183–192.
14. Verma C. P., Abo-Shady S.E. Method of calculation of transient skin-effect in conductors embedded in slot for cage winding, IEEE Trans. on PAS, 1981, № 6.
15. Wu X. Z., Wang X. H. Calculations of skin effect for double-cage rotor bar of the induction machine, CSEE, 2003, № 23 (3), p. 116–119.
16. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980, с. 256.
17. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1985, с. 530.
18. Виноградов А. Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе// Электротехника, 2005, № 5, с. 57–61.
19. Вольдек А. И. Электрические машины. Л., «Энергия», 1974.
20. Горелик Л. В. Расчет параметров короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя в пусковых режимах. Электротехника, 1979, № 7, с. 24–25.
21. Грюнер А. И. Влияние магнитной цепи на электрические параметры ротора с глубокими пазами// Электричество, 1990, № 9.
22. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М., «Энергия», 1980.
23. Инкин А. И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. Новосибирск, «ЮКЭА», 2002.
24. Каваре Ясер Хусейн. Учет эффекта вытеснения тока в стержнях ротора асинхронного двигателя при его моделировании в среде Matlab// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика, випуск 67: Донецьк: ДонНТУ, 2003, с. 160–162.
25. Казовский Е. Я Исследование электромагнитных полей, параметров и потерь в мощных электрических машинах / Е. Я. Казовский, Я. Б. Данилевич. – Л.: Наука, 1966, с. 213.
26. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока М.; Л.: Издательство АН СССР, 1962, с. 624.
27. Кетнер К. К. Переходные процессы в машинах переменного тока. Рига, РПИ, 1976.
28. Клоков Б. К. Расчет вытеснения тока в стержнях произвольной конфигурации// Электротехника, 1969, № 6, с. 25–29.
29. Клоков Б. К. Практические методы учета вытеснения тока// Электротехника, 1970, № 6, с. 48–51.
30. Копылов И. П. Проектирование электрических машин. М., «Энергия», 1980.
31. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М., «Высшая школа», 1994.
32. Кравчик А. Э., М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с, ил.
33. Мамиконянц Л. Г. Анализ некоторых аспектов переходных и асинхронных режимов синхронных и асинхронных машин М.: ЭЛЕКС-КМ, 2006.
34. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. М., «Высшая школа», 1975.
35. Рюденберг Р., Явления неустановившегося режима в электрических установках, ГНТИ, 1931.
36. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. М.: ил, 1955, с. 714.
37. Сивокобыленко В. Ф., Павлюков В. А. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин// Электричество, 1979, № 10, с. 35–39.

38. Сивокобыленко В. Ф. Моделирование режимов работы асинхронных машин с учетом насыщения магнитных цепей и вытеснения токов в роторе// Наукові праці ДонНТУ, Серія Електротехніка і енергетика, Вип. 112. Донецьк: ДонНТУ, 2006, с. 10–16.
39. Соколов М. М., Петров Л. П., Масандилов Л. Б., Ладензон В. А. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. М., «Энергия», 1967.
40. Соломин А. В. Учет влияния вытеснения тока на параметры проводника обмотки тягового линейного асинхронного двигателя при его произвольном расположении по высоте паза// Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2000, № 1, с. 30–35.
41. Соломин В. А., Замшина Л. Л. Параметры регулируемого тягового линейного асинхронного двигателя с учетом вытеснения тока в пазу// Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2000, № 2, с. 57–60.
42. Соломин А. В., Замшина Л. Л. Учет влияния вытеснения тока в стержне вторичного элемента линейного асинхронного двигателя при его произвольном расположении по высоте паза// Известия высших учебных заведений, Электромеханика, 2005, № 3, с. 34–37.
43. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970, с. 520.
44. Фильц Р. В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. Киев, «Наукова думка», 1979.
45. Цуканов В. И., Фисенко В. Г. Методы расчета параметров обмотки ротора с учетом эффекта вытеснения тока// Труды МЭИ, 1980, вып. 449.
46. Цуканов В. И., Георгиади В. Х. Расчет на ЭВМ коэффициентов вытеснения токов в стержне ротора электрических машин// Электротехника, 1982, № 12.
47. Чабан В. И. К расчету переходных процессов в демпферных контурах электрических машин// Электричество, 1978, № 6.
48. Щербаков В. Г., Вольвич А. Г., Орлов Ю. А., Колпахчян П. Г., Оперативное определение нелинейных параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором// Электротехника, 2009, № 8, с. 22–26.
49. Янко-Триницкий А. А. Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решения// Электричество, 1951, № 3, с. 18–25.