

Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Tehniskā fakultāte

Enerģētikas institūts



Mg.sc.ing. **Aleksejs Gedzurs**

promocijas darbs

**ASINHRONO ELEKTRODZINĒJU TERMISKĀ STĀVOKĻA
NOTEIKŠANAS RISINĀJUMI TO EKSPLOATĀCIJAS DROŠUMA
PAAUGSTINĀŠANAI**

***ESTIMATION OF THERMAL STATE OF INDUCTION MOTORS
FOR IMPROVING OF THEIR RELIABILITY***

zinātnes doktora (Ph.D.) zinātniskā grāda iegūšanai

Vides inženierijas un enerģētikas nozarē

Promocijas darba vadītājs

Profesors **Dr.sc.ing. Aigars Laizāns**

Promocijas darba autors

Jelgava

2022

INFORMĀCIJA

Darba izpilde: Pētījumi tika veikti laika posmā no 2013. gada 1. septembra līdz 2022. gada 31. janvārim Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Enerģētikas institūtā.

Promocijas darba vadītājs: Dr.sc.ing., profesors Aigars Laizāns.

Zinātniskā darba aprobācija: Zinātniskā darba izstrādes laikā tika publicēti 9 zinātniskie raksti, no kuriem 9 atbilst vispārātzītiem recenzējamiem zinātniskajiem rakstiem. Par pētnieciskajiem rezultātiem ziņots ar uzstāšanos 7 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kuras notika Latvijā un Igaunijā.

Publikācijas vispārātzītos recenzējamajos zinātniskajos izdevumos.

1. Gedzurs, Aleksejs. Indirect induction motor stator winding temperature estimation. Engineering for rural development, 17, 2018, p. 681-686.
2. Gedzurs Aleksejs, Straume Indulis, Galins Ainars, Laizans Aigars. Low-voltage circuit breaker selectivity studies. Engineering for rural development, 15, 2016, p.612-617
3. Gedzurs, Aleksejs. Operation reliability of induction motors at egg processing plant 'Balticovo'. Agronomy Research. No.14 (Special Issue 1) 2016, p. 1161-1168.
4. Gedzurs, Aleksejs. Fault diagnosis of low-power three-phase induction motor. Rural Sustainability Research. Warsaw: De Gruyter Open, 2016. Vol. 36(331), p. 34-41. DOI: 10.1515/plua-2016-0012.
5. Gedzurs, Aleksejs Andris Šnīders. Experimental research and simulation of induction motor stator winding nonstationary heating. American Journal of Energy and Power Engineering. Vol. 2(4) (2015), p.44-50:
6. Gedzurs, Aleksejs. Operation improvement of induction motor temperature protection device under extreme overload. Engineering for rural development, 14, 2015, p.361-365
7. Gedzurs, Aleksejs. Temperature protection methods of induction motor. Research for rural development, 21, 2015. Vol.1, p. 258-263
8. Gedzurs, Aleksejs, Andris Šnīders. Induction motor stator winding thermal process research and modelling under locked rotor mode. Engineering for rural development, 13, 2014, p.265-270.
9. Gedzurs, Aleksejs. Heating of low power induction motor under no load mode and different cooling conditions. Research for rural development, 20, 2014. Vol.1, p. 219-224

Ziņojumi zinātniskajās konferencēs

1. Aleksejs Gedzurs. Indirect induction motor stator winding temperature estimation. 17th International scientific conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 23 - 25, 2018.
2. Aleksejs Gedzurs, Indulis Straume, Ainars Galins, Aigars Laizans. Low-voltage circuit breaker selectivity studies. 15th International scientific conference "Engineering for rural development", Jelgava, Latvia, May 25 - 27, 2016.
3. Gedzurs, Aleksejs. Operation reliability of induction motors at egg processing plant 'Balticovo'. 7th International conference on Biosystems Engineering, Estonia, Tartu, May 12–13, 2016
4. Gedzurs, Aleksejs. Operation improvement of induction motor temperature protection device under extreme overload. 14th International scientific conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 20 - 22, 2015.

5. Gedzurs, Aleksejs. Temperature protection methods of induction motor. 2015: annual 21st international scientific conference "Research for rural development", Jelgava, Latvia, 13-15 May, 2015
6. Gedzurs, Aleksejs, Andris Šnīders. Induction motor stator winding thermal process research and modelling under locked rotor mode. 13th International scientific conference "Engineering for rural development": proceedings, Jelgava, Latvia, May 29 - 30, 2014.
7. Gedzurs, Aleksejs. Heating of low power induction motor under no load mode and different cooling conditions. Research for rural development 2015: annual 20st international scientific conference proceedings, Jelgava, Latvia, 21 - 23 May.

ANOTĀCIJA

Gedzurs A. Asinhrono elektrodzinēju termiskā stāvokļa noteikšanas risinājumi to ekspluatācijas drošuma paaugstināšanai: promocijas darbs zinātnes doktora (Ph.D.) zinātniskā grāda iegūšanai, Jelgava, LLU, 2022. Kopējais darba apjoms 126 lpp., 12 tabulas, 101 attēli un 5 pielikumi. Promocijas darbā izmantoti 94 informācijas avoti.

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Enerģētikas institūtā no 2013. gada septembra līdz 2021. gada janvārim.

Zinātniskā darba mērķis: teorētiski un eksperimentāli pamatot asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas metodi ar attālinātu elektrodzinēja rotācijas ātruma mērīšanu, un, izstrādāt algoritmu šīs metodes pielietošanai mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai pret pārkāršanu.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti sekojoši uzdevumi:

1. veikt asinhronā elektrodzinēja silšanas procesa, zudumu jaudas un siltumtehnisko parametru noteikšanas teorētisko analīzi;
2. izpētīt asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes;
3. veikt ar nemainīgu slodzi ar dažādu rotora rotācijas frekvenci strādājošu asinhrono elektrodzinēju silšanas eksperimentālos pētījumus pie normāliem apstākļiem un pie dažādiem dzesēšanas traucējumiem;
4. pilnveidot mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju silšanas matemātisko modeli, apskatot to kā divu elementu ķermeni;
5. izstrādāt statora tinumu temperatūras un rotora rotācijas frekvences izmaiņas aprakstošu matemātisko modeli.
6. matemātiskā modeļa pārbaude (verifikācija un validācija) – asinhrono elektrodzinēju silšanas modeļa simulācijas rezultātu salīdzināšana ar eksperimentāliem datiem;
7. mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju statora aizsardzības algoritma izveide un izstrādātas statora tinumu noteikšanas metodes tehniski ekonomiskais novērtējums lauksaimniecības produktu ražošanā, izmantoto asinhrono elektrodzinēju drošuma uzlabošanai un atteices mazināšanai.

Darbs ir strukturēts 5 nodaļās:

1. nodaļā analizēta problemātika saistībā ar asinhrono elektrodzinēju atteicēm, to veidiem, iemesliem un statistiku visās nozarēs un lauksaimniecības nozarēs, analizēta asinhrono elektrodzinēju atteicu statistika un to iemesli vīstū kūtīs “Balticovo” Iecavā, apskatīti asinhrono elektrodzinēju aizsardzības viedi un veikts to salīdzinājums;
2. nodaļā apskatīti asinhrono elektrodzinēju siltuma zudumu veidi un to noteikšana, asinhrono elektrodzinēju silšanas procesu pamati, dažādu elektrodzinēja darba režīmu ietekme uz to silšanu un statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes.
3. nodaļā veikti asinhrono elektrodzinēju silšanas eksperimentālie pētījumi pie dažādām slodzēm un dzesēšanas apstākļiem, veikta statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņu korelācija, iegūts empīriskais modelis, ar kuru var noteikt statora tinumu temperatūras izmaiņas pēc rotācijas frekvences;
4. nodaļā apskatīts asinhronā elektrodzinēja pirmās kārtas silšanas modelis un novērtēta to precizitāte, izveidots otrās kārtas silšanas modelis statora tinumu temperatūras noteikšanas modeļa pilnveidošanai, veikta pilnveidota modeļa salīdzināšana ar eksperimentāliem rezultātiem;
5. nodaļā veikta asinhrono elektrodzinēju drošuma modelēšana, apskatītas asinhrono elektrodzinēju rotācijas frekvences metodes, izmantojot strāvas sensorus, aprakstīts algoritms statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtai, veikts šīs iekārtas ieviešanas ekonomiskais pamatojums.

Pētījumu un modelēšanas rezultāti apstiprina iepriekš izvirzītās hipotēzes, ka neregulējamā piedziņā strādājošu asinhrono elektrodzinēju statoru tinumu temperatūru un rotora rotācijas frekvenci ietekmē dzesēšanas apstākļi un, izmantojot attālinātu elektrodzinēja rotora rotācijas frekvences mērīšanu, pēc noteikta algoritma ir iespējams aizsargāt elektrodzinēja statora tinumu no pārkaršanas.

ANNOTATION

Gedzurs A. Estimation of thermal state of induction motors for improving of their reliability: Research paper for obtaining a doctoral (Ph.D.), Jelgava, LLU, 2022. The research thesis consists of 126 pages, it contains 12 tables, 101 pictures and 5 annexes. The thesis has 94 references.

The research thesis has been done at Latvia University of Life Sciences and Technologies, Faculty of Engineering, Institute of Energetics from September 2013 till January 2021.

The aim of the scientific thesis: theoretically and experimentally validate the method of estimating the stator winding temperature of an induction motor with remote measurement of motor rotation frequency and to develop an algorithm for application of this method for protection of low power induction motors against overheating.

The following tasks have been set to achieve the aim of the work:

1. to perform the analysis of the induction motor heating process, power losses and determination of thermal parameters on induction motor.
2. to study the methods of determining the stator windings temperature of induction motors.
3. to develop a mathematical model of low power induction motor stator windings heating process.
4. to perform experimental research of heating of induction motors operating at constant load with different rotor rotation frequency under normal conditions and under various cooling disturbances.
5. to develop a mathematical model describing the stator winding temperature and rotor rotation frequency changes;
6. verification and validation of the developed mathematical model - comparison of the simulation results with experimental results;
7. development of algorithm for low power induction motors protection and technical economic evaluation of the developed stator winding detection method to improve safety and reduce failure of induction motors used in agricultural production.

The paper consists of 5 chapters:

Chapter 1 analyzes the problems of induction motor failures, their types, causes and statistics in all industrial sectors and agricultural sectors, analyzes the statistics of induction motor failures and their causes in henhouses at "Balticovo" egg processing plant in Iecava, discusses the types and comparison of induction motor protection methods.

Chapter 2 discusses the types of heat losses of induction motors and their calculation, the basics of induction motor heating processes, the influence of different electric motor operating modes on their heating and stator winding temperature determination methods.

In Chapter 3, experimental studies of induction motor heating under different loads and cooling conditions are performed, the correlation of stator winding temperature and rotational frequency changes are analyzed and empirical model is obtained, which can determine stator winding temperature changes by estimation rotational frequency of induction motor.

Chapter 4 discusses the first-order heating model of an induction motor and evaluates its accuracy, a second-order heating model is developed to improve the stator winding temperature estimation model, comparison of the improved model simulation results with experimental results.

In Chapter 5, modeling of induction motor's reliability is performed, the rotational frequency estimation methods of using motors using current sensors are described, the algorithm for stator winding temperature estimation device is described, the economic evaluation of this device implementation is performed.

The results of research and modeling confirm the hypothesizes that the winding temperature and rotor rotation frequency of induction motor are influenced by cooling

conditions and using remote measurement of electric motor rotor rotation frequency, it is possible to protect electric motor stator winding from overheating.

SATURS

Attēlu saraksts	9
Tabulu saraksts	12
Pielikumu saraksts	12
Lietotie simboli, saīsinājumi un apzīmējumi.....	14
Ievads.....	14
1. Asinhrono elektrodzinēju drošuma analīze	18
1.1. Asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas apstākļu analīze	19
1.2. Asinhrono elektrodzinēju atteices analīze	25
1.3. Asinhrono elektrodzinēju atteices analīze SIA “Balticovo” olu ražošanas uzņēmumā	29
1.4. Asinhrono elektrodzinēju aizsardzības analīze.....	36
1.4.1. Elektrodzinēju pārslodzes aizsardzības ierīču veidi	36
1.4.2. Elektrodzinēju iebūvētās temperatūras aizsardzības metodes	39
1.4.3. Statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes.....	40
1.5. Pētījumu pamatojums, struktūra un metodika	42
1.6. Pētījumu hipotēze, mērķis un uzdevumi	42
1.7. Darba tautsaimnieciskā nozīme	43
2. Asinhrono elektrodzinēju silšanas izpēte	44
2.1. Asinhronā elektrodzinēja zudumu veidi	44
2.2. Asinhronā elektrodzinēja zudumu noteikšana un to sadalījums.....	47
2.2. Asinhronā elektrodzinēja siltumapmaiņas procesu analīze	50
2.3. Asinhronā elektrodzinēja silšanas analīze pie dažādiem darba režīmiem.....	53
2.4. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes	56
2.5. Nodaļas kopsavilkums un secinājumi	63
3. Asinhrono elektrodzinēju silšanas eksperimentālie pētījumi	65
3.1. Eksperimentālo pētījumu metodika	65
3.2. Asinhrono elektrodzinēju silšanas pētījumu rezultātu analīze	70
3.3. Ventilatoru piedziņas elektrodzinēju darbības analīze	80
3.4. Nodaļas kopsavilkums un secinājumi	81
4. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu silšanas modelēšana	82
4.1. Pirmās kārtas silšanas modeļa izmantošanas analīze asinhronā elektrodzinēja silšanas modelēšanai.....	82
4.2. Asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļa izveide un elektrodzinēja silšanas modelēšana.....	84
4.3. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras noteikšana pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences	93
4.4. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras modelēšana pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences	96
4.5. Nodaļas kopsavilkums un secinājumi	102
5. statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes ieviešanas ekonomiskais novērtējums	104
5.1. Asinhrono elektrodzinēju drošuma noteikšana.....	104
5.2. Asinhrono elektrodzinēju bezsensoru rotācijas frekvences noteikšana.....	108
5.3. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšana algoritms.....	110
5.4. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas ekonomiskais novērtējums	112
5.5. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas ieviešanas ekonomiskais novērtējums	113
5.6. Nodaļas kopsavilkums un secinājumi	116
Secinājumi	117
Informācijas avoti	119

ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att. Elektroenerģijas patēriņa sadalījums pa tehnoloģijām	18
1.2. att. Elektrodzinēju pārdošanas ieņēmumi atkarībā no elektrodzinēja jaudas	18
1.4. att. Izolācijas materiāla un gultņa smērvielas darbmūža atkarība no temperatūras.....	20
1.5. att. Statora tinumu izolācijas klases pieļaujamās temperatūras:.....	20
1.6. att. Apkārtējās vides ietekme uz elektrodzinēju drošumu	21
1.7. att. Elektrisko faktoru ietekme uz elektrodzinēju drošumu.....	22
1.8. att. Elektrodzinēju slodzes samazināšanas faktors atkarība no sprieguma asimetrijas pēc NEMA standarta	23
1.9. att. Mehānisko faktoru ietekme uz elektrodzinēju drošumu.....	25
1.10. att. Elektrodzinēja komponentu bojājumu sadalījums pēc EPRI datiem.....	26
1.11. att. Elektrodzinēja komponentu bojājumu sadalījums pēc IEEE datiem.....	26
1.12. att. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu atteices sadalījums	27
1.13. att. Remontēto elektrodzinēju skaits uzņēmumā SIA “Elektro” laika posmā no 2010. gada līdz 2015. gadam	28
1.14. att. Remontēto elektrodzinēju skaita sadalījums pēc dzinēja jaudas uzņēmumā SIA “Elektro”	28
1.15. att. Remontēto elektrodzinēju sadalījums pēc to pielietošanas nozarēm.....	29
1.16. att. Remontēto elektrodzinēju bojājumu sadalījums.....	29
1.17. att. Vistu olu ražotnes tehnoloģisko procesu shēma un elektrodzinēju skaits “Balticovo” ražotnē Iecavā.....	30
1.18. att. Elektrodzinēju sadalījums pēc jaudas Balticovo” ražotnē Iecavā	30
1.19. att. Ikgadējais elektrodzinēju atteicu skaits “Balticovo” ražotnē Iecavā laika posma no 2014. gada līdz 2017. gadam	31
1.21. att. Ventilatora elektrodzinēju atteices sadalījums pa mēnešiem vistu kūtīs laika posma no 2010. gada līdz 2017. gadam.....	32
1.22. att. Remontēto 1.1. kW ventilatora elektrodzinēju ekspluatācijas laiks līdz otrai atteicei.....	33
1.23. att. ABB 1.1 kW ventilatora elektrodzinēja ekspluatācijas apstākļi vistu kūtīs:.....	34
1.24. att. 1.1 kW bojāto ventilatora elektrodzinēju analīze:	35
1.25. att. Elektrodzinēju kombinētā elektroniskā aizsardzības ierīce SIEMENS ESP200:.....	38
Elektrodzinēju pārslodzes aizsardzības kļāšu nostrādes laiki t atkarībā no strāvas, atbilstoši IEC 60947-4-1 standartam	38
1.26. att. Pozistoru un PT 100 sensora pretestības izmaiņas atkarībā no temperatūras.....	39
1.27. att. 15 kW asinhronā dzinēja rotora un statora silšana	42
2.1. att. Asinhronā elektrodzinēja siltuma zudumu veidi un to cēloņi	44
2.2. att. Feromagnētiska materiāla histerēzes cilpa pie dažādām temperatūrām.....	46
2.3. att. Asinhronā elektrodzinēja statora elektrisko un magnētisko zudumu atkarība no dzinēja temperatūras tukšgaitās režīmā	47
2.4. att. Asinhronā elektrodzinēja zudumu sadalījums atkarībā no dzinēja slodzes.....	49
2.5. att. Asinhrono elektrodzinēju zudumu sadalījums ar jaudu 0.75 kW, 3.7 kW un 19 kW .	49
2.6. att. Asinhrono elektrodzinēju zudumu sadalījums ar jaudu 4 kW un 15 kW	50
2.7. att. ODP un TEFC asinhronie elektrodzinēji.....	51
2.8. att. Mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju siltumapmaiņa	53
2.9. att. Elektrodzinēja jauda $P = f(t)$ un temperatūra $\theta = f(t)$ S1 darba režīmā	54
2.10. att. Elektrodzinēja jauda $P = f(t)$ un temperatūra $\theta = f(t)$ S2 darba režīmā	54
2.11. att. Elektrodzinēja jauda $P = f(t)$ un temperatūra $\theta = f(t)$ S3 darba režīmā	55
2.12. att. Temperatūras aizsardzības ierīces ar kļūdu kompensācijas blokshēma	56
2.13. att. Asinhronā elektrodzinēja pirmās kārtas silšanas modelis	57
2.14. att. Asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļi	58
2.15. att. Asinhronā elektrodzinēja piektās kārtas silšanas modelis.....	59

2.16. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu pretestības R_s noteikšana ar līdzstrāvas signāla padošanu.....	60
2.17. att. Blokskāma asinhronā elektrodzinēja statora tinumu pretestības noteikšanai ar neironu tīklu.....	61
2.18. att. Asinhronā elektrodzinēja vienkāršotais otrās kārtas silšanas modelis	63
3.1. att. Asinhronā elektrodzinēja silšanas pētījumu stands	66
3.2. att. Asinhronā elektrodzinēja silšanas pētījumu stenda elektriskā shēma	66
3.3. att. Asinhrono elektrodzinēju silšanas eksperimentos mērījumu datu logeri	67
3.4. att. Termopāru izvietojums ABB elektrodzinējā.....	68
3.5. att. TC - 08 datu logeru iestatīšanas secība	69
3.6. att. Pētījumu stands ventilatora darbības analīzei pie dažādiem spriegumiem:	70
3.7. att. 4A asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti tukšgaitas režīmā bez dzesēšanas traucējumiem	71
3.8. att. 4A asinhronā elektrodzinējā silšanas eksperimentu rezultāti tukšgaitas režīmā ar dzesēšanas traucējumiem.....	72
3.9. att. 4A asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti tukšgaitas režīmā	72
3.10. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti pie dažādām slodzēm bez dzesēšanas traucējumiem.....	73
3.11. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti pie slodzes $k = 0.98$ ar dzesēšanas traucējumiem.....	73
3.12. att. Statora strāvas izmaiņa ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas pārejas procesā.....	74
3.13. att. Rotācijas frekvences izmaiņa ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas pārejas procesā.....	74
3.14. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti silšanas pārejas procesā pie dažādām slodzēm un dzesēšanas apstākļiem.....	75
3.15. att. ABB asinhronā elektrodzinēja gultņu sēžas silšanas eksperimentu rezultāti pie nominālas slodzes un bez ventilatora	76
3.16. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti pie nosprūdušā rotora.....	76
3.17. att. ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras un rotora rotācijas frekvences mijiedarbības raksturīgāne	77
3.18. att. ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņu korelācija lineārā posmā.....	78
3.19. att. ABB asinhronā elektrodzinēja koeficienta a atkarība no slodzes.....	79
3.20. att. Ventilatora strāvas un rotācijas frekvences atkarība no sprieguma.....	80
4.1. att. ABB asinhronā elektrodzinēja laika konstantes T noteikšana	82
4.2. att. Pirmās kārtas pārvades funkcija Matlab Simulink vidē statora tinumu silšanas simulācijai.....	83
4.3. att. Pirmās kārtas pārvades funkcijas statora tinumu silšanas simulācijas rezultāti pie dažādiem T un R_t lielumiem:.....	84
4.4. att. Asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļa siltuma plūsma	85
4.5. att. Asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļa ekvivalentā elektriskā shēma	86
4.6. att. Virtuālais modelis statora tinuma termiskās pretestības R_{t1} un siltumietilpības C_1 noteikšanai Matlab Simulink vidē	87
4.7. att. Virtuālais modelis korpusa termiskās pretestības R_{t2} un siltumietilpības C_2 noteikšanai Matlab Simulink vidē	88
4.8. att. ABB asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļa virtuālais modelis Matlab Simulink vidē	89
4.9. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas modeļa simulācijas rezultāti pie nominālas slodzes	89

4.10. att. ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinuma temperatūras starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem pie nominālas slodzes.....	90
4.11. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas modeļa simulācijas rezultāti pie pārslodzes	90
4.12. att. ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinuma temperatūras starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem pie pārslodzes	91
4.13. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas modeļa simulācijas rezultāti pie slodzes $k = 0.98$ ar dzesēšanas traucējumiem	91
4.14. att. ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinuma temperatūras starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem pie slodzes $k = 0.98$	92
4.15. att. ABB asinhronā elektrodzinēja atdzišanas simulācijas rezultāti	92
4.16. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas blokshēma pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences	93
4.17. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas virtuālais modelis pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences Matlab Simulink vidē.....	94
4.18. att. Pārslēgšanas bloka starp silšanas modeļa un temperatūras noteikšanas pēc rotācijas frekvences modeļiem uzbūve un darbība Matlab Simulink vidē.....	94
4.19. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas pēc rotācijas frekvences modeļa uzbūve Matlab Simulink vidē.....	95
4.20. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas pēc rotācijas frekvences modeļa uzbūve darbībā pirms un pēc bloka “Switch” pārslēgšanas	96
4.21. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie nominālas slodzes	97
4.22. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie nominālas slodzes	97
4.23. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie slodzes $k = 0.98$	98
4.24. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie slodzes $k = 0.98$	98
4.25. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie slodzes $k = 0.91$	99
4.26. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie slodzes $k = 0.91$	99
4.27. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie slodzes $k = 0.76$	100
4.28. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie slodzes $k = 0.76$	100
4.29. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie pārslodzes $k = 1.18$	101
4.30. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie pārslodzes...	101
5.1. att. ABB 1.1 kW asinhrono elektrodzinēju bezatzeices darbības vidējais laiks atkarībā no statora tinumu temperatūras.....	108
5.2. att. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšana algoritms.....	111
5.3. att. Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas izgatavošanas un montāžas izmaksas	114
5.4. att. Ventilatoru asinhronā elektrodzinēja bezatzeices darbības laika noteikšana pie statora tinumu temperatūras $110\text{ }^{\circ}\text{C}$	114
5.5. att. Ventilatoru asinhronā elektrodzinēja bezatzeices darbības laika noteikšana pie statora tinumu temperatūras $140\text{ }^{\circ}\text{C}$	115
5.6. att. Ventilatoru asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas NPV dinamika vistu kūtīs 15 gadu laika periodā.....	116

TABULU SARAKSTS

1.1.tabula. Sprieguma asimetrijas ietekme uz statora tinumu temperatūru	23
1.2.tabula. Trīs reizes atteikušo elektrodzinēju ekspluatācijas laiks starp atteicēm	33
1.3.tabula. Elektrodzinēju pārslodzes aizsardzības kļāšu nostrādes laiki t atkarībā no strāvas, atbilstoši IEC 60947-4-1 standartam	38
1.4.tabula. Elektrodzinēju pārslodzes aizsardzības nostrādes laiki t atkarība no strāvas atbilstoši IEC 60947-4-1 standartam, tolerances grupa E	39
2.1.tabula. Papildzudumi pēc IEEE 112 standarta.....	48
2.2.tabula. Asinhrono elektrodzinēju temperatūras noteikšanas metodes salīdzinājums	62
3.1.tabula. Koeficienta a atkarība no ABB asinhronā elektrodzinēja slodzes.....	79
3.2.tabula. Tīkla sprieguma ietekme uz ventilatora darbību.....	80
4.1.tabula. Laika konstantes T un termiskās pretestības R_t lielumi atkarībā no noteikšanas metodes	83
4.2.tabula. Elektrisko zudumu P_{el} un termisko pretestību aprēķinu rezultāti pie dažādām slodzēm.....	87
5.1.tabula. Drošuma analīzes parametru aprēķinu rezultāti.....	108
5.2.tabula. Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas programmēšanas un testēšanas izmaksas.....	113

PIELIKUMU SARAKSTS

1. pielikums. Mazgabarīta automātslēdžu apraksts
2. pielikums. Ventilatoru un temperatūras sensoru izvietojums vistu kūtīs
3. pielikums. Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas apraksts
4. pielikums. Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas galvenās komponentes un to cena
5. pielikums. Ventilatora asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas izmaksas salīdzinājums starp esošo situāciju ar statora tinumu temperatūras iekārtu un NPV analīzes rezultāti

LIETOTIE SIMBOLI, SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

PVU	sprieguma asimetrijas indekss, %	R_o	statora tinuma aktīvā pretestība pie sākuma temperatūras θ_o , Ω
MVD	maksimālā sprieguma novirze, V	α	pretestības termiskais koeficients, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
U_{vid}	vidējā līnijas spriegumu amplitūda, V	P_{mag}	magnētiskie zudumi, W
$U_{\text{ab}}, U_{\text{bc}}, U_{\text{ca}}$	līnijas spriegumi, V	k_{Hy}	histerēzes zudumu faktors
VUF	sprieguma asimetrijas faktors, %	k_{Ft}	virpuļstrāvas zudumu faktors
U_1	pozitīvās secības spriegums, V	B_{max}	magnētiskā indukcija, T
U_2	negatīvās secības spriegums, V	f	frekvence, Hz
a_u	operators	P_{virp}	virpuļstrāvas zudumi, W
R_s	statora pretestība, Ω	R_{dz}	serdes aktīvā pretestība, Ω
R_r	rotora pretestība, Ω	α_{dz}	dzelzs termiskais koeficients
R_{sn}	statora pretestība pēc ražotāja datiem, Ω	$\Delta\theta$	virstemperatūra, $^{\circ}\text{C}$
R_{rn}	rotora pretestība pēc ražotāja datiem, Ω	P_s	statora tinumu elektriskie zudumi, W
k_r	statora un rotora pretestības attiecības koeficients	P_r	rotora tinumu elektriskie zudumi, W
I_s	statora strāva, A	P	statoram pievadīta aktīvā jauda, W
I_r	rotora strāva, A	s	rotora slīde
P_{el}	elektriskie zudumi, W	ρ_i	i elementa materiāla blīvums, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
θ	Statora tinumu temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	ψ_{dr}	magnētiskās plūsmas saķēdējums, W
θ_o	sākuma temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	k	slodzes koeficients pēc strāvas
R_{θ}	statora tinuma aktīvā pretestība pie temperatūras θ , Ω	a	empīriskais koeficients, kas raksturo statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņas attiecību teorētiskā statora temperatūra pie rotācijas frekvences 0 apgriezieni min^{-1}
$\lambda_{\text{ix}}, \lambda_{\text{iy}}, \lambda_{\text{iz}}$	i elementa siltuma vadīšanas koeficienti koordinātu ass virzienā, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	θ_0	

c_i	i elementa materiāla īpatnēja siltumietilpība, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	C	asinhronā elektrodzinēja siltumietilpība, $J \cdot K^{-1}$
Q_i	i elementa siltuma avota īpatnēja siltuma plūsma, W	λ_e	elektrodzinēju atteices intensitāte
t	silšanas laiks, s	$P(t)$	bezatteices darbības varbūtība
q	siltuma plūsmas blīvums, $W \cdot m^{-2}$	$Q(t)$	atteices varbūtība
R_t	termiskā pretestība, $K \cdot W^{-1}$	$T_v(t)$	bezatteices darbības vidējais laiks
l	attālums starp diviem punktiem, m	K	koeficients, kas raksturo elektrodzinēja projektēšanas un uzgatavošanas stadijā sasniegto drošuma līme
S	šķērsriezuma laukums, m^2	λ_{vid}	elektrodzinēju vidējā atteices intensitāte
α	siltuma atdeves koeficients, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	v	vibrāciju ātrums, $mm \cdot s^{-1}$
θ_k	korpusa temperatūra, $^{\circ}C$	K_v	vides iespaids korekcijas koeficients
θ_v	arējās vides temperatūra, $^{\circ}C$	α_k	korekcijas koeficientu pēc elektrodzinēja slodzes koeficienta
σ	Stefana-Bolcamaņa konstante, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	n	rotācijas frekvence, min^{-1}
ε	melnuma pakāpe	D_{max}	filtra zemākās robežas frekvence
ε_d	relatīvais darba ilgums, %	FR	FFT analīzes frekvences izšķirtspēja
t_d	elektrodzinēja darba laiks, min	NPV	pašreizējā neto vērtība
t_p	pauzes laiks, min	E_o	sākotnējie ieguldījumi
t_c	cikla laiks, min	E_i	naudas plūsma i – gadā
m	elektrodzinēja masa, kg	θ_t	statora tinumu temperatūra, $^{\circ}C$
Q_a	akumulētā siltuma plūsma, W	C_1	statora tinumu siltumietilpība, $J \cdot ^{\circ}C^{-1}$
Q_v	videi atdotā siltuma plūsma, W	R_{t1}	statora tinumu termiskā pretestība, $^{\circ}C \cdot W^{-1}$
P_z	zudumu jauda, W	r	diskonta likme
T	silšanas laika konstante, s	R_{t2}	korpusa termiskā pretestība, $^{\circ}C \cdot W^{-1}$
L_s	statora induktivitāte, H	C_2	korpusa siltumietilpība, $J \cdot ^{\circ}C^{-1}$

$U_{sw,dc}$	nesimetriskā sprieguma līdzstrāvas komponente, V	f_e	ieslēgšanas biežums, h^{-1}
$U_{as,dc}$	fāzes sprieguma līdzstrāvas komponente, V	f_f	faktiskais ieslēgšanas biežums, h^{-1}
$U_{ab,dc}$	līnijas sprieguma līdzstrāvas komponente, V	v_f	faktiskais vibrāciju ātrums, $mm \cdot s^{-1}$
$I_{as,dc}$	statora strāvas līdzstrāvas komponente, A	θ_f	faktiskā tinumu temperatūra
L_s	statora induktivitāte, H	f_{nom}	nominālais ieslēgšanas biežums, h^{-1}
$U_{a'a,dc}$	starp barošanas avota un statora sprieguma līdzstrāvas komponente, V	v_{nom}	nominālais vibrāciju ātrums, $mm \cdot s^{-1}$
L_r	rotora induktivitāte, H	θ_{nom}	nominālā tinumu temperatūra, $^{\circ}C$
L_m	mijinduktivitāte, H	K_s	slodzes koeficients
U_{qs}	q-ass statora spriegums, V	θ_s	nostabilizētā temperatūra, $^{\circ}C$
I_{ds}	d-ass statora strāva, A	θ_d	darba temperatūra, $^{\circ}C$
U_{ds}	d-ass statora spriegums, V	C_s	silšanas modeļa statora siltumietilpība $J \cdot ^{\circ}C^{-1}$
I_{ns}	statora nominālā strāva, A	C_r	silšanas modeļa rotora siltumietilpība $J \cdot ^{\circ}C^{-1}$
$\Delta\theta_s$	statora virstemperatūra, $^{\circ}C$	R_{ts}	silšanas modeļa statora termiskā pretestība, $^{\circ}C \cdot W^{-1}$
T_1	statora laika konstante, s	R_{tr}	silšanas modeļa rotora termiskā pretestība, $^{\circ}C \cdot W^{-1}$
Q_{at}	statora tinumos akumulētā siltuma plūsma, W	R_{tv}	silšanas modeļa vides termiskā pretestība, $^{\circ}C \cdot W^{-1}$
Q_k	korpusam atdotā siltuma plūsma, W	θ_t	silšanas un rotācijas frekvences modeļa statora temperatūra, $^{\circ}C$
Q_{ak}	korpusā akumulētā siltuma plūsma, W		
α_R	pretestības termiskais koeficients, $\Omega \cdot ^{\circ}C^{-1}$		

IEVADS

Apmēram 58% no visas pasaulē saražotās elektroenerģijas patērē elektrodzinēji, apmēram 7% apgaismojumam un atlikušie 35% apkurei un citiem mērķiem. Galvenie elektrodzinēju veidi ir sinhronais elektrodzinējs, asinhronais elektrodzinējs un līdzstrāvas motors. Asinhronie elektrodzinēji ar jaudu mazāku par 3.5 kW sastāda 88% no elektrodzinēju kopskaita (Patel, 2021).

Asinhronajiem elektrodzinējiem ir vienkārša konstrukcija un augsts drošums, tomēr to atteices intensitāte smagos darba vides apstākļos var būt 12% no elektrodzinēju kopskaita (Venkataraman, 2005). Tādi ekspluatācijas apstākļi ir raksturīgi lauksaimniecības objektiem, kur asinhronie elektrodzinēji piedzen sūkņus, barības sagatavošanas iekārtas, ventilatorus, transportierus utt. Vairāki apkārtējās vides apstākļi, tādi kā putekļi, augsta temperatūra darba telpā, var izraisīt asinhronā elektrodzinēja pārkaršanu. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu izolācijas bojājums, pārkaršanas dēļ, var izraisīt elektrodzinēja atteici un būs nepieciešams remonts. Asinhronā elektrodzinēja atteice var apturēt ražošanas procesu, līdz ar to kopā ar tiešajām izmaksām par remontu, var būt ražošanas zaudējumi.

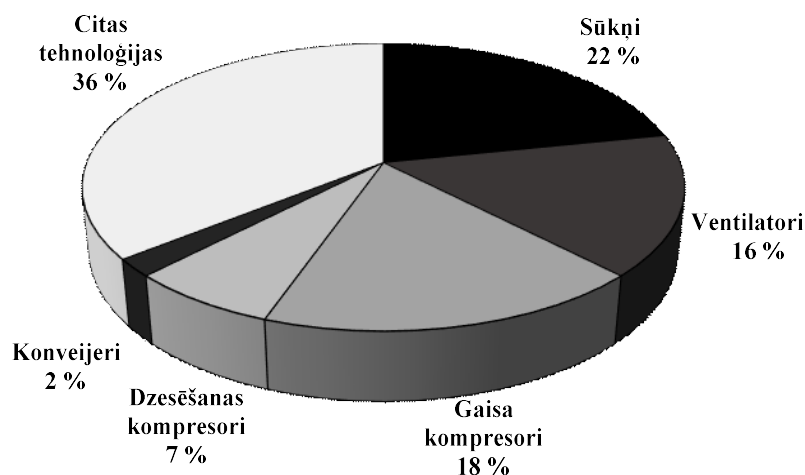
Asinhrono elektrodzinēju drošumu analīze Balticovo olu ražotnē Iecavā parādīja, ka vistu kūtīs ir darba vide ar lielu graudu putekļu daudzumu, kuri pārklājas uz mazas jaudas ventilatoru asinhronajiem elektrodzinējiem. Šiem ventilatoru elektrodzinējiem atteices intensitāte ir salīdzinoši augsta – 6 % no ventilatora kopskaita ražotnē (Gedzurs, 2016). Izmantotās aizsardzības ierīces asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai nespēj aizsargāt pārkarsušos elektrodzinējus, bet temperatūras sensoru izmantošana mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai no pārkaršanas nav ekonomiski pamatota.

Pamatojoties uz mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju aizsardzības problēmu no pārkaršanas, kuru izraisa dzesēšanas traucējumi, tika izvēlēta promocijas darba tēma par asinhrono elektrodzinēju statora temperatūras noteikšanas metodes izstrādi, kuras izmantošana būtu ekonomiski pamatots risinājums arī mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai.

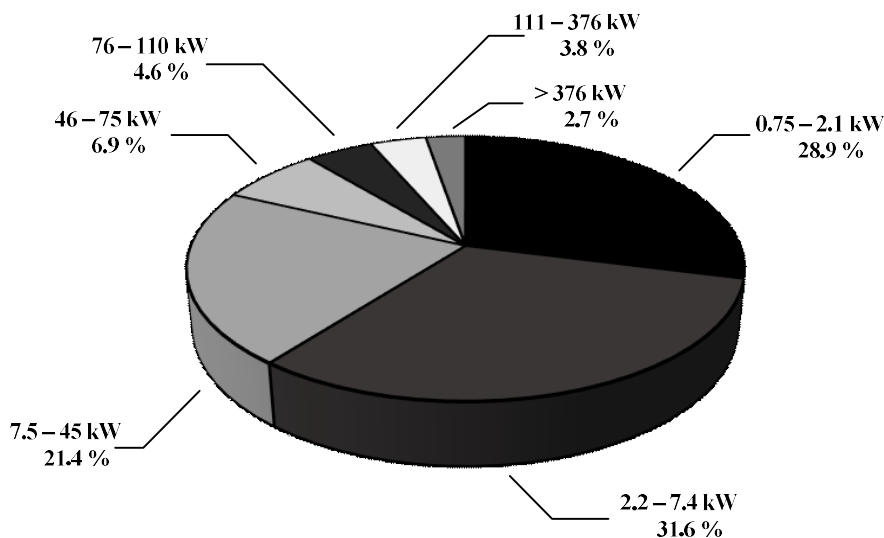
Promocijas darbā apskatītas pašreizējās zinātniskās publikācijas par asinhrono elektrodzinēju aizsardzības risinājumiem un temperatūras noteikšanas metodēm. Pēc zinātniskās literatūras analīzes tika izvirzīti darba mērķis, hipotēze un uzdevumi.

1. ASINHRONO ELEKTRODZINĒJU DROŠUMA ANALĪZE

Elektrodzinēji tiek plaši lietoti industrijā, lauksaimniecībā, sabiedrisko pakalpojumu un māsaimniecības nozarēs. Eiropas Savienībā industrijā elektrodzinēji patērē apmēram 70 % no patērētās elektroenerģijas (Bertoldi, 2015). Visvairāk elektrodzinēji piedzen kompresorus, ventilatorus un sūkņus (skat. 1.1. att.). Pēc elektrodzinēju pārdošanas datiem (skat. 1.2. att.) var redzēt, ka visvairāk no pārdotiem elektrodzinējiem ir elektrodzinēji ar jaudu diapazonu 0.75-45 kW. Vairāk nekā 90 % no globāli pārdotiem zemsprieguma elektrodzinējiem ir ar jaudu 0.75-7.5 kW (Meza, 2014; Gomen et al, 2019).



1.1. att. Elektroenerģijas patēriņa sadalījums pa tehnoloģijām (Gomen et al, 2019)



1.2. att. Elektrodzinēju pārdošanas ieņēmumi atkarībā no elektrodzinēja jaudas (Meza, 2014, Gomen et al, 2019)

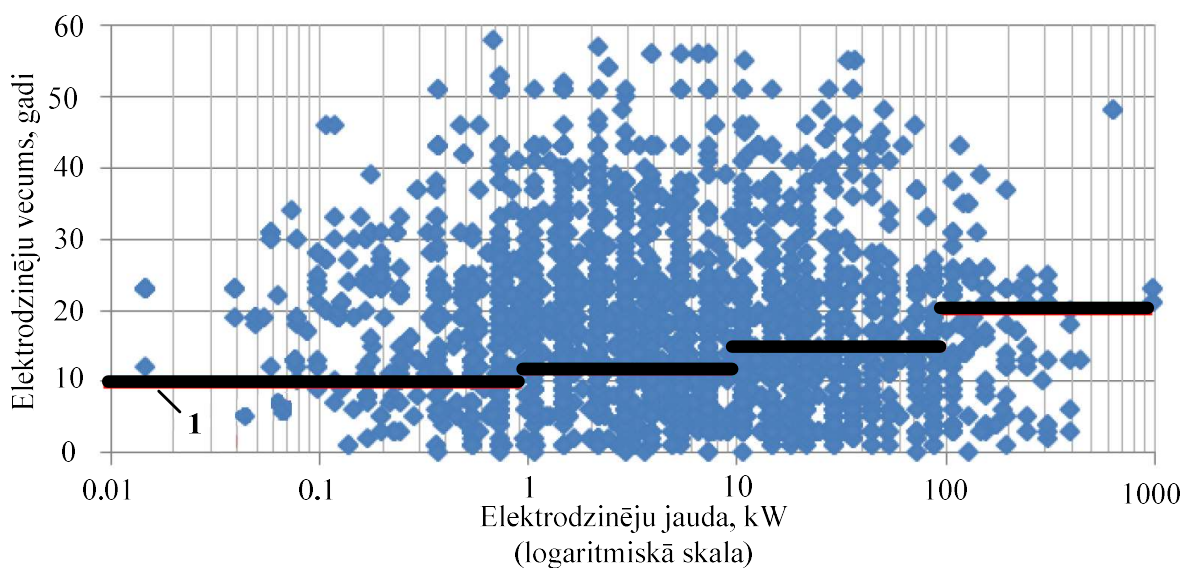
Vairāk nekā 80% no elektrodzinēju kopskaita sastāda asinhronie elektrodzinēji ar īsi slēgto rotoru (Ferreira un citi, 2015). Asinhrono elektrodzinēju ar īsi slēgto rotoru priekšrocības:

1. vienkārša konstrukcija;
2. drošums;
3. zemā cena.

Tipiski, asinhrono elektrodzinēju darbmužs ir 12 – 20 gadi. Šajā laikā dzinējs var tikt pārtīts 2- 4 reizes atkarībā no to jaudas un darbības apstākļiem (Bertoldi, 2015; De Almeida et al, 2008). Neskatoties uz augsto drošuma līmeni, ikgadēja atteices intensitāte ir aptuveni 3-5% no elektrodzinēju kopskaita (Venkataraman et al, 2005). Asinhrono elektrodzinēju atteice var

izraisīt būtiskus tiešus un tehnoloģiskus zaudējumus, t.i., dzinēja nomaiņu, remontu un ražošanas zaudējumus. Vidējie dīkstāves zaudējumi, ko izraisa dzinēja atteice, var sasniegt $7000 \text{ USD}\cdot\text{h}^{-1}$ kokapstrādes uzņēmumā un $30000 \text{ USD}\cdot\text{h}^{-1}$ pārtikas pārstrādes uzņēmumā (Grubic et al, 2008).

Laika posmā no 2010.-2014. gadam Šveicē tika veikta audita programma “Easy” 18 uzņēmumos, lai analizētu elektropiedziņas sistēmas. Rezultāti rāda (1.3. attēls), ka no 4142 elektrodzinējiem, 56 % gadījumos elektrodzinēju vecums bija lielāks nekā to darbmūžs (Werle, 2014). Nekvalitatīva pārtīšana var samazināt elektrodzinēja lietderības koeficientu pat par 4 procentpunktiem (Ferreira et al, 2016). Elektrodzinēja liels kalpošanas laiks un samazinātais lietderības koeficients (lielāki zudumi, līdz ar to lielāka silšana) var paaugstināt to atteices intensitāti, tādā veidā var pārtraukt ražošanas procesu un radīt ekonomiskos zaudējumus.



1.3. att. Elektrodzinēju vecums 18 industriālos un infrastruktūras uzņēmumos Šveicē (R. Werle, 2014):

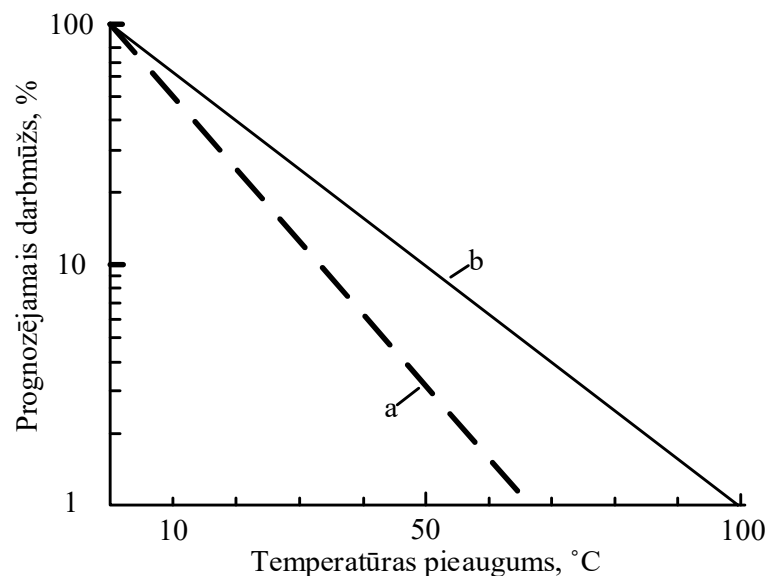
1 – elektrodzinēju darbmūžs

1.1. Asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas apstākļu analīze

Asinhronos elektrodzinējus izmanto vairākās nozarēs un tie ir pakļauti vairākiem faktoriem, kas ietekmē asinhrono elektrodzinēju darbības, aizsardzības kvalitāti. Piemēram, lauksamniecības nozarē ir šādas īpatnības un raksturīgie faktori – klimatiskie apstākļi, elektroenerģijas kvalitātes parametri, garas elektropārvades līnijas, smagie darba vides apstākļi. Šos faktorus var iedalīt trīs grupās:

1. apkārtējās vides faktori;
2. elektriskie faktori;
3. mehāniskie faktori.

Elektrodzinēja pārkaršana, kuru var izraisīt elektriskie, mehāniskie un apkārtējās vides faktori, ir viens no galvenajiem faktoriem, kas būtiski ietekmē elektrodzinēja drošuma līmeni. Visvairāk pārmērīga silšana ietekmē statora tinumu izolācijas un gultņu smērvielas ekspluatācijas laiku (1.4. attēls). Pārkaršanas gadījumā mainās izolācijas struktūra un ātri pasliktinās izolācijas īpašības. Izolācija kļūst trausla, rodas mikroplaisas. Mikroplaisās var iekļūt mitrums un netīrumi, kā rezultātā elektriskā pretestība ātri samazinās, kā arī var notikt izolācijas caursīšana, un tinumi var sadegt. Īsas termiskās pārslodzes, kad statora tinumu temperatūra pārsniedz izolācijas kritiskās temperatūras, gandrīz neiespaido izolācijas darbmūža ilgumu.

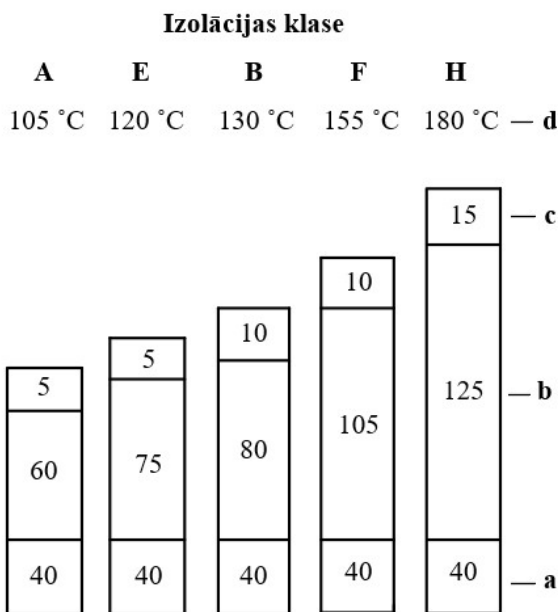


1.4. att. Izolācijas materiāla un gultņa smērvielas darbmuža atkarība no temperatūras (Ferreira un citi, 2015):
a – izolācija; b – smērviena

Elektroizolācijas materiālus iedala klasēs atkarība no to termiskās izturības (1.5. attēls). Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu izolācijai visvairāk tiek izmantotas šādas klases:

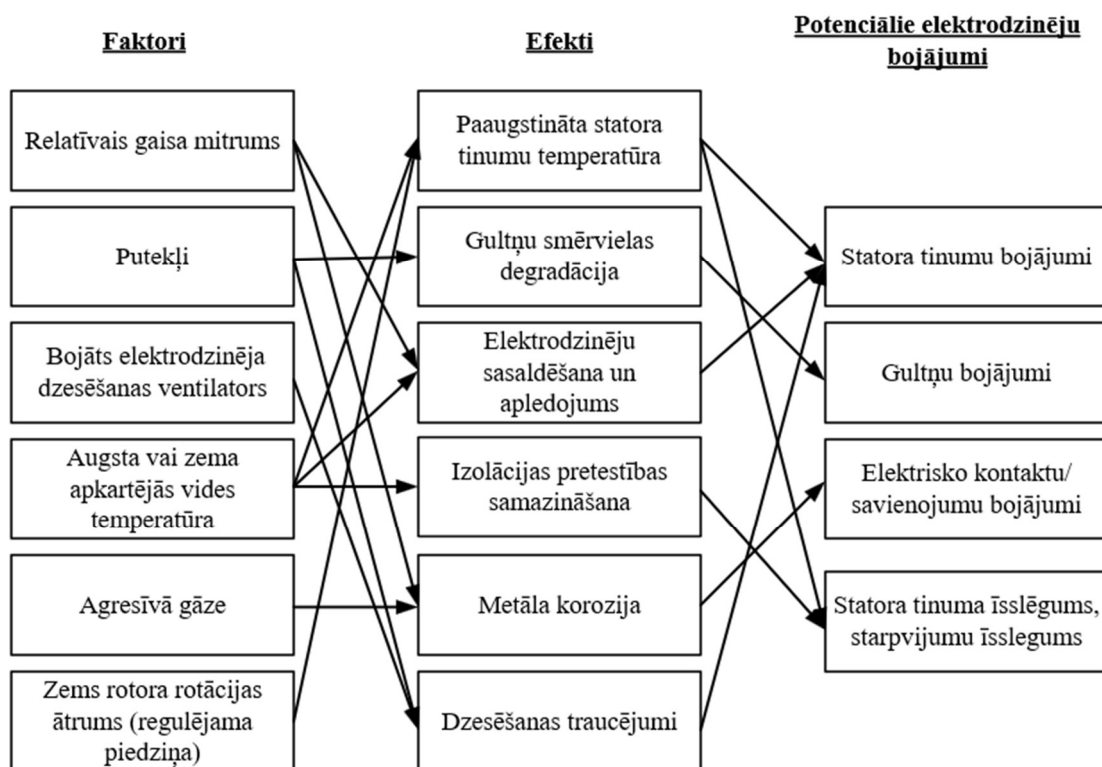
1. B izolācijas klase ar pieļaujamo temperatūru 130 °C;
2. F izolācijas klase ar pieļaujamo temperatūru 155 °C;
3. H izolācijas klase ar pieļaujamo temperatūru 180 °C.

Izolācijas klases pieļaujamās temperatūras ir pie nosacījuma, ka apkārtējās vides temperatūra ir 40 °C. Ja elektrodzinējs strādā ar nemainīgo slodzi darba vidē ar apkārtējās vides temperatūru zem 40 °C, tad elektrodzinēju var noslogot ar lielāko slodzi nekā nominālā slodze. Par katru tinumu izolācijas temperatūras pieaugumu par 10 °C, izolācijas ekspluatācijas laiks samazinās par aptuveni 50 %. Gultņu smērvielām – par katru 15 °C temperatūras pieaugumu (Ferreira un citi, 2015).



1.5. att. Statora tinumu izolācijas klases pieļaujamās temperatūras:
a – maksimālā apkārtējās vides temperatūra; b – pieļaujamā temperatūra; c – pieļaujamā temperatūra tinuma “karstākajā punktā”; d – maksimālā temperatūra

Apkārtējās vides mikroklimata un mikrobioloģiskie apstākļi (1.6. attēls) ietver darba vides temperatūru, graudu un citu izejmateriālu putekļus, gaisa mitrumu, putekļus u.c. Lauksaimniecības objekti tiek pakļauti nokrišņiem un temperatūru izmaiņām, piemēram, ziemas laikā apkārtējās vides temperatūra var būt $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ un vasarā $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plašais temperatūru diapazons un to svārstības, rada problēmas izolācijai – tās termiskās izplešanās koeficients atšķiras no vada materiāla (vara) un var veidoties atslāņošanās plaisas, u.c. Ja apkārtējās vides temperatūra ir zema, tad pieaug berze elektrodzinēju kustīgajos elementos. Ir iespēja, ka tie var iesalst un, palaižot dzinēju, rotors negriežas, statora tinumā plūst palaišanas strāva, tinuma temperatūra strauji palielinās. Ja aizsardzības iekārta nenostādā laicīgi, statora tinuma izolācija pārdegs un notiks īsslēgums. Pie lielām apkārtējās vides temperatūrām samazinās siltuma apmaiņa ar elektrodzinēju un apkārtējo vidi, rezultātā pieaug elektrodzinēju temperatūra.

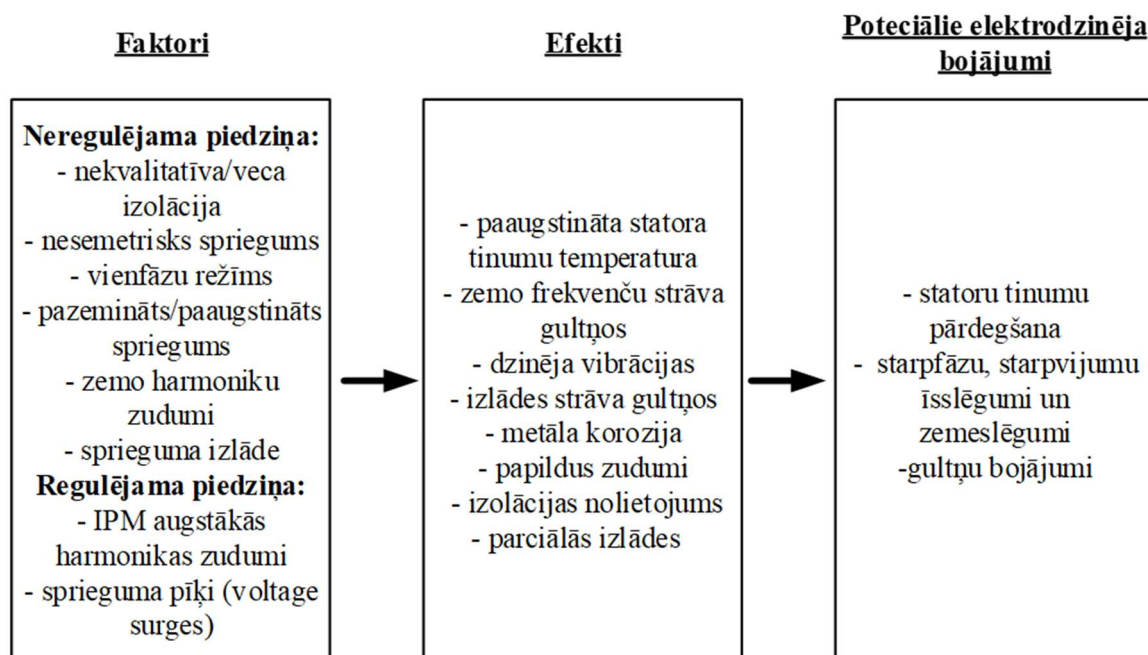


1.6. att. Apkārtējās vides ietekme uz elektrodzinēju drošumu

Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu izolācijas pretestība var samazināties pie paaugstināta gaisa mitruma. Elektrodzinēja palaišanas laikā var rasties komutācijas pārspriegums un, ja statora tinumu izolācijas pretestība ir samazināta, var tikt caursista izolācija.

Paaugstināts putekļu daudzums gaisā veicina gultņu paaugstinātu nodilumu, nokļūstot starp gultņa cietajām daļiņām. Putekļu kārtā uz elektrodzinēja korpusa traucē normālu dzesēšanu. Statora tinumu pārklāšana ar putekļiem un biežie komutācijas pārspriegumi, piemēram, elektropiedziņa ar frekvenču pārveidotāju, var izraisīt izolācijas virsmas bojājumus (surface tracking – noplūde pa virsmu) un samazināt elektrisko pretestību (Webber et al, 1996).

Pie elektriskiem (1.7. attēls) ārējiem faktoriem pieder ārtīkla sprieguma kvalitātes rādītāji, iekšējiem faktoriem – izolācijas kvalitāte, regulējamas piedziņas īpatnības. Pārspriegumi, sprieguma asimetrija, efektīvās vērtības novirze, frekvences novirze, augstākās harmonikas, negatīvi iespaido asinhronā elektrodzinēja darbību.



1.7. att. Elektrisko faktoru ietekme uz elektrodzinēju drošumu

Elektromagnētisko pārejas procesu laikā, kad elektrodzinējus ieslēdz vai atslēdz, rodas pārspriegumi. Pārspriegumi var rasties no zibens, kā arī no elektroniskām iekārtām, kas regulē dzinēja rotācijas ātrumu.

Praksē parasti izmanto divas vispārējas sprieguma asimetrijas definīcijas atbilstoši NEMA (National Electrical Manufacturers Association) un IEC (International Electrotechnical Commission) standartiem. Pēc NEMA standarta tiek izmantots indekss “percent voltage unbalance” (PVU), kurš tiek aprēķināts pēc (Csanyi, 2017):

$$PVU = \frac{MVD}{U_{vid}} \cdot 100, \quad (1.1)$$

kur PVU – sprieguma asimetrijas indekss, %;
MVD – maksimālā sprieguma novirze, V;
 U_{vid} – vidējā līnijas spriegumu amplitūda, V.

Maksimālā sprieguma novirzi aprēķina pēc (Csanyi, 2017):

$$MVD = \max[(U_{ab} - U_{vid}), (U_{bc} - U_{vid}), (U_{ca} - U_{vid})], \quad (1.2)$$

$$U_{vid} = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3}, \quad (1.3)$$

kur U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} – līnijas spriegumi, V.

IEC standarts sprieguma asimetrijas novērtēšanai izmanto sprieguma asimetrijas faktoru (VUF – voltage unbalance factor), kuru aprēķina pēc 1.4 formulas (Csanyi, 2017):

$$VUF = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100, \quad (1.4)$$

kur VUF – sprieguma asimetrijas faktors, %;
 U_1 – pozitīvās secības spriegums, V;
 U_2 – negatīvās secības spriegums, V.

Pozitīvās un negatīvās secības spriegumus var noteikt pēc simetriskās komponentu metodes (Laadjal et al., 2021). Pozitīvās secības spriegumu nosaka (Csanyi, 2017):

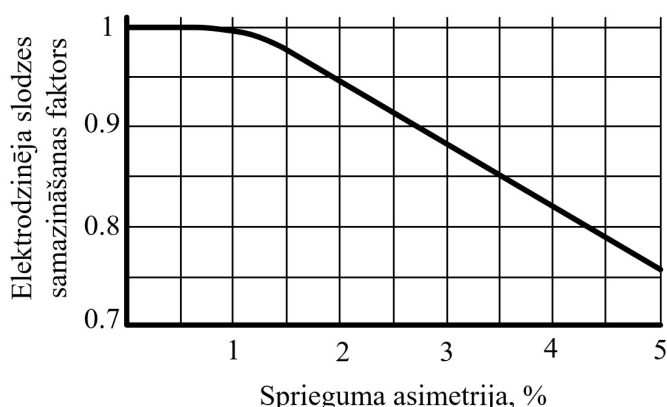
$$U_1 = \frac{U_{ab} + a_u \cdot U_{bc} + a_u^2 \cdot U_{ca}}{3}, \quad (1.5)$$

Negatīvās secības spriegumu nosaka (Csanyi, 2017):

$$U_2 = \frac{U_{ab} + a_u^2 \cdot U_{bc} + a_u \cdot U_{ca}}{3}, \quad (1.6)$$

kur a_u – operators, $a_u = e^{j120^\circ}$ un $a_u^2 = e^{j240^\circ}$.

Ja trīsfāžu asinhronais elektrodzinējs tiek pieslēgts pie nesimetriskā sprieguma, rodas negatīvās secības strāva, kas palielina statora un rotora tinumu silšanu, bet nerada lietderīgo jaudu. Tabulā 1.1. ir parādīts statora tinumu temperatūras pieaugums atkarība no sprieguma asimetrijas. 2 % sprieguma asimetrija var palielināt statora tinumu temperatūru par 8 %, bet 5 % sprieguma asimetrija jau par 50 %. Tāpēc pēc NEMA standarta rekomendācijas, ja sprieguma asimetrija ir lielāka par 1%, ir jāsamazina elektrodzinēja slodze (1.8. attēls). Ja sprieguma asimetrija ir lielāka par 5 %, tad nerekomendē darbināt elektrodzinēju.



1.8. att. Elektrodzinēju slodzes samazināšanas faktors atkarība no sprieguma asimetrijas pēc NEMA standarta (Csanyi, 2017)

1.1.tabula

Sprieguma asimetrijas ietekme uz statora tinumu temperatūru (Csanyi, 2017)

Sprieguma asimetrija, %	Statora tinumu temperatūras pieaugums, %
2	8
3	18
4	32
5	50

Nepilnfāžu režīma iespaids uz asinhrona elektrodzinēja darbību un iespējamās sekas ir atkarīgas no sekojošiem faktoriem:

1. asinhrona elektrodzinēja statora tinumu slēgums (Y vai Δ);
2. dzinēja darba stāvoklis fāzes izzušanas laikā (dzinējs tiek darbināts ar slodzi vai tiek palaists);
3. dzinēja noslodze un darba mašīnas mehāniskie raksturlielumi.

Pazemināts spriegums proporcionāli kvadrātam samazina griezes momentu un palielina slīdi. Līdz ar to, dzinējs nevarēs attīstīt nominālo jaudu, un griezīsies lēnāk, kas savukārt samazina ražošanas procesa jaudu un noved pie ekonomiskiem zaudējumiem. Ja elektrodzinējs tiek ekspluatēts pie smagiem palaišanas apstākļiem, tad pazemināts spriegums var izraisīt rotora nosprūšanu palaišanas vai griešanas laikā.

Paaugstināts spriegums palielina magnētiskos zudumus statora serdē, 10 % pārspriegums izraisa 20-30 % magnētisko zudumu pieaugumu (Finley, 2000). Līdz ar to palielinās elektrodzinēja, īpaši statora tinuma, temperatūra.

Samazinoties frekvencei, palielinās magnētiskā plūsma un magnetizācijas strāva, kā arī tukšgaitas strāva. Samazinoties frekvencei par 10%, tukšgaitas strāva palielinās par 20-30 % (Šnīders, 1995). Tā kā tukšgaitas strāva galvenokārt sastāv no reaktīvās komponentes, tās palielināšanās samazina elektrodzinēja jaudas koeficientu. Palielinoties frekvencei, notiek proporcionāls rotācijas ātruma pieaugums. Ja elektrodzinējs darbina ventilatora sistēmu, tā griezes moments palielinās proporcionāli frekvencei kvadrātā un magnētiskā plūsma samazinās apgriezti proporcionāli frekvencei. Tas viss palielina rotora strāvu un līdz ar to arī zudumus rotorā un to temperatūru. Palielinoties frekvencei par 10 %, rotora strāva palielinās apmēram 1.5 reizes un paaugstina rotora silšanu. Rotorā intensīvākā silšana savukārt var izraisīt elektrodzinēja pārkāršanu un izraisīt elektrodzinēja atteici (Gedzurs, 2013).

Lai regulētu asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātrumu un iegūtu ekonomisko efektu, regulējot ražošanas procesu, tiek izmantoti frekvenču pārveidotāji. Elektropiedziņa ar frekvenču pārveidotāju tiek plaši izmantota sūkņu un ventilatoru rotācijas ātruma regulēšanai. Galvenās problēmas, ko izraisa frekvenču pārveidotāja izmantošana:

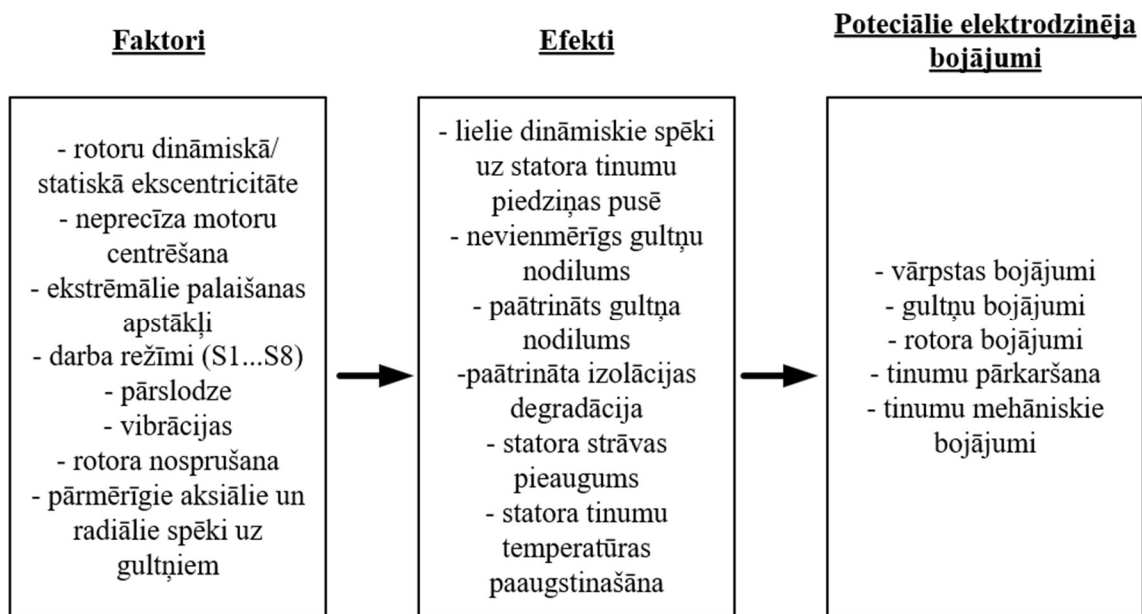
1. augstu frekvenču harmoniku strāvas gultņos;
2. lielāki magnētiskie zudumi;
3. statora tinumu izolācijas paātrināta degradācija;
4. neoptimālā dzesēšana pie mazākiem ātrumiem.

Frekvenču pārveidotājs padod augstfrekvences spriegumu uz elektrodzinēju un inducē augstfrekvences strāvas rotora vārpstā. Ja gultņu smērvielas aizsargvāks tiek bojāts, tad caur gultņiem var plūst augstfrekvences strāva, kas saīsina gultņa un smērvielas darbību (Ferreira un citi, 2006). Viens no šo problēmu risinājumiem ir elektriski izolēto gultņu izmantošana.

Regulējamās piedziņas gadījumā 5., 7., un 11. kārtas harmonikas spektrs tiek pārvietots uz augstākām kārtām atkarībā no IPM (impulsa platuma modulācijas) frekvences. Rezultātā statora tinumos un serdē tiek palielināti magnētiskie zudumi, kas palielina elektrodzinēja temperatūru līdz 10 %, salīdzinot ar neregulējamo piedziņu (Ferreira, 2008). Līdz ar to statora tinumu temperatūra pieaug un izolācijas degradācija paātrinās.

Biežo komutāciju dēļ frekvenču pārveidotājs izraisa pārsprieguma impulsus. Statora tinumi, kuri ir tuvāk motora pieslēgšanas terminālam, tiek pakļauti pārsprieguma impulsiem. Šī sprieguma amplitūda varbūt līdz 2 reizes lielāka nekā frekvenču pārveidotāja līdzstrāvas posma izejas spriegums. Šis spriegums palielina elektrisko slodzi uz izolāciju, un var izraisīt parciālās izlādes. Pārsprieguma impulsu biežums ir tieši atkarīgs no IPM frekvences. Samazinot IPM frekvenci, var samazināt elektrisko slodzi uz izolāciju, bet magnētiskie zudumi var palielināties, un tas palielinās izolācijas termisko novecošanu (Ferreira et al, 2015).

Pie mehāniskiem faktoriem pieder dzinēja ekscentricitāte, montāžas kvalitāte, slodzes raksturs, vibrācijas (skat. 1.7. attēlu).



1.9. att. Mehānisko faktoru ietekme uz elektrodzinēju drošumu

Elektrodzinēja ekscentricitāte ir tad, kad gaisa sprauga starp statoru un rotoru nav vienmērīga. Galvenie ekscentricitātes cēloņi ir nekvalitatīvā elektropiedziņas centrēšana, gultņu bojājumi. Ekscentricitātes rezultātā, vietā ar mazāku gaisa spraugu, rotors tiek pievilkt ar lielāku spēku. Ja ekscentricitātes pakāpe ir pietiekoši liela, var notikt berze starp statoru un rotoru. Ekscentricitāte izraisa arī statora tinumu nevienmērīgu silšanas sadalījumu. Veicot asinhrona elektrodzinēja silšanas simulāciju pie dažādām ekscentricitātes pakāpēm, rezultāti parāda, ka pie 5/6 ekscentricitātes statora tinumu viskarstākās vietas, temperatūra pieaug par $\sim 7^{\circ}\text{C}$, salīdzinot ar veselu elektrodzinēju (Baptista et al, 2012).

Nekvalitatīva elektrodzinēja uzstādīšana un savienošana ar darba mašīnu paaugstina tā vibrāciju līmeni. Paaugstinātās vibrācijas dēļ samazinās gultņu ekspluatācijas laiks, tinumu izolācijā rodas mikroplaisas. Tas savukārt var novest pie izolācijas caursīšanas. Paaugstinātu vibrāciju iespaidā var kļūt vaļīgi elektrodzinēju elektropievadu stiprinājumi, kā rezultāta var rasties nepilnfāžu režīms vai īssavienojums uz korpusu. Statora feromagnētiskais tērauds uzsilst mazāk nekā tinumu vadītājs no vara, un tiem ir dažādi termiskās izplešanas koeficienti. Rezultātā varš izplešas vairāk nekā tērauds pie darba slodzes. Tas rada mehānisko iedarbi statora rievās un vadu pārvietošanu, kas noved pie izolācijas berzes un jaunu spraugu veidošanu, kuros iekļūst mitrums un putekļi (Gedzurs, 2013).

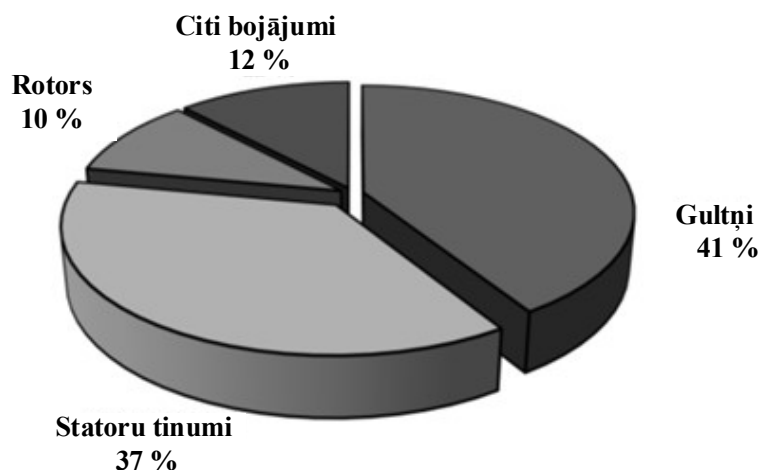
Asinhrono elektrodzinēju palaišanas strāva 5-7 reizes pārsniedz nominālo strāvu (Šnīders, 1993). Asinhrono elektrodzinēju elektriskie zudumi ir atkarīgi no strāvas, tāpēc elektrodzinēju palaišana apstākļos palaišanas apstākļos noved pie ilgākas intensīvas statora tinumu silšanas un statora tinumu temperatūra ātri var pārsniegt izolācijas pieļaujamo vērtību.

Mehāniskas iedarbes uz tinumu izolāciju var notikt pie nevienmērīgas termiskās izplešanās starp dažādiem elektrodzinēja elementiem, korpusa vibrācijām, elektrodzinēja palaišanas laikā.

1.2. Asinhrono elektrodzinēju atteices analīze

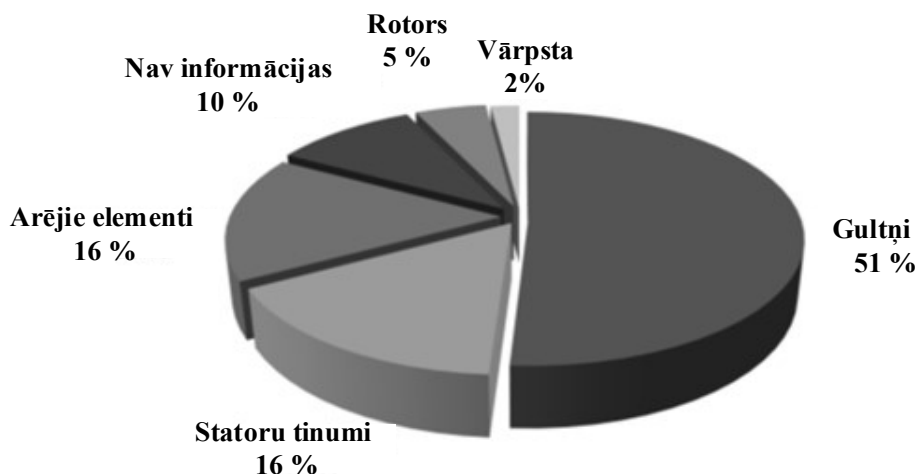
Analizējot zinātniskos literatūras avotus par elektrodzinēju atteicēm secināts, ka tika veikti 2 lieli pētījumi par elektrodzinēju drošumu: EPRI un IEEE elektrodzinēju drošuma pētījumi. 1983. gadā EPRI (Elektroenerģijas Pētniecības institūts) veica elektrodzinēju atteices analīzi un vispārējo elektrodzinēju drošuma novērtējumu vairākos uzņēmumos. Elektrodzinēju atteices sadalījums ir parādīts 1.10. attēlā – no 1227 atteicēm 41 % notika elektrodzinēja gultņu

bojājumu dēļ, 37 % – statora tinumu bojājumi, 10 % rotora bojājumi un 12 % – citi bojājumi (1.10. attēls) (Albrecht un citi, 1986, 1987). Kopā tika analizēti 4797 elektrodzinēji, no kuriem 872 tika bojāti. Bet kopējais elektrodzinēju atteicu skaits bija 1227. Var redzēt, ka 335 atteices no kopējām atteicēm notikušas atkārtoti. Bija gadījumi, kad viens un tas pats dzinējs izgāja no ierindas 4 un vairākas reizes, sliktākajā gadījumā 8 reizes. Vairāk nekā 90 % no dzinēju atteicēm notika 54 % uzņēmumos no kopēja skaita, bet 50 % no kopējām atteicēm – 17 % uzņēmumos. Šajos 17 % uzņēmumos ikgadējā elektrodzinēju atteices intensitāte sasniedz 9.3 %, 13 % uzņēmumos atteču intensitāte bija tikai 0.8 % un vidējā intensitāte sastāda 3.4 %. Kā var redzēt, elektrodzinēju atteices intensitāte starp uzņēmumiem var būtiski atšķirties, ko var izskaidrot ar atšķirīgiem tehnoloģiskiem procesiem un darba vides apstākļiem.



1.10. att. Elektrodzinēja komponentu bojājumu sadalījums pēc EPRI datiem

Vēl vienu plašu pētījumu par elektrodzinēju drošumu un atteicēm veica IEEE (Elektronikas un Elektrotehnikas inženieru institūts) darba grupa (1.11. attēls).



1.11. att. Elektrodzinēja komponentu bojājumu sadalījums pēc IEEE datiem

IEEE veica 3 elektrodzinēju drošuma pētījumus 1983., 1985. un 1995. gadā. Šajos pētījumos tika analizētas elektrodzinēju atteices tautsaimniecībā, industriālā, naftas, gāzes ieguves un apstrādes industrijā. Atbilstoši IEEE pētījumu rezultātiem elektrodzinēju atteices sadalījums pēc bojātas dzinēja komponentes ir šāds (Albrecht un citi, 1986, 1987; Thorson un Dalva 1995):

1. gultņu bojājumi – 51 %;
2. statora bojājumi – 16 %;

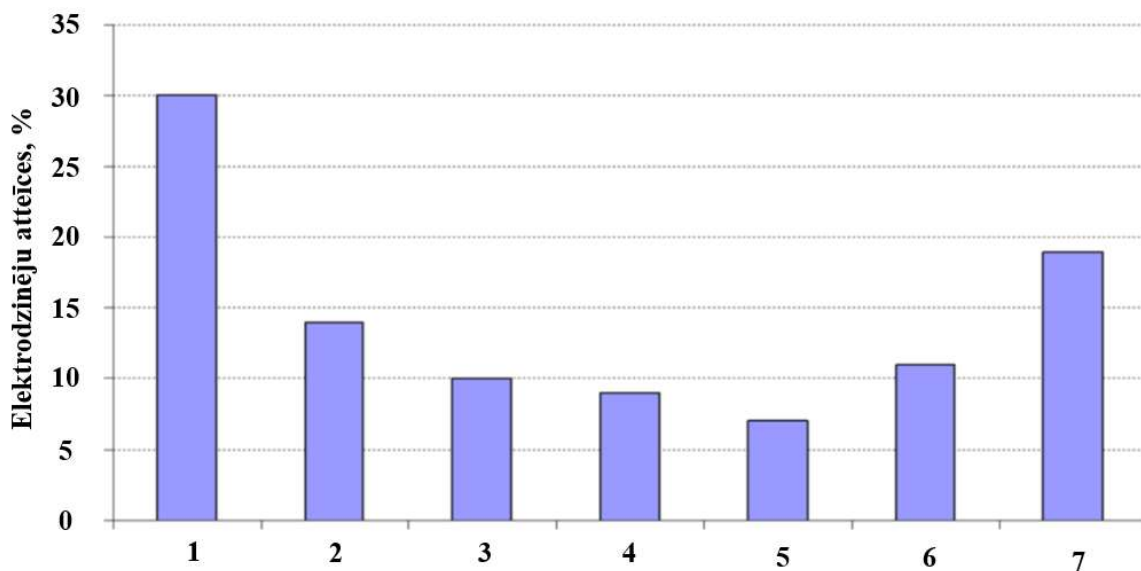
3. elektropiedziņas ārējo elementu bojājumi – 16 %;
4. rotora bojājumi – 5 %;
5. vārpstas bojājumi – 2 %;
6. netika minēti atteices iemesli – 10 %.

IEEE un EPRI pētījumos tika secināts, ka lielākā daļa elektrodzinēju atteižu notiek gultņu bojājumu dēļ. Lielākā atšķirība pētījumos ir statoru bojājumu sadalījumam, EPRI pētījumā – 37 %, bet IEEE – 16 %.

Atteices intensitāte elektrodzinējiem, kuri tika aprīkoti ar temperatūras sensoriem, bija 3 reizes mazāka nekā elektrodzinējiem, kuri tika aizsargāti ar drošinātāju vai automātslēdzi. Arī apkopes biežumam ir liela ietekme uz elektrodzinēja drošumu. Elektrodzinējiem, kam apkope tika veikta vismaz reizi gada laikā, atteices intensitāte bija 5 reizes mazāka nekā elektrodzinējiem, kuriem apkopes tika veiktas retāk.

Elektrodzinēju atteižu analīze lauksaimniecības objektos parāda, ka 70 % no elektrodzinēju atteicēm notika statoru tinumu pārdegšanas dēļ. EPRI un IEEE pētījumos statoru bojājumu sadalījums ir mazāks 2–3 reizes. Tādu atšķirību var izskaidrot ar to, ka lauksaimniecības objektos ir apstākļi, kas vairāk iespaido elektrodzinēja statora tinumu drošumu. Visvairāk statora tinumu atteižu izraisa tehnoloģiskās pārslodzes – 30%, apkārtējās vides faktori (putekļi, gāzes) – 19 %, elektroenerģijas kvalitāte (sprieguma asimetrija un novirze no nominālās vērtības, pārspriegumi) – 33 % (Šnīders, 1995).

Šie elektrodzinēju atteižu dati lauksaimniecībā ir no 1970. līdz 1980. gadiem, un lielāka daļa no atteicēm notika pārslodzes un sliktas sprieguma kvalitātes dēļ. Mūsdienās elektriskie tīkli tiek atjaunoti, uzlabojas sprieguma kvalitāte, tiek modernizētas elektroiekārtas un aizsardzības ierīces. Mūsdienīgas elektrodzinēju aizsardzības var aizsargāt no pārslodzēm, sprieguma asimetrijas, pārsprieguma, nepietiekoša sprieguma un fāzes izzušanas. Tajā pašā laikā, literatūrā nav pieejama informācija par elektrodzinēju atteicēm pēdējo 20 gadu laikā.

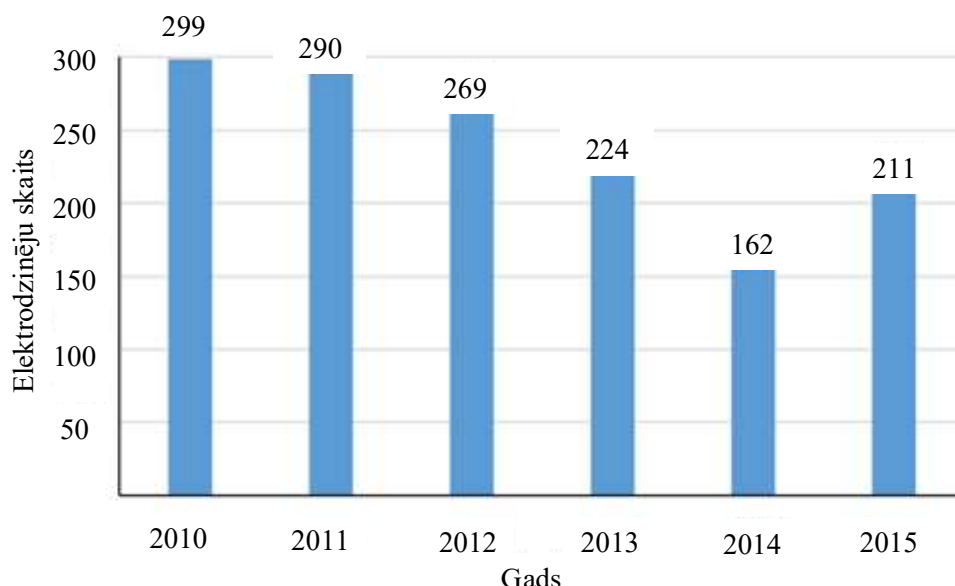


1.12. att. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu atteices sadalījums

(Gedzurs, 2013):

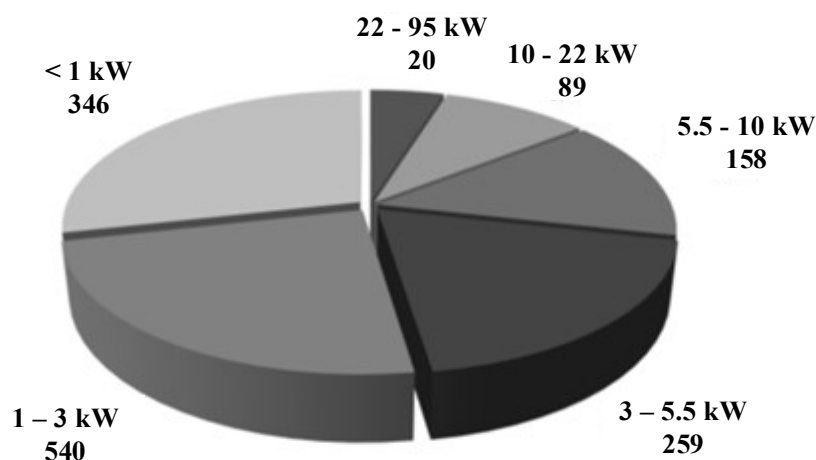
1 – pārslodze; 2 – sprieguma simetrija; 3 – īslaicīgie pārspriegumi; 4 – sprieguma novirzes, 5 – augsta apkārtējās vides temperatūra, 6 – tinumu izolācijas novecošana, 7 – apkārtējās vides faktori

Uzņēmumā SIA “Elektro” (Tukuma novads), kurā tiek veikts elektrodzinēju remonts, tika veikta elektrodzinēju atteices analīze (Justs, 2016). Uzņēmumā vidējais remontēto elektrodzinēju skaits gada laikā ir 246 dzinēji.



1.13. att. Remontēto elektrodzinēju skaits uzņēmumā SIA “Elektro” laika posmā no 2010. gada līdz 2015. gadam (Justs, 2016)

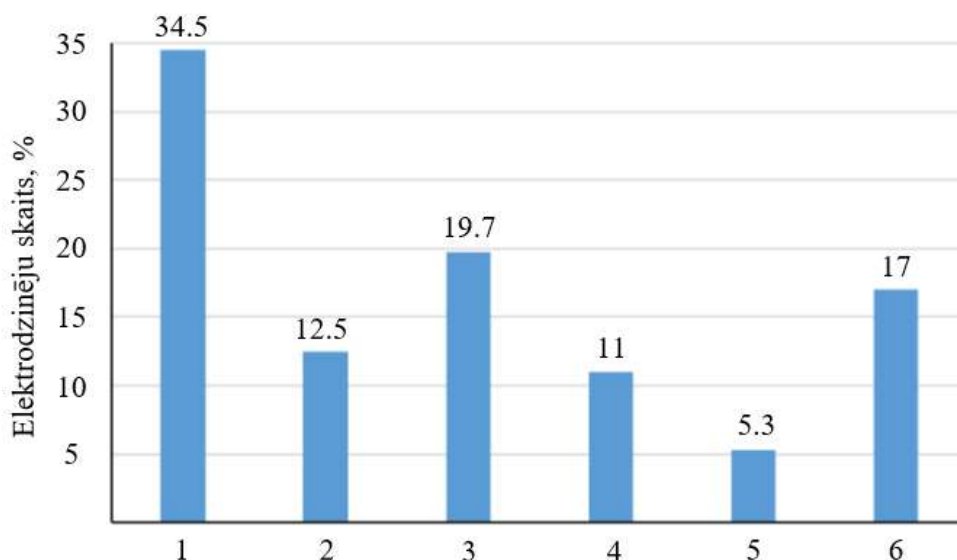
Remontēto elektrodzinēju sadalījums, ņemot vērā jaudas, parādīts 1.14 attēlā. Visvairāk tika remontēti dzinēji ar jaudu 1 – 3 kW, bet dzinēju skaits ar jaudu līdz 5.5 kW sastāda 78% no remontēto dzinēju kopskaita. Tas apliecina 1.2. attēlā redzamo informāciju, ka lielāka daļa no elektrodzinēju parka ir ar jaudu zem 10 kW.



1.14. att. Remontēto elektrodzinēju skaita sadalījums pēc dzinēja jaudas uzņēmumā SIA “Elektro” (Justs, 2016)

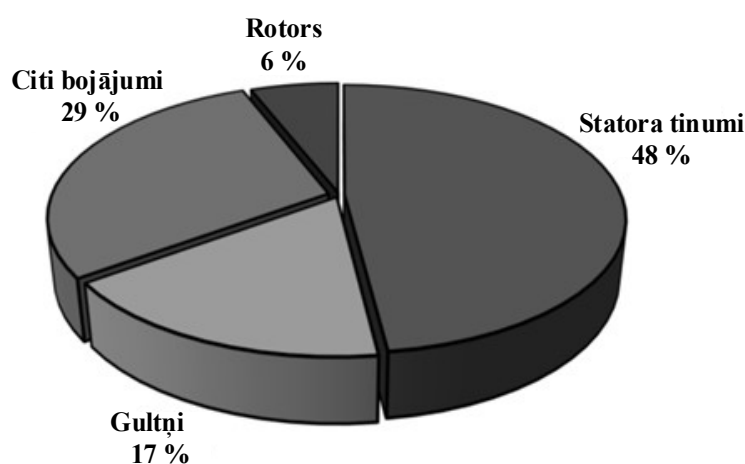
Lielākā daļa uz remontu atvesto elektrodzinēju ir no lauksaimniecības nozares uzņēmumiem, t.i., zemnieku saimniecībām, pārtikas pārstrādes un kokapstrādes uzņēmumiem, un sastāda 65.2 % no dzinēja kopskaita. Visvairāk ir no zemnieku saimniecībām – 34.5 % no kopskaita, no pārtikas (zivju un piena) pārstrādes uzņēmumiem – 19.7 %, privātpersonām – 12.5 %, kokapstrādes – 11 % (skat. 1.15.att.). Analizējot remontēto elektrodzinēju bojājumus, tika konstatēts sekojošs bojājumu sadalījums:

1. statora bojājumi – 48 %;
2. gultņu bojājumi – 17 %;
3. citi bojājumi – 29 %;
4. rotoņa bojājumi – 6 %.



1.15. att. Remontēto elektrodzinēju sadalījums pēc to pielietojanas nozarēm (Justs, 2016):

1 – zemnieku saimniecības, 2 – privātpersonas, 3 – pārtikas pārstrādes uzņēmumi, 4 – kokapstrādes uzņēmumi, 5 – dažāda veida rūpniecības, 6 – citas nozares (metālapstrāde, autoserviss, ceļu būvniecība un citas)



1.16. att. Remontēto elektrodzinēju bojājumu sadalījums (Justs, 2016)

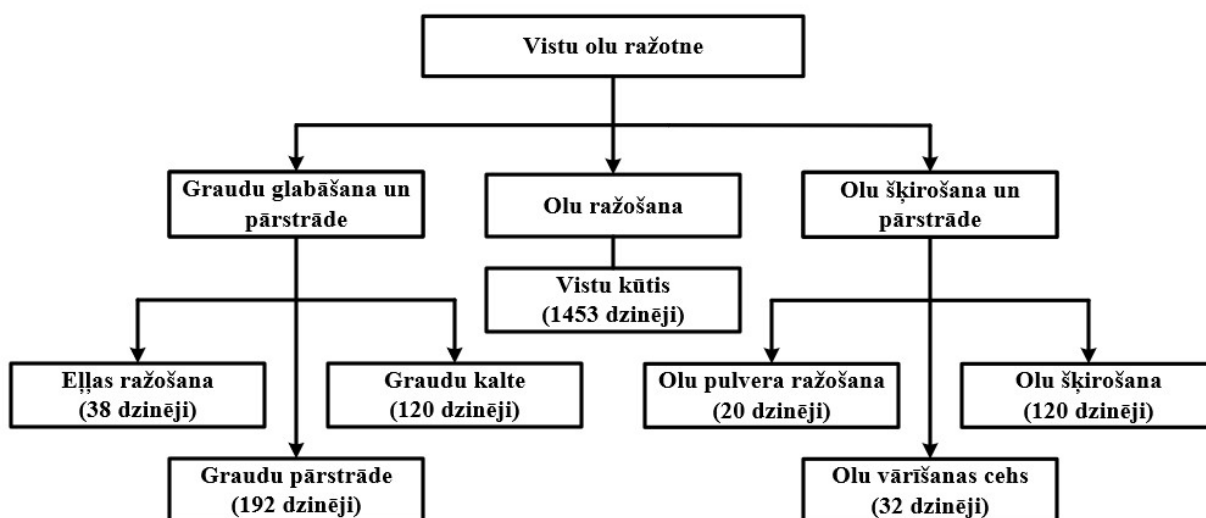
Var secināt, ka uzņēmumā SIA “Elektro” lielāka daļa elektrodzinēju tika remontēti statora tinumu bojājumu dēļ. To var izskaidrot ar to, ka daudzi no tiem ir no lauksaimniecības nozares uzņēmumiem, kur ekspluatācijas apstākļi (augsta apkārtējās vides temperatūra, liels relatīvais mitrums, agresīvas gāzes, putekļi) negatīvi iespaido tieši statora tinumu izolācijas darbību.

1.3. Asinhrono elektrodzinēju atteices analīze SIA “Balticovo” olu ražošanas uzņēmumā

Lai noskaidrotu esošo situāciju sakarā ar elektrodzinēju drošumu, tika veikti ražošanas pētījumi. Par pētījumu objektu tika izvēlēts SIA “Balticovo” olu ražošanas un pārstrādes uzņēmums Iecavā. Sākumā tika analizēts ražotnes elektrodzinēju parks – dzinēja jauda, piedziņas veids, aizsardzība, ekspluatācijas apstākļi. Pēc tam tika veikta elektrodzinēju atteižu un to iespējamo iemeslu analīze.

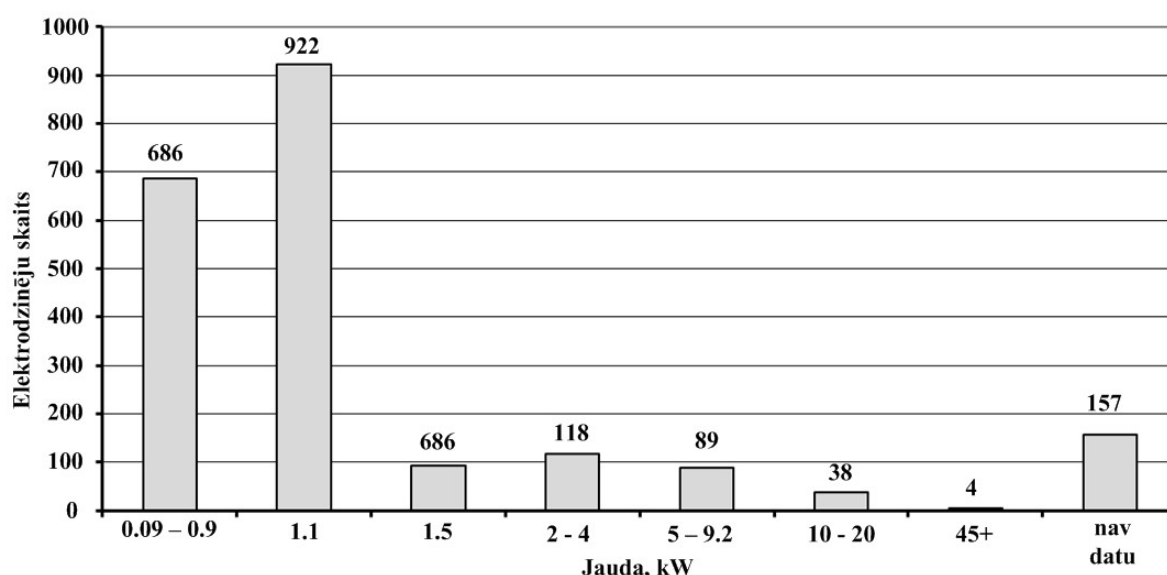
Tehnoloģisko procesu uzņēmumā Iecavā var iedalīt trīs grupās (skat. 1.17. att.):

1. olu pārstrāde;
2. graudu uzglabāšana;
3. olu ražošana vīstu kūtīs.



1.17. att. Vistu olu ražotnes tehnoloģisko procesu shēma un elektrodzinēju skaits “Balticovo” ražotnē Iecavā

Olu ražotne Iecavā sastāv no sekojošiem tehnoloģiskiem procesiem: graudu kalte, eļļas ražošana, olu ražošana vistu kūtīs, to šķirošana un pārstrāde, olu vārīšana un olu pulvera ražošana. Lielākā daļa no ēkām un iekārtām tika modernizēta, vai uzbūvētas laika posmā no 2000. gada līdz 2014. gadam. Apmēram 350 asinhronie elektrodzinēji tiek izmantoti graudu tehnoloģiskās iekārtās. Vistu barībai izmanto graudus. No graudiem arī ražo eļļu. Olu šķirošanas un apstrādes tehnoloģiskās iekārtās izmanto 172 asinhronos elektrodzinējus. Visvairāk elektrodzinēju atrodas vistu kūtīs – 1453 asinhronie elektrodzinēji. 1.1 kW asinhronie elektrodzinēji sastāda 43 % no elektrodzinēja parka (1.18. attēls). Tie darbina ventilatorus vistu kūtīs. Asinhronie elektrodzinēji ar jaudu mazāku par 1 kW sastāda 33 % un tos izmanto transportieros graudu un olu transportēšanā. Asinhronie elektrodzinēji ar jaudu 10 kW tiek pielietoti graudu pārstrādei. Graudu dzirnavās elektropiedziņa sastāv no 110 kW. Visjaudīgākais (132 kW) asinhronais elektrodzinējs tiek izmantots eļļas preses elektropiedziņā.

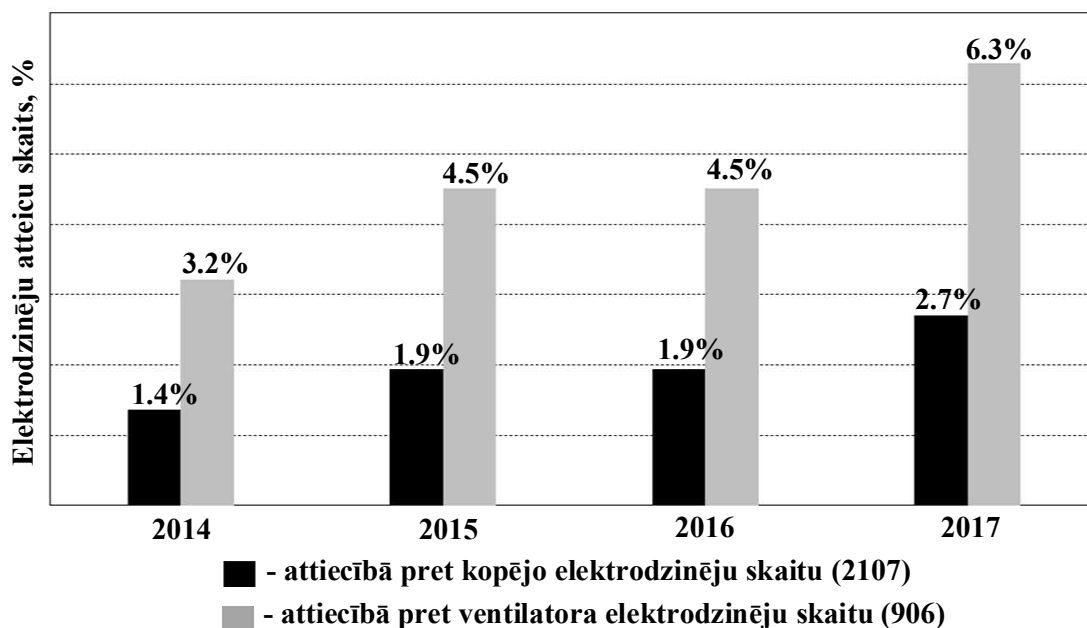


1.18. att. Elektrodzinēju sadalījums pēc jaudas “Balticovo” ražotnē Iecavā

Elektrodzinēju drošuma pētījuma rezultāti “Balticovo” ražotnē tika publicēti (Gedzurs, 2016) par 2010 – 2015. gadiem. Šie rezultāti tika papildināti ar atteicu datiem par 2016. un 2017. gadu un ir parādīti 1.19. attēlā. Atteicu intensitātes no 2014. gada līdz 2017. gadam pieauga gandrīz 1.83 reizes, no 2.3 % līdz 4.2 %.

No 1.19. attēla datiem var secināt, ka lielākā daļa, apmēram 65 %, no bojātiem elektrodzinējiem ir ventilatora elektrodzinēji.

Balticovo ražotnē Iecavā, vīstu kūtīs, ventilatoru piedziņai izmanto trīsfāžu asinhronos elektrodzinējus ar jaudu 1.1 kW. Lielākā daļa no ventilatoru asinhronajiem elektrodzinējiem ir ABB firmas ražotie asinhronie elektrodzinēji. Bojāto elektrodzinēju tehniskā apskate un atteicu iemeslu analīze uzņēmumā netiek veikta. Pēc demontāžas asinhronie elektrodzinēji tiek vesti uz remontu. Atbilstoši uzņēmuma darbinieku informācijai, iespējamie iemesli elektrodzinēju atteicei var būt darba vides apstākļi – liels mitrums, graudu putekļi un agresīvas gāzes. Transportēšanas sistēma tiek darbināta periodiski un elektrodzinēju statora tinumu izolācijas var samazināties, ja dzinējs netiek darbināts un ir liels relatīvais mitrums.

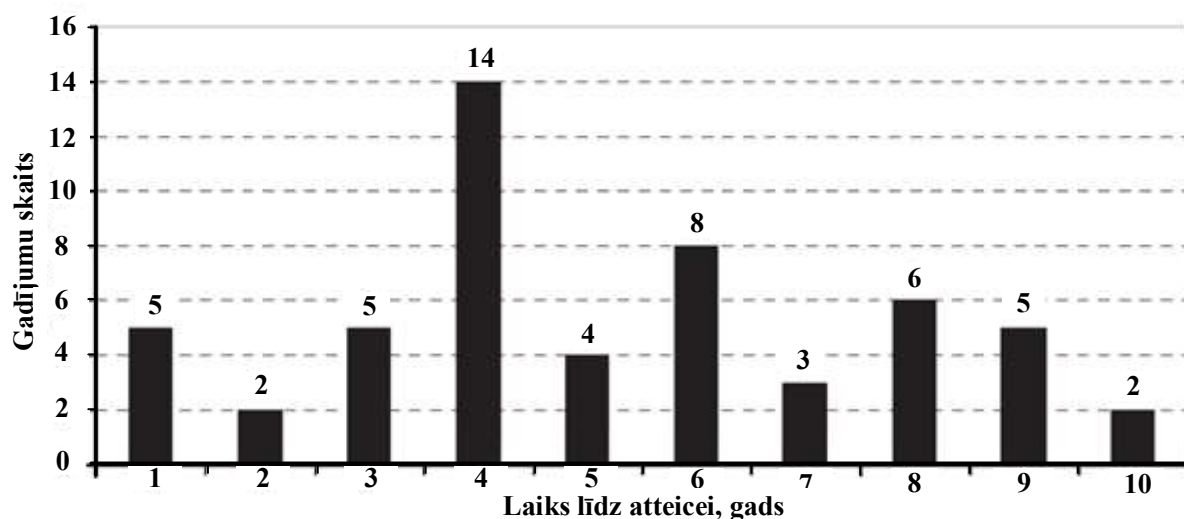


1.19. att. Ikgadējais elektrodzinēju atteicu skaits “Balticovo” ražotnē Iecavā laika posmā no 2014. gada līdz 2017. gadam

Vīstu kūtīs gaisa ventilācijai ir liela nozīme, aptuveni 20-30 % no olu ražošanas apjoma ir atkarīgs no gaisa kvalitātes (Шипалов, 2009). Tāpēc, pētījuma laikā, uzmanība tika vērsta uz ventilatoru piedziņas darba apstākļu analīzi, bojāto ventilatora dzinēju apskati un iespējamo avārijas iemeslu noteikšanu.

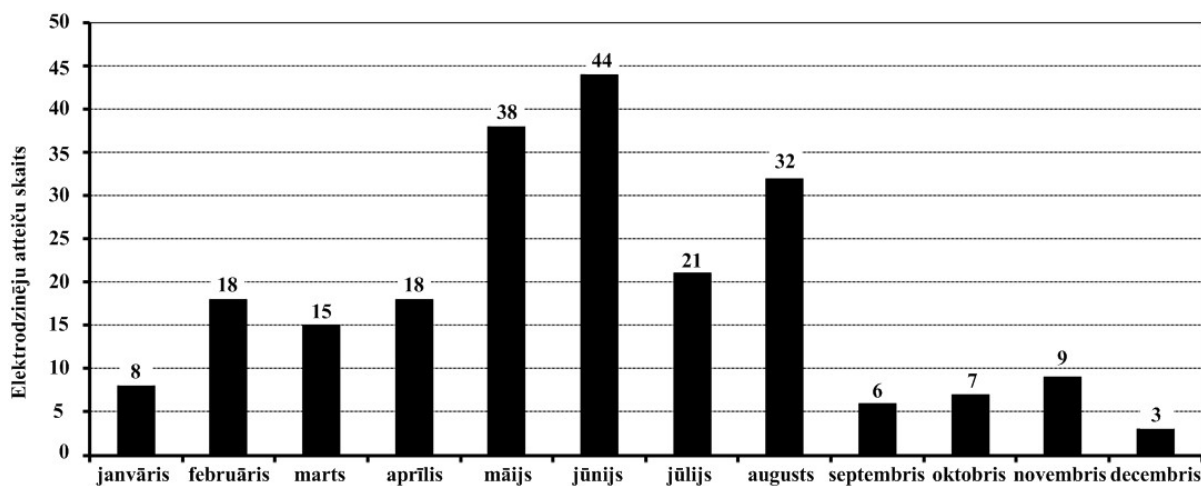
“Balticovo” olu ražotnē Iecavā atrodas 14 vīstu kūtīs, divas no kurām ir vecākas par 10 gadiem un citas tika izbūvētas no 2004. gada līdz 2014. gadam.

Vīstu kūtīs 1.1. kW ABB ventilatoru asinhronie elektrodzinēji ir sadalīti 2 grupās. Ventilatori, kas strādā visu laiku, ir grupā “ecoclimate”, bet “emergency” grupas ventilatori strādā, kad nepieciešams palielināt gaisa plūsmu. Ventilatoru grupas darbību regulē automātika, kas izmanto CO₂ koncentrācijas un temperatūras sensoru mērījumus.



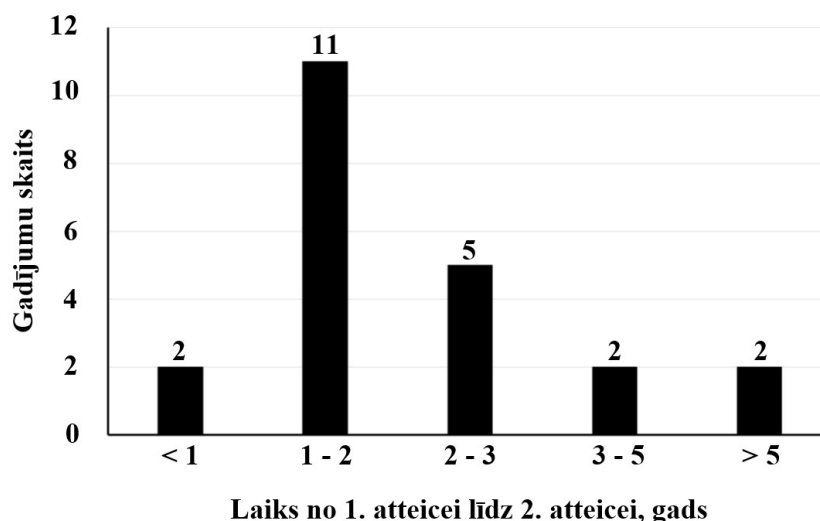
1.20. att. Ventilatora elektrodzinēju ekspluatācijas laika līdz atteicei

Citā darbā (Хомытов, 2010) ventilatoru elektrodzinēju drošuma statistikas dati parāda, ka elektrodzinēju ekspluatācijas laiks līdz atteicei ir 3.1 gadi ar vidējo darba laiku 2800 stundas. “Balticovo” uzņēmumā ventilatoru ekspluatācijas laiks līdz atteicei ir parādīts 1.20. attēlā. Ir zināms ventilatoru ekspluatācijas sākuma laiks, bet nav zināms dzinēju precīzs darba laiks, jo tie ir sadalīti “ecoclimate” un “emergency” grupās. Daži dzinēji strādā 365 dienas gadā, citi pavasarī, vasarā un rudenī, atkarībā no temperatūras vīstus kūtīs, kura ir atkarīga no apkārtējās vides temperatūras. Diemžēl informācija, no kuras grupas ir katrs bojāts elektrodzinējs, netiek reģistrēta un nevar noteikt precīzu ventilatoru elektrodzinēju darbības laiku. Atbilstoši 1.20. attēlā dotai informācijai, 58% no visiem bojātajiem ventilatoru elektrodzinējiem ekspluatācijas laiks līdz atteicei ir no 3-6 gadiem.



1.21. att. Ventilatora elektrodzinēju atteices sadalījums pa mēnešiem vīstus kūtīs laika posma no 2010. gada līdz 2017. gadam

Pēc ventilatora 1.1 kW bojāto elektrodzinēju atteices sadalījuma pa mēnešiem (1.21. attēls) var redzēt, ka būtiski lielāks ir elektrodzinēju atteižu skaits siltajos gada mēnešos – maijā, jūnijā, jūlijā un augustā, kad ir siltāks laiks un visi ventilatori strādā. Vislielākais atteižu skaits bija jūnijā – 44 gadījumi.



1.22. att. Remontēto 1.1. kW ventilatora elektrodzinēju ekspluatācijas laiks līdz otrai atteicei

Pētījuma rezultāti arī rāda, ka 15 % no 1.1 kW ventilatora elektrodzinēju atteicēm ir atkārtotas atteices. Laikā periodā no 2010. gada līdz 2017. gadam 22 gadījumos remontētais elektrodzinējs tika bojāts otro reizi. 1.22. attēlā var redzēt, ka lielākai daļai no tiem ekspluatācijas laiks līdz otrajai atteicei, ir 1-3 gadi. Vidēji 2 reizes mazāks ekspluatācijas laiks, nekā līdz pirmajai atteicei. Līdzīgs rezultāts tiek minēts arī darbā (Хомытов, 2010), kur remontēto elektrodzinēju ekspluatācijas laiks bija par 50 % mazāks nekā jaunajiem elektrodzinējiem lauksaimniecības nozaru uzņēmumos.

Fiksēti arī gadījumi, kad viens elektrodzinējs tika bojāts 3 reizes. Tādi kopā ir 5 dzinēji (1.2. tabula) un trim no tiem ekspluatācijas laiks pēc otrā remonta bija mazāks nekā viens gads. Iemesli mazākam kalpošanas laikam pēc remonta var būt sekojoši:

1. nekvalitatīvs remonts;
2. izmantota neatbilstošas klases statora tinumu izolācija;
3. tiek remontēts tikai bojāts motora elements, un netiek pārbaudīti/nomainīti citi elementi (piemēram, gultņi, izolācijas kvalitāte);
4. citu motora elementu novecošana.

1.2.tabula

Trīs reizes atteikušo elektrodzinēju ekspluatācijas laiks starp atteicēm

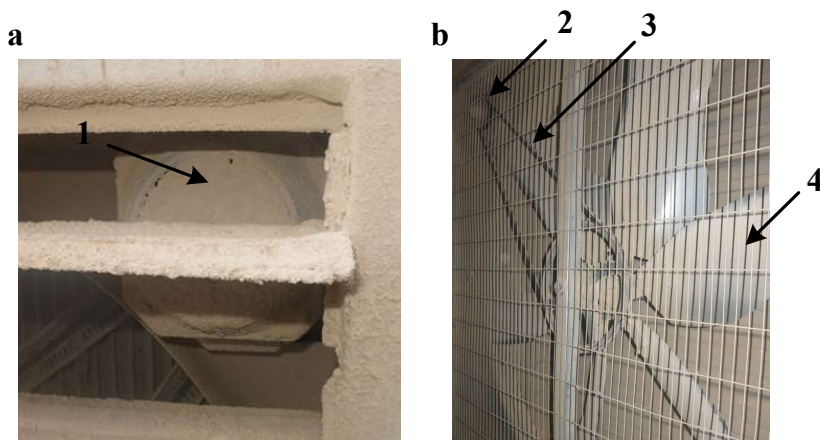
N.P.K.	Ekspluatācijas laiks līdz 1. atteicei, gadi	Ekspluatācijas laiks līdz 2. atteicei, gadi
1.	1.5	2
2.	2	< 1
3.	1.5	5
4.	4	< 1
5.	4	< 1

Analizējot 1.1 kW asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas apstākļus, tika konstatēti divi ekspluatācijas faktori, kas visvairāk ietekmē elektrodzinēja drošumu (1.23. attēls):

1. graudu putekļi;
2. ķīļsiksna pārvads.

Vistu kūti graudu transportēšanas laikā izdalās putekļi, kuri pēc tam nonāk uz ventilatora elektropiedziņas korpusa. Pārklājoties ar putekļiem, tiek samazināta siltuma atdeve no asinhronā elektrodzinēja korpusa uz apkārtējo vidi. Salīdzinoši liels putekļu slānis uz elektrodzinēja var arī bloķēt asinhronā elektrodzinēja dzesēšanas ventilatora gaisa plūsmu.

Vistu kūtīs ventilatoru asinhrono elektrodzinēju korpuss pilnīgi tiek pārklāts ar putekļiem un būtiski samazināta gaisa plūsma, kas būtiski palielina elektrodzinēja temperatūru (skat. 1.23. a attēlu). 1.23. b attēlā var redzēt, ka ventilatoru piedziņai tiek izmantots ķīsisksnas pārvads, kas rada lielāku radiālo spēku uz gultni un var paātrināt to nodilumu, ja centrēšana un siksna nav nospriegoti atbilstoši prasībām.



1.23. att. **ABB 1.1 kW ventilatora elektrodzinēja ekspluatācijas apstākļi vistu kūtīs:**
a – 1.1 kW ventilatora asinhronais dzinējs, b – ventilatora piedziņa, 1 – putekļu slānis, 2 – 1.1 kW asinhronais elektrodzinējs, 3 – V-tipa siksna, 4 – ventilatora spārni

Pētījumā tika apskatīti arī bojātie 1.1 kW ventilatora elektrodzinēji, kuru galvenie bojājumi un ekspluatācijas apstākļu ietekme uz dzinējiem ir parādīti 1.24. attēlā. Elektrodzinēja pievadkārbā ir sekojošie bojājumi:

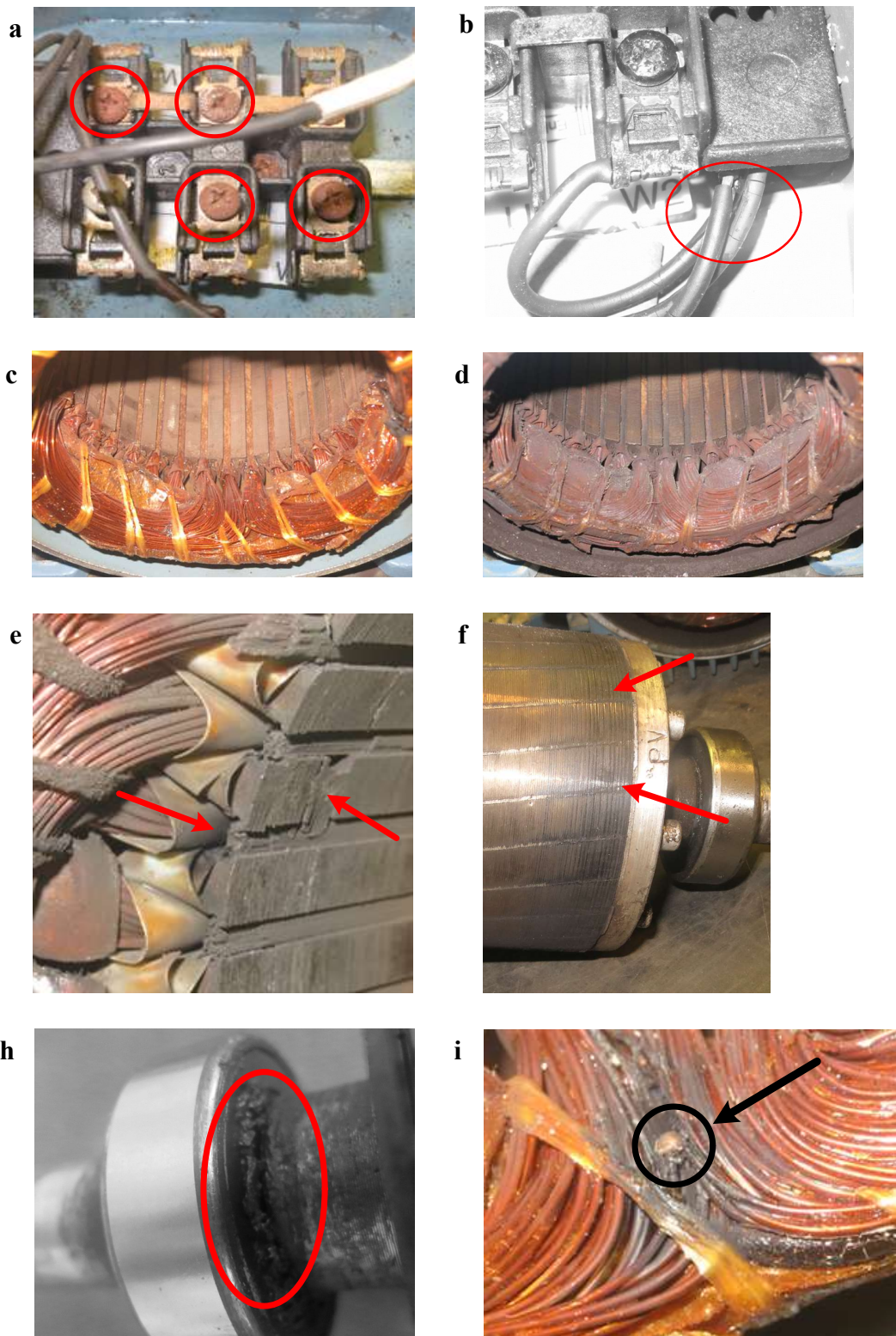
1. elektrisko kontaktu un skrūves korozija (1.24. a attēls);
2. statora tinumu vadu izolācijas bojājumi (1.24. b attēls).

Elektrisko kontaktu korozija var palielināt kontaktu pretestību, kas palielina silšanu savienošanas vietā, un samazināt elektrodzinēja lietderības koeficientu. Kontaktu korozija visticamāk, izraisa agresīvas gāzes vistu kūtīs. Elektrodzinēju pārkaršana izraisa pievadkārbes blīvummateriāla bojājumus, tāpēc gāzes un mitrums var tikt iekšā un izraisīt kontaktu koroziju. Skrūves korozija neļauj atskrūvēt skrūvi un atvienot kabeli no elektrodzinēja un tiek bojāti elektrodzinēja pieslēgšanas termināli. Statora tinumu vadu izolācija apskates laikā bija trausla un viegli nobirst no vada, kas arī notika ekspluatācijas laikā. Ja dzinējā darba laikā ir vibrācijas, tad vadu neizolēto daļu saskarsme ar korpusu izraisa īssavienojumu un elektrodzinējs tiek atslēgts. Šāds vadu izolācijas bojājums ir raksturīgs izolācijas pārkaršanas gadījumos.

Izārdot bojāto elektrodzinēju, varēja konstatēt, ka statoru tinumi no ventilatora puses tika pārklāti ar pāroglotiem putekļiem (1.24. d attēls). Piedziņas pusē putekļi nav nonākuši dzinēja iekšā caur gultņu vāku, tāpēc statora tinumi nav pārklāti ar putekļiem (1.24. c attēls). Dzinēja korpusa iekšējās malas, statora tinumi, gultņi ir pārklāti ar putekļiem. 1.24. h attēlā var redzēt slēgto gultņu smērvielu kopā ar putekļiem. Augstas temperatūras dēļ smēre nonākusi ārpus gultņa, savukārt putekļi caur spraugu starp vāku un vārpstu nonāk gultņu iekšpusē. Pie šādiem apstākļiem gultņu darbmūžs var tikt būtiski samazināts.

Berze starp statoru un rotoru izraisa statora tinumu bojājumus, un mehānisko triecienu rezultātā statora tinumos tiek iesista serdes plāksne (1.24. e attēls). Rezultātā rodas īssavienojums, statora un rotora tinumu bojājums (1.24. f attēls). Statora un rotora nodilumi tika konstatēti visiem apskatītajiem asinhronajiem elektrodzinējiem.

Vienam elektrodzinējam bija konstatēts statora tinumu starpvijumu īssavienojums (1.24. i attēls). Tā kā tiek izmantots siksnu pārvads, kas samazina vibrācijas, un dzinējs strādā ilgstošā darba režīmā S1, tad statora tinumu starpvijumu īssavienojumu izraisīja statora tinumu izolācijas pārkaršana. Tā kā visiem apskatītiem bojātiem dzinējiem bija konstatēts statora un rotora berze, tad uzmanība tika pievērsta šo bojājumu analīzei.



1.24. att. 1.1 kW bojāto ventilatora elektrodzinēju analīze:

a – pievienošanas kontaktu korozija, b – statora tinumu vadu izolācijas bojājumi, c – statora tinums no piedziņas puses, d – statora tinums no dzinēja ventilatora puses, e – statora tinumu bojājums statora un rotora berzes dēļ, f – rotora bojājumi statora un rotora berzes dēļ, g – putekļi un gultņu smērvielas maisījums; i – tinumu starpvijumu īssavienojums

Ilglaicīgas statora un rotora berzes dēļ var rasties asinhronā elektrodzinēja gaisa spraugas, starp rotoru un rotoru, ekscentricitāte. No asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas apstākļu

analīzes var minēt siksas pārvadu, gultņu sēžas nodilumu un rotora termisko izplešanu, kas var izraisīt asinhrono elektrodzinēju ekscentricitāti.

Pārāk liela siksas nospriegojuma dēļ uz gultņiem iedarbojas palielināts radiālais spēks, kas paātrina gultņa nodilumu (Harman un Hongwei, 2009). Elektrodzinēju pārmērīga silšana un putekļu nokļūšana gultņu smērē arī paātrina gultņa nodilumu (Karmakar, 2016). Rezultātā ir vairāki faktori, kas vienlaikus iedarbojas uz gultņa nodilumu un var būtiski palielināt asinhrona elektrodzinēja gaisa spraugu.

Elektrodzinēja korpusa pārklāšana ar putekļiem samazina siltuma atdevi. Tas savukārt, palielina rotora silšanu, jo lielāka daļa no rotora izdalītā siltuma aiziet caur gaisa spraugu uz statora serdi/korpusu un pēc tam siltums tiek atdots uz apkārtējo vidi. Rotora termiskās izplešanās pētījumi, veicot elektrodzinēja silšanas simulāciju, rāda, ka silšanas laikā rotors izplešas vairāk nekā stators un rezultātā gaisa sprauga samazinās, kas var novest pie statora un rotora berzes (LV un citi, 2014).

1.1 kW ABB ventilatoru asinhronie elektrodzinēji “Balticovo” ražotnē ir ar IP 55 aizsardzības pakāpi, kas aizsargā no putekļiem. Bet samazinātas siltuma atdevas dēļ palielinās arī alumīnija korpusa un vāka izplešanās un palielinās sprauga starp vāku un vārpstu, kā arī starp gultni un gultņu sēžu. Tāpēc, putekļiem nonākot starp gultni un sēžu, gultņu sēžas nodiluma dēļ palielinās to diametrs un noved pie gaisa spraugas ekscentricitātes.

Lauksaimniecības nozares uzņēmumos elektropiedziņai lielākoties izmanto asinhronos elektrodzinējus ar jaudu no 1 līdz 3 kW ar sinhrono ātrumu $1500 \text{ aprg} \cdot \text{min}^{-1}$. Smagie ekspluatācijas apstākļi noved pie augstas elektrodzinēju atteices intensitātes, un var sasniegt pat 20% (Павлов, 2008). Ražošanas pētījumi “Balticovo” ražotnē rada līdzīgu elektrodzinēju parka sadalījumu. Bet atteicu intensitāte nav tik liela. Tomēr atteicu intensitāte starp ventilatora elektrodzinējiem vīst kūtīs 2017. gadā bija 8.3% un turpina pieaugt ar katru gadu. Galvenais atteicu iemesls ir elektrodzinēju pārkaršana, ko izraisa dzinēja pārklāšanās ar putekļiem un izraisa statora tinumu pārkaršanu. Lai samazinātu ventilatora elektrodzinēju atteicu skaitu, ir jāaizsargā no statora silšanas, bet esošie izmantojamie aizsardzības aparāti uzņēmumā aizsargā tikai no pārslodzēm un īssavienojumiem. Tāpēc tālāk tiks apskatītas asinhrono elektrodzinēju aizsardzības metodes un ierīces.

1.4. Asinhrono elektrodzinēju aizsardzības analīze

Asinhrono elektrodzinēju aizsardzības veidus var klasificēt sekojoši:

1. automātslēdži un siltuma releji;
2. iebūvētās temperatūras aizsardzības metodes;
3. statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes.

1.4.1. Elektrodzinēju pārslodzes aizsardzības ierīču veidi

Automātslēdžus un siltuma relejus var iedalīt sekojoši:

1. elektromehāniskais automātslēdzis;
2. elektromehāniskais un elektroniskais siltuma relejs;
3. elektromehāniskais un elektroniskais automātslēdzis ar iebūvēto siltuma releju.

Automātslēdži vienlaikus nodrošina elektrisko ķēžu komutāciju un elektriskā tīkla un patērētāja aizsardzību pret īssavienojumiem. Zemspriegumā sadales līniju un iekārtu aizsardzībai izmanto mazgabarīta automātslēdžus. Detalizētāka informācija par automātslēdžiem ir 1. pielikumā.

Siltuma relejs paredzēts asinhrono elektrodzinēju ar vienmērīgu slodzi aizsardzībai pret ilgstošām tehnoloģiskām pārslodzēm, nepilnu fāžu režīmu un rotora nosprūšanu. Pieejami automātslēdži ar iebūvēto siltuma releju, kas aizsargā no īssavienojuma un tehnoloģiskās pārslodzes vienlaikus. Siltuma relejus var iedalīt 3 grupās:

1. siltuma releji ar bimetāla plāksnīti;
2. siltuma releji ar kūstošu metāla sakausējumu;
3. elektroniskās aizsardzības ierīces.

Siltuma relejā ar kūstošu metāla sakausējumu sildītājs silda kūstoša metāla sakausējumu, kurš ievietots trubiņā, un, ja sakausējuma temperatūra sasniedz kušanas temperatūru, sakausējums pāriet šķidrā stāvoklī un atslēdzes mehānisms nostrādā. Siltuma releja ar bimetāla plāksnīti gadījumā, tiek uzsildīta bimetāla plāksne, kura izliecas un iedarbojas uz atslēdzes mehānismu. Salīdzinot abus siltuma releju veidus, abi nodrošina vienādu aizsardzības kvalitāti, bet siltuma relejam ar kūstošu metāla sakausējumu ir sekojošie trūkumi:

1. nav ārējās vides temperatūras kompensācijas;
2. nav automātiskās atiestatīšanas funkcijas pēc releja nostrādes;
3. ja releju atiestata, kad kūstošais sakausējums vēl nav pilnīgi atdzisis (cietā stāvoklī), tad atslēgšanas mehānisms var neatiestatīties un būs jāmaina silšanas modulis.

Ir siltuma releji ar papildus bimetāla plāksnīti, kas kompensē ārējās vides temperatūras izmaiņas.

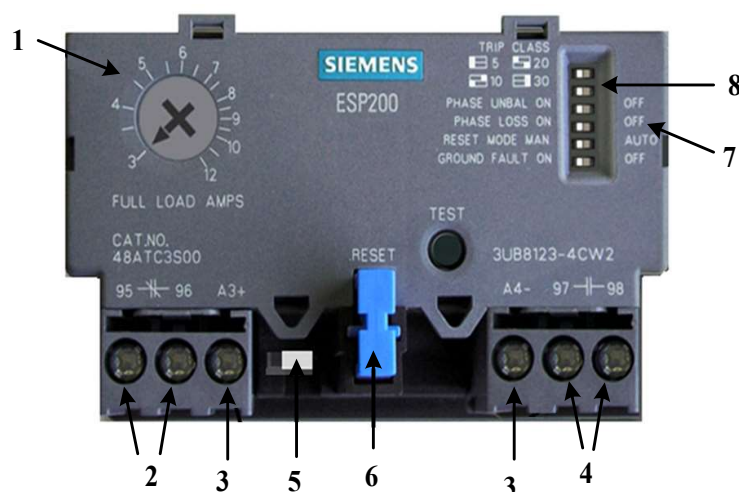
Modernas elektroniskās aizsardzības ierīces veidotas uz pusvadītāju vai mikroprocesora bāzes, kas pilda komutācijas un aizsardzības funkcijas. Salīdzinot ar elektromehāniskajiem siltuma relejiem, elektronisko aizsardzības ierīču priekšrocības ir (Gedzurs, 2013):

1. īss nostrādes laiks fāzēs izzušanas gadījumā;
2. nostrādes precizitāte 2.5-5 % (elektromehāniskajām – 10-15 %);
3. regulējams strāvas diapazons 1-4 no nominālās strāvas, elektromehāniskajām – 1-1.5;
4. 95-98 % mazāks elektroenerģijas patēriņš vadības/komutācijas funkciju izpildei;
5. lielāks komutāciju skaitu resurss – lielāks par 100 milj., elektromehāniskajām - lielāks par 100 tūkstošiem;
6. elektroniskās aizsardzības ierīces ir kompaktas;
7. komutācijas ilgums 0.25-10 ms, elektromehāniskajām – 5-20 ms;
8. nav kontaktu, trokšņu, dzirksteļošanas un komutācijas pārspriegumu;
9. elektroniskās aizsardzības ierīces nav jutīgas pret vibrācijām, agresīvas vides apstākļiem, novecošanu un temperatūras svārstībām, tāpēc var tikt izmantotas sprādzienbīstamās vidēs un citās telpās ar smagiem ekspluatācijas apstākļiem.

Elektronisko aizsardzības ierīču trūkumi:

1. dārgākas nekā elektromehāniskās (aptuveni 2-2.5 reizes);
2. jutīgas pret pārspriegumiem;
3. jaudīgām ierīcēm notiek to silšana un vajadzīgi siltuma novadītāji;
4. izslēgtā stāvoklī notiek strāvas noplūde;
5. var strādāt tikai maiņstrāvas vai līdzstrāvas sistēmās, bet ne abās.

Parastas elektrodzinēju elektroniskās aizsardzības ierīces aizsargā pret pārslodzēm un fāzes izkrišanu. Ja ir vajadzība, tad var pievienot papildus modulius, piemēram, ar temperatūras aizsardzību. 1.25. attēlā ir parādīta kombinētā elektrodzinēju aizsardzības ierīce, kura aizsargā no fāzes izzušanas, sprieguma asimetrijas un izolācijas bojājumiem. Ar iestatīšanas paneļa palīdzību var ieslēgt/izslēgt aizsardzības funkcijas un iestatīt nostrādes laiku.



1.25. att. Elektrodzinēju kombinētā elektroniskā aizsardzības ierīce SIEMENS ESP200:

1 – nominālās strāvas iestatīšana, 2 – normāli slēgts kontakts, 3 – spoles barošanas kontakti, 4 – normāli atvērts kontakts, 5 – nostrādes indikators, 6 – ierīces nostrādes atiestatīšanas poga, 7 – aizsardzības funkcijas iestatīšana; 8 – nostrādes klases iestatīšana

1.3.tabula

Elektrodzinēju pārslodzes aizsardzības klašu nostrādes laiki t atkarībā no strāvas, atbilstoši IEC 60947-4-1 standartam

Nostrādes klase	Strāva			
	$1.05 I_n^{(1)}$	$1.2 I_n^{(1)}$	$1.5 I_n^{(2)}$	$7.2 I_n^{(1)}$
10A	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ min}$	$2 \text{ s} < t \leq 10 \text{ s}$
10	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 4 \text{ min}$	$4 \text{ s} < t \leq 10 \text{ s}$
20	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 8 \text{ min}$	$6 \text{ s} < t \leq 20 \text{ s}$
30	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 12 \text{ min}$	$9 \text{ s} < t \leq 30 \text{ s}$

(1) Nostrādes laiks aukstam dzinējam (izslēgts un auksts)

(2) Nostrādes laiks karstam dzinējam (tiek darbināts zem normāliem apstākļiem)

Atkarībā no automātslēdžiem elektrodzinēju siltuma releju un kombinētās aizsardzības ierīču nostrādes laiku apraksta ar nostrādes klasēm, kuras nosaka standarts IEC 60947-4-1. Siltuma releju nostrādes klases ir sekojošas – 5, 10, 20 un 30 nostrādes klase.

Elektrodzinēju pārslodzes aizsardzības ierīces nostrādes klase raksturo nostrādes laiku, ja strāva ir 7.2 reizes lielāka nekā nominālā strāva I_n (tabula 1.3.). Piemēram, nostrādes klases 10 aizsardzības ierīce nostrādā 10 sekunžu laikā, ja strāva ir 7.2 reizes lielāka nekā nominālā. Koeficients 7.2 raksturo elektrodzinēju strāvu palaišanas brīdī, kura vidēji ir 7.2 reizes lielāka nekā nominālā strāva. Pēc 1.3. tabulas datiem var redzēt, ka nostrādes laiks var būt atšķirīgs, piemēram, nostrādes klasei 20, nostrādes laiks ir no 6 līdz 20 sekundēm. Šādi nostrādes laiki ir raksturīgi elektromehāniskajiem siltuma relejiem. Kā jau iepriekš minēts, elektroniskām pārslodzes aizsardzības ierīcēm ir labāka nostrādes precizitāte, un ražotāji blakus nostrādes klases ciparam papildus pieraksta burtu E, piemēram, 10E. Nostrādes laiki tādām ierīcēm ir parādīti 1.4. tabulā.

Elektrodzinēju pārslodzes aizsardzības nostrādes laiki t atkarībā no strāvas, atbilstoši IEC 60947-4-1 standartam, tolerances grupa E

Nostrādes klase	Strāva			
	$1.05 I_n^{(1)}$	$1.2 I_n^{(1)}$	$1.5 I_n^{(2)}$	$7.2 I_n^{(1)}$
5	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ min}$	$3 \text{ s} < t \leq 10 \text{ s}$
10	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 4 \text{ min}$	$5 \text{ s} < t \leq 10 \text{ s}$
20	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 8 \text{ min}$	$10 \text{ s} < t \leq 20 \text{ s}$
30	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 12 \text{ min}$	$20 \text{ s} < t \leq 30 \text{ s}$

(1) Nostrādes laiks aukstam dzinējam (izslēgts un auksts)

(2) Nostrādes laiks karstam dzinējam (tiek darbināts zem normāliem apstākļiem)

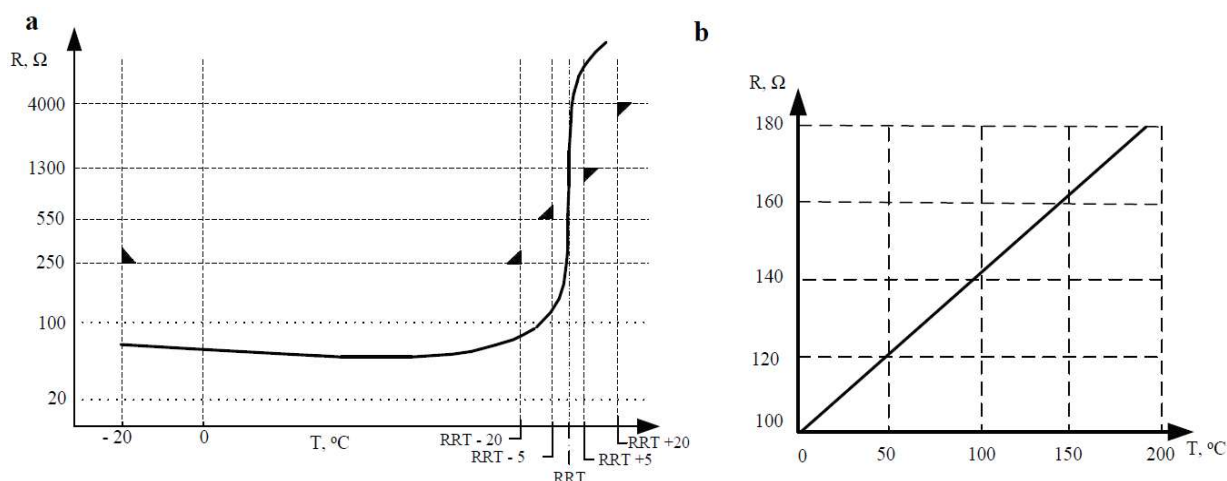
1.4.2. Elektrodzinēju iebūvētās temperatūras aizsardzības metodes

Ja elektrodzinējs strādā ar izteikti mainīgo slodzi, ir traucēta dzinēja dzesēšana, vai ir augsta apkārtējās vides temperatūra, tad siltuma relejs nespēj aizsargāt elektrodzinēju no statora tinumu pārkaršanas. Tādos gadījumos piemērotākā ir temperatūras aizsardzība. Ir sekojoši elektrodzinēju temperatūras aizsardzības veidi:

1. termostats;
2. termistors;
3. rezistīvie temperatūras sensori.

Statora termostati ir ierīces, kas izmanto bimetāla plāksnīti, lai mainītu pozīciju starp diviem kontaktiem pie noteiktas nominālās temperatūras. Kad temperatūra pārsniedz nominālo temperatūras līmeni, bimetāla plāksnīte maina kontaktus un vadības ierīce atslēdz elektrodzinēju. Vadības spriegums var tikt padots tieši uz termostatu, līdz ar to nav vajadzīga nostrādes ierīce. Termostati tiek ielikti statora tinumu piedziņas pusē katrā fāzē un slēgti virknē. Termostata trūkumi ir:

1. liela termiskā inerce;
2. nekvalitatīva termostatu instalācija tinumos var ietekmēt nostrādes temperatūru;
3. liels izmērs, salīdzinot ar moderniem temperatūras sensoriem.



1.26. att. Pozistoru un PT 100 sensora pretestības izmaiņas atkarībā no temperatūras (Gedzurs, 2016):

a – pretestības izmaiņas pozistoram, b – pretestības izmaiņas PT 100 sensoram

Termistori ir nelieli pusvadītāju temperatūras sensori ar nelineāro temperatūras koeficientu. Ir divu veidu termistori – ar negatīvo temperatūras koeficientu un pozitīvo temperatūras koeficientu (PTC) – positive temperature coefficient). Parasti PTC termistori, jeb pozistori, tiek izmantoti elektrodzinēju aizsardzībai. Pozistoru pretestība pie normālās temperatūras ir salīdzinoši maza un gandrīz nemainās līdz pieļaujamai temperatūrai (RRT rated response temperature). Sasniedzot pieļaujamo temperatūru, pozistoru pretestība strauji pieaug (1.26. a attēls). Pozistoriem ir liela jutība pret temperatūras izmaiņām ap pieļaujamo temperatūras robežu. Aizsardzības relejs kontrolē pozistora pretestību un, kad pozistora pretestība pieaug, tad spriegums uz spoles samazinās un dzinējs tiek atslēgts vai padots avārijas signāls. Pozistoru priekšrocības:

1. mazie izmēri un maza termiskā inerce;
2. vairāki pozistori var tikt pieslēgti virknē un pie viena releja;
3. liela jutība pret temperatūras izmaiņām;
4. mazas izmaksas, salīdzinot ar citiem temperatūras sensoriem.

Pozistoru trūkumi:

1. nav iespējama precīzā temperatūras mērīšana;
2. nepieciešams relejs.

Rezistīvie temperatūras sensori mēra temperatūru, mērot sensora pretestības izmaiņas. Parasti rezistīvie sensori tiek izgatavoti no vara, niķeļa vai platīna. Bet bieži vien platīna sensors PT – 100 tiek izmantots statora tinumu aizsardzībai. Rezistīvie sensori varbūt tītie (priekš lieliem dzinējiem), var folijas tipa, kuri ir lētāki un ar mazāko inerci. Rezistīviem sensoriem ir lineāra sakarība starp temperatūras un pretestības izmaiņām (skat. 1.26. b attēls). Caur sensoru laiž nelielu strāvu un ir nepieciešams ļoti jutīgs instruments, lai izmērītu temperatūru. Rezistīvo sensoru priekšrocības:

1. ļauj mērīt temperatūru ar augsto precizitāti;
2. lineāra pretestības un temperatūras izmaiņas sakarība.

Rezistīvo sensoru trūkumi:

1. nepieciešams jutīgs mērīšanas instruments;
2. ja sensoru vadu garums ir lielāks par 3 metriem, ir nepieciešama sensora vadu pretestības kompensācija;
3. augstas izmaksas.

Temperatūras sensoru izmantošana mazas jaudas elektrodzinēju aizsardzībai nav ekonomiski efektīvi. Tos ir grūti, vai pat nav iespējams, ievietot statora tinumos ekspluatācijas laikā, jo statora tinumos sensori tiek ievietoti ražošanas vai remonta procesā, lai nodrošinātu labu kontaktu starp sensoru un tinumiem. Nepieciešama arī papildus iekārta, kas pārveido sensora mērīšanas signālu, vadi un to montāžas darba resursi (Zhang un Habetler, 2016).

1.4.3. Statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes

Iebūvēto temperatūras sensoru un to instalācijas izmaksu dēļ, izstrādātas vairākas statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes:

1. statora tinumu temperatūras noteikšana, izmantojot silšanas modeļus;
2. statora tinumu temperatūras noteikšana, izmantojot dzinēja parametrus.

Statoru tinumu temperatūras noteikšanas ar silšanas modeli gadījumā elektrodzinējs tiek sadalīts vairākās daļās. Katras daļas silšanas procesu raksturo ar silšanas ekvivalentu shēmu jeb silšanas modeli. Modeļa ieejas signāls ir elektrodzinēja zudumu jauda. Modeļa siltumtehniskie parametri tiek noteikti ar parciāliem diferenciālvienādojumiem vai pēc eksperimenta datiem. Modeļa izejas signāls ir attiecīgās elektrodzinēja daļas temperatūra. Silšanas modelis var nodrošināt pietiekoši labu temperatūras noteikšanas precizitāti. Pielietot parciālo diferenciālvienādojumu ir sarežģīts un laika ietilpīgs process, ir nepieciešami vairāki elektrodzinēju parametri, kuri ne vienmēr ir pieejami vai zināmi, vai arī nepieciešami

eksperimentu dati. Tā kā silšanas modeļa ieejas parametri ir strāva vai strāva un spriegums, modelis nespēj reaģēt uz dzesēšanas un arējās vides temperatūras izmaiņām.

Tā kā statora un rotora aktīvās pretestības izmaiņas ir atkarīgas no temperatūras izmaiņām, tad statora un rotora temperatūras noteikšanai lieto statora un rotora aktīvās pretestības.

Statora tinumu pretestības mērīšanai var izmantot līdzstrāvas signālu, pievienojot ķēdi ar diodēm vai tranzistoriem starp barošanas avotu un dzinēja spailēm vienā no fāzēm. Pēc noteiktā laika ķēdē palaiž līdzstrāvas signālu, veicot mērījumus, nosaka statora tinumu pretestību un aprēķina statora tinumu temperatūru. Izmantojot šo metodi, precizitāte ir relatīvi augsta, bet vajag pievienot papildu ķēdi starp barošanas avotu un dzinēja spailēm, ko praksē reti pielieto. Šī metode rada nelielas griezes momenta pulsācijas un elektriskos zudumus, papildus ir nepieciešama kabeļa pretestības kompensācija no līdzstrāvas signāla avota līdz elektrodzinējam.

Cita metode ir izmantot elektrodzinēja ekvivalento elektrisko shēmu. Sākumā tiek noteikta rotora aktīvā pretestība, izmantojot rotora un statora induktivitātes, statora strāvas un sprieguma lielumus un rotora rotācijas ātrumu. Pēc tam tiek veikts statora aktīvās pretestības aprēķins, jo tās noteikšana ir jutīga pret vajadzīgo parametru mērīšanas kļūdām.

Nosakot rotora aktīvo pretestību, statora tinumu temperatūru var noteikt vēl ar divu metožu palīdzību. Pirmā metode, pēc EDF (Francijas elektroenerģijas padome) pieredzes, nosaka, ka rotora temperatūra ir par 10°C lielāka nekā statora tinumu temperatūra (Dessoude, 1994). Otrā metode nosaka, ka statora tinumu pretestība ir vienāda ar (Kubota et al, 1993):

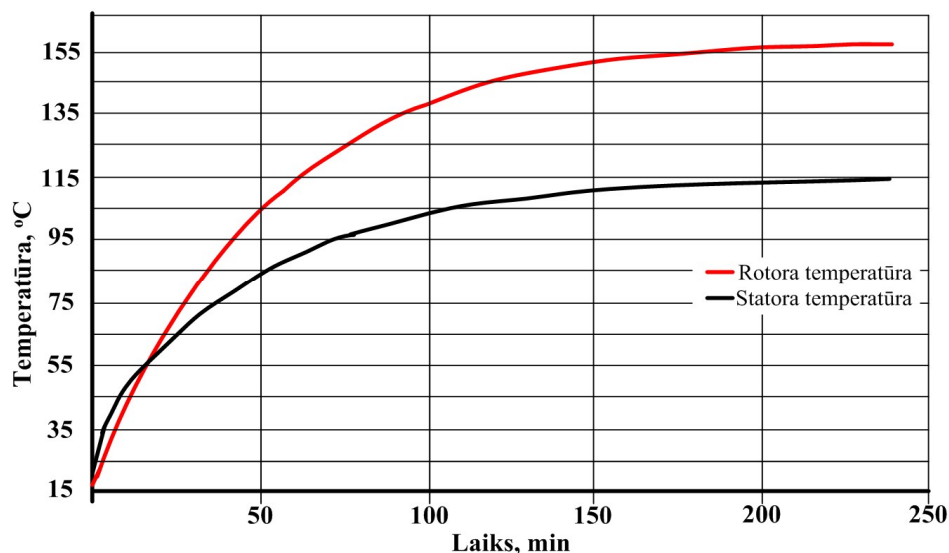
$$R_s = R_r \cdot k_r, \quad k_r = \frac{R_{sn}}{R_{rn}}, \quad (1.7)$$

kur R_s, R_r – statora un rotora pretestība, Ω ;

R_{sn}, R_{rn} – statora un rotora pretestība no ražotāja datiem, Ω ;

k_r – statora un rotora pretestības attiecības koeficients.

Šī sakarība nosaka, ka statora tinumu pretestības izmaiņas ir tieši proporcionālas rotora pretestības izmaiņām. Ja ir korelācija starp statora un rotora pretestību izmaiņām, tad arī ir korelācija starp statora un rotora temperatūru izmaiņām. Var secināt, ka, ja elektrodzinējs strādā ar nemainīgo slodzi un nemainīgiem tīkla parametriem, tad rotora rotācijas ātrums ir atkarīgs tikai no rotora pretestības izmaiņām. Līdz ar to, pastāv korelācija starp rotora rotācijas ātruma un statora tinumu temperatūras izmaiņām, ko izraisa elektrodzinēja silšana pie nemainīgas slodzes. 15 kW asinhronā elektrodzinēja rotora un statora silšanas dinamika, pēc palaišanas ar gandrīz nominālo slodzi, ir parādīta 1.34. attēlā. Pēc palaišanas var redzēt, ka mazākās inerces dēļ stators uzsilst straujāk un pēc tam statora un rotora temperatūras izmaiņas ir līdzīgas. Tas nozīmē, ka pēc palaišanas, rotācijas ātruma un statora tinumu temperatūras izmaiņu dinamika ir atšķirīga, tāpēc statoru tinumu temperatūras noteikšanai labāk izmantot elektrodzinēja silšanas modeli, jo pašā sākumā pēc dzinēja palaišanas arējās vides apstākļi un dzesēšanas traucējumi neiespaido statora tinumu silšanu.



1.27. att. 15 kW asinhronā dzinēja rotora un statora silšana (Kylander, 1995)

1.5. Pētījumu pamatojums, struktūra un metodika

Pieejamās literatūras un zinātnisko pētījumu analīze apliecina to, ka lauksaimniecības nozares uzņēmumos elektrodzinēji strādā smagos apkārtējās vides apstākļos un to ikgadējā atteižu intensitāte ir augsta. Galvenais atteižu iemesls ir bojāti statora tinumi, izolācijas pārkaršanas dēļ. Lauksaimniecības produkcijas ražošanā tiek lietoti elektrodzinēji, tie ir mazas jaudas (līdz 4 kW), un to aizsardzībai izmanto siltuma relejus, kuri nenodrošina aizsardzību pret dzinēja pārkaršanu, kas rodas no dzesēšanas traucējumiem un no paaugstinātas apkārtējās vides temperatūras. Analīze apliecina, ka mazjaudas elektromotoru aizsardzībai temperatūras sensoru izmantošana nav ne tehniski, nedz arī ekonomiski izdevīga. Esošo statora temperatūras noteikšanas principu galvenie trūkumi ir vairāku (strāvas un sprieguma) sensoru izmantošana rotoru pretestības netiešai mērīšanai, kas arī nav tehniski un ekonomiski izdevīgi, lai aizsargātu mazas jaudas elektrodzinēju (Zhang un Habetler, 2016).

Veiktā izpēte apliecina to, ka nepieciešams izstrādāt vienkāršotu un ekonomiski pamatotu statoru tinumu temperatūras monitoringa un kontroles metodi, lai aizsargātu mazas jaudas elektrodzinējus no atteices. Tādēļ nepieciešams veikt pētījumus elektrodzinēja silšanas modeļa izveidei, izstrādāt statora tinumu temperatūras noteikšanas algoritmu, izmantojot elektrodzinēja rotora rotācijas frekvences mērījumus, lai izveidotu ekonomiski un tehniski pamatotu mazas jaudas elektrodzinēju aizsardzību.

1.6. Pētījumu hipotēze, mērķis un uzdevumi

Pētījumu veikšanai izvirzītā **hipotēze** – izmantojot attālinātu elektrodzinēja rotora rotācijas frekvences mērīšanu, pēc noteikta algoritma ir iespējams aizsargāt elektrodzinēja statora tinumu no pārkaršanas.

Izvirzītās hipotēzes sevī iekļauj asinhronā elektrodzinēja silšanas procesu izpēti, statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes izpēti, rotora rotācijas frekvences un statora tinuma temperatūras sakarību izpēti, dzesēšanas traucējumu un sprieguma ietekmi uz asinhrona elektrodzinēja silšanas režīmiem.

Zinātniskā darba mērķis ir teorētiski un eksperimentāli pamatot asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas metodi ar attālinātu elektrodzinēja rotācijas ātruma mērīšanu un izstrādāt algoritmu šīs metodes pielietošanai mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai pret pārkaršanu.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti esoši uzdevumi:

1. veikt asinhronā elektrodzinēja silšanas procesa, zudumu jaudas un siltumtehnisko parametru noteikšanas teorētisko analīzi;
2. izpētīt asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes;
3. veikt ar nemainīgu slodzi ar dažādu rotora rotācijas frekvenci strādājošu asinhrono elektrodzinēju silšanas eksperimentālos pētījumus pie normāliem apstākļiem un pie dažādiem dzesēšanas traucējumiem;
4. pilnveidot mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju silšanas matemātisko modeli, apskatot to kā divu elementu ķermeni;
5. izstrādāt statora tinumu temperatūras un rotora rotācijas frekvences izmaiņas aprakstošu matemātisko modeli.
6. matemātiskā modeļa pārbaude (verifikācija un validācija) – asinhrono elektrodzinēju silšanas modeļa simulācijas rezultātu salīdzināšana ar eksperimentāliem datiem;
7. mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju statora aizsardzības algoritma izveide un izstrādātas statora tinumu noteikšanas metodes tehniski ekonomiskais novērtējums lauksaimniecības produktu ražošanā, izmantoto asinhrono elektrodzinēju drošuma uzlabošanai un atteices mazināšanai.

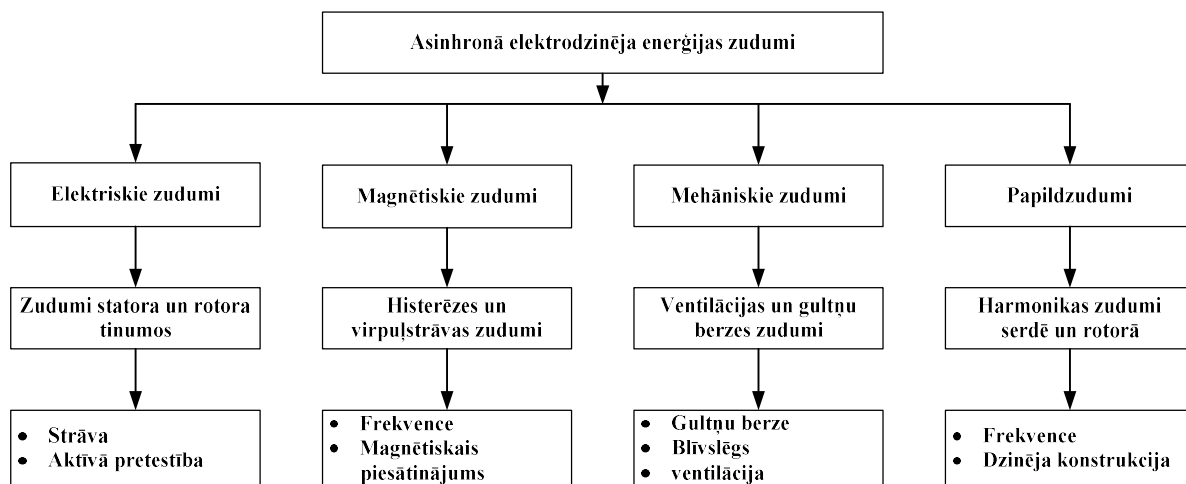
1.7. Darba tautsaimnieciskā nozīme

1. Darbā izstrādātās statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes ieviešana lauksaimniecības objektos ar smagiem darba apstākļiem, īpaši putekļiem, palielinās elektropiedziņas drošumu un ļaus nodrošināt ražošanas procesu nepārtrauktību. Tās savukārt uzlabos lauksaimniecības produkcijas kvalitāti un produktu stabilitāti.
2. Elektrodzinēja stāvokļa kontrole, izmantojot statora tinumu temperatūras noteikšanas metodi, ļaus novērtēt elektrodzinēja silšanas dinamiku un efektīvāk plānot tehnisko apkopi atkarībā no elektrodzinēja tehniskā stāvokļa, nodrošinot aprites ekonomikas elementu ieviešanu, kā arī ražošanas ekonomisko efektivitāti.
3. Piedāvātais risinājums ir aktuāls vietās ar nepārtrauktu ražošanas procesu un ražotnēs, kur ir grūti vai nav iespējams tikt pie elektrodzinēja. Īpaši vērtīgi to ievest ir lauksaimniecības produktu pārstrādes un uzglabāšanas uzņēmumos gan Latvijā, gan pasaulē.

2. ASINHRONO ELEKTRODZINĒJU SILŠANAS IZPĒTE

2.1. Asinhronā elektrodzinēja zudumu veidi

Enerģijas zudumi elektrodzinējos ir svarīgs faktors ne tikai no ekonomiskā viedokļa, bet arī no drošuma viedokļa. Kā jau minēts 1. nodaļā, asinhrono elektrodzinēju statora tinumu izolācija un rotora tinumi ir jutīgi pret termiskām pārslodzēm – to ietekmē var notikt elektrodzinēja atteice. Enerģijas zudumi elektrodzinējā izraisa temperatūras pieaugumu statorā un rotorā. Enerģijas zudumu tipoloģija asinhronajiem elektrodzinējiem, iekļaujot arī to cēloņus, parādīta 2.1.attēlā.



2.1. att. Asinhronā elektrodzinēja siltuma zudumu veidi un to cēloņi

Enerģijas zudumi tiek iedalīti sekojoši:

1. elektriskie zudumi;
2. magnētiskie zudumi;
3. mehāniskie zudumi;
4. papildzudumi.

Elektriskie zudumi statorā un rotorā tiek izdalīti, strāvai plūstot tinumos. Trīsfāžu asinhronā elektrodzinēja elektriskie zudumi tiek aprēķināti pēc formulas (Kylander, 1995):

$$P_{el} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 + 3 \cdot R_r \cdot I_r^2, \quad (2.1)$$

kur P_{el} – elektriskie zudumi, W;
 I_s, I_r – statora un rotora strāva, A.

Elektriskie zudumi ir atkarīgi no strāvas un aktīvās pretestības. Savukārt strāva ir atkarīga no mehāniskās slodzes uz rotora vārpstas. Aktīvā pretestība ir atkarīga no maiņstrāvas izraisīta virsmas efekta un tinumu vadu temperatūras. Mazas jaudas asinhroniem elektrodzinējiem, kuriem statora tinumu vadiem ir mazs šķērsgriezuma laukums, virsmas efektu var neievērot, ja tiek pievadīts sinusoidālais spriegums (Kylander, 1995). Statora tinumu pretestības korekcija atkarīga no statora tinumu temperatūras (IEEE 112, 2004):

$$R_{\theta} = R_o(1 + \alpha_R(\theta - \theta_o)), \quad (2.2)$$

kur θ – statora tinumu temperatūra, °C;
 θ_o – sākuma statora tinumu temperatūra, °C;
 R_{θ}, R_o – statora tinuma aktīvā pretestība pie temperatūras θ un θ_o , Ω ;
 α_R – pretestības termiskais koeficients, °C⁻¹.

Arī rotora tinumu elektrisko zudumu aprēķināšanā var neievērot virsmas efektu, ja caur rotora tinumiem plūst sinusoidāla zemas frekvences strāva.

Mehāniskos zudumus rada elektrodzinēja rotora berze pret gaisu, berze gultņos un gultņu blīvslēgos, un dzesēšanas ventilatora patērētā mehāniskā jauda. Gultņu berzes moments sastāv no nemainīgas daļas un hidrodinamiskās daļas. Hidrodinamiskā daļa parasti ir lielāka par nemainīgo daļu un ir atkarīga no temperatūras un griešanas ātruma. Palielinoties motora temperatūrai, berze gultņos samazinās, jo palielinās smērvielas viskozitāte. Pieaugot slodzei, asinhronā elektrodzinēja rotācijas frekvence mainās ļoti minimāli, un var pieņemt, ka tā ir nemainīga. Salīdzinot ar citiem zudumiem, mehānisko zudumu daļa ir ļoti maza un bieži vien tos neņem vērā veicot aprēķinus, īpaši mazas jaudas asinhronajiem elektrodzinējiem.

Magnētiskie zudumi, jeb serdes zudumi, sastāv no histerēzes un virpuļstrāvas zudumiem. Serdes zudumi uz masas vienību tiek aprakstīti ar vienādojumu (Kylander, 1995):

$$P_{\text{mag}} = (k_{\text{hy}} \cdot f + k_{\text{Ft}} \cdot f^2) \cdot B_{\text{max}}^2, \quad (2.3)$$

kur P_{mag} – magnētiskie zudumi, W;
 k_{Hy} – histerēzes zudumu faktors;
 k_{Ft} – virpuļstrāvas zudumu faktors;
 B_{max} – magnētiskā indukcija, T;
 f – frekvence, Hz.

Inducētais spriegums izraisa virpuļstrāvas, līdz ar to virpuļstrāvas ir atkarīgas no serdes plāksnīšu elektriskās pretestības, kura samazinās, palielinoties temperatūrai (Kochmann un H. Huneus, 1990):

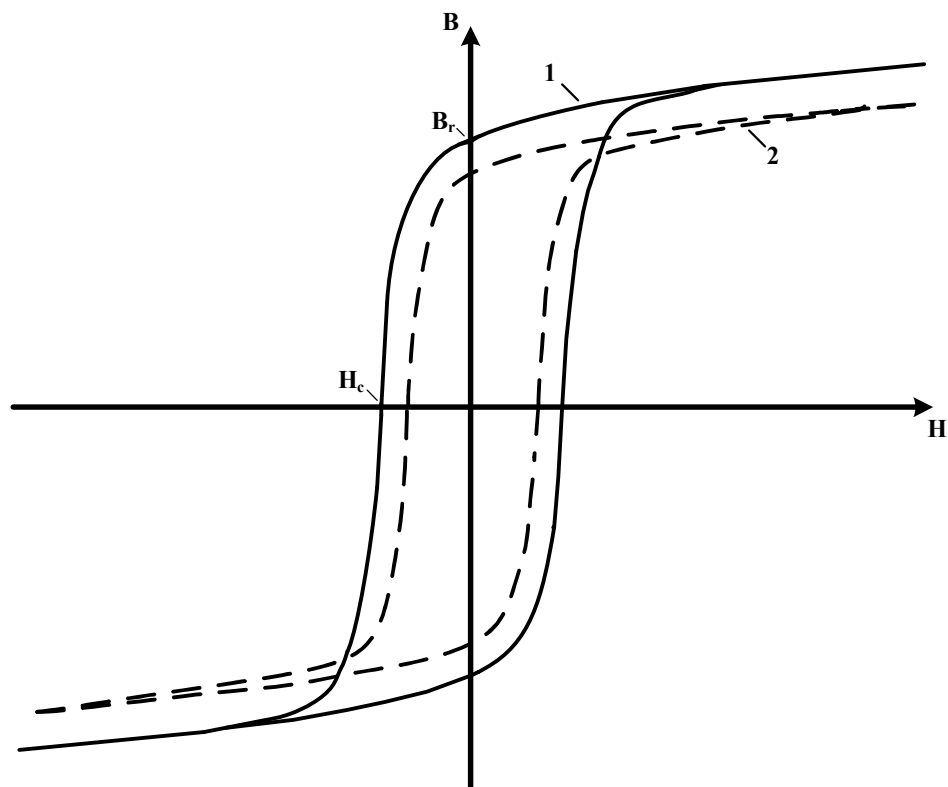
$$P_{\text{virp}} \sim \frac{1}{R_{\text{dz}}} \sim \frac{1}{1 + \alpha_{\text{dz}} \cdot (\theta - \theta_o)}, \quad (2.4)$$

kur P_{virp} – virpuļstrāvas zudumi, W;
 R_{dz} – serdes aktīvā pretestība, Ω ;
 α_{dz} – dzelzs pretestības termiskais koeficients, °C⁻¹.

Histerēzes zudumi ir proporcionāli frekvencei un proporcionāli magnētiskās plūsmas intensitātei. Praksē histerēzes zudumi tiek parasti pieņemti proporcionāli magnētiskajai indukcijai B (Kylander, 1995). Palielinoties feromagnētiska materiāla temperatūrai, palielinās atomu kustība un samazinās vajadzīgais enerģijas daudzums Veisa domēnu polarizācijai. Līdz ar to feromagnētiska materiāla paliekošā indukcija B_r un koercitīvais spēks samazinās (Boll, 1990). Histerēzes cilpa sašaurinās (skat. 2.2.att.) un histerēzes zudumi samazinās proporcionāli cilpas laukumam (Schützhold, 2013).

Rotora strāvas frekvence ir 1-3 Hz, līdz ar to magnētiskie zudumi rotorā ir ļoti mazi, un var pieņemt, ka magnētiskie zudumi asinhronā elektrodzinējā ir vienādi ar magnētiskajiem zudumiem statora serdē.

Asinhronā elektrodzinēja magnētiskā plūsma ir atkarīga no sprieguma un frekvences un nav atkarīga no temperatūras (Schützhold, 2013).

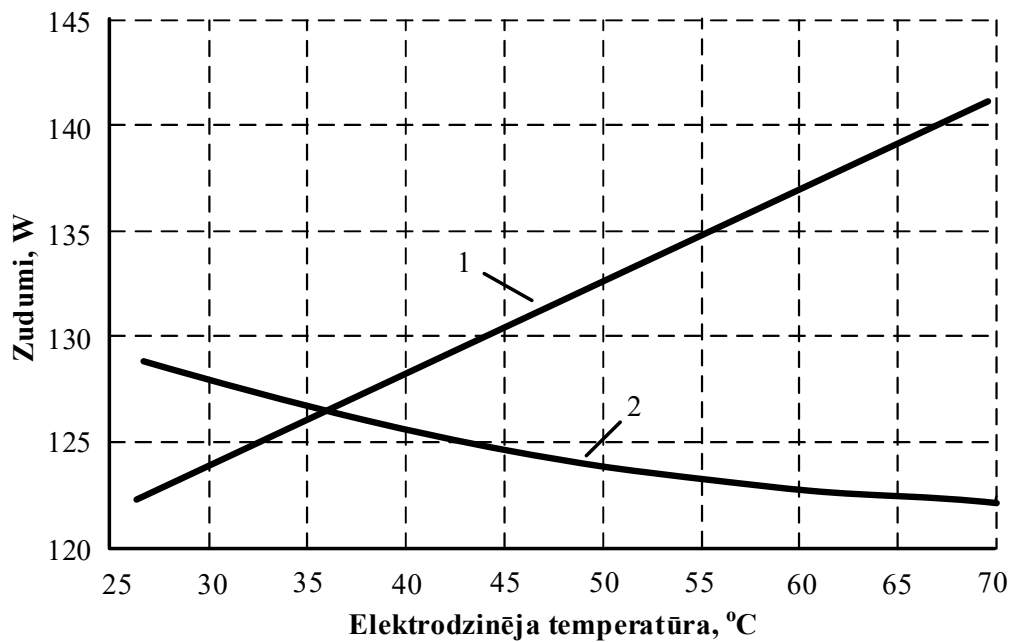


2.2. att. **Feromagnētiska materiāla histerēzes cilpa pie dažādām temperatūrām**
(Schützhold, 2013)

1 – histerēzes cilpa; 2 – histerēzes cilpa pie lielākas temperatūras

Papildzudumi ir zudumi, kurus ir ļoti grūti noteikt ar tiešo mērīšanu vai aprēķiniem. Tie sastāv no zudumiem statora serdē augstāko harmoniku dēļ, starpvijumu noplūdes strāvas zudumiem, augstāko harmoniku zudumiem rotora tinumos un citām noplūdes plūsmām, kuras inducē strāvas slodzes komponente (Zabardast un Mokhtari, 2008). Augstāko harmoniku inducētas strāvas zudumi rotora tinumos sastāda nozīmīgu daļu no papildzudumiem. (Englebreton, 2009). Papildzudumi galvenokārt ir atkarīgi no elektrodzinēja konstrukcijas.

Kā var secināt no pētījumiem, zudumi mainās atkarība no elektrodzinēja temperatūras. Veicot 2.2 kW asinhronā elektrodzinēja statora elektrisko un magnētisko zudumu analīzi atkarībā no dzinēja temperatūras (Schützhold, 2013) tukšgaitas režīmā (rotora elektriskie zudumi gandrīz vienādi ar 0), tika secināts, ka elektriskie zudumi palielinās un magnētiskie zudumi samazinās, palielinoties dzinēja temperatūrai. Pēc 2.3 attēla var redzēt, ka elektrodzinēja temperatūrai pieaugot par 45 °C, elektriskie zudumi palielinās par ~ 15% un magnētiskie zudumi samazinās par ~ 5 %. Līdz ar to zudumu jauda palielinās, ja uzsilst mazjaudas asinhronais elektrodzinējs. Ja asinhronais elektrodzinējs tiek darbināts ar nominālo slodzi, tad uzsilst arī rotora tinums, palielinās rotora pretestība, uz samazinās strāva. Tāpēc statora elektrisko zudumu izmaiņas atkarība no temperatūras būs dažāda pie atšķirīgas slodzes.



2.3. att. Asinhronā elektrodzinēja statora elektrisko un magnētisko zudumu atkarība no dzinēja temperatūras tukšgaitās režīmā (Schützhold, 2013):
1 – statora elektriskie zudumi; 2 – statora magnētiskie zudumi

2.2. Asinhronā elektrodzinēja zudumu noteikšana un to sadalījums

Lai noteiktu asinhronā elektrodzinēja zudumus, izmanto to lietderības koeficienta noteikšanas standartus:

1. IEEE 112 (tiek izmantots ASV);
2. IEC 60034-2 (galvenokārt tiek izmantots Eiropā);
3. JEC-37 (galvenokārt tiek izmantots Japānā).

Ir dažādas atšķirības starp standartiem, bet galvenā atšķirība ir papildzudumu noteikšanā. Pēc IEEE 112 standarta papildzudumi tiek noteikti netiešā veidā, pēc IEC standarta papildzudumus aprēķina kā 0.5% no ieejas jaudas un pēc JEC standarta tiek pieņemts, ka papildzudumi nav. Tiek pieņemts, ka no šiem standartiem IEEE 112 nodrošina visprecīzāko lietderības koeficienta lielumu (Zabardast un Mokhtari, 2008).

Tālāk tiks apskatīta asinhronā elektrodzinēja zudumu jaudas noteikšana pēc IEEE 112 standarta. Statora tinumu elektriskos zudumus aprēķina pēc (IEEE 112, 2004):

$$P_s = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2, \quad (2.5)$$

kur P_s – statora tinumu elektriskie zudumi, W;
 R_s – vienas fāzes omiskā pretestība, Ω ;
 I_s – statora tinuma izmērītā vai aprēķinātā strāva, A.

Rotora elektriskie zudumi tiek noteikti, izmantojot sekojošo formulu (IEEE 112, 2004):

$$P_r = (P - P_s - P_{\text{mag}}) \cdot s, \quad (2.6)$$

kur P_r – rotora tinumu elektriskie zudumi, W;
 P – statoram pievadītā aktīvā jauda, W;
 s – rotora slīde.

Mehāniskos P_{meh} un magnētiskos P_{mag} zudumus var noteikt, asinhrono elektrodzinēju darbinot tukšgaitas režīmā. Dzinējs tiek pieslēgts pie tīkla ar nominālo frekvenci un bez slodzes. Tiek veikti temperatūras, sprieguma, strāvas un aktīvās jaudas mērījumi, mainot spriegumu no 125% nominālā sprieguma līdz spriegumam, pie kura strāva sāk palielināties.

Mehānisko zudumu noteikšana.

1. metode: izveido aktīvās jaudas P mērījumu (y ass) un sprieguma kvadrātā U^2 mērījumu (x ass) līkni. Izmantojot iegūtās līknes apakšējos trīs vai vairākus punktus, tiek veikta lineārās regresijas analīze.

2. metode: Izveido jaudas starpības ($P - P_s$) un sprieguma mērījumu atkarības līkni. Iegūtās līknes jaudas lielums pie sprieguma $U = 0$ V būs vienāds ar mehāniskiem zudumiem.

Magnētisko zudumu noteikšana.

Magnētiskos zudumus pie katra sprieguma lieluma var noteikt, atņemot mehāniskos un elektriskos zudumus no aktīvas jaudas ($P_{mag} = P - P_s - P_{meh}$). Var izveidot grafiku, kas parāda sakarību starp magnētiskiem zudumiem un spriegumu, lai noteiktu magnētiskos zudumus pie jebkura vajadzīgā sprieguma.

Papildzudumu noteikšana.

Pamatā izmanto netiešo metodi: no kopējiem zudumiem (nosaka sekojošā veidā: no pievadītas elektriskās aktīvās jaudas atņem mehānisko jaudu uz vārpstas) atņem mehāniskos zudumus, statora un rotora elektriskos un magnētiskos zudumus.

Papildzudumi var arī būt pieņemti kā konstants lielums no nominālās jaudas pie nominālās slodzes (skat. 2.1. tabulu), ja to pieļauj instrukcija vai izmantotais standarts.

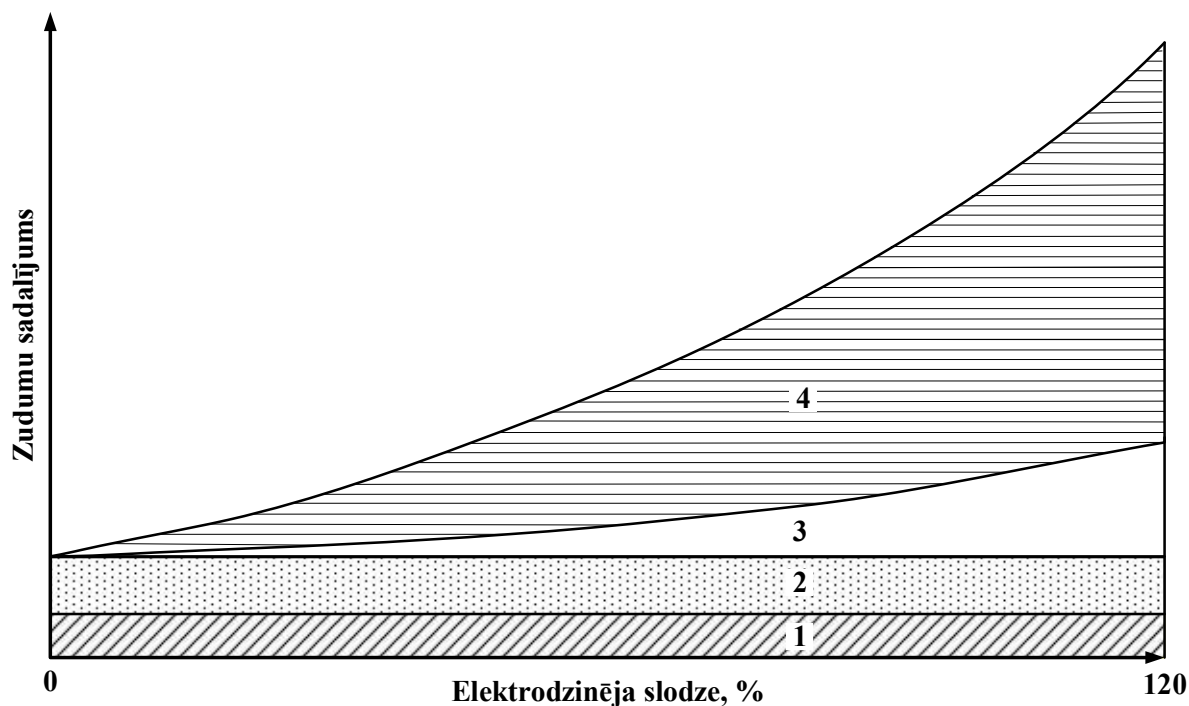
Ja ir nepieciešams, papildzudumus var noteikt ar tiešās mērīšanas metodi. Šajā gadījumā pamatfrekvences un augstākas frekvences papildzudumi tiek noteikti atsevišķi. Pamatfrekvences papildzudumi tiek noteikti, pieslēdzot elektrodzinēju pie nomināla sprieguma bez rotora. Augstākas frekvences papildzudumi tiek noteikti, pieslēdzot elektrodzinēju pie nominālā sprieguma un griežot pretējā virzienā ar citu piedziņu. Detalizētāk ir aprakstīts IEEE 112 standartā.

2.1.tabula

Papildzudumi pēc IEEE 112 standarta

Elektrodzinēja nominālā jauda, kW	Papildzudumi, % no nominālās jaudas
1 – 90	1.8 %
91 – 375	1.5 %
376 – 1850	1.2 %
> 1850	0.9 %

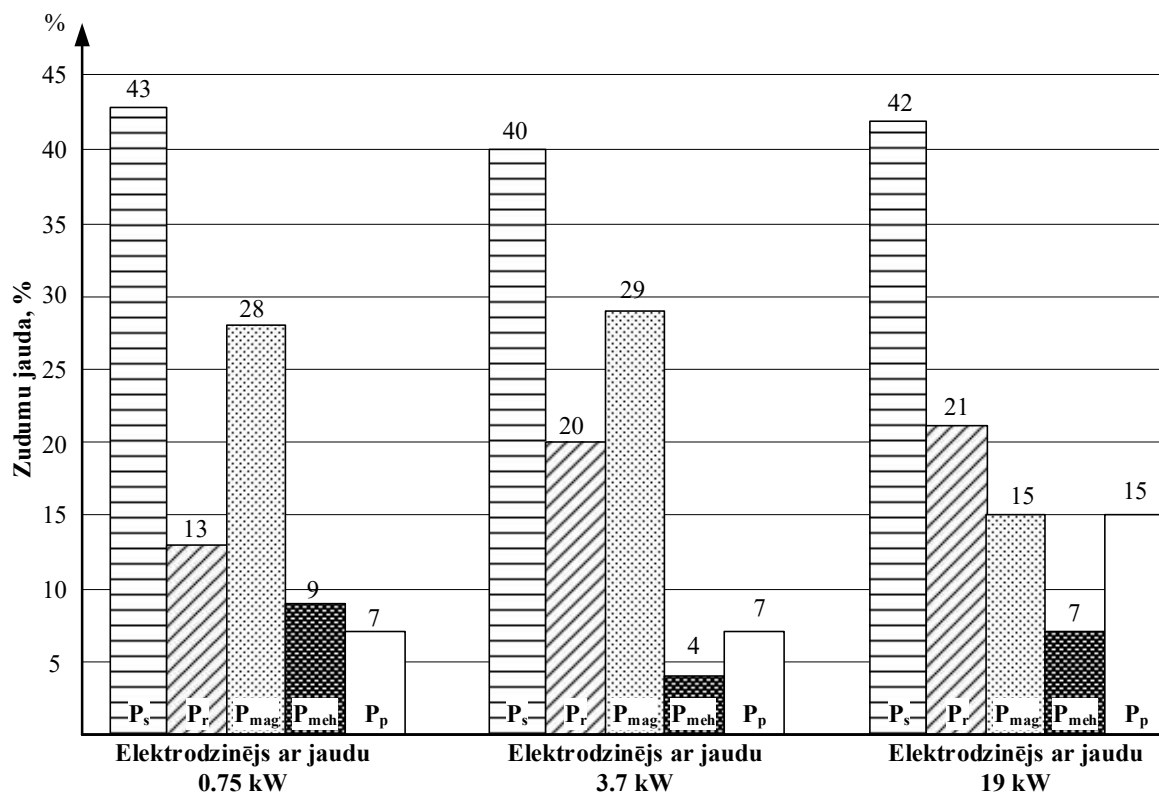
Asinhrono elektrodzinēju zudumu sadalījums atkarībā no slodzes ir parādīts 2.4. attēlā. Var konstatēt, ka magnētiskie un mehāniskie zudumi nemainās no slodzes, papildzudumi pieaug ar slodzes pieaugumu, bet visvairāk pieaug elektriskie zudumi statora un rotora tinumos.



2.4. att. Asinhronā elektrodzinēja zudumu sadalījums atkarībā no dzinēja slodzes (Emadi, 2004):

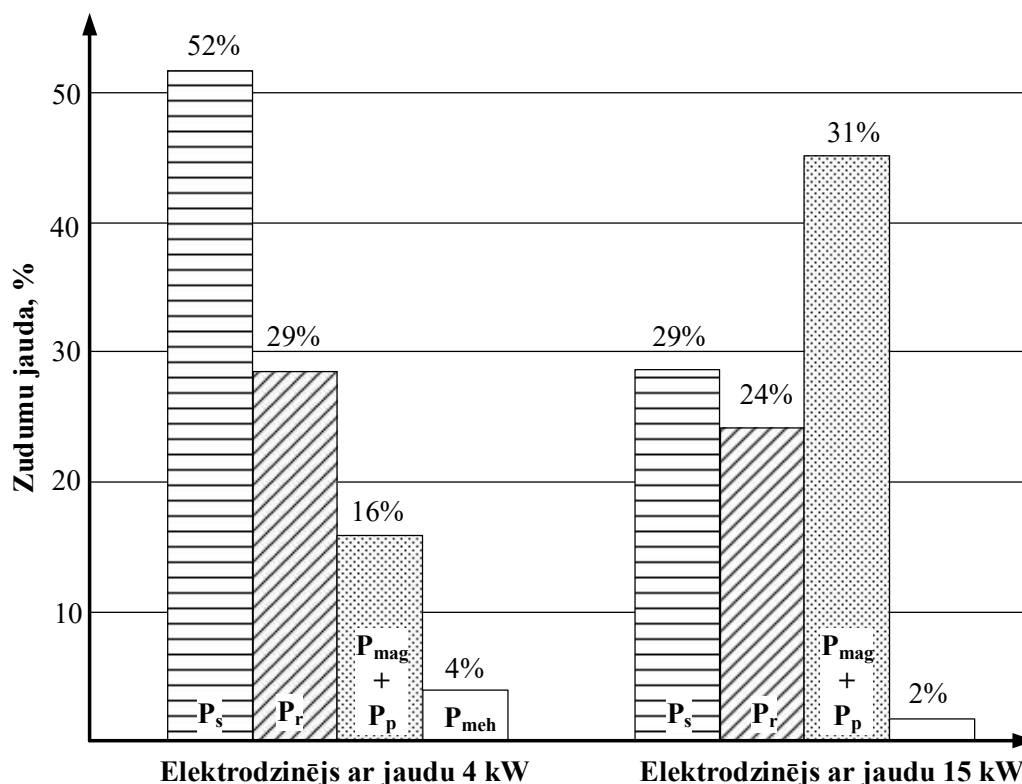
1 – mehāniskie zudumi; 2 – magnētiskie zudumi; 3 – papildzudumi; 4 – elektriskie zudumi

Mazas jaudas asinhronajiem elektrodzinējiem vairāk nekā 50% no kopējiem zudumiem ir elektriskie zudumi un lielākā šo zudumu daļa izdalās kā siltums statora tinumos (skat. 2.5. un 2.6. att.).



2.5. att. Asinhrono elektrodzinēju zudumu sadalījums ar jaudu 0.75 kW, 3.7 kW un 19 kW (Emadi, 2004)

Lielākas jaudas elektrodzinējiem būtiski pieaug papildzudumi, bet mazjaudas elektrodzinējiem tos var neievērot, jo to lielums, salīdzinot ar elektriskiem zudumiem, ir ļoti mazs. Piemēram, 4 kW asinhronajam elektrodzinējam elektriskie zudumi sastāda 81% no kopējiem (skat. 2.6. att.). Tāpēc mazas jaudas elektrodzinēju vienkāršākai silšanas analīzei bieži izmanto tikai elektriskos zudumus.



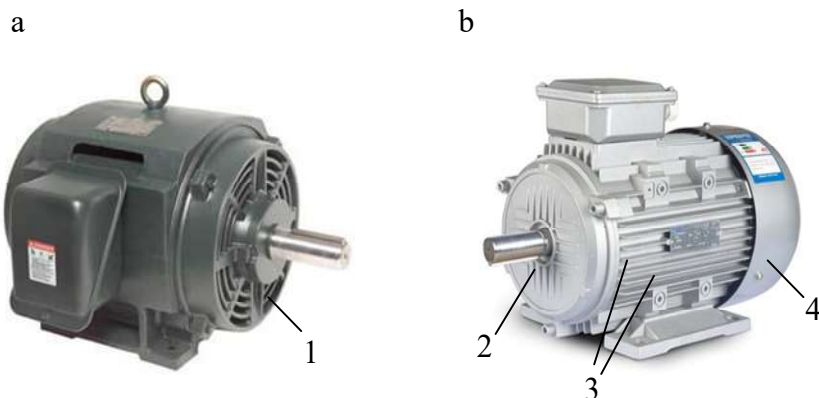
2.6. att. Asinhrono elektrodzinēju zudumu sadalījums ar jaudu 4 kW un 15 kW (Kylander, 1995)

2.3. Asinhronā elektrodzinēja siltumapmaiņas procesu analīze

Atkarībā no asinhrono elektrodzinēju izpildījuma un ventilācijas veida, tos iedala:

1. Atvērtā tipa pret pilienu aizsargātie (Open Drip Proof – ODP) asinhronie elektrodzinēji:
 - a. ar aksiālo iekšējo ventilāciju;
 - b. ar radiālo iekšējo ventilāciju;
 - c. ar aksiālo un radiālo ventilāciju.
2. Pilnīgi slēgtie asinhronie elektrodzinēji:
 - a. ar dabīgo ventilāciju (Totally enclosed naturally ventilated – TENV);
 - b. ar ventilatoru (Totally enclosed fan cooled - TEFC).

Atvērtā tipa elektrodzinējos gala vākiem ir atvērumi, caur kuriem gaiss ieplūst un izplūst cauri statoram un rotoram (2.7. a. attēls). Pilnīgi slēgtiem asinhronajiem elektrodzinējiem gala vāki ir pilnīgi slēgti, lai aizsargātu statora tinumu no putekļiem un citām daļām, kas samazina siltuma atdevi un var mehāniski bojāt tinumus. Statora un rotora temperatūras atvērtā tipa elektrodzinējiem ir zemākas nekā pilnīgi slēgtajiem asinhronajiem elektrodzinējiem. Lai palielinātu siltuma atdevi pilnīgi slēgtajiem elektrodzinējiem ar ventilatoru, korpusam ir ribas, lai palielinātu ventilējamo virsmas laukumu.



2.7. att. **ODP un TEFC asinhronie elektrodzinēji:**

a – atvērtā tipa asinhronais elektrodzinējs (ODP); 2 – pilnīgi slēgts asinhronais elektrodzinējs ar ventilatoru (TEFC); 1 – ventilācijas kanāli; 2 – pilnīgi slēgts vāks; 3 – ribas; 4 – ventilatora vāks

Tā kā pamatā elektrodzinēju dzesēšanas traucējumus izraisa putekļi, piemēram, lauksaimniecības objektos, tad šādos objektos izmanto pilnīgi slēgtos TEFC asinhronos elektrodzinējus. Tāpēc siltumapmaiņas procesi tiks analizēti TEFC asinhronajiem elektrodzinējiem.

Elektrodzinēja siltumapmaiņa ar apkārtējo vidi notiek 3 veidos:

1. Siltuma vadīšana – temperatūru starpības dēļ;
2. Konvekcija – siltumenerģiju saturošu siltumnesēju plūsmas dēļ;
3. Siltuma starojums – infrasarkanā starojuma veidā.

Siltuma vadīšanu apraksta 2.7.vienādojums (Kylander, 1995):

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_{ix} \frac{d\theta_i}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\lambda_{iy} \frac{d\theta_i}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(\lambda_{iz} \frac{d\theta_i}{dz} \right) + Q_i = \rho_i c_i \frac{d\theta_i}{dt}, \quad (2.7)$$

kur θ_i – i elementa temperatūra, °C;
 ρ_i – i elementa materiāla blīvums, kg·m⁻³;
 $\lambda_{ix}, \lambda_{iy}, \lambda_{iz}$ – i elementa siltuma vadīšanas koeficienti koordinātu ass virzienā, W·(m·K)⁻¹;
 c_i – i elementa materiāla īpatnējā siltumietilpība, J·(kg·K)⁻¹;
 Q_i – i elementa siltuma avota īpatnējā jauda, W;
 t – silšanas procesa laiks, s.

Zudumu radītā siltumenerģija siltuma vadīšanas procesā asinhronajos elektrodzinējos plūst aksiāli no statora tinumu galiem uz tinumiem serdes rievās. Tālāk siltumenerģija radiāli plūst no statora tinumiem uz statora serdi, un no serdes uz elektrodzinēja korpusu.

No rotora tinumiem siltums nonāk rotora serdē un pēc tam aksiāli visā vārpstas garumā. Asinhronajos elektrodzinējos temperatūru starpība aksiālā virzienā ir maza - mazāk nekā 10 °C (Boldea & Nasar, 2010), līdz ar to siltumapmaiņu aksiālā virzienā var neievērot. Asinhrono elektrodzinēju konstrukcijas riņķveida simetrija ļauj neievērot arī riņķveida temperatūras starpību. Tāpēc asinhrono elektrodzinēju siltumapmaiņas procesu analīzei izmanto viendimensiju siltuma plūsmu, tad siltuma plūsmas vienādojums ir:

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dt}, \quad (2.8)$$

kur q – siltuma plūsmas blīvums, W·m⁻².

Termiskā pretestība starp diviem punktiem ir:

$$R_{vt} = \frac{1}{\lambda \cdot S}, \quad (2.9)$$

kur R_{vt} – siltuma vadīšanas termiskā pretestība, $K \cdot W^{-1}$;
 l – attālums starp diviem punktiem, m;
 S – šķērsriezuma laukums, m^2 .

Siltuma vadīšanas gadījumā termiskā pretestība cietiem ķermeņiem var tikt pieņemta kā konstants lielums, jo cieta ķermeņa siltuma vadīšana mainās tikai nedaudz, mainoties temperatūrai (Kylander, 1995).

Siltumapmaiņa starp asinhrono elektrodzinēju un ārējo vidi konvekcijas ceļā notiek starp korpusa virsmu un gaisa plūsmu, ko rada ventilators. Šo procesu apraksta sekojošs vienādojums:

$$q = \alpha(\theta_k - \theta_v), \quad (2.10)$$

kur α – siltuma atdeves koeficients, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$;
 θ_k – korpusa temperatūra, $^{\circ}C$;
 θ_v – ārējās vides temperatūra, $^{\circ}C$.

Konvekcijas termiskā pretestība:

$$R_{kt} = \frac{1}{\alpha \cdot S}, \quad (2.11)$$

kur R_{kt} – konvekcijas termiskā pretestība, $K \cdot W^{-1}$.

Konvekcijas siltumapmaiņa ir atkarīga no gaisa plūsmas ātruma, gaisa parametriem (viskozitāte, blīvums, siltuma vadīšana), elektrodzinēja virsmas ģeometrijas un gaisa plūsmas orientācijas.

Siltuma starojumu no ķermeņa uz apkārtējo vidi rakstu vienādojums:

$$q = \sigma \varepsilon (\theta^4 - \theta_v^4), \quad (2.12)$$

kur σ – Stefana-Bolcamaņa konstante, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$;
 ε – melnuma pakāpe.

Siltuma starojuma termiskā pretestība:

$$R_{st} = \frac{\theta - \theta_v}{S \sigma \varepsilon (\theta^4 - \theta_v^4)}, \quad (2.13)$$

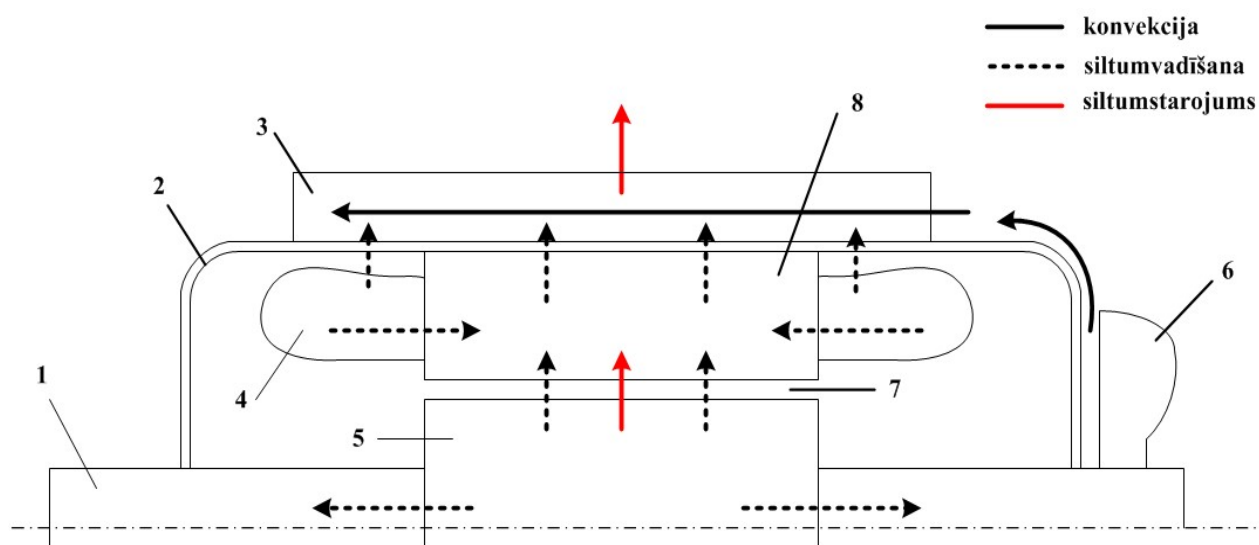
kur R_{st} – siltuma starojuma termiskā pretestība, $K \cdot W^{-1}$;

Praktiski siltuma starojuma daļa no kopējās siltumapmaiņas asinhronajiem elektrodzinējiem ir ļoti maza, izņemot pilnīgi slēgtos asinhronos elektrodzinējus bez ventilatora (TENV) un asinhronos elektrodzinējus ar H izolācijas klasi, kuru korpusa temperatūra var sasniegt 120 – 150 $^{\circ}C$ (Boldea & Nasar, 2010). Bieži vien asinhrono elektrodzinēju siltumatdeves koeficients no elektrodzinēja korpusa iekļauj gan konvekciju, gan siltuma starojumu.

Uz rotora ir izvirzījumi, kas rada gaisa plūsmu elektrodzinēja iekšienē. Mazas jaudas elektrodzinējos attālums starp statora gala tinumiem un korpusu ir ļoti mazs ($< 2 \text{ mm}$), līdz ar to iekšējā konvekcija nav tik efektīva, un notiek ievērojama siltuma vadīšana caur gaisa slāni starp statora gala tinumiem un korpusu (Boglietti & Cavagnino, 2006).

Mazas jaudas asinhroniem elektrodzinējiem nav aksiālās gaisa plūsmas gaisa spraugā starp rotoru un statora serdi, tāpēc siltuma plūsma no rotora uz statora serdi notiek caur siltuma vadīšanu un nedaudz caur siltuma starojumu (Kylander, 1995).

Ievērojot visas mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju siltumapmaiņas īpatnības, var izveidot vienkāršoto siltuma plūsmas shēmu (2.8. attēls). Lielākā daļa no statora tinumu kopēja siltuma siltuma vadīšanas ceļā nonāk statora serdē un neliela daļa siltuma no gala tinumiem uz korpusu. Pie nominālās slodzes 65% no kopējiem siltuma zudumiem rotorā nonāk statora serdē caur gaisa spraugu, un pārējais siltums caur vārpstu tiek aizvadīts uz gultņiem un elektrodzinēja korpusu. Siltums no asinhronā elektrodzinēja korpusa galvenokārt tiek atdots apkārtējai videi konvekcijas un nedaudz siltuma starojuma ceļā.



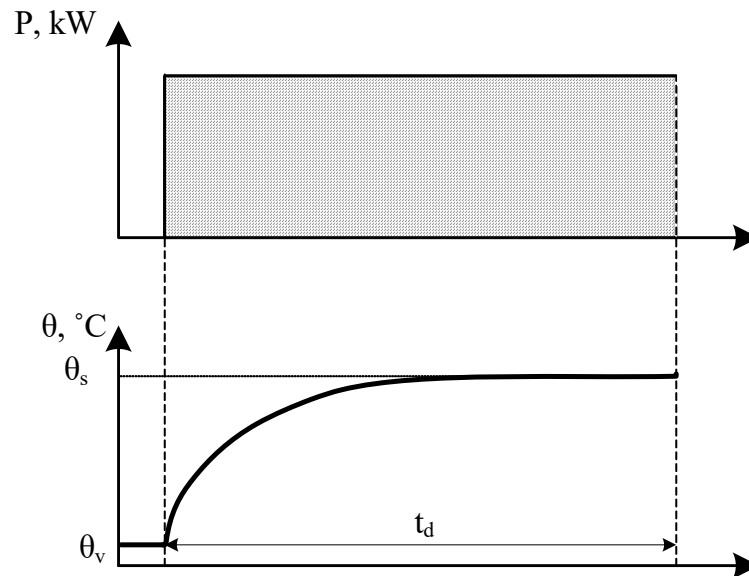
2.8. att. Mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju siltumapmaiņa:

1 – vārpsta; 2 – korpus; 3 – korpusa ribas; 4 – statora gala tinumi; 5 – rotors; 6 – ventilators; 7 – gaisa sprauga; 8 – statora serde

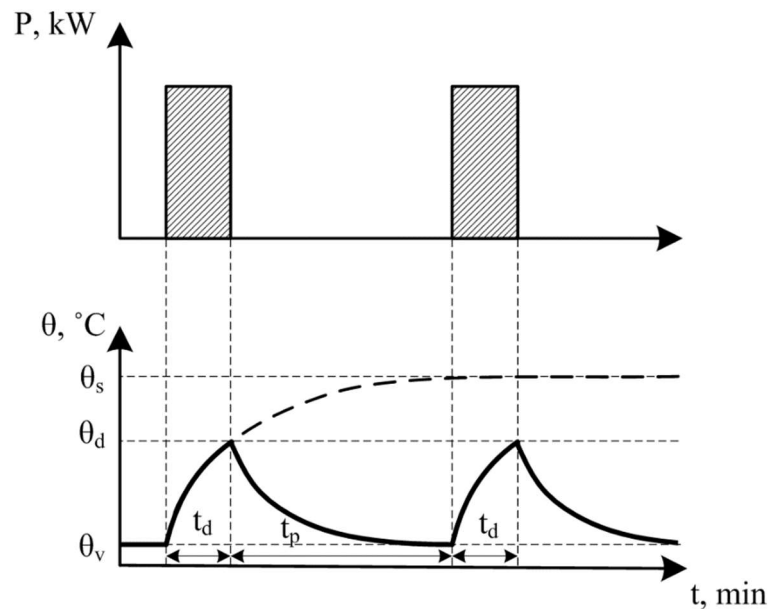
2.4. Asinhronā elektrodzinēja silšanas analīze pie dažādiem darba režīmiem

Asinhronie elektrodzinēji darbina dažādas iekārtas, kurām ir atšķirīgs slodzes raksturs. Atbilstoši IEC – 60034 – 1 standartam elektriskai piedziņai ir izveidoti standartizētie darba režīmi atkarībā no slodzes rakstura S1 – S10. Visbiežāk tiek izmantoti S1, S2, S3 un S6 standartizētie darba režīmi.

S1 režīmā elektrodzinējs tiek ilgstoši darbināts ar nemainīgo slodzi, piemēram, cirkulācijas sūkņi, vēdināšanas iekārtu ventilatori. Atbilstību darba režīmam S1 nosaka pēc elektrodzinēja temperatūras. Ilgstošā režīmā elektrodzinēja darba temperatūra sasniedz nostabilizēto temperatūru θ_s (2.9. attēls). Par nostabilizēto temperatūras vērtību pieņem temperatūru, kuru izmaiņas ilgstoši nepārsniedz $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



2.9. att. Elektrodzinēja jauda $P = f(t)$ un temperatūra $\theta = f(t)$ S1 darba režīmā



2.10. att. Elektrodzinēja jauda $P = f(t)$ un temperatūra $\theta = f(t)$ S2 darba režīmā

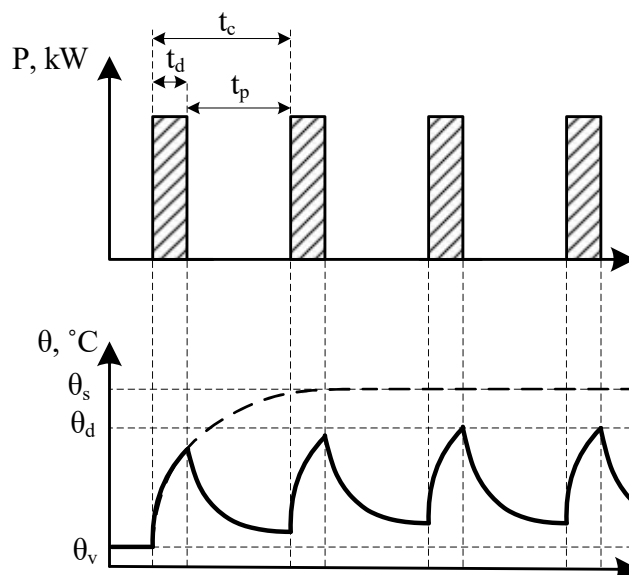
S2 darba režīmā dzinējs tiek īslaicīgi darbināts ar nemainīgo slodzi, kuras laikā elektrodzinējs nesasniedz stacionāru silšanas procesu, un darba laika t_d beigās dzinēja darba temperatūra θ_d ir mazāka par nostabilizēto temperatūru θ_s . Pēc tam, pauzes laikā t_p dzinējs atdziest līdz apkārtējās vides temperatūrai θ_v (2.10. attēls). Elektrodzinējs var tikt pārslogots, bet nedrīkst pārsniegt maksimālo pieļaujamo temperatūru. Mazas jaudas asinhronajiem elektrodzinējiem maksimālo pieļaujamo temperatūru nosaka statora tinumu izolācijas klases pieļaujamā temperatūra.

S3 darba režīmā elektrodzinējs tiek cikliski slogots. Ar nemainīgo slodzi elektrodzinējs tiek darbināts ar laiku t_d un elektrodzinējs nesasniedz nostabilizēto temperatūru. Pauzes laikā t_p elektrodzinējs atdziest, bet nesasniedz apkārtējās vides temperatūru (2.11. attēls). Arī šajā režīmā elektrodzinējs var tikt pārslogots, bet nedrīkst pārsniegt maksimālo pieļaujamo temperatūru. Elektrodzinēja darbību S3 režīmā raksturo relatīvais darba ilgums:

$$\varepsilon_d = \frac{t_d}{t_d + t_p} \cdot 100\% = \frac{t_d}{t_c} \cdot 100\%, \quad (2.14)$$

kur ε_d – relatīvais darba ilgums, %;
 t_d – elektrodzinēja darba laiks, min;
 t_p – pauzes laiks, min;
 t_c – cikla laiks, min.

Ja netiek specificēts, tad cikla laikam jābūt 10 min. Pieņemtās vērtības ir 15 %, 25 %, 40 % un 60 %. S6 režīmā, salīdzinot ar S3, pauzes vietā dzinējs tiek darbināts tukšgaitā, bet silšanas procesa dinamika ir līdzīga kā S3 režīmā.



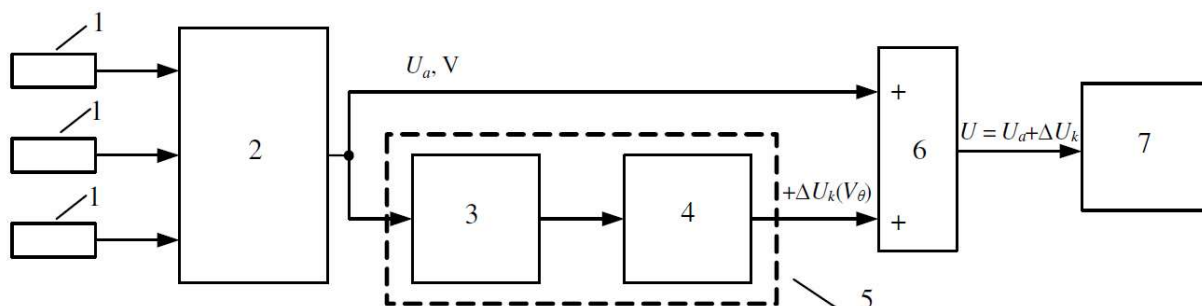
2.11. att. Elektrodzinēja jauda $P = f(t)$ un temperatūra $\theta = f(t)$ S3 darba režīmā

Palaišanas momentā un nosprūdušā rotora gadījumā asinhronā elektrodzinēja statora tinumos plūst ~ 5 – 9 reizes (jauniem elektrodzinējiem ar lielāko lietderības koeficientu vēl vairāk) lielāka strāva nekā nominālā darba režīmā un statora tinumu temperatūra strauji pieaug. Smagos palaišanos apstākļos asinhronais elektrodzinējs var palaisties pietiekoši ilgi, lai statora tinumi sasniegtu izolācijas klases. Pārslodze, gultņu un vārpstu mehāniskie bojājumi, pazemināts spriegums un fāzes izzušana var izraisīt rotora nosprūšanu. Kā jau minēts, īslaicīga statora tinumu izolācijas pārkāršana būtiski neiespaido to darbmūžu. Ja rotora nosprūšana vai elektrodzinēja palaišana notiek pie elektrodzinēja karsta stāvokļa, tad aizsardzības ierīces nostrādes laikā statora tinumu temperatūra var būtiski pārsniegt pieļaujamo temperatūru un notikt izolācijas bojājums.

Asinhrono elektrodzinēju silšanas eksperimentālie pētījumi (Gedzurs & Sniders, 2014) pie nosprūdušā rotora rāda, ka 30 s laikā 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūra palielinās no 24 °C līdz 157 °C, tikmēr korpusa temperatūra palielinās tikai par 3 °C. Tāpēc var uzskatīt, ka pie nosprūdušā rotora režīma notiek adiabatisks silšanas process un viss siltums akumulējās statora tinumos. 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja temperatūras pieaugšanas ātrums ir 4.8 °C·s⁻¹ (Gedzurs & Sniders, 2014) un 2.5 kW – 6.2 °C·s⁻¹ (Staton & Šušnjic, 2009).

Mērot statora tinumu temperatūru ar temperatūras sensoru nosprūdušam rotoram (piemēram ar PT 100), rodas būtiska mērīšanas kļūda sensoru inerces dēļ. Šo inerci ietekmē sensora izmēri, sensora izolācijas materiāla biezums, statora tinumu izolācijas biezums un kontakta kvalitāte starp statora tinumu un sensoru. Lai atrisinātu šo problēmu, var izmantot asinhronā elektrodzinēja temperatūras aizsardzību ar kļūdas kompensāciju (Sniders &

Gedzurs, 2016). Risinājuma blokshēma ir parādīta 2.12. attēlā. Mērīšanas adapteris pārveido mērīšanas signālu un padod elektrisko signālu uz summatoru un kļūdu kompensācijas ķēdi, kas sastāv no pastiprinātāja un diferenciālā filtra. Diferenciālais filtrs reaģē uz straujo mērīšanas signāla pieaugumu un formē kompensācijas signālu, kas tiek padots uz summatora otro ieeju. Tad summatora izejas signāls tiek padots uz releju.



2.12. att. Temperatūras aizsardzības ierīces ar kļūdu kompensācijas blokshēma
(Gedzurs, 2016):

1 – temperatūras sensors; 2 – mērīšanas adapteris; 3 – pastiprinātājs; 4 – diferenciālais filtrs; 5 – kļūdu kompensācijas ķēde; 6 – summators; 7 – elektroniskais relejs

2.5. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes

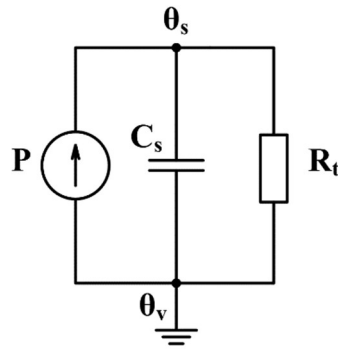
Termiskā pārslodze ir viens no galvenajiem cēloņiem, kas izraisa asinhronā elektrodzinēja statora tinumu atteici. Tāpēc precīzā statora tinumu temperatūras kontrole ir svarīga, lai efektīvi aizsargātu dzinēju. Elektromehāniskās vai elektroniskās aizsardzības ierīces nevar aizsargāt asinhrono elektrodzinēju pret termisko pārslodzi dzesēšanas traucējuma gadījumā. Iebūvēto temperatūras sensoru neizmanto mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai, to sarežģītas instalācijas izmaksu dēļ. Tāpēc tiek izstrādātas vairākas statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes. Analizējot literatūru par statora tinumu temperatūras noteikšanas metodēm, tās var iedalīt:

1. statora tinumu temperatūras noteikšana, izmantojot silšanas tīklus un modeļus;
2. statora tinumu temperatūras noteikšana, izmantojot asinhronā elektrodzinēja parametrus.

Silšanas ķēdes (thermal network) metodē, elektrodzinējs tiek sadalīts pa elementiem. Elementi tiek savienoti kopā, veidojot tīklu no mezgliem un termiskām pretestībām. Šī metode ir līdzīga elektriskajam tīklam, kurš sastāv no strāvas avota un pretestības (Kylander, 1995). Detalizētai asinhronā elektrodzinēja silšanas izpētei var tikt izmantots silšanas tīkls ar 20 vai vairāk mezgliem. Šādos gadījumos var izmantot galīgo elementu metodi (Lee et al., 1997; Ho & Fu, 2001; Staton et al., 2010; Xie et al. 2011), izmantojot diferenciālos vienādojumus katras elektrodzinēja daļas temperatūras modelēšanai. Šo metodi vairāk izmanto projektēšanas nolūkiem, elektrodzinēja konstrukcijas uzlabošanai.

Silšanas modeļa (lumped parameter thermal model) gadījumā, elektrodzinējs tiek apskatīts kā viens vai vairāki homogēni ķermeņi. Tiek izmantota termiskā pretestība un termiskā kapacitāte siltumapmaiņas procesu modelēšanai. Izveidojot ekvivalento elektrisko ķēdi, elektrodzinēja temperatūra tiek aprēķināta pēc elektrisko ķēžu aprēķinu metodēm.

Vienkāršākais silšanas modelis ir 1. kārtas silšanas modelis, kad asinhrono elektrodzinēju apskata kā homogēnu ķermeni ar vienu termisko siltumietilpību C , kas raksturo termiskās īpašības, un pretestību R_t , kas raksturo siltuma atdevi apkārtējai videi (skat. 2.13. attēlu). Par ieejas signālu tiek ņemta statora tinumu elektrisko zudumu jauda P_z , kuru nosaka ar 2.5. formulas palīdzību.



2.13. att. Asinhronā elektrodzinēja pirmās kārtas silšanas modelis

Asinhronā elektrodzinēja silšanas analīzei izvēlas nulles sākuma nosacījumu. Pie laika momenta $t = 0$ min, elektrodzinēja tinumu temperatūra ir vienāda ar vides temperatūru. Asinhronā elektrodzinēja nestacionāro silšanas procesu apraksta vienādojums (Šnīders & Straume, 2008):

$$Q_a + Q_v = P_z, \quad (2.15)$$

kur Q_a – akumulētā siltuma plūsma, W;
 Q_v – videi atdotā siltuma plūsma, W;
 P_z – zudumu jauda, W.

Silšanas procesa sākumā, visa siltuma plūsma akumulējas asinhronā elektrodzinējā, palielinot to temperatūru. Procesa beigās iestājas stacionārs līdzsvara stāvoklis un elektrodzinēja temperatūra ir konstanta. Zudumu radītā siltuma plūsma izdalās apkārtējā vidē. Asinhronā elektrodzinēja silšanas dinamikas vienādojumi izvērsta veidā (Šnīders & Straume, 2008):

$$Q_a + Q_a = cm \frac{d\Delta\theta}{dt} + \alpha S \Delta\theta = P_z, \quad (2.16)$$

kur c – īpatnējā siltumietilpība, $J/(kg \cdot K)^{-1}$;
 $\Delta\theta$ – virstemperatūra, $^{\circ}C$;
 m – elektrodzinēja masa, kg.

Dalot diferenciālvienādojuma (2.16) abas puses ar αS , iegūstam elektrodzinēja silšanas vienādojumu normālformā (Šnīders & Straume, 2008):

$$T \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = R_t \cdot P_z, \quad (2.17)$$

kur $T = c \cdot m \cdot (\alpha S)^{-1}$ – silšanas laika konstante, s;
 $R_t = 1 \cdot (\alpha S)^{-1}$ – termiskā pretestība, $^{\circ}K \cdot W^{-1}$.

Reizinājums $C = c \cdot m$ ir asinhronā elektrodzinēja siltumietilpība. Atrisinot diferenciālvienādojumu (2.17.), iegūst eksponenciālu funkciju, kas apraksta siltuma pārejas procesu elektrodzinējā (Šnīders & Straume, 2008):

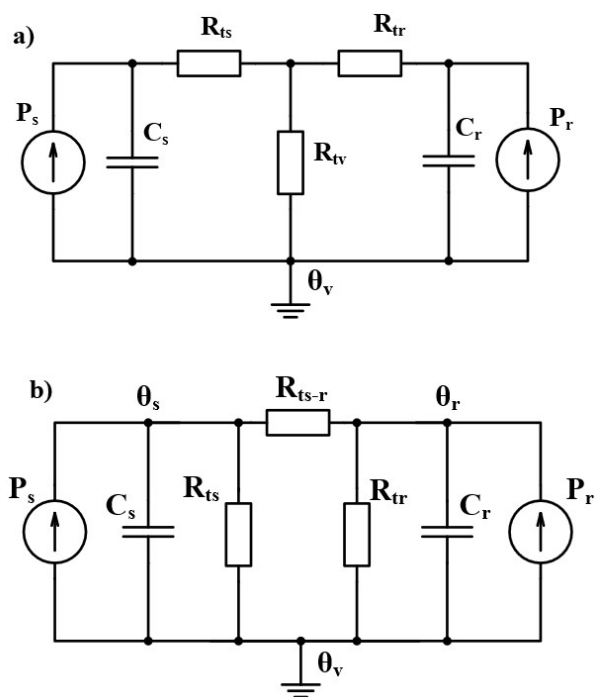
$$\Delta\theta(t) = \Delta\theta_s (1 - e^{-t/T}) = R_t \cdot P_z (1 - e^{-t/T}), \quad (2.18)$$

kur $\Delta\theta_s = R_t \cdot P$ – stacionārā (nostabilizētā) virstemperatūra, $^{\circ}C$.

Mazas jaudas elektrodzinējos pirmās kārtas silšanas modeli izmanto statora tinumu temperatūras noteikšanai. Pirmās kārtas silšanas modeļa algoritma izmantošana asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai tika apskatīta (Abou-El-Ela et al., 1996). Silšanas modeļu verifikācijai tika veikti asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentālie pētījumi. Tika izmantots asinhronais elektrodzinējs ar īsslēgto rotoru, nominālais spriegums 380 V un strāva 9 A. Rezultāti parāda, ka starpība starp silšanas modeļa un eksperimenta rezultātiem ir maza, aptuveni 2 °C (Abou-El-Ela et al., 1996). Līdz ar to tika secināts, ka pirmās kārtas silšanas modelis var tikt izmantots elektrodzinēju aizsardzības izstrādei pret pārkāršanu pārslodzes un spriegumu asimetrijas gadījumos. Pēc eksperimenta rezultātiem aprēķināta silšanas laika konstante $T = 50$ min (Abou-El-Ela et al., 1996). Šī laika konstante ir salīdzinoši liela, kas liecina par lielu termisko inerci.

Laika konstantes un elektrodzinēja siltumietilpības noteikšanai izmanto elektrodzinēja tehniskos un dimensiju parametrus vai tās nosaka, izmantojot eksperimenta rezultātus. Mazas jaudas elektrodzinējiem ne vienmēr ir pieejami to tehniskie parametri, tādēļ nav zināmi arī to siltumtehniskie un inerces parametri. Praksē bieži pielieto elektrodzinēju aizsardzības ierīces nostrādes klases mazas jaudas elektrodzinēju siltumtehnisko parametru noteikšanai (Zocholl, 1990).

Pirmās kārtas silšanas modelis tiek plaši izmantots relejos elektrodzinēju aizsardzībai. Tomēr elektrodzinēju silšana ir sarežģīts process un silšanas modelis ar vienu laika konstanti ir pārāk konservatīvs. Uz to balstīta relejaizsardzība var nostrādāt neatbilstoši reālajai situācijai – atslēgt elektrodzinēju no tīkla, pirms elektrodzinēja temperatūra sasniegs pieļaujamo vērtību (Du et al., 2008). Lielas jaudas asinhronajiem elektrodzinējiem ir jākontrolē arī rotora tinumu temperatūru, tāpēc pirmās kārtas modeļu izmantošana šiem elektrodzinējiem neder.



2.14. att. Asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļi:

a – silšanas modelis ar silšanas pretestību R_{tv} (Hurst & Habetler, 1997);

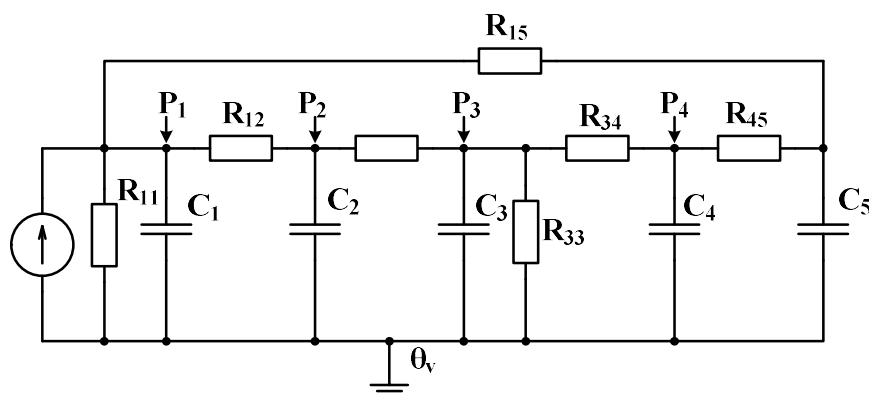
b – silšanas modelis ar silšanas pretestību R_{ts-r} (Gao, 2006)

Lai uzlabotu silšanas modeļa precizitāti un varētu noteikt arī rotora temperatūru, izmanto asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeli. Viens no šādiem modeļiem ir parādīts 2.14. a attēlā (Hurst & Habetler, 1997). Modelis sastāv no statora P_s un rotora P_r zudumu avotiem, statora C_s un rotora C_r kapacitātēm un termiskām pretestībām R_{ts} , R_{tr} , R_{tv} . Statora P_s

zudumi sastāv no statora elektriskiem un magnētiskiem zudumiem, bet rotora P_r – no rotora magnētiskajiem zudumiem. Kapacitāte C_s iekļauj sevī statora tinuma, serdes un korpusa siltumietilpības, rotora kapacitāte C_r – rotora serdes un tinumu siltumietilpības. Pretestība R_{tv} raksturo konvekciju starp iekšējo elektrodzinēja gaisu un ārējo gaisu. R_{tv} iekļauj sevī arī konvekciju starp korpusu un ārējo gaisu. Izmērit elektrodzinēja iekšējo gaisa temperatūru nav viegli, tāpēc ir grūti noteikt termiskās pretestības R_{tv} vērtību (Du et al., 2008).

Kā jau tika analizēts, pilnīgi slēgtajiem elektrodzinējiem lielāka daļa no siltuma plūsmas no rotora un statora uz korpusu nonāk siltuma vadīšanas ceļā. 2.14. b attēlā ir parādīts otrās kārtas silšanas modelis, kur elektrodzinēja iekšēja ventilācija tiek likvidēta un tiek lietota termiskā pretestība R_{ts-r} , kas raksturo siltuma apmaiņu starp rotoru un statoru (Gao, 2006).

Precīzākai asinhronā elektrodzinēja silšanas procesa modelēšanai, tiek izmantoti augstākās kārtas silšanas modeļi (Nestler & Sattler, 1993; Champenois et al., 1994; Bousbaine et al., 1995; Boglietti et al., 2003). Nester un Sattler darbā tika izmantots asinhronā elektrodzinēja piektās kārtas silšanas modelis (2.15. attēls). Modelī tiek atsevišķi modelētas statora serdes, statora tinumu serdes rievās, statora gala tinumu, rotora tinumu un serdes temperatūras. Siltuma zudumi – statora serdes magnētiskie zudumi P_1 , statora tinumu zudumi serdes rievās P_2 , statora gala tinumu zudumi P_3 , rotora zudumi P_4 . Elektrodzinēja temperatūras simulācijas rezultāti rāda labu sakarību ar eksperimenta rezultātiem. Modeļa precizitātes uzlabošanai tiek izmantots stāvokļa novērotājs, atgriezeniskajai saitei tiek izmantoti elektrodzinēja viegli pieejamas korpusa virsmas temperatūras mērījumi.



2.15. att. Asinhronā elektrodzinēja piektās kārtas silšanas modelis
(Nestler & Sattler, 1993)

Augstākās kārtas silšanas modeļi spēj precīzāk noteikt elektrodzinēja temperatūras un ļauj labāk izprast siltuma plūsmas elektrodzinēja iekšpusē, tomēr termisko parametru aprēķināšanai tiek izmantoti elektrodzinēja izmēri vai silšanas eksperimentu dati. Šie modeļi ir ievērojami sarežģītāki, salīdzinot ar pirmās vai otrās kārtas silšanas modeļiem, un to praktiskā izmantošana mazas jaudas elektrodzinēju aizsardzībai var būt ekonomiski neizdevīga.

Asinhrono elektrodzinēju temperatūras noteikšanas pēc elektrodzinēju parametriem pamatā ir aktīvās pretestības izmaiņa atkarībā no temperatūras. Līdz ar to statora un rotora temperatūras var noteikt, zinot to aktīvās pretestības. Asinhrono elektrodzinēju aktīvās pretestības noteikšanas metodes var iedalīt sekojoši:

1. pretestības noteikšana ar līdzstrāvas signālu;
2. pretestības noteikšana ar neironu tīklu modeļiem;
3. pretestības noteikšanas ar asinhrono elektrodzinēju ekvivalento shēmu.

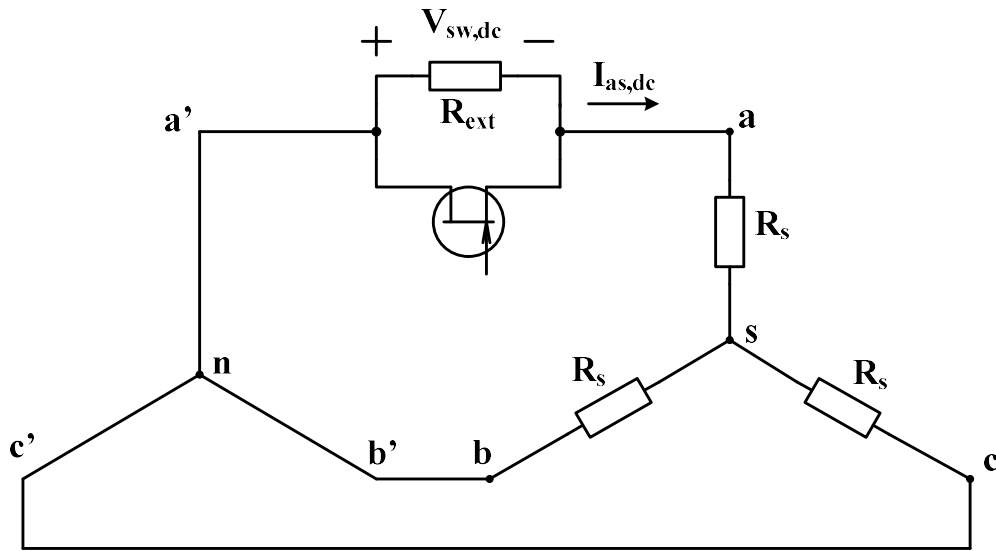
Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas metode ar līdzstrāvas signālu tika aprakstīta jau 1980. gadā (Paice, 1980). Tālāk šīs metodes izmantošana elektrodzinēja aizsardzībai neregulējamai elektropiedziņai tika apskatīta sekojošos darbos (Sang-Bin & Habetler, 2001; Sang-Bin & Habetler, 2002), elektropiedziņai ar mīksto palaišanu

(Zhang et al., 2007) un regulējamai elektropiedziņai (Cheng et al., 2012; He et al., 2015; Zhang & Habetler, 2016).

Pretestība R_{ext} tiek paralēli pieslēgta tranzistoram. Šī ķēde tiek pieslēgta starp barošanas avotu un elektrodzinēju (2.16. attēls). Nesimetriskā pretestība rada nesimetrisko spriegumu ķēdē, līdzstrāvas komponenti U_{sw} , rezultātā tiek padots līdzstrāvas signāls. Statora pretestība tiek aprēķināta katrā signāla padošanas reizē pēc formulas (Sang-Bin & Habetler, 2002):

$$R_s = \frac{U_{as,dc}}{I_{as,dc}} = \frac{2 \cdot U_{ab,dc}}{3 \cdot I_{as,dc}} = -\frac{2 \cdot U_{sw,dc}}{3 \cdot I_{as,dc}}, \quad (2.21)$$

kur $U_{sw,dc}$ – nesimetriskā sprieguma līdzstrāvas komponente, V;
 $U_{as,dc}$ – fāzes sprieguma līdzstrāvas komponente, V;
 $U_{ab,dc}$ – līnijas sprieguma līdzstrāvas komponente, V;
 $I_{as,dc}$ – statora strāvas līdzstrāvas komponente, A.



2.16. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu pretestības R_s noteikšana ar līdzstrāvas signāla padošanu (Sang-Bin & Habetler, 2002)

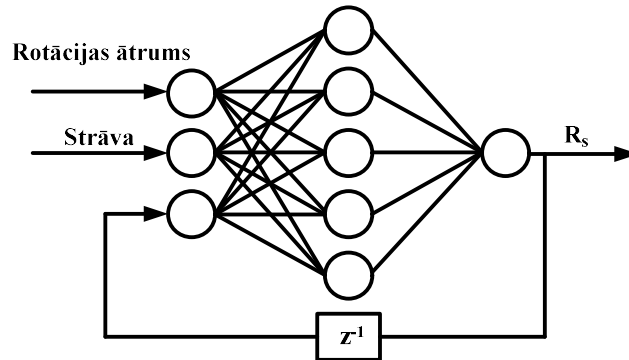
Tā kā statora tinumu izmaiņas notiek lēni, izņemot elektrodzinēja palaišanu un nosprūdušā rotora gadījumu, nav vajadzības injicēt līdzstrāvas signālu un R_s noteikt nepārtraukti. Pēc (Sang-Bin & Habetler, 2002) rekomendācijām R_s nosaka ik pēc 30 sekundēm ar 0.25 sekunžu ilgu līdzstrāvas signāla injicēšanu. Statora tinumu pretestības R_s noteikšanas precizitāti ietekmē pārejas procesi un citas aktīvas pretestības ķēdē. Risinājumi pārejas procesu izraisītu kļūdu novēršanai ir aprakstīti (Sang-Bin & Habetler, 2001). Bez statora tinumu pretestības R_s un pretestības R_{ext} , ķēdē ir barošanas avota, drošinātāja, automātslēdža un kabeļa pretestības. Barošanas avota pretestību var neievērot, tad drošinātāja, automātslēdža un kabeļa pretestību radīto kļūdu var kompensēt mērot spriegumu starp punktiem a' un a (2.15. attēls), tad R_s nosaka pēc sekojošas formulas (Sang-Bin & Habetler, 2001):

$$R_s = -\frac{U_{sw,dc} - 3 \cdot U_{a'a,dc}}{3 \cdot I_{as,dc}}, \quad (2.22)$$

kur $U_{a'a,dc}$ – starp barošanas avota un statora sprieguma līdzstrāvas komponente, V.

Mākslīgā neironu tīkla izmantošana asinhronā elektrodzinēja statora un rotora pretestības noteikšanai tika analizēta darbos (Cabrera et al., 1997; Campbell et al., 2000; Woo-yong et al., 2001; Karanayil et al. 2003; Karanayil et al., 2007; Reza & Mekhilef, 2013). Šī metode

galvenokārt tiek lietota attālinātai (bez sensoru izmantošanas) elektrodzinēju vektora kontrolei, bet var arī būt izmantota statora un rotora pretestības noteikšanai aizsardzības nolūkiem. Viens no neironu tīkla piemēriem ir parādīts 2.17. attēlā (Campbell et al., 2000). Tīklam ir trīs ieejas – strāva, rotācijas frekvence un statora pretestība R_s . Tīkls tiek trenēts pie dažādām frekvencēm un slodzēm. Pēc tīkla “trenēšanas”, statora tinumu pretestības noteikšanas precizitāte ir 4% (Du et al., 2008). Izmantošanai elektrodzinēja aizsardzības nolūkā tīklu jātrenē pie apstākļiem, kuri izraisa elektrodzinēju avārijas režīmus.



2.17. att. Blokshēma asinhronā elektrodzinēja statora tinumu pretestības noteikšanai ar neironu tīklu (Campbell et al., 2000)

Statora un rotora tinuma pretestības noteikšanas metodika ar asinhronā elektrodzinēja ekvivalento elektrisko shēmu ir aprakstīta vairākos pētījumos (Kerkman et al., 1996; Habetler et al., 1998; Mir et al., 1998; Lee & Krishan 1998; Beguenane & Benbouzid, 1999). Stacionārā procesā asinhrona elektrodzinēja rotora tinumu pretestība, kura nav atkarīga no statora tinumu pretestības, tiek aprēķināta pēc formulas (Campbell et al., 2000):

$$R_r = \sqrt{-(s\omega_s)^2 \cdot L_r \cdot \left[\frac{\omega_s L_m^2}{\frac{U_{qs}}{I_s} - \omega_s L_s} + L_r \right]}, \quad (2.23)$$

kur ω_s – barošanas tīkla leņķiskā frekvence, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;
 L_s un L_r – statora un rotora induktivitāte, H;
 L_m – mijinduktivitāte, H;
 U_{qs} – q-ass statora spriegums, V.

Statora pretestība stacionārā procesā (Campbell et al., 2000):

$$R_s = \frac{U_{ds}}{I_{ds}} - \frac{s \cdot \omega_s^2 \cdot L_m \cdot \psi_{ds}}{R_r \cdot I_{ds}}, \quad (2.24)$$

kur ψ_{dr} – d-ass rotora magnētiskās plūsmas saķēdējums, W;
 I_{ds} – d-ass statora strāva, A;
 U_{ds} – d-ass statora spriegums, V.

Rotora pretestības noteikšana pēc 2.23 formulas nodrošina augstu precizitāti, izņemot gadījumus pie nelielām slodzēm. Savukārt statora pretestības noteikšana pēc 2.24 formulas, ir jutīga pret rotora pretestības, magnētiskās plūsmas un citu parametru noteikšanas kļūdām, īpaši L_m . Tā kā R_s noteikšana pēc sakarības 2.24 var būt neprecīza, tad R_s iespējams noteikt pēc 1.7. formulas (Kubota et al, 1993):

$$k_r = \frac{R_s}{R_r} = \frac{R_{sn}}{R_{rn}}$$

Apskatot asinhrono elektrodzinēja temperatūras noteikšanas metodes, tika veikts katras metodes salīdzinājums. Rezultāti apkopoti 2.2. tabulā.

2.2.tabula

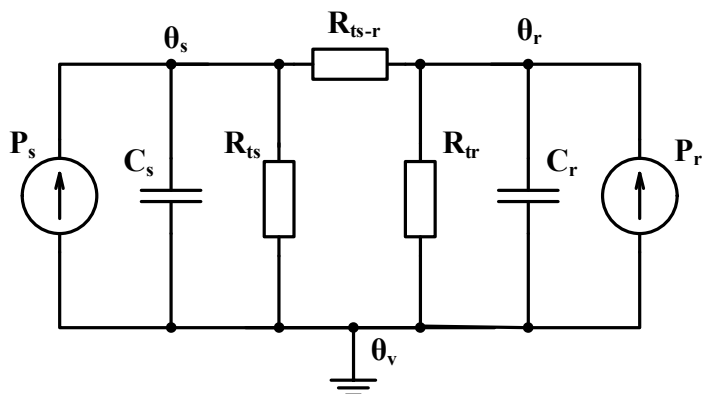
Asinhrono elektrodzinēju temperatūras noteikšanas metodes salīdzinājums

Metode	Priekšrocības	Trūkumi
Pirmās kārtas silšanas modelis	- nepieciešams mērīt tikai strāvu - pietiekoši laba noteikšanas temperatūras precizitāte - vienkāršs	- nav jutīgs pret elektrodzinēja dzesēšanas traucējumiem - nepieciešams zināt vai noteikt elektrodzinēja silšanas parametrus - var notikt pirmslaicīga aizsardzības ierīces nostrāde
Augstākas kārtas silšanas modelis	- precīza temperatūras noteikšana	- sarežģīts - nepieciešams zināt elektrodzinēja izmērus un konstrukcijas materiālus - dažus parametrus var tikai noteikt silšanas eksperimentos
Līdzstrāvas signālu injicēšana	- nav nepieciešams zināt elektrodzinēja parametrus - jutīgs pret elektrodzinēja dzesēšanas traucējumiem	- nepieciešams līdzstrāvas injicēšanas aparāts - nepieciešama kabeļu pretestības kļūdu kompensācija - rada zudumus un rotācijas momenta pulsācijas - nepieciešams mērīt gan strāvu, gan spriegumu
Neironu tīkls	- nav nepieciešams zināt elektrodzinēja parametrus - nepieciešams mērīt strāvu un rotācijas frekvenci	- nepieciešams “iemācīt” neironu tīklu
Elektrodzinēja elektriskais modelis	- jutīgs pret elektrodzinēja dzesēšanas traucējumiem - pietiekoši laba noteikšanas temperatūras precizitāte	- nepieciešams mērīt katras fāzes strāvas un spriegumus - statora pretestības noteikšana ir jutīga pret citu parametru noteikšanas kļūdām

Silšanas modeļi nodrošina labu temperatūras noteikšanas precizitāti un ļauj prognozēt elektrodzinēja temperatūru, bet nespēj reaģēt uz termisko parametru izmaiņām dzesēšanas traucējumu gadījumos. Līdzstrāvas signālu injicēšanai vajadzīga papildus iekārta, kuru pieslēdz spēka ķēdē starp elektrodzinēju un barošanas avotu. Kabeļu pretestības kļūdas kompensācijai nepieciešams papildus mērīt spriegumu starp vienas fāzes barošanas avota un elektrodzinēja spailēm, kas varbūt tehniski sarežģīts process, ja kabeļu garums ir pietiekoši liels. Neironu tīklus jātrenē arī zem avārijas režīmu apstākļiem, ko ne vienmēr ir iespējams izdarīt.

Elektrodzinēja rotora pretestības noteikšana pēc asinhronā elektrodzinēja ekvivalentās shēmas ir pietiekoši precīza, bet pie stacionārā režīma. Lai silšanas modelis varētu noteikt temperatūras izmaiņas dzesēšanas traucējumu gadījumos, ir nepieciešams modelī ievietot vēl vienu ieejas signālu, kas reaģētu uz siltuma atdeves izmaiņu. Kā jau minēts (Nestler & Sattler, 1993) darbā tika piedāvāts mērīt elektrodzinēja viegli pieejamas daļas temperatūru (piemēram, korpusa) un atbilstoši temperatūras izmaiņām pārrēķināt termisko pretestību R_{tv} (attēls 2.13. a). Mazas jaudas elektrodzinēju aizsardzībai, temperatūras sensoru izmantošana to aizsardzībai nav ekonomiski izdevīga. Gao savā darbā (Gao, 2006) izmanto 2.14. b attēlā parādīto silšanas

modeli ar nosacījumu, ka pie nominālās slodzes $\sim 65\%$ no rotora elektriskiem zudumiem pāriet uz statoru. Tad silšanas modelis vienkāršojas, un pretestības R_{tr} vietā tiek izmatots strāvas avots (2.18. attēls).



2.18. att. Asinhronā elektrodzinēja vienkāršotais otrās kārtas silšanas modelis
(Gao, 2006)

Turpmāk Gao, izmantojot asinhronā elektrodzinēja ekvivalento elektrisko shēmu un vienādojumu 2.23., noteica rotora pretestību R_r . Tad statora temperatūra tiek noteikta pēc silšanas modeļa un pēc R_r . Ja šīs abas temperatūras nesakrīt, tad silšanas modeļa parametri C_s un R_{ts} tiek pārrēķināti, lai silšanas modeļa modelētā statora temperatūra sakristu ar R_r noteikto statora temperatūru. Gao darbā aprakstīta asinhronā elektrodzinēja statora tinuma noteikšanas metodika ir sarežģīta priekš mazas jaudas elektrodzinēja pētīšanas. Galvenais šīs metodes trūkums ir nepieciešamība izmantot trīs strāvas un sprieguma sensorus, lai pēc ekvivalentās shēmas noteiktu R_r . Līdz ar to ir nepieciešams izstrādāt vienkāršotu un ekonomiski izdevīgāku asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras noteikšanas metodi, kuru var izmantot elektrodzinēju aizsardzībai pret pārkāršanu arī dzesēšanas traucējumu gadījumos.

Dažas asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas metodes izmanto rotora pretestības R_r izmaiņas. Asinhronā elektrodzinēja rotācijas frekvence (arī slīde) ir atkarīga no R_r izmaiņām, (skat. 2.23. vienādojumā). Pie nemainīgas slodzes asinhronā dzinēja rotors uzsilst, palielinās R_r un samazinās ātrums, līdz ar to rotācijas frekvences izmaiņu nosaka elektrodzinēja silšana. Tāpēc nākamajā nodaļā tiek veikti eksperimentālie pētījumi, lai analizētu korelāciju starp statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņām, kā arī rotācijas frekvences mērīšanas pielietojuma iespējas statora temperatūras noteikšanai.

2.5. Nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Pēc asinhrono elektrodzinēju zudumu veidu analīzes tiek secināts, ka mazas jaudas elektrodzinējiem (līdz 4kW) pamatā zudumi sastāv no elektriskiem zudumiem, no kuriem lielāka daļa izdalās statora tinumos un vienkāršākai elektrodzinēju temperatūras noteikšanai var pieņemt, ka ir tikai elektriskie zudumi.
2. Pētot asinhrono elektrodzinēju siltumapmaiņas procesu, secināts, ka mazas jaudas asinhroniem elektrodzinējiem pie nominālās slodzes 65% no kopējiem siltuma zudumiem rotorā nonāk statora serdē. Atbilstoši šim faktam mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju silšanas analīzei elektrodzinēju apskata kā homogēnu ķermeni un silšanas procesu apraksta ar pirmās kārtas silšanas modeli. Šāda vienkārša modeļa izmantošana elektrodzinēju termiskās aizsardzības ierīcē var novest pie pirmslaicīgas aizsardzības ierīces nostrādes.
3. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanai izmanto vairākas metodes, bet šīm metodēm ir vairāki trūkumi - silšanas modeļi nespēj reaģēt uz termisko

parametru izmaiņām dzesēšanas traucējumu gadījumos. Līdzstrāvas signālu injicēšanas risinājumam vajadzīga papildus iekārta un kabeļu pretestības kļūdas kompensācija. Neirona tīkla risinājumam jāveic darbība arī pie avārijas režīmu apstākļiem, lai neironu tīkls iemācītu šos režīmus, ko ne vienmēr ir iespējams izdarīt. Visi apskatītie varianti nav ekonomiski vai/un sarežģītības dēļ izmantojami mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju statoru termiskai aizsardzībai darba apstākļos ar dzesēšanas traucējumiem vai vietās ar mainīgo ārējās vides temperatūru.

3. ASINHRONO ELEKTRODZINĒJU SILŠANAS EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Pirmajā nodaļā ražošanas pētījumos tika konstatēts, ka lielākā daļa no atteikušiem asinhronajiem elektrodzinējiem ir ventilatoru piedziņas elektrodzinēji ar jaudu 1.1 kW, un kā galvenais atteices cēlonis ir elektrodzinēja tinumu pārkāršana, dzesēšanas traucējumu dēļ. Otrajā nodaļā veiktā asinhrono elektrodzinēju statora tinumu noteikšanas metožu analīze rāda, ka lielākai daļai no metodēm ir vajadzīgi vairāki sensori, kas, savukārt, mazas jaudas asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai nav ekonomiski pamatots risinājums. Analīzes gaitā tika konstatēta korelācija starp asinhrono elektrodzinēja statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņām. Statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences korelācijas un statora tinumu temperatūras noteikšanas iespēju izpētei, ņemot vērā rotācijas frekvenci, nepieciešams veikt eksperimentālos pētījumus. Eksperimentālo pētījumu veikšanai atbilstoši apstākļi un elektrodzinēju parametri bija pieejami SIA "Balticovo", un pētījumā tika izmantoti ventilatoru 1.1 kW asinhrono elektrodzinēji, izpētot to ekspluatācijas apstākļus, (detalizēti apskatīti šī darba pirmajā nodaļā).

Eksperimentālie asinhrono elektrodzinēju silšanas pētījumi tika veikti pie šādiem nosacījumiem:

1. nemainīgas slodzes režīms bez dzesēšanas traucējumiem. Pēc elektrodzinēja silšanas pārejas procesa beigām, pie nostabilizētās temperatūras, tika mākslīgi veidoti dzesēšanas traucējumi;
2. nemainīgas slodzes režīms ar dzesēšanas traucējumiem. Pēc elektrodzinēja silšanas pārejas procesa beigām, elektrodzinējs tika darbināts bez dzesēšanas traucējumiem;
3. elektrodzinēju silšana pie nosprūdušā rotora;
4. asinhrono elektrodzinēju darbība pie dažādām sprieguma vērtībām.

3.1. Eksperimentālo pētījumu metodika

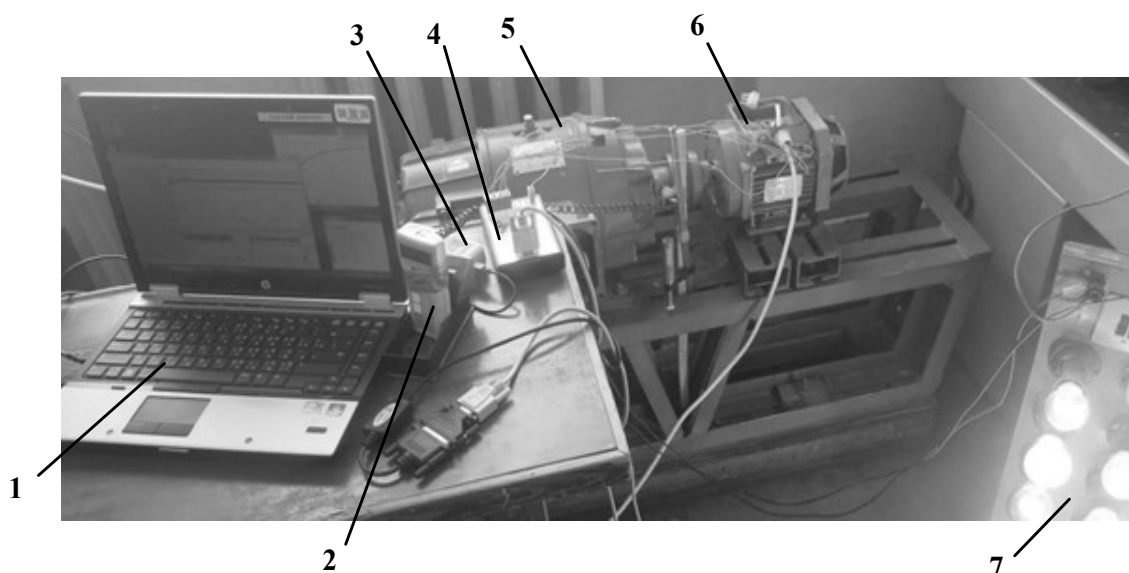
Silšanas procesu pētījumi tika veikti Latvijas Lauksaimniecības universitātes (LLU) Tehniskās fakultātes (TF) Enerģētikas institūta (EI) Elektriskās piedziņas laboratorijā, izmantojot elektrodzinēju pētniecības standu.

Pētniecības stands ir parādīts 3.1. attēlā un tā elektriskā shēma 3.2. attēlā. Stands sastāv no asinhronā elektrodzinēja, līdzstrāvas ģeneratora, lampu reostata, temperatūras logera, tahometra, elektrisko parametru mērinstrumentiem, strāvas un sprieguma datu logera un datora.

Sākuma silšanas pētījumi pie dažādām slodzēm un nosprūdušā rotora tika veikti uz 4A sērijas asinhronā elektrodzinēja. 4A sērijas elektrodzinēju vairs neražo kopš 1970-to gadu beigām, bet 1. nodaļā tika parādīts, ka uzņēmumi vēl joprojām izmanto elektrodzinējus, kuri ir 40 – 50 gadus veci. Tāpēc ir svarīgi saprast, kā dzesēšanas traucējumi iespaido iepriekšējās paaudzes elektrodzinēju silšanas pakāpi.

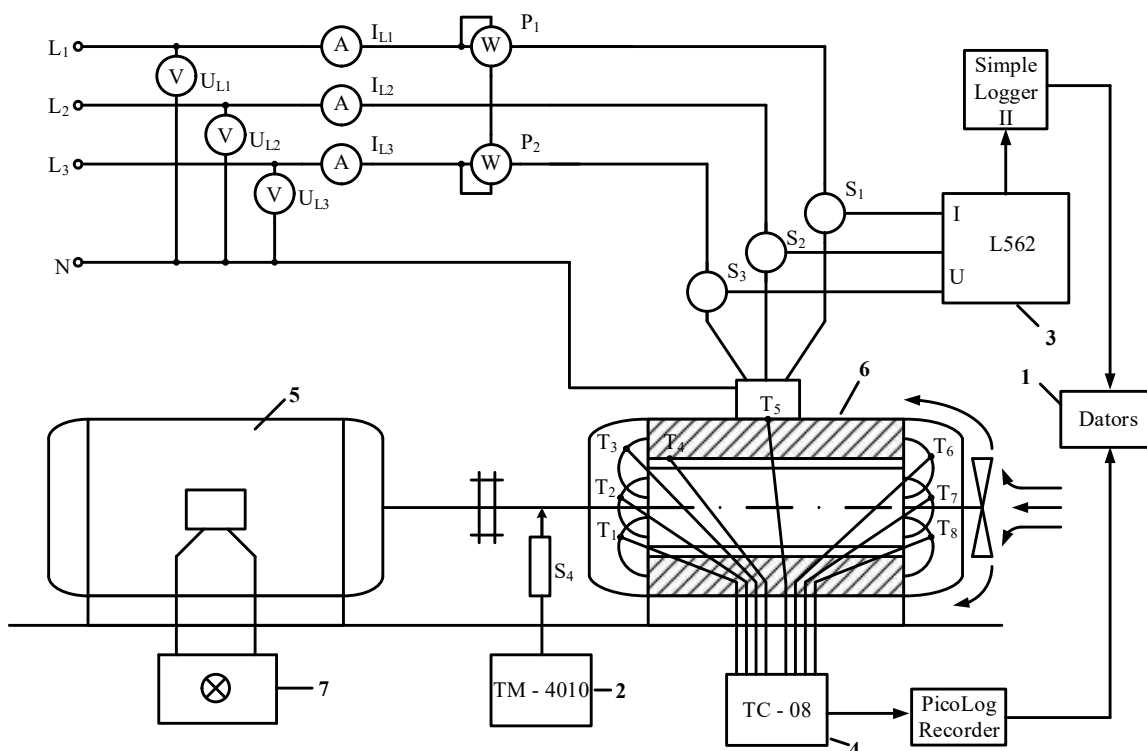
Pēc pētījumiem ražotnē SIA "Balticovo" tika veikti laboratorijas eksperimenti, izmantojot ABB asinhrono elektrodzinēju, kurš uzņēmumā tika izmantots ventilatora piedziņai vistu kūtīs.

4A sērijas trīsfāžu asinhronā elektrodzinēja dati – sērijas numurs 4AX80A4Y3; 220/380 V; 4.9/2.8 A; IP44; termiskās izolācija klase [B], $m = 14.5$ kg; $P = 1.1$ kW; $n = 1400$ min⁻¹; $s = 0.067$; $\eta = 0.75$; $\cos\phi = 0.81$. ABB trīsfāžu asinhronā elektrodzinēja dati – M2AA90S – 4; 220 – 240/380 – 420 V; 4.6/2.66 A; IP55; izolācija klase - F, $m = 13$ kg; $P = 1.1$ kW; $n = 1410$ min⁻¹; $s = 0.06$; lietderības koeficienta klase - IE1; $\cos\phi = 0.81$. Asinhronā elektrodzinēja slogošanai tika izmantots līdzstrāvas ģenerators – P-22Y4, 220 V, 5.9 A, $P = 1$ kW, $n = 1500$ min⁻¹. Slodzes regulēšanai, ģeneratoram tika pieslēgts lampu reostats.



3.1. att. Asinhronā elektrodzinēja silšanas pētījumu stends:

1 – dators; 2 – Line Seiki TM – 4010 tahometrs; 3 – strāvas un sprieguma Simple Logger L562 logeris; 4 – temperatūras Pico TC – 08 logeris; 5 – līdzstrāvas ģenerators; 6 – asinhronais elektrodzinējs; 7 – lampu reostats



3.2. att. Asinhronā elektrodzinēja silšanas pētījumu stenda elektriskā shēma:

1 – līdzstrāvas ģenerators; 2 – lampu reostats; 3 – Line Seiki TM – 4010 tahometrs; 4 – temperatūras Pico TC – 08 logeris; 5 – asinhronais elektrodzinējs; 6 – strāvas un sprieguma Simple Logger L562 logeris

Elektrodzinēju slodzes raksturošanai tika izmantots slodzes koeficients:

$$k = \frac{I_s}{I_{sn}}, \quad (3.1)$$

kur k – slodzes koeficients, ņemot vērā strāvu;
 I_{sn} – statora nominālā strāva, A.

Eksperimenti tika veikti tukšgaitas režīmā, pie nepilnās slodzes ($k = 0.76$ un 0.91), nominālās slodzes ($k = 1$), pārslodzes ($k = 1.18$) un nosprūdušā rotora režīmā. Mazās jaudas tukšgaitas strāva ir apmēram 60% no nominālās strāvas, tāpēc mazāko slodzi par $k = 0.76$ nevar dabūt. Ja elektrodzinēja pārslodze ir lielāka par 20%, tad aizsardzības iekārtas ātri atslēdz elektrodzinēju un veikt eksperimentus virs slodzes $k = 1.18$ nav praktiskās nozīmes. ABB elektrodzinēja gadījumā sākumā elektrodzinējs tika darbināts ar nominālo slodzi un normāliem apstākļiem, kad elektrodzinēja temperatūra sasniedza nostabilizēto temperatūru, tika pārtraukta viena fāze un rotors tika nosprūdināts.

Lai imitētu dzesēšanas traucējumus, tika izmantotas divas metodes. Pirmajā metodē tika noņemts ventilators, lai imitētu gadījumus, kad tika sabojāts ventilators vai to lāpstiņas. Otrajā metodē tika bloķēti ventilatora vāka caurumi, lai radītu situāciju līdzīgu kā parādīts 1.25. a attēlā, lai bloķētu dzesēšanas gaisa plūsmu. Eksperimenti ar dzesēšanas traucējumiem tika veikti divos variantos. Pirmajā variantā elektrodzinējs tika palaists pie normāliem apstākļiem un pie nostabilizētās temperatūras tika bloķēta dzesēšanas gaisa plūsma, otrajā variantā – otrādi.

Asinhronie elektrodzinēji tika slēgti zvaigznes slēgumā un pieslēgti pie trīsfāžu barošanas tīkla ar līnijas spriegumu 400 V. Trīsfāžu elektrisko lielumu mērīšanai un kontrolei tika izmantoti ampēmetri, voltmetri, vatmetri. Rotācijas ātruma, temperatūras, vienas līnijas strāvas un līnijas sprieguma mērīšanai tika izmantoti datu logeri (3.3. attēls).



3.3. att. Asinhrono elektrodzinēju silšanas eksperimentos mērījumu datu logeri:

1 – temperatūras Pico TC – 08 datu logeris; 2 – Simple Logger II L562 datu logeris; 3 – strāvas knaibles un sprieguma spaiļes; 4 – Line Seiki TM – 4010 tahometrs

Strāvas un sprieguma mērīšanai tika izmantots divu kanālu datu logeris Simple Logger L562. Strāvas mērīšanai tika izmantotas strāvas knaibles - 3XTA011AC un spriegumam divas spaiļes (3.3. attēls). Mērīšanas precizitāte – strāva $\pm 0.5\%$ no mērījuma +1 mV, spriegums $\pm 0.5\%$ no mērījuma +1 V. Datu logera iestatīšanai un mērījumu ierakstīšanai tika izmantota programma Simple Logger II, ar programmas DataView palīdzību mērījumi tika eksportēti uz Excel programmu.

Uz asinhronā elektrodzinēja vārpstas tika uzlīmēta atstarojošā lente un ar optisko sensoru, kas tika pieslēgts pie tahometra Line Seiki TM – 4010, tika mērīta elektrodzinēja rotācijas frekvence. Mērīšanas precizitāte – $\pm 0.01\%$ no mērījuma +0.1 min⁻¹.

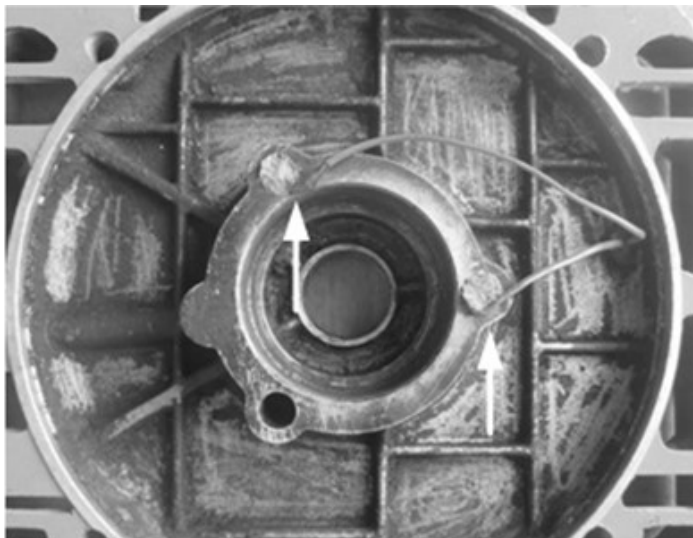
Elektrodzinēju korpusa un statora tinumu temperatūras mērīšanai tika izmantoti K-tipa termopāri BK – 50 ($\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, pie temperatūras robežas no -40 līdz 375 $^{\circ}\text{C}$). Elektrodzinēja korpusa temperatūra tika mērīta pieslēgšanas kārbā, lai temperatūras mērījumus neietekmētu dzesēšanas gaisa plūsma. Silšanas pētījumos ar 4A elektrodzinēju statora tinumu galu

temperatūra tika mērīta katrā fāzē (L_1, L_2, L_3) ar termopāriem T_1, T_2, T_3 darba vārpstas pusē un ventilatora pusē – ar T_6, T_7, T_8 (3.2. attēls). Lai ievietotu termopārus ventilatoru pusē, tika izurbts caurums elektrodzinēja vākā.

ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas pētījumos divi termopāri tika ievietoti statora rievās, viens termopāris pie korpusa pieslēgšanas kārbā un pieci termopāri tika ievietoti piedziņas pusē statora tinumos (3.4. a attēls). Papildus tika mērīta gultņu sēžas temperatūra elektrodzinēja ventilatora pusē. Divi termopāri tika izvietoti gultņu sēžā kā parādīts 3.4. b attēlā.



a

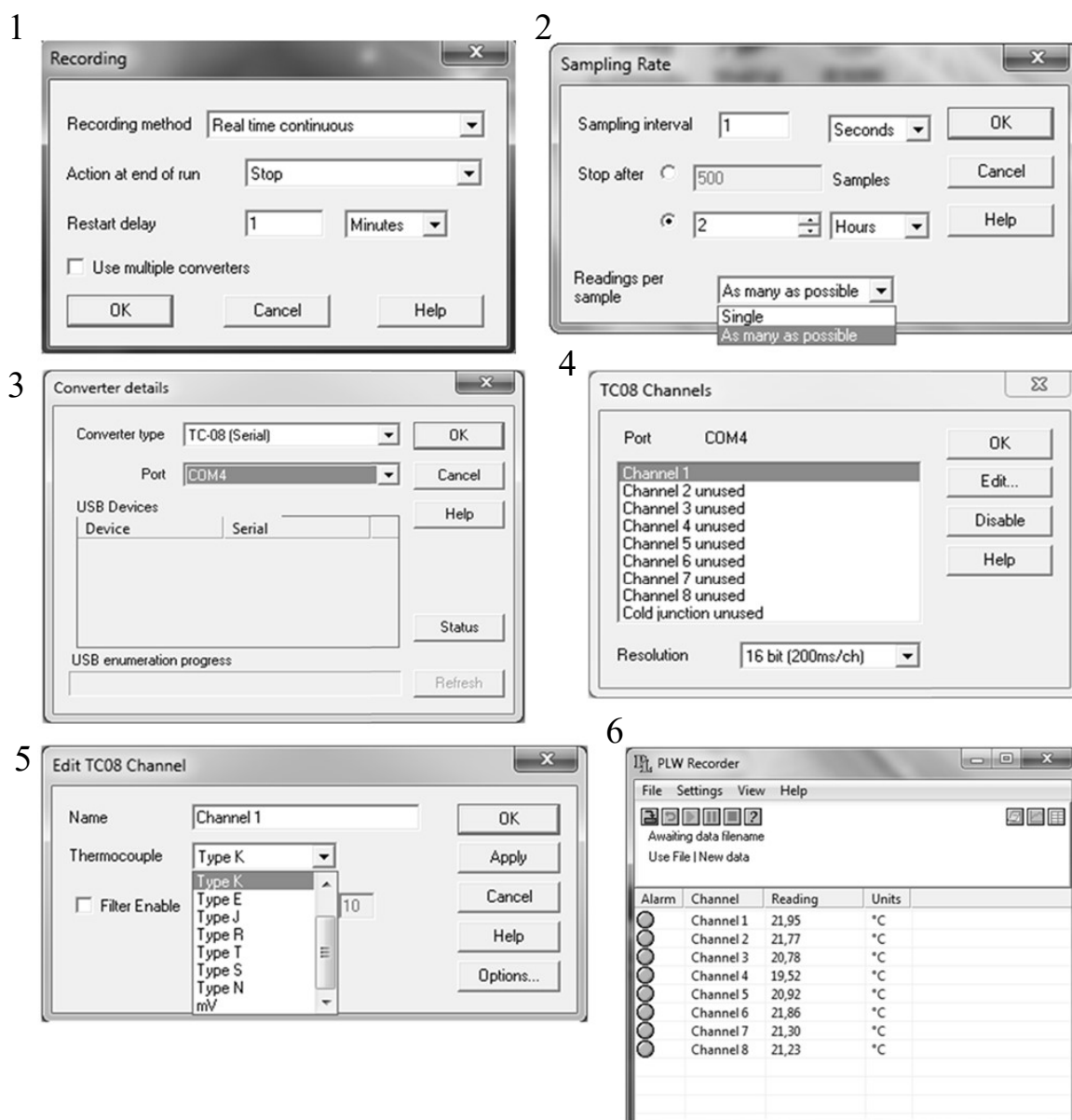


b

3.4. att. Termopāru izvietojums ABB elektrodzinējā:

a – termopāru izvietojums statora tinumos; b – termopāru izvietojums

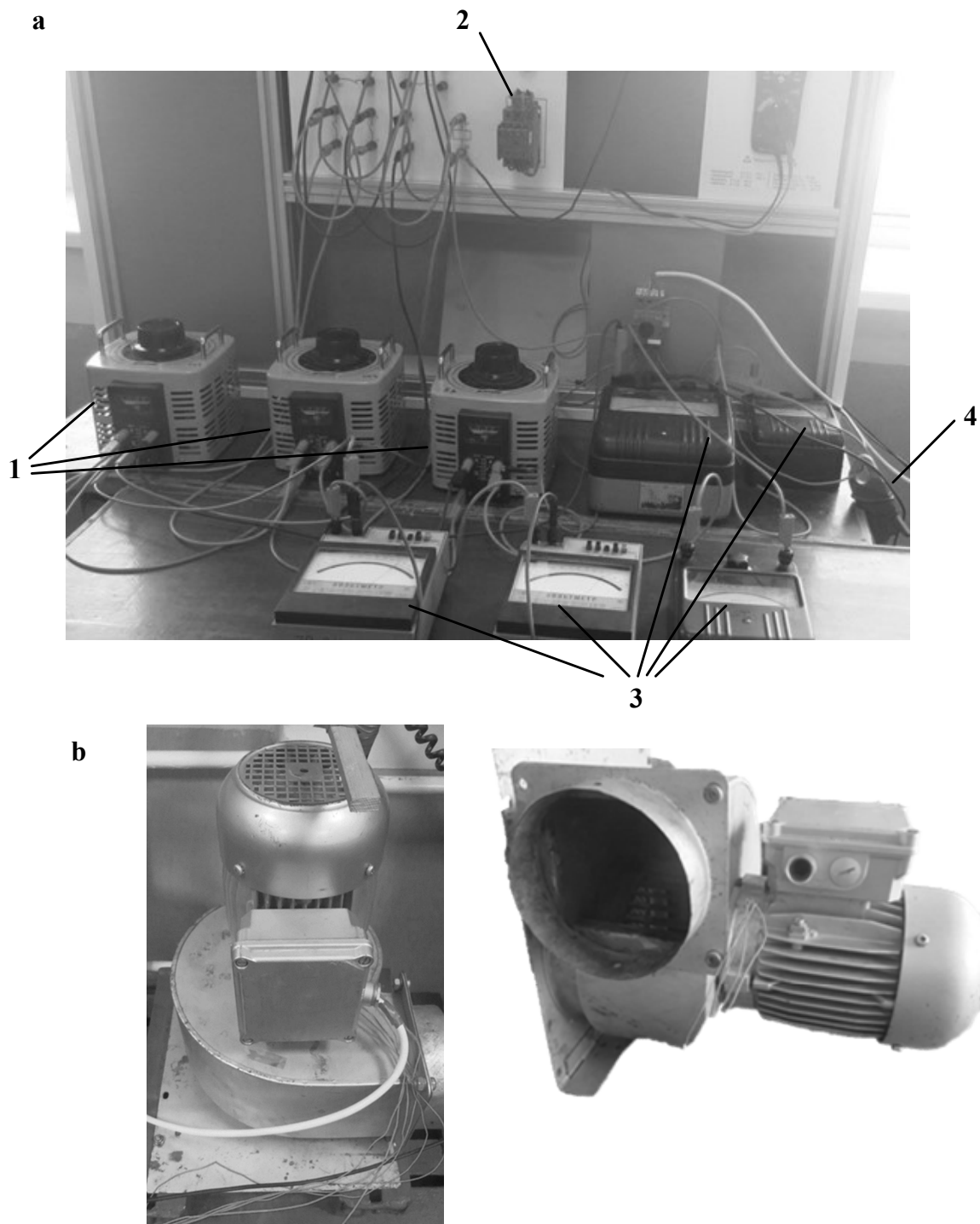
Termopāri tika pievienoti pie datu logera Pico TC – 08, ar iebūvēto apkārtējās vides temperatūras kompensāciju. TC – 08 datu logera precizitāte ir $\pm 0.3 \%$ un $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Datu logeris tika pieslēgts pie datora izmantojot kabeli ar Serial-to-USB pārveidotāju. TC – 08 datu logera iestatīšanai un temperatūras mērījumu ierakstīšanai tika lietota datorprogramma PicoLog Recorder. TC – 08 datu logera iestatīšanas secība ir parādītā 3.5. attēlā. Ierakstītos mērījumus var saglabāt skaitliskā formātā, un pēc tam mērījumus var pārkopēt datu apstrādes programmās.



3.5. att. TC - 08 datu loggeru iestatīšanas secība:

1 – ierakstīšanas parametru izvēle; 2 – mērījuma periodiskuma izvēle; 3 – pārveidotāja un komunikācijas porta izvēle; 4 – datu logera kanālu konfigurēšana; 5 – termopāra tipa izvēle; 6 – logs pēc visu parametru iestatīšanas

Lai analizētu sprieguma izmaiņu iespaidu uz ventilatora darbību, tika izveidots eksperimentālais stends, kas parādīts 3.6. attēlā. Sprieguma regulēšanai tika izmantoti trīs vienfāzīgie autotransformatori – JERDIN TDGC2, S = 2 kVA, 8A, ieejas spriegums – 220 V, izejas spriegums 0-250V. Tā kā laboratorijas nominālais līnijas spriegums ir 400 V, tad autotransformatorā varēja iegūt izejas spriegumu līdz 260 V. Ventilatora dati – Karl Klein; DNG6 – 35; max 37 m³·min⁻¹; max 860 Pa. Ventilatoru darbina trīsfāzīgais asinhronais elektrodzinējs – EMOD EEDF 801/2, 220/380 V; 4.3/2.5 A; IP54; izolācija klase - B; P = 1.1 kW; n = 2840 min⁻¹; cosφ = 0.81. Statora tinumu mērīšanai piedziņas puses vākam tika izurbts caurums. Pieci termopāri tika ievietoti statora tinumu galos piedziņas pusē un viens termopāris elektrodzinēja pieslēgšanas kārbā. Eksperimenti tika veikti pie sekojošām sprieguma vērtībām – 220 V, 230 V, 240 V, un 245 V un 260 V.



3.6. att. Pētījumu stends ventilatora darbības analīzei pie dažādiem spriegumiem:
a – vadības un mērīšanas iekārtas; b – ventilators; 1 – autotransformatori; 2 – elektromagnētiskais palaidējs;
3 – mērinstrumenti; 4 – strāvas kņables

3.2. Asinhrono elektrodzinēju silšanas pētījumu rezultātu analīze

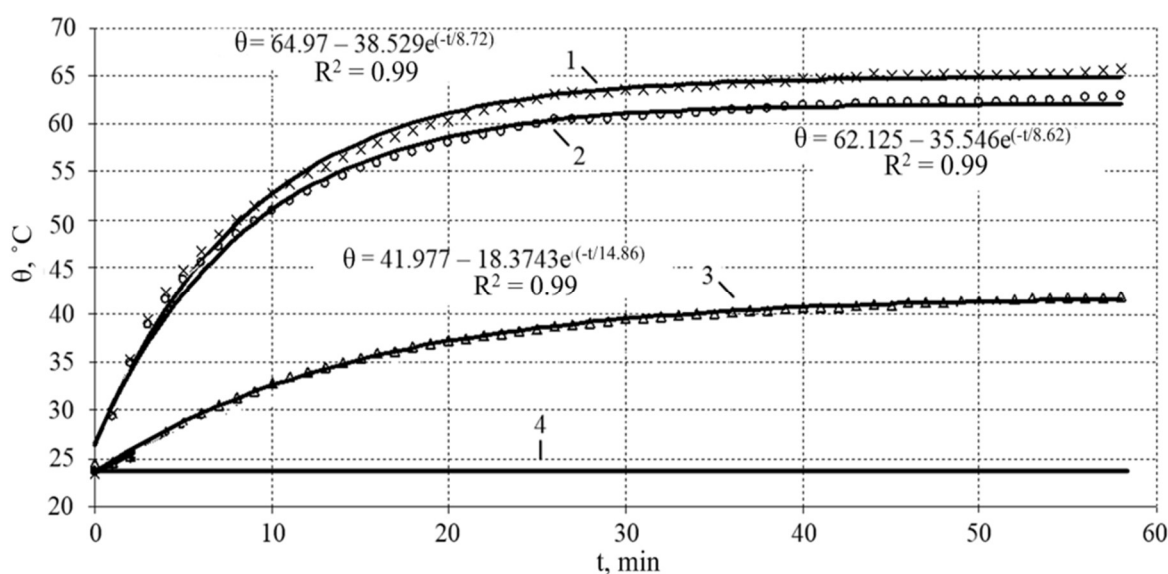
Eksperimentālie pētījumi tika atkārtoti 5 reizes pie katras slodzes un rezultātos parādīti eksperimentu vidējie mērījumi.

Eksperimentālo rezultātu nelineārās regresijas analīzei tika izmantota 2.18. formula, kas apraksta silšanas procesu:

$$\theta(t) = \Delta\theta(1 - e^{-t/T}) + \theta_0$$

Silšanas eksperimenti ar 4A sērijas elektrodzinēju iepriekš jau tika veikti pie slodzes $k = 0.95$ un $k = 1.14$ (Gedzurs, 2013) un rezultāti rāda, ka pie slodzes $k = 0.95$ statora tinumu nostabilizētā temperatūra ir $86\text{ }^{\circ}\text{C}$ un pie slodzes $k = 1.14$ $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tāpēc, lai analizētu dzesēšanas traucējumu iespaidu uz 4A sērijas asinhrono elektrodzinēju, eksperimenti tika veikti tukšgaitas režīmā.

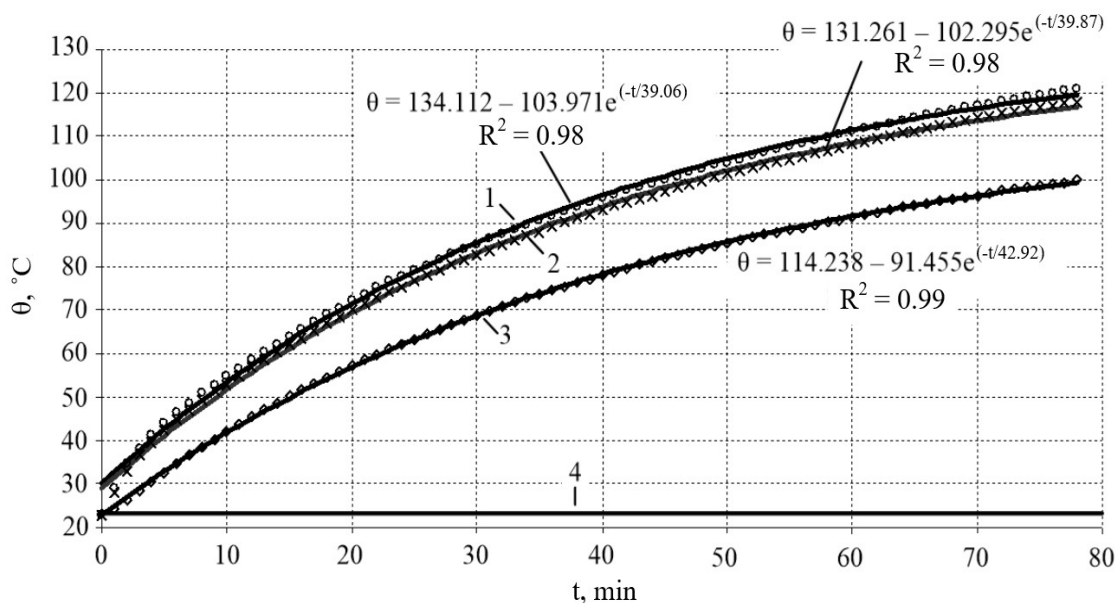
Silšanas eksperimenta rezultāti 4A asinhronajam elektrodzinējam tukšgaitas režīmā bez dzesēšanas traucējumiem ir parādīti 3.7. attēlā (attēlā parādīti arī katru silšanu raksturojošie silšanas dinamikas vienādojumi un to atbilstību eksperimentālajiem datiem raksturojošie determinācijas koeficienti). Statora gala tinumu temperatūra piedziņas pusē $\theta = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$, bet korpusa temperatūra $42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Statora tinumu temperatūra serdes rievās ir tikai $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ mazāka nekā statora gala tinumu temperatūra.



3.7. att. 4A asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti tukšgaitas režīmā bez dzesēšanas traucējumiem:

1 – statora gala tinumu temperatūra; 2 – statora tinumu temperatūra serdes rievās; 3 – korpusa temperatūra; 4 – apkārtējās vides temperatūra

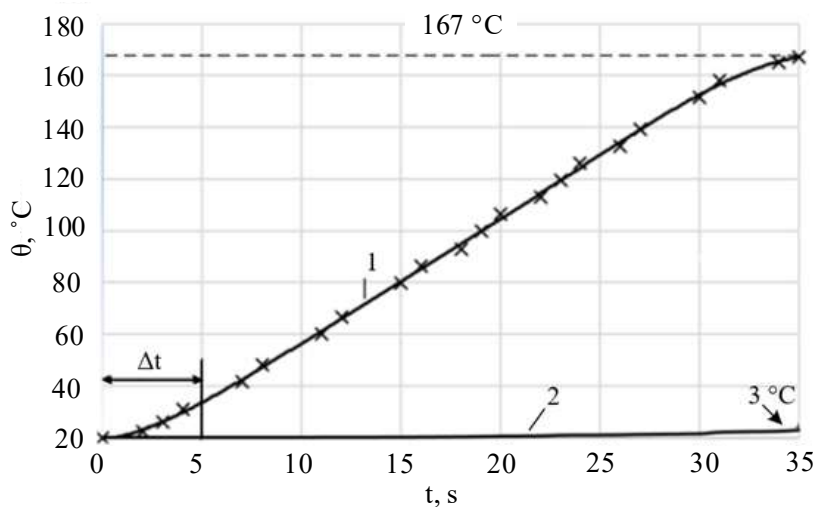
Silšanas eksperimenta rezultātā 4A asinhronajam elektrodzinējam tukšgaitas režīmā ar dzesēšanas traucējumiem (nedarbojas ventilators), statora gala tinumu temperatūra piedziņas pusē pieauga līdz $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ un pēc tam dzinējs tika atslēgts, jo tika sasniegta izolācijas B klases ilgstoši pieļaujamā temperatūra (3.8. attēls). Attēlā parādīti arī katru silšanu raksturojošie silšanas dinamikas vienādojumi un to atbilstību eksperimentālajiem datiem raksturojošie determinācijas koeficienti. Pēc regresijas vienādojuma analīzes var redzēt, ka nostabilizētā statora tinumu temperatūra ir virs $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Var secināt, ka 4A elektrodzinēju statora tinumu temperatūra pie būtiskiem dzesēšanas traucējumiem (ventilatoru lāpstiņu bojājumi, bloķēta gaisa plūsma) zem slodzes var būtiski pārsniegt izolācijas klases pieļaujamo temperatūru, un elektrodzinējs tiks bojāts. Korpusa temperatūra sasniedz $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ un, ja cilvēks pieskaras elektrodzinēja korpusam, tas var dabūt traumu.



3.8. att. 4A asinhronā elektrodzinējā silšanas eksperimentu rezultāti tukšgaitās režīmā ar dzesēšanas traucējumiem:

1 – statora gala tinumu temperatūra; 2 – statora tinumu temperatūra serdes rievās; 3 – korpusa temperatūra; 4 – apkārtējās vides temperatūra

4A asinhrono elektrodzinēju silšana pie nosprūdušā rotora ir parādītā 3.9. attēlā. Pašā sākumā, laika posmā Δt , rodas mērīšanas kļūda temperatūras sensoru dēļ. Pēc tam apmēram 25 s statora tinumu temperatūra lineāri pieaug ar ātrumu $\sim 4.6 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ un korpusa temperatūra nemainās. Tālāk statora tinumu augšanas ātrums samazinās un korpusa temperatūra sāk pieaugt.



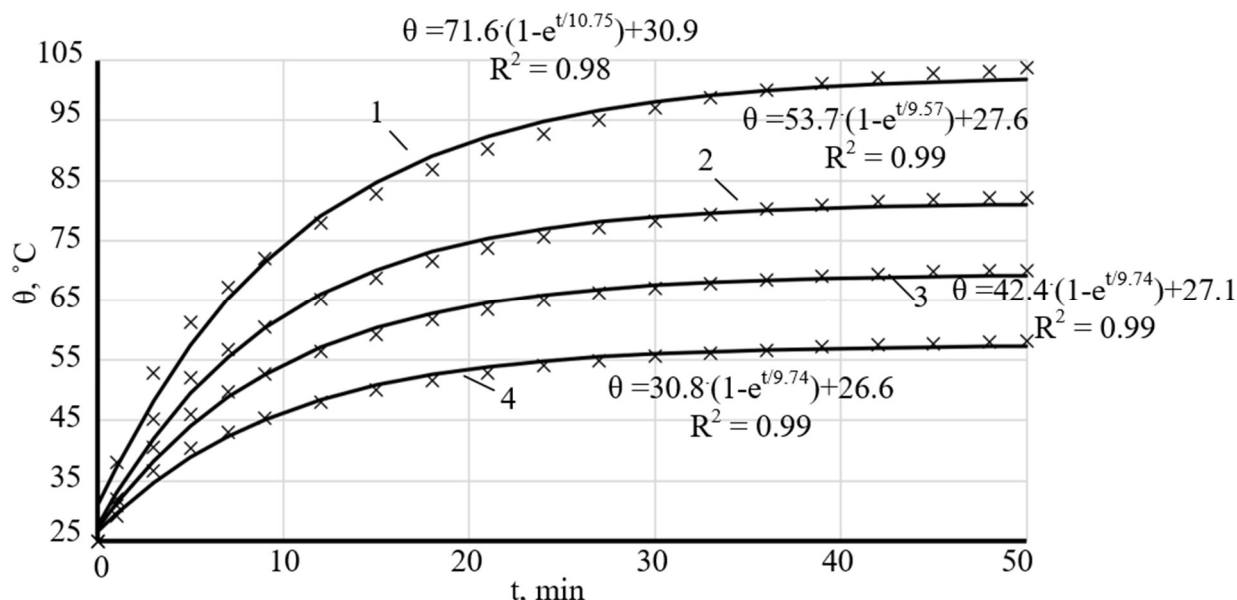
3.9. att. 4A asinhronā elektrodzinējā silšanas eksperimentu rezultāti tukšgaitās režīmā:

1 – statora gala tinumu temperatūra; 2 – korpusa temperatūra

Rezultāti rāda, ka pie nosprūdušā rotora 4A asinhrono elektrodzinēju statora tinumu silšanas process līdz izolācijas klases pieļaujamai temperatūrai ir adiabatisks un temperatūra var ļoti ātri sasniegt kritisko temperatūru, ja rotora nosprūšana notiek elektrodzinēja darba laikā.

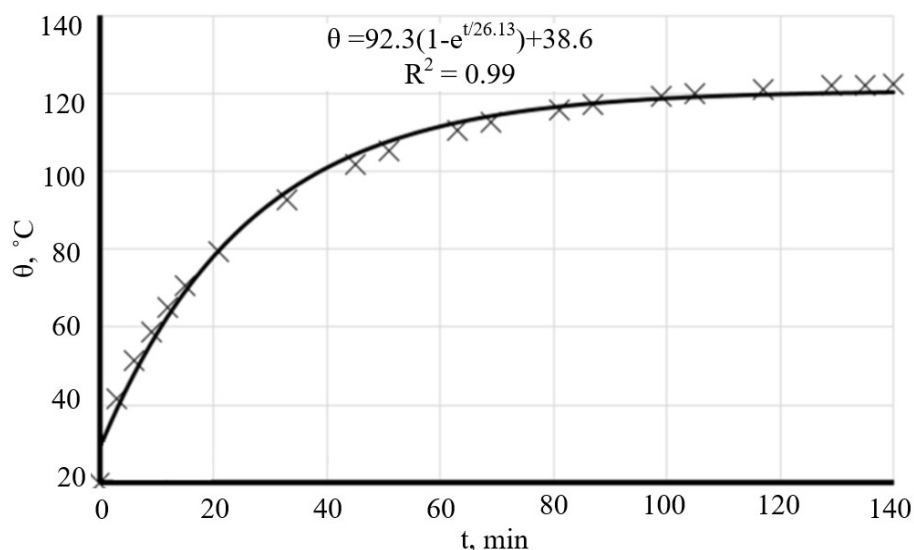
ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas pētījumu rezultāti ir parādīti 3.10. attēlā. Nostabilizētā statora tinumu temperatūra pie pārslodzes $k = 1.18$ ir $103 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sasniedzot tinumu temperatūru $103 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pie apkārtējās vides temperatūras $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Statora virsmas temperatūra pie nominālās slodzes $k = 1$ ir $82 \text{ }^{\circ}\text{C}$, pie $k = 0.91$ – $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ un pie $k = 0.76$ – $57.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 4A sērijas 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūra ir par $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lielāka nekā ABB 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja tinumu temperatūra. ABB elektrodzinējam ir lielāks lietderības koeficients (mazāki zudumi) un labāka konstrukcija, kas uzlabo siltuma atdevi. ABB

elektrodzinēja statora tinumu temperatūra ar dzesēšanas traucējumiem (bloķēta ventilatora vāka gaisa ieplūdes vieta) ir 131.5 °C pie apkārtējās vides temperatūras 28.5 °C (3.11. attēls). Statora tinumu temperatūra pie nominālās slodzes ar dzesēšanas traucējumiem ir par 46.5 °C lielāka nekā pie normāliem apstākļiem. Statora tinumu temperatūra pie 18 % pārslodzes ($k = 1.18$) ir par 21 °C lielāka nekā pie nominālās slodzes. Tas liecina par to, ka asinhronā elektrodzinēja dzesēšanas traucējumi palielina elektrodzinēja temperatūru vairāk nekā nelielas pārslodzes (20 – 30 %). Pie nominālās slodzes ar dzesēšanas traucējumiem statora tinumu temperatūra var palielināties līdz vai pārsniegt tinumu izolācijas materiāla pieļaujamo temperatūru.

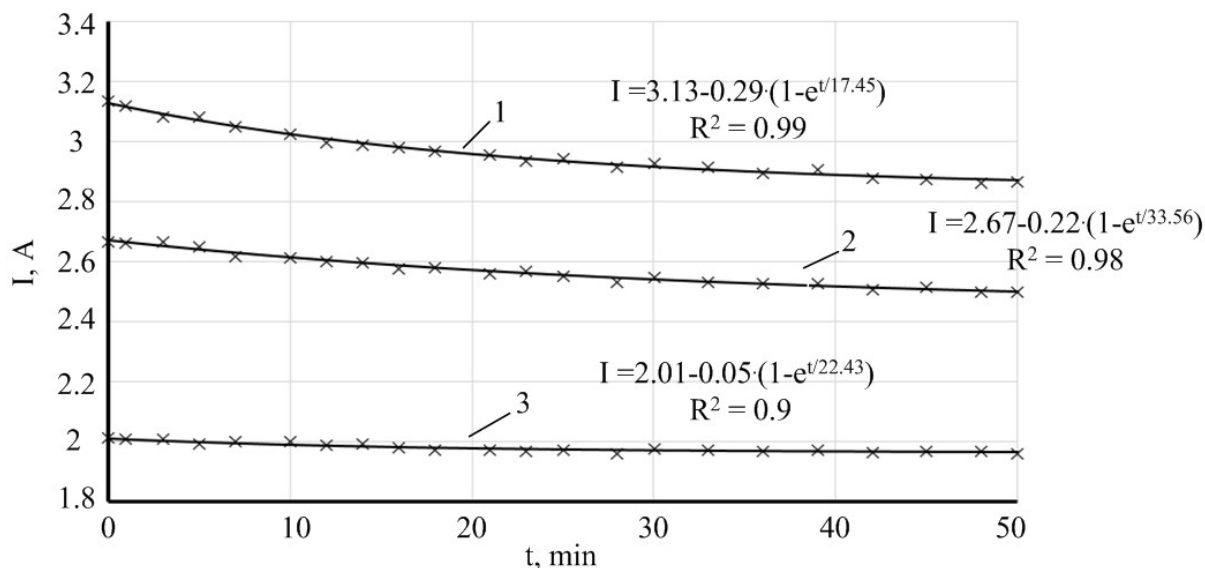


3.10. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti pie dažādām slodzēm bez dzesēšanas traucējumiem:

1 – statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 1.18$; 2 – statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 1$;
3 – statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 0.91$; 4 – statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 0.76$



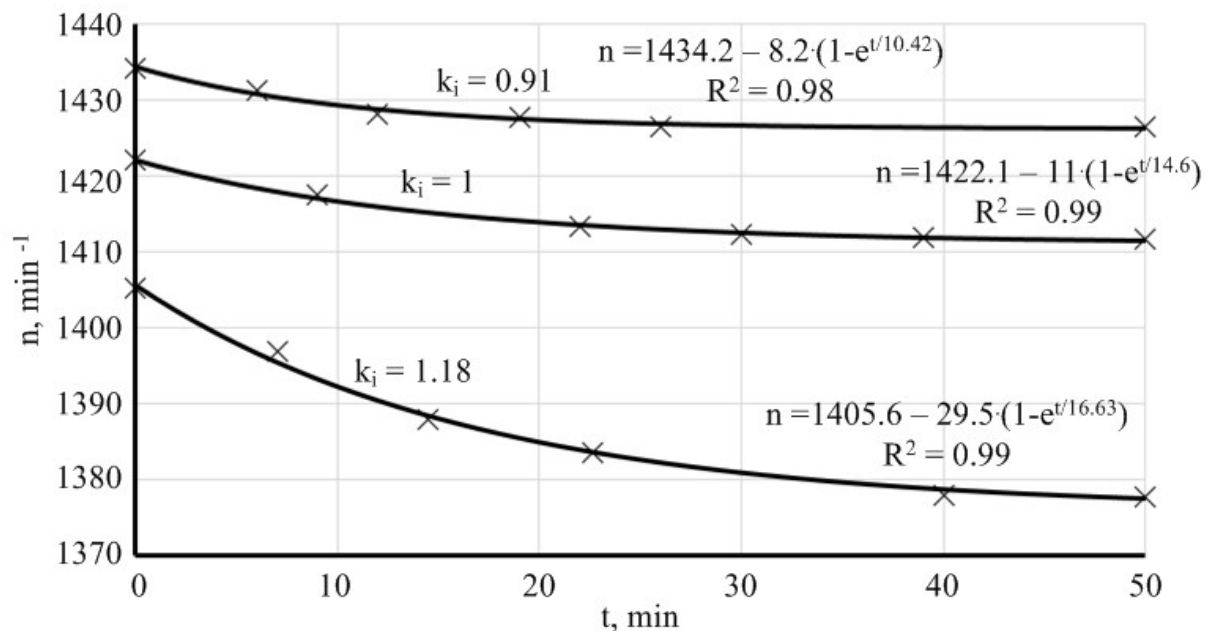
3.11. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti pie slodzes $k = 0.98$ ar dzesēšanas traucējumiem



3.12. att. Statora strāvas izmaiņa ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas pārejas procesā:

1 – statora strāva pie slodzes $k = 1.18$; 2 – statora strāva pie slodzes $k = 1$; 3 – statora strāva pie slodzes $k = 0.76$

Eksperimenti rāda, ka pie nemainīgas slodzes asinhrono elektrodzinēju silšanas procesu laikā statora strāva samazinās. ABB asinhrono elektrodzinēju strāva pie nominālas slodzes samazinās par 8 % un pie pārslodzes par 9.3 %. Regresijas analīze (3.12. attēls) parāda, ka strāvas izmaiņas notiek elektrodzinēju silšanas dēļ, jo silšanas laikā mainās elektrodzinēja elektriskie parametri.

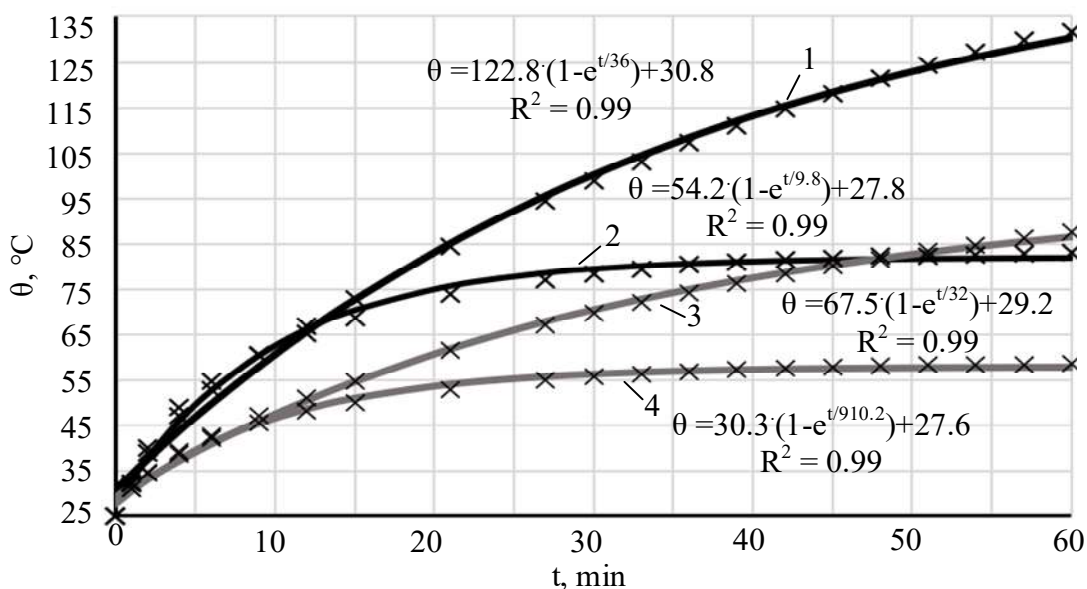


3.13. att. Rotācijas frekvences izmaiņa ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas pārejas procesā

ABB asinhronā elektrodzinēja rotācijas frekvences izmaiņa pie dažādām slodzēm ir parādītā 3.13. attēlā. Var redzēt, ka rotācijas frekvences izmaiņa ir lielāka, palielinoties elektrodzinēja slodzei. Palielinoties slodzei, strāva rotora tinumos pieaug, palielinās elektriskie zudumi, un palielinās rotora tinumu temperatūra. Līdz ar to palielinās arī rotora pretestība un rotora rotācijas frekvence samazinās. Determinācijas koeficients $R^2 = 0.99$ pie nominālas

slodzes un pārslodzes pierāda, ka rotācijas frekvences izmaiņas notiek silšanas dēļ, ja elektrodzinēja darba laikā ir nemainīga slodze. Samazinoties rotācijas frekvencei, samazinās arī elektrodzinēja lietderīgā (aktīvā) jauda, ko apliecina vatmetra rādījumi. ABB asinhronam elektrodzinējam pie nominālas slodzes, statora tinumu temperatūras 25 °C un rotācijas frekvences $1422 \pm 0.2 \text{ min}^{-1}$, patērētā aktīvā jauda $P = 1450 \pm 6 \text{ W}$, bet pie statora tinumu temperatūra 122 °C un rotācijas frekvences $1401.4 \pm 0.2 \text{ min}^{-1}$ tā ir $P = 1360 \pm 6 \text{ W}$. Tukšgaitas režīmā asinhrono elektrodzinēju rotora strāva praktiski ir 0 A, rotora tinumi nesilts, rotora aktīvā pretestība nemainās un līdz ar to arī rotācijas frekvence paliek nemainīga.

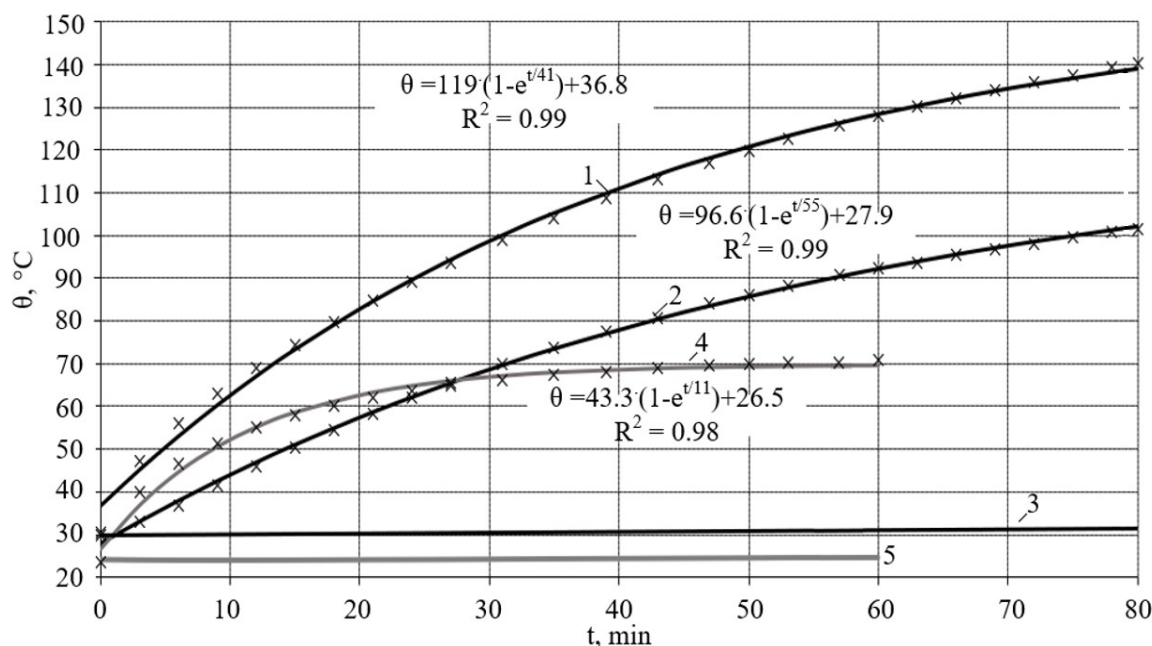
3.14. un 3.15. attēlā ir apskatīta ABB elektrodzinēja silšana, ja tiek noņemts ventilators. Pie nominālas slodzes statora tinumu virstemperatūra pieaug par 52 °C, kas ir par 5.5 °C vairāk nekā, ja tiek bloķēta tikai dzesēšanas gaisa plūsma. Nepieciešams atzīmēt, ka bez ventilatora nav zudumu, ko tas rada. Līdz ar to strāva nedaudz samazinās un elektrodzinējs sākumā uzsilts nedaudz mazāk nekā ar ventilatoru, ko var redzēt 3.14. attēlā. Vēl var redzēt, ka asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūra ~ 7 – 8 minūtēs pieaug vienādi, neatkarīgi no dzesēšanas apstākļiem. Šāds secinājums tika izdarīts arī (Dorrell et al., 2006) darbā, ka elektrodzinēju dzesēšana ar gaisa ventilāciju ir efektīvs veids, kā samazināt elektrodzinēja nostabilizēto temperatūru, bet ir mazāk efektīva elektrodzinēja silšanas pārejas procesa laikā.



3.14. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti silšanas pārejas procesā pie dažādām slodzēm un dzesēšanas apstākļiem:

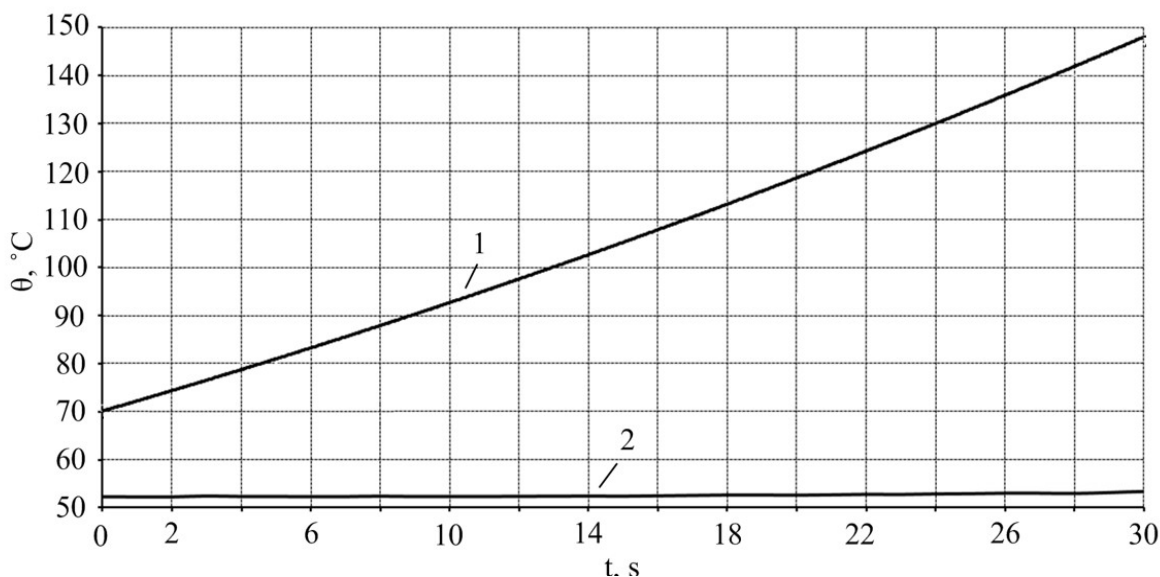
1 – statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 0.98$ bez ventilatora; 2 – statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 1$ ar ventilatoru; 3 – statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 0.76$ bez ventilatora; 4 – statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 0.76$ ar ventilatoru

ABB elektrodzinēja gultņu sēžas temperatūra ventilatora pusē pieaug līdz 101 °C (pie apkārtējās vides temperatūras 30°C), ja tiek noņemts ventilators. Pēc SKF gultņu ražotāja rekomendācijām gultņu sēžas temperatūra nedrīkst būt lielāka par 82 °C un gultņa ārējās virsmas temperatūra var būt par 11°C lielāka nekā gultņu sēžas temperatūra (Rolling bearing..., 2013). Tāpēc gultņu temperatūra var būt lielāka par 101 °C, kas var būtiski samazināt gultņa smērvielas darbмūžu.



3.15. att. ABB asinhronā elektrodzinēja gultņu sēžas silšanas eksperimentu rezultāti pie nominālas slodzes un bez ventilatora (Gedzurs, 2016):

1 – statora tinumu temperatūra; 2 – gultņu sēžas temperatūra; 3 – apkārtējās vides temperatūra; 4 – statora tinumu temperatūra ar ventilatoru; 5 – apkārtējās vides temperatūra eksperimenta laikā ar ventilatoru

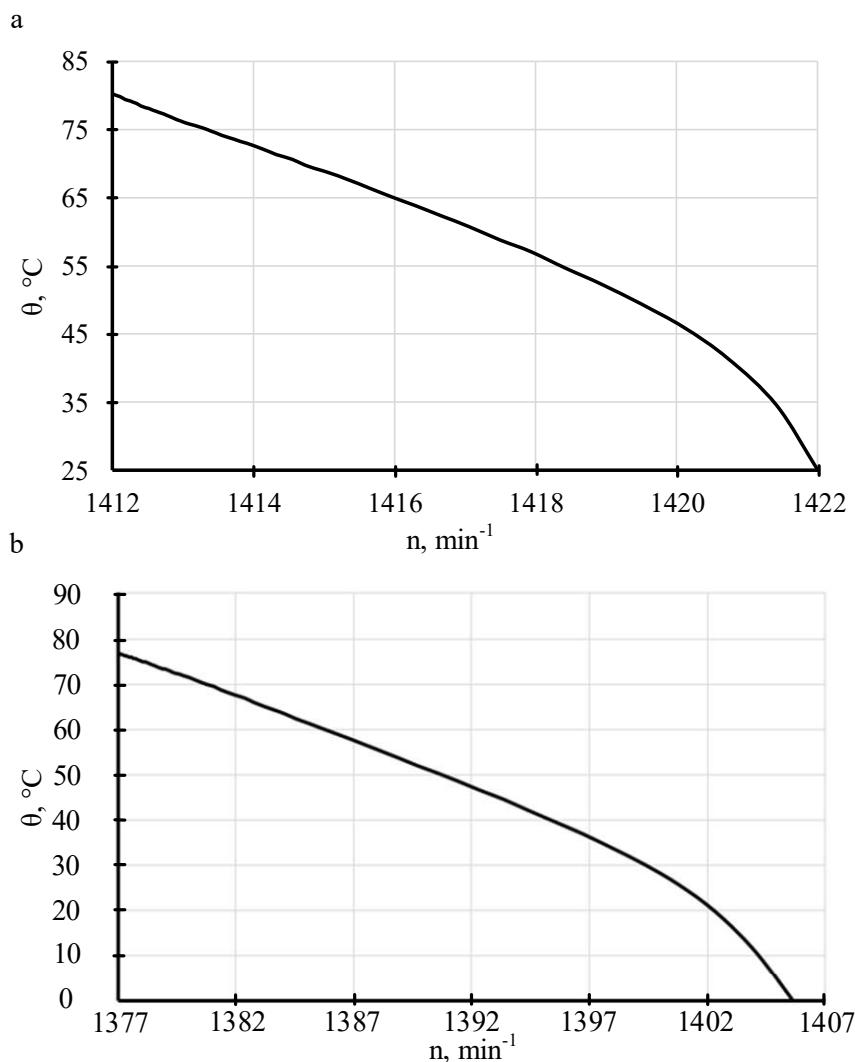


3.16. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultāti pie nosprūdušā rotora:

1 – statora tinumu temperatūra; 2 – korpusa temperatūra

ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas analīzei pie nosprūdušā rotora, elektrodzinējs sākumā tika darbināts pie nominālās slodzes, un sasniedzot nostabilizēto temperatūru 69 °C, viena fāze tika atslēgta un rotors tika nosprūdināts. Statora tinumu temperatūra 30 sekunžu laikā palielinājās līdz 149 °C. Pēc 3.16. attēla var redzēt, ka temperatūra pieauga lineāri ar ātrumu 2.67°C·s⁻¹. Korpusa temperatūra pieauga par 2 °C tikai pēdējās 2 sekundēs un temperatūra statora tinumam, kas tika pieslēgts pie atslēgtās fāzes, pieauga par 5 °C procesa beigās. Rezultāti rāda, ka elektrodzinēja statora tinumu silšanas process ir adiabatisks. Tā kā rotors tika nosprūdināts jau pie uzsiluša elektrodzinēja (elektrodzinēja temperatūra ir lielāka par apkārtējās vides temperatūru), rotora un statora pretestības bija lielākas nekā aukstā stāvoklī. Statora strāva rotora nosprūšanas momentā ir 10.44 ± 0,05 A, 3.92 reizes lielāka nekā nominālā strāva.

Asinhronā elektrodzinēja palaišanas strāva ar IE1 lietderības klasi ir 6.4 reizes lielāka nekā nominālā strāva aukstā stāvoklī.



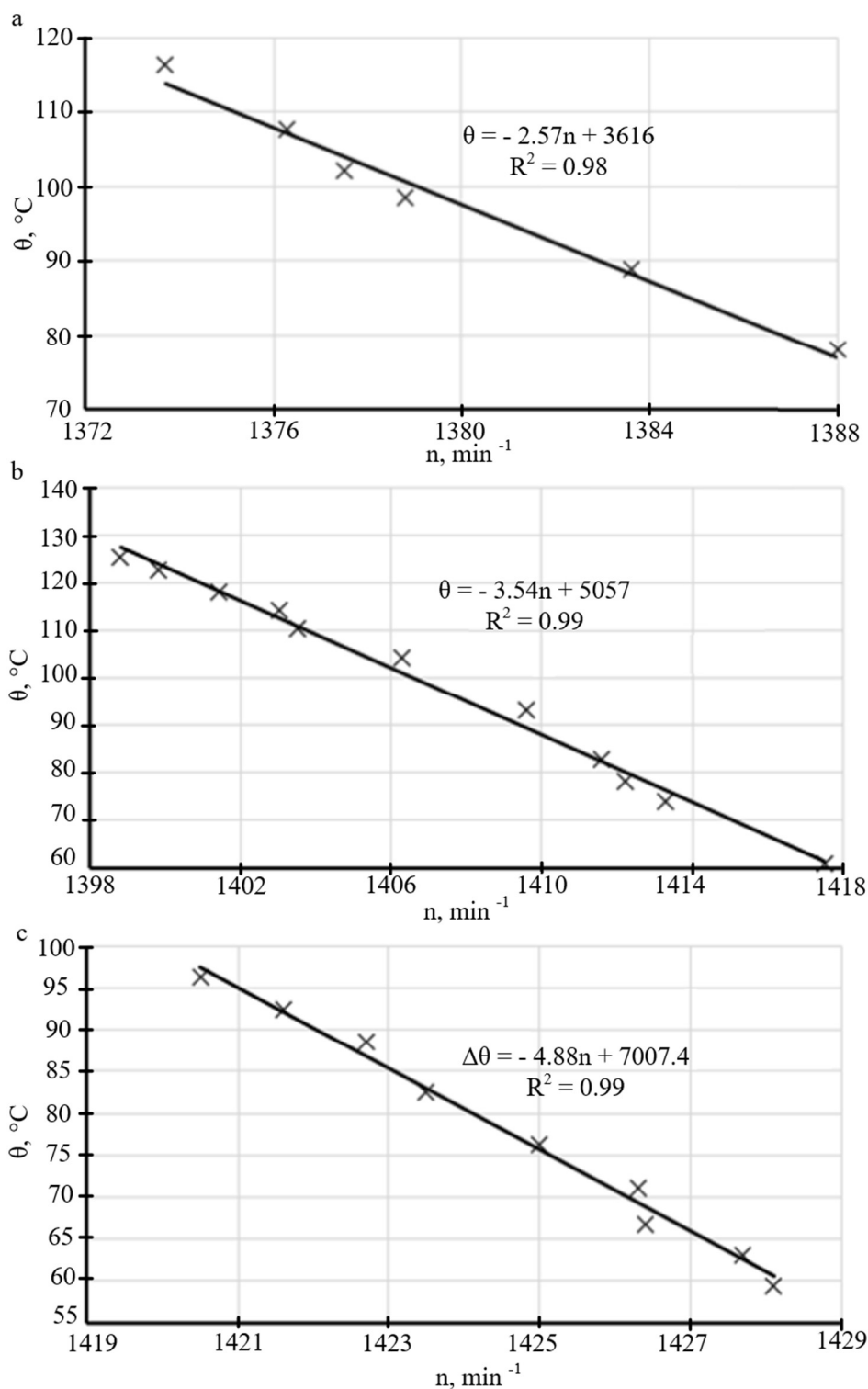
3.17. att. **ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras un rotora rotācijas frekvences mijiedarbības raksturlīkne:**

a – nominālā slodze $k = 1$; b – pārslodze $k = 1.18$

Korelācija starp statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņām pie nominālās slodzes un pārslodzes ir parādīta 3.17. attēlā. Silšanas sākumā korelācija starp statora tinumu un rotācijas frekvences izmaiņām nav lineārā, jo statora tinumam ir mazāka silšanas inerce nekā rotora tinumam. Tāpēc temperatūras noteikšana pēc rotācijas frekvences silšanas procesa sākumā varbūt neprecīza. Pēc tam statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņa ir lineāra, ko arī parāda lineārās regresijas analīze raksturlīknes lineāram posmam (3.17. attēls). Lineārā posma korelāciju starp statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņām apraksta lineārs vienādojums:

$$\theta = a \cdot n + \theta_0, \quad (3.2)$$

kur a – empīriskais koeficients, kas raksturo statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņas attiecību, $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$;
 n – rotora rotācijas frekvence, min^{-1} ;
 θ_0 – teorētiskā statora temperatūra pie rotācijas frekvences 0 min^{-1} , $^\circ\text{C}$.



3.18. att. ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņu korelācija lineārā posmā:

a – pārslodze $k = 1.18$; b – nominālā slodze $k = 1$; c – pie slodzes $k = 0.91$

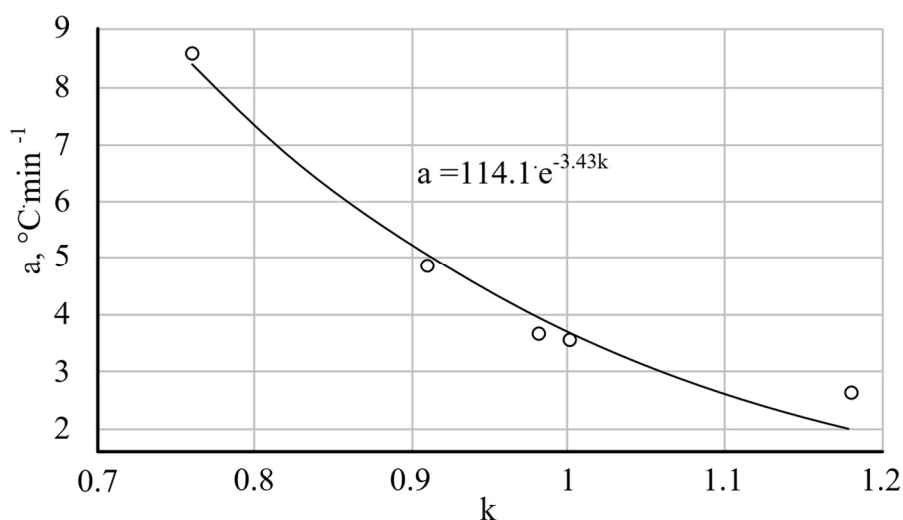
Pēc regresijas analīzes vienādojumiem pie dažādām slodzēm var redzēt, ka koeficienta a vērtība ir atkarīga no asinhronā elektrodzinēja slodzes. Tabulā 3.1. ir parādīti koeficienta a rezultāti pie dažādām slodzēm.

Koeficienta a atkarība no ABB asinhronā elektrodzinēja slodzes

Asinhronā elektrodzinēja slodze k	Koeficients $a, ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$
0.76	8.55
0.91	4.88
0.98	3.65
1.00	3.54
1.18	2.58

Veicot regresijas analīzi, tika iegūts vienādojums, kas apraksta koeficienta a atkarību no asinhronā elektrodzinēja slodzes (3.19. attēls). Nosakot elektrodzinēja slodzes koeficientu k elektrodzinēja palaišanas sākumā var noteikt empīrisko koeficientu ABB asinhronajam elektrodzinējam pēc sekojoša vienādojuma:

$$a(k) = 114.1 \cdot e^{-3.43 \cdot k}, \quad (3.3.)$$

3.19. att. ABB asinhronā elektrodzinēja koeficienta a atkarība no slodzes

Formulas 3.3. koeficients 114.1 nozīmē koeficientu a vērtību, ja slodze būs vienāda ar 0, kas praktiski nav iespējams, ja asinhronais elektrodzinējs tiek darbināts.

Iegūto vienādojumu statora tinumu noteikšanai var pielietot apskatītājā darba diapazonā $k = 0.76-1.18$ un statora tinumu izolācijas pieļaujamā temperatūras diapazonā. Vienādojums raksturo arī citas jaudas asinhronos elektrodzinējus ar īsslēgto rotoru, bet būs citi koeficienti, kurus jānosaka eksperimentāli.

Pēc koeficienta a noteikšanas, var noteikt statora tinumu temperatūras izmaiņu, ņemot vērā elektrodzinēja rotācijas frekvenci. Elektrodzinēju silšanas procesu sākumā korelācija starp statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņām nav lineārā. Tāpēc statora tinumu noteikšanai šajā silšanas procesa posmā jāizmanto cita metode. Silšanas modeļa izmantošanas trūkums ir nespēja reaģēt uz elektrodzinēja dzesēšanas apstākļu izmaiņām. Bet tika secināts, ka asinhrono elektrodzinēju silšanas procesu sākumā dzesēšana praktiski neietekmē statora tinumu silšanu, tāpēc var izmantot silšanas modeli elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanai procesa sākumā.

Silšanas modeļa un statora tinumu temperatūras noteikšana pēc rotācijas frekvences metodes izmantošanas un validācijas ar eksperimenta rezultātiem tiks apskatīta nākamajā nodaļā.

3.3. Ventilatoru piedziņas elektrodzinēju darbības analīze

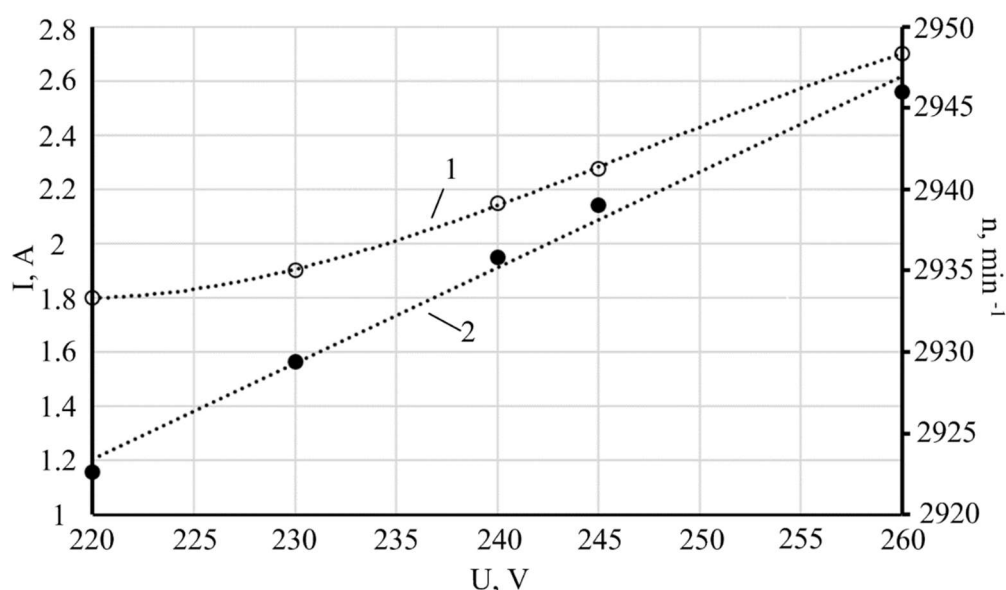
Ventilatoru piedziņas elektrodzinēju darbības eksperimentu rezultāti ir apkopoti 3.2. tabulā. Ventilatora piedziņā izmantotā asinhronā elektrodzinēja nominālā strāva ir 2.5 A pie fāzes sprieguma 220 V, un ieslēdzot ventilatoru, strāva ir 1.8 A un elektrodzinējs tiek noslogots ar slodzi $k = 0.72$.

Palienot spriegumu, ventilatora rotācijas frekvence palielinās un elektrodzinējs tiek vairāk noslogots (pieaug strāva un aktīvā jauda). Rotācijas frekvence lineāri pieaug, palielinoties spriegumam, bet strāva palielinās vairāk, ja spriegums ir lielāks par 240 V nekā pie standartizētā fāzes sprieguma 220 – 240 V (3.20. attēls).

3.2.tabula

Tīkla sprieguma ietekme uz ventilatora darbību

Fāzes spriegums, V	Strāva, A	Rotācijas frekvence, min^{-1}
220 ± 1.5	1.80 ± 0.012	2922.6 ± 0.4
230 ± 1.5	1.90 ± 0.012	2929.4 ± 0.4
240 ± 1.5	2.15 ± 0.012	2935.8 ± 0.4
245 ± 1.5	2.27 ± 0.012	2939.0 ± 0.4
260 ± 1.5	2.70 ± 0.012	2946.0 ± 0.4



3.20. att. Ventilatora strāvas un rotācijas frekvences atkarība no sprieguma

1 – strāva; 2 – rotācijas frekvence

Eksperimenta laikā tika veikta arī ventilatora asinhronā elektrodzinēja temperatūras mērīšana, bet nelielas slodzes dēļ statora tinuma un rotora temperatūras izmaiņas nebija lielas, līdz ar to nebija iespējams analizēt statora tinumu temperatūras un rotora rotācijas frekvences izmaiņas korelāciju. Bloķējot elektrodzinēja dzesēšanu, būtiski nepalielinājās elektrodzinēja ātrums, jo elektrodzinējs ir mehāniski savienots ar ventilatora korpusu, kuru dzesē ventilatora radīta gaisa plūsma. Tas nozīmē, ka ventilatoriem ar šādu konstrukciju (3.6. b attēls) asinhrono elektrodzinēju silšanu būtiski neietekmē dzesēšanas traucējumi, salīdzinot ar ventilatora konstrukciju SIA “Balticovo” ražotnē (1.25. b. attēls).

3.4. Nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentālie pētījumu rezultāti rāda, ka pie pārslodzes $k = 1.18$ statora tinumu temperatūra ir $103\text{ }^{\circ}\text{C}$, tā ir par $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ lielāka nekā pie nominālās slodzes. Statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 0.98$ un ar dzesēšanas traucējumiem ir $131.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tas liecina, ka dzesēšanas traucējumi ietekmē asinhrono elektrodzinēju silšanu vairāk nekā elektrodzinēju nelielas pārslodzes.
2. Pēc asinhrono elektrodzinēju silšanas pētījumiem pie nosprūdušā rotora tika secināts, ka silšanas process ir adiabatisks un statora tinumu temperatūra lineāri palielinās 4A sērijas 1.1 kW elektrodzinējam ar ātrumu $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ aukstā stāvoklī. ABB 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūra nosprūdušā rotora režīmā palielinās ar ātrumu $2.67\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ kārstā stāvoklī. Tas nozīmē, ka statora tinumu silšanas intensitāte nosprūdušā rotora režīmā ir atkarīga no temperatūras, jo mazāka ir statora un rotora temperatūra, jo intensīvāka ir statora tinumu silšana.
3. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimenti rāda, ka gultņu sēžas temperatūra sasniedz $101\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pēc gultņu ražotāja rekomendācijām gultņu sēžas temperatūra nedrīkst būt lielāka par $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ un gultņa ārējās virsmas temperatūra var būt par $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ lielāka nekā gultņu sēžas temperatūra. Tāpēc gultņu temperatūra var būt lielāka nekā $101\text{ }^{\circ}\text{C}$, kas var būtiski samazināt gultņa un elektrodzinēja drošumu.
4. Asinhronā elektrodzinēja silšanas procesa laikā pie nemainīgas slodzes mainās elektrodzinēja rotācijas frekvence un pastāv korelācija starp statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņām. Silšanas procesa sākumā šī korelācija nav lineāra statora un rotora dažādu silšanu inerču dēļ, bet pēc tam izmaiņa ir lineāra. Regresijas analīzes rezultātā tika iegūts empīriskais koeficients un vienādojums, kas apraksta sakarību starp statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences izmaiņām.
5. Asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimenta rezultāti parāda, ka silšanas pārejas procesa sākumā elektrodzinēja dzesēšanas traucējumi praktiski neiespaido statora tinumu silšanu, tāpēc statora tinumu temperatūras noteikšanai silšanas procesu sākumā var izmantot silšanas modeli, neatkarīgi no dzesēšanas apstākļiem.

4. ASINHRONO ELEKTRODZINĒJU STATORA TINUMU SILŠANAS MODELĒŠANA

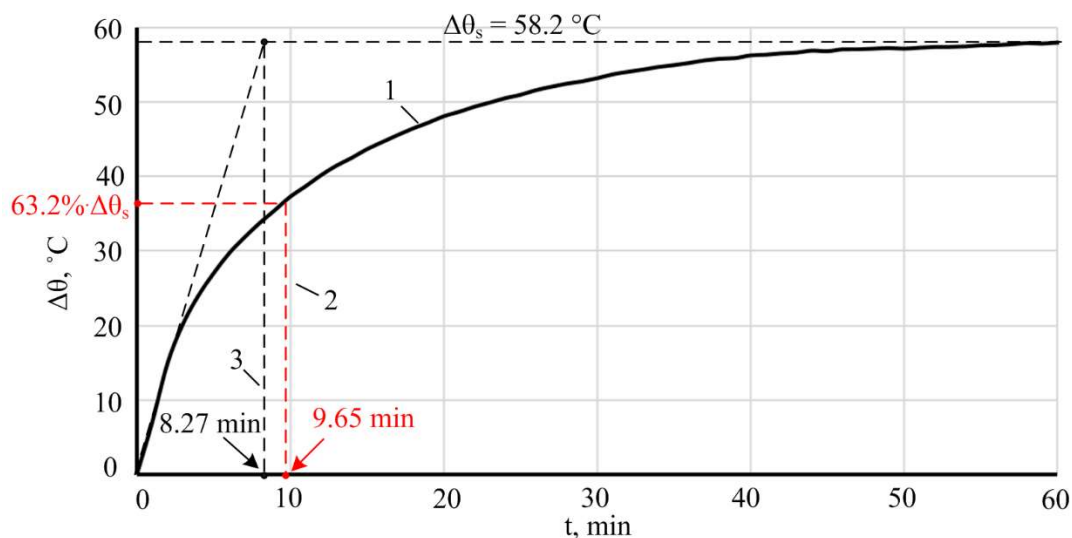
Trešajā nodaļā tika veikti mazas jaudas asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentālie pētījumi un secināts, ka elektrodzinēja statora tinumu temperatūras izmaiņu var noteikt pēc elektrodzinēja rotācijas frekvences. Elektrodzinēja statora tinumu noteikšana pēc rotācijas frekvences silšanas pārejas procesa sākumā nebūs precīza rotora un statora atšķirīgo silšanas inerces dēļ. Tāpēc pārejas procesa sākumā var izmantot silšanas modeli statora tinumu noteikšanai, jo silšanas procesa sākumā, statora tinumu silšanu, elektrodzinēja dzesēšanas apstākļi praktiski neietekmē. Plaši tiek izmantots pirmās kārtas silšanas modelis, bet ir publikācijas, kas parāda labu sakritību starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem, un ir publikācijas, kas norāda, ka pirmās kārtas silšanas modelis var radīt būtiskas kļūdas un priekšlaicīgi atslēgtu elektrodzinēju. Tāpēc tiks aplūkota pirmās kārtas modeļa izmantošana ABB 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja silšanas simulācijai un veikta tā salīdzināšana ar eksperimenta datiem.

4.1. Pirmās kārtas silšanas modeļa izmantošanas analīze asinhronā elektrodzinēja silšanas modelēšanai

Lai veiktu simulāciju, ir nepieciešams noteikt elektrodzinēja termisko pretestību R_t un laika konstanti T . Termisko pretestību var noteikt no eksponenciālās funkcijas, zinot zudumu jaudu un elektrodzinēja statora tinumu nostabilizēto temperatūru. No ABB asinhronā elektrodzinēja eksperimentāliem pētījumiem pie nominālās slodzes nostabilizētā statora tinumu virstemperatūra $\Delta\theta_s = 58.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ un elektriskie zudumi statora tinumos $P_{el} = 52.8\text{ W}$ (vienas fāzes elektriskie zudumi). ABB elektrodzinēja termiskā pretestība R_t ir $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$.

Laika konstantes noteikšanai tiks izmantotas šādas metodes:

1. no nelineārās regresijas analīzes;
2. pēc laika konstantes definīcijas, laiks, kurā statora tinumu temperatūra sasniedz 63.2 % no nostabilizētas vērtības $\Delta\theta_s$;
3. grafoanalītiski – velkot pieskari no raksturlīknes sākumpunkta, līdz tā krusto ordinātu $\Delta\theta_s$. Velkot iegūtā krustpunkta projekciju uz laika t asi, iegūst T vērtību (Šnīders & Straume, 2008).



4.1. att. ABB asinhronā elektrodzinēja laika konstantes T noteikšana:

1 – eksperimenta rezultāti; 2 – pēc definīcijas; 3 – grafoanalītiski

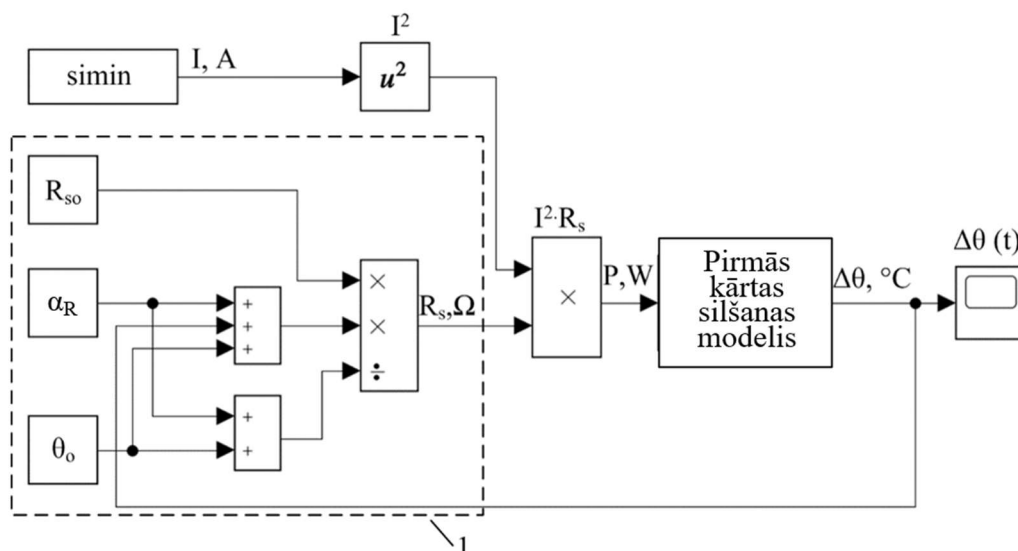
ABB elektrodzinēju statora tinumu temperatūras mērījumu regresijas analīze ir parādīta 3.10. attēlā pie nominālas slodzes. Pēc regresijas vienādojuma nostabilizētā temperatūra ir 53.7 °C, tāpēc $R_t = 1.02 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$, laika konstante $T = 9.57 \text{ min}$. Laika noteikšana pēc definīcijas un grafoanalītiskās metodes ir parādīta 4.1. attēlā.

Laika konstantes un termiskās pretestības lielumi atkarībā no noteikšanas metodes ir apkopoti 4.1. tabulā. Nosakot laika konstantes un termiskās pretestības, tika veikta statora tinumu silšanas procesa simulācija Matlab Simulink vidē, izmantojot pirmās kārtas silšanas modeļa pārvades funkciju (4.2. attēls).

4.1.tabula

Laika konstantes T un termiskās pretestības R_t lielumi atkarībā no noteikšanas metodes

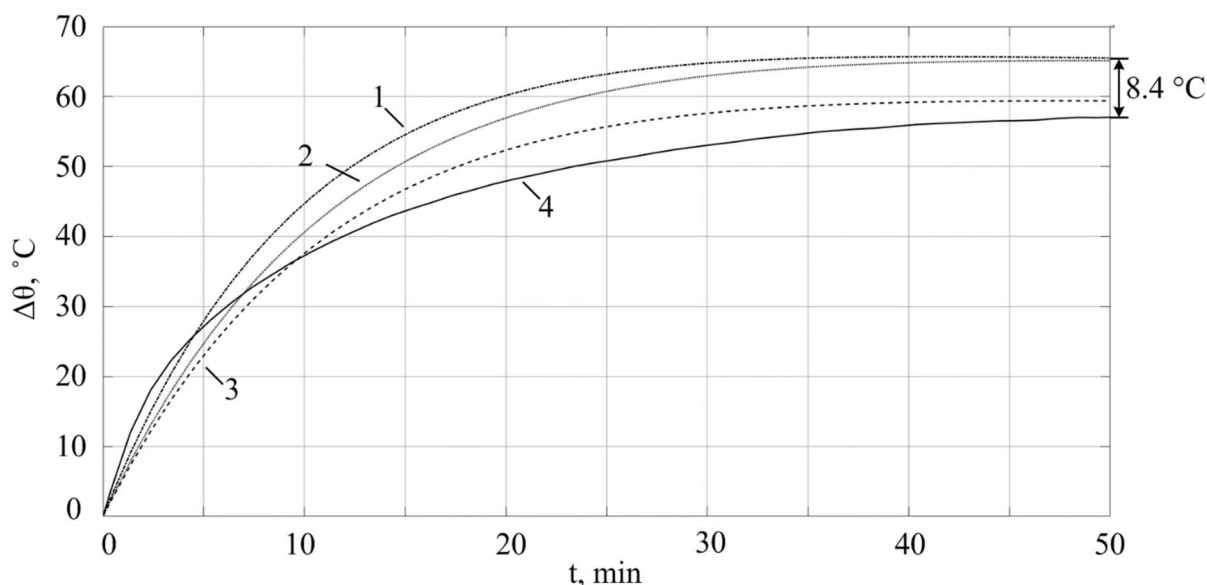
Laika konstantes noteikšanas metode	T, min	$R_t, \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$
Regresijas analīze	9.57	1.02
Pēc definīcijas	9.65	1.11
Grafoanalītiskā metode	8.27	1.11



4.2. att. Pirmās kārtas silšanas modelis Matlab Simulink vidē statora tinumu silšanas simulācijai:

1 – statora pretestības korekcijas bloks

Silšanas modeļa ieejas parametrs ir statora strāva un ar “simin” bloku statora strāvas mērījumi tiek izmantoti simulācijas laikā. Simulācijas laikā tiek pārrēķināts statora aktīvās pretestības lielums pēc 2.2. vienādojuma. Pēc statora strāvas un pretestības tiek aprēķināti elektriskie zudumi. Pirmās kārtas silšanas modeļa blokā, pēc 2.17. vienādojuma, tiek ierakstīti T un R_t lielumi un tiek aprēķināta statora tinuma virstemperatūra $\Delta\theta$.



4.3. att. **Pirmās kārtas silšanas modeļa statora tinumu silšanas simulācijas rezultāti pie dažādiem T un R_t lielumiem:**

1 – $T = 8.27$ min un $R_t = 1.11$ °C·W⁻¹; 2 – $T = 9.65$ min un $R_t = 1.11$ °C·W⁻¹; 3 – $T = 9.57$ min un $R_t = 1.02$ °C·W⁻¹; 4 – eksperimenta rezultāti

Simulācijas rezultāti rāda, ka pirmās kārtas silšanas modeļa rezultāti atšķiras no eksperimenta rezultātiem. Praksē bieži laika konstanti nosaka pēc grafoanalītiskās metodes (4.3. attēls 1. līkne) un dotajā gadījumā temperatūras starpība starp eksperimenta un simulācijas rezultātiem ir 8.4 °C. Līdz ar to simulācijas rezultāti apstiprina to, ka pirmās kārtas silšanas modeļa izmantošana asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai pārslodzes gadījumos var priekšlaicīgi atslēgt elektrodzinēju no tīkla, elektrodzinējam nesasniedzot izolācijas klases pieļaujamo temperatūru.

Šādu starpību starp eksperimenta un pirmās kārtas silšanas modeļa simulācijas rezultātiem var izskaidrot ar to, ka elektrodzinēja silšanas pārejas procesa sākumā, dzesēšana praktiski neietekmē statora tinumu silšanu un tinumi uzsilt straujāk. Pēc tam silšanā iesaistās statora korpusa un dzesēšanas gaisa plūsma samazina statora tinuma temperatūras augšanu.

4.2. Asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļa izveide un elektrodzinēja silšanas modelēšana

Otrajā nodaļā tika aprakstīts asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modelis, kur tiek atsevišķi modelēta statora un rotora temperatūra. Analizējot Gao (Gao, 2006) darbu, tika secināts, ka arī šāds otrās kārtas silšanas modelis rada kļūdu (~ 10 °C) silšanas procesa sākumā. Līdz ar to šādu risinājumu nevar izmantot kopā ar statora temperatūras noteikšanu pēc rotācijas frekvences. Augstākās kārtas modeļa izmantošana nav lietderīga, jo papildu vajadzīgo parametru noteikšanai nepieciešami papildu eksperimenti un parametri. Tāpēc tiks analizēts elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modelis, kurā statora tinumu un korpusa (kopā ar serdi) temperatūras tiks simulētas atsevišķi. Lai to veiktu, ir pieņemti šādi vienkāršojumi:

1. magnētiskie zudumi statora serdē mazas jaudas elektrodzinējos ir niecīgi, tāpēc tiks ņemti vērā tikai statora tinuma elektriskie zudumi;
2. viss siltums no statora tinumiem nonāk statora serdē un korpusā;
3. elektrodzinēja termiskās pretestības R_t un siltumietilpības C ir nemainīgie lielumi.

Tad statora tinumu silšanu var aprakstīt ar sekojošo siltuma plūsmu bilances vienādojumu (4.4. attēls):

$$P_{el} = Q_k + Q_{at}, \quad (4.1)$$

kur Q_{at} – statora tinumos akumulētā siltuma plūsma, W;
 Q_k – korpusam atdotā siltuma plūsma, W.

Statora tinuma silšanas dinamikas vienādojums izvērstā veidā:

$$P_{el} = \frac{\theta_t - \theta_k}{R_{t1}} + C_1 \cdot \frac{d\theta_t}{dt}, \quad (4.2)$$

kur R_{t1} – statora tinumu termiskā pretestība, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$;
 θ_k – korpusa temperatūra, $^{\circ}\text{C}$;
 θ_t – statora tinumu temperatūra, $^{\circ}\text{C}$;
 C_1 – statora tinumu siltumietilpība, $\text{J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Korpusa siltuma plūsmu bilances vienādojums:

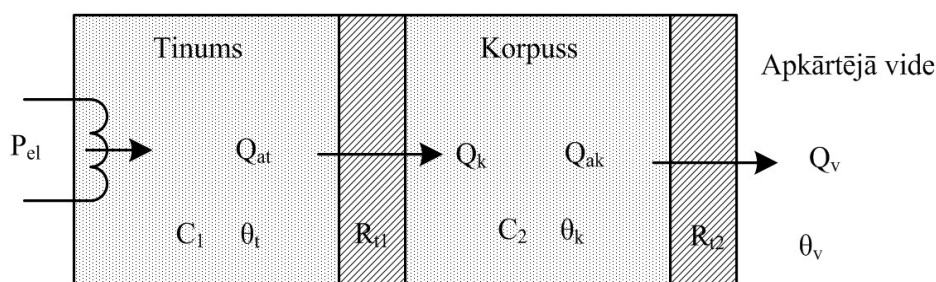
$$Q_k = Q_v + Q_{ak}, \quad (4.3)$$

kur Q_{ak} – korpusā akumulētā siltuma plūsma, W;
 Q_v – videi atdotā siltuma plūsma, W.

Korpusa silšanas dinamikas vienādojums izvērstā veidā:

$$\frac{\theta_t - \theta_k}{R_{t1}} = \frac{\theta_k}{R_{t2}} + C_2 \cdot \frac{d\theta_k}{dt}, \quad (4.4)$$

kur R_{t2} – korpusa termiskā pretestība, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$;
 C_2 – korpusa siltumietilpība, $\text{J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

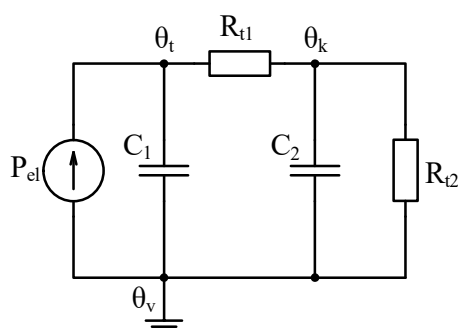


4.4. att. Asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļa siltuma plūsma

Trīsfāžu asinhronais elektrodzinējs sastāv no trim vienādiem tinumiem, tāpēc tālāk silšanas analīzei tiks apskatīts viens tinums. Otrās kārtas silšanas modeļa ekvivalentā elektriskā shēma ir parādīta 4.5. attēlā. Izmantojot ekvivalento elektrisko shēmu, elektrodzinēja stacionārā silšanas procesā var aprēķināt termiskās pretestības:

$$R_{t1} = \frac{\theta_t - \theta_k}{P_{el}} = \frac{\Delta\theta_t - \Delta\theta_k}{P_{el}}, \quad (4.5)$$

$$R_{t2} = \frac{\theta_k - \theta_v}{P_{el}} = \frac{\Delta\theta_k}{P_{el}}, \quad (4.6)$$



4.5. att. Asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļa ekvivalentā elektriskā shēma

Elektriskie zudumi statorā ar tinumu pretestības korekciju pēc temperatūras:

$$P_{el} = I^2 \cdot R_s = I^2 \cdot R_{so}(1 + \alpha_R(\theta - \theta_o)), \quad (4.7)$$

kur R_{t2} – korpusa termiskā pretestība, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$;

Pie nominālas slodzes ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinuma nostabilizētā temperatūra $\theta_{ts} = 83.2^{\circ}\text{C}$ un virstemperatūra ($\theta_{ts} - \theta_v$) $\Delta\theta_{ts} = 58.2^{\circ}\text{C}$, korpusa nostabilizētā virstemperatūra $\Delta\theta_{ks} = 31.6^{\circ}\text{C}$, statora strāva $I = 2.5\text{ A}$, statora tinumu pretestība $R_s = 7.2\ \Omega$ pie $\theta_o = 25^{\circ}\text{C}$.

Pēc 4.5. – 4.7. formulām un eksperimenta datiem ir aprēķināti elektrisko zudumu un termiskās pretestības lielumi.

4.2.tabula

Elektrisko zudumu P_{el} un termisko pretestību aprēķinu rezultāti pie dažādām slodzēm

Elektrodzinēja slodze, k	Elektriskie zudumi P_{el} , W	Statora termiskā pretestība R_{t1} , $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$	Korpusa termiskā pretestība R_{t2} , $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$
k = 0.76	29.2	0.49	0.67
k = 0.91	41.0	0.51	0.59
k = 1.00	52.8	0.50	0.60
k = 1.18	76.4	0.50	0.58

Aprēķini rāda (4.2. tabula), ka statora vidēja termiskā pretestība ir $R_{t1} = 0.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$, bet korpusa - $R_{t2} = 0.61^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$. Tālāk siltumietilpības noteikšanai un silšanas procesu simulācijai tiks izmantoti aprēķinātie R_{t1} un R_{t2} lielumi pie nominālās slodzes.

Siltumietilpības noteikšanai var izmantot eksperimentālās metodes, kuras ir aprakstītas darbā (Moreno et al., 2001), bet šajā darbā tiks izmantoti silšanas modelis, Matlab Simulink programma un elektrodzinēju silšanas eksperimentālie dati.

Reizinot 4.2. vienādojumu ar statora vidējo termisko pretestību R_{t1} iegūst:

$$P_{el} \cdot R_{t1} = \theta_t - \theta_k + T_1 \cdot \frac{d\theta_t}{dt}, \quad (4.8)$$

$$\frac{d\theta_t}{dt} = \frac{P_{el} \cdot R_{t1} - \theta_t + \theta_k}{T_1}, \quad (4.9)$$

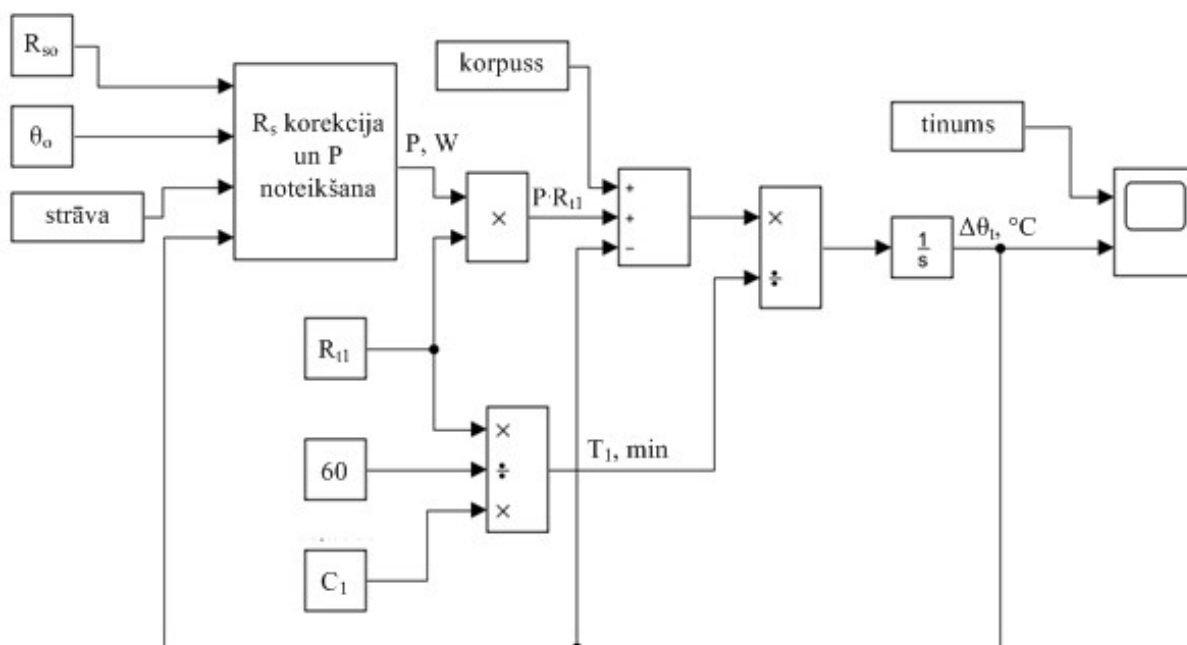
kur $T_1 = R_{t1} \cdot C_1$ – statora tinumu laika konstante, s.

Tad statora tinuma siltumietilpības C_1 noteikšanas secība ir:

1. izveidot virtuālo modeli atbilstoši 4.9. vienādojumam Matlab Simulink vidē;
2. ievadīt aprēķināto R_{t1} lielumus;
3. importēt strāvas, statora tinuma un korpusa temperatūras no silšanas eksperimentiem;
4. pēc ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimenta datiem nosprūdušā rotora režīmā noteikt aptuveno C_1 vērtību;
5. veicot simulācijas, koriģēt R_{t1} un C_1 vērtības, lai simulācijas un eksperimenta rezultāti sakristu.

Nosprūdušā rotora režīmā statora tinumu silšanas process ir adiabātisks, t.i., visa siltuma plūsma tiek akumulēta statora tinumos. Nosakot zuduma jaudu un statora tinumu temperatūras augšanas ātrumu, var noteikt statora tinuma siltumietilpību.

Virtuālais modelis, R_{t1} un C_1 noteikšanai, Matlab Simulink vidē ir parādīts 4.6. attēlā. Strāvas, korpusa un statora tinumu virstemperatūras eksperimentā rezultāti tika importēti ar “simin” blokiem, kuri tika attiecīgi nosaukti – strāva, korpus, tinums (4.6. attēls). Skaitlis 60 laika konstantes aprēķināšanā tiek izmantots, lai no sekundēm pārietu uz minūtēm. Veicot simulāciju, tika noteikts, ka $R_{t1} = 0.45 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ un $C_1 = 300 \text{ J}\cdot\text{C}^{-1}$.



4.6. att. Virtuālais modelis statora tinuma termiskās pretestības R_{t1} un siltumietilpības C_1 noteikšanai Matlab Simulink vidē

Reizinot 4.4. vienādojumu ar korpusa vidējo termisko pretestību R_{t2} iegūst:

$$\frac{(\theta_t - \theta_k) \cdot R_{t2}}{R_{t1}} = \theta_k + T_2 \cdot \frac{d\theta_k}{dt}, \quad (4.10)$$

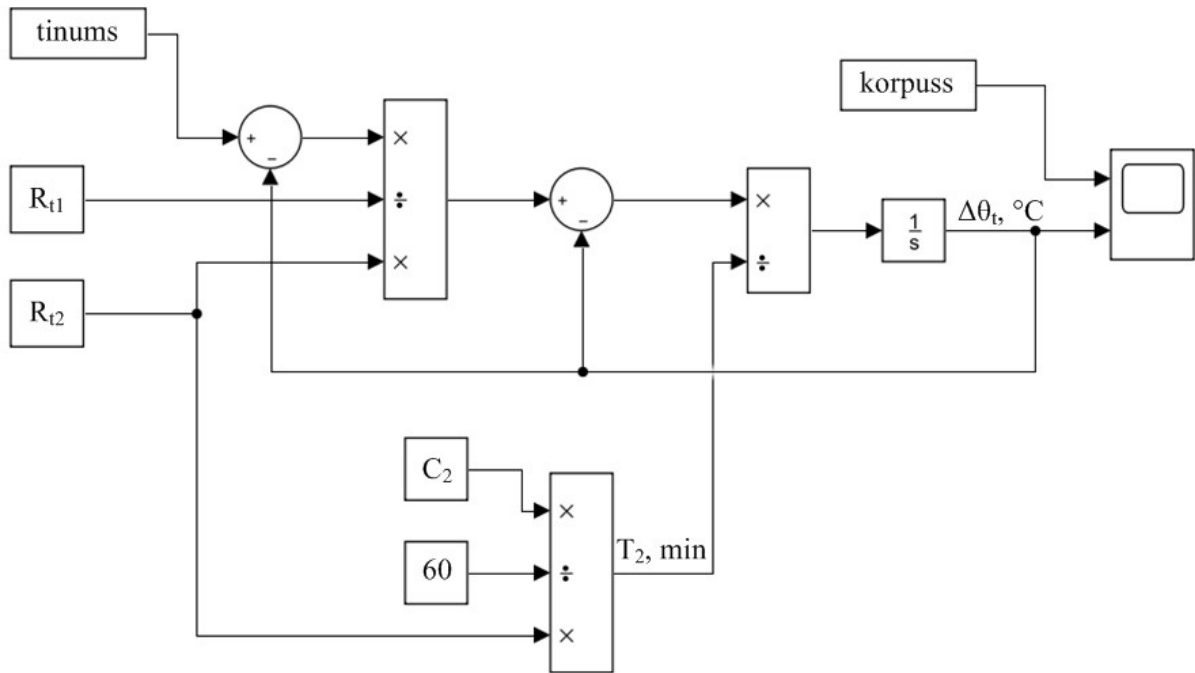
$$\frac{d\theta_k}{dt} = \frac{(\theta_t - \theta_k) \cdot R_{t2}}{R_{t1} \cdot T_2} - \frac{\theta_k}{T_2}, \quad (4.11)$$

kur $T_2 = R_{t2} \cdot C_2$ – korpusa laika konstante, s.

Integrējot 4.9. vienādojumu un $\frac{d\theta_k}{dt}$ vietā ielikt 4.11. vienādojumu, tiek iegūts statora tinumu temperatūras otrās kārtas diferenciālvienādojums:

$$\frac{d^2\theta_t}{dt^2} + \frac{1}{T_1} \cdot \frac{d\theta_t}{dt} - \frac{\theta_t \cdot R_{t2}}{R_{t1} \cdot T_1 \cdot T_2} = \frac{P_{el} \cdot R_{t1}}{T_1} - \frac{\theta_k \cdot R_{t2}}{R_{t1} \cdot T_1 \cdot T_2} - \frac{\theta_k}{T_1 \cdot T_2}, \quad (4.12)$$

Korpora termiskās pretestības un siltumietilpības noteikšanas kārtība ir līdzīgi statora tinumu R_{t1} un C_1 noteikšanai. Pēc virtuālā modeļa izveidošanas Matlab Simulink vidē (4.7. attēls), korpusa aprēķinātie parametri – $R_{t2} = 0.55 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ un $C_1 = 800 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.



4.7. att. Virtuālais modelis korpusa termiskās pretestības R_{t2} un siltumietilpības C_2 noteikšanai Matlab Simulink vidē

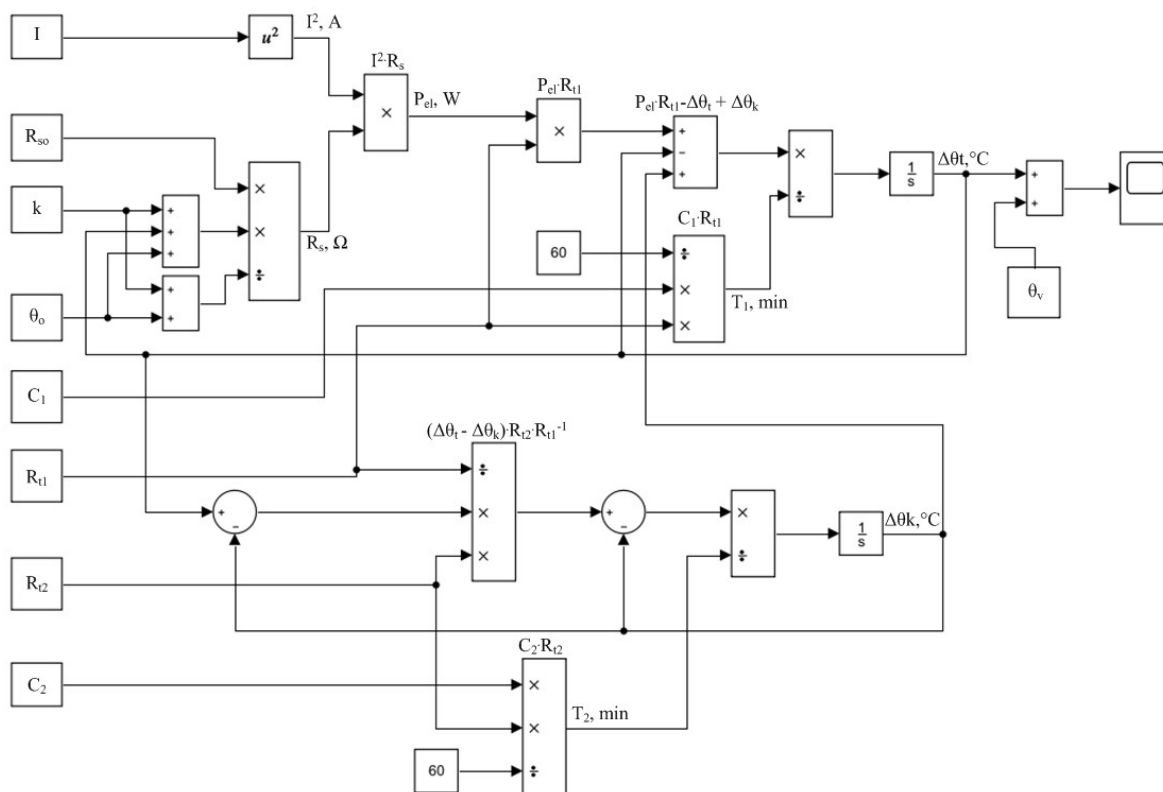
ABB1.1 kW asinhrono elektrodzinēju statora (tinums + korpus) kopējā termiskā pretestība (R_{t1} un R_{t2} – virknes slēgums) un siltumietilpība ir:

$$R_{ts} = R_{t1} + R_{t2}, \quad (4.13)$$

$$C_s = 3 \cdot (C_1 + C_2), \quad (4.14)$$

Moreno darbā pēc eksperimenta rezultātiem aprēķinātā 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja statora siltumietilpība $C_s = 3200 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ (Moreno et al., 2001), bet Armando darbā – $C_s = 3537 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ (Armando et al., 2019). Asinhrono elektrodzinēju ar īsi slēgto rotoru statora termiskā pretestība R_{ts} parasti ir robežās no 0.1 līdz $10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ (Gao, 2006). Tas apliecina, ka ABB asinhronā elektrodzinēja aprēķinātie R_{ts} un C_s lielumi ir atbilstoši.

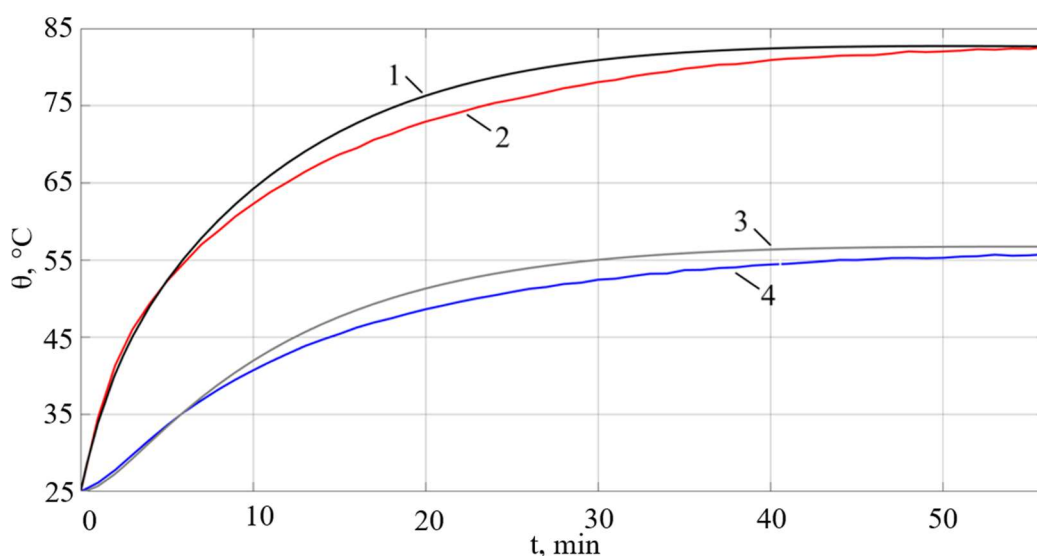
Pēc R_{t1} , R_{t2} , C_1 un C_2 noteikšanas tika izveidots aprakstītā otrās kārtas silšanas modeļa virtuālais modelis Matlab Simulink vidē (4.8. attēls). Asinhronā elektrodzinēja silšanas procesu simulācija tika veikta pie nominālas slodzes bez dzesēšanas traucējumiem, pie slodzes $k = 0.98$ ar dzesēšanas traucējumiem un pārslodzes bez dzesēšanas traucējumiem. Strāvas eksperimenta mērījumi tiek importēti ar “simin” bloku.



4.8. att. ABB asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeļa virtuālais modelis Matlab Simulink vidē

ABB asinhronā elektrodzinēja korpusa nostabilizētā virstemperatūra $\Delta\theta_{ks} = 31.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, statora tinumu nostabilizētā temperatūra $\theta_{ts} = 131.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 2.47\text{ A}$ pie slodzes $k = 0.98$ un ar dzesēšanas traucējumiem. P_{el} un R_{l2} pie šādiem apstākļiem ir 61.9 W un $1.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$.

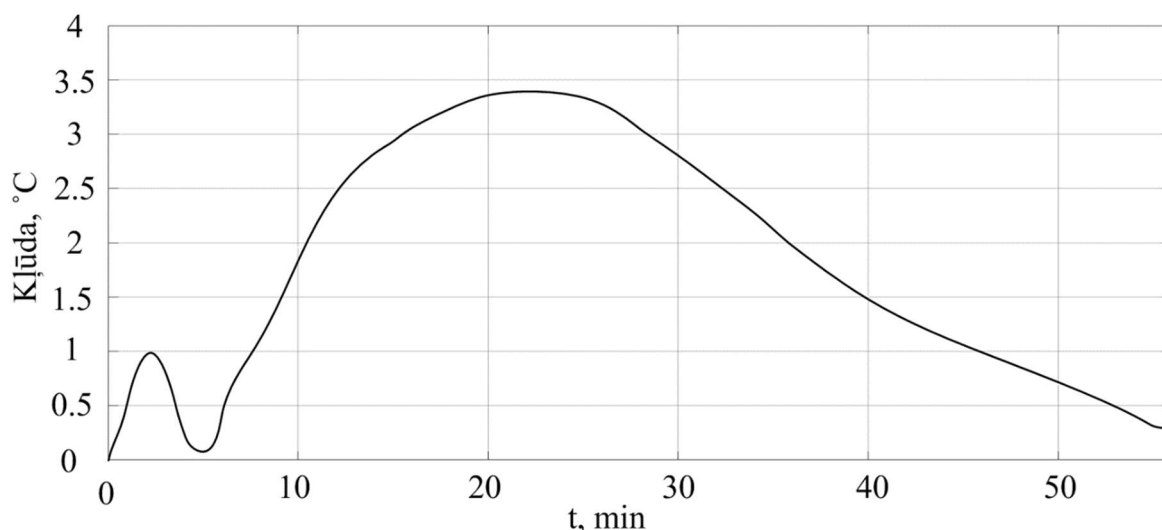
Pēc simulācijas veikšanas, korpusa termiskā pretestība pie slodzes $k = 0.98$ un ar dzesēšanas traucējumiem tika koriģēta un tika noteikts, ka $R_{l2} = 1.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$. Korpusa termiskā pretestība ar dzesēšanas traucējumiem ir 2.23 reizes lielāka nekā bez traucējumiem, bet kopēja statora termiskā pretestība ir 1.68 reizes lielāka.



4.9. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas modeļa simulācijas rezultāti pie nominālas slodzes:

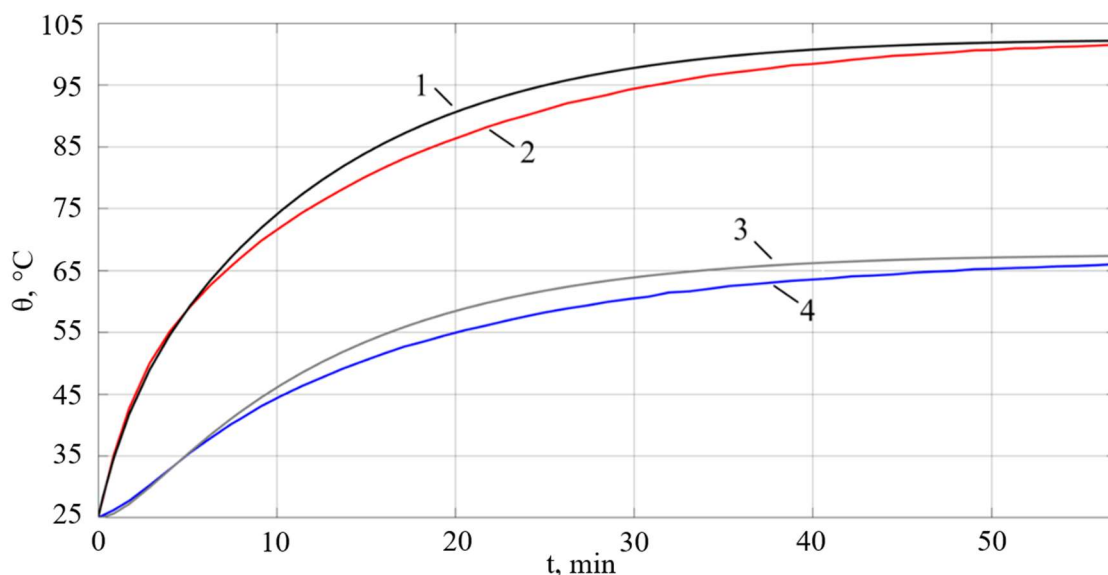
- 1 – statora tinumu temperatūras simulācijas rezultāti; 2 – statora tinumu temperatūras eksperimenta rezultāti;
- 3 – korpusa temperatūras simulācijas rezultāti; 4 – korpusa temperatūras eksperimenta rezultāti

ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas simulācijas rezultāti pie nominālās slodzes (4.9. attēls) parāda, ka piedāvātais otrās kārtas silšanas modelis nodrošina labu precizitāti starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem. Statora tinumu simulācijas temperatūra silšanas procesa sākumā un beigās praktiski ir vienāda ar eksperimenta rezultātiem (starpība mazāka par 1 °C), bet silšanas procesa vidū lielākā starpība ir 3.4 °C (4.10. attēls). Starpība starp korpusa temperatūras simulācijas un eksperimenta rezultātiem ir ~ 3 °C silšanas procesa vidū un 1 °C silšanas procesa beigās.



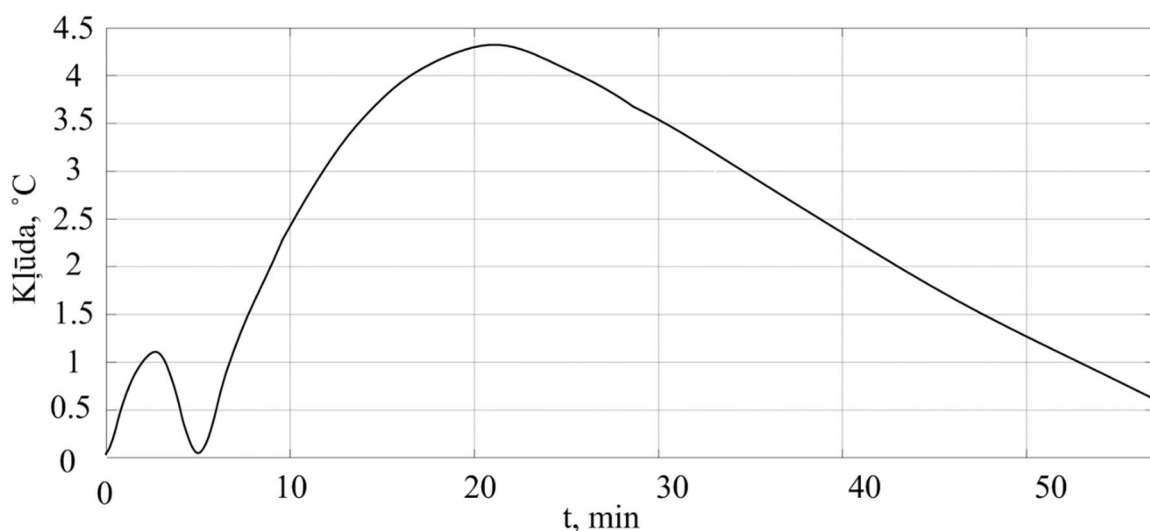
4.10. att. **ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinuma temperatūras starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem pie nominālās slodzes**

Pārslodzes gadījumā (4.11. attēls) simulācijas un eksperimenta rezultāti silšanas procesa sākumā un beigās praktiski ir vienādi ar eksperimenta rezultātiem (starpība ir ap 1 °C), bet silšanas procesa vidū lielākā starpība ir 4.3 °C (4.12. attēls).



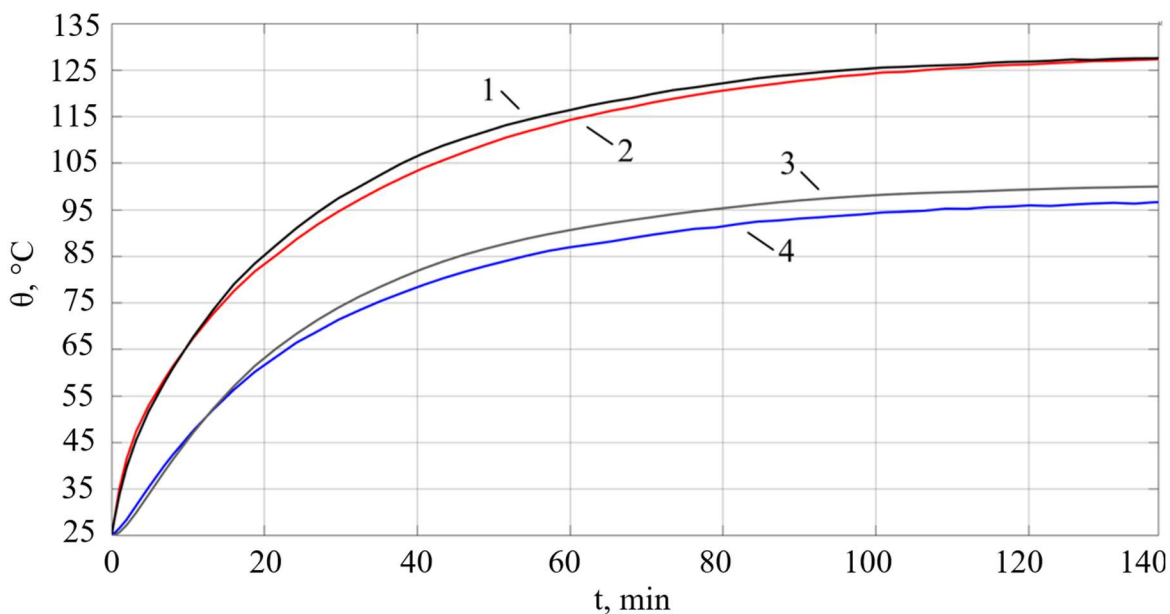
4.11. att. **ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas modeļa simulācijas rezultāti pie pārslodzes:**

1 – statora tinumu temperatūras simulācijas rezultāti; 2 – statora tinumu temperatūras eksperimenta rezultāti;
3 – korpusa temperatūras simulācijas rezultāti; 4 – korpusa temperatūras eksperimenta rezultāti



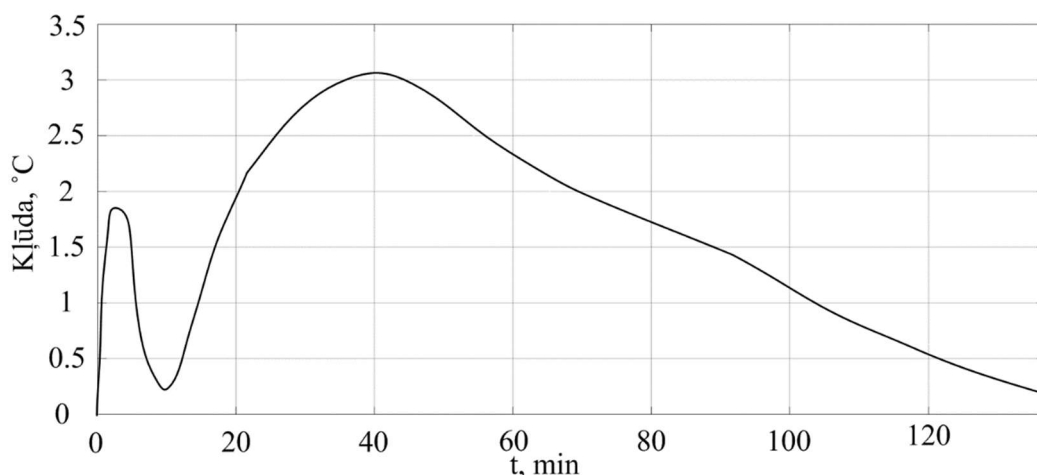
4.12. att. ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinuma temperatūras starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem pie pārslodzes

Arī gadījumā ar dzesēšanas traucējumiem pie slodzes $k = 0.98$ statora tinumu temperatūras simulācijas un eksperimenta rezultāti silšanas procesa beigās sakrīt (4.13. attēls). Lielāka starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem ir 3 °C silšanas procesa vidū (4.14 attēls). Pēc simulācijas rezultātiem pie dažādām slodzēm un dzesēšanas apstākļiem var secināt, ka simulācijas kļūda ir vislielākā silšanas procesa vidū un tās lielums ir atkarīgs no elektrodzinēja slodzes. Jo lielāka ir slodze, jo lielāka ir simulācijas kļūda.



4.13. att. ABB asinhronā elektrodzinēja silšanas modeļa simulācijas rezultāti pie slodzes $k = 0.98$ ar dzesēšanas traucējumiem:

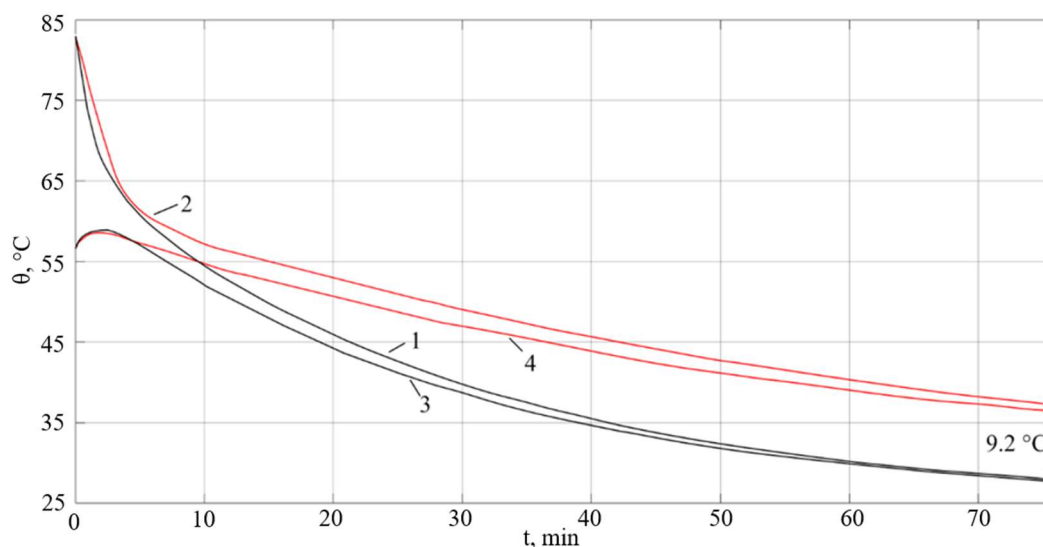
- 1 – statora tinumu temperatūras simulācijas rezultāti; 2 – statora tinumu temperatūras eksperimenta rezultāti;
- 3 – korpusa temperatūras simulācijas rezultāti; 4 – korpusa temperatūras eksperimenta rezultāti



4.14. att. ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinuma temperatūras starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem pie slodzes $k = 0.98$

Aprakstītais asinhrono elektrodzinēju silšanas modelis nodrošina pietiekoši labu statora tinumu temperatūras noteikšanas precizitāti – $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ kļūda pie nominālas slodzes. Būtiska simulācijas kļūda radīsies pie būtiskām asinhronā elektrodzinēja pārslodzēm ($k > 1.5$), bet, pie tādām slodzēm, aizsardzības iekārtas atslēgs elektrodzinēju, pirms statora tinumu temperatūra sasniegs pieļaujamās temperatūras lielumu. Pie slodzes $k = 1.5$ elektrodzinējs tiks atslēgts pēc 4 min vai mazāk, ja elektrodzinēja pārslodzes aizsardzības iekārta ir ar klasi 10 (1.3. un 1.4. tabulas).

Tika simulēts arī ABB asinhrono elektrodzinēju atdzišanas process. Asinhronais elektrodzinējs tika darbināts pie nominālās slodzes un tika atslēgts, kad statora tinumu temperatūra sasniedza nostabilizēto vērtību. Atdzišanas procesa sākumā, apmēram piecas minūtes, starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem nav liela (4.15 attēls). Pēc asinhronā elektrodzinēja atslēgšanas, korpusa temperatūra nedaudz palielinās, jo nav dzesēšanas gaisa plūsmas un siltuma atdeve samazinās. Pēc piecām minūtēm statora tinumu temperatūra sāk lineāri samazināties, bet pēc simulācijas rezultātiem statora tinumu un korpusa temperatūras samazinās straujāk, un pēc 77 minūtēm kopš atdzišanas procesa sākuma starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem ir būtiska – $9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šādu starpību var izskaidrot ar to, ka lielā daļa no rotora akumulētā siltuma nonāk statorā, pēc tam tiek atdota apkārtējai videi, kas silšanas modelī nav iekļauts.



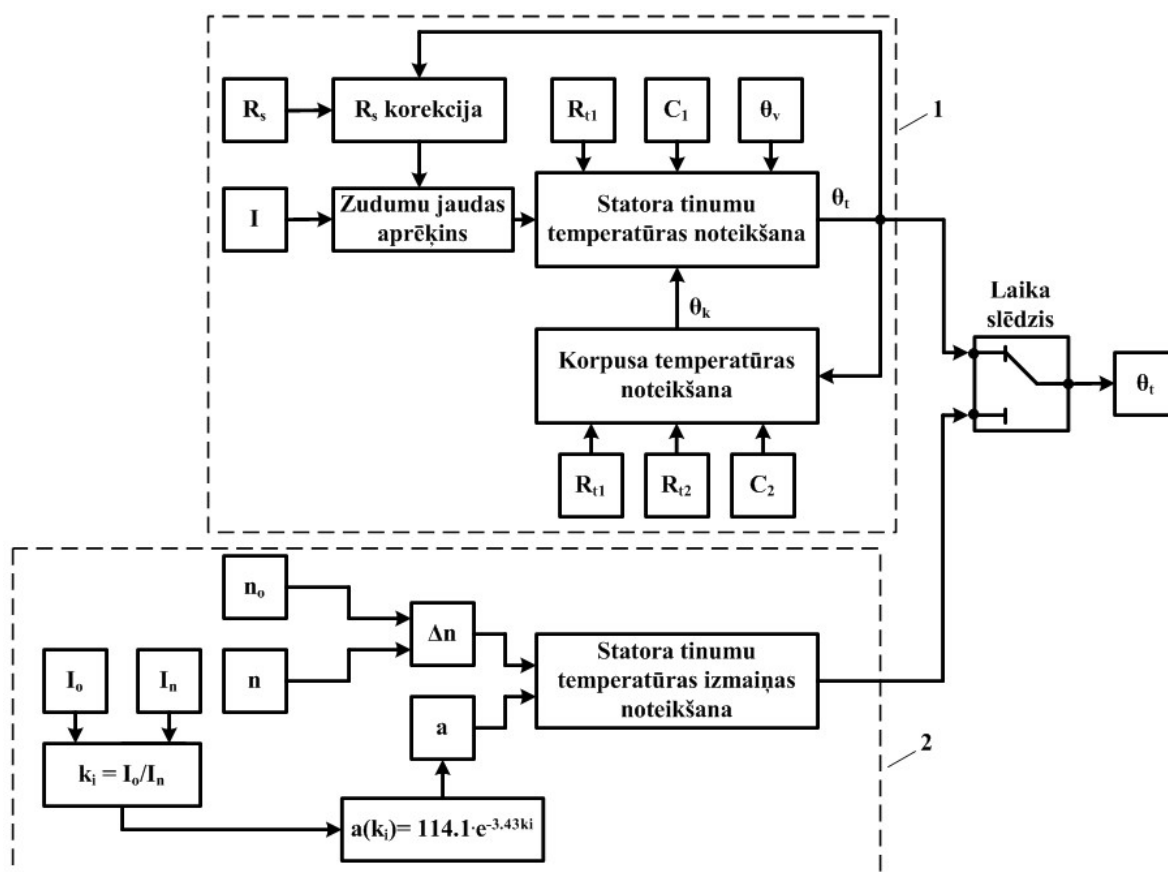
4.15. att. ABB asinhronā elektrodzinēja atdzišanas simulācijas rezultāti:

- 1 – statora tinumu temperatūras simulācijas rezultāti; 2 – statora tinumu temperatūras eksperimenta rezultāti;
- 3 – korpusa temperatūras simulācijas rezultāti; 4 – korpusa temperatūras eksperimenta rezultāti

Lielākā asinhrono elektrodzinēju daļa tiek darbināta S1 darba režīmā, arī analizētie ventilatora asinhronie elektrodzinēji SIA “Balticovo” vīstū kūtīs, un elektrodzinējs tiek ilgstoši darbināts bez darba pārtraukšanas, tāpēc nav vajadzības noteikt elektrodzinēja statora tinumu temperatūru atdzišanas laikā. Tāpēc šajos gadījumos var tikt izmantots aprakstīts otrās kārtas asinhrona elektrodzinēja silšanas modelis, lai noteiktu statora tinumu temperatūru.

4.3. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšana pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences

Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšana pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences notiek divos etapos. Pirmajā etapā, statora tinumu temperatūru nosaka pēc silšanas modeļa. Ieejas parametri zudumu jaudas aprēķināšanai ir statora strāvas efektīvā vērtība I , kura tiek mērīta elektrodzinēja darbības laikā, un statora tinuma aktīvā pretestība R_s pie temperatūras $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4.16. attēls). Statora pretestība tiek koriģēta atkarībā no statora tinuma temperatūras. Statora tinumu temperatūras θ_t aprēķināšanai ieejas parametri ir statora termiskā pretestība R_{t1} , statora tinumu siltumietilpība C_1 , vides temperatūra θ_v un korpusa temperatūra θ_k . Korpusa temperatūras θ_k aprēķināšanai – statora termiskā pretestība R_{t1} , korpusa termiskā pretestība R_{t2} , korpusa siltumietilpība C_2 un statora tinumu temperatūra θ_t .

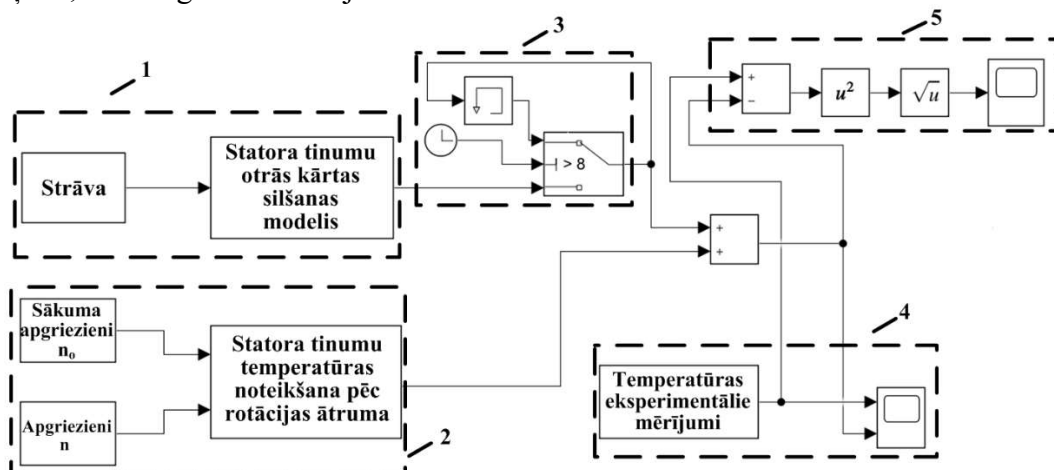


4.16. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas blokskāma pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences:

1 – silšanas modeļa blokskāma; 2 – statora tinumu temperatūras izmaiņas noteikšanas blokskāma pēc rotācijas frekvences

Otrajā etapā pēc noteikta laika statora tinumu temperatūras izmaiņa tiek noteikta pēc rotācijas frekvences un tiek pieskaitīta pirmajā etapā aprēķinātam statora tinumu temperatūras lielumam. Apskatītajam 1.1 kW ABB asinhronajam elektrodzinējam šis laiks ir 8 minūtes, un

tas tika noteikts, no elektrodzinēja silšanas eksperimentiem pie dažādiem dzesēšanas apstākļiem, un koriģēts simulācijas laikā.

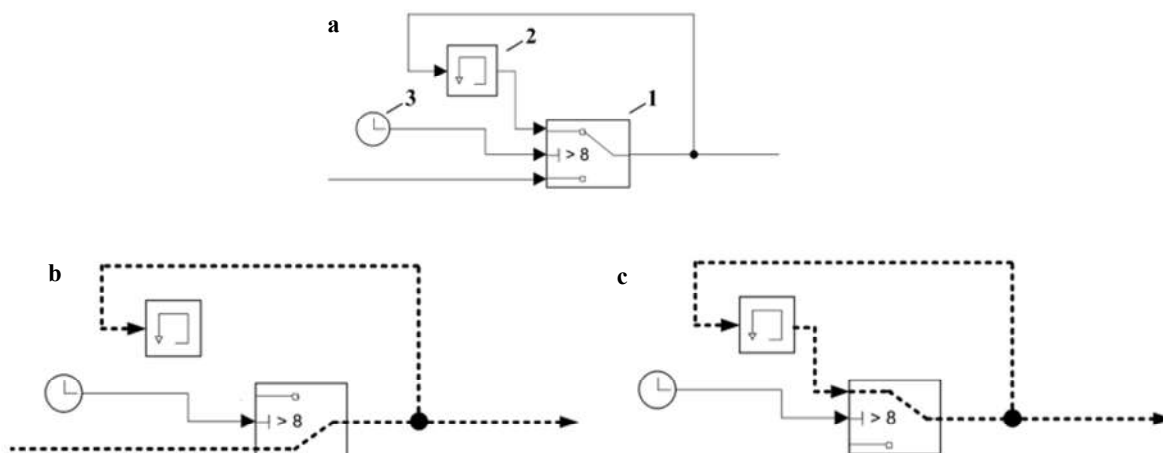


4.17. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas virtuālais modelis pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences Matlab Simulink vidē:

1 – silšanas modeļa blokshēma; 2 – statora tinumu temperatūras izmaiņas noteikšanas blokshēma pēc rotācijas frekvences; 3 – silšanas modeļa pārslēgšanas bloks; 4 – eksperimentālo un simulācijas rezultātu salīdzināšanas bloks; 5 – simulācijas kļūdas aprēķinu bloks

Pēc palaišanas pārejas procesa ir nepieciešams izmērīt sākuma strāvu I_0 , lai noteiktu k un pēc tam koeficientu $a(k)$. Pārslēgšanas laikā ir jānosaka sākuma rotācijas frekvence n_0 . Pēc tam tiek periodiski noteikta rotācijas frekvence n un aprēķināta ātruma izmaiņa $\Delta n = n_0 - n$. Reizinot rotācijas frekvences izmaiņu Δn ar koeficientu $a(k)$, iegūst statora tinumu temperatūras izmaiņu un tiek noteikta statora temperatūra θ_t . Lai novērtētu šīs metodes precizitāti, tika izveidots virtuālais modelis Matlab Simulink programmā un simulācijas rezultāti salīdzināti ar eksperimentāliem rezultātiem.

Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu silšanas modelis Matlab Simulink vidē ir parādīts 4.17. attēlā. Modelis sastāv no 5 blokiem. Pirmais bloks (4.17.att. – 1) ietver sevī otrās kārtas silšanas modeli un ieejas parametru – statora strāvu. Otrās kārtas silšanas modelis Simulink vidē tika apskatīts 4.8. attēlā. Kad silšanas modeļa pārslēgšanas bloks (trešais bloks) tiek pārslēgts, otrais bloks aprēķina temperatūras izmaiņu pēc elektrodzinēja apgriezieniem. Ceturtajā blokā, izmantojot “Simin” bloku, tiek salīdzināti eksperimentālie rezultāti ar simulācijas rezultātiem un noteikta simulācijas kļūda, kas tiek aprēķināta piektajā blokā.

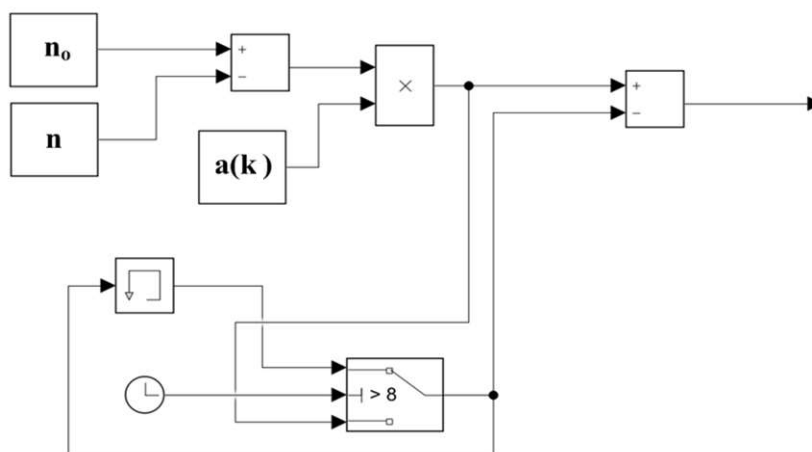


4.18. att. Pārslēgšanas bloka starp silšanas modeļa un temperatūras noteikšanas pēc rotācijas frekvences modeļiem uzbūve un darbība Matlab Simulink vidē:

a – pārslēgšanas bloka uzbūve; b – signālu plūsma pirms pārslēgšanas; c – signālu plūsma pēc pārslēgšanas; 1 – “Switch” bloks; 2 – “Memory” bloks; 3 – “Clock” bloks

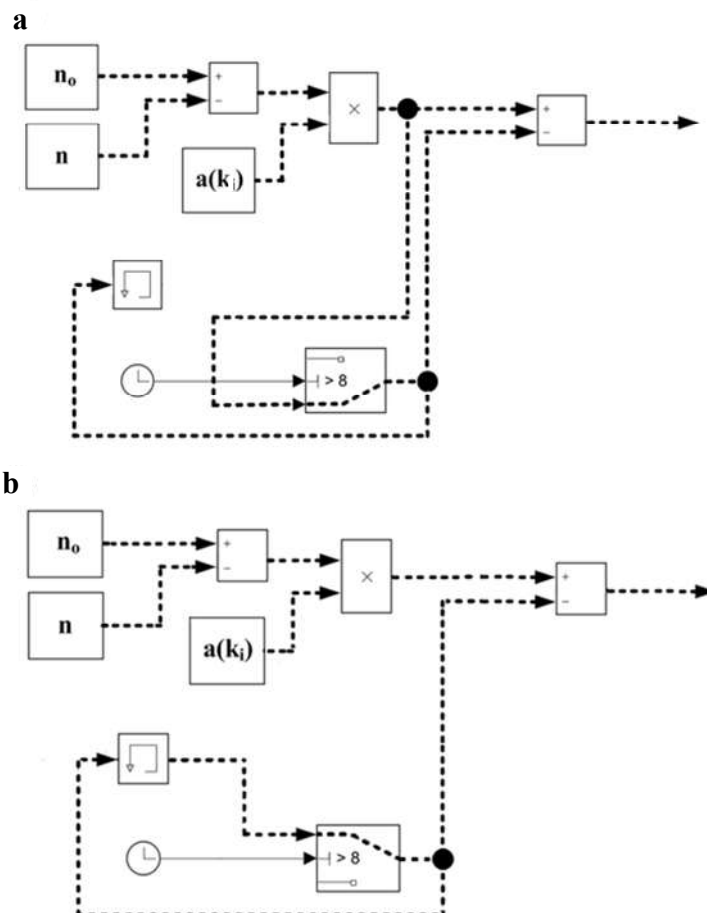
Trešais bloks (4.18.attēls - a) sastāv no “Clock”, “Switch” un “Memory” blokiem. “Clock” bloks ģenerē signālu atbilstoši simulācijas laikam. “Switch” bloks pārslēdz ieejas signālu atbilstoši iestatītam nosacījumam. “Memory” bloks saglāba ieejas signālu dotajā simulācijas momentā un ģenerē to pašu signālu. “Switch” bloka pārslēgšanas nosacījums ir 8 min, t.i., kad simulācijas laiks būs 8 minūtes, bloka ieejas tiks pārslēgtas. Simulācijas periodā no 0 līdz 8 min uz “Switch” bloku tiek padots signāls no silšanas modeļa un no “Switch” bloka izejas vienlaikus tiek padots signāls atpakaļ uz “Memory” bloku, kurš saglabā šo vērtību (4.18. attēls – b). Kad simulācijas laiks ir 8 minūtes, ieeja tiek pārslēgta un caur bloku “Memory” tiek izveidota nepārtrauktā saite, visu laiku tiek ģenerēts un saglabāts viens un tas pats signāls (4.18. attēls – c). Piemēram, ja 8. minūtē silšanas modeļa izejas signāls bija 60 °C, tad šis skaitlis tiek saglabāts “Memory” blokā un pēc 8. minūtes tiek padots uz bloku “Switch”. Tā kā “Switch” izeja ir savienota ar bloku “Memory”, tad 60 °C tiek padoti atpakaļ uz “Memory” bloku. Tāpēc pēc 8. minūtes visā simulācijas laikā no “Switch” bloka izejā būs 60 °C.

Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras izmaiņas pēc rotācijas frekvences bloka uzbūve parādīta 4.19. attēlā. Modelis sastāv no elektrodzinēja sākuma rotācijas frekvences (netiek noteikts palaišanas brīdī), no esoša rotācijas frekvences bloka, kas ar “Simin” bloku palīdzību tiek importēti no Matlab darba virsmas uz Simulink, koeficienta $a(k)$ bloka, “Clock”, “Memory” un “Switch” blokiem.



4.19. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas pēc rotācijas frekvences modeļa uzbūve Matlab Simulink vidē

Lai simulācijas programmā Simulink varētu simulēt asinhrona elektrodzinēja silšanas procesu ar silšanas modeļa palīdzību un pēc rotācijas frekvences, ir nepieciešams, lai no temperatūras noteikšanas pēc rotācijas frekvences bloka signāls nāktu tikai pēc 8. minūtes. Tajā pašā laikā šīs metodes analīzei un pārbaudei ar eksperimenta rezultātiem tika izmantoti rotācijas frekvences mērījumi visa eksperimenta laikā. Tāpēc šeit arī tiek izmantoti “Clock”, “Memory” un “Switch” bloki.



4.20. att. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas pēc rotācijas frekvences modeļa uzbūve darbībā pirms un pēc bloka “Switch” pārslēgšanas:
a – darbība pirms pārslēgšanas; b – darbība pēc pārslēgšanas

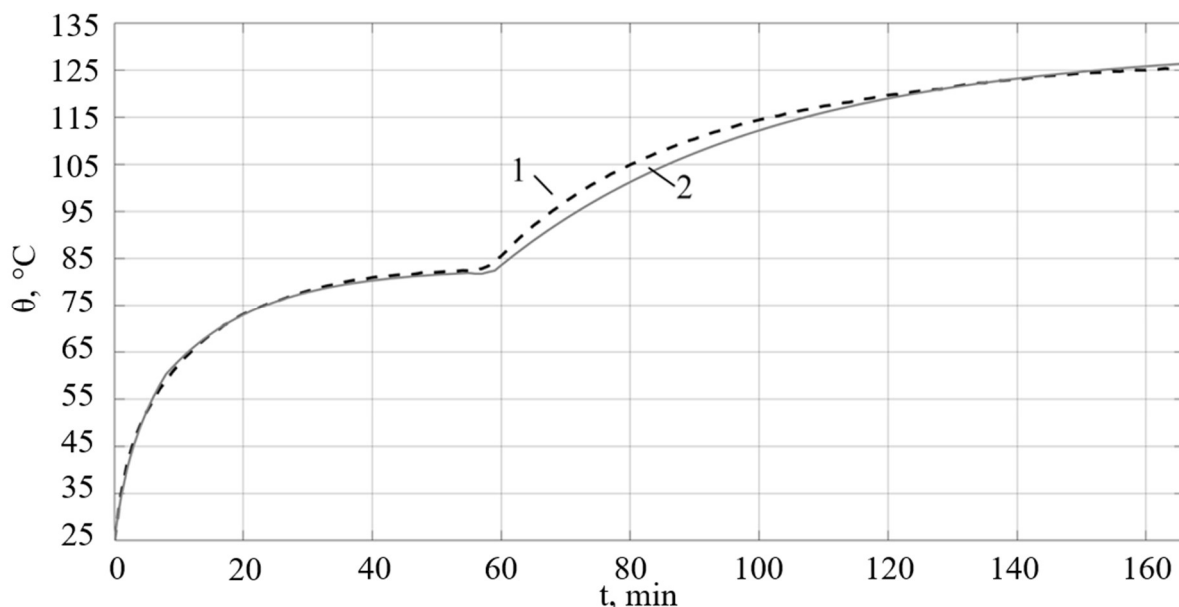
Pirmās 8 minūtēs, starpība starp n_0 un n tiek reizināta ar koeficientu $a(k)$. Tālāk šis signāls tiek padots uz saskaitīšanas bloka “+” ieeju un vienlaikus arī uz bloku “Memory” un “Switch”, caur kuru tas pats signāls iet uz saskaitīšanas bloka “-” ieeju (skat. 4.20.att. – a). Tāpēc rezultātā no skaitīšanas bloka pirmās 8 minūtes signāls ir vienāds ar 0. Pēc 8. minūtes bloka “Switch” ieeja mainās (skat. 4.20.att. – b) un skaitīšanas bloka izejā ir temperatūras izmaiņa, kas tiek noteikta pēc rotācijas frekvences, tiek pieskaitīta klāt temperatūrai, kura tika noteikta pēc silšanas modeļa 8. minūtē.

4.4. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras modelēšana pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences

1.1 kW ABB asinhronā elektrodzinēja statora tinumu silšanas process tika simulēts ar iepriekš aprakstīto metodi Matlab Simulink vidē un salīdzināts ar eksperimenta rezultātiem pie sekojošām slodzēm un dzesēšanas apstākļiem:

1. pie nominālās slodzes $k = 1$ bez dzesēšanas traucējumiem un, sasniedzot stacionāru temperatūru, ar dzesēšanas traucējumiem;
2. pie slodzes $k = 0.98$ ar dzesēšanas traucējumiem un, sasniedzot stacionāru temperatūru, bez dzesēšanas traucējumiem;
3. pie slodzes $k = 0.91$ bez dzesēšanas traucējumiem un, sasniedzot stacionāru temperatūru, ar dzesēšanas traucējumiem;
4. pie slodzes $k = 0.76$ bez dzesēšanas traucējumiem;
5. pie pārslodzes $k = 1.18$ ar un bez dzesēšanas traucējumiem.

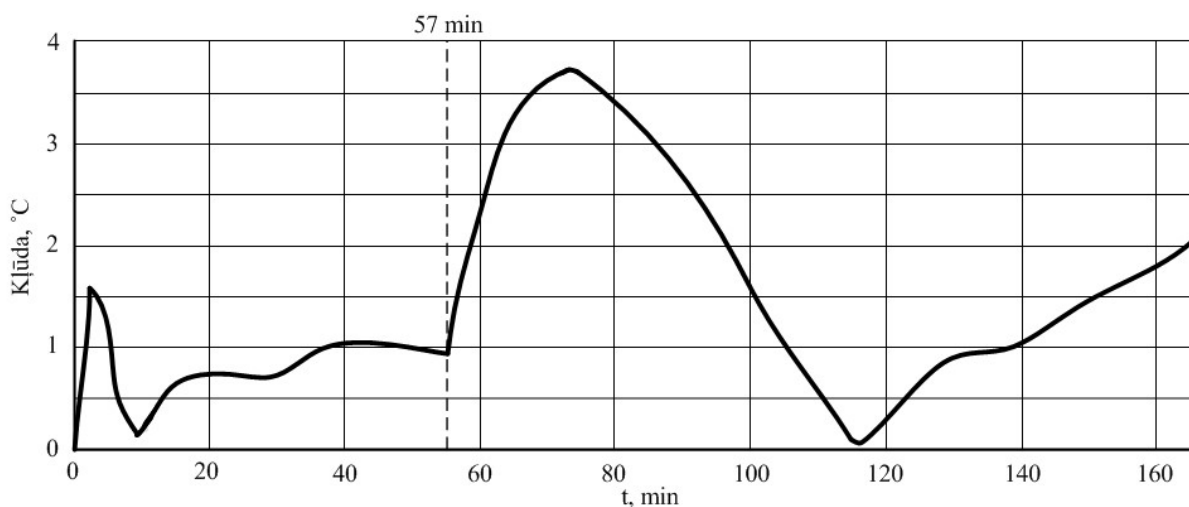
Pie nominālas slodzes $k = 1$ bez dzesēšanas traucējumiem, statora tinumu temperatūras simulācijas rezultātu maksimālā starpība no eksperimenta rezultātiem ir $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (skat. 4.21. un 4.22. att.). Pēc stacionārās temperatūras sasniegšanas bez dzesēšanas traucējumiem un elektrodzinēja gaisa ventilācijas bloķēšanas, starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem silšanas pārejas procesa sākumā palielinās, sasniedzot $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elektrodzinēja silšanas pārejas procesa beigās starpība starp simulācijas un eksperimenta rezultātiem samazinās līdz $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šādu starpības izmaiņu pēc dzesēšanas traucējuma parādīšanās rada silšanas inerces starpība starp rotoru un statoru.



4.21. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie nominālas slodzes:

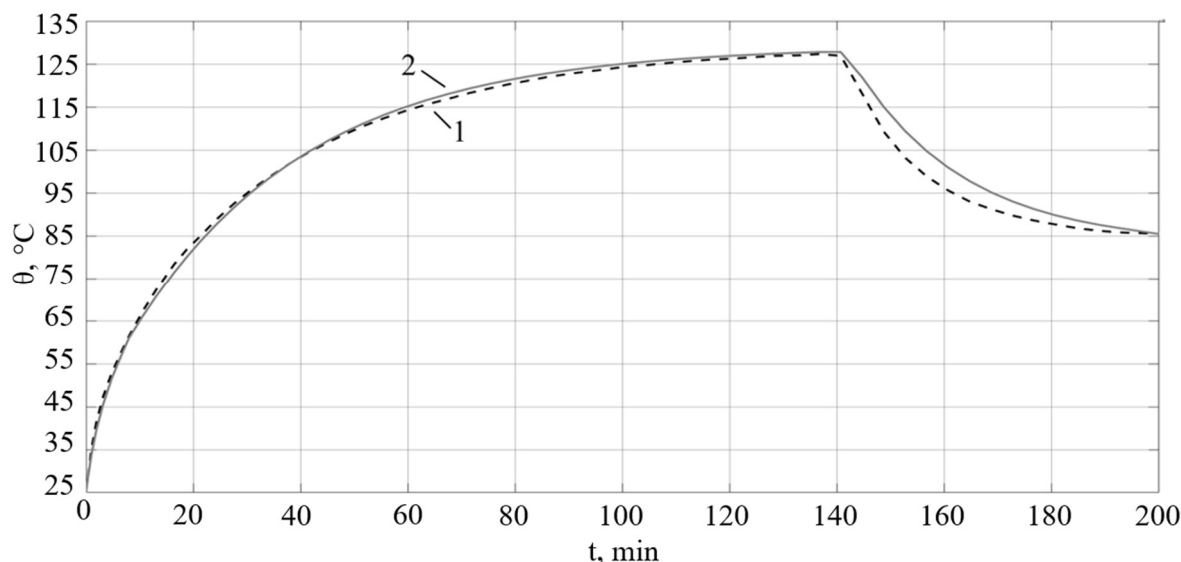
1 – statora tinuma temperatūras eksperimenta rezultāti; 2 – statora tinuma temperatūras simulācijas rezultāti

Statoram silšanas inerce (silšanas laika konstante) ir mazāka, tāpēc eksperimentālie rezultāti ir lielāki nekā simulācijas silšanas pārejas procesa sākumā pēc dzesēšanas traucējumu sākšanas. Rotorā silšanas ir lēnāka, tāpēc rotācijas frekvence samazinās lēnāk un rodas starpība starp eksperimenta un simulācijas rezultātiem. Šī kļūdas maksimālā vērtība sasniedz ap 20 min kopš dzesēšanas traucējuma, bet pēc tam kļūda samazinās līdz $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, sasniedzot silšanas procesa beigās.



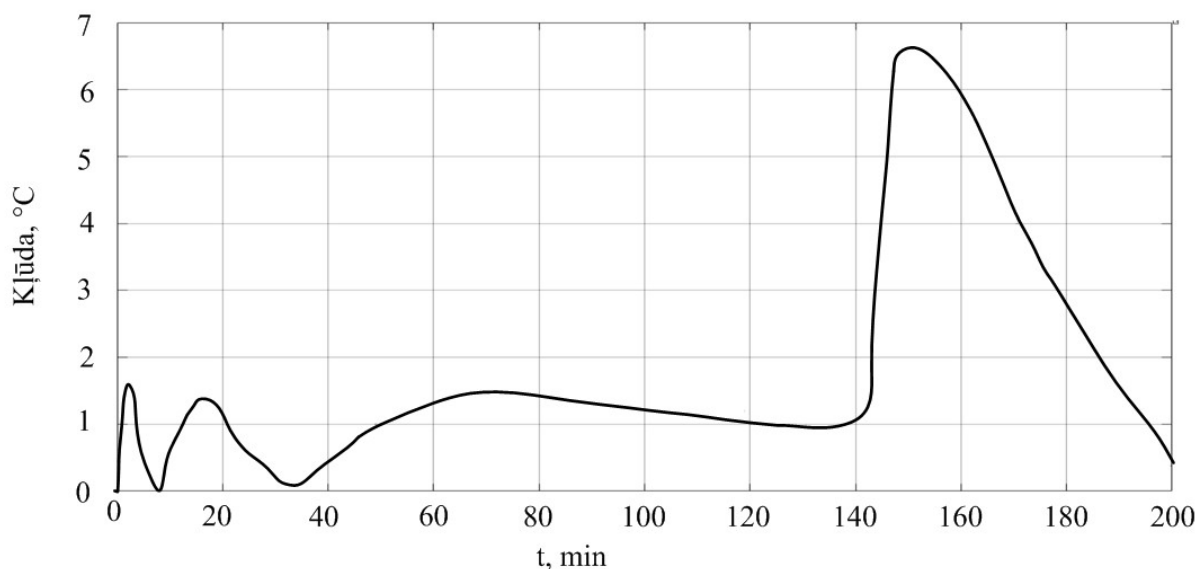
4.22. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie nominālas slodzes

Pie slodzes $k = 0.98$ un dzesēšanas traucējuma (skat.4.23. att.) no silšanas procesa sākuma līdz silšanas pārejas procesa beigām simulācijas kļūda nepārsniedz $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (skat. 4.24. att.). Pēc 140 min, sasniedzot stacionāro temperatūru, elektrodzinēja dzesēšana tika atjaunota un dzinēja temperatūra sāk samazināties. Arī šajā situācijā rotora lielākas silšanas inerces dēļ ir kļūda. Kļūdas maksimālā vērtība ir gandrīz $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 minūtes pēc dzesēšanas apstākļu izmaiņas. Pēc tam kļūda samazinās un silšanas pārejas procesa beigās samazinās līdz $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



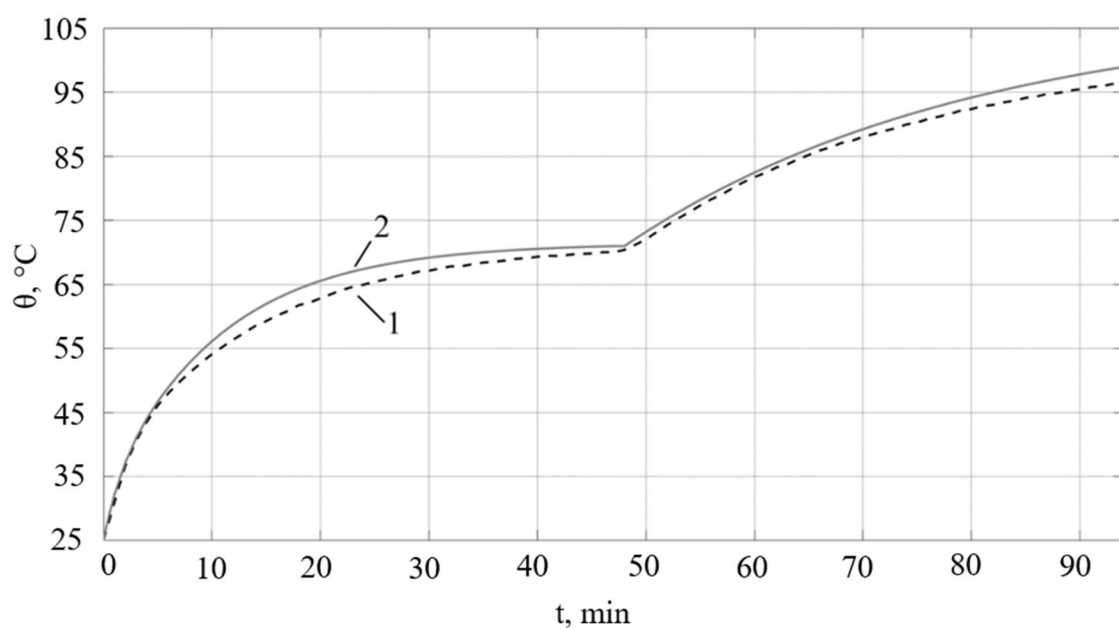
4.23. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie slodzes $k = 0.98$:

1 – statora tinuma temperatūras eksperimenta rezultāti; 2 – statora tinuma temperatūras simulācijas rezultāti



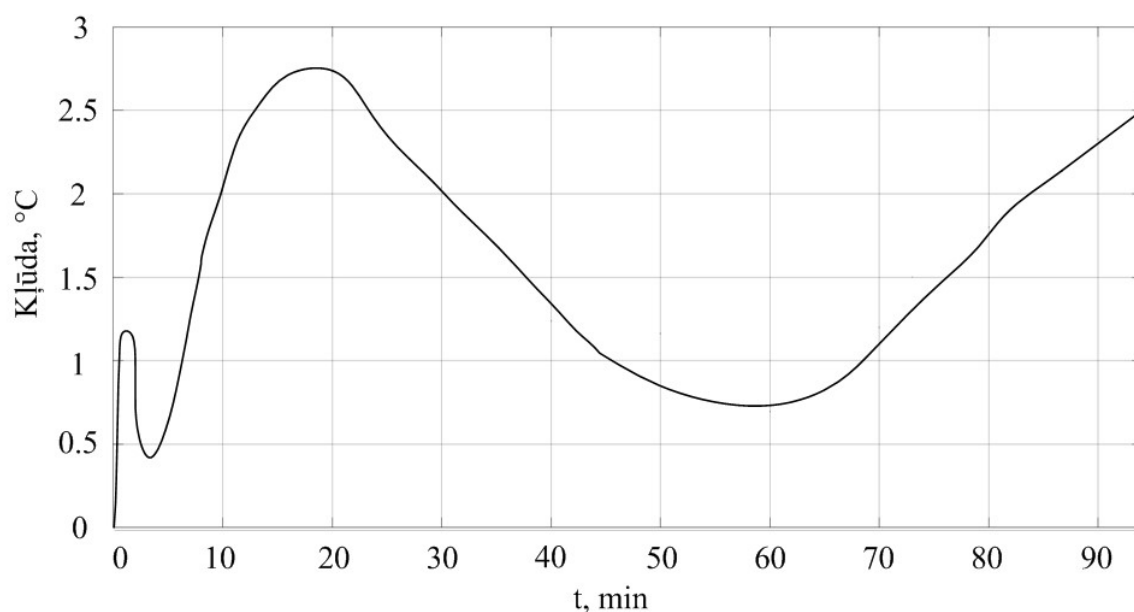
4.24. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie slodzes $k = 0.98$

Pie slodzes $k = 0.91$ bez dzesēšanas traucējumiem simulācijas rezultāti ir ar nelielu lielāku kļūdu – $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (skat. 4.25. att.). Sasniedzot silšanas procesa stacionāro temperatūru un izveidojot dzesēšanas traucējumus, silšanas kļūda nepalielinās strauji kā pie nominālās slodzes. 10-15 min pēc dzesēšanas traucējumu izveidošanās, kļūda gandrīz nemainās un, sasniedzot stacionāro silšanas procesu, sasniedz tikai $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mazas jaudas asinhronajiem elektrodzinējiem tukšgaitas strāva ir apmēram 60% ($k = 0.6$) no nominālās strāvas.



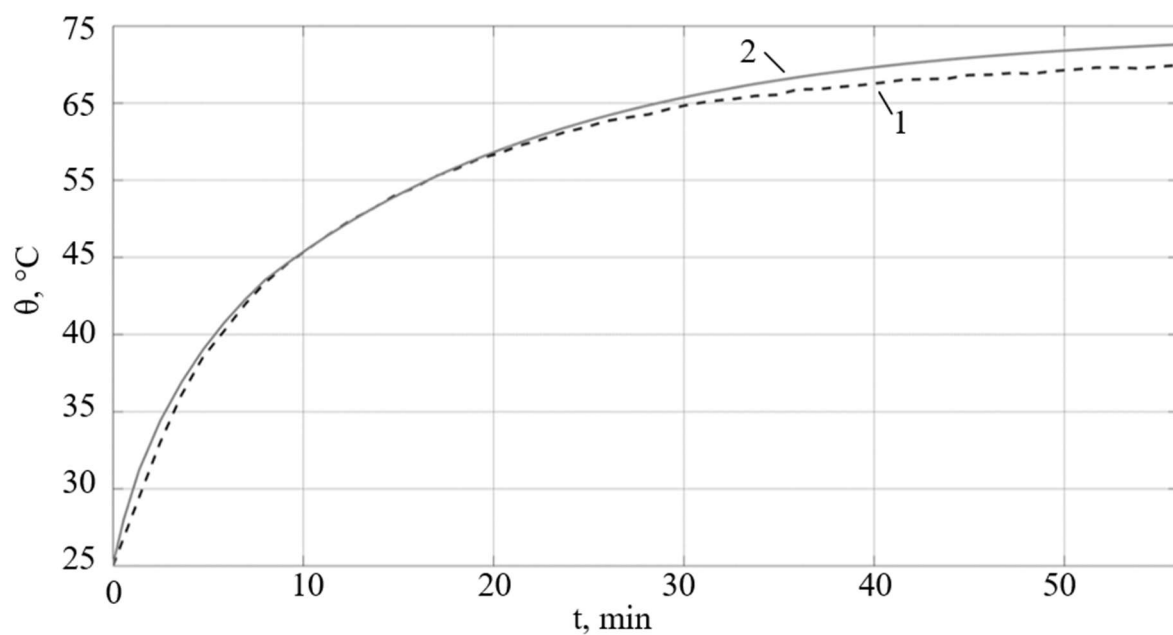
4.25. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie slodzes $k = 0.91$:

1 – statora tinuma temperatūras eksperimenta rezultāti; 2 – statora tinuma temperatūras simulācijas rezultāti



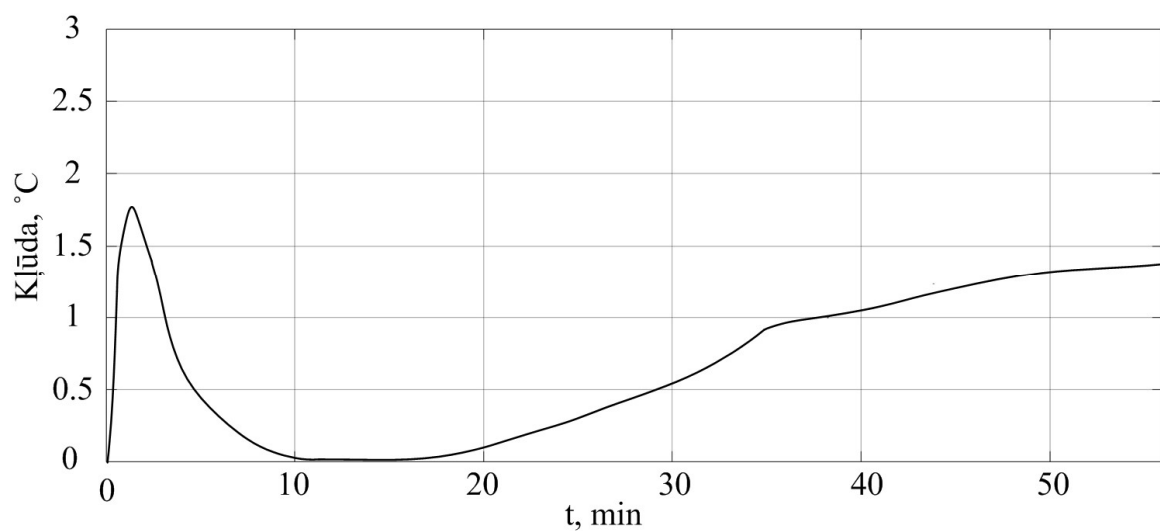
4.26. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie slodzes $k = 0.91$

Samazinot slodzes koeficientu līdz $k = 0.76$, statora tinumu temperatūra palielinās tikai par $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ (skat. 4.27. att.) un pie dzesēšanas traucējumiem temperatūra būtu būtiski mazāka par tinumu izolācijas kritisko temperatūru, tāpēc statora tinumu silšanas simulācija tika apskatīta tikai bez dzesēšanas traucējumiem. Simulācijas rezultāti parāda, ka arī pie zemas elektrodzinēja noslodzes simulācijas precizitāte ir laba – nepārsniedz $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (skat. 4.28. att.).

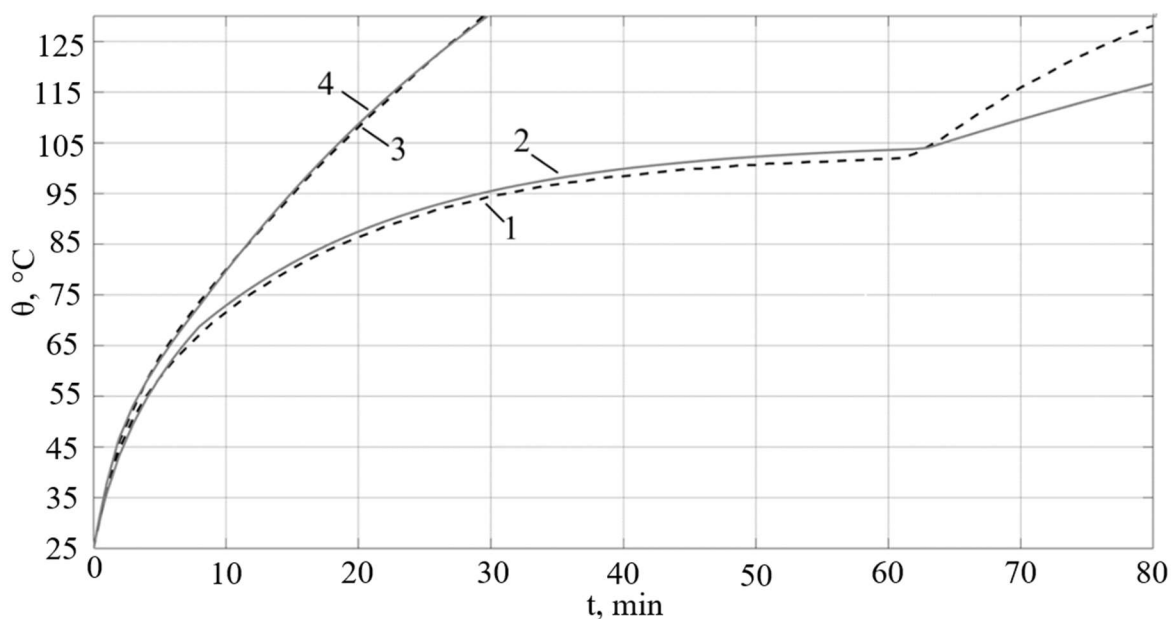


4.27. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie slodzes $k = 0.76$:

1 – statora tinuma temperatūras eksperimenta rezultāti; 2 – statora tinuma temperatūras simulācijas rezultāti



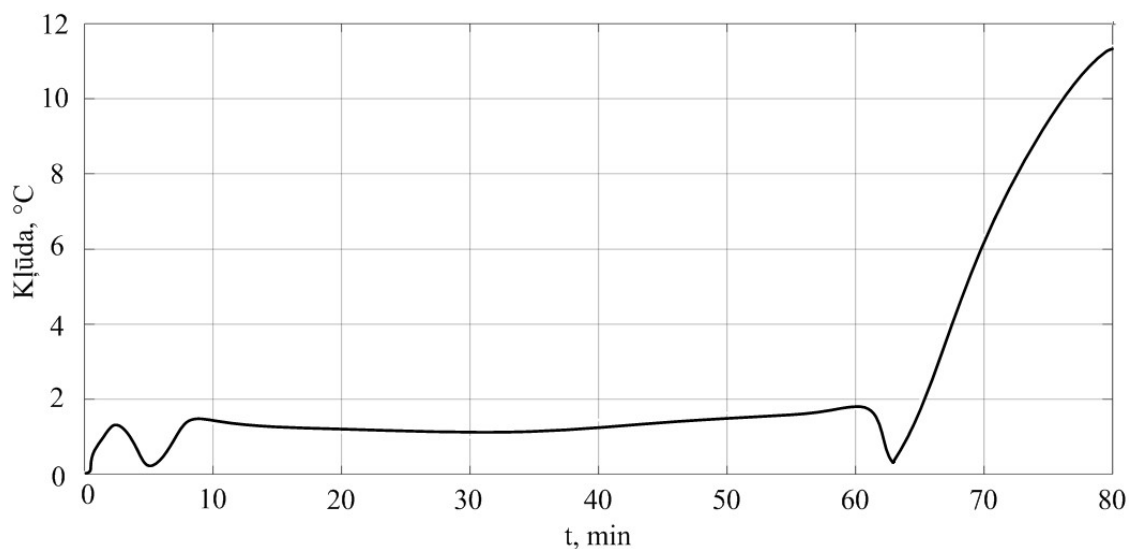
4.28. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie slodzes $k = 0.76$



4.29. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācija pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences pie pārslodzes $k = 1.18$:

1 – statora tinuma temperatūras eksperimenta rezultāti bez dzesēšanas traucējumiem sākumā; 2 – statora tinuma temperatūras simulācijas rezultāti bez dzesēšanas traucējumiem sākumā; 3 – statora tinuma temperatūras eksperimenta rezultāti ar dzesēšanas traucējumiem; 4 – statora tinuma temperatūras simulācijas rezultāti ar dzesēšanas traucējumiem

Pārslodzes gadījumā bez dzesēšanas traucējumiem simulācijas rezultāti ir ļoti tuvu eksperimentāliem rezultātiem (skat. 4.29. att.). Simulācijas kļūda nepārsniedz $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (skat. 4.30. att.). Mainoties dzesēšanas apstākļiem pārslodzes režīmā, kad tinums uzsilis līdz nostabilizētai temperatūrai, rodas lielā simulācijas kļūda, jo silšana ir intensīvāka un statora tinums uzsils daudz straujāk nekā rotors. No 4.29. un 4.30. attēliem var redzēt, ka tinumu virstemperatūrai sasniedzot $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tinumu temperatūra $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ pie vides temperatūras $27\text{ }^{\circ}\text{C}$), simulācijas kļūda sasniedz $11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pēc šīs kļūdas dinamikas, var redzēt, ka kļūda būtu lielāka, ja turpinātu elektrodzinēja silšanu. Šajā pārslodzes gadījumā strāva ir par 18% procentiem lielāka nekā nominālā strāva un aizsardzības ierīces ar nostrādes klasēm 10, 20 un 30 atslēgs elektrodzinēju pēc apmēram 20 minūtēm.



4.30. att. Asinhronā elektrodzinēja statora temperatūras simulācijas kļūda pie pārslodzes

Šajā laikā elektrodzinējs nespēs uzsilt līdz kritiskai temperatūrai, ja vides temperatūra ir 20-30 °C un nav nepieciešamības pēc statora tinumu temperatūras noteikšanas. Ja vides temperatūra ir zema, apmēram – 10-20 °C un elektrodzinējs tiek darbināts ar pārslodzi, tad pēc simulācijas rezultātiem var secināt, ka bez dzesēšanas traucējumiem ar aprakstīto statora tinumu noteikšanas metodi var simulēt elektrodzinēja statora tinumu temperatūru ar labu precizitāti. Ja elektrodzinēja statora tinumu izolācijas klase ir B un pārslodzes laikā notiek pēkšņs dzesēšanas traucējums, tad inerces kļūdas dēļ laicīgi var arī nenoteikt momentu, kad statora tinumu temperatūra sasniegs kritisko lielumu. Ja elektrodzinēja izolācijas klase ir F vai lielāka, tad jāveic eksperimentālie pētījumi ar šādu elektrodzinēju, jo iespējams šī kļūda samazināsies līdz momentam, kad temperatūra sasniegs kritisko vērtību.

Dzesēšanas traucējuma gadījumā visā silšanas procesa laikā, līdz statora tinumu temperatūra sasniedza 130 °C, simulācijas rezultāti sakrīt ar eksperimenta rezultātiem, atšķirība nepārsniedz 1 °C. Līdz ar to, ar izstrādāto metodi precīzi var noteikt asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūru elektrodzinējam, kurš sāka darbību arī pie dzesēšanas traucējumiem.

Kopumā, pie nominālās un zemākām slodzēm asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras simulācijas rezultāti ir ar labu precizitāti, simulācijas kļūda nepārsniedz 2.5 °C. Mainoties dzesēšanas apstākļiem, rodas lielāka simulācijas kļūda rotora lielākas silšanas inerces dēļ, sasniedzot līdz pat 7 °C. Elektrodzinēja silšanas pārejas process pie nominālās slodzes ilgst pietiekoši ilgi, lai šī kļūda samazinātos līdz 1- 2 °C. Līdz ar to pēkšņas dzesēšanas traucējumi var izraisīt salīdzinoši lielās kļūdas, tomēr sasniedzot stacionāro silšanas procesu (varbūt arī kritisko tinumu izolācijas temperatūru pie B klases izolācijas), šī kļūda samazinās un ir 1-2 °C robežās.

Mūsdienās elektrodzinēju ražotājiem ir pieejamas programmas, kas precīzi var simulēt to mehāniskas raksturlīknes un silšanu, piemēram, Motor-CAD (Motor Design). Tāpēc ražotājiem nav nepieciešams veikt elektrodzinēju silšanas eksperimentus, lai noteiktu nepieciešamos parametrus un koeficientus šajā darbā piedāvātam statora tinumu temperatūras noteikšanas algoritmam, jo tos var noteikt, izmantojot precīzus asinhronā elektrodzinēja silšanas un mehānisko parametru noteikšanas modeļus. Nepieciešamo informāciju lietotājam ražotājs var norādīt elektrodzinēja pasē, ja lietotājs gribēs izmantot šo algoritmu.

Līdz ar to simulācijas rezultāti apstiprina izvirzīto hipotēzi, ka asinhrono elektrodzinēju statoru tinumu temperatūru var noteikt, izmantojot elektrodzinēja rotācijas frekvences mērījumus neregulējamai piedziņai ar nemainīgo slodzi, kas ar algoritma palīdzību nosaka statora tinumu temperatūras izmaiņas pēc rotācijas frekvences izmaiņām.

4.5. Nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu silšanas simulācija, izmantojot pirmās kārtas silšanas modeli, parāda, ka silšanas pārejas procesa beigās simulācijas rezultāti ir līdz pat 8 °C lielāki par eksperimenta rezultātiem pie nominālās slodzes. Pirmās kārtas silšanas modeļa izmantošana asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai no pārslodzes var priekšlaicīgi atslēgt elektrodzinēju no tīkla, elektrodzinējam nesasniedzot izolācijas klases pieļaujamo/kritisko temperatūru.
2. Darbā tika apskatīts otrās kārtas asinhronā elektrodzinēja silšanas modelis kā elektrodzinējs sastāv no diviem ķermeņiem – statora tinuma un korpusa, nevis stators un rotors, kā citos darbos. Statora tinumu silšanas simulācijas rezultāti parāda, ka modelis nodrošina pietiekoši labu statora tinumu temperatūras noteikšanas precizitāti - 3.5 °C kļūda pie nominālās slodzes. Būtiska simulācijas kļūda radīsies pie būtiskām asinhronā elektrodzinēja pārslodzēm ($k > 1.5$), bet pie tādām pārslodzēm aizsardzības iekārtas atslēgts elektrodzinēju pirms statora tinumu temperatūra sasniegs pieļaujamās temperatūras lielumu.

3. Izstrādāts otrās kārtas asinhronā elektrodzinēja silšanas modelis nespēj reaģēt uz elektrodzinēja dzesēšanas apstākļu izmaiņām, tāpēc tika izstrādāta kombinētā metode statora tinumu temperatūras noteikšanai. Pēc elektrodzinēja palaišanas, statora tinumu temperatūra tiek simulēta ar otrās kārtas silšanas modeli un pēc tam statora tinumu temperatūras izmaiņas tiek noteiktas pēc elektrodzinēja rotācijas frekvences izmaiņām.
4. Statora tinumu temperatūras simulācijas pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences metodes parāda, ka pie nominālās un zemākām slodzēm simulācijas rezultāti ir ar labu precizitāti, simulācijas kļūda nepārsniedz 2.5 °C. Mainoties dzesēšanas apstākļiem, rodas lielāka simulācijas kļūda rotora lielākas silšanas inerces dēļ, sasniedzot līdz pat 7 °C. Elektrodzinēja silšanas pārejas process pie nominālās slodzes ilgst pietiekoši ilgi, lai šī kļūda samazinātos līdz 1 – 2 °C. Līdz ar to pēkšņas dzesēšanas traucējumi var izraisīt salīdzinoši lielās kļūdas, tomēr sasniedzot stacionāro (varbūt arī kritisko tinumu izolācijas temperatūru pie B klases izolācijas), šī kļūda samazinās un ir 1-2 °C robežās. Pēc simulācijas rezultātiem var secināt, ka izvirzītā darba hipotēze tika apstiprināta.
6. Mūsdienās elektrodzinēju ražotājiem ir pieejamas programmas, kas precīzi var simulēt to mehāniskas raksturlīknes un silšanu. Tāpēc ražotājiem nav nepieciešams veikt elektrodzinēju silšanas eksperimentus, lai noteiktu nepieciešamos parametrus un koeficientus šajā darbā piedāvātam statora tinumu temperatūras noteikšanas algoritmam, jo tos var noteikt, izmantojot asinhrono elektrodzinēju simulācijas programmas.

5. STATORA TINUMU TEMPERATŪRAS NOTEIKŠANAS METODES IEVIEŠANAS EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS

Ceturtajā nodaļā tika veikti mazas jaudas asinhronā elektrodzinēja silšanas simulācijas pētījumi, izmantojot kombinēto metodi pēc silšanas modeļa un rotācijas frekvences izmaiņas. Rezultāti liecina, ka elektrodzinēju statora tinumu temperatūras var noteikt pēc silšanas modeļa un elektrodzinēja rotācijas frekvences. Šajā nodaļā tiek veikts ekonomiskais novērtējums, ja šo ieviestu praksē. Kā piemērs tiks izmantots pirmajā nodaļā apskatītā vistu kūts SIA “Balticovo” olu ražotne Iecavā. Lai to veiktu, tiks salīdzinātas divas situācijas.

Vispirms tiks apskatīta situācija, ja vistu kūtī uzstādītu iekārtu, lai noteiktu vairāku ventilatoru elektropiedziņas (1.1 kW asinhrono elektrodzinēju) statora tinumu temperatūru. Sasniedzot pieļaujamo statora tinumu izolācijas temperatūru (vai zemāku iestatīto temperatūru), iekārta izpildīs ieprogrammēto komandu. SIA “Balticovo” gadījumā, vistu kūtīs ir nepieciešams laicīgi noteikt elektrodzinēja paaugstināto silšanu, ko izraisa dzesēšanas traucējumi putekļu dēļ. Laicīga elektrodzinēju dzesēšanas traucējumu konstatēšana neļaus statora tinumu temperatūrai sasniegt kritisko izolācijas temperatūru un varēs laicīgi ielānēt un veikt elektrodzinēja apkopi.

Otrā situācija ir esošā situācija SIA “Balticovo” olu ražotnē – elektrodzinēji netiek pietiekoši regulāri tīrīti no putekļiem un regulāri notiek to atteice. No ierindas izgājuši elektrodzinēji tiek demontēti un uzglabāti elektrocehā un reizi mēnesī tiek vesti uz elektrodzinēju pārtīšanu Jelgavā.

Divu situāciju analīzei nepieciešams noteikt elektrodzinēja atteices intensitāti. SIA “Balticovo” uzņēmumā Iecavā netiek reģistrēts elektrodzinēja darba laiks līdz atteicei un noteikt šo laiku nav iespējams, jo tikai neliela daļa no visiem ventilatoru elektrodzinējiem strādā visu laiku gada garumā. Tāpēc tika apskatīta metode asinhronā elektrodzinēja atteices intensitātes noteikšanai.

5.1. Asinhrono elektrodzinēju drošuma noteikšana

Dažādu variantu un faktoru ietekmi uz elektroiekārtas drošumu novērtēšanai izmanto kvantitatīvos drošuma rādītājus – atteices intensitāte $\lambda_e(t)$; atteices frekvence $a(t)$; bezatteices darbības varbūtība $P(t)$; atteices varbūtība $Q(t)$; bezatteices darbības vidējais laiks T_v . Atteices intensitāte $\lambda_e(t)$ – laika vienībā bojāto elementu (ierīču) skaita attiecība pret darbspēju saglabājušo elementu skaitu laika periodā t . Atteices frekvence $a(t)$ – atteices sadalījuma blīvuma funkcija, kas parāda laika vienībā bojāto elementu skaita attiecību pret visu pārbaudāmo elementu skaitu. Bezatteices darbības varbūtība $P(t)$ – tāda fakta varbūtība, ka laika periodā t elementā vai ierīcē nerodas atteice. Atteices varbūtība $Q(t)$ – tāda fakta varbūtība, ka laika periodā t elementā vai ierīcē rodas atteice. Bezatteices darbības vidējais laiks T_v – ierīces sastrādes, līdz pirmajai atteicei, matemātiskā cerība (Šnīders, 1998).

Laika intervāls starp divām secīgām ierīces vai sistēmas atteicēm ir nepārtraukts nejaušs lielums, kuru raksturo attiecīgs varbūtību sadalījuma likums. Normālas darbības periodā, kad atteices intensitāte $\lambda_e(t)$ daudzos gadījumos ir konstants lielums ($\lambda_e(t) = \lambda_e = \text{const.}$), ierīces vai sistēmas drošumu nosaka eksponenciālais sadalījuma likums. Eksponenciālais bezatteices darbības laika sadalījums attiecināms uz elementiem, kuri normālas darbības periodā noveco ļoti lēni. Prakse liecina, ka šī īpašība piemīt lielākajai daļai elektronikas un automātikas elementu un ierīču. Ja pārsvarā rodas atteices nolietošānās dēļ, tad jāizmanto normālais sadalījuma likums jeb tiek izmantots Gausa likums, ja pārsvarā rodas atteices nolietošānās dēļ. Ja rodas abu veidu atteices, un neviena no tām nav pārsvarā, tad sistēmu drošumu aprēķina, izmantojot gamma sadalījumu. Dažos gadījumos atteices intensitāte arī normālas darbības periodā nav konstanta. Tad drošuma aprēķināšanai lieto Veibula sadalījumu. Normālo un gamma sadalījuma likumus elektroiekārtu un sistēmu drošuma analīzē pielieto tikai īpašos

gadījumos, kad eksponenciālais sadalījuma likums vai Veibula likums nedod pietiekami precīzus rezultātus (Šnīders, 1998).

Elektrodzinēju drošumu ekspluatācijā nosaka to projektēšanas un izgatavošanas kvalitāte, pareiza izvēle pēc elektrodzinēja izpildījuma, slodzes un darba vides apstākļiem. Būtiskākie ekspluatācijas faktori, kas iespaido elektrodzinēja drošumu, ir tinumu temperatūra, ieslēgšanas biežums un mehāniskās pārslodzes, apstākļi (Šnīders, 1998).

Eksponenciālo sadalījuma likumu lieto, lai novērtētu automātikas jutīgo elementu – mērīšanas pārveidotāju, elektronisko un elektromagnētisko elementu, elektrisko ķēžu komutācijas ierīču, kā arī izpildmehānismu un elektriskā tīkla komponentu (elektropārvades līniju, tīkla transformatoru u.c.) drošumu normālas darbības periodā. Eksponenciālais drošuma likums pielietojams tad, ja iekārtā rodas pēkšņas (nejaušas) atteices, bet nav vēl nolietojšanās pazīmju. Eksponenciālā sadalījuma likuma kvantitatīvo drošuma rādītāju analītiskās izteiksmes (Šnīders, 1998):

$$P(t) = e^{-\lambda_e \cdot t}, \quad (5.1)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda_e \cdot t}, \quad (5.2)$$

$$a(t) = \lambda_e \cdot e^{-\lambda_e \cdot t}, \quad (5.3)$$

$$T_v = \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_e t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda_e}, \quad (5.4)$$

kur λ_e – elektrodzinēju atteices intensitāte, h^{-1} ;
 t – laiks, h;
 $P(t)$ – bezatteices darbības varbūtība;
 $Q(t)$ – atteices varbūtība;
 T_v – bezatteices darbības vidējais laiks, h.

Asinhrono elektrodzinēju drošuma statistiskajos pētījumos tika iegūta funkcionālā sakarība, kas saista elektrodzinēju atteižu intensitāti ar galvenajiem ekspluatācijas faktoriem – statora tinumu temperatūru, ieslēgšanas biežumu un vibrāciju ātrumu (Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.И., 1988):

$$\lambda_{vid} = \exp - (K + 0.135 \cdot \theta - 6.4 \cdot 10^{-4} \theta^2 - 1 \cdot 10^{-3} f_e - 2.47 \cdot 10^{-5} f_e \cdot \theta - 3.3 \cdot 10^{-7} v \cdot \theta^2 - 8.1 \cdot 10^{-4} v^2), \quad (5.5)$$

kur K – koeficients, kas raksturo elektrodzinēja projektēšanas un izgatavošanas stadijā sasniegto drošuma līmeni (jaunākajiem Rietumeiropas firmu elektrodzinējiem $K = 7 \pm 0.2$);
 λ_{vid} – elektrodzinēju vidējā atteices intensitāte, h^{-1} ;
 f_e – ieslēgšanas biežums, h^{-1} ;
 v – vibrāciju ātrums, $mm \cdot s^{-1}$.

θ , f un v lielumus var aprēķināt pēc sekojošām sakarībām:

$$\theta = 155 + (\theta_f - \theta_{nom}), \quad (5.6)$$

$$f_e = 2 + (f_f - f_{nom}), \quad (5.7)$$

$$v = 5 + (v_f - v_{nom}), \quad (5.8)$$

kur θ_f, f_f, v_f – parametru faktiskie lielumi;
 $\theta_{nom}, f_{nom}, v_{nom}$ – parametru nominālie lielumi, kurus nosaka pēc elektrodzinēja pases datiem vai rokasgrāmatām.

Elektrodzinēju tinumu nominālās temperatūras θ_{nom} izvēlas atbilstoši izolācijas klasei – ar B klases izolāciju – 120 °C, ar F klases izolāciju – 140 °C, ar H klases izolāciju – 165 °C. Nominālo vibrāciju ātrumu v_{nom} nosaka pēc elektrodzinēja vibrāciju klases atkarībā no ass augstuma h – pie $h = 50-71$ mm, $v_{nom} = 1.1$ mm·s⁻¹; pie $h = 80-132$ mm, $v_{nom} = 1.8$ mm·s⁻¹; pie $h = 160-255$ mm, $v_{nom} = 2.8$ mm·s⁻¹; pie $h = 250 - 355$ mm, $v_{nom} = 4.5$ mm·s⁻¹ (Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л., 1988).

Bez apskatītajiem faktoriem (tinumu temperatūra, ieslēgšanas biežums un vibrāciju ātrums) elektrodzinēju drošumu iespaido elektriskā slodze, kuru izsaka ar slodzes koeficientu K_s (pie S1 darba režīma $K_s = 0.85$ un pie S2 - $K_s = 0.9$) un kuras iespaidu uz elektrodzinēja drošumu izsaka ar korekcijas koeficientu α_k (pie $K_s = 0.9$ $\alpha = 0.55$ un pie $K_s = 0.85$ $\alpha = 0.45$). Darba vides destabilizējošo faktoru uz elektrodzinības drošumu ievērtē ar koeficientu K_v – $K_v = 1$ – laboratorijas apstākļos, slēgtās apkurināmās telpās, istabas temperatūra 20±5 °C, gaisa relatīvais mitrums 65 ±15%, normāls atmosfēras spiediens); $K_v = 2.5$ – slēgtās neapkurināmās (apkurināmās) telpās ar lielu temperatūras svārstīgumu, augstu gaisa relatīvo mitrumu (līdz 100%), paaugstinātu putekļu blīvumu un tml. (lauksaimniecības telpas, rūpnīcu cehi, elektrisko tīklu apakšstacijas); $K_v = 10$ – smagos lauku apstākļos (atklātās vietās, zem nojumes, šahtās, uz urbšanas iekārtām un tml.). Ņemot vērā slodzes un vides faktorus, elektrodzinēju faktisko atteices intensitāti aprēķina pēc formulas (Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л., 1988):

$$\lambda_e = K_v \cdot \alpha_k \cdot \lambda_{vid}, \quad (5.9)$$

kur λ_e – elektrodzinēju faktiskā atteices intensitāte, h⁻¹;
 K_v – vides iespaids korekcijas koeficients;
 α_k – korekcijas koeficients pēc elektrodzinēja slodzes koeficienta.

Pielikumā 2 ir parādīts plāns vienai no vistu kūtīm Iecavā. Var redzēt temperatūras sensoru un ventilatoru izvietošanu. Ventilatori tiek iedalīti trīs grupās – “Bioclimate” (20 ventilatori), “Emergency – 1” (10 ventilatori) un “Emergency – 2” (15 ventilatori). “Bioclimate” ventilatori strādā visu laiku, “Emergency – 1” tiek pieslēgti, kad “Bioclimate” grupas ventilatori nespēj nodrošināt vajadzīgo temperatūru kūtīs, kas būtu pavasara beigās un rudens sākumā. “Emergency – 2” tiek darbināta galvenokārt vasarā.

Nav pieejama informācija par precīzu katras ventilatoru grupas darbības laiku, tāpēc tiks izmantota ventilatoru atteices statistika pa mēnešiem (skat 1.23. attēlu). Asinhrono elektrodzinēju drošuma noteikšanai tiks izmantoti sekojošie darba laika parametri – “Bioclimate” ventilatoru grupai 8760 h; “Emergency – 1” – 4752 h (puse no marta mēneša, aprīlis, maijs, jūnijs, jūlijs, augusts, septembris); “Emergency – 2” – 2580 h (puse no maija, jūnijs, jūlijs, augusts).

Drošuma radītāju aprēķināšanai nepieciešams noteikt statora tinumu temperatūru, ieslēgšanas biežumu un vibrāciju ātrumu ABB M2AA90S-4 1.1 kW asinhronajiem elektrodzinējiem. No elektrodzinēja silšanas eksperimentu rezultātiem statora tinumu temperatūra pie nominālās slodzes ar dzesēšanas traucējumiem sasniedz 130-135 °C, bez – 83 °C pie apkārtējās vides temperatūras 25 °C. Praksē putekļi ne tikai bloķē ventilācijas gaisa plūsmu, bet arī palielina termisko pretestību starp korpusu un apkārtējo vidi. Eksperimentos tika bloķēta tikai gaisa plūsma, tāpēc praksē statora tinumu temperatūra varbūt lielāka par 135 °C. Tāpēc drošuma analīzei tiks pieņemta faktiskā temperatūra 140 °C situācijai, kad netiek veikta papildu apkope putekļu attīrīšanai no elektrodzinēja. Faktiskā temperatūra, kad nostrādās temperatūras noteikšanas iekārta un tiks veikta papildu apkope, tiks pieņemta kā vidējais lielums no 80 līdz 140 °C. Temperatūra 130 °C būs pieņemtais temperatūras līmenis, kad

aizsardzības ierīce pados signālu, ka statora tinumu temperatūra tuvojas kritiskai vērtībai, dodot nepieciešamo laiku ieplānot elektrodzinēja apkopi. Tiks arī pieņemts, ka laiks, līdz elektrodzinējs tiks pilnīgi apklāts ar putekļiem, ir 6 mēneši un statora tinumu temperatūra pieaug lineāri. Precīzs laiks nav zināms, kā arī informācija par to nav pieejama. Šis laiks ir atkarīgs no transportēta graudu daudzuma, ēkas konstrukciju īpašībām/ventilācijas un citiem faktoriem, jo katram objektam tas varbūt atšķirīgs. Tāpēc otrai situācijai tiks pieņemta faktiskā temperatūra 110 °C. ABB M2AA90S–4 1.1 kW asinhronajiem elektrodzinējiem izolācijas klase ir F, tāpēc θ_{nom} ir 140 °C.

ABB M2AA90S–4 1.1 kW asinhronajiem elektrodzinējiem ass augstums ir 90 mm, darba režīms S1, līdz ar to $v_{nom} = 1.8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ un faktiskais ieslēgšanas biežums ir vienāds ar nominālo. Informācija par faktisko vibrācijas līmeni arī nav pieejama, tāpēc tiks pieņemta vērtība, kas vienāda ar nominālo. Pēc formulām 5.4. – 5.9. tiek aprēķināti tinumu temperatūras, vibrācijas ātruma, ieslēgšanas biežuma, atteices intensitātes un bezatteices darbības vidējā laika parametri.

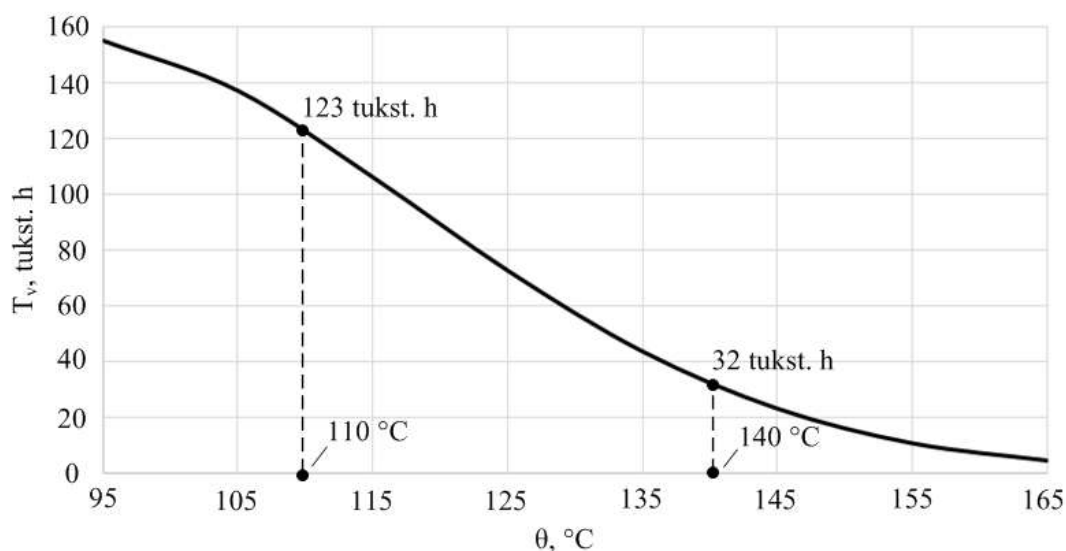
Ventilatoru asinhrono elektrodzinēju vidējā atteices intensitāte, faktiskā atteices intensitāte un vidējais laiks līdz atteicei pie nominālas slodzes ($\alpha = 1$) un vides iespaida korekcijas koeficienta $K_v = 10$ (daudz putekļu, agresīvās gāzes, mitrums) ir parādīti 5.1. tabulā:

5.1. tabula

Drošuma analīzes parametru aprēķinu rezultāti

Parametrs	Esošai situācijai	Situācijai, ar temperatūras noteikšanas iekārtu
Tinumu temperatūra θ , °C	155	125
Ieslēgšanas biežums f_e , h ⁻¹	2	2
vibrācijas ātrums v , mm·s ⁻¹	5	5
Atteices intensitāte λ , 10 ⁻⁶ h ⁻¹	31.1	8.1
Bezatteices darbības vidējais laiks, T_v 10 ³ h	32	123

Rēķini parāda, ka statora temperatūrai ir liela ietekme uz ventilatora asinhrono elektrodzinēju drošumu – pie statora faktiskās temperatūras 140 °C bezatteices nostrādes laiks ir 32108 h vai 3.67 gadi “Bioclimate” ventilatoru grupai. Ja statora faktiskā temperatūra ir 110 °C, tad nostrādes laiks līdz atteicei ir 3.8 reizes lielāks – 14 gadi. Ventilatoru bezatteices laika atkarība no 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras diapazonā 95–165 °C ir parādīta 5.1 attēlā. Var redzēt, ka tinumu temperatūras diapazonā 105–140 °C par katriem 10 °C bezatteices laiks izmainās apmēram par $36 \cdot 10^3$ stundām.



5.1. att. ABB 1.1 kW asinhrono elektrodzinēju bezatteices darbības vidējais laiks atkarībā no statora tinumu temperatūras

5.2. Asinhrono elektrodzinēju bezsensoru rotācijas frekvences noteikšana

Pēdējā laikā strauji pieaug regulējamas maiņstrāvas elektropiedziņas izmantošana gan industrijā, gan sadzīvē. Elektropiedziņas regulēšanai nepieciešams precīzi mērīt elektrodzinēja rotācijas frekvenci. Šim nolūkam izmanto ātruma sensorus, bet tie ir dārgi, jutīgi pret trokšņiem un dažreiz nav iespējams tos uzstādīt. Tāpēc ir izpētītas vairākas metodes bezsensora elektrodzinēja rotācijas frekvences noteikšanai. Tādā veidā tiek samazinātas elektropiedziņas izmaksas, paaugstināts drošums, ir vienkāršāka sistēmas uzbūve un mazāks apkopes apjoms.

Maiņstrāvas elektrodzinēju rotācijas frekvences noteikšanas metodes ir sekojošas (Zaky & Khater, 2008):

1. rotora ātruma noteikšana pēc rotora rievu harmonikām;
2. rotora ātruma noteikšana, izmantojot signālu padošanu statorā;
3. rotora ātruma noteikšana pēc elektrodzinēja ekvivalentām shēmām.

Rotora magnētiskais lauks inducē nelielas strāvas statorā. Statora strāvas spektrālā analīze dot iespēju atrast šīs harmonikas un aprēķināt rotora rotācijas frekvenci. Šādai metodei nepieciešams laiks aprēķinu veikšanai, tā spēj precīzi noteikt ātrumu tikai neliela ātruma diapazonā (Zaky un Khater, 2008).

Zemfrekvenču signālu injicēšana statorā ir apskatīta darbā (Fot et al., 2018) un augstfrekvence signālu injicēšana darbā (Ha un Sul, 1999). Šīs metodes trūkumi ir augstfrekvences griezes momenta pulsācijas, traucējumu veidošana, ja tiek mērīti nepieciešamie lielumi ar augstfrekvences signālu, un ir nepieciešamība pēc signālu avota (Zaky un Khater, 2008; Hussien et al, 2019).

Bezsensora elektropiedziņas regulēšanas populārākās metodes izmanto elektrodzinēja ekvivalentām shēmām, sprieguma un/vai strāvas mērījumus. Šīs metodes priekšrocība ir vienkāršība. Šai metodei ir vairāki veidi, bet labāko darbību vidējos un lielos ātruma diapazonos nodrošina adaptīva vadība ar atskaites shēmu. Šīs metodes darbība ir pētīta sekojošos darbos (Ta et al, 2001; Rashed un Stronach, 2004; Kojabadi, 2009; Teja et al, 2012; Rind et al, 2015; Teja et al, 2015; Fereka et al, 2018). Tomēr dotās metodes trūkums ir nepieciešamība pēc elektrodzinēja ekvivalentās shēmas parametru noteikšanas.

Statora tinumu temperatūras noteikšanas metodei ir nepieciešams tikai viens strāvas sensors silšanas modelim un pēc tam elektrodzinēja rotācijas frekvences noteikšanai. ABB 1.1 kW asinhronā elektrodzinēja silšanas process ir ar salīdzinoši lielo inerci, aptuveni

9-10 minūtes, un, atbilstoši eksperimenta mērījumiem, noteikt stāvas lielumu un rotācijas frekvenci var ar intervālu – viena minūte. Ņemot vērā šos faktorus un bezsensoru elektrodzinēja rotāciju ātruma noteikšanas metožu analīzi, piemērotākā metode būs ātruma noteikšana pēc rotora rievu harmonikām. Šī metode ir aprakstīta un analizēta šajos darbos (Holtz, 2002; Ilaš et al, 1994; Elloumi et al 1998; Staines et al, 2006) un darbā (Phumiphak un Chat-uthai, 2009) ir aprakstīta metodika kā pēc dotās metodes var noteikt rotācijas frekvenci tikai ar vienu strāvas sensoru.

Ir zināms, ka, pieslēdzot trīsfāžu asinhronā elektrodzinēja statora tinumus pie maiņstrāvas, rodas rotējošais magnētiskais lauks ar sinhrono ātrumu, kurš var inducēt elektrodzinējspēku rotora tinumos. Rotorā inducētais spriegums ir atkarīgs no rotora un rotējošā magnētiskā lauka ātrumu attiecības. Strāva rotora tinumos rada efektīvo rotora magnētisko lauku, kurš statora tinumos var inducēt nelielas subharmoniskās frekvences. Līdz ar to rotora frekvenci var noteikt no statora strāvas spektrālās analīzes un no rotora frekvences var noteikt rotora rotācijas frekvenci. Elektrodzinēja spektrāla analīze jeb MCSA (Motor Current Signature Analyses) sastāv no četriem galvenajiem posmiem (Phumiphak un Chat-uthai, 2009):

1. statora strāvas mērījumu vākšana;
2. ātrā Furjē transformācija;
3. rotora ātruma aprēķināšana.

Strāvas sensoru mērījumiem var izmantot zemfrekvences filtru, lai no mērījuma signāla samazinātu trokšņus, kurus rada temperatūra, vibrācijas, rotora un statora rievās. Lai atbrīvotos no šiem trokšņiem, filtra nogriešanas frekvencei jābūt $2 \cdot f_1$ (Phumiphak un Chat-uthai, 2009):

$$\begin{aligned} i(t) \cdot i(t) &= i(t)^2 = m(t)^2 \cdot \cos^2(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) = \\ &= \frac{1}{2} m(t)^2 + \frac{1}{2} \cos(2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) \cdot m(t)^2, \end{aligned} \quad (5.10)$$

No iegūtiem izteiksmē 5.10 strāvas mērījumu rezultātiem ar ātro Furjē transformāciju (FFT) var atrast strāvas komponenti ar augstāko komponenti. Šo komponenti jānosaka frekvences diapazonā starp zemākās un augstākās frekvences robežām (Phumiphak un Chat-uthai, 2009):

$$f_z = \frac{n_z}{60}, \quad (5.11)$$

$$f_a = \frac{120 \cdot f_1}{60 \cdot p}, \quad (5.12)$$

kur n_z – rotora rotācijas frekvence pie f_z , kuru izvēlas kā ātrums pie maksimālā griezes momenta vai pie frekvences $0.9 \cdot f_a$, $\text{apgr} \cdot \text{min}^{-1}$;
 f_z – filtra zemākās robežas frekvence, Hz;
 f_a – filtra augstākās robežas frekvence, Hz.

No strāvas mērījumu FFT analīzes rotora rotācijas ātrums tiek noteikts pēc izteiksmes (Phumiphak un Chat-uthai, 2009):

$$n = f_r \cdot 60 = D_{\max}, \quad (5.13)$$

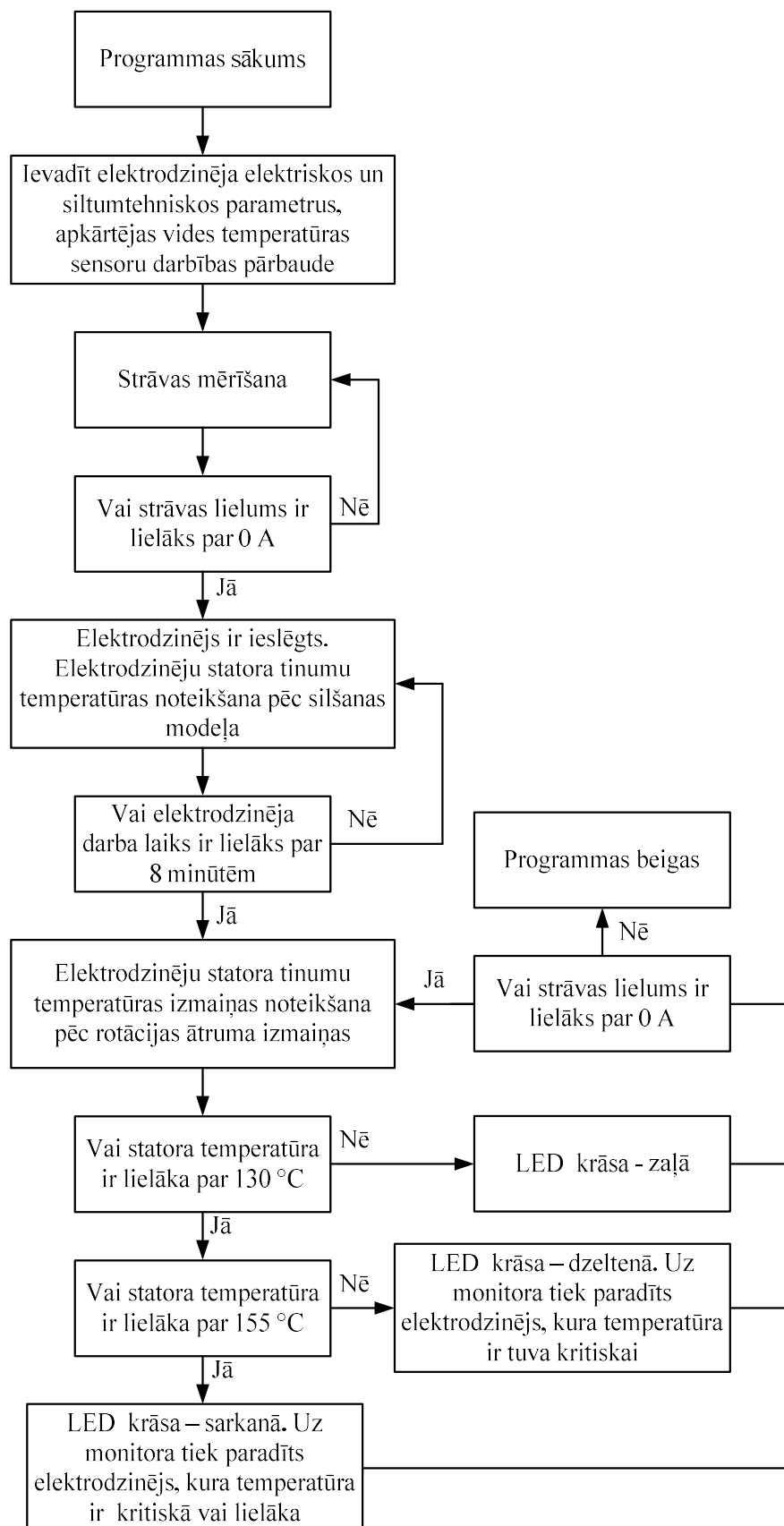
kur n – rotora rotācijas frekvence, $\text{apgr} \cdot \text{min}^{-1}$;
 $D_{\max}$ – filtra zemākās robežas frekvence, Hz;
 f_r – rotora frekvence, Hz;

5.3. Asinhrono elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas algoritms

Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas nepieciešamo komponentu noteikšanai un izvēlei nepieciešams veikt šīs metodes algoritma analīzi. Algoritma uzbūve ir parādīta 5.2. attēlā. Ieslēdzot iekārtu, tiek palaista programma un pirmais solis ir ievadīt/pārbaudīt visus nepieciešamos parametrus – elektrodzinēja nominālā strāva, siltumtehnikos parametrus priekš siltuma modeļa, apkartējās vides temperatūra un statora temperatūras limiti. Apkartējās vides temperatūra var tiks ievadīta, ja ir nemainīga, bet mainīgos apstākļos to būtu precīzāk mērīt. Ja visi parametri ir ievadīti, tad tiek mērīta strāva līdz momentam, kad strāva būs lielāka par 0 A (tiek palaists elektrodzinējs). Pēc tam 8 minūtes statora tinumu temperatūra tiek noteikta pēc silšanas modeļa un pēc 8 minūtēm tiek saglabāts simulācijas rezultāts. Tālāk simulācijas rezultātam tiek pieskaitīta temperatūras izmaiņa, kura tiek aprēķināta pēc rotācijas ātruma izmaiņas. Nākamais solis ir salīdzināt temperatūru ar iestatītiem temperatūras limitiem. Ja rezultāts ir zemāks par 130 °C, tad LED (gaismu izstarojoša diode) deg ar zaļo krāsu, ja lielāks par 130 °C – LED deg ar dzelteno krāsu, bet ja lielāks par 155 °C – ar sarkano krāsu. LED lampiņa tiek izmantota vizualizācijai, lai operators varētu vienkārši noskaidrot elektrodzinēja termisko stāvokli. Šim nolūkam var izmantot RGB LED, kurai krāsu var regulēt atkarībā no sprieguma. Statora tinumu temperatūras limitus izvēlas atbilstoši elektrodzinēja statora izolācijas klasei. Dotajā darbā šī metode tiek apskatīta tikai kā pasīva sistēma statora tinumu temperatūras noteikšanai, t.i., ja dzinējs sasniedz kritisko temperatūras limitu, tad dzinējs netiek atslēgts. Pēc nepieciešamības sistēmu var papildināt, lai varētu atslēgt elektrodzinēju, ja tiek pārsniegta statora tinumu temperatūra. Statora tinumu temperatūras izmaiņa tiek noteikta un salīdzināta ar temperatūras limitiem. Kad strāva samazinās līdz 0 A, programma apstāsies. Tad statora temperatūra tiek atiestatīta līdz apkartējās vides temperatūrai.

Programmas izveidei ir nepieciešami sekojošie galvenie programmēšanas uzdevumi:

1. temperatūras sensora mērīšanas signāla nolasīšana un pārrēķināšana (izšķirtspēja 0.1 °C);
2. elektrodzinēju parametru ievadīšana, izmantojot pogas un ekrānu;
3. strāvās sensoru mērīšanas signālu nolasīšana un strāvas efektīvas vērtības aprēķināšana (izšķirtspēja 0.05 A);
4. statora tinumu temperatūras noteikšana pēc silšanas modeļa (no MATLAB SIMULINK programmas ir iespējams iegūt silšanas modeļa kodu C programmēšanas valodā);
5. strāvas mērījumu (mērīšanas frekvence 5 kHz) FFT analīze;
6. noteikt elektrodzinēja rotācijas frekvenci no FFT analīzes ($0.1 \text{ apgr min}^{-1}$);
7. noteikt statora tinumu temperatūras izmaiņu pēc empīriskā eksponenciālā vienādojuma;
8. RGB LED lampas krāsas maiņa atkarība no statora tinumu temperatūras;



5.2. att. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšana algoritms

5.4. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas ekonomiskais novērtējums

Darbā aprakstītas temperatūras noteikšanas metode var tikt izmantota kā pasīvā elektrodzinēja silšanas noteikšanas iekārta. Tādā veidā nav nepieciešamības pēc dārgas PLC (programmējams loģiskais kontroleris) sistēmas, lai nodrošinātu drošuma līmeni. Var izmantot mikrokontrolleri (MCU – Microcontroller unit), kas ir ievērojami lētāks risinājums nekā PLC. PLC sistēma sastāv no paša kontrolera un dažādiem moduļiem (digitālo un analoģo signālu ieejas/izejas moduļi, komunikācijas moduļi, barošanas bloks un citi), bet MCU gadījumā visas nepieciešamās komponentes tiek uzmontētas kopā uz vienas elektroniskās plates.

Pēc 5.3. apakšnodaļā aprakstītā algoritma un konsultācijas ar informācijas tehnoloģijas speciālistu, tika veikta nepieciešamo komponentu izvēle. Pielikumā Nr.3 ir parādīta un aprakstīta iekārtas blokshēma. Iekārtas visas nepieciešamās aprēķinu funkcijas un citas operācijas veiks MCU, analoģu signālu no strāvas sensoriem apstrādi veiks analogciparu pārveidotājs.

MCU izvēle ir atkarīga no nepieciešamā datu apstrādes/aprēķinu apjoma. Statora tinumu temperatūras noteikšanas metodē aprēķinu apjomīga operācija ir strāvas mērījumu veikšana ar frekvenci 5 kHz un FFT analīze. Apskatītā piemērā ir 45 motori, kam nav nepieciešams noteikt statora tinumu temperatūru ik pēc sekundes. Temperatūras noteikšanas intervāls katram elektrodzinējam var būt viena minūte, jo silšanas inerce ir liela un temperatūra nepieaugs ātri, rodoties dzesēšanas traucējumiem vai/un nelielas pārslodzes gadījumos. Strāvas sensoru skaits ir vienāds ar elektrodzinēju skaitu, jo ir nepieciešams veikt mērījumus tikai vienai fāzes strāvai. Lai nodrošinātu 45 strāvas sensoru mērījuma signālu apstrādi, ir izvēlēti trīs ADS1158 analogciparu pārveidotāji, 16 analogās ieejas katram. MCU un analogciparu pārveidotāju barošanai nepieciešams 200 mA barošanas bloks.

Strāvas mērīšanai ir nepieciešams sensors, kurš var mērīt arī zemas frekvences (zem 50 Hz) strāvas. Ar strāvas transformatoriem nav nepieciešams to mērīt, tāpēc jāizvēlas Holla efekta strāvas sensori. Sensoru montāžas atvieglošanai un laika samazināšanai ir izvēlēti sensori ar sašķelto serdi. Šāda veida sensoru montāžai nav nepieciešams atslēgt elektrodzinējus/pārtraukt ventilācijas procesu. Esošiem 1.1 kW asinhronajiem elektrodzinējiem nominālā strāva ir 2.6 A, un nav nepieciešams mērīt palaišanas/pārejas procesa strāvas, tāpēc ir izvēlēti sensori ar nominālo strāvu 5 A. Zem 50 A strāvas diapazonā strāvas sensoru nominālās vērtības solis ir 5 A un zemākais ir 5 A. Izvēlētiem Holla strāvas sensoriem ir nepieciešams ± 15 V līdzspriegums un tie patērē 25 mA. Ir izvēlēti 2 barošanas bloki ar nominālo strāvu 1 A 45 strāvas sensoru un ekrāna elektroenerģijas nodrošināšanai. Elektroniskās plates izmērs ir atkarīgs no elementu skaita un to izmēriem. Priekš 45 elektrodzinēju strāvas mērīšanas ir nepieciešams liels klemju skaits, lai pie plates pievienotu strāvas sensoru izvadus. Plates korpusa konstrukcija ļauj izvietot klemmes tikai no divām pusēm. Aprēķinot nepieciešamo klemju skaitu un nosakot to garumu (aptuveni 70 mm), ir izvēlēts plates korpuss ar garumu 88 mm un platumu 90 mm. Šajā korpusā var izvietot plates horizontāli trīs līmeņos (stāvos). Apakšējā (lielākajā) līmenī uzstādītai elektroniskai platei (ar MCU un ACP) ir jābūt ar izmēru 86.5x84 mm un augšējā līmenī - 42x83 mm. Izvēlēto komponentu saraksts un to cena ir parādīti 4. pielikumā.

Pēc statora tinumu temperatūras noteikšanas un iekārtas galveno komponentu izvēles ir nepieciešams veikt plates elektriskās shēmas izveidošanu un iekārtas prototipa izgatavošanu. Shēmas izveidošanai ir nepieciešams apmēram 16 stundas, prototipa izgatavošanai – 16 stundas. Šāda darba veida speciālista darba stundas likme ir 30 EUR·h⁻¹. Iekārtas programmas izstrādei, atbilstoši iepriekš aprakstītiem galvenajiem programmēšanas uzdevumiem, to programmēšanai un testēšanai nepieciešamais laiks un cenas ir apkopotas 5.2. tabulā. Arī programmētāja stundas likme ir ņemta 30 EUR·h⁻¹.

Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas programmēšanas un testēšanas izmaksas

Uzdevums	Izpildes laiks, h	Stundas likme, EUR·h ⁻¹	Cena, EUR
Temperatūras sensora mērīšanas signāla nolasīšana un pārrēķināšana	2	30	60
Parametru ievadīšana, izmantojot pogas un ekrānu	4	30	120
Strāvas mērīšanas un efektīvas vērtības aprēķināšana	3	30	90
Statora tinumu temperatūras noteikšana pēc silšanas modeļa	5	30	150
Strāvas mērījumu FFT analīze	4	30	120
Noteikt elektrodzinēja rotācijas frekvenci no FFT analīzes	2	30	60
Noteikt statora tinumu temperatūras izmaiņu	2	30	60
RGB LED lampas krāsas maiņa atkarībā no statora tinumu temperatūras	1	30	30
Programmas testēšana	23	30	690
		Kopā	1380

5.5. Asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas ieviešanas ekonomiskais novērtējums

Esošās situācijas un statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtu ieviešanas situācijas ekonomiskajai analīzei ir izmantota NPV (Net Present Value), jeb pašreizējā neto vērtība. Šajā metodē naudas plūsma tiek diskontēta, lai iegūtu nākotnes izdevumu un ieņēmumu vērtību uz doto momentu. Tiek pieņemts laika posms un tad katru gadu tiek aprēķināta naudas plūsma, ievērojot diskonta likmi (Vanaga, 2007). NPV metodes formula:

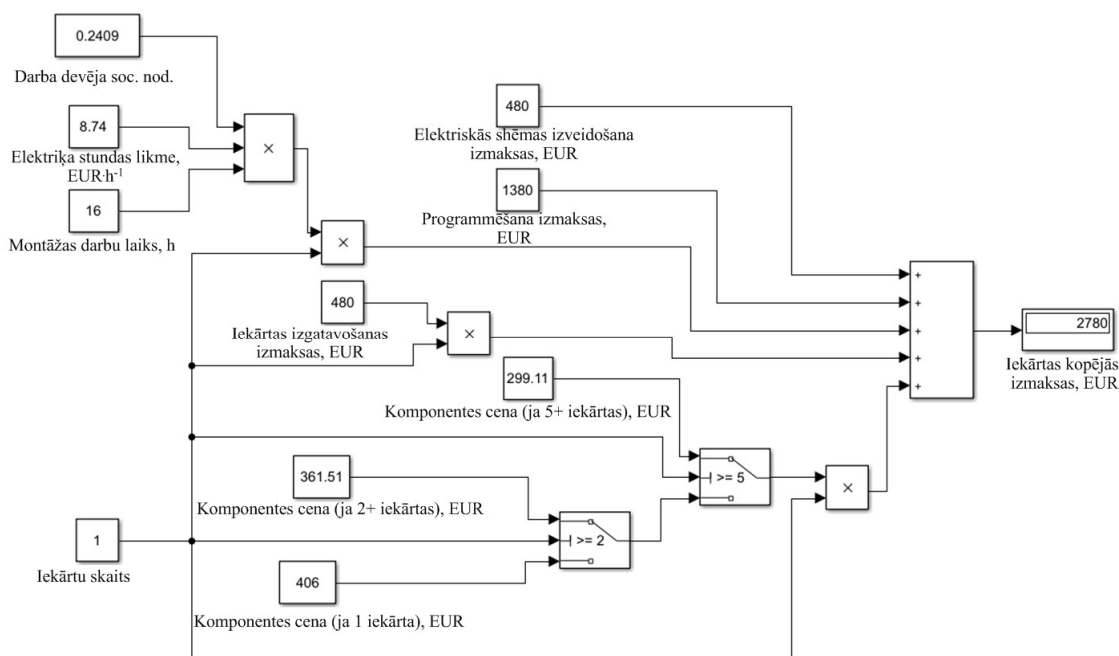
$$NPV = E_0 + \sum \frac{E_i}{(1+r)^i}, \quad (5.14)$$

kur E_0 – sākotnējie ieguldījumi, EUR;
 E_i – naudas plūsma i – gadā, EUR;
 r – diskonta likme, tiek pieņemta 0.05 – 0.15 robežās.

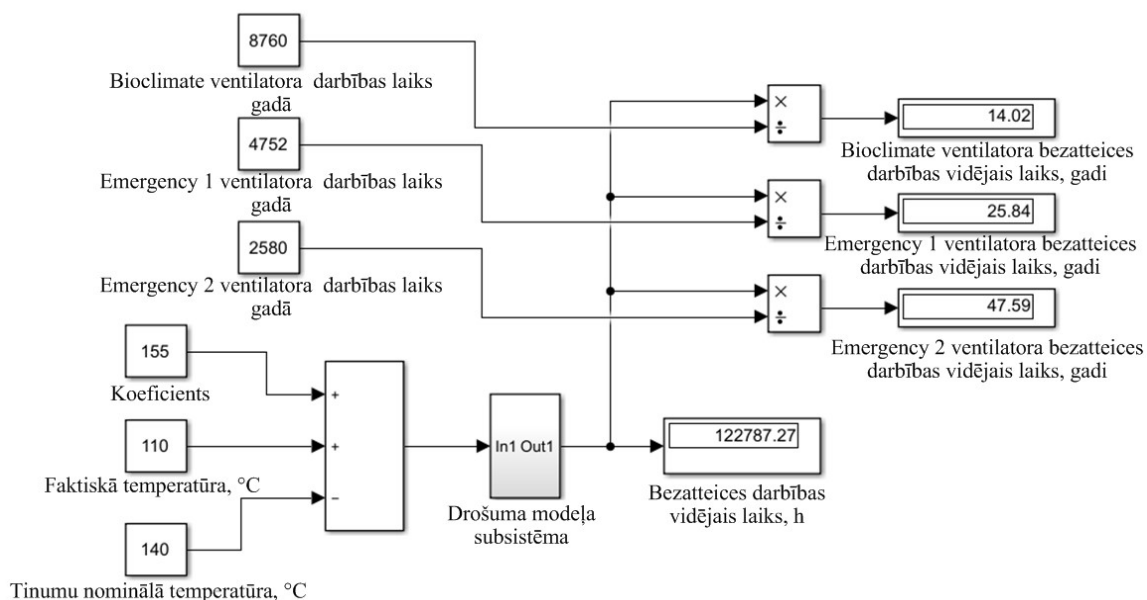
Asinhrono elektrodzinēju kopējais darbmužs ir robežās 12 – 20 gadi un tos var pārtīt 2-4 reizes šajā periodā. Ņemot vērā elektrodzinēja smago darba vidi, NPV aprēķinos pieņemtais elektrodzinēju darbmužs – 15 gadi. Pārtīšanas daudzums elektrodzinējam tiks pieņemts 2 reizes, atbilstoši asinhrono elektrodzinēju atteices statistikas elektrodzinējiem ar 2 un 3 atteices reizēm SIA “Balticovo” vīstū olu ražotne Iecavā (skat. 1.2. tabulu), jo nostrādes laiks, pēc pārtīšanas līdz nākošai atteicei, vidēji samazinās.

Sākumā tiks aprēķināta NPV vērtība statoru tinumu noteikšanas iekārtas ieviešanai un ekspluatācijai. Vienas iekārtas izgatavošanas un uzstādīšanas kopējās izmaksas ir 2780 EUR. Montāžas laiks ir 16 darba stundas. Darbinieka vienas stundas likme ir 8.74 EUR·h⁻¹ (vidējā

stundas likme elektroenerģētikas speciālistam pēc 2019. gada VID datiem). Iekārtas izgatavošanas izmaksas, montāžas izmaksas un komponentes cena ir atkarīga no iekārtas skaita, elektriskās shēmas izveidošanas un programmēšanas (programmas izveidošana) ir vienreizējs uzdevums un nav atkarīgs no nepieciešamo iekārtu skaita. Ievadot modeli MATLAB Simulink programmā (skat. 5.4. att.) nepieciešamo iekārtu skaitu, darbinieka stundas likmi un montāžas darbu laiku, automātiski tiek aprēķinātas iekārtās kopējās izmaksas. Ar “switch” bloku tiek automātiski izvēlēta komponentes cena atkarībā no iekārtu skaita.



5.3. att. Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas izgatavošanas un montāžas izmaksas



5.4. att. Ventilatoru asinhronā elektrodzinēja bezatzeices darbības laika noteikšana pie statora tinumu temperatūras 110 °C

Asinhrono elektrodzinēju ekspluatācija pie vidējās statoru tinumu temperatūras 110 °C, veicot regulāras elektrodzinēju apkopes, nodrošina to bezatzeices darbības vidējo laiku 14 gadus Bioclimate grupu ventilatoriem, Emergency – 1. grupai – gandrīz 26 gadi un Emergency –

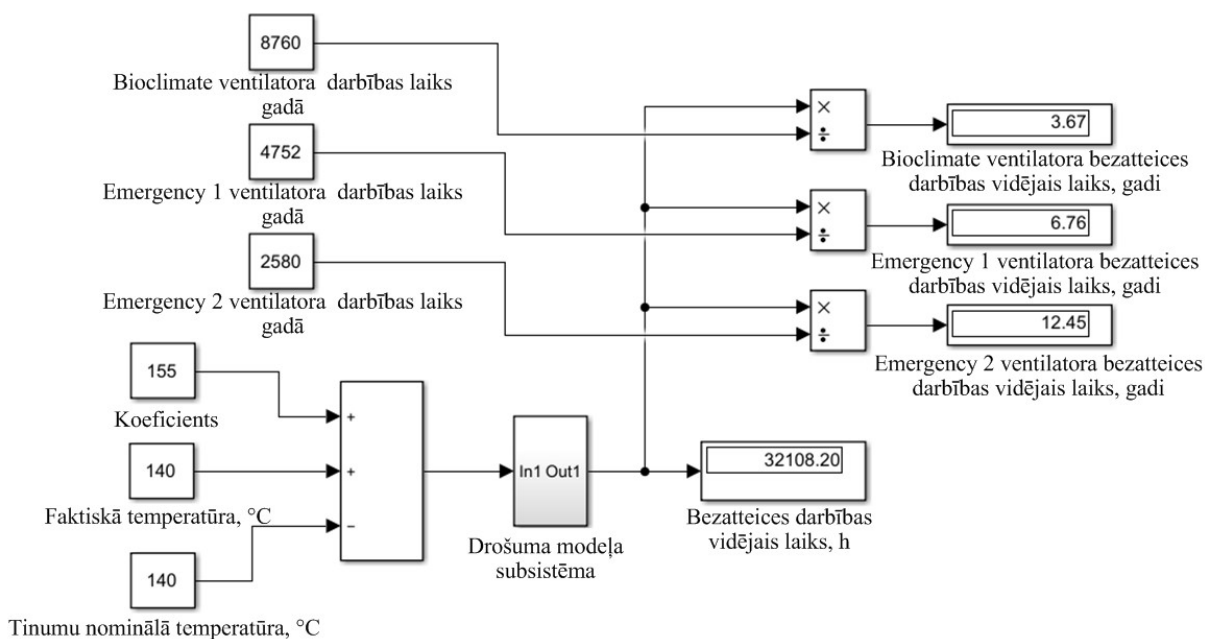
2. grupai – 47.5 gadi (skat. 5.5. att.). Atbilstoši aprēķiniem 15 gadu laikā atteices notiks Bioclimate ventilatoru elektrodzinējiem vienu reizi.

Ventilatora asinhrono elektrodzinēju atteices gadījumā izmaksas sastāv no elektrodzinēja demontāžas, remonta un montāžas izmaksām. Demontāžām un montāžām ir nepieciešami divi elektriķi un 6 stundas kopā, 1.1 kW asinhrono elektrodzinēju pārtīšanas cena ir 44 EUR bez PVN (pēc Balticovo asinhrono elektrodzinēju atteižu informācijas). Viena 1.1 kW ventilatora asinhronā elektrodzinēja atteice izmaksās 130 EUR.

Asinhrono elektrodzinēju apkopes daudzums ir pieņemts 4 reizes gadā Bioclimate (20 elektrodzinēji) grupai, 2 reizes Emergency – 1 grupai (10 elektrodzinēji) un 1 reizi Emergency – 2 grupai (15 elektrodzinēji). Apkopes laikā elektrodzinēji tiks notīrīti no putekļiem, veikta to vizuālā apskate un to ilgums ir 20 min vienam elektrodzinējam. Vienu reizi gadā nepieciešams veikt arī statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas apkopi, kurā ietilpst iekārtas vizuālā apskate, elektrisko savienojumu pārbaude, un tās ilgums ir 1h. Kopējais apkopes laiks gadā ir 39.3 h un ir nepieciešams viens elektriķis apkopes veikšanai. Apkopes izmaksas gadā ir 426 EUR.

Situācijā ar tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas izmantošanu, Bioclimate ventilatoru elektrodzinējiem bezatteices darbības vidējais laiks ir 14 gadi un NPV aprēķinā izmaksas par šo elektrodzinēju grupas remontu ir aprēķināti 15. gadam, pieņemot, ka visas Bioclimate ventilatoru grupas elektrodzinēju atteices notiks tajā pašā gadā.

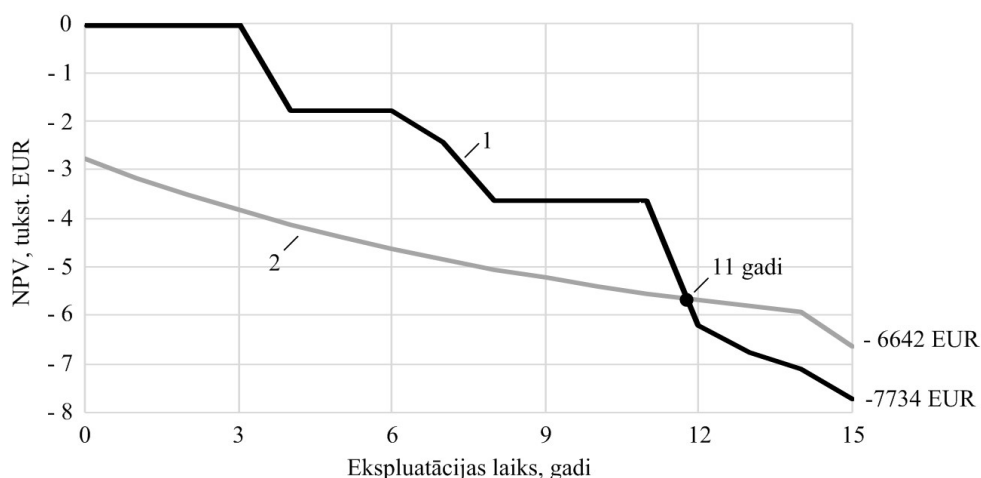
Asinhrono elektrodzinēju ekspluatācija pie vidējās statoru tinumu temperatūras 140 °C (esošā situācija vistu kūtīs SIA “Balticovo” uzņēmumā Iecavā) samazina bezatteices darbības vidējo laiku līdz 3.67 gadiem Bioclimate grupu ventilatoriem, Emergency – 1 grupai – 6.76 gadi un Emergency – 2 grupai – 12.45 gadi (skat. 5.6. att.).



5.5. att. Ventilatoru asinhronā elektrodzinēja bezatteices darbības laika noteikšana pie statora tinumu temperatūras 140 °C

Pie bezatteices darbības vidējā laika 3.67 gadi Bioclimate grupu katrs elektrodzinējs 15 gadu laikā izies no ierindas 4 reizes. Tas nozīmē, ka pēc 3. atteices būs nepieciešams nopirkt jaunus elektrodzinējus. Atbilstoši Eiropas Savienības direktīvai Nr. 04/2014 no 2017. gada var pārdot tikai asinhronos elektrodzinējus ar lietderības klasi IE3 vai lielāku neregulējamai elektropiedziņai. Jaunais ABB 1.1 kW asinhronais elektrodzinējs tāda pašā izpildījumā kā esošie ventilatoru elektrodzinēji vistu kūtīs ar IE3 lietderības klasi maksā ap 400 EUR. Atbilstoši 5.6. attēlā parādītiem aprēķiniem Bioclimate grupu elektrodzinējiem būs

nepieciešams remonts 4., 8. un 15. gadā, bet elektrodzinēju nomaiņa uz jaunajiem – 12. gadā. Emergency – 1 grupas ventilatoru elektrodzinējiem remonts būs 7. un 14. gadā, bet Emergency – 2 grupai – 13. gadā.



5.6. att. Ventilatoru asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas NPV dinamika vīstu kūtīs 15 gadu laika periodā:

1 – elektrodzinēju ekspluatācija esošos apstākļos; 2 - elektrodzinēju ekspluatācija ar statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtu

Abu situāciju ventilatoru asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas izmaksas un pēc 5.14. formulas NPV naudas plūsmas aprēķini 15 gadu periodā ir apkopotas 5.pielikumā. Aprēķinu rezultāti ir ar mīnuss zīmi, jo tie ir izmaksas, t.i., nauda plūst no uzņēmuma. Ieviešot iekārtu 45 asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanai, atmaksāšanās periods ir 11 gadi pie nosacījuma, ka iekārta tiek ieviesta elektrodzinēju ekspluatācijas sākumā. Iekārtas ieviešanas variantā NPV ir – 6642 EUR, par 1092 EUR mazāka nekā salīdzinot ar esošo situāciju (skat. 5.7. attēlu). Asinhrono elektrodzinēju drošuma analīze un NPV aprēķini apliecina, ka, ieviešot vīstu kūtīs iekārtu ventilatora asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanai, ir iespējams samazināt elektrodzinēja ekspluatācijas izmaksas to darbības laikā.

5.6. Nodaļas kopsavilkums un secinājumi

- 1.1 kW ABB asinhrona elektrodzinēja drošuma simulācija parāda, ka pie statora temperatūras 140 °C bezatzeices nostrādes laiks ir ~32108 h (3.67 gadi) “Bioclimate” ventilatoru grupai. Ja statora temperatūra ir 110 °C, tad nostrādes laiks līdz atteices ir 3.8 reizes lielāks – 14 gadi. Simulētais bezatzeices nostrādes laiks ir salīdzināms ar vidējo faktisko bezatzeices laiku pēc pieejamiem datiem, par 1.1 kW ABB asinhrono elektrodzinēju datiem SIA “Balticovo” vīstu kūtīs.
- Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanai ar darbā izstrādāto metodi nepieciešamās iekārtas izgatavošanai un to montāžai nepieciešams 2780 EUR. Ar NPV metodi analizējot šīs iekārtas ieviešanas ekonomisko pamatojumu salīdzinājumā ar esošo situāciju, tika secināts, ka atmaksāšanās laiks ir 11 gadi. Pamatojoties uz to, ka elektrodzinēja kalpošanas laiks var būt 20 gadi un vairāk, tad statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas ieviešana var būt ekonomiski pamatots risinājums asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai no statora tinumu pārkaršanas.

SECINĀJUMI

1. Eksperimentālie pētījumi liecina, ka dzesēšanas traucējumi ietekmē asinhrono elektrodzinēju silšanu vairāk nekā elektrodzinēju nelielas pārslodzes. Piemēram, ABB asinhronā elektrodzinēja ar jaudu 1.1 kW silšanas eksperimentālie pētījumu rezultāti rāda, ka pie pārslodzes $k = 1.18$ statora tinumu temperatūra ir $103\text{ }^{\circ}\text{C}$, par $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ lielāka nekā pie nominālās slodzes. Statora tinumu temperatūra pie slodzes $k = 0.98$ un ar dzesēšanas traucējumiem ir $131.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Asinhrono elektrodzinēju silšanas pētījumi pie nosprūdušā rotora apliecina, ka elektrodzinēja statora tinumu silšanas process ir adiabatisks un statora tinumu temperatūra strauji palielinās. Piemēram, 4A sērijas 1.1 kW elektrodzinējam ar ātrumu $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ pie aukstā sākuma stāvokļa, un ABB 1.1 kW – $2.67\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ pie karstā sākuma stāvokļa.
3. Asinhronā elektrodzinēja silšanas eksperimentālos pētījumos iegūtie dati ļauj konstatēt korelāciju starp statora tinumu temperatūru un rotācijas frekvences izmaiņām. Pieļaujamā statora tinumu izolācijas temperatūras diapazonā šī korelācija ir lineāra, un statora tinumu temperatūras un rotācijas frekvences sakarību apraksta empīriskis vienādojums $\theta = a(k) \cdot n + \theta_0$, kur a – empīriskais koeficients, kas apraksta statora tinumu temperatūras izmaiņu, mainoties rotācijas frekvencei.
4. Elektrodzinēja statora tinumu temperatūras precīzākai noteikšanai visā elektrodzinēja darba režīmā modelis pilnveidots, apvienojot empīrisko vienādojumu ar izstrādāto asinhronā elektrodzinēja otrās kārtas silšanas modeli.
5. Empīriskais koeficients a ir atkarīgs no elektrodzinēja slodzes. To apraksta eksponenciāls vienādojums. Piemēram, ABB 1.1 kW elektrodzinējiem šis vienādojums ir $a(k) = 114.1 \cdot e^{-3.34 \cdot k}$. Ar šo vienādojumu ir iespējams noteikt statora tinumu temperatūras izmaiņu, mērot rotācijas frekvences izmaiņu pie dažādām asinhronā elektrodzinēja slodzēm.
6. Apstiprinās izvirzītā hipotēze, ka ar attālinātu elektrodzinēja rotora rotācijas frekvences mērīšanu pēc noteikta algoritma ir iespējams aizsargāt elektrodzinēja statora tinumu no pārkaršanas.
7. Statora tinumu temperatūras simulācijas rezultāti, izmantojot pilnveidoto modeli, parāda, ka pie nominālās un zemākām slodzēm simulācijas rezultāti ir ar labu precizitāti, simulācijas kļūda nepārsniedz no $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $7\text{ }^{\circ}\text{C}$.
8. Izmantojot izstrādāto asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas modeli, ir iespējams aizsargāt mazas jaudas asinhronos elektrodzinējus no statora tinumu pārkaršanas pie dažādiem elektrodzinēja dzesēšanas bojājumiem, pret kuriem automātslēdzi nespēj nodrošināt aizsardzību un temperatūras sensoru izmantošana nav ekonomiski pamatota.
9. Pielietojot piedāvāto asinhrono elektrodzinēju statora tinumu temperatūras noteikšanas modeli, ir iespējams efektīvi plānot elektrodzinēja apkopes un būtiski pagarināt elektrodzinēja ekspluatācijas laiku. Piemēram, 1.1 kW ABB asinhronā elektrodzinēja drošuma simulācija parāda, ka pie statora temperatūras $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, bezatteices nostrādes laiks 3.8 reizes lielāks nekā, ja statora temperatūra ir $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, kas atbilst darba apstākļiem ar dzesēšanas traucējumiem.
10. Asinhronā elektrodzinēja statora tinumu temperatūras noteikšanas risinājuma, kurš strādā atbilstoši darbā izstrādātam algoritmam, ieviešanas izmaksas ir 2780 EUR. NPV analīze parāda, ka dotā risinājuma ieviešanas atmaksāšanās laiks ir 11 gadi, salīdzinot ar esošo situāciju, kurā netiek nodrošināta statora tinumu pārkaršanas aizsardzība pie dzesēšanas traucējumiem. Pamatojoties uz to, ka elektrodzinēja kalpošanas laiks var būt 20 gadi un vairāk, tad statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas ieviešana var būt ekonomiski pamatots risinājums asinhrono elektrodzinēju aizsardzībai no statora tinumu pārkaršanas.

11. Uztādot piedāvāto statora tinumu temperatūras noteikšanas risinājumu, nav nepieciešams apstādināt elektropiedziņu un montāžas darbus nepieciešams veikt pie elektropiedziņas vadības sadalnes.

INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Selective Main Circuit-Breakers S 750 DR series acc . to IEC / EN 60947-2 Selective Main Circuit-Breaker series S 750 DR Function. (n.d.). Retrieved February 13, 2018, from <https://library.e.abb.com/public/6713c8100b90ffec1257d7a002ac43a/2CDC415033D0201.pdf>
2. Abou-El-Ela M.S., M. A. I. M. O. P. (1996). Thermal model based digital relaying algorithm. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2, 1016–1019.
3. Albrecht, P. F., Appiarius, J. C., Cornell, E. P., Houghtaling, D. W., McCoy, R. M., & Owen, E. L. (1987). Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications. 3, 396–406.
4. Albrecht, P. F., Appiarius, J. C., McCoy, R. M., Owen, E. L., & Sharma, D. K. (1986). Assessment of the reliability of motors in utility applications — updated. IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-1(1), 39–46. <https://doi.org/10.1109/TEC.1986.4765668>
5. Alsaedi, M. A. (2015). Fault diagnosis of three-phase induction motor: A review. 4(3), 1–8. <https://doi.org/10.11648/j.optics.s.2015040101.11>
6. Armando, E. G. , Boglietti, A., Carpaneto, E., Castagnini, A., & Seita, M. "Thermal Performances of Induction Motors for Applications in Washdown Environment," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4578-4584, Sept.-Oct. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2917419.
7. Baptista, B., Mendes, A., Cruz, S., & Cardoso, A. (2012). Temperature distribution inside a three-phase induction motor running with eccentric airgap. Przegląd Elektrotechniczny, 88(1 A), 96–99.
8. Beguenane, R., & Benbouzid, M. E. H. (1999). Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification. IEEE Transactions on Energy Conversion, 14(3), 566–570. <https://doi.org/10.1109/60.790915>
9. Bertoldi P, Diluiso F, & Castellazzi L. (2018). Energy Consumption and Energy Efficiency Trends in the EU-28 2000-2015. European Commission, JRC Science for Policy Report. <https://doi.org/10.2760/6684>
10. Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., & Pastorelli, M. (2003). A simplified thermal model for variable speed self cooled industrial induction motor. Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2(4), 723–730. <https://doi.org/10.1109/ias.2002.1042640>
11. Boglietti, A., & Cavagnino, A. (2007). Analysis of the endwinding cooling effects in TEFC induction motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 43(5), 1214–1222. <https://doi.org/10.1109/TIA.2007.904399>
12. Boll, R. (1990). Weichmagnetische Werkstoffe: Einführung in den Magnetismus. VAC-Werkstoffe und ihre Anwendung. Publicis Corporate Publishing.
13. Bousbaine, A. M. W. F. L. (1995). In-situ determination of thermal coefficients for electrical machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 10(3), 385–391.
14. Cabrera, L. A., & Elbuluk, M. E. (1997). Tuning the stator resistance of induction motors using artificial neural network. PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 12(5), 779–787. <https://doi.org/10.1109/63.622995>
15. Campbell, J. A., Sumner, M., & Curtis, M. (2000). An improved sensorless vector controlled induction motor drive employing artificial neural networks for stator resistance estimation. 475, 274–279. <https://doi.org/10.1049/cp:20000258>
16. Champenois, G., Roye, D., & Zhu, D. S. (1994). Electrical and thermal performance predictions in inverter-fed squirrel-cage induction motor drives. Electric Machines and Power Systems, 22(3), 355–369. <https://doi.org/10.1080/07313569408955572>

17. Cheng, S., Du, Y., Restrepo, J. A., Zhang, P., & Habetler, T. G. (2012). A nonintrusive thermal monitoring method for induction motors fed by closed-loop inverter drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(9), 4122–4131. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2188045>
18. Csanyi E. The influence of voltage unbalance on NEMA motor performance, 2017. [tiešsaite] [skatīts 30.09.2020.]. Pieejams: <https://electrical-engineering-portal.com/voltage-unbalance-nema-motor-performance>
19. De Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., Fong, J., & Fonseca, P. (2008). EUP Lot 11 Motors. In *Practice*, February, 137. http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Final_Documents/Lot11_Motors_FinalReport.pdf
20. De Almeida, A. T., Fonseca, P., Falkner, H., & Bertoldi, P. (2003). Market transformation of energy-efficient motor technologies in the EU. *Energy Policy*, 31(6), 563–575. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00100-3)
21. Dessoude, M., Capolino, Gérard-André & Du, B. (1994). A fast algorithm for PC-based motor monitoring system.
22. Dorrell, D. G., Staton, D. A., & McGilp, M. I. (2006). Design of brushless permanent magnet motors - A combined electromagnetic and thermal approach to high performance specification. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 4853–4858. <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.348105>
23. Dorrell, D. G., Staton, D. a., & McGilp, M. I. (2006). Design of brushless permanent magnet motors - A combined electromagnetic and thermal approach to high performance specification. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 4853–4858. <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.348105>
24. Du, Y., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2008). Methods for thermal protection of medium voltage induction motors - A review. *Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008*, 229–233. <https://doi.org/10.1109/CMD.2008.4580269>
25. Emadi, A. (2004). *Energy-Efficient Electric Motors*. CRC Press.
26. Englebretson, S. C. (2009). Induction Machine Stray Loss from Inter-bar Currents.
27. Ferreira, F. J. (2008). Strategies to Improve the Performance of Three-phase induction motor driven systems. 718.
28. Ferreira, F. J. T. E., Pereirinha, P. G., & Almeida, A. T. De. (2006). Study on the Bearing Currents Activity in Cage Induction Motors using Finite Element Method. March 2017.
29. Ferreira, F. J. T. E., Baoming, G., & De Almeida, A. T. (2016). Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(6), 4628–4637. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2600677>
30. Ferreira, F. J. T. E., Leprettre, B., & De Almeida, A. T. (2016). Comparison of Protection Requirements in IE2-, IE3-, and IE4-Class Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3603–3610. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2545647>
31. Finley, W. R. (2000). *Troubleshooting Motors*.
32. Gao, Z. (2006). Sensorless Stator Winding Temperature Estimation for Induction Machines (Issue December). Georgia Institute of Technology.
33. Gedzurs, A., Straume, I., Galiņš, A., Laizans, A. (2016). Low-voltage circuit breaker selectivity studies. *Engineering for Rural Development*, 2016-Janua, 612–617.
34. Gedzurs, A. (2016). Operation reliability of induction motors at egg processing plant 'Balticovo.' *Agronomy Research*, 14, 1161–1168.
35. Gedzurs, A. (2013). Asinhrono elektrodzinēju silšanas modelēšana pārslodzes režīmos un to aizsardzības izvēle. LLU.
36. Gedzurs, A. (2015). Operation improvement of induction motor temperature protection device under extreme overload. *Engineering for Rural Development*, 14(January), 361–365.

37. Gedzurs, A., & Sniders, A. (2014). Induction motor stator winding thermal process research and modelling under locked rotor mode. *Engineering for Rural Development*, 13, 265–270.
38. Glynn, P. W. (1977). The field. May, 209–216.
39. Grubic, S., Aller, J. M., Lu, B., & Habetler, T. G. (2008). A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12), 4127–4136. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2004665>
40. Goman V, Oshurbekov S, Kazakbaev V, Prakht V, Dmitrievskii V. Energy Efficiency Analysis of Fixed-Speed Pump Drives with Various Types of Motors. *Applied Sciences*. 2019; 9(24):5295. <https://doi.org/10.3390/app9245295>
41. Habetler, T. G., Profumo, F., Griva, G., Pastorelli, M., & Bettini, A. (1998). Stator resistance tuning in a stator-flux field-oriented drive using an instantaneous hybrid flux estimator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 13(1), 125–133. <https://doi.org/10.1109/63.654966>
42. Han, W. Y., Kim, S. M., & Lee, C. G. (2001). Model following adaptive controller with rotor resistance estimator for induction motor servo drives. *Proceedings of the American Control Conference*, 1, 558–563. <https://doi.org/10.1109/ACC.2001.945605>
43. Harmon, J. D. (2009). *Livestock Industry Facilities and Environment : Choosing Fans for Livestock and Poultry Ventilation and Poultry Ventilation*. Agriculture and Environment Extension Publications, 40.
44. Ho, S. L., & Fu, W. N. (2001). Analysis of indirect temperature-rise tests of induction machines using time stepping finite element method. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 16(1), 55–60. <https://doi.org/10.1109/60.911404>
45. Hurst, K. D., & Habetler, T. G. (1997). Thermal monitoring and parameter tuning scheme for induction machines. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1, 136–142. <https://doi.org/10.1109/ias.1997.643019>
46. Boldea, I., S. A. N. (2010). *The Induction Machines Design Handbook*. CRC Press.
47. Justs, E. (2016). Asinhrono elektrodzinēju diagnostikas risinājumi uzņēmumā SIA “ELEKTRO”, LLU.
48. Karanayil, B., Rahman, M. F., & Grantham, C. (2003). Investigation of an on-line rotor resistance identification with a new stator resistance observer for induction motor drive using artificial neural networks. *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 4(1), 1883–1888. <https://doi.org/10.1109/pesc.2003.1217740>
49. Karanayil, B., Rahman, M. F., & Grantham, C. (2007). Online stator and rotor resistance estimation scheme using artificial neural networks for vector controlled speed sensorless induction motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1), 167–176. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.888778>
50. Kerkman, R. J., Seibel, B. J., Rowan, T. M., & Schlegel, D. (1995). New flux and stator resistance identifier for AC drive systems. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1, 310–318. <https://doi.org/10.1109/ias.1995.530316>
51. Kylander, G. (1995). Thermal modelling of small cage induction motors (Issue 265). <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/1335/1335.pdf>
52. Kochmann, T., & Huneus, H. (1990). Temperaturabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften von Elektrolech und -band. In *Magnetwerkstoffe und Magnetsysteme*. DGM.
53. Kubota, H., Matsuse, K., & Nakano, T. (1993). DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(2), 344–348. <https://doi.org/10.1109/28.216542>

54. Laadjal, K., Sahraoui, M., Alloui, A., Cardoso, A.J.M. Three-Phase Induction Motors Online Protection against Unbalanced Supply Voltages. *Machines* 2021, 9, 203. <https://doi.org/10.3390/machines9090203>
55. Lee, B. S., & Krishnan, R. (1998). Adaptive stator resistance compensator for high performance direct torque controlled induction motor drives. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1, 423–430. <https://doi.org/10.1109/ias.1998.732337>
56. Lee, Y., Lee, H., Hahn, S., & Lee, K. (1997). Analysis of Induction Motor with Distributed Heat Sources. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33(2), 1718–1721.
57. Lee, S. Bin, & Habetler, T. G. (2002). A remote and sensorless thermal protection scheme for small line-connected AC machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(5), 1323–1331. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.816550>
58. Lee, S. Bin, & Habetler, T. G. (2003). A remote and sensorless stator winding thermal protection scheme for line-connected AC machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(5), 1323–1332. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.816550>
59. Lee, S. Bin, & Habetler, T. G. (2003). An online stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(3), 685–694. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.811789>
60. Lv, Q., Bao, X., & He, Y. (2014). Influence of thermal expansion on eccentricity and critical speed in dry submersible induction motors. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 9(1), 106–113. <https://doi.org/10.5370/JEET.2014.9.1.106>
61. Management, M. (n.d.). Basics for practical operation.
62. Meza, M. (2014). *Industrial LV Motors & Drives: A Global Market Update • Introduction to IHS • Overview & Segmentation of the Market About IHS IHS Brings Content & Expertise to Clients Across a Range of Industries* (Issue January).
63. Moreno, J. F., Hidalgo, F. P., & Martínez, M. D. (2001). Realization of tests to determine the parameters of the thermal model of an induction machine. *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 148(5), 393–397. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20010580>
64. Motor Design [tiešsaite] [skatīts 30.03.2020.]. Pieejams: <https://www.motor-design.com>
65. Nestler, H., & Nestler, H. (1993). On-line-estimation of temperatures in electrical machines by an observer. *Electric Machines and Power Systems*, 21(1), 39–50. <https://doi.org/10.1080/07313569308909633>
66. Nrel, D. C. W. (2005). *Energy Matters - Winter 2005*.
67. Paice, D. A. (1980). Motor Thermal Protection by Continuous Monitoring of Winding Resistance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, IECI-27(3), 137–141. <https://doi.org/10.1109/TIECI.1980.351666>
68. Patel, M.R. (2021) *Shipboard Electrical Power Systems*, 2nd Edition. CRC Press
69. R. Elmanis-Helmanis, A. K. (2007). Zemsprieguma automātslēdžu savienojamības īpatnības un selektivitātes uzlabošanas priekšlikumi. *RTU Zinātniskais Žurnāls*, 22, 109 – 177.
70. Reza, C. M. F. S., & Mekhilef, S. (2013). Online stator resistance estimation using artificial neural network for direct torque controlled induction motor drive. *Proceedings of the 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2013*, 1486–1491. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566602>
71. S. Karmakar, S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. S. (2016). *Induction motor fault diagnosis. Power Systems*, Springer. Springer.
72. S. Mir, M. E. Elbuluk, D. S. Z. (1994). PI and fuzzy estimators for tuning the stator resistance in direct torque control of induction machines. *Power Electronics Specialist Conference*, 744–751. <https://doi.org/10.1109/PESC.1994.349655>

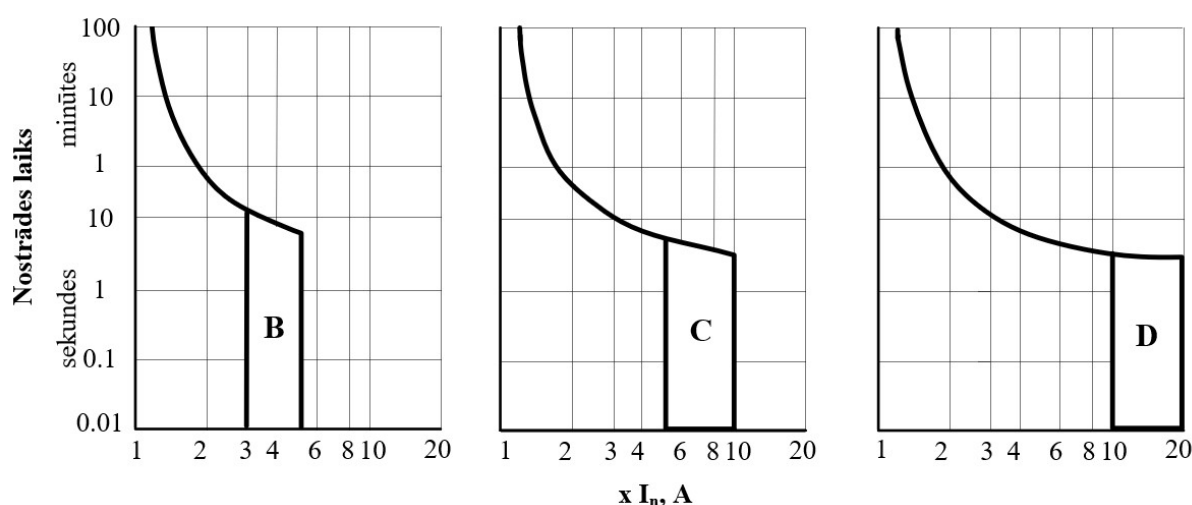
73. Siddique, A., Yadava, G. S., & Singh, B. (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(1), 106–114. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.837304>
74. SKF. (2013). Rolling bearings and seals in electric motors and generators. 146. <http://www.skf.com/binary/68-134586/13459-EN-Rolling-bearings-and-seals-in-electric-motors-and-generators.pdf>
75. Staton, D., & Popescu, M. (2010). Analytical thermal models for small induction motors. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 29(5), 1345–1360. <https://doi.org/10.1108/03321641011061542>
76. Susnjic, L. (2015). Induction Motors Thermal Analysis. *Strojarstvo*, January.
77. Šnīders, A. (1993). Elektrodzinēju kombinētā aizsardzība. LLU.
78. Šnīders, A. (1995). Asinhrono elektrodzinēju ekspluatācija lauksaimniecībā. LLU.
79. Šnīders, Andris; Gedzurs, A. (2015). Asinhronā elektrodzinēja tinumu temperatū
80. Šnīders, A. (1998). Automātikas ierīču un sistēmu drošums. Teorētiskie pamati un aprēķinu metodika: Mācību līdzeklis maģistrantiem. Jelgava: LLU, 1998. 80.
81. ras aizsardzība ar kļūdas kompensāciju (Patent No. 15090).
82. Šnīders, A.; Straume I. (2008). Automātiskā elektriskā piedziņa, LLU, 164.
83. Šušniķ, L., & Staton, D. (2009). Induction Motors Thermal Analysis. *Strojarstvo : Časopis Za Teoriju i Praksu u Strojarstvu*, 51(6), 623–631.
84. T, W. A. B. B. P., & Company, D. (1990). It. 5(3), 1275–1280.
85. Thorsen, O. V., & Dalva, M. (1995). A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(5), 1186–1196. <https://doi.org/10.1109/28.464536>
86. Venkataraman, B., Godsey, B., Premierlani, W., Shulman, E., Thakur, M., & Midence, R. (2005). Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection. *IEEE Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 11–27. <https://doi.org/10.1109/papcon.2005.1502046>
87. Weeber, K., Stutt, M., Dymond, J., & Rehder, R. (1996). Finite element field analysis of nonuniform surface contaminations on high voltage windings of electric machines. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report*, 1, 40–43. <https://doi.org/10.1109/ceidp.1996.564583>
88. Werle, R. (2014). Swiss audit program " Easy " Contents • Motor policy in Switzerland • The Easy program.
89. Xie, Y., Gu, C., & Wang, L. (2011). There-dimensional temperature estimation of squirrel-cage induction motor using finite element method. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2011. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2011.6073627>
90. Zabardast, A., & Mokhtari, H. (2008). Effect of high-efficient electric motors on efficiency improvement and electric energy saving. 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008, April, 533–538. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2008.4523464>
91. Zhang, P., & Habetler, T. G. (2016). DC signal injection-based thermal protection for stator winding of AC machines. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2(2), 43 – 51.
92. Zhang, P., Lu, B., & Habetler, T. G. (2007). A nonintrusive induction motor stator resistance estimation method using a soft-starter. 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED, 197–202. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2007.4393094>
93. Zinger, D. S. (1994). Control of Induction Machines. 1.

94. Zocholl, S. E. (1990). Motor analysis and thermal protection. IEEE Transactions on Power Delivery, 5(3), 1275–1280.
95. Žižlavský, O. (2014). Net Present Value Approach: Method for Economic Assessment of Innovation Projects. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 156 (November 2014), 506–512. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.11.230>
96. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л, (1988). Испытания и надежность электрических машин. Высшая школа, 231.
97. Пахомов, А. (2008). Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных разрядов. российская академия сельскохозяйственных наук. Всероссийский научно-исследовательский проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства.
98. Хомутов, С. (2010). Система повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции. Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.
99. Шипалов, В. (2009). Эксплуатационная эффективность электропривода вентиляторов в птичниках с индукционным регулятором напряжения. Кубанский государственный аграрный университет.

PIELIKUMI

Mazgabarīta automātslēdžu apraksts

Galvenie mazgabarīta automātslēdžu parametri ir nomināla strāva un laikstrāvas raksturliķnes klases, B, C un D (skat.1. attēlu) un to apzīmē sekojoši – C25, kur C ir laikstrāvas raksturliķnes klase un 25 – automātslēdža nomināla strāva $I_n = 25$ A. B līknes automātslēdža magnētiskā atslēgšanas nostrādās pie 3.2-4.8 I_n . B klases automātslēdžus izmanto ļoti garu kabeļu aizsardzībai, ģeneratorus saturošo tīklu aizsardzība. C līkne - magnētiskā atslēgšana notiek pie 7-10 I_n . C klases automātslēdžus izmanto standarta tīklu aizsardzībai. D līkne - magnētiska atslēgšana notiek pie strāvas starp 10 un 20 I_n . D klases automātslēdžus izmanto tīklu aizsardzībai, kuri baro slodzes ar augstam palaišanas strāvām (transformatorus, elektrodzinējus utt.). Automātslēdži nodrošina aizsardzību arī no ilgstošam nelielām pārslodzēm, bet tiem nevar regulēt nominālo strāvu, tāpēc elektrodzinēju aizsardzībai no pārslodzēm neizmanto.

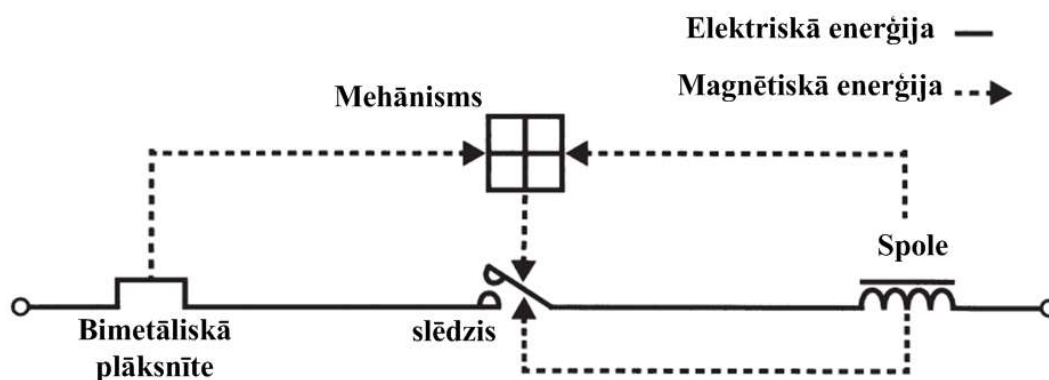


1. att. Mazgabarīta automātslēdžu laikstrāvas raksturliķnes B, C un D klasēm

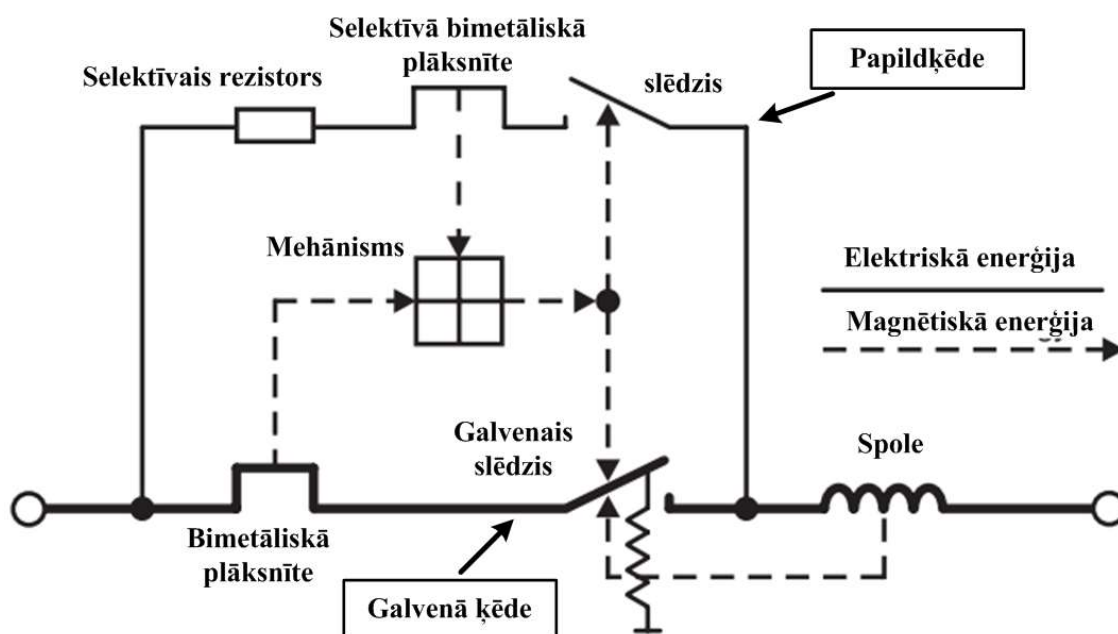
Viens no galvenajiem faktoriem, kas raksturo automātslēdžus, ir selektivitāte. Automātslēdžu selektivitāte ir spēja aizsargāt tikai to elektroietaisi, kuram šī aizsardzības ierīce uzstādīta, un reaģēt tikai tad, kad saņemts avārijas signāls tieši no šīm ierīcēm.

Īsslēguma strāva ir atkarīga no tīkla parametriem. Piemēram, ja īsslēgums notika mājā, kura ir tālu no transformatora, tad īsslēguma strāva ir 88 A, bet kafejnīcā pilsētas teritorijā īsslēguma strāva ir 1906 A (Elmanis-Helmanis un Kanbergs, 2008). Pirmajā gadījumā atslēgsies patērētāju pusē uzstādītājs automātslēdzis un selektivitāte tiks nodrošināta, bet otrajā gadījumā atslēgsies gan ievada, gan patērētāju pusē automātslēdži un selektivitāte netiks nodrošināta. Automātslēdžu selektivitātes pētījumi (Gedzurs et al, 2016) parāda, ka dažādu ražotāju automātslēdži pie īsslēguma strāvas 300 A nodrošināja selektivitāti (ievada automāts C32 un patērētāju pusē B16), bet automātslēdžu nostrādes laiki atšķiras, kas varbūt būtisks ja tiek izmantoti dažādu ražotāju automātslēdži (piemēram, ievadā viena ražotāja automātslēdzis, bet patērētāju pusē cita ražotāja). Pie īsslēguma strāvām 3000 A automātslēdži nenodrošina selektīvo darbību.

Lai nodrošinātu automātslēdžu selektīvo darbību, ir pieejami automātslēdži ar paaugstinātu selektivitāti. Galvenās funkcionālās un konstruktīvās atšķirības starp parastu automātslēdži un automātslēdži ar paaugstinātu selektivitāti parādītas 2. un 3.attēlā.



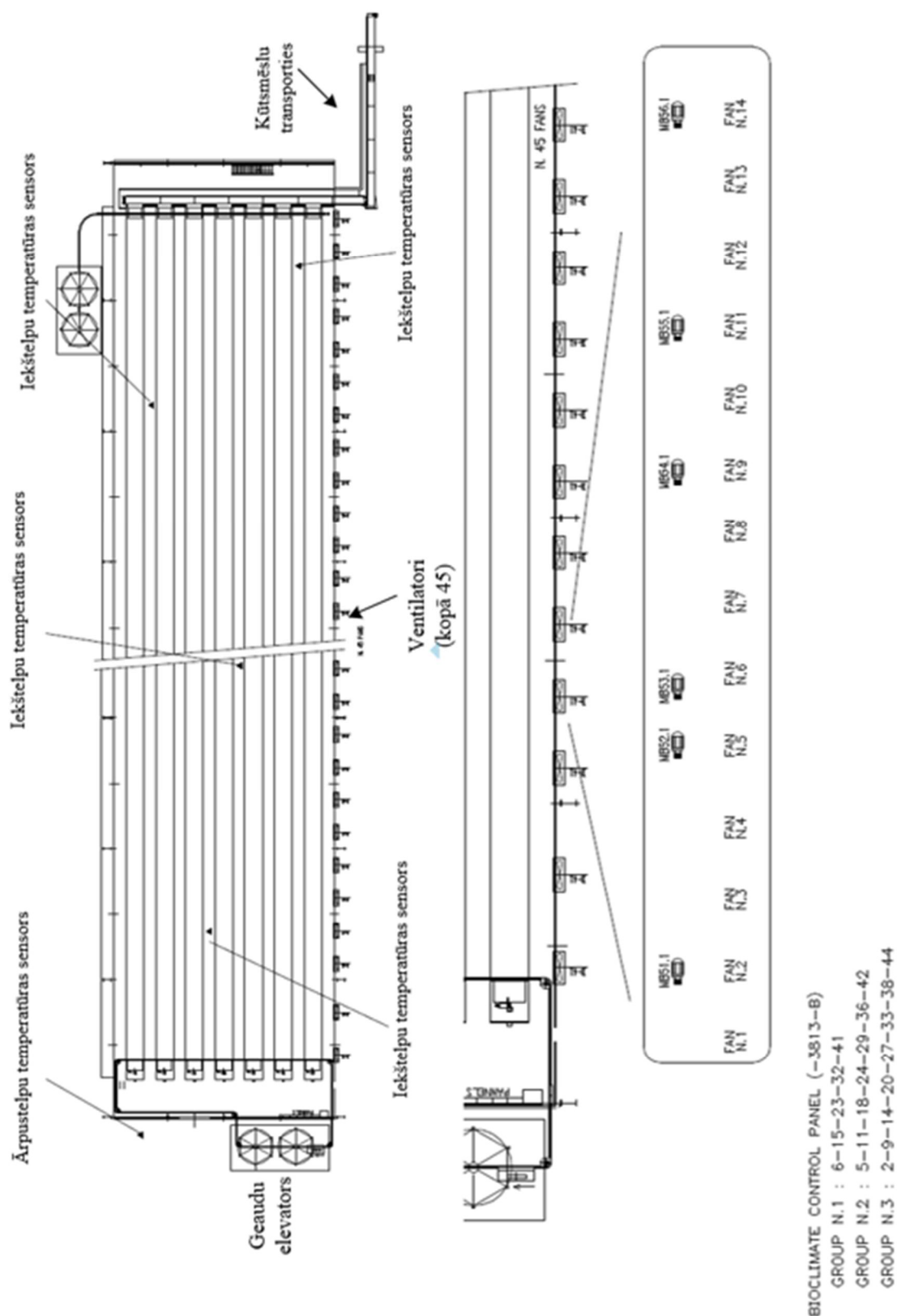
2. att. Parasta automātslēdža funkcionālās darbības shēma



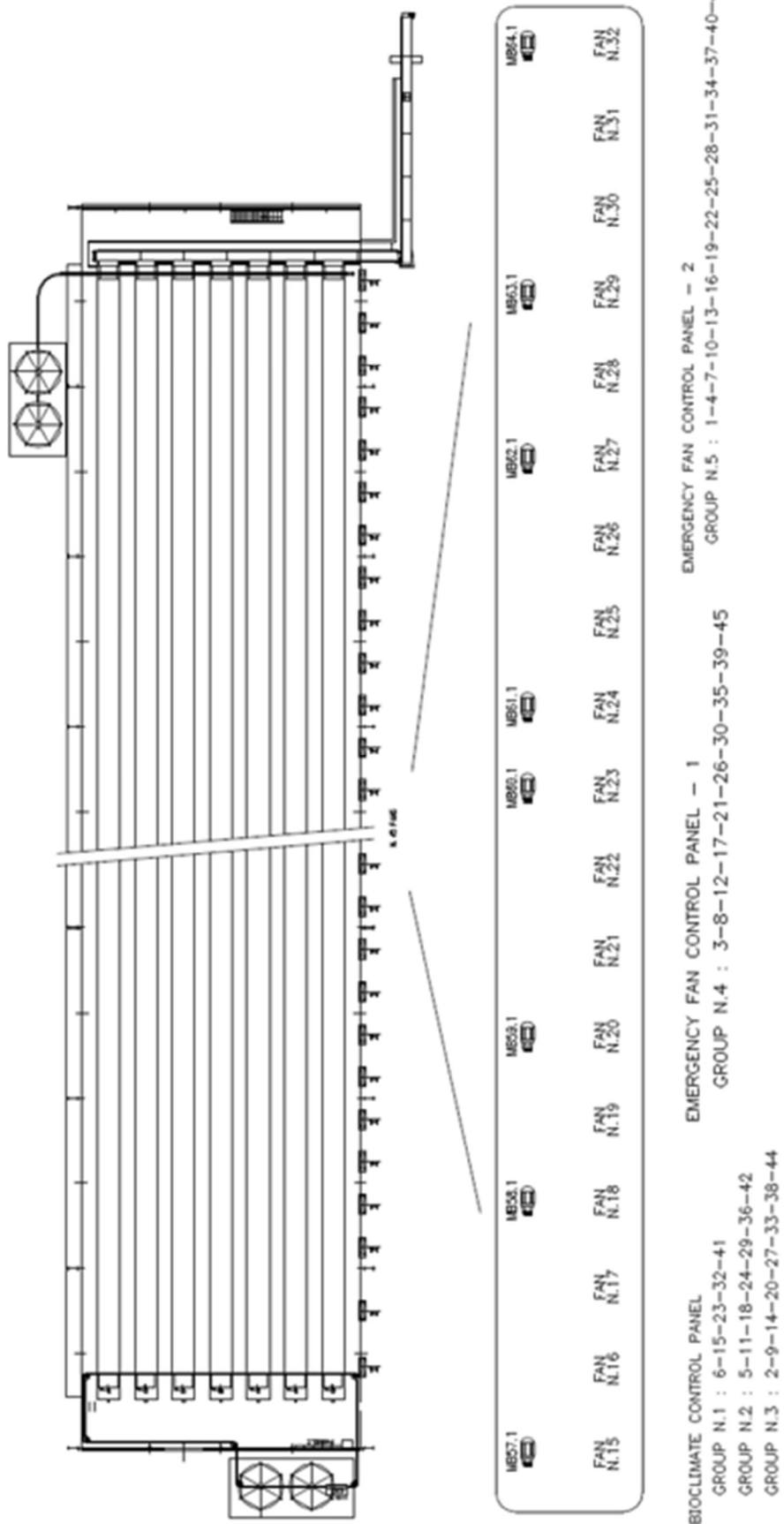
3. att. Automātslēdža ar paaugstināto selektivitāti funkcionālās darbības shēma

Kā var redzēt, automātslēdzī ar paaugstinātu selektivitāti papildus galvenajai strāvas ķēdei ir izveidota papildus strāvas ķēde ar ierobežojošo rezistoru, papildus bimetālisku elementu un papildus šo ķēdi atslēdzošiem kontaktiem, kas iedarbojas uz galveno kontaktu, piebremzējot jaudas kontaktu atslēgšanu liela īsslēguma gadījumā.

Ventilatoru un temperatūras sensoru izvietojums vistu kūtīs



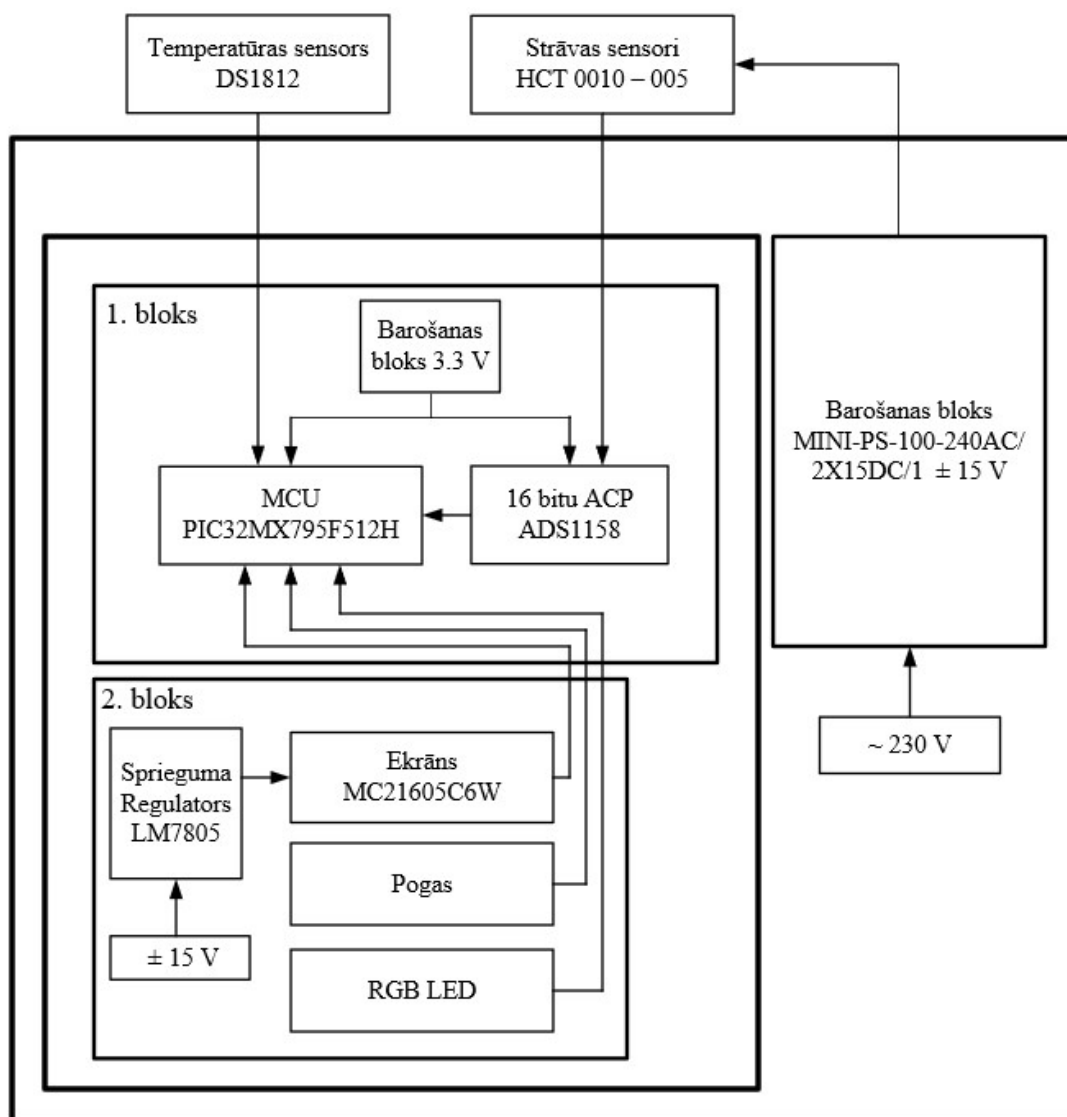
1. att. Ventilatoru un temperatūras sensoru izvietojums vistu kūtīs



2. att. Ventilatoru izvietojums vīstu kūtīs

Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas apraksts

Mikrokontroleris, analogciparu pārveidotājs un līdzstrāvas 3.3 V barošanas bloks ir izvietoti vienā blokā. Otrā blokā ir ekrāns – informācijas attēlošanai, pogas – informācijas ievadīšanai un attēlotās informācijas izvēlei, RGB LED un sprieguma regulators, lai nodrošinātu ekrānam līdzspriegumu 5 V. Elektroniskās plātes ir ievietotas vienā plastmasas korpusā, kuru var novietot uz DIN sliedēm. Elektriskajā skapī, kopā ar elektroniskās plātes korpusu, ir līdzstrāvas barošanas bloks ± 15 V, kuru arī var novietot uz DIN sliedi. Ārpus elektriskā skapja atrodas temperatūras sensors un strāvas sensori, kuri ir paredzēti uzstādīšanai elektromotoru vadības skapī. Iekārtas elektriskais skapis jāuzstāda blakus elektromotoru vadības skapim, lai samazināti sensoru vadu nepieciešamu garumu, jo sensori ar lielāku vada garumu maksā vairāk.



1. att. Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas blokshēma

Statora tinumu temperatūras noteikšanas iekārtas galvenās komponentes un to cena

Komponente	Daudzums	Cena, EUR
ACP ADS 1158	3	11.72
MCU PIC32MX795F512H	1	7.91
ekrāns - MC21605C6W-SPR-V2	1	7.55
Strāvas sensori HCT 0010 – 005 (5 A)	45	53
Barošanas bloks PCB 230 V to 3.3 V 200 mA	1	5
Lineārais sprieguma regulators LM7805	1	0.7
Temperatūras sensors DS1812	1	2.15
Barošanas bloks MINI-PS-100-240AC/2X15DC/1 - AC/DC	2	148
Elektroniskās plātes korpuss CNMB/5/2	1	8.17
Elektroniskā plāte 4 slāņu 86.5x84	1	85.33, ja 1 plāte; 61.30, ja 2+ plātes; 30.57, ja 5+ plātes
Elektroniskā plāte 4 slāņu 42x83 mm	1	76.46 ja 1 plāte; 53.01 ja 2+ plātes; 24.34 ja 5+ plātes

Ventilatora asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas izmaksas salīdzinājums starp esošo situāciju ar statora tinumu temperatūras iekārtu un NPV analīzes rezultāti

1. tabula

Ventilatora asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas izmaksas salīdzinājums starp esošo situāciju ar statora tinumu temperatūras iekārtu 15 gadu periodā

Laiks, gadi	Ar statora tinumu temperatūras iekārtu izmaksas, EUR	Esošas situācijas izmaksas, EUR
1	426	0
2	426	0
3	426	0
4	426	2600
5	426	0
6	426	0
7	426	1300
8	426	2600
9	426	0
10	426	0
11	426	0
12	426	8000
13	426	1950
14	426	1300
15	3026	2600

2. tabula

Ventilatora asinhrono elektrodzinēju ekspluatācijas NPV 15 gadu periodā

Laiks, gadi	NPV ar statora tinumu temperatūras iekārtu, EUR	Esošas situācijas NPV, EUR
0	– 2780	0
1	– 387	0
2	– 352	0
3	– 320	0
4	– 291	– 1776
5	– 265	0
6	– 240	0
7	– 218	– 667.11
8	– 199	– 1213
9	– 181	0
10	– 164	0
11	– 149	0
12	– 136	– 2549
13	– 123	– 565
14	– 112	– 342
15	– 724	– 622
NPV kopā	– 6642	– 7734