

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

Svetlana ORLOVA

Doktora studiju programmas „Elektriskās mašīnas un aparāti” doktorante

AUTONOMU BAROŠANAS AVOTU INDUKTORĢENERATORU OPTIMIZĀCIJA

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs

Dr. habil. sc. ing.

V. PUGAČEVŠ

Zinātniskais konsultants

Dr. habil. sc. ing., profesors

N. LEVINS

Rīga 2011



Šis darbs izstrādāts Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

Šis darbs izstrādāts Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Eiropas energotehnoloģiju stratēģiskā plāna Latvijas aktivitāšu atbalsta zinātniskā grupa”, identifikācijas numurs 1DP/1.1.1.2.0./09/APIA/VIAA/027.

This work supported by the European Social Fund within the project „Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University”.

This work financially supported by European Social Fund Project “Scientific Group Supporting Latvian Activities of the European Strategic Energy Technology Plan”, No.1DP/1.1.1.2.0./09/APIA/VIAA/027.

Работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ».

Работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Научная группа поддержки Латвийской деятельности Европейского стратегического плана энерготехнологий», номер 1DP/1.1.1.2.0./09/APIA/VIAA/027.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs veltīts rekomendāciju izstrādei aksiālo induktorģeneratoru energoefektivitātes paaugstināšanā, balstoties uz magnētiskā lauka izpēti.

Darbā tiek veikta magnētiskā lauka aprēķina metodikas izvēle un pamatojums, tiek piedāvāts trīsdimensiju magnētiskā lauka modelēšanas veids, tiek pamatota mērķfunkcija rezultātu analīzei un tiek noteikta racionāla induktormašīnas zobzonas ģeometrija. Iegūto rezultātu aprobācija tiek veikta uz Latvijā ražotā zemvagona induktorģeneratora 2ГВ.13.2У1 bāzes.

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, literatūras sarakstu, slēdzienus, kā arī 8 pielikumus, kopā uz 127 lappusēm, literatūras sarakstā 98 informācijas avoti. Darbs ilustrēts ar 63 attēliem un 26 tabulām.

SUMMARY

The present promotion work is devoted to the development of recommendations how to raise the energy efficiency of axial inductor machines on the basis of magnetic field investigations.

The work presents the choice and substantiation of the methods of calculation of magnetic field. It describes the procedure of modelling of three-dimensional magnetic field and substantiates the objective function for the result analysis. Rational geometry of tooth zone of the inductor machine is also defined in the present work. The approbation of gained results is realized on the basis of under carriage inductor generator 2ГВ.13.2У1 produced in Latvia.

The present promotion work is written in the Latvian language. It contains introduction, 4 chapters, conclusions, the list of references and 8 appendixes. In total there are 127 pages. The list of references includes 98 sources of information. The work is illustrated by 63 drawings and 26 tables.

АННОТАЦИЯ

Промоционная работа посвящена разработке рекомендаций по повышению энергоэффективности аксиальных индукторных машин на основе исследования магнитного поля.

В работе производится выбор и обоснование методики расчёта магнитного поля, предлагается способ моделирования трехмерного магнитного поля, обосновывается целевая функция для анализа результатов и определяется рациональная геометрия зубцовой зоны индукторной машины. Апробация полученных результатов производится на базе подвагонного индукторного генератора 2ГВ.13.2У1, производимого в Латвии.

Промоционная работа написана на латышском языке, содержит введение, 4 раздела, список литературы, заключения, а также 8 приложений, всего на 127 страницах, список литературы содержит 98 источников информации. Работа иллюстрирована 63 рисунками и 26 таблицами.

SATURS

Pieņemtie apzīmējumi	8
Ievads	12
1. Aksiālā induktormašīna kā ekonomisks paaugstināta drošuma autonomas elektroapgādes avots	18
1.1. Homopolāru un heteropolāru induktormašīnu salīdzinoša analīze.....	18
1.2. Induktormašīna kā autonomas elektroapgādes avots aviācijā, vēja enerģētikā un dzelzceļa transportā	20
1.3. Aksiālās induktormašīnas enkura tinumu tipa izvēle un pamatojums.....	27
1.4. Enkura tinuma shēmas pamatojums un tinuma koeficienta noteikšana	31
1.5. Secinājumi	37
2. Aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķins – pamats elektriskās mašīnas raksturlielumu noteikšanai un tās parametru optimizācijai.....	38
2.1. Elektromagnētiskā lauka vienādojumi.....	38
2.2. Magnētiskā lauka aprēķināšanas ar galīgo elementu skaitlisko metodi galvenās priekšrocības.....	40
2.3. Aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķināšanas metodes izvēle un pamatojums.....	42
2.4. Aksiālā induktorģeneratora tukšgaitas un īsslēguma raksturlielumi un to uzbūve uz magnētiskā lauka aprēķina bāzes.....	51
2.5. Secinājumi	55
3. Rekomendāciju izstrāde aksiālās induktormašīnas efektivitātes paaugstināšanai	56
3.1. Pētījuma objekta – zemvagona induktorģeneratora 2ГВ.13.2У1 apraksts.....	56
3.2. Aksiālā induktorģeneratora magnētiskās ķēdes parametri, kas nosaka mašīnas izmantošanas efektivitāti	59
3.3. Aksiālās induktormašīnas zobu zonas ģeometrijas optimizācija, pamatojoties uz magnētiskā lauka izpēti	60
3.4. Aksiālā induktorģeneratora magnētiskā lauka skaitliskās modelēšanas rezultāti	63
3.5. Rekomendācijas racionālai induktormašīnas zobzonas ģeometrijas izvēlei	69
3.6. Secinājumi	70
4. Aksiālās induktormašīnas eksperimentālie pētījumi un tās tālākās pilnveidošanas iespējas.....	72

4.1. Eksperimentālo pētījumu mērķis un uzdevumi	72
4.2. Eksperimentālās pārbaudes veikšanas ģenerators eksperimentālā modeļa apraksts ...	72
4.3. Sērijveida ģenerators un eksperimentālā parauga eksperimentālo pētījumu rezultāti	74
4.4. Eksperimenta rezultātu un teorētisko datu salīdzināšana	80
4.5. Priekšlikumi induktorgenerators konstrukcijas pilnveidošanai.....	83
4.6. Secinājumi	84
Slēdzieni.....	85
Izmantotie informācijas avoti.....	87
Pielikumi.....	95
1.pielikums	96
2.pielikums	100
3.pielikums	102
4.pielikums	108
5.pielikums	113
6.pielikums	115
7.pielikums	118
8.pielikums	121

PIEŅEMTIE APZĪMĒJUMI

A	vektoriālā potenciālā vērtība	Wb/m
a	paralēlo zaru skaits enkura tinumos	-
A_{AB}, A_{CD}	vektoriālā potenciāla vērtības uz robežām AB un CD	Wb/m
A_Z	vektoriālā magnētiskā potenciāla komponente uz ass Z	Wb/m
B	indukcijas vērtība	T
b_1	statora zoba iedaļa	-
b_2	rotora zoba iedaļa	-
b_{ar}	rotora jūga loka garums	m
b_{as}	statora jūga loka garums	m
b_{br}	transformēta korpusa zem rotora paketes vidus loka garuma vērtība	m
b_{bs}	transformēta korpusa virs statora paketes vidus loka garuma vērtība	m
b_{ir}	transformēta ieliktna starp rotora paketēm loka garuma vērtība	m
b_{is}	transformēta korpusa starp statora paketēm loka vērtība	m
B_j	indukcija jūgā	T
$B_{maxieliktis}$	maksimālā magnētiskās indukcijas vērtība ieliktnī	T
$B_{maxstatne}$	maksimāla magnētiskās indukcijas vērtība statnē	T
$B_{minieliktis}$	minimālā magnētiskās indukcijas vērtība ieliktnī	T
$B_{minstatne}$	minimālā magnētiskās indukcijas vērtība statnē	T
B_{max}	maksimālās indukcijas vērtība	T
B_{min}	minimālas indukcijas vērtība	T
B_n	indukcijas normālā komponente	T
B_r	indukcija rotora serdenī	T
b_{r1}	statora rievas platums	m
b_{r2}	rotora rievas platums	m
$B_{vidieliktis}$	magnētiskās indukcijas vidējā vērtība ieliktnī	T
$B_{vidstatne}$	magnētiskās indukcijas vidējā vērtība statnē	T
b_{z1}	statora zobu platums	m
B_{z1}	indukcija statora zobā	T
b_{z2}	rotora zobu platums	m
B_{z2}	indukcija rotora zobā	T
B_δ	magnētiskā indukcija gaisā spraugā	T
B_τ	indukcijas tangenciālā komponente	T
C_g	mērķfunkcijas vērtība	-
D_a	statora ārējais diametrs	m
D_{ie}	rotora ieliktna diametrs	m
D_j	statora jūga diametrs	m

D_s	statora izvirpojuma diametrs	m
E_1	tukšgaitas EDS līnijas vērtība	V
E_0	tukšgaitas EDS	V
f_1	elektrodzinējspēka frekvence	Hz
F_f	ierosmes tinuma MDS	A
$F_{ieliktņi}$	kopējā MDS vērtība ieliktnī	A
F_j	magnētiskā potenciāla kritums jūgā	A
F_m	MDS vērtības aksiālajā magnētavadā	A
F_r	magnētiskā potenciāla kritums rotorā	A
F_{statne}	kopējā MDS vērtība statnē	A
F_z	MDS vērtības zobzonā	A
F_{z1}	magnētiskā potenciāla kritums statora zobā	A
F_{z2}	magnētiskā potenciāla kritums rotora zobā	A
F_δ	magnētiskā potenciāla kritums spraugā	A/m
G_g	ģenerators masa	kg
h_0	rotora zoba relatīvais augstums	-
$H_{ieliktņi}$	kopējā magnētiskā lauka intensitātes vērtība ieliktnī	A/m
$H_{maxieliktņi}$	maksimālā magnētiskās lauka intensitātes vērtība ieliktnī	A/m
$H_{maxstatne}$	maksimālā magnētiskās lauka intensitātes vērtība statnē	A/m
$H_{minieliktņi}$	minimālā magnētiskās lauka intensitātes vērtība ieliktnī	A/m
$H_{minstatne}$	minimālā magnētiskās lauka intensitātes vērtība statnē	A/m
h_r	rotora jūga augstums	m
h_s	statora jūga augstums	m
H_{statne}	kopējā magnētiskā lauka intensitātes vērtība statnē	A/m
$H_{vidieliktņi}$	magnētiskās lauka intensitātes vidējā vērtība ieliktnī	A/m
$H_{vidstatne}$	magnētiskās lauka intensitātes vidējā vērtība statnē	A/m
h_{z1}	statora zoba augstums	m
H_{z1}, H_{z2}, H_j	magnētiskā lauka intensitātes vērtības	A/m
h_{z2}	rotora zoba augstums	m
I_f	ierosmes strāvas vērtība	A
I_k	īsslēguma strāvas vērtība	A
I_N	ģenerators nominālā strāva	A
I_S	slodzes strāvas vērtība	A
j_z	strāvas blīvums koordinātā, kas sakrīt ar mašīnas rotācijas asi	A/m ²
k	mazs vesels skaitlis	-
k_1, k_2	veseli skaitļi	-
k_d	tinuma sadalījuma koeficients	-
k_{FE}	paketes aizpildīšanas ar tēraudu koeficients	-
k_p	soļa saīsinājuma koeficients	-
k_{w1}	tinuma koeficients pēc pirmās harmonikas	-

l	statora paketes garums	m
L	induktivitāte	H
l_s	magnētiskā ceļa vidējais garums pa statni	m
l_i	magnētiskā ceļa vidējais garums pa ieliktni	m
l_j	jūga garums	m
l_{ir}	attālums starp rotora paketēm	m
l_{is}	attālums starp statora paketēm	m
m	fāžu skaits	-
M	saslēdzošais gredzens	-
n	rotācijas frekvence	min ⁻¹
n_N	nominālā rotācijas frekvence	min ⁻¹
N	lielākais kopējais statora Z_1 un rotora Z_2 zobu skaita dalītājs	-
n_k	spoļu skaits katrā paralēlā zarā	-
N_S	spoļu skaits ģenerators fāzē	-
p	polu pāru skaits	-
P_N	nomināla jauda	kW
q	rievu skaits uz polu un fāzi	-
S_{ar}	rotora jūga laukums	m ²
S_{as}	statora jūga laukums	m ²
S_j	statora jūga šķērsriezums	m ²
S_r	rotora serdeņa šķērsriezums	m ²
S_{z1}	statora zoba šķērsriezums tēraudā	m ²
S_{z2}	rotora zoba šķērsriezums tēraudā	m ²
U_0	tukšgaitas spriegums	V
U_d	taisngrieztais spriegums	V
U_l	līnijas sprieguma vērtība	V
U_k	īsslēguma sprieguma vērtība	V
U_N	ģenerators nominālais spriegums	V
w_f	vijumu skaits ierosmes spolē	-
w_k	vijumu skaits vienā enkurā spolē	-
X'_d	sinhronā ģenerators pārejas pretestība	Ω
X_S	sinhronā pretestība	W
Z_1	statora zobu skaits	-
Z_2	rotora zobu skaits	-
\bar{B}	magnētiskā lauka indukcija	T
\bar{H}	magnētiskā lauka intensitāte	A/m
\bar{E}	elektriskā lauka intensitāte	V/m
\bar{E}_1	EDS vektors	V
\bar{J}	strāvas blīvums	A/m ²
\bar{S}	vektors S apraksta fāzes A izvietojumu	-

PIEŅEMTIE APZĪMĒJUMI GRIEĶU ALFABĒTĀ

α_C	leņķis starp divu spoļu EDS, kas atrodas uz blakus esošiem enkura zobiem	el.grādi
α_Z	leņķis par kuru tiek nobīdīti blakus esošo spoļu EDS	el.grādi
$\cos \varphi$	jaudas koeficients	-
φ_p	magnētiska lauka periods	grādi
λ_a	vidējā magnētiskā vadītspēja	-
λ_r	spraugas vadītspējas koeficients statora rievas iedaļas robežās	-
λ_z	spraugas vadītspējas koeficients statora zoba iedaļas robežās	-
μ_x, μ_y	magnētiskās caurlaidības tenzora komponentes	-
γ	rotora rievas relatīvais platums (rotora rievas platuma attiecība pret rotora zoba platuma)	-
γ_{1-2}	rotora zoba platuma attiecība pret statora zoba platumu	-
δ	gaisa sprauga	m
Δ	loksnes biezums	m
η	lietderības koeficients	-
τ	pola iedaļa	-
τ_0	rotora pola iedaļas relatīvais lielums	-
Φ	kopējā magnētiskā plūsma	Wb
Φ_A	fāzes A plūsma	Wb
Φ_{AD}	magnētiskā plūsma uz arējās riņķa līnijas AD	Wb
Φ_M	plūsma, kura iziet caur polu pāri	Wb
Φ_{max}	magnētiskās plūsmas maksimālā vērtība statora zobā, kad statora zobs atrodas pret rotora zobu	Wb
$\Phi_{max(k)}$	īsslēguma maksimālo magnētisko plūsmu vērtības	Wb
Φ_{min}	magnētiskās plūsmas minimālā vērtība statora zobā, kad statora zobs atrodas pret rotora rievu	Wb
$\Phi_{min(k)}$	īsslēguma minimālo magnētisko plūsmu vērtības	Wb
Φ_r	maksimālā plūsma rievā	Wb
Φ_z	maksimālā plūsma zobā	Wb

SAĪSINĀJUMI

EDS	elektrodzinējspēks
ESM	elektronu skaitļojamā mašīna
MDS	magnētdzinējspēks
RER	Rīgas Elektromašīnbūves rūpnīca
VEI	vēja enerģētiskā iekārta

IEVADS

Enerģijas patēriņa pieaugums ar katru gadu prasa paaugstināt energoefektivitāti, t.i., kopumā optimizēt energosistēmas. Par cik elektriskās mašīnas ir galvenie enerģijas pārveidotāji, tad nepieciešama to savlaicīga modernizācija. Enerģijas tirgus izaugsmes, jaunu tehnoloģiju attīstības apstākļos, palielinoties ekoloģiskajām prasībām, nepieciešami jauni risinājumi elektrisko mašīnu masas un gabarītu rādītāju, drošuma uzlabošanā, lai elektriskās mašīnas būtu iespējams remontēt un droši ekspluatēt. Iekārtu energoefektivitātes paaugstināšana šodien nav vienkārši nepieciešama, bet arī ekoloģiski un ekonomiski pamatota.

Šajā darbā tiek aplūkoti elektromehāniskie enerģijas pārveidotāji - induktormašīnas. Par induktormašīnu sauc sinhrono elektrisko mašīnu, kurai ierosmes plūsma, kas iet caur statora zobu, pulsē gaisa spraugas starp zobu un rotoru magnētiskās vadītspējas izmaiņu dēļ. Šīs mašīnas atšķirīgā konstruktīvā īpatnība ir tāda, ka tajā nav tinumu, kuri rotē (visi tinumi izvietoti statorā un ir nekustīgi), bet rotors izgatavots zobrata veidā, kuram griežoties notiek magnētiskās plūsmas, kas saķēdēta ar enkura tinumu, pulsācija.

Induktormašīnām ir virkne priekšrocību, salīdzinot ar heteropolāru sinhrono mašīnu konstrukcijām, tādas kā:

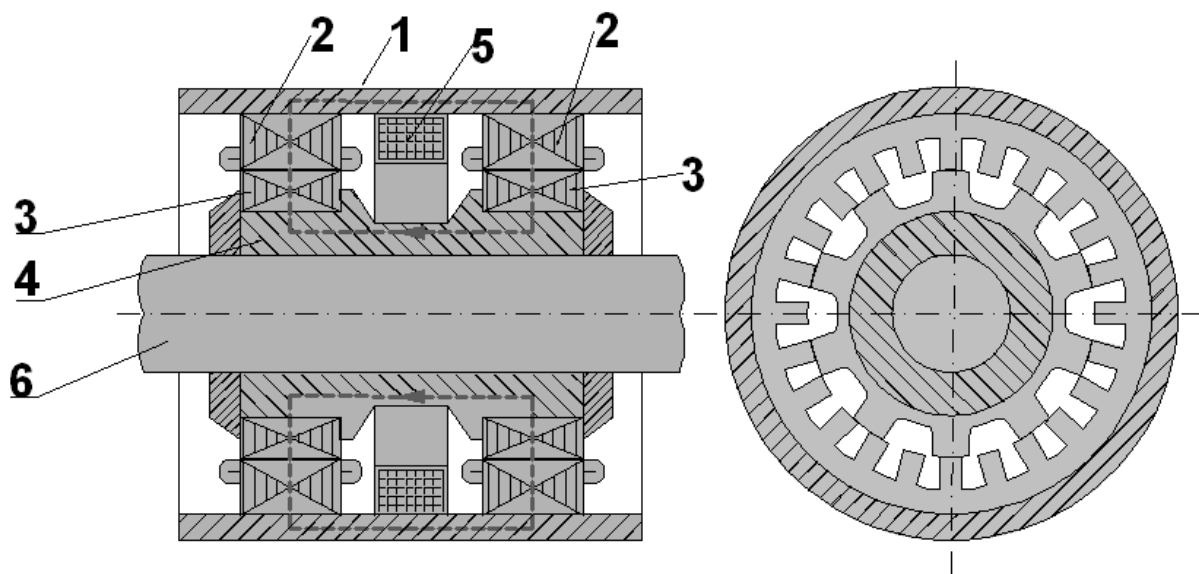
- nav rotējoši tinumi un rotora izpildījums zobrata veidā, turklāt elektroenerģijas pievadei un novadei nav vajadzīgi kolektori, sukas un kontaktgredzeni;
- induktormašīnā, kuru izmanto paaugstinātas frekvences maiņstrāvas iegūšanai, pastāv iespēja izveidot lielāku polu pāru skaitu, salīdzinot ar mainīgu polu sinhrono mašīnu ar tādu pašu statora izvirpojuma diametru;
- tas, ka nav rotējoši tinumi, tad mašīna ir bezkontakta, līdz ar to iekārta ir vienkārša, ar paaugstinātu drošumu, vieglāk remontējama.

Induktormašīnas ir ar radiālo ierosmi (heteropolārās) un ar aksiālo ierosmi (homopolārās vai aksiālās). Induktormašīnās ar radiālo ierosmi raksturīgs tas, ka ierosmes spoles tajās izvietotas statora rievās, sakarā ar ko ierosmes tinuma radītajai magnētiskajai plūsmai šajās mašīnās nav aksiāla virziena. Pretstatā tam aksiāli ierosināmās mašīnās ierosmes spoles novietotas koaksiāli mašīnas vārpstai, un tāpēc to radītajai plūsmai ir aksiāls virziens. Atšķirības magnētisko plūsmu virzienos visai būtiski ietekmē mašīnas konstrukciju, tās raksturlielumus un īpašības. Turklāt aksiālās induktormašīnas ir ekonomiskākas sakarā ar

to, ka mazāk jāizmanto varš un tām piemīt augstāks lietderības koeficients. Tāpēc sīkāk tiek aplūkotas tikai induktorģeneratora ar aksiālo ierosmi īpatnības.

Aksiālajam induktorģeneratoram var būt viena, divas vai pat vairāk par divām statora un rotora paketēm. Tālāk tiek aplūkoti tikai divpakešu induktorģeneratori.

Aksiālais induktorģenerators (II.att.) sastāv no korpusa, kurā izvietotas, piemēram, divas statora paketes ar enkura tinumiem un divām rotora zobu paketēm (bez tinumiem). Gredzenveida ierosmes tinums izvietots starp statora paketēm. Kā parādīts II.att., magnētdzinējspēka (MDS) ietekmē ierosmes spoles magnētiskajā ķēdē rodas plūsma, kura iet pa rotora ieliktni, zvaigžņveidā izplatās rotora zobos, iziet caur spraugu statora zobos, tālāk caur statora jūgu pa korpusu, zvaigžņveidā izplatās pa statora otrās paketes zobiem, spraugu, iziet caur rotora otrās paketes zobiem un noslēdzas caur ieliktni.



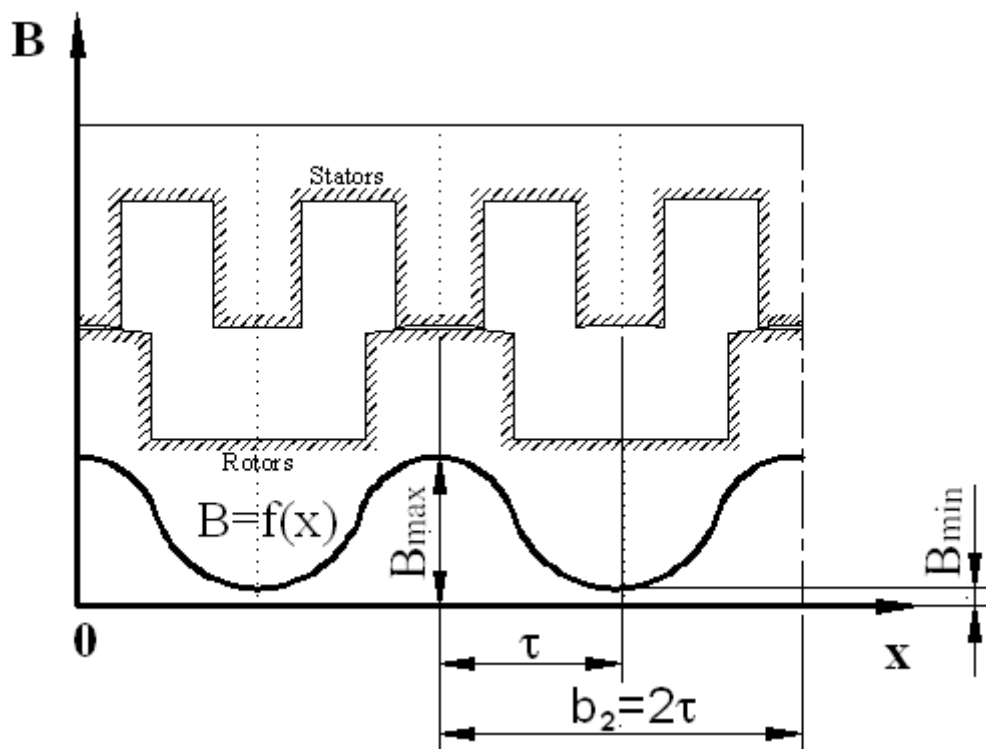
II.att. Aksiālais divpakešu induktorģenerators:

1 - korpusa, 2 – enkura paketes ar tinumiem, 3 - rotora paketes,
4 - rotora ieliktnis, 5 - ierosmes tinums, 6 - vārpsta

Ierosmes magnētiskās indukcijas sadalījuma līkne gaisa spraugā parādīta I2.att. Šajā attēlā redzams, ka, rotoram griežoties, indukcija mainās (saglabājot virzienu) no maksimālās vērtības B_{\max} līdz minimālai B_{\min} zem rievas. Indukcijas izmaiņas ir periodiskas. Statora zobā plūsmas izmaiņas viens periods atbilst rotora pagriezienam par vienu zoba iedaļu, un tāpēc elektrodzinējspēka (EDS) frekvence

$$f_1 = \frac{Z_2 \cdot n}{60}, \quad (I.1)$$

kur Z_2 – rotora zobu skaits;
 n –rotācijas frekvence, min^{-1} .



12.att. Ierosmes magnētiskās indukcijas sadalījuma līkne aksiālās vienfāzes induktormašīnas gaisa spraugā: τ - pola iedaļa, b_2 - rotora zoba iedaļa

Ir acīmredzams, ka mainoties magnētiskajai indukcijai no B_{max} līdz B_{min} spraugā, plūsmas izmantošanas pakāpe, inducējot EDS enkura tinumos, ir zemāka nekā parastā izpildījuma sinhronajās mašīnās. Tomēr iepriekš norādīto konstruktīvo un tehnoloģisko priekšrocību dēļ racionāli projektētas divpakešu aksiālās paaugstinātas frekvences induktormašīnas pēc tehniskajiem un ekonomiskajiem rādītājiem praktiski neatpaliek no heteropolāru sinhronajām mašīnām ar tādiem pašiem nominālajiem datiem.

Induktormašīnas darbības princips ir zināms kopš XIX gadsimta. V. Apsīša un L. Dombura darbos [1,2] sīki tiek izklāstīta šī tipa mašīnu attīstība un praktiskā izmantošana. Taču elektromašīnbūvē plašāk induktormašīnas sāka izmantot tikai kopš pagājušā gadsimta vidus, tādu labu īpašību dēļ, kā ekspluatācijas drošums, izgatavošanas vienkāršums, iespēja izgatavot ar lielām rotācijas frekvencēm. Savas attīstības sākumā induktormašīnas tika izmantotas galvenokārt kā paaugstinātas frekvences vienfāzes maiņstrāvas barošanas avoti. Tomēr veiktie pētījumi ļāva atklāt plašākas daudzfāžu induktormašīnu izmantošanas iespējas. Pateicoties A.Aļeksejeva, V.Vologdina, J.Petruņkina un M.Spicina darbiem, pašreiz

induktormašīnas sekmīgi tiek izmantotas transportlīdzekļu elektroapgādes sistēmās – aviācijā, dzelzceļa, jūras un automobiļu transportā, kā arī kā rūpnieciskajās un paaugstinātas frekvences autonomajās elektroierīces [3-5].

Pie vēlāka perioda interesantākajiem darbiem, kas veltīti induktormašīnu galveno īpatnību pētīšanai, jāattiecinā M. Aļeksejevas, N. Alpera, V. Apsīša, L. Dombura, R. Žežerina, M. Krasnošapkas, N. Levina, V. Pugačeva, A. Serebrjakova, E. Skruzīša, A. Terzjana, V. Šarova, G. Šturmana darbi [2,6-18]. Pateicoties šo zinātnieku pētījumiem, pašreiz mums ir pietiekami pilnīgs priekšstats par svarīgākajiem fizikāliem procesiem induktormašīnās, kas ļāva krasi celt pēdējo tehnisko līmeni un izgatavošanas kvalitāti. Turklāt liela nozīme induktormašīnu pilnveidošanā ir to magnētiskā lauka kvalitatīvai analīzei.

Jāatzīmē, ka aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka pētīšanai diezgan liela uzmanība tika pievērsta virknē pagājušā gadsimta darbos [19-28]. Elektrisko mašīnu teorija bāzējās uz magnētiskā lauka mašīnas izpētes rezultātiem gaisa spraugā ar analītiskām metodēm. Šo lauku raksturojošie koeficienti tika noteikti, risinot magnētiskā lauka vienādojumus, kas ietvēra skalārā magnētiskā potenciāla funkcijas atrašanu, kura apmierinātu Laplasa vienādojumu un uzdotos robežnosacījumus. Vispārējā veidā uzdevums ietvēra magnētiskā lauka noteikšanu starp divām koaksiālām feromagnētiskām zobvirsmām ar uzdotu magnētiskā potenciāla sadalījumu uz šīm virsmām un aplūkojamās zobu konfigurācijas. Tomēr pētījumu vienkāršošanas un vienkāršāku aprēķinu izteiksmju iegūšanas nolūkā, darbos pieņēma virkni vienkāršojumus un pieņēmumus, kurus parasti ievieša, pētot magnētiskos laukus sinhronajās mašīnās:

- magnētiskais lauks gaisa spraugā tika pieņemts plakanparalēls;
- enkura izvirpojuma virsma tika pieņemta gluda, t.i., netika ņemts vērā enkura zobainums;
- tērauda magnētiskā caurlaidība tika pieņemta vienāda ar bezgalību, t.i., netika ņemts vērā mašīnas magnētiskās ķēdes elementu piesātinājums.

Ņemot vērā pieņēmumus, pētāmo zonu attēloja daudzstūra veidā, kura malas veidoja enkura gludā virsma, induktora zobvirsma un aksiālas līnijas, kas iet caur induktora zobu vidus.

Vēlākos Latvijas Republikas zinātnieku A. Zviedra, U. Brakanska, A. Zaiceva, A. Gasparjana, E. Kamoliņa un A. Podgornova [29-33] darbos izskatīti magnētiskā lauka kvantitatīvās modelēšanas ar galīgo elementu metodi jautājumi. Šīs metodes priekšrocība ir tāda, ka tā ļauj risināt uzdevumus ar jebkuras sarežģītības pakāpes magnētiskas sistēmas

ģeometriju, ņemot vērā, ka vides ir nelineāras. Galīgo elementu metodes būtība ir tā, ka nepārtraukta vide tiek aizstāta ar galīga skaita diskrētu elementu kopumu, kas aplūkoti kā atsevišķi magnētiskās ķēdes elementi un kas veido aprēķina apgabalu pārklājošu režģi. Galīgo elementu metodes ideju izstrādāja Krievijas zinātnieki jau 1936.gadā, bet efektīvas skaitļošanas tehnikas trūkuma dēļ tā neattīstījās.

Magnētiskā lauka aprēķins elektriskajā mašīnā ar kvantitatīvām metodēm ļauj detalizēti atrast tā sadalījumu atsevišķos magnētiskās ķēdes elementos. Saliktā zobzonas ģeometrija, lielie aprēķina zonas izmēri un tas, ka vides ir ar dažādu magnētisko caurlaidi, prasa lielu skaitu mezglu, izmantojot galīgo elementu metodi. Elementu skaits, uz kādu tiek sadalīta elektriskās mašīnas lauka zona, var sasniegt vairākus desmitus tūkstošu. Tāpēc tādas klases vienādojumu sistēma var tikt risināta tikai ar pilnveidotām skaitļošanas programmām un izmantojot ātrdarbības skaitļošanas tehniku. Pašreiz pastāv plašs programmu spektrs, kas balstītas uz galīgo elementu metodi. Šajā darbā magnētiskā lauka modelēšanai tiek izmantots programmu komplekss QuickField.

Tostarp magnētiskā lauka analīze aksiālajā induktormašīnā līdz šim brīdim tika veikta, neņemot vērā tā sadalījuma īpatnības aksiālā virzienā, kas noveda pie būtiskām kļūdām. Tāpēc aksiālās induktormašīnas tehnisko un ekonomisko rādītāju uzlabošana uz precīzākas magnētiskā lauka analīzes bāzes, ņemot vērā tā aksiālo sastāvdaļu, ir aktuāls uzdevums.

Šī darba mērķis ir rekomendāciju izstrāde aksiālās induktormašīnas efektivitātes uzlabošanā, balstoties uz magnētiskā lauka analīzi, kam piemīt radiāli tangenciāls – aksiāls sadalījums.

Ar efektivitāti saprot kādā pakāpē tiek realizēta aksiālā induktora ģeneratora lietošana tā ekspluatācijas laikā. Efektivitāte tiek novērtēta ar galveno kritēriju kvantitatīviem lielumiem, kuri nosaka elektriskās mašīnas derīgumu ekspluatācijai.

Galvenie kritēriji pie novērtēšanas var būt:

- īpatnējā jauda, t.i. elektriskās mašīnas nominālā jauda attiecināta uz elektriskās mašīnas masu (apjomu);
- lietderības koeficients;
- pārslogojamība;
- relatīvās griešanās frekvences robežvērtība;
- regulēšanas diapazons;
- elektriskās mašīnas pieļaujamā sasilšana;

- drošums;
- lietošanas laiks;
- nostrāde uz atteikumu;
- trokšņa līmenis
- izgatavošanas izmaksas
- ekspluatācijas izdevumi.

Bez minētiem var būt arī citi (specifiskie kritēriji), tādi kā:

- izturība pret radiāciju;
- izturība pret salu;
- ķīmiskā izturība;
- sprādziendrošība un citi.

Bez tam ar efektivitātes paaugstināšanu jāsaprot darbība, kas vērsta uz šo izvēlēto kritēriju kvantitatīvu novērtējumu (atkarībā no tā, kam paredzēta elektriskā mašīna) virs līmeņa (pasaulē, pēc nozares dotai valstij, konkrētam ražotājam) kas sasniegts apskatāmai elektriskās mašīnas tipam, daļa no tiem var izrādīties tādi, kurus nevar izmainīt, t.i. iesaldēti, bet daži, kuriem nav būtiska nozīme attiecībā uz apskatāmo objektu, pat sliktāki, salīdzinot ar zināmiem sasniegumiem šajā nozarē.

Pētījuma objekts ir divpakešu zemvagonu ģenerators 2ГВ.13.2У1, kuru Latvijā ražo akciju sabiedrība “Latvo” (Rīgas Elektromašīnbūves rūpnīca).

Uzstādītā mērķa sasniegšanai **tiek risināti šādi uzdevumi:**

- pamatota optimāla enkura tinuma shēma;
- veikta magnētiskā lauka aprēķina metodikas izvēle un pamatojums, ņemot vērā tā sadalījuma īpatnības aksiālajā induktormašīnā;
- pamatota mērķfunkcija magnētiskā lauka modelēšanas rezultātu analīzei un racionālas zobzonas ģeometrijas noteikšanai;
- veikta eksperimentāla jaunu tehnisko risinājumu pārbaude;
- parādītas aksiālās induktormašīnas attīstības perspektīvas;
- tiek īstenota pētījuma rezultātu aprobācija.

1. AKSIĀLĀ INDUKTORMAŠĪNA KĀ EKONOMISKS PAAUGSTINĀTA DROŠUMA AUTONOMAS ELEKTROAPGĀDES AVOTS

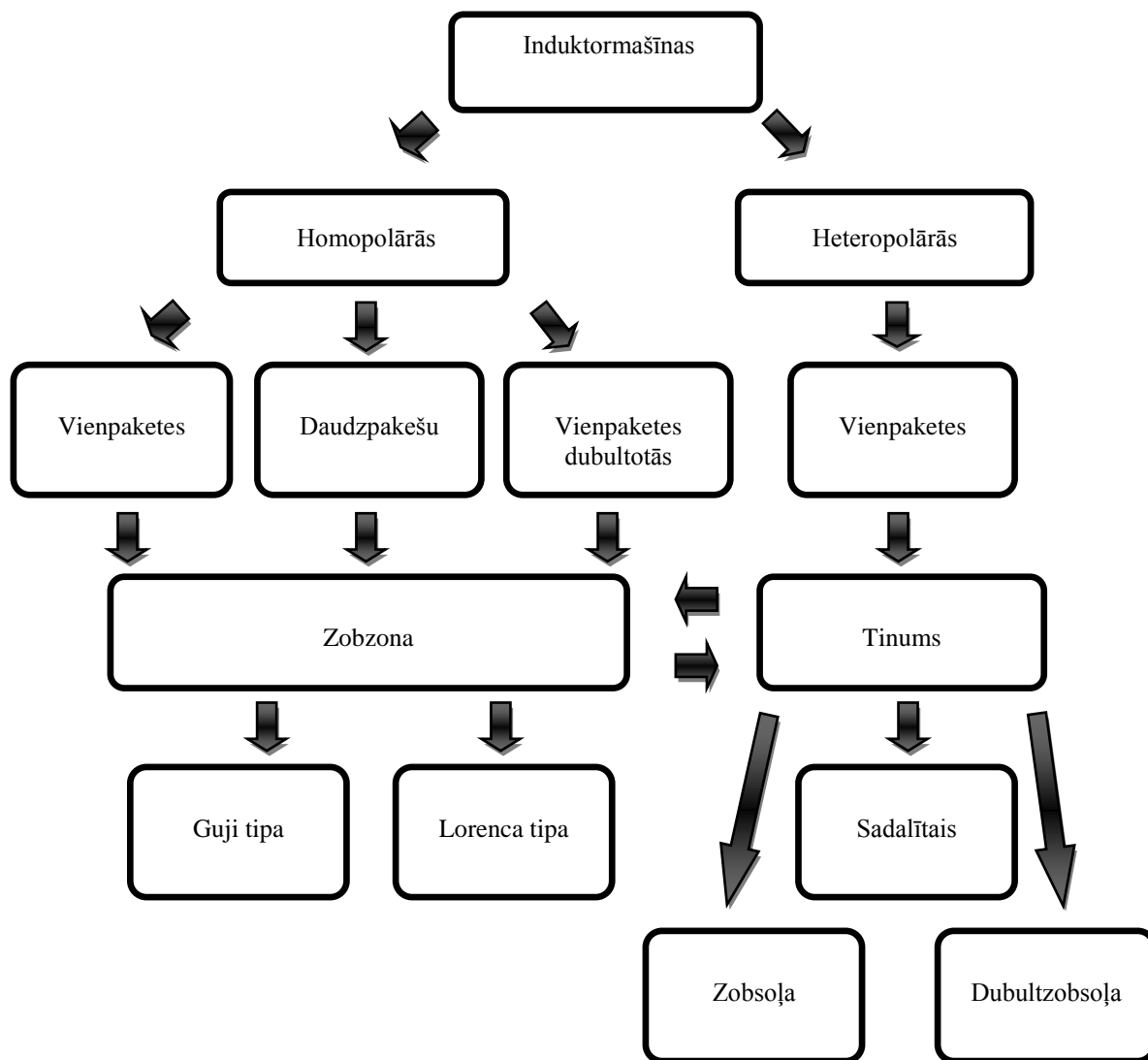
1.1. Homopolāru un heteropolāru induktormašīnu salīdzinoša analīze

Induktormašīnu attīstības vēsture mērāma jau gandrīz divās simtgadēs, tāpēc šajā periodā tika izstrādāti dotā tipa mašīnu klasifikācijas parametri. Zemāk sniegti darbu rezultāti: V.Apsīša [1], N.Alpera un A.Terzjana [7].

Nemot vērā mašīnā notiekošo elektromagnētisko procesu fizikālo būtību, induktormašīnas jāattiecinā pie pulsējošo klases, t.i., mašīnām ar laikā pulsējošu plūsmu enkura un induktora magnētīvadā. No magnētiskās ķēdes īpatnību viedokļa mašīnas, kā jau tika norādīts iepriekš, var tikt iedalītas radiālas ierosmes (heteropolāru) un aksiālas ierosmes (homopolāru). Radiālas ierosmes mašīnām raksturīgs tas, ka ierosmes spoles vai pastāvīgie magnēti rada magnētisko plūsmu, kura ies perpendikulāri aksiālai plaknei. Pretstatā tam aksiālās ierosmes mašīnās ierosmes spoles atrodas koaksiāli vārpstai, un tāpēc to radītā plūsma tiek vērsta arī aksiāli. Jāatzīmē, ka atšķirība magnētiskās plūsmas virzienā visai būtiski ietekmē mašīnas konstrukciju un tās raksturlielumus. Uzskatāmu priekšstatu par induktormašīnu klasifikāciju sniedz zemāk parādītā shēma 1.1.att. Taču konstruktīvā ziņā izšķir vienpaketes, tai skaitā dubultās vienpaketes (ar ierosmes spolēm uz viena vai diviem gultņu vairogiem), un daudzpakēšu, galvenokārt divpakēšu. Radiālās ierosmes induktormašīnas parasti mēdz būt tikai vienpaketes.

Visu tipu induktormašīnām raksturīga pazīme ir rotējošo tīnumu neesība un rotora izpildījums zobrata veidā, kura griešanās izraisa ierosmes magnētiskās plūsmas pulsāciju statora zobos. Tāpēc vissvarīgākā induktormašīnas priekšrocība ir bezkontakts, rotējošo tīnumu neesība, kā arī iespēja iegūt paaugstinātas un augstas frekvences strāvas.

Induktorģeneratorā tukšgaitā magnētiskajai indukcijai jebkurā enkura izvirpojuma virsmā vienmēr mainās tikai vērtība, bet nemainās tās zīme. Šīs noteicošās īpatnības sekas ir sliktāka aktīvās daļas apjoma izmantošana, salīdzinot ar parastajiem mainīgu polu sinhronajiem ģeneratoriem.



1.1.att. Induktormašīnu klasifikācija

Homopolāra ģeneratoram ir šādas priekšrocības:

- šī ģeneratora lietderības koeficients ir augstāks, jo tiek samazināti zudumu ierosmei, ko īsteno ar koaksiāli izvietotu spoli, tajā tiek mazāk izlietots varš;
- mašīnas ārējais diametrs ir mazāks nekā heteropolāru ģeneratoram;
- pilnīgāk tiek izmantots statora izvirpojuma apkārtmērs, jo nav nepieciešamas palielinātas rievas ierosmes tinumu izvietošanai;
- rotora zobu skaitu ierobežo viens nosacījums – tam jābūt jebkurām veselam skaitlim, kas ir lielāks par vieninieku;
- homopolāra ģeneratoru enkura tinums vienfāzes un daudzfāžu izpildījumā ir simetrisks magnētiskā ziņā.

Tomēr homopolāra veidam ir arī zināmi trūkumi, salīdzinot ar heteropolāru:

- garš un smags rotors ar ieliktni un masīvu korpusu, un tātad papildus masu, jo ierosmes magnētiskā plūsma iet aksiāli pa rotora ieliktni un statni, kas vienkorpusa izpildījuma gadījumā nosaka papildus izkliedi;
- rotora inerces moments (paaugstinātas masas rezultātā) ir ievērojams, bet tādas pašas jaudas heteropolāriem ģeneratoriem rotora šis inerces moments ir mazāks.

Heteropolāriem ģeneratoriem, salīdzinot ar homopolāriem, ir virkne priekšrocību:

- rotora ieliktna un serdeņa izmēri heteropolāru ģeneratoros ir būtiski mazāki un pamatā tos nosaka konstruktīvi apsvērumi;
- mašīnas korpuss nav magnētiskās ķēdes daļa un tāpēc var būt izgatavots no viegliem materiāliem, turklāt vārpsta var būt īsāka;
- magnētiskās ķēdes un visas konstrukcijas masa virknē gadījumu sanāk mazāka;
- nav magnētiskās plūsmas noplūdes caur dzinēju vienkorpusa izpildījumā vai caur magnētvasdošiem vairogiem.

Heteropolāru ģeneratoru trūkums ir tas, ka ierosmes tinuma rievu izmēri un to skaits jāizvēlas tā, lai ierosmes magnētiskā plūsma jebkurā rotora stāvoklī paliktu pastāvīga, bet tādu rievu esamība samazina iespējas enkura tinumu izvietojumam.

No masas un gabarītu viedokļa abu tipu ģeneratori ir aptuveni līdzvērtīgi. Tostarp mazāks vara patēriņš ierosmes tinumam, un tātad augstāks lietderības koeficients, virknē gadījumu dod priekšroku izmantot kā ģeneratorus tieši homopolāras induktormašīnas.

1.2. Induktormašīna kā autonomas elektroapgādes avots aviācijā, vēja enerģētikā un dzelzceļa transportā

Induktormašīnas var tikt izmantotas visdažādākajās mūsdienu tehnikas jomās. Tās tiek izmantotas galvenokārt kā paaugstinātas frekvences ģeneratori diapazonā no 50 līdz 10 000 Hz. Mazāk izplatīti ģeneratori ir ar frekvenci virs 10 000 Hz. Svarīgu vietu tie ieņem transportlīdzekļu elektroapgādes sistēmās (aviācijā, automobiļu un dzelzceļa transportā), vēja enerģētiskajās iekārtās. Centralizētā energoapgādes sistēmā (valsts) tie tiek izmantoti komplektā ar taisngriežiem un kalpo kā spēcīgu hidroģeneratoru ierosinātāji, tos izmanto arī dažādās aizsardzības tehnikas jomās. Pēc induktormašīnu darbības principa uzbūvētas dažas speciālās elektriskās mašīnas, piemēram, bezkontakta selsīni, kurus izmanto telemehānikā, kā arī impulsa ģeneratori. Induktormašīnas ir apgriezeniskas un var strādāt arī kā sinhronie dzinēji.

Aviācijas transports ir svarīgākā nozare. Šī transporta elementi un lidmašīnas kopumā strādā nelabvēlīgos apstākļos, kas ievērojami atšķiras no virszemes transportlīdzekļu darbības apstākļiem.

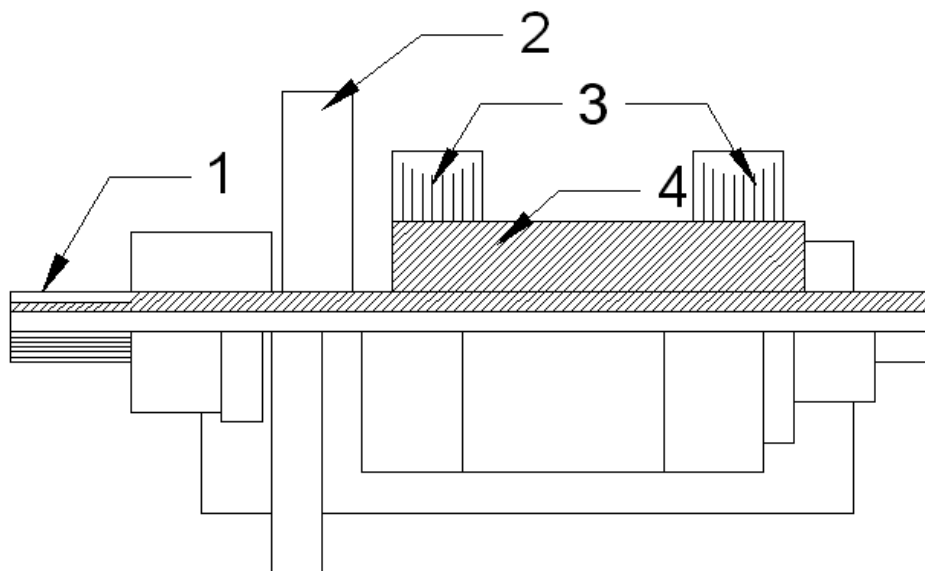
Gaisa kuģiem tiek izvirzītas stingras prasības lidojumu nodrošināšanā vissarežģītākajos meteoroloģiskajos apstākļos un lielā augstumā, veicot biežu nosēšanos un pacelšanos, turklāt saglabājot augstu komforta līmeni pasažieriem. Tāpēc visām gaisa transporta iekārtām, ieskaitot elektroapgādes sistēmu un elektrisko piedziņu, tiek izvirzītas augstas prasības drošumam un bezatteices darbībai, kā arī attiecībā uz komplektējošo elementu masu un gabarītiem, tai skaitā elektrisko mašīnu. Pēdējais tiek sasniegts, palielinot strāvas frekvences un elektrisko mašīnu rotācijas frekvences. Īpaši tas attiecas uz elektroapgādes pamatelementiem – uz ģeneratoriem [34].

Kā inductormasīnu priekšrocības, salīdzinot ar citām elektriskajām mašīnām, kuras izmanto aviācijas transporta iekārtās, var minēt:

- universālums, tas ir, spēja uz vienas un tās pašas inductormasīnas komponējuma shēmas bāzes konstruēt jebkuru no zināmajiem elektrisko mašīnu konstruktīvajiem pielietojumiem – ģeneratorus un dzinējus (līdzstrāvas, asinhronus un sinhronus, bezreduktora lēngaitas, soļa dzinējus, dubultbarošanas mašīnas);
- principiāls mašīnas bezkontaktums, kas tiek sasniegts, izvietojot tinumus tikai statorā, kas nodrošina turklāt tās augstāku drošumu;
- daudzpolainība, tas ir, iespēja izvietot uz rotora lielu skaitu zobus - polu pārus, kas nodrošina mašīnai elektromagnētiskās redukcijas īpašību, iespēju iegūt zemas rotācijas frekvences, neizmantojot nedrošu mehānisko reduktoru (bezreduktora konstrukcijai piemīt liela drošība un atsevišķos gadījumos mazāka īpatnējā masa);
- rotora masas samazināšana, sakarā ar tinumu neesību rotorā un mašīnas samazinātais ātrums uzlabo gultņu darbību, samazina to nolietojumu un veicina to resursu palielināšanos;
- konstruktīva saderība, t.i., inductormasīnu izmantošana pastāvošajos aviācijas transporta agregātos neprasa īpašu stiprinājumu izstrādi, sēdvietu izvēli u.tml.; „jauna” mašīna var tikt uzstādīta „vecās” vietā;
- piemērotība darbam ar ESM (piemēram, soļu režīmā) [35,36].

Inductormasīnu izmantošanu aviācijas iekārtās pamatā ierobežo tas, ka, salīdzinot ar citu tipu elektriskajām mašīnām, pazīstajām inductormasīnām ir lielāka īpatnējā masa,

sliktākas ierosmes magnētiskās plūsmas izmantošanas iespējas tajās un ievērojama predispozīcija enkura reakcijas darbībai. 1.2.attēlā parādīta aviācijas divpakešu homopolāra tipa vienfāzes strāvas 30 kVA, 1200 Hz ar 12 000 apgr./min. induktorģeneratora konstrukcija [37].



1.2.att. Aviācijas divpakešu homopolāra tipa vienfāzes strāvas 30 kVA, 1200 Hz ar 12 000 min⁻¹ induktorģeneratora rotora konstrukcija:
1-vārpsta, 2 – ventilators, 3 – rotora paketes, 4 – rotora ieliktnis no ARMKO

Induktormāšīnu īpašās priekšrocības atklājas, izmantojot tās kā tiešas piedziņas lēngaitas vējģeneratorus.

Analizējot vējenerģētiskās iekārtas (VEI) darbību, uzmanība jāpievērš tādiem parametriem, kā ģenerators tips un tā jauda, rotācijas frekvence, spriegums ģenerators izejā un slodze (elektrotīkls, sprieguma pārveidotājs, autonomā slodze).

Izmantoto vējģeneratoru analīze ļauj tos iedalīt trīs pamatgrupās, kas raksturo to specifiskās īpatnības.

Pie pirmās grupas var attiecināt ģeneratorus ar jaudu no 100 W līdz 30 kW. Šajā jaudu diapazonā (pamatos līdz 90%) tiek izmantoti ģeneratori ar ierosmi no pastāvīgajiem magnētiem, turklāt tiešas piedziņas izpildījumā, t.i., bez multiplikatoriem. Ģenerators darbojas ar taisngriezi. Tādas VEI tiek izmantotas autonomo patērētāju barošanai ar līdzstrāvu.

Otrā grupa ietver ģeneratorus ar jaudu no 30 kW līdz 600 kW. Tās ir iekārtas, kuras strādā paraleli ar lielas jaudas tīklam. Galvenokārt tie ir asinhronie ģeneratori ar īsslēgtu

rotoru un maināmu polu pāru skaitu. Šeit tiek izmantota klasiskā shēma: vēja turbīna – multiplikators – 4 vai 6 polu ģenerators – elektriskais tīkls.

Trešo grupu veido VEI ģeneratori ar jaudu virs 600 kW. Līdz ar asinhronajiem ģeneratoriem ar īsslēgtu rotoru šeit plaši tiek izmantoti dubultbarošanas asinhronās mašīnas ar fāžu rotoru. Elektroenerģija tiek noņemta gan no primārā (statora), gan arī no sekundārā (rotora) tinuma. Optimālas konstrukcijas meklēšanas rezultātā tika iegūta tiešas piedziņas VEI bez multiplikatora. Šajā gadījumā ģenerators tiek savienots tieši ar vēja turbīnu. Tiešas piedziņas iekārtās tiek izmantoti sinhronie ģeneratori gan ar elektromagnētisko ierosmi, gan arī ar ierosmi no pastāvīgajiem magnētiem. Ir arī zinātniskas izstrādes, kur piedāvā izmantot dubultbarošanas režīmā daudzpolu tiešas piedziņas induktorgeneratorus [38].

Pašreiz sinhronie induktorgeneratori tiek izmantoti vēja elektriskās turboģeneratora ierīces ТГ-750 komplektācijai, kuru ražo akciju sabiedrība „Электромаш”.

Zinātniskā ražošanas Slēgtā akciju sabiedrība „Электромаш” (Tiraspole) – liels mūsdienu uzņēmums, kas ražo plašu elektrisko mašīnu, aparātu un pārveidojošo ierīču nomenklatūru. Kā redzams rūpnīcas 2008.g. ziņojumā, 21.gadsimts ir bijis uzņēmuma jauna progresīva virziena produkcijas - induktormašīnu ražošanas apgūšanas sākums [39]. Tā ir tehnika, kuru šodien pieņemts saukt par augsto tehnoloģiju produktu. ZR SAS „Электромаш” kopīgi ar induktormašīnu izstrādātāju SIA „Конкорд” ir noorganizējusi vēja elektriskās iekārtas ТГ-750 izlaidi. 1.3.att. parādīts vēja iekārtas ТГ-750 vispārējs veids. Šeit sinhronais induktorgenerators СИИ paredzēts izmantošanai vēja enerģētiskās iekārtas ТГ-750 sastāvā kā trīsfāžu maiņstrāvas 50 Hz, 400 V elektroenerģijas avots (1.1. tabula).



1.3.att. Vēja elektriskā iekārta ТГ-750

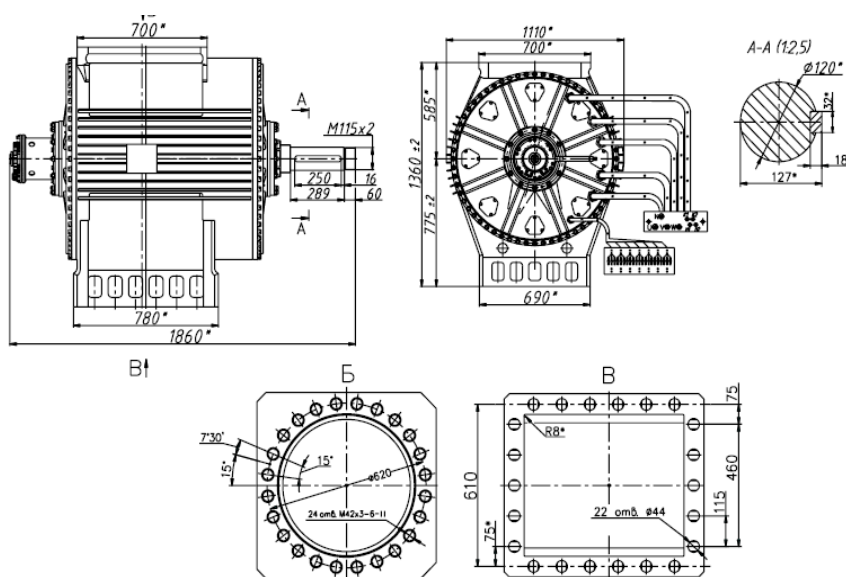
Šī tipa elektriskās mašīnas atšķiras ar savu konstruktīvo vienkāršību, rotējošo tinumu, un tādām slīdošu kontaktu trūkumu, kas nodrošina to augstu drošumu ekspluatācijā. Ģeneratori pieļauj darbību gan bezgalīgas jaudas tīklam, gan arī lokālajam tīklam, kopīgi ar dīzeļelektriskajām ierīcēm vai autonomai slodzei. Ģeneratoru konstrukcija un ierosmes sistēmas nodrošina darbību bez bojājumiem un paliekošām deformācijām. Vēja iekārtas konstrukcijas oriģinalitātes dēļ (ģeneratoru izvietojums uz spārnēm) ekspluatējamie ģeneratori ir pakļauti ievērojamām pārslodzēm – līdz 13g ilgstoši un līdz 16g īslaicīgi (līdz 5 minūtēm), turklāt tie saglabā augstas darbības un drošumu.

Ģeneratora izstrāde līdz atteicei ir ne mazākā 9000 stundas, pilns kalpošanas termiņš – ne mazāk kā 20 gadi [40].

1.1.tabula

CGИ vēja ģeneratoru tehniskie parametri

Tipizmērs	Jauda, kW/kVA	Spriegums, V	Rotācijas frekvence, min ⁻¹	Strāvas frekvence, Hz	Lietderības koeficients, %	cos φ	Masa, kg
CGИ-250-16 УХЛ 1	250/263	400	375	50	93.6	0.95	3550
CGИ-350-16 УХЛ 1	350/368	690		50	94.0		4750



1.4.att. Ģeneratora CGИ-250 vispārējs skats

Nesenā pagātnē firma „Baltaruta” (Latvija) sērijveidā ražoja induktortipa bezreduktora vājģeneratoru portatīvajām vēja elektriskajām iekārtām, kuru pamatdati ir šādi: nomināla jauda $P_N=1\text{kW}$; rotācijas frekvence $n=600\text{ min}^{-1}$; spriegums $U_N=220\text{ V}$, taisngrieztais spriegums $U_d=24\text{ V}$; enkura tinuma fāžu skaits $m=3$; gaisa sprauga $\delta=0.4\text{ mm}$; rotora zobu skaits $Z_2=46$; statora paketes garums $l=28\text{ mm}$; statora izvirpojuma diametrs $D_s=153.7\text{ mm}$; ģeneratora masa $G_g=24\text{ kg}$, lietderības koeficients $\eta=0.84$; jaudas koeficients $\cos\varphi=1$.

Induktorģeneratori plaši tiek pielietoti dzelzceļa pasažieru vagonu elektroapgādes sistēmās. Galvenais uzdevums šeit bija elektriskā apgaismojuma nodrošināšana. Realizētie risinājumi, kuri tiek izmantoti daudzas desmitgades, balstījās uz homopolāra induktorģeneratora izmantošanu ar piedziņu no riteņpāra un akumulatora baterijas.

Pasažieru vagonu elektroapgādes sistēmās izmantojamiem induktorģeneratoriem ir augsti tehniskie raksturlielumi, kas sniegti 1.2.tabulā.

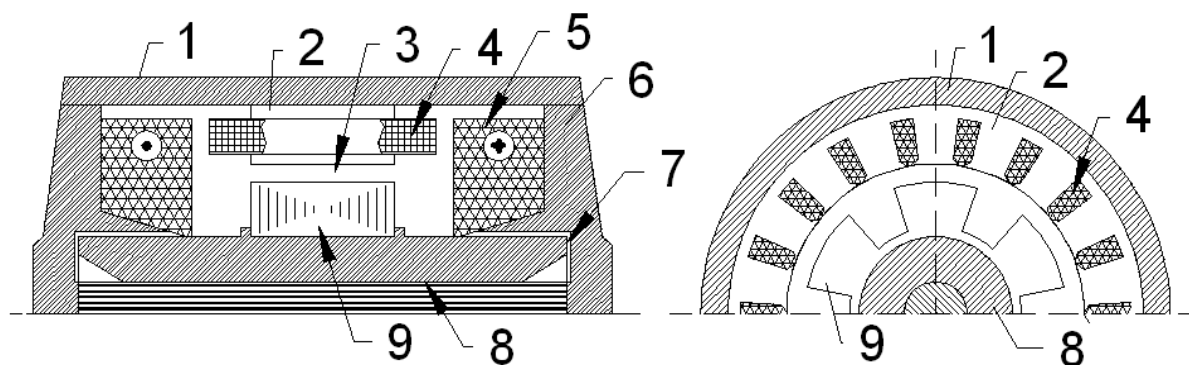
1.2.tabula

Zemvagonu induktorģeneratoru tehniskie raksturlielumi

Parametri	Ģeneratoru tipi				
	2 ГВ-003	ГCB-2, ГCB-8	OCC-4435	2ПВ-001	2ГВ.13.2Y1
Ilgstoša nominālā jauda kVA	9.45/0.75	5.8/2.2	35	30	34
Ilgstoša nominālā jauda taisngrieža izejā, kW	8	5.5	30	26	32
Nominālais spriegums, V	45/24	48/15	150	150	116
Nominālā strāva, A	121/31	70/85	155	135	170
Rotācijas frekvences diapazons, min^{-1}	1 000...4 000	1 000...4 000	1 000...3 400	550...3 000	1000...3400
Strāvas frekvences izmaiņu diapazons, Hz	100...400	100...400	200...680	100...400	167...567
Masa, kg	260	200	720	-	700

Ģeneratori ГCB - 2, - 8A, 2 ГВ - 003 un 2 ПВ - 001 – tās ir mašīnas ar aksiālu ierosmi. Šajās mašīnās statora tinums 4, kurā, rotoram griežoties, inducējas mainīgs EDS, tiek ielikts statora rievās. (1.5.att.). Ierosmes tinums 5 arī uz statora izgatavots divu gredzenveida spoļu veidā, kas atrodas blakus statora pakešu galiem. Rotoram ir pēc kārtas mainošie zobi 9 un rievās, kas it kā veido mašīnas polus. Magnētiskā plūsma Φ , kuru rada ar katru ierosmes tinumu 5, iet gar rotora vārpstas 8 asi, sadalās pa rotora zobiem 9, tālāk caur gaisa spraugu 3 iekļūst statora zobos 2, iziet caur statne 1 aksiālajā virzienā, bet pēc tam caur gultņu vairogu 6 un gaisa spraugu 7 atkal ieiet vārpstā. Plūsmas Φ , kuras radītas ar katru ierosmes tinuma spoli

5, statora un rotora zobos sasummējas. Rotoram griežoties plūsma, kas iet caur katru statora zobu, pulsē, jo magnētiskā pretestība šai plūsmai mainās atkarībā no tā, kas atrodas pret statora zobu – zobs vai rotora rieva, un atkarībā no tā enkura tinuma spolēs inducējas EDS.



1.5.att. Vienpaketes maiņstrāvas induktorģeneratora konstruktīva shēma:

1 – korpuss, 2 – statora serde, 3,7 – gaisa spraugas, 4 – statora tinums,
5 – ierosmes tinums, 6 – gultņu vairogs, 8 – rotora ieliktnis, 9 – rotora zobs

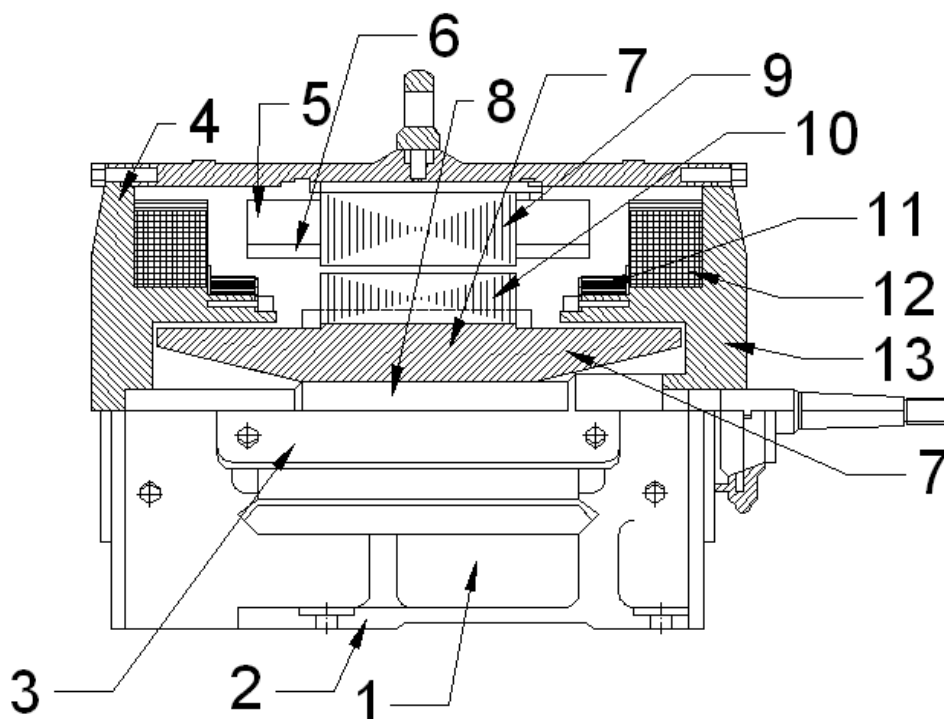
Maiņstrāvas ģeneratori 2ГВ-003 un ГСВ ir divpadsmit polu slēgta izpildījuma mašīnas (1.6.att.). Ģeneratora korpusam 1 ir ķepas 2 vai stiprinājuma plāksne (ģeneratora montāžai zem vagona vai uz ratiem) un ribas mašīnas gaisa dzesēšanai. Statora magnētserde 9 izgatavota no izolētām elektrotehniskā tērauda loksnēm un iepresēta korpusā. Statoram ir 18 rievas, kurās ielikti tinumi 5 un 6. Izvadi no tinumiem pieslēgti paneļa spailēm, kas uzstādītas spaiļu kārbā 3. Gultņu vairogi 4 un 13, kuriem no ārpuses ir ribas dzesēšanai, piestiprināti pie korpusa ar skrūvēm. Gredzenveida vairogu pie lējumi kalpo paralēlā 12 un secīgā 11 ierosmes tinuma divu virknē savienotu spoļu pāru uzstādīšanai.

Rotora serdenis 10 salikts no elektrotehniskā tērauda loksnēm, kas izolētas viena no otras, un tam ir seši zobi, t.i., 12 poli. Tas uzpresēts uz ieliktna 7, kas nostiprināts uz vārpstas. Rotora ieliktnis 7 ir ģeneratora magnētveda daļa un tam ir pietiekami liels šķērsriezums.

Dažādu modifikāciju ģeneratoriem 2ГВ un ГСВ ir aptuveni vienāda tipa konstrukcija un atšķiras ar ģeneratora mezgla pievienošanas iekārtu vagonam, vairogu gultņu konstrukciju, ierosmes tinumu izvietojumu un skaitu, rotora stiprinājuma veidu.

Ģenerators 2ПВ-001 ir divu mašīnu agregāts, kas sastāv no induktorģeneratora un piedziņas elektrodzinēja, kas iemontēti kopējā korpusā un kuriem ir kopēja vārpsta. Ģeneratora konstrukcija līdzīga ģeneratoram 2ГВ-003: rotoram ir 8 zobi, t.i., 16 poli; uz statora atrodas trīsfasu tinums, kas savienots zvaigznē. Piedziņas elektrodzinējs – asinhronais ar īsslēgtu rotoru.

Kā izriet no iepriekš doto zemvagonu ģeneratoru apraksta, nav pamatota optimālā statora un rotora zobu skaita attiecība (vienā gadījumā 18 un 3, bet otrā 18 un 8) [41].



1.6.att. Ģeneratora 2ГВ-003 uzbūve:

1 - korpuss; 2 - ķepas, 3 – spaiļu kārba; 4, 13 gultņu vairogi; 5,6 – statora tinumi; 7 – ieliktnis; 8 – vārpsta; 9 – statora serdenis; 11 – virknes ierosmes tinums; 12 –paralēlās ierosmes tinums

1.3. Aksīālās induktormašīnas enkura tinumu tipa izvēle un pamatojums

Parasta izpildījuma aksīālajās induktormašīnās enkura zobu skaits Z_1 tiek noteikts no izteiksmes:

$$Z_1 = 2pmq = 2Z_2mq, \quad (1.1)$$

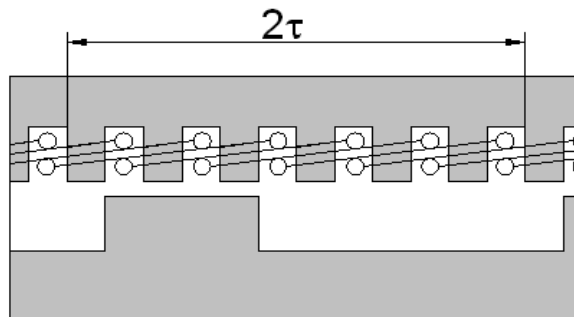
kur m - fāžu skaits;

q - rievu skaits uz polu un fāzi;

Z_2 - rotora zobu skaits;

p - polu pāru skaits ($p=Z_2$).

Paaugstinātas frekvences ģeneratoros rotora zobu skaits un mazās pola iedaļas nedod iespēju veidot vairāk kā sešas rievas uz induktora dubulto pola iedaļu, t.i., ne vairāk kā vienu rievu uz polu un fāzi $q=1$ (1.7.att.). Spoles solis šajā gadījumā vienāds ar pola iedaļu. Augstākās harmonikas EDS līknē parasti var novērst, izveidojot slīpās rievas.

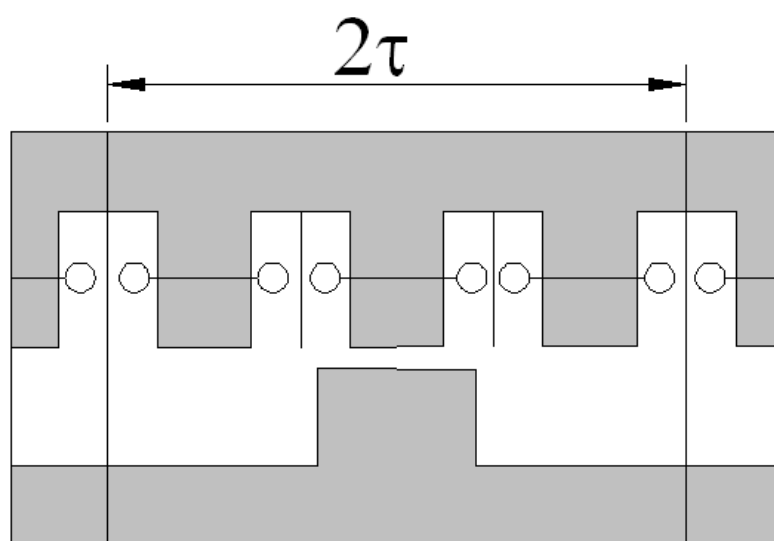


1.7.att. Trīs fāžu tinums ar $Z_1=2Z_2mq$ un $q=1$ (τ – pola iedaļa)

Izgatavošanas vienkāršuma un drošuma dēļ plaši izplatīti kļuvuši enkura koncentrēti tinumi ar rievu skaitu uz polu un fāzi dalījumu vienādu ar $q=0.5$ (1.8. att). Induktora dubultā pola iedalījumam trīs fāžu mašīnā atbilst enkura trīs zobi:

$$Z_1 = 3Z_2 \quad (1.2)$$

Katra no trīs spolēm, kas atrodas induktora zoba iedaļas robežās, ir nobīdīta telpā par $1/3$ no zoba iedaļas, tāpēc tajās inducētais EDS tiks nobīdīts fāzē par leņķiem $2/3 \pi$, un tātad veidos trīs fāžu sistēmu. Enkura tinuma spoles, kas atrodas viena no otras zoba iedaļas attālumā uz induktora, ir vienādos magnētiskajos apstākļos un veido trīs fāžu enkura tinuma vienas fāzes tinumu. Tāda tinuma trūkums ir visu pāru un nepāru harmoniku spektra esamība, kas pastāv vadītspējas izmaiņu līknē, un ievērojamas gareniskās magnētiskās plūsmas pulsācijas aksiālajā izpildījumā.



1.8.att. Trīs fāžu tinums ar $q=0.5$

Statora rievu skaita samazināšanai, vienlaicīgi samazinot gareniskās magnētiskās plūsmas pulsācijas, neizmantojot rotora slīpās rievās homopolāra induktorģeneratoram statora rievu skaits var būt noteikts tuvu dubultotam rotora zobu skaitam.

Lai arī Z_1 atšķiras no dubultotā induktora zobu skaita Z_2 par veselu zobu skaitu, t.i., vispārējā veidā Z_1 un Z_2 saistīti ar attiecību

$$Z_1 = 2Z_2 \pm k, \quad (1.3)$$

kur $k=1,2,3,\dots$, - mazs vesels skaitlis. Tā kā tiek pieņemts, ka $Z_1 \approx 2Z_2$, tad izteiksmē (1.3) k nevar būt liels skaitlis.

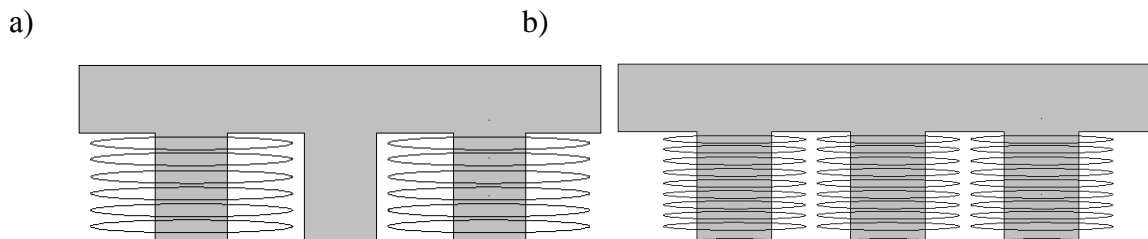
Pēc sava stāvokļa magnētiskajā laukā blakus esošo spoļu EDS nobīdīti viens pret otru par leņķi

$$\alpha_z = \frac{2\pi Z_2}{Z_1}, \quad (1.4)$$

kas ir tuvs, bet nav vienāds ar 180 el.grādiem [42,43].

Pašreiz sinhronajās mašīnās ar pastāvīgajiem magnētiem plaši tiek izmantoti nekrustotie koncentrētie tinumi, to apliecina darbu par doto tēmu pieaugums [44-57]. Literatūrā sastopama dažāda terminoloģija šo tinumu tipa apzīmēšanai, tādi kā „koncentrētais tinums” (concentrated winding), „zobu tinums” (tooth winding), „nešķērsojošais koncentrētais tinums” (non-overlapping concentrated winding), „zobu koncentrētais tinums” (tooth concentrated), „daiļskaitļa tinums” (fractional pitch winding) u.c. Taču koncentrētu tinumu izmantošana induktormašīnās aprakstīta virknē agrīnāka perioda darbos [6,42-43,58-61]. Darbā [62] tiek piedāvāta induktormašīna ar daudzfāžu enkura tinumu, kurš sastāv no spolēm, kas novietotas uz statora atsevišķiem zobiem, no zobratveida rotora bez tinumiem un gredzentipa ierosmes tinuma, kura dod iespēju palielināt īpatnējo jaudu, rotora zobu skaita un statora zobu skaita attiecība izvēlēta maksimāli tuvu vērtībai 3/5, turklāt nodrošinot iespēju izveidot simetrisku enkura tinumu.

Jāatzīmē arī tas, ka pastāv vienslāņa koncentrēts tinums ar izlaistu un neizlaistu statora zobu (1.9.att.). Pirmajā gadījumā vienslāņa tinumu spoles atrodas uz statora zobiem ik pēc viena, bet otrajā spoles atrodas uz katra zoba.



1.9.att. Spoļu izvietojums uz statora zobiem:

a) vienslāņa tinums ar zoba izlaišanu un b) vienslāņa tinums bez zoba izlaišanas

Tinuma izvēle vairumā gadījumu atkarīga no mašīnas īpatnībām, kuras izmantotas.

1.3. tabulā sniegti daži salīdzinoši vienslāņa tinumu raksturlielumi.

1.3.tabula

Salīdzinājums starp koncentrētiem tinumiem

	Vienslāņa tinums ar zoba izlaidumu	Vienslāņa tinums bez zoba izlaiduma
Tinuma sānu daļa	gara	īsa
Rievas aizpildījuma koeficients	augsts	zems
Pašindukcija	augsta	zema
Savstarpēja indukcija	zema	augsta
EDS līknes forma	tuva trapeciodālai	tuva trapeciodālai
MDS harmoniku koeficients	augsts	zems
Zudumi no virpuļstrāvām	augsti	zemi
Pārslodzes momenta nodrošināšanas spēja	augsta	zema

Vienslāņa tinums ar zoba izlaidumu atzīstams par labāku, kad obligāta augsta noturība pret defektiem, jo tinuma fāzes termiski un elektriski ir izolētas, pašindukcija ir augsta (kas ierobežo īsslēguma strāvas) un savstarpēja indukcija ļoti zema (kas magnētiski izolē fāzes). Pateicoties augstajai induktivitātei, vienslāņa tinumiem dodama priekšroka arī iekārtās, kur nepieciešams plašs ātrumu diapazons. Vairumā gadījumu par labāku atzīstams vienslāņa tinums bez zoba izlaiduma, zudumu un momenta pulsāciju ierobežošanas nolūkā. Pastāv arī virkne iespējamo polu un statora zobu skaita kombināciju virkne tinuma izvēlei.

1.4. Enkura tinuma shēmas pamatojums un tinuma koeficienta noteikšana

Pēc tinuma tipa izvēles nepieciešams pamatot m-fāzes tinuma shēmu un atrast tinuma koeficienta vērtības.

Racionālu enkura tinuma shēmu var iegūt, balstoties uz EDS vektoru diagrammu. [42, 44, 46,48].

Kā piemēru aplūkosim EDS fāzes diagrammu un spoļu savienojuma shēmu enkura trīsfāžu tinumā induktormašīnai ar zobu skaitu uz enkura $Z_1=24$ un uz rotora $Z_2=10$.

Tādai zobu zonai atbilst (1.4) $\alpha_Z = \frac{2\pi Z_2}{Z_1} = 150^\circ = 180^\circ - 30^\circ$.

Virtnes tinuma saskaņotu spoļu skaitu uz fāzi atrodam no izteiksmes:

$$a_V = \frac{Z_1}{2 \cdot m \cdot N} = \frac{24}{2 \cdot 3 \cdot 2} = 2, \quad (1.5)$$

kur N – lielākais kopējais statora Z_1 un rotora Z_2 zobu skaita dalītājs.

Leņķis starp divu spoļu EDS, kas atrodas uz blakus esošiem enkura zobiem

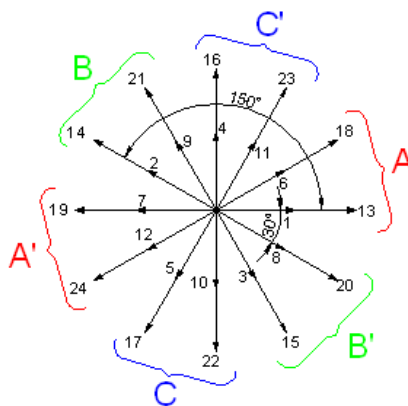
$$\alpha_C = \begin{cases} \alpha_Z + \pi & \text{pie } Z_1 < 2Z_2 \\ \pi - \alpha_Z & \text{pie } Z_1 > 2Z_2 \end{cases} = 180^\circ - 150^\circ = 30^\circ. \quad (1.6)$$

Trīsfāžu tinuma veidošanai iespējams spoļu savienošanas variants:

- Fāze A: +1; +6; -7; -12; +13; +18; -19; -24.
- Fāze B: +2; +9; -3; -8; +14; +21; -15; -20.
- Fāze C: +5; +10; -4; -11; +17; +22; -16; -23.

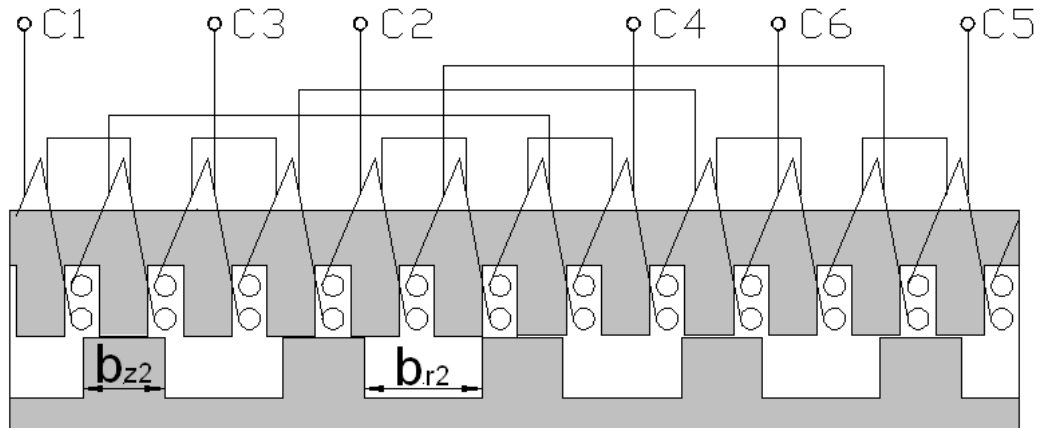
„+” zīme atbilst virtnes-saskaņotam spoļu savienojumam, „-” zīme virtnes-pretējam.

1.10.att. sniegta enkura spoļu EDS diagramma induktormašīnai ar 24 zobiem uz statora un 10 zobiem uz rotora.



1.10.att. Enkura spoļu tinumu EDS diagramma

Tinuma shēma ģenerators enkura tinuma 12 spolēm parādīta 1.11.att. Nobīdes leņķis starp diviem blakus esošiem fāzes vektoriem $\alpha_c=30^\circ$, tad tinuma koeficients pēc pirmās harmonikas $k_{w1} = \cos \frac{\alpha_c}{2} = \cos 15^\circ = 0.96$.



1.11.att. 12 spoļu enkura tinuma savienojuma shēma:
 b_{r2} – rotora rievas platums; b_{z2} – rotora zoba platums

Analogu enkura tinuma shēmu var iegūt uz ģenerators ar zobu skaita attiecību $Z_1/Z_2 = 24/14$. Tādai zobzonas struktūrai atbilst (1.4) $\alpha_z = \frac{2\pi Z_2}{Z_1} = \frac{2\pi \cdot 14}{24} = 210^\circ = 180^\circ + 30^\circ$. Arī šeit nobīdes leņķis $\alpha_z = 30^\circ$, tātad $k_{w1} = \cos \frac{30}{2} = 0.96$.

Pastāv vēl viens enkura tinuma shēmas noteikšanas veids. Šī metode kļuvusi īpaši aktuāla mašīnās ar pastāvīgajiem magnētiem, par to liecina virkne darbu, kuros var sastapt detalizētu šī veida aprakstu [44,46,50-51,54,57,63]. Šī veida pamatideja ir vieninieku (1) un nulļu (0) rindas izveidošana no rievu skaita uz polu un fāzi. Zemāk dots enkura tinuma shēmas atrašanas algoritms, izvietojot rievu skaitu uz polu un fāzi. 1.12.att. parādīts gadījums, kad $Z_1=24$ un $Z_2=10$. Secība šeit ir tāda.

- Tiek noteikts, enkura rievu skaits uz polu un fāzi $q = \frac{Z_1}{2mZ_2}$ kā nesaīsināms daļskaitlis:

$$q = \frac{24}{2 \cdot 3 \cdot 10} = \frac{24}{60} = \frac{2}{5}.$$

- Tad rindā ir pieci skaitļi (pēc daļskaitļa saucēja lieluma) no tiem divi vieninieki (pēc daļskaitļa skaitītāja lieluma) un pārējie nulles.

Piemēram, šiem skaitļiem piemērotas rindu kombinācijas

10010

10100

00101

01001

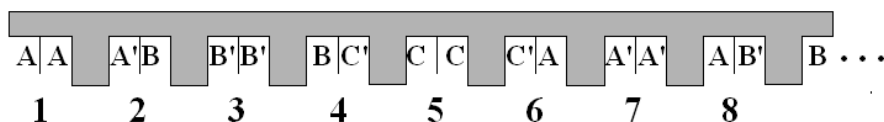
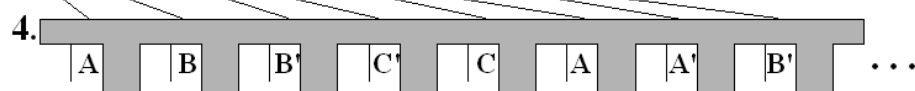
01010

- Izvēlētā rinda, piemēram, otrā, atkārtojas 12 reizes.
- Tās rievas, kas atbilst „1”, saglabājas un veido vienu vienslāņa tinumu ar zoba izlaišanu. Vienslāņa tinums bez zoba izlaišanas iznāk, ierakstot atbilstošā vada galu apzīmējumus, t.i., A' priekš A .
- Vektors \bar{S} apraksta fāzes A izvietojumu. Tas tiks izmantots tinuma koeficienta noteikšanai. Tādējādi rievas ir sanumurētas no 1 līdz 24. Vektors \bar{S} sastāv no atsevišķu vektoru summas, kuri apzīmēti (sk.1.10.att.) ar atbilstošiem numuriem, kas atbilst fāzes A tinuma rievu skaitam. Ja abas vienas rievas spoles satur fāzes A vadus, tad rievas numurs ir divreiz ierakstīts vektorā. Vadam A' mīnuss tiek pievienots atbilstošam rievu numuram.

$$1. q = \frac{Z_1}{2mZ_2} = \frac{2}{5} \rightarrow \begin{matrix} 2 \times "1" \\ 3 \times "0" \end{matrix}$$

$$2. 10100$$

$$3. \begin{matrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ \hline A-C & B-A & C & -B & A-C & B-A & C-B & A-C & B-A & C-B & A-C & B-A & C-B & A-C & \dots \end{matrix}$$



$$5. \bar{S} = [1 \ 1 \ -2 \ 6 \ -7 \ -7 \ 8 \ -12 \ 13 \ 13 \ -14 \ 18 \ -19 \ -19 \ 20 \ -24]$$

1.12. att. Enkura tinuma shēmas atrašanas algoritms gadījumam, kad $Z_1=24$, bet $Z_2=10$

Induktormāšīnas enkura tinuma shēma un tinuma koeficients ir atkarīgs no polu skaita un rievu skaita kombinācijas. Tāpēc rotora un statora zobu skaita attiecība jāizvēlas, lai iegūtu optimālu tinuma koeficientu. Dotajai rotora un statora zobu skaita kombinācijai pastāv daudzas iespējas izvietot katras fāzes spoles rievās, veidojot tinumu.

Tinuma koeficientu var aprēķināt ar vienu no šādām metodēm: izmantojot EDS vektoru, (šī metode aprakstīta darbos [48, 51]), vai izmantojot izteiksmes slēgtā formā (šī metode aprakstīta darbos [42, 47, 52, 57]).

Atrodot tinuma koeficientu, izmantojot EDS vektoru, tiek atrasta tinuma shēma ar vienu no iepriekš aplūkotajiem veidiem. Vektors \bar{S} apraksta fāzes A shēmu. Rievas ir

sanumurētas no 1 līdz Z_1 . Vektors \vec{S} sastāv no numuriem, kas atbilst rievām, kuras satur fāzes A spoles. Ja rievā izvietotas divas fāzes A spoles puses, tad rievu numurs tiek ierakstīts divas reizes. \vec{S} ir $2 \cdot Z_1/3$ elementi. $Z_1=24$ $Z_2=10$ vektors tiek raksturots kā [1 1 -2 6 -7 -7 8 -12 13 13 -14 18 -19 -19 20 -24].

Izmantojot vektoru \vec{S} , atbilstošo EDS vektoram \vec{E}_1 atrodam:

$$\vec{E}_1 = \text{sign}(S(i)) e^{j \frac{2\pi Z_2}{Z_1} |S(i)|}. \quad (1.7)$$

Tad tinuma koeficientu var aprēķināt kā

$$k_{w1} = \frac{1}{2 \cdot Z_1/3} \left| \sum_{i=1}^{2 \cdot Z_1/3} \vec{E}_1 \right| \quad (1.8)$$

kur i vektora \vec{S} elementa numurs.

Vektoru EDS summa gadījumam $Z_1=24$, $Z_2=10$ izskatās šādi

$$\sum_{i=1}^{2 \cdot \frac{24}{3}} \vec{E}_1 = (e^{j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} + e^{j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} - e^{2j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} + e^{6j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} - e^{7j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} - e^{7j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} + e^{8j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} - e^{12j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} + e^{13j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} + e^{13j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} - e^{14j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} + e^{18j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} - e^{19j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} - e^{19j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} + e^{20j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}} - e^{24j \frac{2\pi Z_2}{Z_1}})$$

Tinuma koeficients šajā gadījumā ir vienāds ar $k_{w1}=0.933$. Jāatzīmē, ka tinuma koeficienta noteikšana ar šo metodi neļauj noteikt atsevišķi sadalījuma koeficienta un soļa saīsinājuma koeficienta vērtību.

Slēgtā formā tinuma koeficients tiek noteikts pēc šādas formulas:

$$k_{w1} = k_p \cdot k_d, \quad (1.9)$$

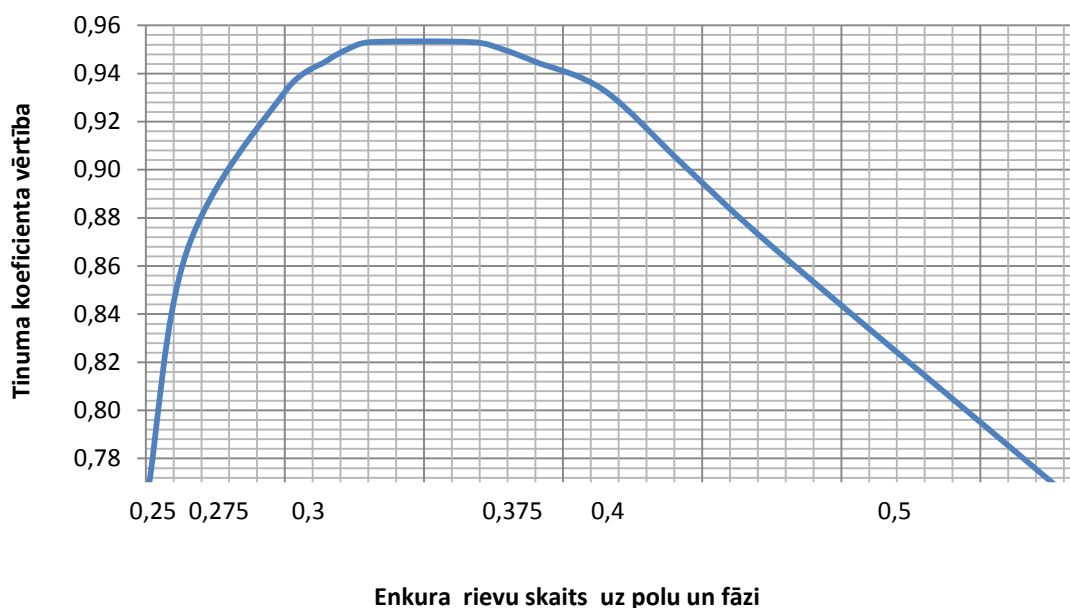
kur soļa saīsinājuma koeficients k_p , $k_p = \sin\left(\frac{\pi Z_2}{Z_1}\right)$ un k_d sadalījuma koeficients.

Sadalījuma koeficients tiek aprēķināts pēc šādas formulas

$$k_d = \begin{cases} \frac{\sin a \left(\frac{2Z_2}{Z_1} - 1\right) \frac{\pi}{2}}{a \sin\left(\frac{2Z_2}{Z_1} - 1\right) \frac{\pi}{2}} & \text{при } Z_1 < 2Z_2. \\ \frac{\sin a \left(1 - \frac{2Z_2}{Z_1}\right) \frac{\pi}{2}}{a \sin\left(1 - \frac{2Z_2}{Z_1}\right) \frac{\pi}{2}} & \text{при } Z_1 > 2Z_2. \end{cases} \quad (1.10)$$

Gadījumam, kad $Z_1=24$, bet $Z_2=10$, tinuma koeficients ir vienāds ar $k_{w1}=0.933$. Vienādojuma izmantošana slēgtā formā dod iespēju noteikt sadalījuma koeficientu un soļa saīsinājuma koeficientu un tikai pēc tam tinuma koeficientu. Tālāk darbā pirmās harmonikas tinuma koeficients sastāvēs tikai no vienas sastāvdaļas – sadalījuma koeficienta, jo soļa

saīsinājuma koeficients tiek ņemts vērā, modelējot mašīnas zobzonas reālo ģeometriju, un aprēķinot plūsmas zobā un plūsmu saķēdējumu spolē. 1.13.att. parādīta tinuma koeficienta lieluma atkarība no enkura rievu skaita uz polu un fāzi. Kā redzams, maksimālo vērtību tinuma koeficients sasniedz ar rievu skaitu uz polu un fāzi, kas vienāds no 0.31 līdz 0.35. 1.4.tabulā sniegtas tinuma koeficienta vērtības dažādām rotora un statora zobu attiecībām.



1.13.att. Tinuma koeficienta atkarība no enkura rievu skaita uz polu un fāzi

1.5. Secinājumi

1.5.1. Induktormašīnām elektrisko kontaktu suka veidā un rotējošo tinumu trūkuma dēļ piemīt augsts ekspluatācijas drošums, izgatavošanas un tehniskās apkopes vienkāršums, kā arī remontderīgums, tās ir plaši izplatītas transportā, vēja enerģētikā un citās tehnikas jomās.

1.5.2. Radiālas un aksiālas ierosmes induktormašīnu salīdzinoša analīze, pamatojoties uz esošiem literatūras avotiem parādīja, ka aksiālajām induktormašīnām ir augstāks lietderības koeficients, nepieciešams mazāks vara patēriņš, tām piemīt labs remontderīgums, tādēļ tām dod priekšroku izmantošanā, arī dzelzceļa transportā.

1.5.3. Meklējot aksiālās induktormašīnas optimālu konstrukciju, vadošo vietu ieņem tās magnētiskā lauka analīze, kas līdz šim tika veikta diezgan aptuveni. Precīzāka magnētiskā lauka analīze, ņemot vērā tā aksiālās sastāvdaļas esamību, ļaus apstiprināt koncentrētu tinumu izmantošanas priekšrocības aksiālās induktormašīnās.

1.5.4. Pasažieru vagonu elektroapgādes sistēmās izmantojamo aksiālo induktorgeneratoru konstruktīvo īpatnību analīze parādīja, ka pagaidām nav precīzu rekomendāciju par optimālo statora un rotora zobu skaita attiecību, kā arī zobzonas ģeometrijas izvēli. Precīzāka magnētiskā lauka analīze, ņemot vērā aksiālās sastāvdaļas esamību tajā, ļaus risināt šodien aktuālo uzdevumu - aksiālās induktormašīnas ar zobu tinumiem, kas nodrošina elektriskās mašīnas augstu efektivitāti, par optimālā statora un rotora skaita pamatotību.

2. AKSIĀLĀS INDUKTORMAŠĪNAS MAGNĒTISKĀ LAUKA APRĒĶINS – PAMATS ELEKTRISKĀS MAŠĪNAS RAKSTURLIELUMU NOTEIKŠANAI UN TĀS PARAMETRU OPTIMIZĀCIJAI

2.1. Elektromagnētiskā lauka vienādojumi

Galvenie fizikālie lielumi, kas raksturo elektromagnētisko lauku elektriskajās mašīnās ievērojat to īpatnības [64, 65, 71, 77], ir magnētiskā lauka indukcijas \vec{B} un intensitātes \vec{H} vektori, elektriskā lauka intensitātes \vec{E} vektors, kā arī elektriskās strāvas blīvuma \vec{j} vektors.

Sakarība starp elektrisko strāvu un magnētiskā lauka intensitāti tiek noteikta ar pilnas strāvas likumu

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum i, \quad (2.1)$$

kas vēsta, ka magnētiskā lauka intensitātes lineārais integrālis pa jebkuru noslēgtu kontūru ir vienāds ar pilno strāvu caur virsmu, kuru ierobežo šis kontūrs. Ar šī vienādojuma palīdzību tiek noteikta viena no svarīgākajām sakarībām starp elektromagnētisko parādību elektrisko un magnētisko pusi, konkrētāk: tas nosaka magnētisko lauku, kas rodas, uzlādētajām daļiņām pārvietojoties, un mainot elektrisko lauku.

EDS inducēšanās kontūrā, ja mainās to caurtverošā magnētiskā plūsma Φ , magnētiskais lauks izraisa elektrisko lauku. Turklāt elektrodzinējspēks, kas darbojas kontūrā, ir vienāds ar elektriskā lauka intensitātes līnijintegrāli. Tādējādi, vispārināts elektromagnētiskās indukcijas likuma Maksvela formulējums ir šāds:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.2)$$

Elektromagnētiskās indukcijas parādības būtība ir tāda, ka jebkādu magnētiskā lauka izmaiņu laikā gadījumā tajā pašā telpā rodas ar to saistīts elektriskais lauks.

Magnētiskās indukcijas vektora līnijas visur ir nepārtrauktas, ko izsaka ar attiecību

$$\oint_S \vec{B} d\vec{s} = 0. \quad (2.3)$$

Iepriekš minētās sakarības ir galvenie elektromagnētiskā lauka vienādojumi integrālā formā.

Diferenciālā formā pilnās strāvas likums ir šāds

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}. \quad (2.4)$$

Šo elektromagnētiskā lauka vienādojumu sauc par **Maksvela pirmo vienādojumu vai pilnās strāvas likumu diferenciālā formā.**

Maksvela otrais vienādojums atspoguļo elektromagnētiskās indukcijas likumu, kuru pirmoreiz 1831.gadā atklāja M.Faradejs

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (2.5)$$

Šis vienādojums vēsta, ka jebkāda magnētiskā lauka indukcijas izmaiņa izraisa virpuļveida elektriskā lauka rašanos ar elektrisko intensitāti \vec{E} . Z.Lencs 1832.gadā uzreiz pēc M.Faradeja atklājuma parādīja, ka elektriskās intensitātes \vec{E} iedarbībā noslēgtā kontūrā rodas elektriskā strāva, kas vērsta tā, ka tās magnētiskais lauks pretojas sākotnējā lauka izmaiņām („mīnus” zīme vienādojuma labajā pusē).

Un, visbeidzot, **magnētiskās plūsmas nepārtrauktības principu un elektriskās strāvas diferenciālā formā izsaka tādas izteiksmes:**

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \text{ un } \operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2.6)$$

kas nozīmē, ka magnētiskā lauka un elektriskā strāvas līnijas ir noslēgtās.

Iepriekš sniegtie elektromagnētiskā lauka likumi un vienādojumi ir pamats dažādu šo lauku aprēķināšanas metožu un veidu attīstībai un pilnveidošanai, sākot ar grafiskām un beidzot ar mūsdienīgām skaitliskām metodēm, izmantojot jaunāko datortehnoloģiju [64-66].

Zemāk apkopojošā 2.1.tabulā sniegti elektromagnētiskā lauka pamatlikumi.

Elektromagnētiskā lauka pamatlikumi

Nosaukums	Vienādojumi diferenciālā formā	Vienādojumi integrālā formā
Pilnās strāvas likums	$rot \bar{H} = \bar{j}$	$\oint \bar{H} d\bar{l} = i$
Elektromagnētiskās indukcijas likums	$rot \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$	$\oint \bar{E} d\bar{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$
Magnētiskās plūsmas un elektriskās strāvas nepārtrauktības princips izteikšana	$div \bar{B} = 0$	$\oint_s \bar{B} d\bar{s} = 0$

2.2. Magnētiskā lauka aprēķināšanas ar galīgo elementu skaitlisko metodi galvenās priekšrocības

Elektrisko mašīnu un citu elektrotehnisko ierīču aprēķināšanas metodes balstās uz to elektromagnētisko lauku pētījumu rezultātiem. Lauka aprēķināšanas elektrotehniskajās ierīcēs grūtības palielinās līdz ar virsmu formas sarežģītākos, kas atdala vides ar dažādām īpašībām. Šīs grūtības pieaug vēl lielākā mērā, ja nepieciešams ņemt vērā vidu nelinearitāti, kas izpaužas vidu parametru atkarībā no lielumiem, kuri raksturo lauku (piemēram, magnētiskās indukcijas) [63].

Pastāv daudzas pieejas elektrisko mašīnu aprēķināšanā. Viena no tām ir daļēju lauku vai pilnas magnētiskā lauka ainas aprēķins tādā vai citādā veidā, ņemot vērā magnētiskā nelinearitāti. Magnētiskā lauka aprēķināšana līdz pat šim paliek galvenā problēma, kuras atrisināšana ļauj turpmāk noteikt nepieciešamos elektromagnētisko ierīču parametrus vai raksturlielumus. Elektromagnētiskā lauka vienādojumi parasti tiek risināti ar analītiskām vai skaitliskām metodēm.

Analītiskām metodēm risinājums ir algebriskas funkcijas, kurās tiek ieliktas parametru vērtības, kas nosaka lauku. Skaitliskajām metodēm risinājums ir skaitlisko vērtību kopums, kas apraksta lauku vienam atsevišķam uzdoto parametru savienojumam.

Starp skaitliskajām metodēm par izplatītākām jāatzīst galīgo diferencu metode (GDM) un galīgo elementu metode (GEM).

Galīgo diferencu metode izmanto diferenciālo vienādojumu aizvietošanu ar galīgiem algebriskiem vienādojumiem. Šīs metodes galvenais trūkums – precīzs robežu apraksts, tāpēc šīs metodes izmantošana magnētisko lauku parametru noteikšanai elektriskajā mašīnā ir neefektīva.

Galīgo elementu būtība ir tā, ka nepārtraukta vide tiek aizstāta ar galīga skaita diskretu elementu kopumu, kas aplūkoti kā atsevišķi magnētiskās ķēdes elementi un kas veido aprēķina apgabalu pārklājošu režģi.

Sastādot diskretā modeļa GEM, rīkojas šādi:

- izskatāmajā zonā tiek fiksēts punktu, ko sauc par mezgla punktiem, galīgs skaits;
- nepārtrauktā lieluma vērtība katrā mezgla punktā tiek uzskatīta par mainīgo, kas jānosaka;
- nepārtrauktā lieluma noteikšanas zona tiek sadalīta ar apakšzonu, ko sauc par elementiem, galīgo skaitu; šiem elementiem ir kopēji mezglu punkti un kopumā tuvina zonas formu;
- nepārtrauktais lielums tiek tuvināts uz katra elementa ar polinomu, kas tiek noteikts ar šī lieluma mezglu vērtību palīdzību, katram elementam tiek noteikts savs polinoms, kuru piemeklē tā, lai saglabātos lieluma nepārtrauktība gar katra elementa robežām.

Kā jau tika norādīts, GEM realizācijai pētāmā lauka zona tiek sadalīta ar apakšzonu, ko sauc par elementiem, galīgo skaitu. Elementiem ir kopēji mezglu punkti, kopumā tie apraksta zonas formu. Teorētiskajā ziņā vienkāršāki ir galīgie divdimensiju elementi (trīsstūri un četrstūri) un trīsdimensiju elementi (tetraedri un paralēlepīpedi). Izmantojot trīsstūra elementu ar lineāru interpolāciju, elementam ir trīs mezgli, jo polinoms satur trīs koeficientus, tāpēc nepieciešams uzdot potenciālus trīs punktos.

Svarīgākās GEM priekšrocības salīdzinājumā ar GDM, pateicoties kurām tā tiek plaši izmantota magnētisko lauku aprēķināšanai, ir šādas:

- iespēja precīzi aprakstīt zonu jebkuras formas līklīniju robežas;
- vienkārši mainīt zonas diskretizāciju dažādos tās posmos, lai iegūtu augstāku aprēķinu precizitāti ar mazāku aprēķina tīkla mezglu skaitu;
- iespēja uzdot pirmā un otrā veida robežnosacījumus jebkura garuma robežām, kā arī jauktus robežnosacījumus;
- iespēja uzlikt robežnosacījumus ar pārtrauktu virsmas slodzi.

Magnētiskā lauka aprēķināšana elektriskajā mašīnā ar skaitliskajām metodēm ļauj detalizēti izanalizēt lauka sadalījumu atsevišķos magnētiskās ķēdes elementos. Sarežģītā zobzonas ģeometrija, lielie aprēķina zonas izmēri un vidu ar dažādu magnētisko caurlaidību

esamība prasa lielu skaitu mezglu. Elementu skaits, uz kuru tiek sadalīta elektriskās mašīnas lauka zona, var sasniegt vairākus desmitus tūkstošu. Tāpēc tāda veida vienādojumu sistēmu var atrisināt tikai ar pilnveidotu skaitļošanas programmu palīdzību un izmantojot ātrdarbības skaitļošanas tehniku. Līdz ar skaitļošanas līdzekļu attīstību GEM iespējas pastāvīgi paplašinās, paplašinās arī risināmo uzdevumu klase. Pašreiz pastāv plašs programmu spektrs, kas balstās uz galīgo elementu metodi. 2.2.tabulā sniegtas galvenās no tām [67-77].

2.2.tabula

Skaitļošanas sistēmas

Nr. p.k.	Programmas nosaukums	Ražotājs	Valsts	Interneta mājas lapa
1	Ansys	Ansys,Inc	ASV	www.ansys.com
2	Comsol	COMSOL Group	Zviedrija	www.comsol.com
3	Flux	CEDRAT Group	Francija	www.cedrat.com
4	JMAG	POWERSYS	Francija	www.powersys.fr
5	QuickField(ELCUT)	ИПК „ТОР”	Krievija	www.quickfield.com (www.elcut.ru)

Uzskaitītās programmas ļauj risināt sarežģītības ziņā dažādus uzdevumus. Turklāt grūtākie ir trīsdimensiju uzdevumi, kur zonām piemīt sarežģīta robežu konfigurācija, nelinearitāte un daudzveidīgi raksturlielumi. Šai sakarā aplūkosim GEM pielietojuma iespējas trīsdimensiju magnētiskā lauka aprēķināšanai, kā arī piemīt aksiālajai induktormašīnai

2.3. Aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķināšanas metodes, izvēle un pamatojums

Aksiālajām induktormašīnām raksturīga vienkārša konstrukcija, tām ir no citām sinhronajām mašīnām principiāli atšķirīga elektromagnētiskā sistēma un magnētiskais lauks tajās ir ar spilgti izteikti trīsdimensiju raksturu (II.att.).

Magnētiskā lauka modelēšanas aksiālās induktormašīnas aktīvajā zonā sarežģītība ir tāda, ka nepieciešams modelēt trūkstošo ierosmes lauka avotu, jo koaksiālā ierosmes spole atrodas telpā starp statora vai rotora paketēm. Sīkāk par magnētiskā lauka modelēšanas grūtībām aksiālās ierosmes mašīnās aprakstīts U.Brakanska, A.Zaiceva un A.Zviedra darbos [29-30].

Jāatzīmē, ka aprēķina zonu izvēles un robežnosacījumu uzdošanas veidi, modelējot magnētiskos laukus aksiālajā induktormašīnā, būtiski kļūst sarežģītāki, salīdzinot ar citām mašīnām un tostarp tiem ir virkne īpatnību:

- magnētiskajam laukam, noteiktu statora Z_1 un rotora Z_2 attiecību gadījumā, ir periodisks raksturs leņķiskās koordinātas virzienā;
- lauka sadalījums atkarīgs no statora un rotora zobu savstarpējā novietojuma, kā arī no aksiālās induktormašīnas darbības režīma;
- aprēķina zonā jāmodelē tam trūkstošais ierosmes lauka avots.

Magnētiskā lauka periods radiālajā mašīnas aktīvajā zonā ir kāds leņķis φ_p , kurš tiek noteikts pēc formulas:

$$\varphi_p = \frac{2\pi}{N}, \quad (2.7)$$

kur N – lielākais kopējais dalītājs starp statora Z_1 zobu skaitu un rotora Z_2 zobu skaitu.

Kā aprēķina zona jāizvēlas sektors, kas atbilst leņķim, kurš vienāds ar φ_p , t.i., vienam magnētiskā lauka telpiskās izmaiņas periodam, leņķiskās koordinātas virzienā.

Tā, piemēram, mašīnām ar koncentrēto trīsfāžu tinumu, ja $Z_1=24$ un $Z_2=10$ – $N=2$ un leņķis $\varphi_p = 180^\circ$.

Magnētiskā lauka aprēķināšanas uzdevumu var risināt trīs veidos:

- risinot magnētiskā lauka trīsdimensiju uzdevumu tiešā veidā;
- reducējot aprēķinu uz diviem divdimensiju uzdevumiem – lauks radiālajā aktīvajā zonā (statora un rotora magnētserde un galvenā gaisa sprauga), kur lauks ir praktiski plakanparalēls, un lauks aksiālajā magnētīvadā, kur lauks ir aksiālsimetrisks;
- transformējot trīsdimensiju uzdevumu uz divdimensiju uzdevumu.

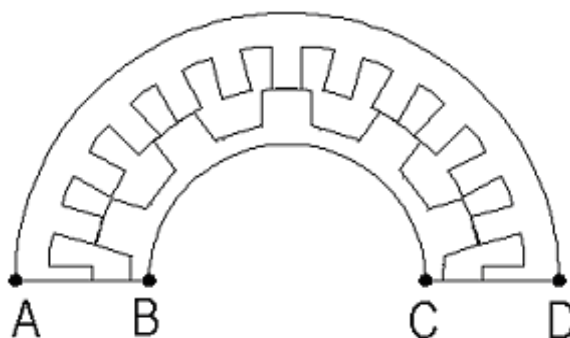
Visi elektromagnētiskie lauki ir trīsdimensiju. Tomēr daudzos gadījumos, kas izraisa praktisku interesi, precīzus analītiskos risinājumus trīsdimensiju laukiem ir grūti iegūt, jo skaitlisko risinājumu atrašana nereti ir saistīta ar pārmērīgi lielu izskaitļojumu apjomu. No otras puses, programmas trīsdimensiju magnētisko lauku aprēķināšanai bieži mēdz būt grūti pieejamas, t.i., to iegāde saistīta ar lieliem materiāliem izdevumiem, bet praktiskā izmantošana saistīta ar lielu laika patēriņu. Tādas programmas pastāv, tās var iegādāties, bet šajā darbā virknes iemeslu dēļ tas bija vienkārši nelietderīgi. Tāpēc tālāk šo programmu neizskatīsim.

Sīkāk aplūkosim tikai otro un trešo aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķināšanas veidu.

Un tā, reducējot magnētiskā lauka aprēķinu aksiālajā induktormašīnā divos divdimensiju uzdevumos, magnētisko lauku mašīnas šķērs griezumā, var noteikt tiek noteikts caur vektoriālo magnētisko potenciālu un aprakstīt ar atvasinājumu diferenciāl vienādojumu parciālo atvasinājumu:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -j_z, \quad (2.8)$$

kur μ_x un μ_y magnētiskās caurlaidības tenzora komponentes; A_z un j_z – attiecīgi vektoriālā magnētiskā potenciāla un strāvas blīvuma komponentes Z ass virzienā, pieņem, ka šī ass sakrīt ar mašīnas rotācijas asi.



2.1.att. Aprēķināmais magnētiskās sistēmas ģeometriskais modelis šķērs griezumā mašīnai ar zobu skaita attiecību 24/10

Tukšgaitas režīmā aksiālajā induktormašīnā lauka avots ir ierosmes spole, kas atrodas ārpus aprēķina zonas starp divām statora vai rotora paketēm.

Piem., gadījumā, kad $N \neq 1$ (2.1.att.), par aprēķina apgabalu var izvēlēties pusi no mašīnas šķērs griezuma, robežnosacījumi tiek uzdoti šādā veidā.

Tā kā robežas AB un CD ir magnētiskā lauka simetrijas asis, tad uz tām jāuzdod 1.veida robežnosacījums $A_{AB} = \text{const}$; $A_{CD} = \text{const}$. Tad magnētiskā plūsma, tiek noteikta ar izteiksmi

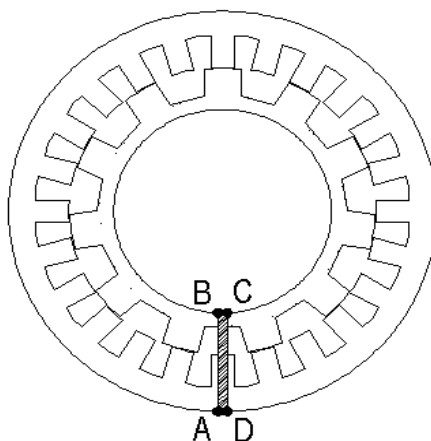
$$\frac{\Phi}{N} = (A_{AB} - A_{CD})l = \Delta A \cdot l, \quad (2.9)$$

kur A_{AB}, A_{CD} - vektoriālā potenciāla vērtības uz robežām AB un CD ;
 l - mašīnas statora paketes garums aksiālā virzienā.

Uz vienas no robežām vektoriālā magnētiskā potenciāla vērtība var tikt izvēlēta patvaļīgi, piem., dotajā gadījumā $A_{CD}=0$, tad $A_{AB}=\Delta A$.

Uz ārējās (AD) un iekšējās (BC) riņķa līnijas uzdodami 2.veida robežnosacījumi, jo uz šīm robežām ir tikai indukcijas normālā komponente (B_n), bet tangenciālā vienāda ar nulli ($B_\tau=0$), jeb $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$.

Gadījumos, kad aprēķina apgabals ir viss šķērsriezums, t.i., $N=1$ un leņķis $\varphi_p=360^\circ$, tad robežas, uz kurām nepieciešams uzdot vektoriālā magnētiskā potenciāla vērtības, nav. Piemēram, ar $Z_1=24$ un $Z_2=11$ statora Z_1 zobu skaita un rotora Z_2 zobu skaita lielākais kopīgais dalītājs $N=1$. Tāpēc tādas robežas nepieciešams izveidot mākslīgi, radot niecīgi mazu spraugu mašīnas aktīvajā zonā, kā tas parādīts 2.2.att [30,78-80].



2.2.att. Aprēķinātais magnētiskās sistēmas ģeometriskais modelis šķērsriezumā ar zobu skaita attiecību $Z_1/Z_2=24/11$

Šodien esošie pētījumi magnētiskā lauka aksiālo induktormašīnu skaitliskajā modelēšanā ir nepietiekami precīzai optimizācijas uzdevuma risināšanai. Tas saistīts ar to, ka tie ne vienmēr ņem vērā magnētiskās plūsmas aksialās komponentes ietekmi uz zobzonas ģeometrijas izvēli. Aksiālās induktormašīnas magnētiskās ķēdes optimizācijas uzdevumos vispirms nepieciešams ņemt vērā šo atkarību. Turpmāk aplūkots aksiālās magnētiskās plūsmas noteikšanas algoritms mainīgu (jeb dažādu) zobzonas ģeometrisku izmēru gadījumam, kad lauka avots – ierosmes, atrodas ārpus pētāmās zonas. Piedāvātais algoritms ļauj atrast saistību ar magnētiskā lauka ainu mašīnas šķērsriezumā un ierosmes tinuma MDS.

Algoritma būtība ir tāda. Katrai mašīnas ģeometrijai tiek izvēlētas dažādas vektoriālā magnētiskā potenciāla vērtības (t.i., mūsu gadījumā A_{AB}). Vektoriālā magnētiskā potenciāla atrašanas algoritms, izmantojot programmu paketi „Quick Field”, parādīts 2.3.att.

Vektoriālā magnētiskā potenciāla atrašanas algoritms jāizvēlas katrā gadījumā atsevišķi, jo mainot zonas zobzonas ģeometriju, mainās MDS vērtības zobzonā un statnē [81].

Tā, piemēram, izmantojot parametriskās analīzes programmu „LabelMover”, patvaļīgi var uzdot vektoriālā magnētiskā potenciāla vērtības uz robežas AB . Turklāt lielākai precizitātei jāņem mazāks solis. Tālāk uzdotajām vērtībām A_{AB} tiek atrastas MDS vērtības zobzonā (F_z) un magnētiskā plūsma Φ_{AD} uz ārējās riņķa līnijas AD , kā arī tiek noteikta kopējā magnētiskā plūsma $\Phi = \Phi_{AD} \cdot N$. Rezultātu atrašana tiek veikta arī izmantojot programmu LabelMover.

Nākamais solis ir MDS noteikšana aksiālajā magnētīvadā (F_m), t.i., tiek realizēts otrais etaps [82].

Nosakot MDS statnē un ieliktnī, jābalstās uz indukcijas maksimālo un vidējo vērtību:

$$B_{\text{vidstatne}} = \frac{\Phi}{S}, B_{\text{maxstatne}} = \frac{\Phi}{S}, B_{\text{minstatne}} = 0, B_{\text{vidieliktis}} = \frac{\Phi}{S}, B_{\text{maxieliktis}} = \frac{\Phi}{S}, B_{\text{minieliktis}} = 0. \quad (2.10)$$

Tālāk pa magnetizēšanās līkni tiek atrastas magnētiskā lauka intensitātes vērtības:

$$H_{\text{vidstatne}}, H_{\text{maxstatne}}, H_{\text{minstatne}} = 0, H_{\text{vidieliktis}}, H_{\text{maxieliktis}}, H_{\text{minieliktis}} = 0. \quad (2.11)$$

Pēc formulas (2.14.) tiek aprēķināta magnētiskā lauka intensitātes statnē

$$H_{\text{statne}} = \frac{H_{\text{vidstatne}} \cdot 4 + H_{\text{maxstatne}} + H_{\text{minstatne}}}{6} \quad (2.12)$$

un ieliktnī pēc formulas

$$H_{\text{ieliktis}} = \frac{H_{\text{vidieliktis}} \cdot 4 + H_{\text{maxieliktis}} + H_{\text{minieliktis}}}{6}. \quad (2.13)$$

Tad MDS statnē

$$F_{\text{statne}} = H_{\text{statne}} \cdot l_s, \quad (2.14)$$

bet MDS ieliktnī

$$F_{\text{ieliktis}} = H_{\text{ieliktis}} \cdot l_i. \quad (2.15)$$

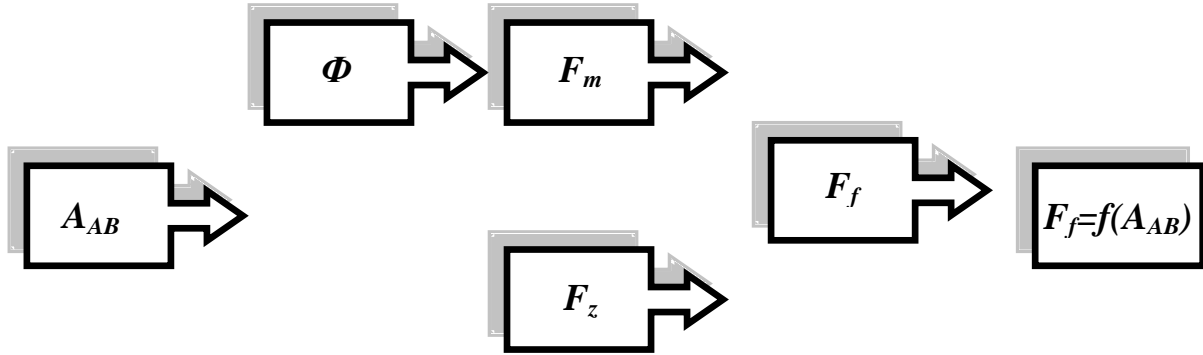
Magnetdzinējspēku summa ieliktnī un statnē ir kopējā MDS aksiālajā magnētīvadā

$$F_m = F_{\text{statne}} + F_{\text{ieliktis}}. \quad (2.16)$$

Ierosmes tinuma MDS (F_f) ir zobzonas MDS un aksiālā magnētīvada MDS summa:

$$F_f = F_z + F_m. \quad (2.17)$$

Uzdodot virkni vektoriālā magnētiskā potenciāla vērtības uz robežas AB , nosakot zobzonas magnētisko plūsmu un atrodot ierosmes tinuma MDS, var noteikt magnētiskā lauka parametru izmaiņu ainu atkarībā no ierosmes MDS.



2.3. att. Vektoriālā magnētiskā potenciāla atrašanas algoritms

Pirms lauka analīzes ar trešo metodi magnētvida aksiālie posmi tiek pārveidoti radiālos, tostarp saglabājot magnētiskās ķēdes transformējamo elementu šķērsriezuma laukumus. 2.4.att. parādīts mašīnas vienas puses rasējums, kas attiecas uz vienu statora un rotora paketi. Turklāt par pamatu tiek pieņemti: plūsmas izešanai caur statora S_{as} (rotora S_{ar}) jūga laukums, kas vienāds ar statora b_{as} (rotora b_{ar}) jūga loka garuma reizinājumu ar paketes l garumu, tad

$$S_{as} = b_{as} \cdot l; \quad S_{ar} = b_{ar} \cdot l. \quad (2.18)$$

Caur norādītajiem laukumiem iziet statora (rotora) atbilstošo pakešu magnētiskās plūsmas.

Ņemot vērā magnētvida aksiālo elementu šķērsriezuma laukuma saglabāšanu:

- $b_{bs} = b_{as} \cdot \frac{2S_{bs}}{0.5 \cdot S_{as}}$ - transformēta korpusa virs statora paketes vidus loka garuma vērtība;
- $b_{is} = b_{as} \cdot \frac{2S_{is}}{S_{as}}$ - transformēta korpusa starp statora paketēm loka garuma vērtība;
- $b_{br} = b_{as} \cdot \frac{2S_{br}}{0.5 \cdot S_{as}}$ - transformēta korpusa zem rotora paketes vidus loka garuma vērtība;
- $b_{ir} = b_{ar} \cdot \frac{2S_{ir}}{S_{ar}}$ - transformēta ieliktņa starp rotora paketēm loka garuma vērtība;

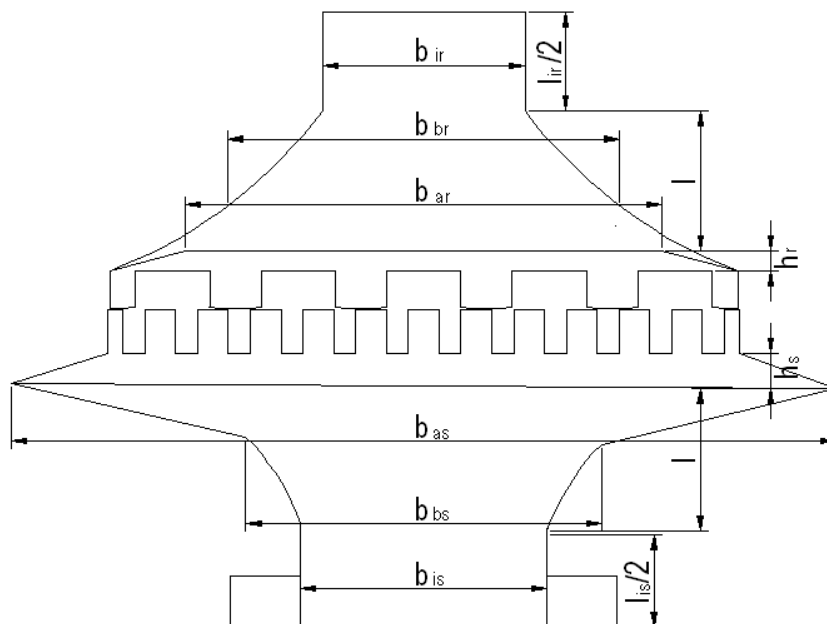
l_{ir} – attālums starp rotora paketēm;

l – paketes garums;

l_{is} – attālums starp statora paketēm;

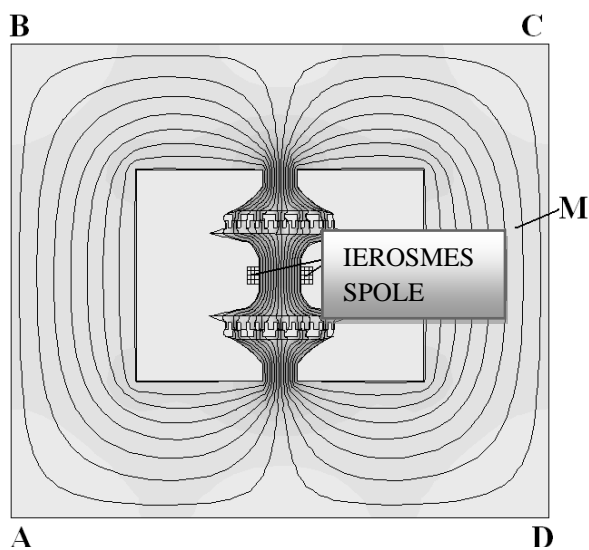
h_r – rotora jūga augstums;

h_s – statora jūga augstums.



2.4.att. Magnētiskās ķēdes šķēsgriezums pēc magnētvasda transformēto aksiālo posmu ieviešanas tajā

2.5.attēlā parādīts magnētiskā lauka sadalījums magnētiskās ķēdes šķēsgriezumā pēc transformētu magnētvasda ģeneratora aksiālās daļas posmu un saslēdzošā gredzena M ar magnētisko pretestību 50 – 100 reižu mazāku salīdzinājumā ar galvenā magnētvasda pretestību.



2.5. att. Magnētiskā lauka sadalījums magnētiskās ķēdes šķēsgriezumā pēc magnētvasda aksiālo posmu transformācijas: ABCD – ārējā robeža; M – saslēdzošais gredzens

Magnētiskā lauka avots ģenerators tukšgaitas režīmā ir gredzenveida ierosmes tinuma MDS (I1.att), bet slodzes režīmā jāievēro arī vēl enkura tinuma MDS. Ierosmes tinumā tiek uzdots strāvas blīvums, kas nodrošina nepieciešamo MDS.

Uz ABCD robežas tiek uzdoti pirmā veida robežnosacījumi, t.i., vektorālā magnētiskā potenciāla vērtības $A_{ABCD}=0$. Šis robežnosacījums nosaka magnētiskās indukcijas normālās komponentes vērtību uz robežas. Nulles vērtība tiek izmantota, lai norādītu pilnu lauka vājinājumu uz no avota attālinātas robežas [83].

2.3.tabulā kā piemēri sniegti pētāmā ģenerators 2ГВ13.У1. aksiāla magnētvasda transformējamo posmu izmēri.

2.3.tabula

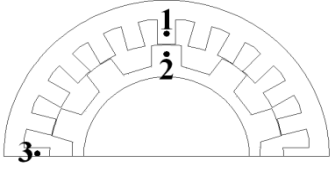
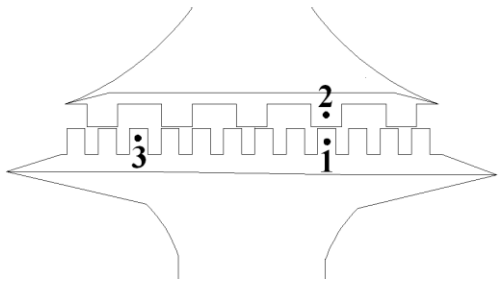
Pētāmā ģenerators aksiāla magnētvasda transformējamo elementu izmēri

Nosaukums	b_{ar}	b_{as}	b_{br}	b_{bs}	b_{ir}	b_{is}	l	l_r	l_s	h_r	h_s
m	0.3903	0.675	0.285	0.2912	0.166	0.2019	0.115	0.16145	0.16145	0.016	0.029

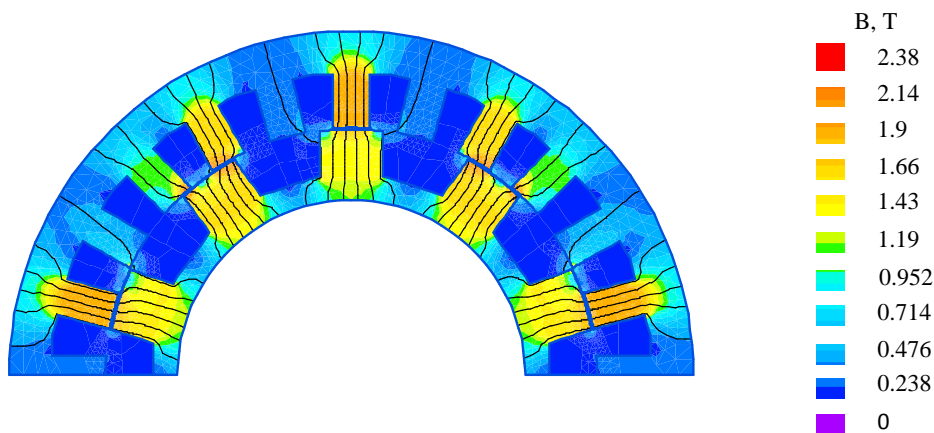
Zemāk sniegti salīdzinoši magnētiskā lauka modelēšanas rezultāti, reducējot aprēķinu divos divdimensiju uzdevumos un transformējot magnētvasda aksiālos posmus statora plaknē, t.i., trīsdimensiju uzdevuma pārveidojums uz divdimensiju (2.4.tabula).

2.4.tabula

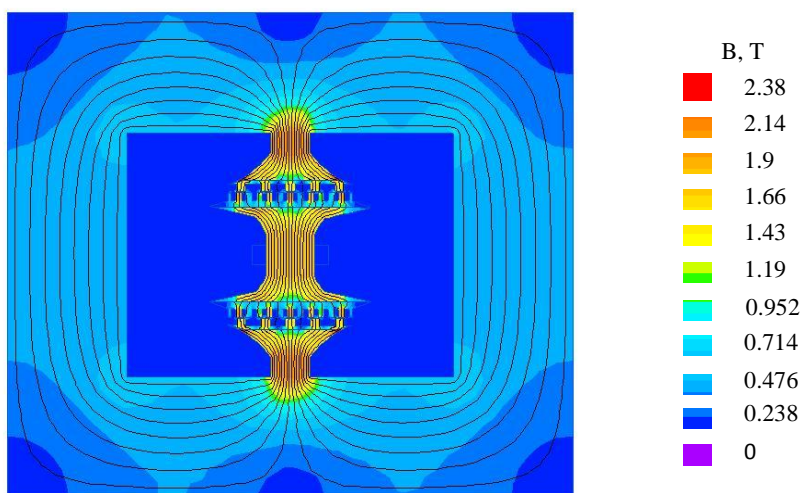
Iegūto magnētiskā lauka modelēšanas rezultātu salīdzināšana

Analizējamā parametra apgabals	Aprēķins, sadalot divos divdimensiju uzdevumos	Aprēķins, kas balstīts uz trīsdimensiju uzdevuma reducēšanu divdimensiju uzdevumu
Rasējums		
Indukcija B punktā 1	1.807 T	1.9 T
Indukcija B punktā 2	1.258 T	1.33 T
Indukcija B punktā 3	0.207 T	0.25 T
Φ_{max}	0.00514 Wb	0.005344 Wb
Φ_{min}	0.00062 Wb	0.00081239 Wb
$\Phi_{max}-\Phi_{min}$	0.00452 Wb	0.00453 Wb

2.6.attēlā parādīta magnētiskā lauka aina mašīnas šķērs griezumā, bet 2.7.att. mašīnas magnētiskā lauka aina pēc magnētvida aksiālo posmu transformācijas.



2.6.att. Magnētiskā lauka aina mašīnas šķērs griezumā



2.7. att. Mašīnas magnētiskā lauka aina pēc magnētvida aksiālo posmu transformācijas

Divos veidos iegūto magnētiskā lauka aprēķina rezultātu analīze apstiprina, ka katrs no tiem ir loģisks. Tomēr aprēķina metodika, transformējot trīsdimensiju uzdevumu divdimensiju uzdevumā, ļauj vienkāršot risināšanas procesu, kas ekonomē laiku, jo nav nepieciešamības daudzkārt risināt vienu un to pašu uzdevumu ar dažādām patvaļīgi uzdotām vektorālā magnētiskā potenciāla vērtībām un izvēlēties no risinājumu kopas piemērotu variantu.

Turpmākā aksiālās induktormašīnas analīze magnētiskā lauka un optimāla tās zobzonas parametru noteikšana veikta uz tukšgaitas un īsslēguma režīma izpētes pamata.

Parādīts, kādā veidā var iegūt interesējošos mašīnas raksturlielumus, pamatojoties uz iepriekš piedāvāto magnētiskā lauka aksiālās induktormašīnās analīzi, kas balstīts uz magnētvasda aksiālo posmu transformāciju radiālā plaknē.

2.4. Aksiālā induktorģeneratora tukšgaitas un īsslēguma raksturlīknes un to noteikšana no magnētiskā lauka aprēķina rezultātiem

Tukšgaitas raksturlīkne ir tukšgaitas sprieguma (U_0) vai EDS (E_0) atkarība no ierosmes strāvas I_f , $U_0=E_0=f(I_f)$ ja rotācijas frekvence ir nemainīga. Ģeneratora elektrodzinējspēks tukšgaitā un statora zoba magnētiskās plūsmas sinusoidālas izmaiņas gadījumā to nosaka ar izteiksmi

$$E_0 = 2 \cdot 4.44 \cdot f_1 \cdot \frac{N_S}{a} \cdot w_k \cdot k_{w1} \cdot \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{2}, \quad (2.19)$$

kur $f_1 = \frac{Z_2 \cdot n_N}{60}$ - strāvas frekvence;

n_N - nominālā rotācijas frekvence;

N_S - spoļu skaits ģeneratora fāzē;

a - paralēlo zaru skaits katrā enkura tinuma fāzē;

Φ_{max}, Φ_{min} - magnētiskās plūsmas maksimālā un minimālā vērtība statora zobā, kad statora zobs atrodas pret rotora zobu, vai kad pret rotora rievu;

w_k - vijumu skaits vienā enkurā spolē;

k_{w1} - tinuma koeficients pēc pirmās harmonikas.

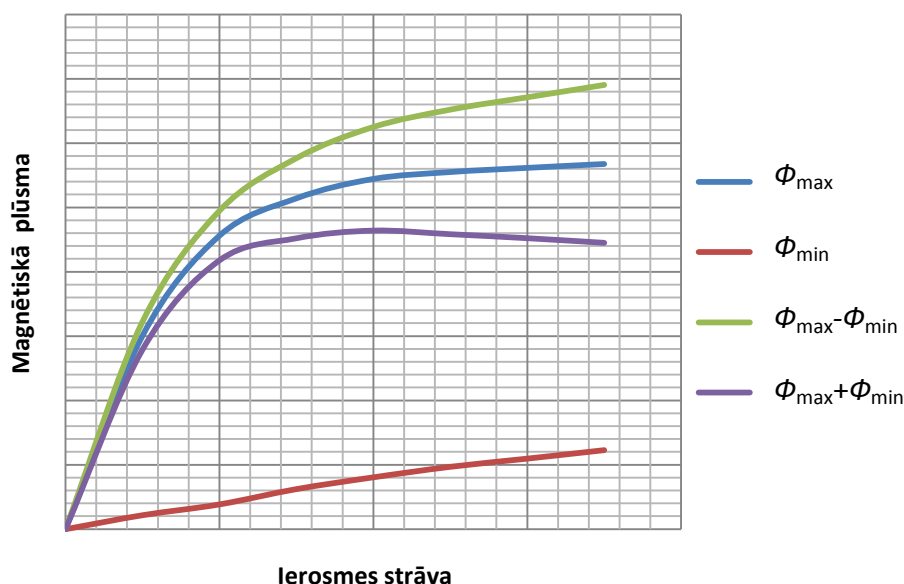
Šajā izteiksmē visi lielumi, izņemot magnētiskās plūsmas vērtības $\Phi_{max}-\Phi_{min}$, ir pastāvīgi. Tādējādi, lai noteiktu tukšgaitas raksturlielumus, nepieciešams atrast plūsmu Φ_{max} un Φ_{min} starpības atkarību no ierosmes strāvas.

Tā kā ierosmes tinuma vijumu skaits ir nemainīgs, tad strāvas I_f vērtību nosaka kopējā magnētiskā potenciāla kritums magnētiskajā ķēdē. Ja F_f - magnētiskā potenciāla kritums katram polu pārim tukšgaitā, w_f - vijumu skaits ierosmes spolē, tad ierosmes strāva vienāda ar

$$I_f = \frac{F_f}{w_f}. \quad (2.20)$$

Jo lielāka indukcija rotora jūgā un serdenī, jo lielāks nepieciešamais magnetdzinējspēks. Jūga vai rotora ievērojamas piesātināšanas gadījumā tukšgaitas līkne noliecas un iet gandrīz paralēli abscisas asij, turklāt turpmāka ierosmes strāvas palielināšana neizraisa ģeneratora sprieguma palielinājumu.

2.8.attēlā doti tukšgaitas magnētiskās raksturlīknes. Šīs līknes apstiprina iepriekš izklāstīto teoriju. Līkne $\Phi_{max}=f(I_f)$ sākumā līdz tērauda piesātinājumam iet taisni, zobu tērauda piesātinājuma zonā līkne novirzās uz abscisas asi. Līkne $\Phi_{min}=f(I_f)$ praktiski ir taisna, jo statora zoba, kas atrodas pret rotora zobu, plūsma ir neliela un neizraisa piesātinājumu. Tāpēc līkne $\Phi_{max}-\Phi_{min}=f(I_f)$ sākumā aug, bet pēc tam $\Phi_{max}=f(I_f)$ augšanas palēnināšanās dēļ starpība $\Phi_{max}-\Phi_{min}$ samazinās. Tad, neskatoties uz turpmāko MDS pieaugumu, ģenerators elektrodzinējspēks samazinās. Tostarp atsevišķi katra no plūsmām Φ_{max} un Φ_{min} , un tātad plūsmu Φ_{max} un Φ_{min} summa palielinās. Tādējādi, palielinot ierosmes strāvu, ģenerators elektrodzinējspēks pieaug līdz noteiktai zobu piesātinājuma robežai, pēc tam sāk pat samazināties, kas nav parastajiem heteropolāriem ģeneratoriem.

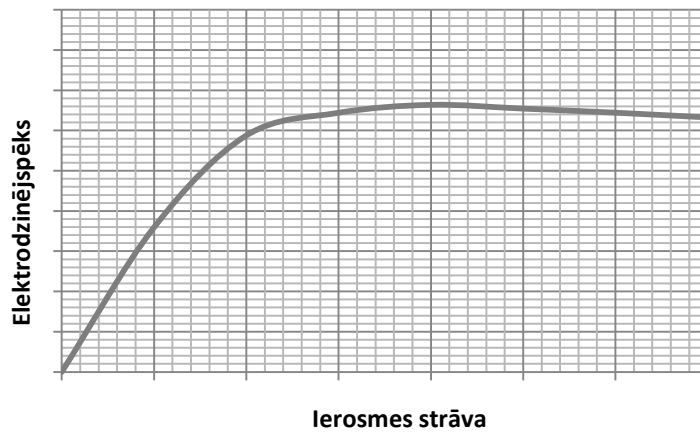


2.8.att. Magnētisko plūsmu izmaiņu līknes atkarībā no ierosmes strāvas

Jo lielāka indukcija rotora jūgā un serdē, jo lielāks nepieciešamais magnetdzinējspēks un jo lēzenāk iet magnētiskās raksturlīknes. 2.8.att. parādītās magnētiskās līknes tika aprēķinātas, izmantojot GEM metodi, reducējot trīsdimensiju uzdevumu uz divdimensiju uzdevumu, ņemot vērā elektrotehniskā tērauda marķu un citus ģenerators parametrus.

Pēc formulas (2.20) aprēķinātā tukšgaitas raksturlīkne uz iepriekš iegūtu magnētisko raksturlīkņu (2.8.att.) bāzes parādīta 2.9.att. Šīs līknes raksturs (novirzes uz abscisas ass virzienā), ir līdzīgs līknēm $\Phi_{max}-\Phi_{min}=f(I_f)$.

Izmantojot GEM metodi un trīsdimensiju uzdevuma reducēšanu uz divdimensiju uzdevumu, tika iegūtas īsslēguma raksturlīknes.



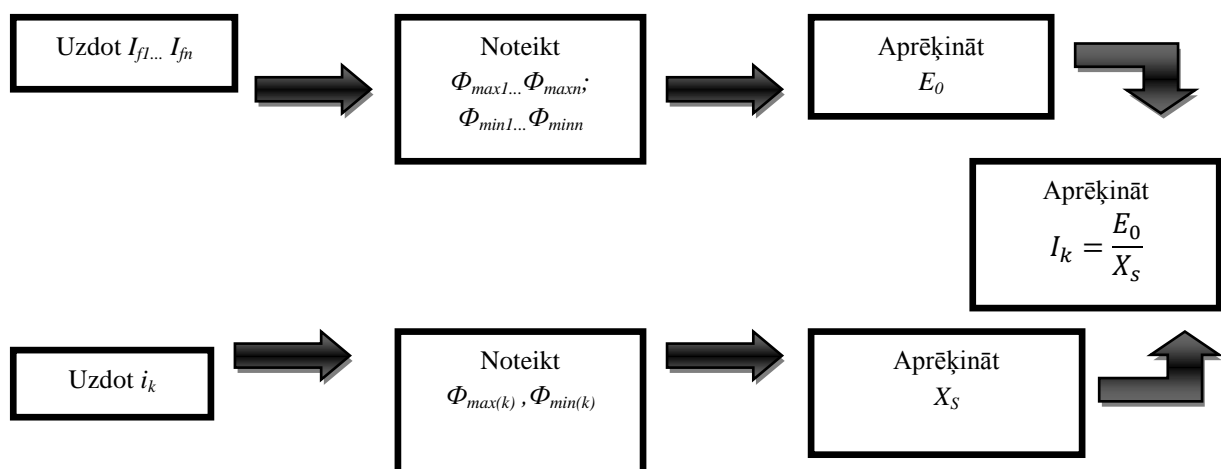
2.9. att. Tukšgaitas raksturlīkne

Par ģenerators īsslēguma raksturlīkni sauc ilgstošas īsslēguma strāvas atkarību no ierosmes strāvas, ja rotācijas frekvence ir nemainīga.

Pēkšņa īsslēguma gadījumā rodas pastāvīga enkura reakcijas sastāvdaļa, kas rada lauku, kurš saķēdēts ar ierosmes tinumu. Pēdējais pretosies enkura reakcijas plūsmas atmagnetizējošās darbības pieaugšanai un pirmajā brīdī īsslēgumu strāvu noteiks sinhronā ģenerators pārejas pretestība X'_d , turklāt strāva pēkšņa īsslēguma gadījumā būs lielāka par nostabilizējušos strāvu [6].

Sakarā ar statora tinuma lielo induktīvo pretestību induktorgeneratoram strāva pēkšņa īsslēguma gadījumā tikai nedaudz pārsniedz ilgstošā režīma strāvu, kas ir tuva slodzes strāvai. No tā izriet, ka īslaicīgs īsslēgums uz ģenerators spailēm pie nominālas ierosmes strāvas induktorgeneratoram nav bīstams.

Īsslēguma raksturlīknes aprēķina algoritms parādīts 2.10.att. un ir šāds:



2.10.att. Īsslēguma raksturlīknes aprēķina algoritms

Izmantojot programmu kompleksu „QuickField” un iepriekš uzdotās vērtības ($I_{fl}... I_{fn}$), tiek noteiktas maksimālās un minimālās magnētiskās plūsmas vērtības ($\Phi_{max1}... \Phi_{maxn}$; $\Phi_{min1}... \Phi_{minn}$). Tālāk tiek aprēķināts EDS, kas izveidots uz ierosmes tinuma rēķina, izmantojot formulu 2.19.

Pēc tam patvaļīgi uzdotajai vērtībai īsslēguma strāva (i_k) tiek noteiktas īsslēguma maksimālās un minimālās magnētiskās plūsmas vērtības ($\Phi_{max(k)}... \Phi_{min(k)}$). Induktivitāte tiek noteikta pēc šādās izteiksmes [32]:

$$L = \frac{(\Phi_{max(k)} + \Phi_{min(k)}) \cdot w_k}{2 \cdot \frac{I_k}{a} \cdot \sqrt{2}}, \quad (2.21)$$

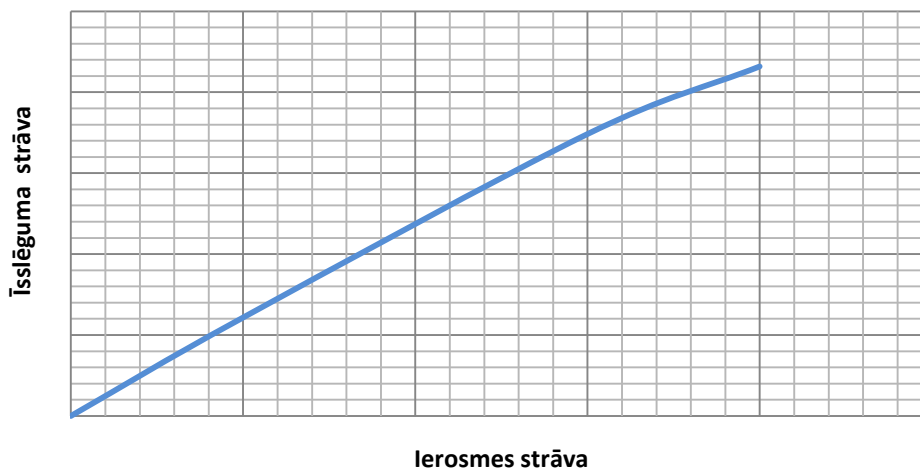
tad induktīvā pretestība pēc formulas

$$X_S = 2\pi fL. \quad (2.22)$$

Pēc tam tiek noteikta īsslēguma strāva

$$I_k = \frac{E_0}{X_S}. \quad (2.23)$$

Pēc iegūtajiem datiem tiek aprēķināta īsslēguma raksturlīkne.



2.11.att. Īsslēguma raksturlīkne

Tukšgaitas un īsslēguma raksturlīknes nepieciešamības gadījumā ļauj aprēķināt citus raksturlielumus, noteikt noteikt ģenerators slodzi pēc strāvas lieluma ģenerators slodzi un atrast zobzonas ģeometrijas ietekmi uz šo raksturlielumu. Turklāt iepriekš iegūto īsslēguma un tukšgaitas raksturlīknes ļauj veikt aprēķinu ātri un pietiekami precīzi.

2.5. Secinājumi

2.5.1. Magnētiskā lauka aksiālajā induktormašīnā analīze ir pamats elektriskās mašīnas raksturlielumu noteikšanai un sekojošai tās konstrukcijas optimizācijai.

2.5.2. Ērtākā, ātrākā un pietiekami precīza magnētiskā lauka elektriskajā mašīnā, arī aksiālajā induktormašīnā, aprēķināšanas metode ir galīgo elementu metode.

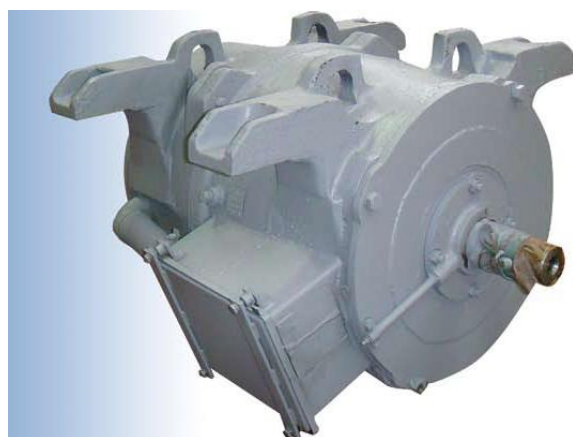
2.5.3. Divu magnētiskā lauka aprēķina veidu, aprēķina reducēšana uz diviem divdimensiju uzdevumiem un trīsdimensiju uzdevuma reducēšana uz vienu divdimensiju uzdevumu, salīdzinoša analīze parādīja, ka abi veidi ir pilnībā pamatoti aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka parametru noteikšanai. Tomēr otrais veids dod vienkāršāku un ātrāku risinājumu, jo nav nepieciešams ilgstoši meklēt magnētiskā lauka vektoriālā potenciāla vērtības. Otrais veids ļauj arī iegūt un izanalizēt pilnu lauka ainu, un tātad pieņemt pareizu lēmumu magnētiskās ķēdes parametru izmaiņai.

2.5.4. Izstrādātais magnētiskā lauka parametru noteikšanas veids aksiālajā induktormašīnā ļauj operatīvi aprēķināt svarīgākos raksturlielumus – tukšgaitas un īsslēguma raksturlīknes, kas dod svarīgu informāciju aksiālās induktormašīnas zobzonas parametru ietekmes noteikšanai uz elektriskās mašīnas slodzi, un tātad efektīvi veikt pētāmā objekta konstrukcijas optimizāciju.

3. REKOMENDĀCIJU IZSTRĀDE AKSIĀLĀS INDUKTORMAŠĪNAS EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANAI

3.1. Pētījuma objekta – zemvagona induktorģeneratora 2ГВ.13.2Y1 apraksts

Šajā nodaļā, balstoties uz magnētiskā lauka aprēķina rezultātiem, sniegtas rekomendācijas aksiālās induktormašīnas racionālas zobzonas ģeometrijas izvēlē. Kā pētījuma objekts tika izvēlēts akciju sabiedrības „Latvo” sērijveidā izgatavotais induktorģenerators 2ГВ.13.2Y1 (3.1.att.) ar jaudu 32 kW. Šis ģenerators tiek izmantots vagonu ar gaisa kondicionēšanas sistēmu elektroapgādei. Ģeneratora tehniskie raksturlielumi doti 3.1.tabulā.



3.1. att. Zemvagona ģenerators 2ГВ.13.2Y1

3.1.tabula

Ģeneratora 2ГВ.13.2Y1 nominālie dati

Parametrs	Vērtība	Mērvienība
Nominālā jauda	32	kW
Nominālais spriegums (līnijas)	116	V
Nominālā strāva līdz taisngriezum	170	A
Nominālā rotācijas frekvence	1000	min ⁻¹
Statora tinuma fāžu skaits	3	-
Fāžu savienojums	Y	-
Nominālā strāvas frekvence	167	Hz
Tērauda marka	2211	-
Enkura tinuma spoles vijumu skaits	13	-
Ierosmes tinuma strāva	3	A
Ierosmes tinuma vijumu skaits	1520	-
Statora (rotora) pakešu skaits	2	-

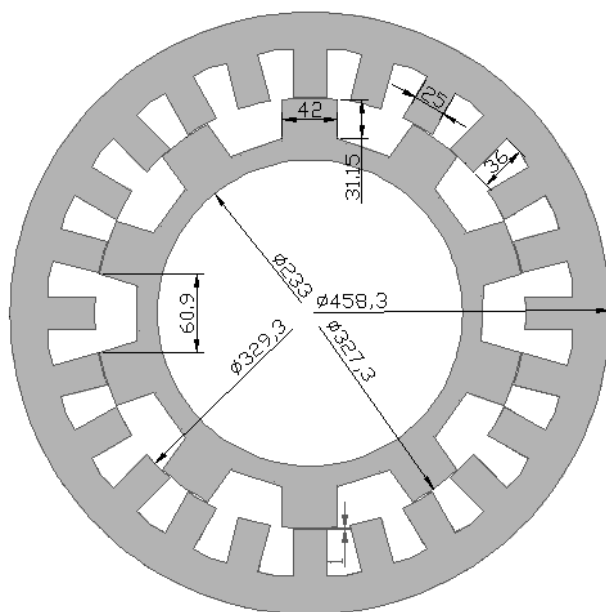
3.2.tabulā norādīti ģenerators zobzonas galvenie parametri.

3.2.tabula

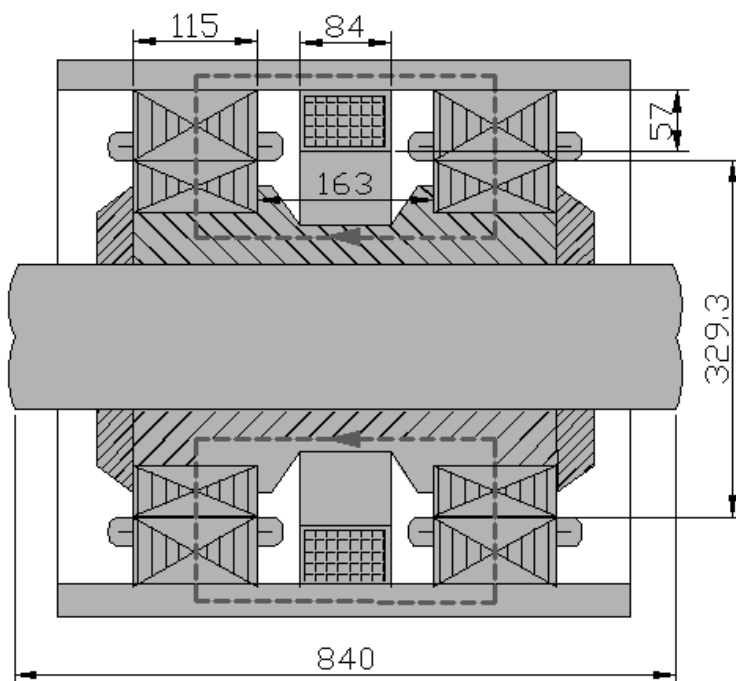
Ģenerators 2ГВ.13.2У1 zobzonas galvenie parametri

Nosaukumi	Apzīmējumi	Vērtības	Mērvienības
Statora zobu skaits	Z_1	24	-
Rotora zobu skaits	Z_2	10	-
Statora zoba iedaļa	b_1	0.043	m
Rotora zoba iedaļa	b_2	0.1029	m
Statora zoba platums	b_{z1}	0.025	m
Rotora zoba platums	b_{z2}	0.042	m
Statora rievās platums	b_{r1}	0.018	m
Rotora rievās relatīvais platums	γ	1.45	-
Rotora rievās platums	b_{r2}	0.0609	m
Gaisa sprauga	δ	0.001	m
Statora paketes garums	l	0.115	m
Tērauda marka	elektrotehniskais tērauds 2211, loksnes biezums $\Delta=0.5$ mm		
Paketes aizpildes ar tērauda koeficients	k_{Fe}	0.96	-
Statora zoba šķērsgriezums tēraudā	$S_{z1} = b_{z1} \cdot l \cdot k_{Fe}$	0.002662	m ²
Rotora zoba šķērsgriezums tēraudā	$S_{z2} = b_{z2} \cdot l \cdot k_{Fe}$	0.004472	m ²
Statora zoba augstums	h_{z1}	0.036	m
Rotora zoba augstums	h_{z2}	0.03115	m
Statora izvirpojuma diametrs	D_s	0.3293	m
Rotora ieliktna diametrs	D_{ie}	0.233	m
Rotora jūga šķērsgriezums	S_r	0.042617	m ²
Statora ārējais diametrs	D_a	0.4583	m
Statora jūga šķērsgriezums	S_j	0.022446	m ²

3.2.att. attēlota mašīnas šķērsriezuma skice, bet 3.3.att. mašīnas gareniskā šķērsriezuma skice, kur norādīti ģenerators galvenie parametri.



3.2.att. Ģenerators šķērsriezums, kurā norādīti galvenie izmēri



3.3.att. Ģenerators gareniskais šķērsriezums, kurā norādīti galvenie izmēri

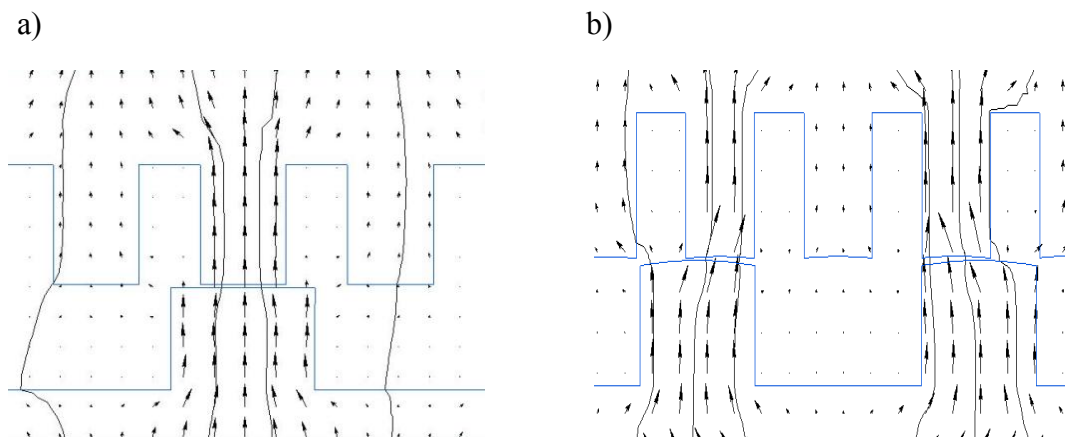
3.2. Aksiālā induktorģeneratora magnētiskās ķēdes parametri, kas nosaka mašīnas izmantošanas efektivitāti

Projektējot aksiālo induktorģeneratoru, rodas induktora racionālas zobzonas ģeometrijas, kas nodrošina efektīvu magnētiskās plūsmas izmantošanu mašīnā, izvēles uzdevums. Neveiksmīgi izvēloties zobzonas ģeometriskos parametrus, mašīna var nenodrošināt nepieciešamo jaudu.

Ģeneratora elektrodzinējspēks tukšgaitā tiek noteikts ar formulu (2.19)

$$E_0 = 2 \cdot 4.44 \cdot f_1 \cdot \frac{N_S}{a} \cdot w_K \cdot k_{w1} \cdot \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2}. \quad (3.1)$$

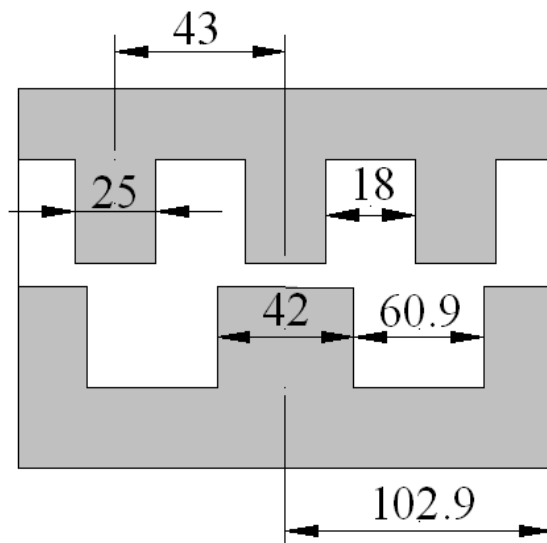
Galvenie parametri, kas ietekmē EDS vērtības un ir atkarīgi no rotora ģeometrijas, ir magnētisko plūsmu $\Phi_{\max} - \Phi_{\min}$ (3.4.att.) starpība un rotācijas frekvence. Magnētisko plūsmu $\Phi_{\max} - \Phi_{\min}$ starpība ir pilnā mērā atkarīga no zobzonas ģeometriskajiem izmēriem. Jo platāks rotora zobs, jo lielāka plūsma iziet caur statora zobu, tomēr vienlaikus palielinās arī plūsma, kas iet caur rotora rievu, tas izraisa magnētisko plūsmu $\Phi_{\max} - \Phi_{\min}$ starpības pazemināšanos. Tāpēc lietderīgi ir meklēt optimālu rotora zoba un rievas attiecību. Otrs noteicošais EDS parametrs ir rotācijas frekvence, kas atkarīga no rotora zobu skaita. Tomēr, palielinoties rotora zobu skaitam, nākas samazināt zoba platumu, un tad samazinās magnētisko plūsmu $\Phi_{\max} - \Phi_{\min}$ starpība.



3.4. att. Magnētisko plūsmu sadalījuma caur statora zobu, kas atrodas pret rotora zobu (maksimālā plūsma Φ_{\max}), un caur statora zobu, kurš atrodas pret rotora rievu (minimālā magnētiskā plūsma Φ_{\min}), attēls.

Pētāmajam induktorģeneratoram 2ГВ.13.2У1 ir 24 zobi rotorā un 10 zobi statorā ar relatīvu rievas platumu $\gamma=1.45$, tādas attiecības gadījumā uz rotora zobi ir daudz platāki par

zobiem uz statora (3.5.att.), no tā plūsmu izkliedes paaugstināšanās, kas izraisa slodzes pazemināšanos un zudumu palielināšanos.



3.5.att. Ģenerators 2ГВ.13.2У1 zobzonas parametri (mm)

Vadoties pēc iepriekš uzskaitītā, induktorgenerators racionāla ģeometrija tiek noteikta, meklējot optimālu rotora un statora zobu skaita attiecību, kā arī rotora rievu relatīvo platumu.

3.3. Aksiālā induktorgenerators zobu zonas optimizācija, pamatojoties uz magnētiskā lauka izpēti

Ar aksiāla induktorgenerators optimizāciju jāsaprot konstruktīvo izmaiņu kopumu, kas vērsts uz elektriskās mašīnas efektivitātes, kas novērtēta pēc iepriekš izvēlētiem kritērijiem, paaugstināšanu [84,85].

Dotajam gadījumam (zemvagona induktorgenerators optimizācija) par galvenajiem kritērijiem, kas sevišķi svarīgi dzelzceļa transportam, pieņemsim īpatnējo jaudu un lietderības koeficientu. Uzskatīsim, ka pārējie kritēriji, pēc ražotāja apstiprinājuma, uz šodien nav iespējami. Tā, piemēram, apskatāmām ģeneratoram masa un apjoms, kā arī tā sasilšana, piemērotība remontam, drošums, trokšņa līmenis pilnīgi pieļaujami un apmierina pasūtītāju.

Šajos gadījumos īpatnējās jaudas un lietderības koeficienta palielināšanai pietiekoši, neizmainot ģeneratora apjomu un masu, palielināt derīgo jaudu, bet enerģijas zudumus saglabāt iepriekšējā līmenī, precīzāk – nepieļaut to palielināšanos. Tad automātiski pieaugs īpatnējā jauda un lietderības koeficients

Šādos apstākļos ģenerators optimālās konstrukcijas meklējumos pietiek optimizēt tā zobu zonu un enkura tinumu. Tam nepieciešams atrast matemātiskās izteiksmes, kas sasaista zobu zonas un enkura tinumu parametrus ar ģenerators jaudu, ņemot vērā zudumu ierobežojumus tēraudā un tinumos, un noteikt tā maksimumu. Tāda matemātiskā izteiksme - mērķfunkcija

$$C_g = \frac{mU_N I_N}{G_g}, \quad (3.2)$$

šeit m – fāžu skaits;

U_N, I_N – ģenerators nominālie spriegumi un strāva;

G_g - ģenerators masa.

Lai nodrošinātu zudumu nemainīgumu, vai ārkārtējā gadījumā – nepārsniegt to līmeni, nepieciešami nepalielināt gaisa spraugu, tērauda un vara apjomu, strāvas blīvumu un magnētisko indukciju, kā arī magnētiskās plūsmas izmaiņas frekvenci statora un rotora tēraudā.

Kā galvenos pieņēmumus pie optimizācijas, pamatojoties uz magnētiskā lauka analīzes, pieņemsim, ka magnētiskā plūsma izmainās pēc sinusoidālā likuma, magnētiskais lauks kvazistacionārs un šeit netiek ņemti vērā:

- kontaktu EDS, EDS Tomsona, Holla, un Tolmena;
- vadāmības strāvas dielektriķī;
- mehānisko spriegumu un temperatūras ietekme uz vides izmēriem;
- savienojošo vadu un izvadus elektromagnētiskais lauks;
- elektriskās mašīnas daļu kustību lineārie ātrumi, tā kā tie ir ļoti mazi salīdzinot ar gaismas ātrumu.

Ja ģenerators strādā nominālā režīmā un atdod maksimālu jaudu uz aktīvo slodzi, tad tā spriegums

$$U_N = \frac{E_0}{\sqrt{2}}, \quad (3.3)$$

bet strāva

$$I_N = \frac{I_k}{\sqrt{2}} = \frac{E_0}{x_s \sqrt{2}}. \quad (3.4)$$

Tad mērķfunkcija izskatās šādi

$$C_g = \frac{mE_0^2}{2x_s G_g}. \quad (3.5)$$

šeit E_0 - tukšgaitas EDS;

I_k – īsslēguma strāva;

X_s – sinhronā pretestība.

Tālāk, par cik tiek pētīts ģenerators ar konstantu masu (G_g), tad parametrs G_g mērķfunkcijas izteiksmē netiek ņemts vērā.

Fāzes tukšgaitas EDS var noteikt ar izteiksmi

$$E_0 = \sqrt{2}\pi w_k f_1 n_k k_{w1} \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{2}, \quad (3.6)$$

kur w_k – vijumu skaits enkura tinuma spolē;

f_1 – strāvas frekvence;

n_k - paralēlā zarā spoļu skaits;

k_{w1} – pirmās harmonikas tinumu koeficients.

Φ_{max} , Φ_{min} – ierosmes maksimālā un minimālā magnētiskā zobu plūsma, kas atbilst statora zoba izvietojumam pret rotora zobu vai pret rotora rievu.

Sinhronajai pretestībai pamatota ir izteiksme

$$x_s = 2\pi f_1 n_k w_k^2 \frac{\lambda_a}{a}, \quad (3.7)$$

kur a - paralēlo zaru skaits enkura tinumos;

$\lambda_a = \frac{\Phi_{max(k)} + \Phi_{min(k)}}{2F_k}$ - vidējā magnētiskā vadītspēja ($\Phi_{max(k)}$, $\Phi_{min(k)}$ - maksimālās un minimālās vērtības magnētiskai plūsmai, kuru nosaka rezultējošais MDS; $F_k = \sqrt{2}w_k I_k$ - īsslēguma MDS) [32].

Strāvas frekvence

$$f_1 = \frac{Z_2 n_N}{60} \quad (3.8)$$

bet spoļu skaits divpakešu ģenerators paralēlajā zarā

$$n_K = \frac{2Z_1}{ma}, \quad (3.9)$$

kur Z_1 – statora zobu skaits;

Z_2 – rotora zobu skaits;

n_N – nominālā rotācijas frekvence.

Galīgajā variantā iegūsim

$$C_g = \frac{\pi}{120} k_{w1}^2 n_N Z_1 Z_2 \frac{(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})^2}{\frac{(\Phi_{\max(k)} + \Phi_{\min(k)})}{F_k}} \quad (3.10)$$

Tiek pieņemts, ka, izvēloties zobzonas ģeometriju, ierosmes magnētiskās plūsmas harmonikas ir reducētas līdz neievērojami mazam lielumam.

Sniegtās izteiksmes analīze vēsta par to, ka it kā, pieaugot statora un rotora zobu skaitam, induktorģeneratora īpatnējā jauda palielinās. Tomēr, palielinoties Z_1 un Z_2 , samazinās magnētisko plūsmu ($\Phi_{\max} - \Phi_{\min}$) starpība, turklāt kvadrātiski. Tāpēc nevajadzētu gaidīt bezgalīgu pieaugumu, t.i., pastāv kāds vērtību Z_1 un Z_2 optimums, kura gadījumā mērķfunkcija sasniedz maksimumu. Tāpēc, lai noteiktu induktorģeneratora optimālo ģeometriju gan statora un rotora zobu izmēra, gan arī formas ziņā, ir sīkāk jāizanalizē magnētiskais lauks elektriskās mašīnas gaisa spraugā un jānosaka apstākļi, kuru gadījumā mērķfunkcija, t.i., elektriskās mašīnas īpatnējā jauda, sasniedz maksimumu [86-87].

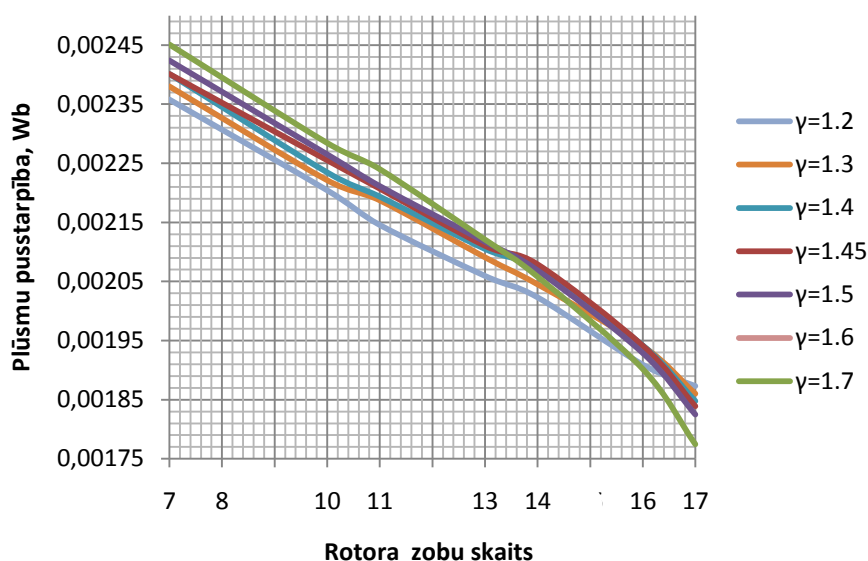
3.4. Aksiālā induktorģeneratora magnētiskā lauka skaitliskās modelēšanas rezultāti

Pamatojoties uz iepriekš sniegto aprēķina metodiku (2.nodaļa), tika veikta magnētiskā lauka modelēšana virknei rotora zobu skaita attiecību un pie zobu dažādiem relatīviem platumiem. Skaitliskie eksperimenti tika veikti $Z_2=7; 8; 10; 11; 13; 14; 16; 17$ ar rotora rievu relatīvo platumu $\gamma=1.2; 1.3; 1.4; 1.45; 1.5; 1.6; 1.7$ ar konstantu statora zobu skaitu $Z_1=24$. 3.3. tabulā sniegtas rotora zoba un rievu platumu vērtības pie dažāda rotora zobu skaita (Z_2) un relatīva rievu platumu (γ). Darbā netika izskatīti varianti ar statora un rotora zobu skaita attiecību $24/9, 24/12$ un $24/15$. Mašīnās ar zobu skaitu rotorā vienādu 9, 12 vai 15 nobīdes leņķi starp blakus esošo spoļu EDS ir vienāds ar $\alpha_Z=135^0, 180^0, 225^0$. Tādu leņķu gadījumā nav iespējams iegūt trīsfāžu tinumu uz statora.

Rotora zoba un rievās platums

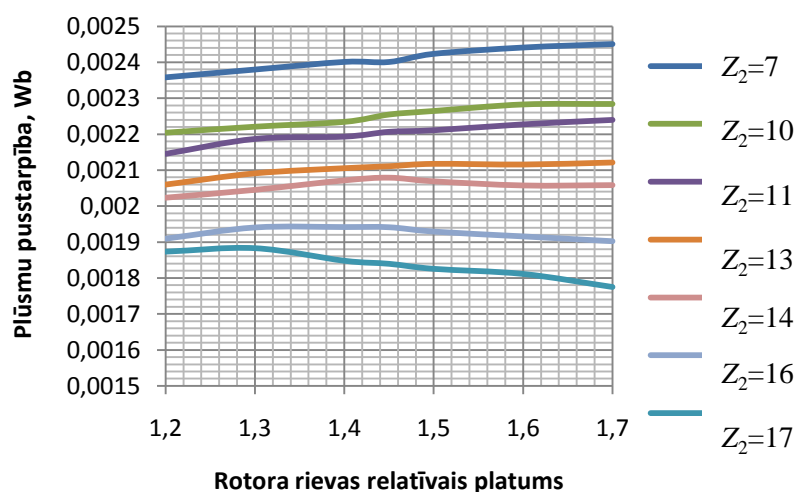
		$Z_2=7$	$Z_2=10$	$Z_2=11$	$Z_2=13$	$Z_2=14$	$Z_2=16$	$Z_2=17$
$\gamma=1.2$	$b_{z2}, \text{ mm}$	66.735	46.715	42.468	35.934	33.368	29.197	27.479
	$b_{r2}, \text{ mm}$	80.082	56.058	50.961	43.121	40.041	35.036	32.975
$\gamma=1.3$	$b_{z2}, \text{ mm}$	63.834	44.684	40.621	34.372	31.917	27.927	26.284
	$b_{r2}, \text{ mm}$	82.984	58.089	52.808	44.684	41.492	36.305	34.170
$\gamma=1.4$	$b_{z2}, \text{ mm}$	61.174	42.822	32.929	32.940	30.587	26.764	25.189
	$b_{r2}, \text{ mm}$	85.644	59.950	54.500	46.116	42.822	37.469	35.265
$\gamma=1.45$	$b_{z2}, \text{ mm}$	59.925	41.948	38.134	32.268	29.963	26.217	24.675
	$b_{r2}, \text{ mm}$	86.892	60.824	55.295	46.788	43.446	38.015	35.779
$\gamma=1.5$	$b_{z2}, \text{ mm}$	58.727	41.109	37.372	31.622	29.363	25.693	24.182
	$b_{r2}, \text{ mm}$	88.090	61.663	56.058	47.433	44.045	38.540	36.273
$\gamma=1.6$	$b_{z2}, \text{ mm}$	56.468	39.528	35.934	30.406	28.234	24.705	23.252
	$b_{r2}, \text{ mm}$	90.349	63.244	57.495	48.650	45.175	39.528	37.203
$\gamma=1.7$	$b_{z2}, \text{ mm}$	54.377	38.064	34.603	29.280	27.188	23.790	22.390
	$b_{r2}, \text{ mm}$	92.441	64.708	58.826	49.776	46.220	40.443	38.064

3.3. tabulā sniegtajai virknei attiecību tika iegūtas maksimālās magnētiskās plūsmas vērtības zobā, kad statora zobs izvietots pret rotora zobu un minimālo magnētisko plūsmu, kad statora zobs izvietots pret rotora rievu. 3.6. att. parādītas atkarības $\frac{\Phi_{max}-\Phi_{min}}{2}$ rotora zobu skaita (Z_2) ar dažādu rievās platuma attiecību pret rotora zoba platumu (γ), bet 3.7.att. plūsmu pusstarpības vērtību atkarības līknes no rievās platuma attiecības pret rotora zoba (γ) dažāda rotora zobu skaita gadījumā (Z_2).



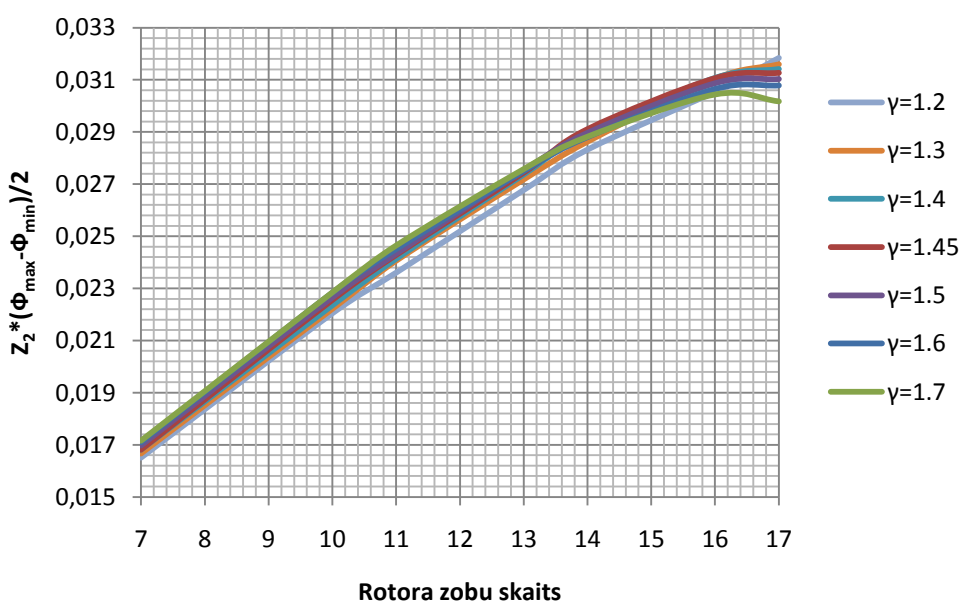
3.6.att. Magnētiskās plūsmu pusstarpības vērtību atkarības no rotora zobu skaita (Z_2) ar dažādu rievas platuma pret rotora zoba platumu (γ) izteiksmju līknes

3.6., 3.7. att. parādītajās atkarībās redzams, ka, palielinoties rotora zobu skaitam, magnētiskās plūsmu pusstarpības lielums krītas. Mazāku rotora zobu skaita gadījumā ir jāizvēlas lielāka rievas platuma attiecības pret rotora zoba platumu (γ) un otrādi. Tomēr jāatzīmē, ka, sākot ar 11 rotora zobiem, notiek līkņu ar dažādām γ vērtībām krustošanās, kas apstiprina nepieciešamību meklēt γ vērtības katram rotora zobu skaitam atsevišķi.



3.7.att. Plūsmu pusstarpības ($\frac{\Phi_{max}-\Phi_{min}}{2}$) atkarības no rievas platuma attiecības pret rotora zoba platumu (γ) ar dažādu rotora zobu skaitu (Z_2) līknes

3.8.att. parādīti magnētiskā lauka izpētes rezultāti kā $\frac{\Phi_{max}-\Phi_{min}}{2} \cdot Z_2$ no zobu skaita pie dažāda rotora rievas relatīvā platuma. Kā izriet no sniegtajiem datiem, spoles maksimālo EDS var iegūt ar $Z_2 = 16$ un $\gamma=1.4$. Tomēr jāatzīmē, ka ar 16 zobiem uz rotora iegūta gadījumā, kad zobzonas ģeometrijai ir attiecība $Z_1/Z_2 = 24/16 = 3/2$, t.i., uz divām rotora zobu iedaļām ir trīs statora zobu iedaļas. Tas atbilst trīsfāžu tinumiem ar zobu skaitu uz polu un fāzi $q=0.25$. Soļa saīsinājuma trūkuma dēļ tādiem tinumiem raksturīgs ir liels augstāko harmoniku spektrs fāzes sprieguma līknē. Bez tam ģeneratoriem raksturīgas ir augstas gareniskās magnētiskās plūsmas pulsācijas, palielināti zudumi magnētīvadā tā rezultātā lieli momenti uz mašīnas vārpstu. Zobu skaits uz polu un fāzi vienāds ar $q=0.5$ tiek iegūts zobzonas ģeometrijas gadījumā, kas vienāda ar $Z_1=24$ un $Z_2=8$, kas ir klasisks zoba enkura tinums, jo uz trīs enkura zobiem ir viens induktora zobs. Induktora ģeneratoriem ar klasisku enkura tinumu ir zemi īpatnējās masas un gabarītu rādītāji un izkropļota fāzes sprieguma līknes forma [43].

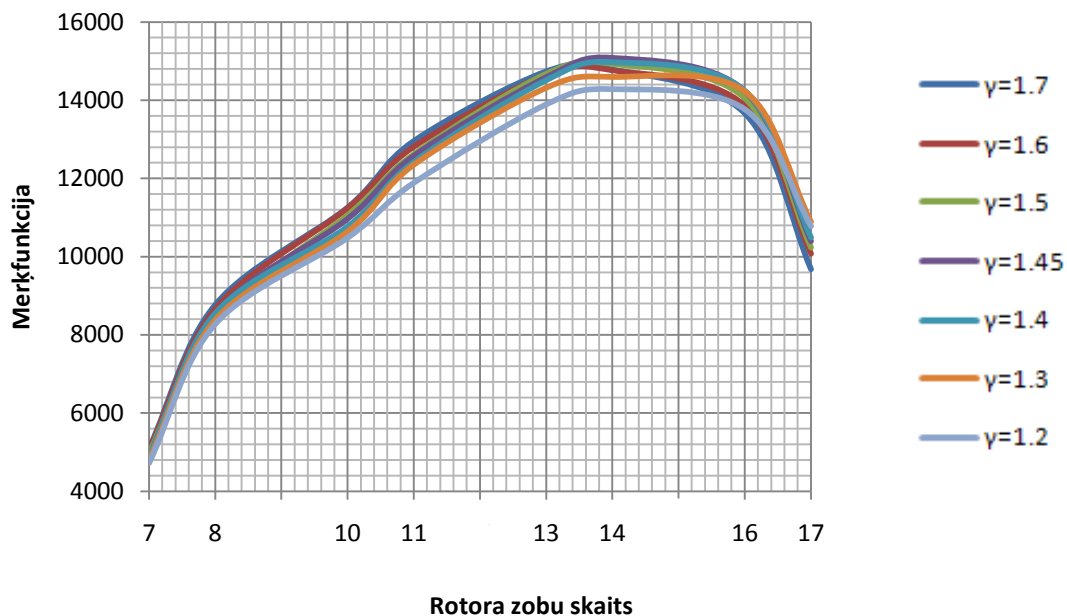


3.8.att. $\frac{\Phi_{max}-\Phi_{min}}{2} \cdot Z_2$ vērtības ar rotora zobu skaita un relatīvu rievu platumu

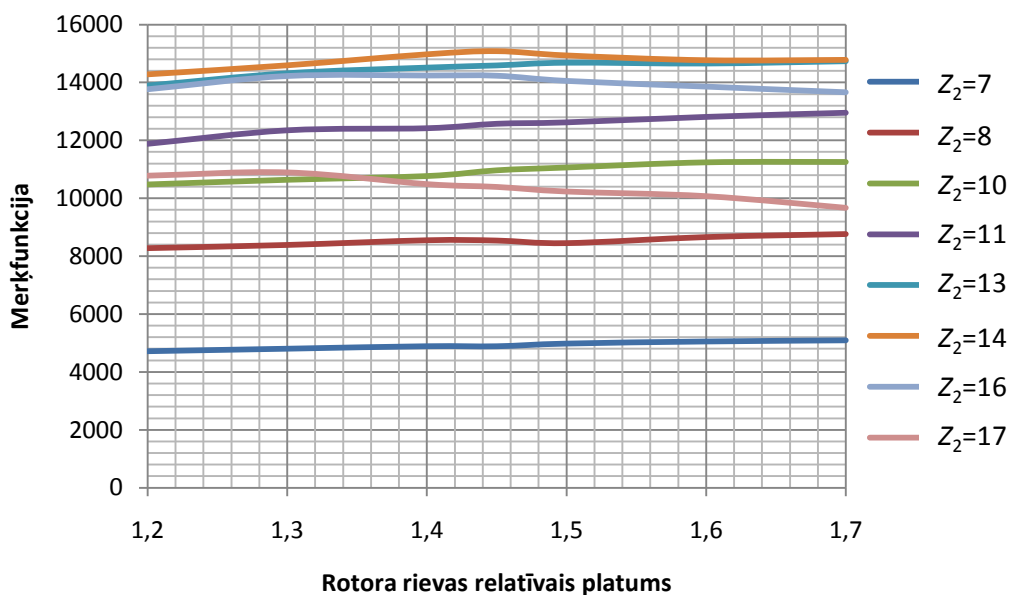
$$\gamma=1.2; 1.3; 1.4; 1.45; 1.5; 1.6; 1.7$$

Jāatzīmē, ka iegūtie aksiālās induktormašīnas tukšgaitas režīma analīzes rezultāti nav pietiekami, jo, meklējot optimālu zobzonas ģeometriju, ir jāņem vērā arī dati, kas iegūti, mašīnai strādājot ar slodzi. Šai nolūkā tiek izmantota mērķfunkcija, kas parādīta 3.3. apakšnodaļās. 3.9.att. dotas mērķfunkcijas atkarības no rotora zobu skaita ar dažādu γ

attiecību. 3.10.att. parādītas mērķfunkcijas atkarības no rievas relatīvā platuma dažāda rotora zobu skaita gadījumā.



3.9. att. Mērķfunkcijas atkarība no rotora zobu skaita ar relatīvo rievas platumu $\gamma=1.2;1.3;1.4;1.45;1.5;1.6;1.7$



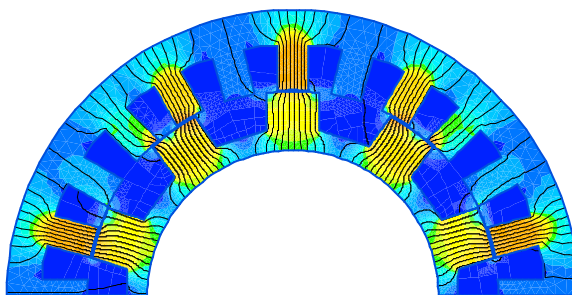
3.10.att. Mērķfunkcijas vērtību atkarības līknes no rievu platuma attiecības pret rotora zoba platumu (γ) ar dažādu rotora zobu skaitu (Z_2)

Kā redzams parādītajās līknēs 3.9.att., palielinot rotora zobu skaitu, mērķfunkcijas vērtības aug līdz noteiktai robežai ($Z_2=14$), taču tālāka rotora zobu skaita palielināšana noved pie mērķfunkcijas lieluma samazinājuma. Jāatzīmē, ka katrai rotora skaita vērtībai jāpiemeklē optimāla rievas platuma attiecība pret rotora zoba platumu (γ), piemēram, ar 10 zobiem uz rotora mērķfunkcijas maksimums ir sasniegts ar $\gamma=1.7$, bet ar 14 zobiem pie 1.45.

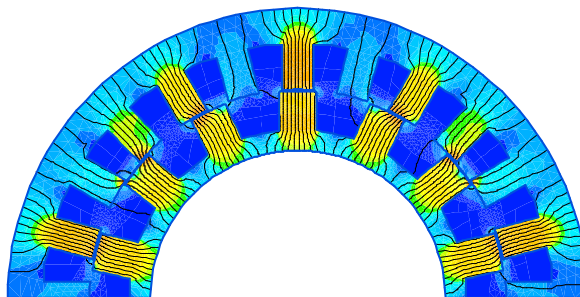
3.8.att. parādītajās līknēs redzams, ka ar 10 zobiem rotorā maksimālā vērtība $\frac{\Phi_{max}-\Phi_{min}}{2} \cdot Z_2$ iegūta ar $\gamma=1.7$, kas ir par 1.3% vairāk nekā ar $\gamma=1.45$. Šis palielinājums nav nozīmīgs un to var noteikt aprēķinu kļūda. Ar 14 zobiem rotorā maksimums $\frac{\Phi_{max}-\Phi_{min}}{2} \cdot Z_2$ sasniegts ar $\gamma=1.45$, kas ir par 29% vairāk nekā zobzonas ģeometrijas $Z_2=10$ un $\gamma=1.45$ gadījumā. No mērķfunkcijas aprēķina rezultātiem iegūstam (3.9, 3.10.att.), ka, mainot zobzonas ģeometriju no $Z_2=10$ un $\gamma=1.45$ uz $Z_2=14$ un $\gamma=1.45$, ģenerators īpatnējā jauda palielinās par 37%.

3.11.att. parādītas magnētiskās indukcijas sadalījuma ainas ģeneratoru šķērsgriezumā ar 10 un 14 zobiem uz rotora. Kā redzams attēlā, zobu skaita uz rotora izmaiņšana ļauj saglabāt magnētiskās plūsmas lielumu statora zobā tajā pašā līmenī un tostarp, palielinot polu skaitu uz rotora, iegūt lielāku EDS lielumu.

a)



b)



3.11. Magnētiskās indukcijas sadalījuma aina:

a) ģeneratoram ar $Z_1=24$ un $Z_2=10$; b) ģeneratoram ar $Z_1=24$ un $Z_2=14$



3.5. Rekomendācijas racionālai induktormašīnas zobzonas ģeometrijas izvēlei

Darbā [2] tiek sniegtas rekomendācijas optimālas zobzonas ģeometrijas izvēlē induktormašīnām ar slēgtām rievām. Šīm mašīnām var pielietot „gludos”, bezrievu enkurus. Zobzona tiek noteikta ar trim relatīviem parametriem. Šīm mašīnām optimāli parametri ir:

- rievās platuma attiecība pret rotora zoba platumu

$$\gamma = \frac{b_{r2}}{b_{z2}} = 1.5, \quad (3.11)$$

- rotora pola iedaļas relatīvais lielums

$$\tau_0 = \frac{\tau}{\delta} \geq 20 \quad (3.12)$$

- rotora zoba relatīvais augstums

$$h_0 = \frac{h_{z2}}{\delta} \geq 40 \quad (3.13)$$

Vispārējā gadījumā mašīnām ar zobu tinumiem statora gluduma pieņēmums nav piemērojams, jo vairumā gadījumu enkura tinuma zobspoles atrodas uz zobiem ar vaļējām vai pusvaļējām rievām. Tādās mašīnās zobzonu noteicošo parametru skaits sasniedz 12. Pamatojoties uz šajā darbā veiktajiem pētījumiem, iegūtas rekomendācijas racionālu zobzonas parametru izvēlē, vadoties no pilnīgākas magnētiskās plūsmas izmantošanas apsvērumiem.

Tādējādi iegūtas šādas rekomendācijas racionālas zobzonas ģeometrijas izvēlē:

- statora zobu skaits dalās bez atlikuma ar dubultotu fāžu skaitu

$$Z_1 = 2k_1m \quad (3.14)$$

kur k_1 - vesels skaitlis;

- rotora zobu skaits tiek noteikts ar izteiksmi

$$Z_2 = \frac{Z_1}{2} + k, \quad (3.15)$$

- rotora zobu skaits nedalās bez atlikuma ar fāžu skaitu

$$Z_2 \neq k_2m; \quad (3.16)$$

где k_2 - vesels skaitlis;

- rotora zobu platuma attiecība pret statora zobu platuma

$$\gamma_{1-2} = \frac{b_{z2}}{b_{z1}} = 1.02 \div 1.05; \quad (3.17)$$

- rotora rievas platuma attiecība pret rotora zoba platumu

$$\gamma = \frac{b_{r2}}{b_{z2}} = 1.4 \div 1.7 \quad (3.18)$$

- statora (rotora) zobu platuma attiecība pret gaisa spraugu

$$\frac{b_{z1}}{\delta} \geq 20; \frac{b_{z2}}{\delta} \geq 20; \quad (3.19)$$

- rotora zobu augstumam jābūt ne mazākām par zoba platumu

$$h_{z2} \geq b_{r2}. \quad (3.20)$$

3.6. Secinājumi

3.6.1. Divpakešu induktorgeneratora ar aksiālu ierosmi optimālas zobzonas ģeometrijas noteikšanai tika pamatota mērķfunkcija

$$C_g = \frac{\pi}{120} k_{w1}^2 n_N Z_1 Z_2 \frac{(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})^2}{\frac{(\Phi_{\max(k)} + \Phi_{\min(k)})}{F_k}}$$

veidā, kas ļauj atrast mašīnas parametrus, kuri nodrošina augstu tās efektivitāti.

3.6.2. Veicot virkni skaitliskus eksperimentus, mainot rotora zobu skaitu un to platuma attiecības pret rievas platumu, tika konstatēts, ka mērķfunkcijas maksimums ir pie $Z_2=14$ un $\gamma=1.45$.

3.6.3. Balstoties uz magnētiskā lauka aprēķina rezultātiem un mērķfunkcijas analīzi, sniegtas rekomendācijas aksiālās induktormašīnas racionālas zobzonas ģeometrijas pamatošanā, kas reducējas šādi:

- statora un rotora zobu skaitam jāatbilst attiecībai

$$Z_1 = 2k_1 m; \quad Z_2 = \frac{Z_1}{2} + k_2 \neq km,$$

kur k_1 un k_2 – veseli skaitļi; k – mazs vesels skaitlis; m – fāžu skaits;

- statora zoba b_{z1} (rotora b_{z2}) platuma attiecībai pret gaisa spraugu δ jābūt ne mazākai par 20, t.i.,

$$\frac{b_{z1}}{\delta} \geq 20; \frac{b_{z2}}{\delta} \geq 20;$$

- optimāla rotora rievās platuma attiecība pret rotora zoba platumu ir

$$\gamma = \frac{b_{r2}}{b_{z2}} = 1.4 \div 1.7;$$

- rotora zoba platuma attiecībai pret statora zoba platumu jāatrodas robežās

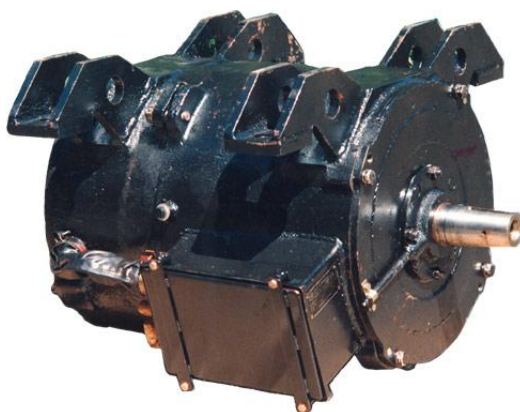
$$\gamma_{1-2} = \frac{b_{z2}}{b_{z1}} = 1.02 \div 1.1.$$

4. AKSIĀLĀS INDUKTORMAŠĪNAS EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI UN TĀS TĀLĀKĀS PILNVEIDOŠANAS IESPĒJAS

4.1. Eksperimentālo pētījumu mērķis un uzdevumi

Šī eksperimentālā pētījuma mērķis bija piedāvātā matemātiskā modeļa izmantošanas pamatotības apstiprināšana aksiālās inductormāšīnas konstrukcijas optimizācijai un pārbaudīt konkrēto piedāvājumu efektivitāti tās tehniski-ekonomisko rādītāju uzlabošanai. Šajos pētījumos kā modelis tika izmantots zemvagona inductorgenerators 2ГВ.13У1 (4.1.att.), kuru lieto dzelzceļa transportā. Šai sakarā pētījumu programma paredzēja šādu pamatuzdevumu uzstādīšanu un risināšanu:

- inductormāšīnu konstruktīvo un ekspluatācijas dzelzceļa transportā īpatnību izpēte;
- zemvagona inductorgenerators optimālas zobzonas ģeometrijas pamatošana;
- ģenerators eksperimentālā parauga pārbaude;
- sērijveidā izlaižamā zemvagona ģenerators pārbaude uz rūpnīcas stenda;
- pārbaudes rezultātu salīdzinoša analīze;
- priekšlikumu izstrāde zemvagona inductorgenerators 2ГВ.13У1 konstrukcijas pilnveidošanā, kas balstīti uz matemātiskās modelēšanas un veikto pārbažu rezultātiem.

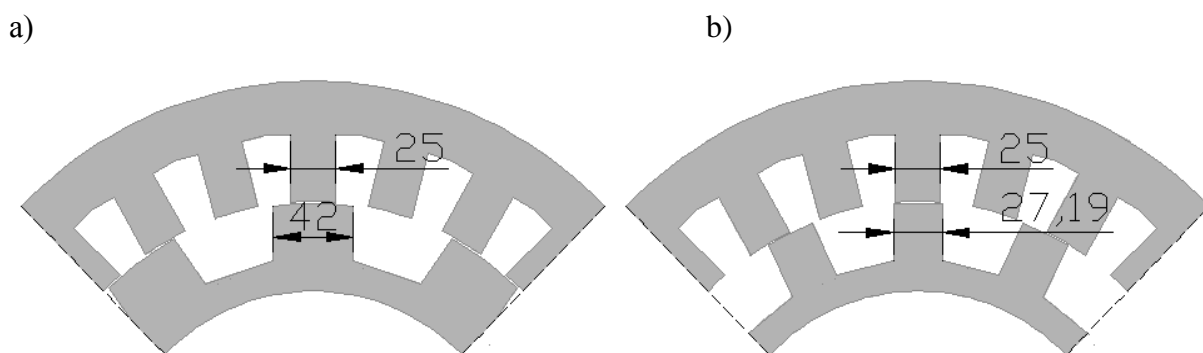


4.1.att. Zemvagona ģenerators 2ГВ.13У1

4.2. Eksperimentālās pārbaudes veikšanas ģenerators eksperimentālā modeļa apraksts

Pateicoties Rīgas Tehniskās universitātes Elektrisko mašīnu un aparātu katedras finansējumam, bija iespējams izgatavot un Rīgas Elektromašīnbūves rūpnīcā (RER) pārbaudīt ģeneratorus ar dažādiem rotoriem (ar 10 un 14 zobiem). Kā izriet no iepriekš iegūtajiem

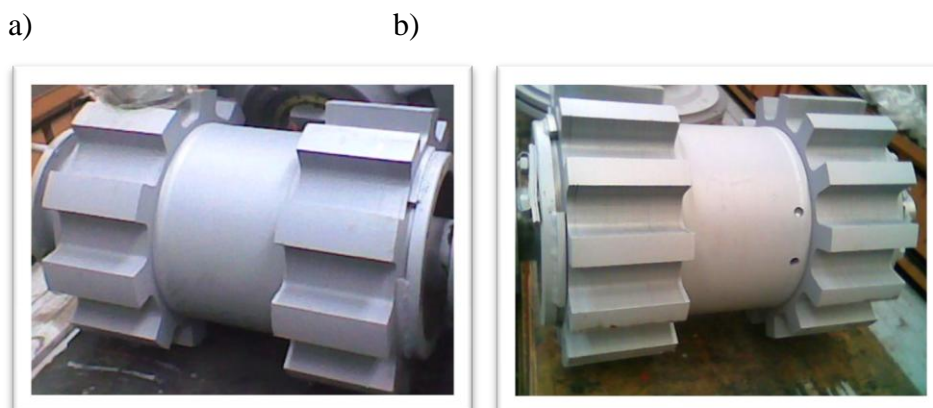
datiem (sk.3.nodaļu), ģenerators ar zobu skaitu uz statora $Z_1=24$ ar $Z_2=14$ ir optimāla konstrukcija, tāds rotors ar zobu skaitu $Z_2=14$ deva iespēju izmantot pārbaudēm sērijveida ģenerators 2ГВ13.2У1 statoru, nemainot enkura tinuma shēmu un citas būtiskas galīgās apstrādes. Tas ļāva ievērojami samazināt darbā iegūto rezultātu eksperimentālās pārbaudes izmaksas. 4.2.,a att. parādītas sērijveida ģenerators ($Z_2=10$) statora un rotora lokšņu sektoru skices un norādīti statora un rotora zobu izmēri, bet 4.2.,b att. parādītas eksperimentālā ģenerators ($Z_2=14$) statora un rotora lokšņu sektoru skices un norādīti ģenerators statora un rotora zobu izmēri [88-89].



4.2.att. Rotora un statora lokšņu sektori:

a – sērijveida ģenerators ar zobu skaitu $Z_2=10$; b – eksperimentālā ģenerators ar rotora zobu skaitu $Z_2=14$

4.3.a att. parādīts sērijveida ģenerators ar zobu skaitu $Z_2=10$ kopskats, bet 4.3.b att. – ģenerators rotors, kur $Z_2=14$. Tādas rotora izmaiņas deva iespēju veikt salīdzinošas pārbaudes, izmantojot tikai vienu kopīgu statoru, t.i., sērijveida ģenerators statoru bez enkura tinuma izmaiņām ar pāreju uz eksperimentālo konstrukciju.

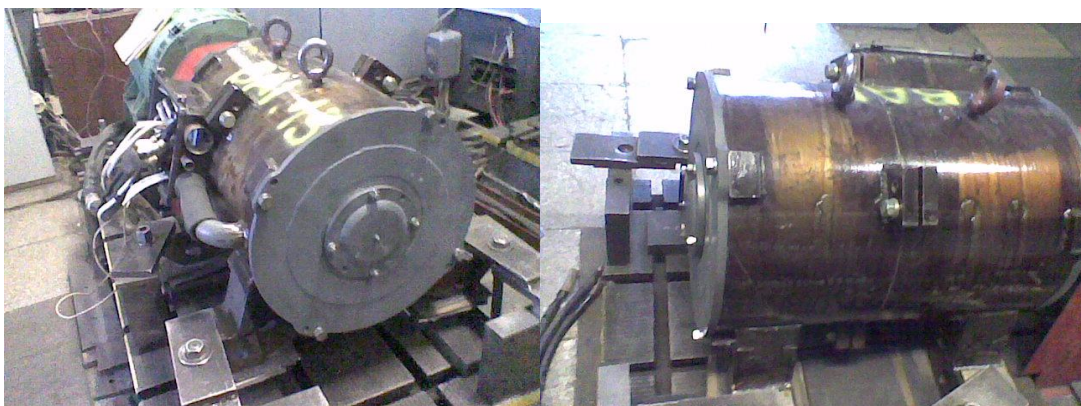


4.3.att. Salikti ģenerators rotori: a – sērijveida ar zobu skaitu $Z_2=10$; b – eksperimentālā ar $Z_2=14$

Izvēloties un pamatojot eksperimentālā ģeneratora konstrukciju, tika ņemts vērā, ka zemvagona ģenerators tiek ekspluatēts smagos apstākļos: lielas mehāniskas un elektriskas pārslodzes, krasas temperatūras un mitruma izmaiņas, agresīvas vides iedarbība. Tāpēc, optimizējot konstrukciju, tika izslēgta iespēja izmantot elektriskos kontaktus un pastāvīgos magnētus.

4.3. Sērijveida un ģeneratora eksperimentālā parauga eksperimentālo pētījumu rezultāti

Ģeneratoru ar dažādiem rotoriem eksperimentālie pētījumi tika veikti rūpnīcas RER pārbaudes kompleksā (4.4.att.). 8. pielikumā sniegti sīki pārbaudes rezultātu apraksti.



4.4.att. Pārbaudes stands eksperimentālai ģeneratora izpētei

Pārbaudes programmas ietvēra:

- enkura tinumu pretestību mērīšana pie līdzstrāvas;
- tukšgaitas raksturlielumu noteikšana;
- īsslēguma raksturlielumu noteikšana;
- ģeneratoru regulēšanas iespēju noteikšana;
- sasilšanas un pārkaršanas novērtējums;
- sprieguma līkņu formu noteikšana tukšgaitas un slodzes režīmā.

Iepriekš tika veikta enkura tinumu ar līdzstrāvu pretestību mērīšana. Tā tika īstenota 20⁰C temperatūrā, mērījumu rezultāti sniegti 4.1.tab. Šeit „PM” – pēc rūpnīcas metodikas dotie parametri pie temperatūras 20⁰C.

Ģeneratora tinumu pretestības

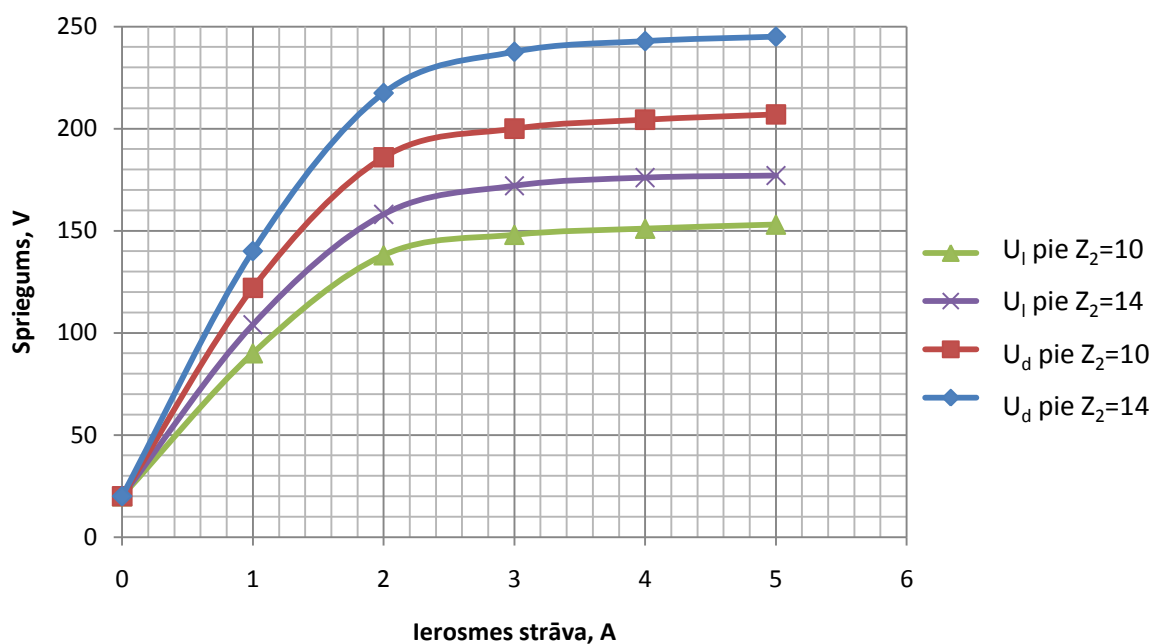
Mērīšanas objekti	Pretestība, Ω	
	Izmērītā	Pēc PM
U-V	0.0165	0.017±0.001
V-W	0.0167	0.017±0,001
W-U	0.0166	0.017±0,001
F1-F2	19.68	18.5±1

No tabulā sniegtajiem datiem izriet, ka enkura tinumu pretestība nepārsniedz noteikto normu, bet pretestību novirzes pēc fāzēm ir mazākas par vienu procentu. Bet ierosmes tinuma pretestība nedaudz pārsniedz normu, tikai par 0.18 Ω , un ir 19.68 Ω ar pieļaujamo robežu 17.5÷19.5 Ω . Jāatzīmē, ka tinumu pretestību mērīšana ļauj noskaidrot kļūdas vijumu skaitā un tinumu shēmā, pārbaudīt savienojumu lodējumu kvalitāti, pretestību nesimetriskumu pēc fāzēm.

Eksperimentālo pētījumu otrajā etapā tika noteikti tukšgaitas raksturlielumi. Tukšgaitas raksturlielumu salīdzinājums veikts pie rotācijas frekvences $n=950 \text{ min}^{-1}$, pētījumu rezultāti sniegti 4.2.tab. Paši raksturlielumi parādīti 4.5.att.

Dati, kas iegūti, uzņemot tukšgaitas raksturlīknes

Ģenerators	I_f, A	U_t, V	U_d, V
14 zobu rotors	5	177	245
10 zobu rotors		153	207
14 zobu rotors	4	176	242,8
10 zobu rotors		151	204,4
14 zobu rotors	3	172	237,6
10 zobu rotors		148	200
14 zobu rotors	2	158	217,4
10 zobu rotors		138	186
14 zobu rotors	1	104	140
10 zobu rotors		90	122



4.5.att. Tukšgaitas raksturlīknes, kas iegūtas pie $n=950 \text{ min}^{-1}$:

U_i - līnijas spriegums; U_d - taisngrieztais spriegums

4.5.att. parādīti tukšgaitas raksturlīknes abiem rotoriem, turklāt raksturlīkne $Z_2=14$ ir augstāk par raksturlīkni $Z_2=10$, ko var izskaidrot ar racionālāku zobzonas ģeometriju. Nominālas ierosmes strāvas $I_f=3 \text{ A}$ gadījumā rezultātu starpība bija 14%.

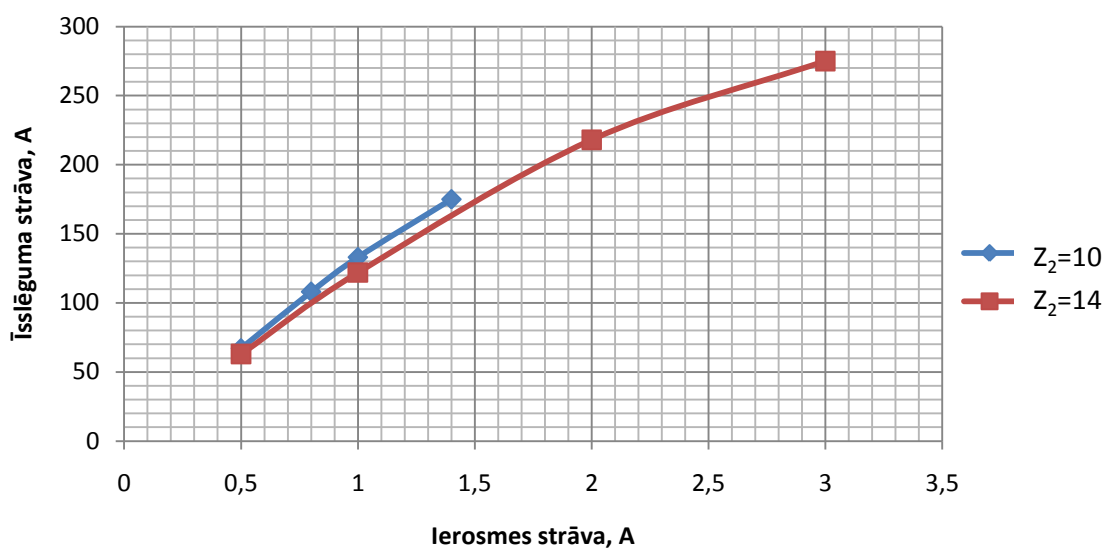
Tomēr jāatzīmē, ka tukšgaitas raksturlīkne iegūta gadījumā, kad uz rotora ir 10 zobi pie lietas statnes un pie enkura spoles tinumu skaita vienādu ar 14, bet tukšgaitas raksturlīkne, kad uz rotora ir 14 zobi pie statnes, no divām caurulēm savienota un pie enkura spoles tinumu skaita vienādu ar 13(sk. Pielikums 9).

Īsslēguma raksturlielumu dati sērijveida un eksperimentālajam ģeneratoram ($Z_2=10$ un $Z_2=14$) doti 4.3.tab. Īsslēguma raksturlielumi pie $n=950 \text{ min}^{-1}$ parādīti 4.6.att.

4.3.tabula

Īsslēguma eksperimenta rezultātu salīdzinošie dati

Ģenerators ar $Z_2=10$		Ģenerators ar $Z_2=14$	
$I_{k2}, \text{ A}$	$I_f, \text{ A}$	$I_{k2}, \text{ A}$	$I_f, \text{ A}$
67	0.5	275	3
108	0.8	218	2
133	1	122	1
175	1.4	63	0.5



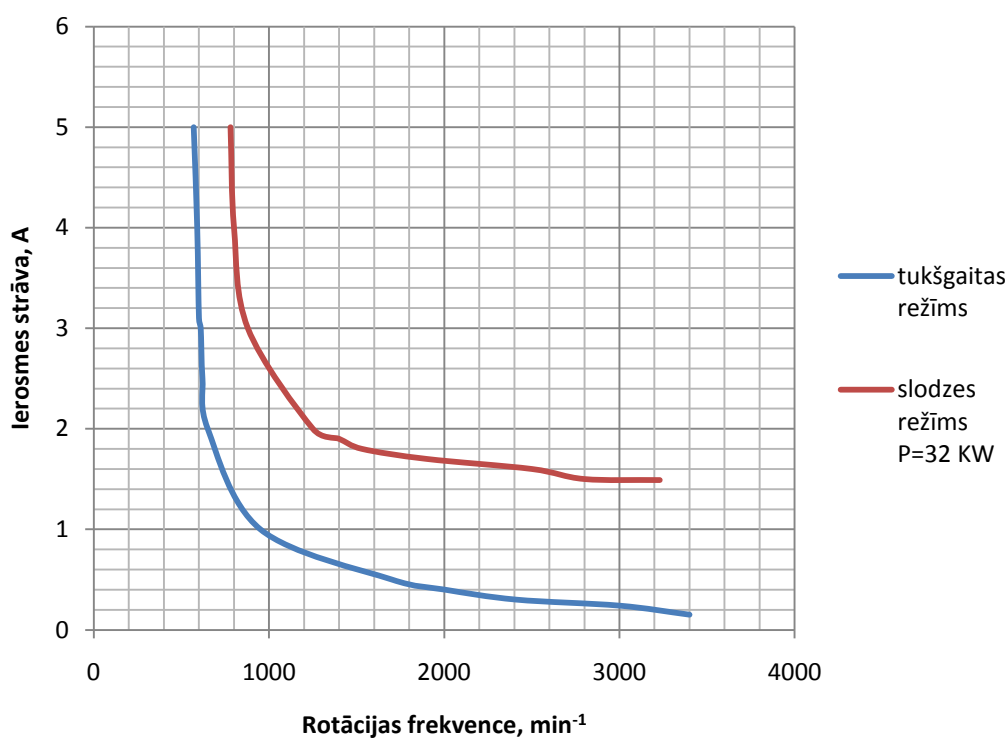
4.6. att. Īsslēguma raksturlīknes ģeneratoram ar rotoru ar $Z_2=10$ un ģeneratoram ar rotoru, kad $Z_2=14$

Dati par regulēšanas iespējām eksperimentālajam un sērijveida ģeneratoram parādīti 4.4.tab. Bet raksturlīknes parādītas 4.7.att.

4.4.tabula

Dati par eksperimentālā un sērijveida ģeneratora sprieguma regulēšanas iespējām

Ģenerators	Režīms	I_f , A	n , min ⁻¹	Slodzes parametri	
				U_d , V	I_s , A
14 zobu rotors	Tukšgaitas	0,24	3000	142	0
10 zobu rotors		0,35	3000	142	0
14 zobu rotors	$P=32\text{kW}$	3,0	879	142	226
10 zobu rotors		3,0	952	142	226
Pēc PM	Tukšgaitas	0,2	3000 ± 10	$142\pm 0,5$	0
	$P=32\text{ kW}$	$3\pm 0,1$	950 ± 50	$142\pm 0,5$	$226\pm 0,5$



4.7.att. Eksperimentālā ģenerators raksturlīknes, kad $Z_2=14$ $P_N=0$ kW un $P_N=32$ kW

Saskaņā ar 4.4.tabulā sniegtajiem datiem redzams, ka ģenerators ar 14 zobu rotoru sasniedz jaudu 32 kW, kad rotācijas ātrums ir par 73 min^{-1} zemāks, nekā ģenerators ar 10 zobu rotoru.

Rezultāti par ģeneratoru sakaršanu pie $n=2000 \text{ min}^{-1}$ doti 4.5.tabulā.

4.5.tabula

Ģeneratoru tinumu sasilšanu mērīšanas rezultāti

Ģenerators	U_d, V	I_s, A	P_s, kW	Temp.pārsniegšana, °C		Sasilšana, °C			
				Ierosmes tinums	Enkura tinums	Piedziņas puse		Pretējā puse	
						Korp.	Gultņi	Korp.	Gultņi
14 zobu rotors	142	226.0	32.09	78	123	87	54	86	61
10 zobu rotors	142	228.4	32.43	36	64	50	42	55	62
Pieļaujamas pēc PM	142	226	32	50	75	-	45	-	75

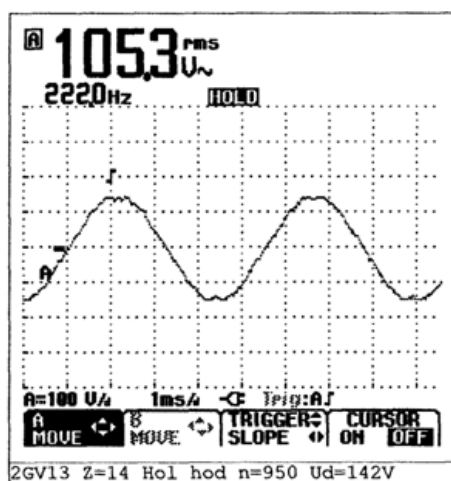
Eksperimentālā ģenerators korpusa sakaršana, salīdzinot ar sērijveida, palielinājās par $31-37 \text{ }^\circ\text{C}$. Statora tinumu sakaršana pieauga par $59 \text{ }^\circ\text{C}$, ierosmes tinuma – par $42 \text{ }^\circ\text{C}$ un pārsniedza pieļaujamo pēc PM. Turklāt jāpievērš uzmanība tam faktam, ka, izgatavojot

eksperimentālo paraugu, tika izmantotas 1 mm biezas 2211 markas elektrotehniskā tērauda loksnes, bet, izgatavojot sērijveida paraugu, tika izmantots tās pašas markas tērauds, bet 0.5 mm biezs. Balstoties uz darbā veikto pētījumu rezultātiem [90], lai samazinātu zudumus ģenerators magnētavadā, jāveic virkne pasākumu:

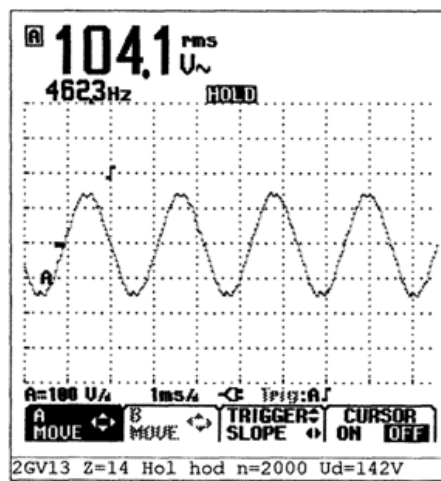
- izmantot tēraudu ar samazinātiem zudumiem, t.i., ar loksnes biežumu 0.5 mm;
- uzlabot ģenerators izgatavošanas tehnoloģiju, konkrētāk, izgatavot rotoru ar lokšņu štancēšanas metodi, nevis frēzējot rievās cilindriskajā sagatavē.

Lineāro spriegumu oscilogrammas parādītas 4.8.att..

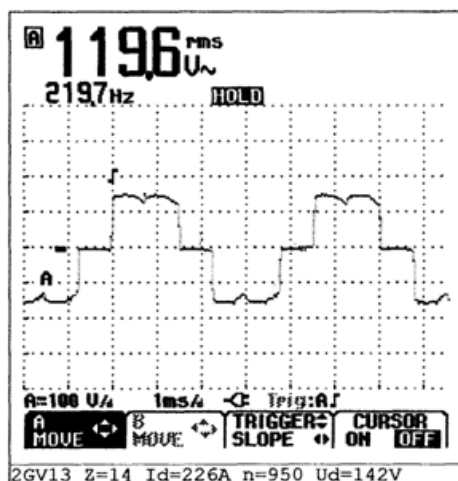
a)



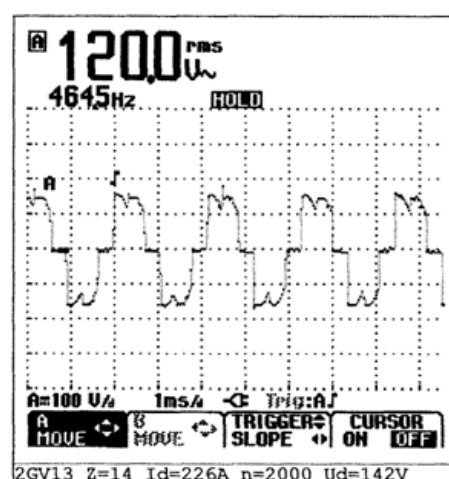
b)



c)



d)

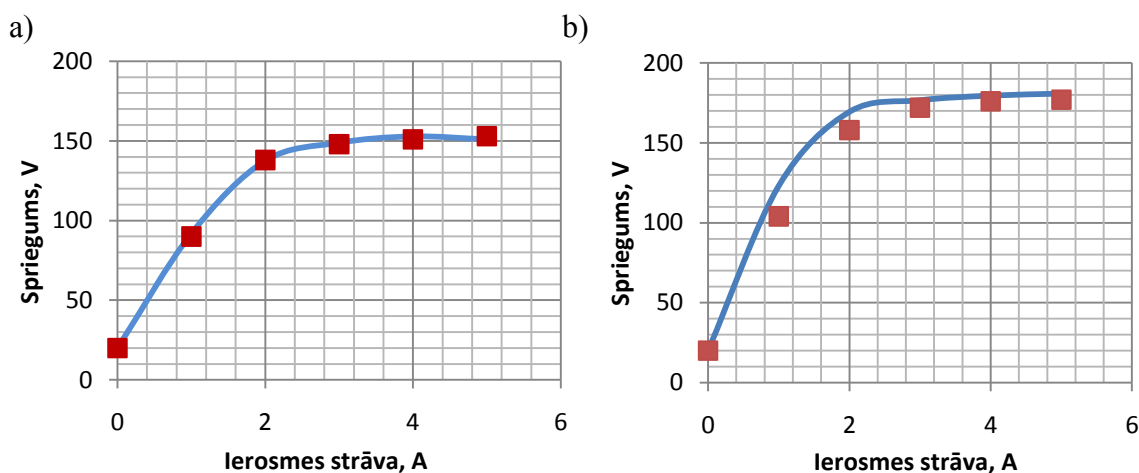


4.8.att. Līnijas spriegumu oscilogrammas: a) tukšgaitas režīmā pie rotācijas frekvences $n=950 \text{ min}^{-1}$; b) tukšgaitas režīmā pie rotācijas frekvences $n=2000 \text{ min}^{-1}$; c) slodzes režīmā pie rotācijas frekvences $n=950 \text{ min}^{-1}$; d) slodzes režīmā pie rotācijas frekvences $n=2000 \text{ min}^{-1}$

Induktorģeneratorā sprieguma līknes forma atkarīga no slodzes lieluma. 4.8. a, b att. parādītas enkura tinuma sprieguma oscilogrammas tukšgaitas režīmā pie rotācijas frekvencēm attiecīgi 950, 2000, bet 4.8. b, c att. – enkura tinuma spriegumi slodzes gadījumā rotācijas frekvencēm 950, 2000. Šajās oscilogrammās redzams, ka enkura reakcija izkropļo spriegumu līkni, t.i., induktorģeneratora enkura tinuma sprieguma līknes forma pasliktinās, palielinoties slodzei.

4.4. Eksperimenta rezultātu un teorētisko datu salīdzināšana

Aksiālā induktorģeneratora optimizācija tika veikta, balstoties uz magnētiskā lauka analīzi. Tāpēc sākotnēji lietderīgi ir aplūkot un salīdzināt eksperimentālos rezultātus ar teorētiskajiem datiem. 4.9.att. parādīti ģeneratoru ar dažādiem rotoriem tukšgaitas teorētiskās un eksperimentālās raksturlīknes.

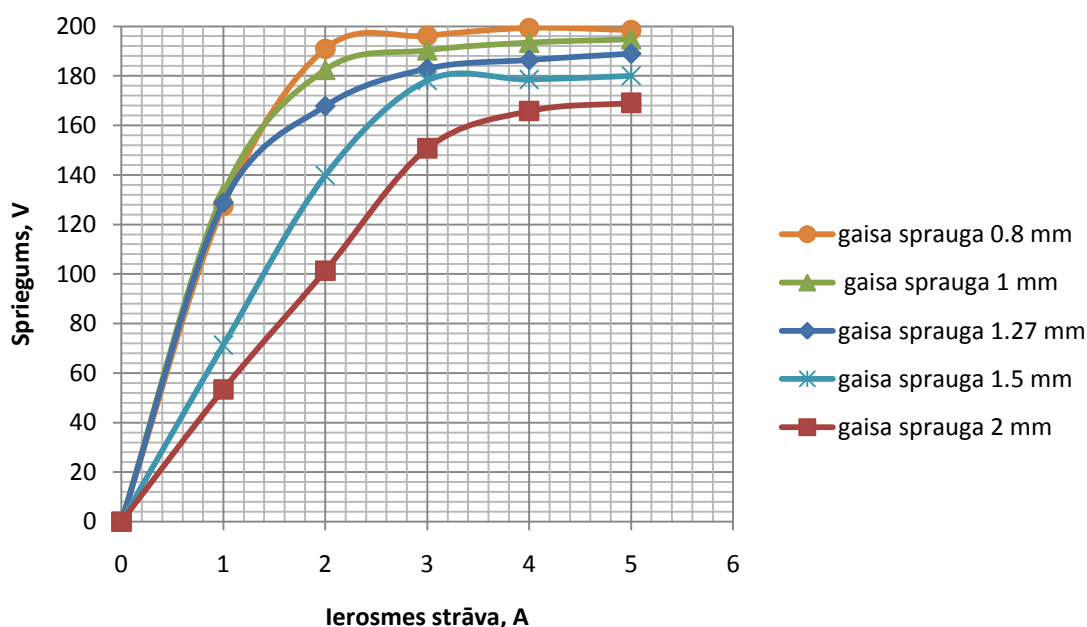


4.9.att. Tukšgaitas raksturlīknes:

a – sērijveida ģeneratora ar $Z_2=10$; b – eksperimentālā ģeneratora ar $Z_2=14$;
— teorētiskā ■ eksperimentālā

Sērijveida ģeneratora $Z_2=10$ (4.9.a att.) tukšgaitas raksturlīknes praktiski pilnībā sakrīt ar teorētiskajām. Tas liecina par izejas datu (ģeometrisko izmēru, magnētisko raksturlielumu) un uz magnētiskā lauka aprēķina un analīzes balstīta matemātiskā modeļa atbilstību. Tomēr nevar runāt par 100% līkņu sakrītību, jo netika izslēgta kļūdu rašanās iespēja aprēķinos un eksperimentālajos mērījumos. Tai pašā laikā eksperimenta ģeneratora ar $Z_2=14$ uz rotora tukšgaitas raksturlīkne ir nedaudz augstāk par eksperimentālo. Rezultātu starpību var skaidrot ar to, ka pārbaudēs tika izmantoti ģeneratori ar dažādu rotora izgatavošanas tehnoloģiju. 10 zobu uz rotora gadījumā tā bija lietā statne un rotora lokšņu štancējums, bet 14 zobu gadījumā

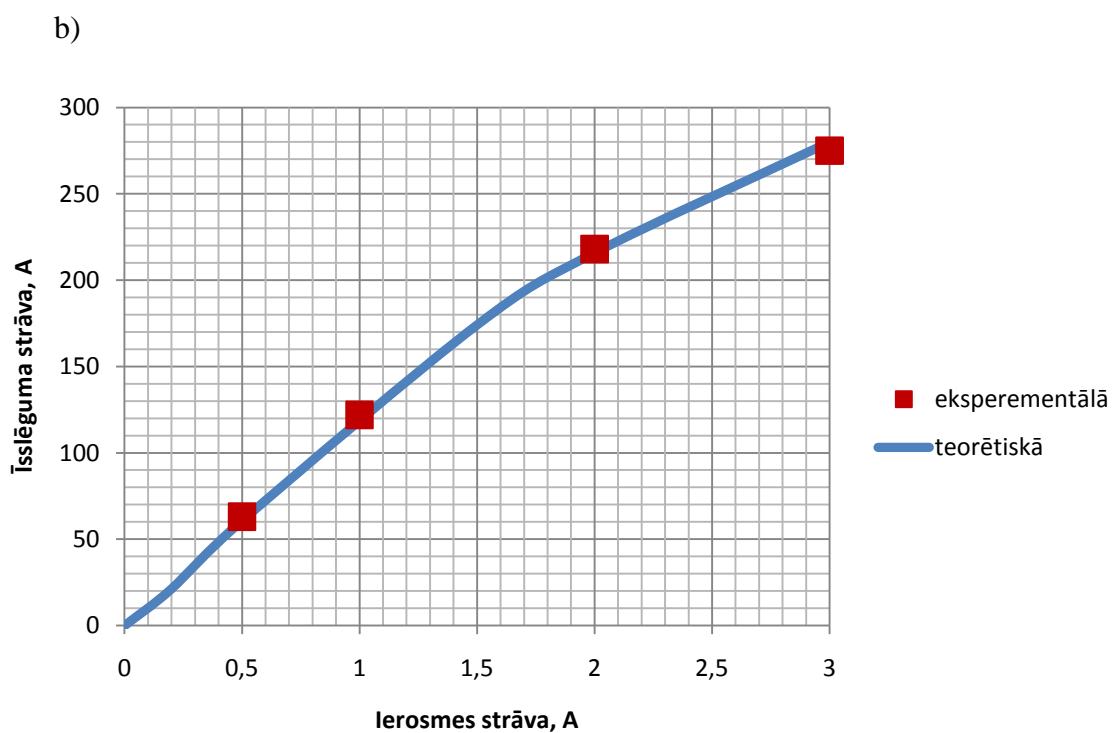
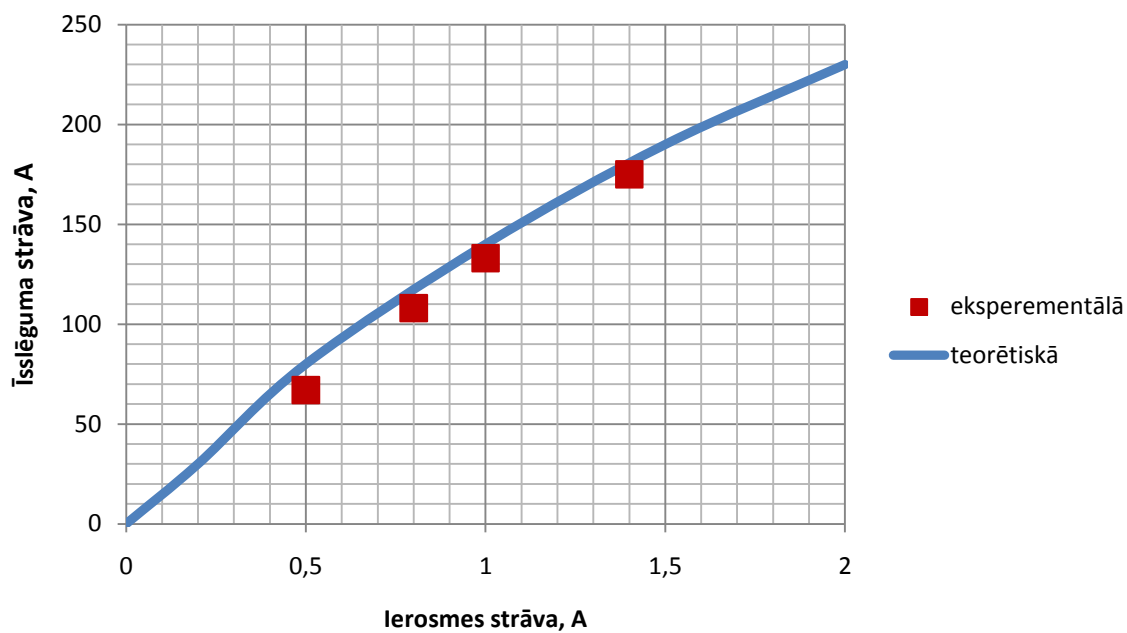
– saliktā statne no divām daļām ar spraudni vidū, bet rotora zobi izgatavoti frēzējot. Tas saistīts arī ar to, ka, jo zemāka frekvence un lielāki mašīnas zobi, jo tuvāk sakrīt tukšgaitas aprēķina un eksperimentālās raksturlīknes. Pie lielākas frekvences un ar mazākiem zobiem krasāks iespaids gan no spraugas izpildījuma precizitātes, gan arī no dažādām montāžas neprecizitātēm, kuras ir nejaušas un tās grūti ņemt vērā aprēķinā, jo vairāk tāpēc, ka eksperimentālā parauga rotora rievās tika izgatavotas ar frēzēšanu, nevis štancēšanu. 4.10.att. parādītas tukšgaitas sprieguma atkarības dažādu gaisa spraugas lielumu gadījumā. No šīm raksturlīknēm izriet, ka, jo mazāka gaisa sprauga, jo augstāk ir raksturlīkne, bet spraugai palielinoties, raksturlīkne ir zemāk.



4.10. att. Tukšgaitas raksturlīknes dažādām gaisa spraugas vērtībām

4.11.attēlā parādītas īsslēguma eksperimentālās un teorētiskās raksturlīknes ģeneratoriem ar dažādiem rotoriem ($Z_2=14$ un $Z_2=10$).

a)

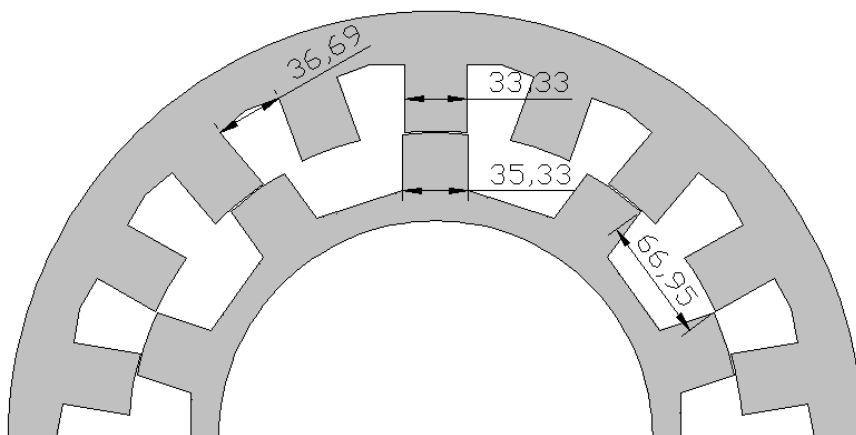


4.11.att. Īsslēguma eksperimentālās un teorētiskās raksturlīknes:

a – ģeneratoram ar $Z_2=10$; b – ģeneratoram ar $Z_2=14$

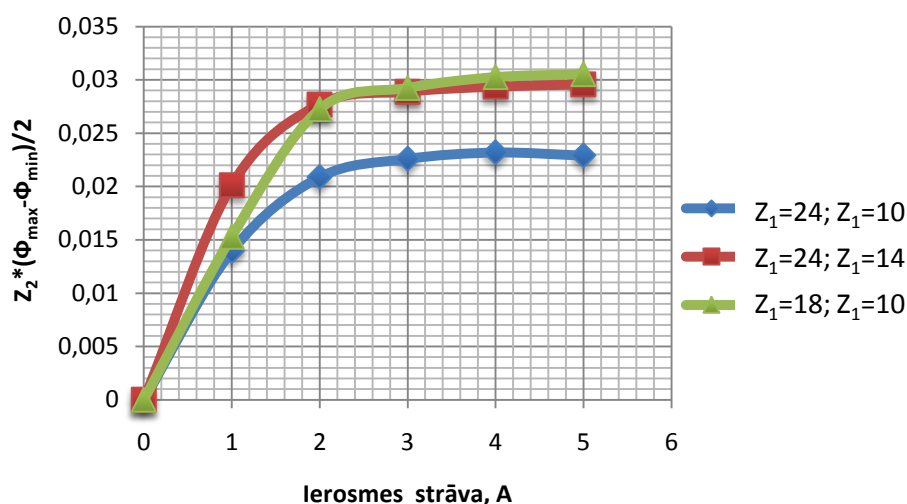
4.5. Priekšlikumi induktorģeneratora konstrukcijas pilnveidošanai

Meklējot racionālu zemvagona induktorģeneratora zobzonas ģeometriju, tika konstatēta optimāla statora un rotora zobu skaita attiecība, kā arī rotora rievas un zoba relatīvais platums. Tomēr iegūtais optimālais zobu skaits uz rotora $Z_2=14$ izraisa strāvas frekvences palielināšanos no 167 Hz līdz 233 Hz. Frekvences palielināšanās noved pie zudumu palielināšanos tēraudā un ģeneratora lietderības koeficienta pamazināšanos. Tāpēc strāvu frekvences pamazināšanas un zudumu ģeneratora tēraudā samazināšanas nolūkā tiek piedāvāts izmantot ģeneratora konstrukciju ar zobu skaitu $Z_1=18$ un $Z_2=10$. Ar tādu rotora un statora zobu skaitu rotācijas frekvence paliek tāda pati kā sērijveida ģeneratorā. Rievas platuma attiecība pret statora zoba platumu jānodrošina vienādu ar 1.1. Taču rotora zoba platums jāizveido atbilstoši 3.5.apakšnodaļas rekomendācijām. 4.12.att. parādīta statora un rotora lokšņu skice ar izmēriem ģeneratoram $Z_1=18$ un $Z_2=10$.



4.12.att. Ģeneratora zobzonas ģeometrija $Z_1=18$, $Z_2=10$

4.13.att. attēlotas ģeneratoru ar dažādām statora un rotora zobu skaita attiecībām ($Z_1=24$, $Z_2=10$; $Z_1=24$, $Z_2=14$; $Z_1=18$, $Z_2=10$) tukšgaitas līknes. No dotajām raksturlīknēm redzams, ka pie nominālas ierosmes strāvas, kas vienāda ar $I_f=3$ A, ģeneratoriem ar $Z_1=24$, $Z_2=14$ un $Z_1=18$, $Z_2=10$ ir vienāda attiecība $\frac{\Phi_{max}-\Phi_{min}}{2} \cdot Z_2$, kas par 29% lielāka nekā sērijveida ģeneratorā. Ģeneratora ar parametriem $Z_1=18$, $Z_2=10$ zobzonas ģeometrija ļauj saglabāt strāvas frekvenci tai pašā līmenī, turklāt paaugstinās ģeneratora īpatnēja jauda par 29% un būtiski tiek vienkāršota elektriskās mašīnas izgatavošanas tehnoloģija.



4.13. att. Ģeneratoru ar dažādām statora un rotora zobu skaita attiecībām tukšgaitas raksturlīknes

Pasažieru vagonu elektoapgādes sistēmā pastāv dažādi papildus elementi, tādi kā palīgdzinēji un pusvadītāju pārveidotāji. Pašreiz elektrisko mašīnu energoefektivitātes paaugstināšanas nolūkā tiek veikta virkne pētījumu, kas sniegti [91-93] darbos, piemēram, masas un gabarītu rādītāju uzlabošana tiek panākta, izvietojot induktora rievās Nd-Fe-B magnētus. Darbos [94-95] tiek piedāvāta elektriskās mašīnas izstrāde bez ierosmes tinuma, kur ierosinošais faktors ir enkura reakcija. Tādai mašīnai ir mazāka jauda, tomēr ieguvums ir drošība un izmaksas sakarā ar vienkāršotu izgatavošanas tehnoloģiju.

4.6. Secinājumi

4.6.1. Veiktie eksperimentālie pētījumi apstiprināja piedāvātā matemātiskā modeļa, kas balstīts uz magnētiskā lauka analīzi, izmantojot programmu kompleksu QuickField, pamatotību.

4.6.2. Sērijveidā izlaižamā induktorgenerators 2ГВ.13У1 zobzonas analīze parādīja, ka tā nav pietiekami efektīva un to var optimizēt ar statora un rotora zobu skaita un zobu platumu izmaiņām.

4.6.3. Lai samazinātu zudumus rotora tēraudā, lietderīgi ir samazināt statora zobu skaitu no 24 līdz 18, tostarp saglabājot rotora zobu skaitu vienādu ar 10.

4.6.4. Kā parādīja eksperimentālie pētījumi, iepriekš noformulētās rekomendācijas izpilde ļaus palielināt ģeneratora īpatnējo jaudu par 14%, turklāt saglabājot mazus zudumus līmeni un augstu lietderības koeficientu.

SLĒDZIENI

1. Elektrisko kontaktu suku veidā un rotējošu tinumu trūkuma dēļ induktormašīnas ir plaši izplatītas, pateicoties augstai ekspluatācijas drošībai, izgatavošanas vienkāršībai un vienkāršai tehniskai apkopei. Radiālas un aksiālas ierosmes induktorgeneratoru salīdzinoša analīze parādīja, ka aksiālajām mašīnām ir augstāks lietderības koeficients, tām vajadzīgas mazāks vara patēriņš, raksturīgs laba piemērotība remontam, tāpēc tām tiek dota priekšroka lietošanā, tai skaitā arī dzelzceļa transportā.

2. Divu magnētiskā lauka aprēķina veidu, reducēšana divos divdimensiju uzdevumos un darbā piedāvātā trīsdimensiju uzdevuma reducēšanas vienā divdimensiju, salīdzinoša analīze parādīja, ka abi veidi ir pamatoti aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka parametru noteikšanai. Tomēr ātrāka un uzskatāmāka ir trīsdimensiju uzdevuma reducēšana uz divdimensiju.

3. Piedāvāta mērķfunkcija uz kuras analīzes bāzes var ātri atrast pētāmās elektriskās mašīnas optimālo konstruktīvo risinājumu

$$C_g = \frac{\pi}{120} k_{w1}^2 n_N Z_1 Z_2 \frac{(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})^2}{\frac{(\Phi_{\max(k)} + \Phi_{\min(k)})}{F_k}},$$

kur k_{w1} – pirmās harmonikas tinumu koeficients;

n_N – nominālā rotācijas frekvence;

Z_1 – statora zobu skaits;

Z_2 – rotora zobu skaits;

Φ_{\max} , Φ_{\min} – ierosmes maksimālā un minimālā magnētiskā zobu plūsma, kas atbilst statora zoba ievietojumam pret rotora zobu vai pret rotora rievu;

$\Phi_{\max(k)}$, $\Phi_{\min(k)}$ – maksimālās un minimālās vērtības magnētiskai plūsmai, kuru nosaka rezultējošais MDS;

F_k – īsslēguma MDS.

4. Balstoties uz magnētiskā lauka aprēķina rezultātiem un mērķfunkcijas analīzi, sniegtas rekomendācijas aksiālās induktormašīnas racionālas zobzonas ģeometrijas izvēlē, kas tiek apkopotas šādi:

- statora un rotora zobu skaitam jāatbilst attiecībām

$$Z_1 = 2k_1m; Z_2 = \frac{Z_1}{2} + k_2 \neq km,$$

kur k_1 un k_2 – veseli skaitļi; k – mazs vesels skaitlis; m – fāžu skaits;

- statora zoba b_{z1} (rotora b_{z2}) platuma attiecībai pret gaisa spraugu δ jābūt ne mazākai par 20, t.i.

$$\frac{b_{z1}}{\delta} \geq 20; \frac{b_{z2}}{\delta} \geq 20;$$

- rotora zoba platuma attiecība pret statora zoba platumu atrodas robežās

$$\gamma_{1-2} = \frac{b_{z2}}{b_{z1}} = 1.02 \div 1.1.$$

5. Zudumu samazināšanai rotora tēraudā un lietderības koeficienta palielināšanai piedāvāts samazināt statora zobu skaitu no 24 līdz 18, tostarp saglabājot rotora zobu skaitu vienādu ar 10, lai ļautu samazināt zudumus tēraudā un palielinātu ģenerators īpatnējo jaudu par 29%.

6. Veiktie eksperimentālie pētījumi apstiprināja aksiālā induktorģenerators piedāvātā matemātiskā modeļa un priekšlikumu energoefektivitātes paaugstināšanā pamatotību.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Апсит В. Исторический обзор развития бесконтактных синхронных машин. – Бесконтакт. электрич. машины, Рига, 1970, вып. 9. - 5-64 с.
2. Домбур Л. Аксиальные индукторные машины. - Рига: «Зинатне», 1984. – 247 с.
3. Алексеев А. Машины повышенной частоты. Элементарная теория и построение рабочих характеристик. – Сборник электромашиностроения, вып.2.,1930.
4. Вологдин В., Спицин М. Генераторы высокой частоты. – ОНТИ, 1935.
5. Петрунькин Ю. Влияние размеров зубцов ротора и междуполюсного пространства униполярных генераторов высокой и повышенной частоты на величину их электродвижущей силы и мощность. – «Вестник электропромышленности», 1936, №3.
6. Алексеева М. Машинные генераторы повышенной частоты. – Л. „Энергия”, 1967 – 344 с.
7. Альпер Н., Терзян А. А. Индукторные генераторы. - М.: Энергия, 1970. – 192 с.
8. Апсит В. Классификация бесконтактных синхронных машин. - Бесконтактные электрические машины. Из-во Академии наук, Рига, 1961 – 23-49 с.
9. Жежерин Р. Индукторные генераторы. – Госэнергоиздат, 1961. – 319 с.
10. Красношарпа М. Индукторные альтернаторы повышенной частоты. – Изд-во ЛВВИА им. Жуковского, 1948.
11. Левин Н. Метод исследования индукторных машин. - Бесконтактные электрические машины. Из-во Академии наук, Рига, 1962.
12. Пугачёв В. Расчёт магнитной цепи аксиальной индукторной машины с постоянными магнитами в пазах индуктора. – Известия Латв. Республики. Серия физических и технических наук, №. 10, 1968. - 156-166 с.
13. Пугачёв В. Аксиальные индукторные машины с постоянными магнитами в пазах индуктора. – Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Рига, 1969. – 205 с.
14. А.Д. Серебряков, Индукторные электрические машины с улучшенными техническими характеристиками, РАУ, 1999, 120 с.
15. Скрузитис К. Магнитное поле зубчатого ротора. - Бесконтактные электрические машины. Из-во Академии наук, Рига, 1962.

16. Терзян А. Магнитное поле в зазоре индукторной машины при неодинаковых зубцах на статоре и роторе. – Бесконтактные электрические машины, 8.Рига, 1969. – 45-50 с.
17. Шаров В. Электромашинные индукторные генераторы. – Госэнергоиздат, 1961. – 144 с.
18. Штурман Г. Повышение частоты переменного тока в системах электроснабжения транспортных средств. – Системы электроснабжения транспортных средств. Изд-во Академии наук, 1958. – 5-20 с.
19. Аписит В. Постоянная составляющая магнитного потока в индукторных машинах. - Бесконтактные электрические машины. Из-во Академии наук, Рига, 1961 – 159-173 с.
20. Афанасьева Е., Дикин Ю., Стецурич А. Расчёт электромагнитного поля и потерь энергии в ферромагнитной станине аксиальной индукторной машины. – Бесконтактные электрические машины, 19. Рига, 1980. – 109-118 с.
21. Домбур Л. Магнитное поле в воздушном зазоре индукторной машины с трапецидальными зубцами ротора. – Бесконтактные электрические машины, 3. Рига, 1963. – 57-72 с.
22. Домбур Л. Реакция якоря, векторная диаграмма и расчёт магнитной цепи аксиальной индукторной машины. – Бесконтактные электрические машины, 4. Рига, 1965. 5 – 32 с.
23. Домбур Л. Гармонический анализ и коэффициенты магнитных полей якоря индукторной машины. – Бесконтактные электрические машины, 4. Рига, 1965. 33 – 74 с.
24. Домбур Л. Магнитное поле в воздушном зазоре аксиальной индукторной машины при холостом ходе с учётом зубчатости якоря. – Бесконтактные электрические машины, 4. Рига, 1965. 75 – 96 с.
25. Домбур Л. Особенности расчёта и взаимосвязь параметров магнитного поля аксиальной индукторной машины. – Бесконтактные электрические машины, 21. – 143-147 с.
26. Залманов Г. Петраков М. Влияние насыщения спинки статора одноименнополюсных индукторных генераторов на переменную составляющую

- магнитного потока возбуждения. – Бесконтактные электрические машины, 15. Рига, 1976. – 130-135 с.
27. Куркалов И. Магнитное поле зубчатого якоря при большом воздушном зазоре и неодинаковых потенциалах зубцов. – Бесконтактные электрические машины, XI. Рига, 1972. – 45-88 с.
28. Пугачёв В. Магнитное поле в зубчатом воздушном промежутке. – Бесконтактные электрические машины, 6. Рига, 1967. – 35-62 с.
29. Браканский У.К., Зайцев А.И., Звиедрис А. П. Определение некоторых характеристик электрических машин по результатам численного моделирования магнитного поля. *Latvian Journal of Physics and Technical Science*, 1991, Nr.1., 78-86 с.
30. Браканский У.К., Зайцев А.И., Звиедрис А. П. Некоторые методологические вопросы численного моделирования магнитных полей в аксиальных индукторных машинах. *Latvian Journal of Physics and Technical Science*, 1991, Nr.1., 87-93 с.
31. Gasparjans A., Terebkov A., Zhiravetska A. The application of the consumed current spectral analysis for the monitoring of bearing units of induction machines. - *Engineering for Rural Development*, Jelgava, Latvia WEB - <http://tf.llu.lv>
32. Kamoliņš E. Relaktances elektriskās mašīnas autonomo vēja iekārtu ģenerēšanas un vadības sistēmās. - Promocijas darbs. Rīga, 2008. – 118 lpp.
33. Podgornovs A. Magnētiskā lauka trešās harmonikas enerģijas izmantošana sinhrono dzinēju pašierosmei. - Promocijas darbs. Rīga, 2009. – 144 lpp.
34. Transporta elektriskās mašīnas. Dirba J., Ketners K., Levins N., Pugačevs V. – JUMAVA, Rīga, 2002. – 344 lpp.
35. Н.Н. Левин, А.Д. Серебряков. Перспективы применения индукторных машин в воздушном транспорте и других областях техники. Рижский Авиационный Университет, 1999, 54 с.
36. А.Д. Серебряков. Индукторные электрические машины в бортовом оборудовании воздушных судов. *Computer Modelling&New Technologies*, 1999, Volume 3, 108-112 с.
37. Бертинов А.И. Авиационные электрические генераторы. Государственное издательство оборонной промышленности, Москва, 1959, 594 с.

38. Dirba J., Levins N., Pugačevs V. Vēja enerģijas elektromehāniskie pārveidotāji. – RTU Izdevniecība, Rīga, 2006 – 310 lpp.
39. Сборник материалов совещаний за 2008 год. Научно-производственное закрытое общество Электромаш. WEB - www.ao-electromash.ru
40. Буклет НП ЗАО „Электромаш”. Научно-производственное закрытое общество Электромаш. WEB- www.ao-electromash.ru
41. Пассажирские вагоны информация о них, их классификация, оборудование. WEB - <http://vagonoff.ru/index.php>
42. Пугачёв В., Яблуновский В. Анализ зубцовой зоны аксиальных индукторных машин – повышенной частоты. – Бесконтактные электрические машины, 15. Рига, 1976. – 150-162 с.
43. Пугачёв В., Яблуновский В. Характеристика индукторных генераторов с многозонной якорной обмоткой. Журнал «Электротехника» - 1981, №2, 11-14 с.
44. Bianchi N. and Prre M. D. Use of the star of slots in designing fractional-slot singlelayer synchronous motors - in IEEE Proc. on Electric Power Applications, vol. 153, no. 3, 2006. - 459-466 p.
45. Cros J., Viarouge P. Synthesis of high performance pm motors with concentrated windings. - Technical Report Vol. 17, No. 2 -2002.
46. Horz M., Herzog H.-G., Haas A. Axial flux machine with single tooth fractional slot winding – Comparison of different winding design approaches. SPEEDAM 2006.
47. Magnussen F., Sadarangani C. Winding Factors and Joule Losses of Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings. Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'03), vol. 1. June 2003. - 333-339 p.
48. Meier F. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed-direct-drive applications. - Doctoral thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweeden, 2008.
49. Meier F., Soulard J. PMSM with non-overlapping concentrated windings: design guidelines and model references. Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 09) 2009, Monaco.
50. Zhu Z. Q. Fractional slot permanent magnet brushless machines and drives for electric and hybrid propulsion systems. Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 09) 2009, Monaco.

51. Florence Libert, Design, optimization and Comparison of Permanent Magnet motor for a Low- speed DirectDriven Mixer, Stockholm 2004. Technical Licentiate.
52. Mitch Olszewski, Fractional – slot surface mouted PM Motors with concentrated winding for HEV Traction drives 43 p. – WEB: <http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/123938.pdf>
53. Chen J., Zhu Z, and Xia Z. Coil Connections and Winding Factors in Flux-Switching PM Brushless AC Machines. EVER 2009.
54. Saeed Mohammadzadeh Babr. Design of PM motors with concentrated windings for concrete cutters. - Master Thesis. Stockholm 2007. – 81 p.
55. Salminen P. Fractional slot permanent magnet synchronous motor for low speed applications. - Doctor thesis, Lappeenranta University of Technology. 2004. – 150 p.
56. Skaar S., Krovel O., Nilssen R. Distribution, coil span and winding factors for PM machines with concentrated windings. – 6 p.
57. Libert F., Soulard I. Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated Windings. – in Pro. International conference on Electrical Machines, 5-8 September 2004, Cracow, Poland. – 6 p.
58. Индукторная машина. Апсит В., Щукин М., Пугачев В., Яблунковский В., Дикин Ю., Радин В., Петраков М., Грингауз М. – Патент №788288, от 28.02.1979.
59. Индуктоная машина. Апсит В., Щукин М., Пугачев В., Яблунковский В., Александровский Г., Зимичев Ю., Боровик – Патент №458929, от 26.06.1972.
60. Синхронная перемено-полюсная машина. Апсит В., Щукин М., Пугачев В., Яблунковский В., Леонов Н., Ивченко Ю. – Патент №871282, от 23.01.1980.
61. Inductor generator. Apsit V., Schukin M., Pugachev V., Yablunovsky V., Alexandrovsky G., Zimichev J., Borovik I. – Patent Nr.3,851,199, 26.11.1974.
62. Induktormāšīna. Bezsmertnijs A., Dirba J., Ketners K., Levins N., Orlova S., Pugačevs V. – Patents Nr. 13947, no 20.02.2009.
63. Иванов-Смоленский А. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
64. Zviedris A. Elektrisko mašīnu elektromagnētiskie aprēķini. – Rīga:RTU, 2001. – 71 lpp.
65. Zviedris A., Podgornovs A. Elektrisko mašīnu elektromagnētisko lauku matemātiskā modelēšana.- RTU Izdevniecība, Rīga 2010. – 102 lpp.

66. Теоретические основы электротехники. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. - 2006 – 377 с.
67. Фисенко В.Г. Численные расчёты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов. МЭИ (ТУ), 2002, WEB - <http://elmech.mpei.ac.ru/books/edu/ELCUT/index.html>
68. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. – М., Энергия, 1969. - 304 с.
69. Bianchi, N. Electrical machine analysis using finite elements. - Boca Raton : Taylor & Francis, 2005. - 275 p.
70. Reese A.B.J., Preston T.W., Finite element methods in electrical power engineering. – Oxford science publications, 2000. – 293 p.
71. Брынский Е.А., Данилевич Я. Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. - Л.: Энергия, 1979.-176 с.
72. Новик Я. Расчёт магнитного поля полузакрытого паза методом конечных элементов. – Бесконтактные электрические машины, 15. Рига, 1976. – 12-16 с.
73. Новик Я. Выбор треугольной сетки при расчёте магнитного поля методом конечных элементов. - Бесконтактные электрические машины, 15. Рига, 1976. – 17-24 с.
74. Новик Я. Численные методы расчёта магнитного поля электрических машин с учётом насыщения. - Бесконтактные электрические машины, XI. Рига, 1972, стр. 3-45.
75. Новик Я. Численный расчёт магнитного поля методом конечных элементов в электрических машинах с учётом насыщения стали. - Изв. АН Латв. ССР. Сер.физ. и тех.наук. 1974. N5. - 96-104 с.
76. Новик Я., Лавенделс Ю., Браканский У. Автоматизация численных расчётов стационарного магнитного поля методом конечных элементов. – Бесконтактные электрические машины, 24. Рига, 1985. – 65-79 с.
77. Звиедрис А.П. Электромагнитные расчёты в электрических машинах – Р.РПИ. - 1973.- 90 с.
78. Orlova S., Pugachov V., Levin N. Magnetic field in the tooth zone of an axial inductor machine (AIM) - 5th annual Conference of Young Scientists on Energy Issues, 2008, Kaunas, Lithuania, CD proceedings. II-20 – II-27.

79. Магнитное поле в зубцовой зоне аксиальной индукторной машины. Орлова С., Пугачёв В., Левин Н., Камолиньш Э. - Техн. Електродинаміка. Частина 5, Киев 2008. - 31-34.
80. Research of magnetic field of an axial inductor machine. Orlova S., Pugachov V., Levin N. Bezsmertnij A. - RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. 23.sēj., 2008. - 117.-122.lpp
81. Optimization of the circuit of an axial inductor machine based on the calculation and analysis of magnetic field. Dirba J., Levin N., Orlova S., Pugachov., Ribickis L. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona:CD proceedings, 2009.
82. Сергеев П. Проектирование электрических машин. – М., «Энергия»,1969 -632 с.
83. Optimization of the tooth zone of an axial inductor machine based on analysis of magnetic field. Levin N., Orlova. S., Pugachov V., E. Kamolins. - Latv. J. Phys. Tech. Sci. Nr.2. - 21-28 p.
84. Рейклетис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. М.: Мир,1986 -352 с.
85. Zviedris A. Elektromagnētisko ierīču magnētisko sistēmu optimizācija. – Rīga:RTU, 2004. – 46 lpp.
86. Rational geometry of a magnetic circuit of an axial inductor generator. Orlova S., Pugachov V., Levin N., Kamolins E. - The 4TH International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas: “Technologija”, 2009. - 219-222 p.
87. Optimization of the magnetic circuit of the homopolar inductor machine with non-overlapping concentrated windings. Levin N., Orlova. S., Pugachov V., Ribickis L. - 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, Republic of Macedonia, 2010. – T4-77 – T4-81 p.
88. Optimization of the magnetic circuit of an axial inductor machine. Dirba J., Levin N., Orlova S., Pugachov V. - RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. 5.sēj., 2009 - 57.-60. lpp.
89. Non-overlapping concentrated windings in homopolar inductor machines. Orlova S., Pugachov V., Levin N., Konuhova M. - 20th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Pisa: CD proceedings, 2010.
90. Пути повышения КПД синхронных индукторных генераторов в режимах

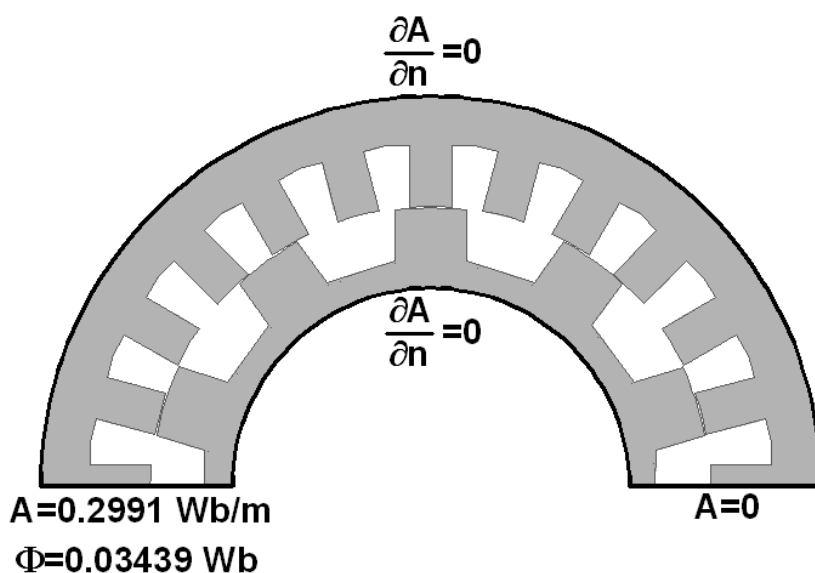
- работы с малыми генерируемыми мощностями. Голубенко Н., Довгалоук О., Поддубный С., Лапенков С. WEB - http://www.ive.org.ua/conference_2008-1.html
91. Aksiālas ierosmes induktormašina. Ketners K., Dirba J., Levins N., Orlova S., Pugačevs V. – Patents Nr. 13971, no 08.04.2009.
92. Sinhronais ģenerators ar pastāvīgajiem magnētiem. Pugačevs V., Dirba J., Levins N., Orlova S., Ose B., Ribickis L. – Patenta pieteikums Nr. P-10-166, no 08.12.2010
93. Daudzpolu sinhronais ģenerators ar pastāvīgajiem magnētiem. Dirba J., Ketners K., Levins N., Orlova S., Pugačevs V. – Patents Nr. 14068, no 28.10.2010.
94. Apvērstas konstrukcijas sinhronais reaktīvais dzinējs. Dirba J., Ketners K., Levins N., Orlova S., Pugačevs V. – Patenta pieteikums Nr. P-11-14, no 08.02.2011.
95. Brushless synchronous motors for appliances and power tools. Dirba J., Ketners K., Levin N., Orlova S., Pugachov V. The 6TH International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas: “Technologija”, 2011 (nodots publicēšanai).
96. QuickField User'Guide version 5.8.WEB – <http://www.quickfield.com>
97. Flux User'Guide WEB - <http://www.cedrat.com>
98. Zviedris A. Datorrealizācijas matemātiskās metodes. RTU, Rīga, 2004. – 78 lpp.

PIELIKUMI

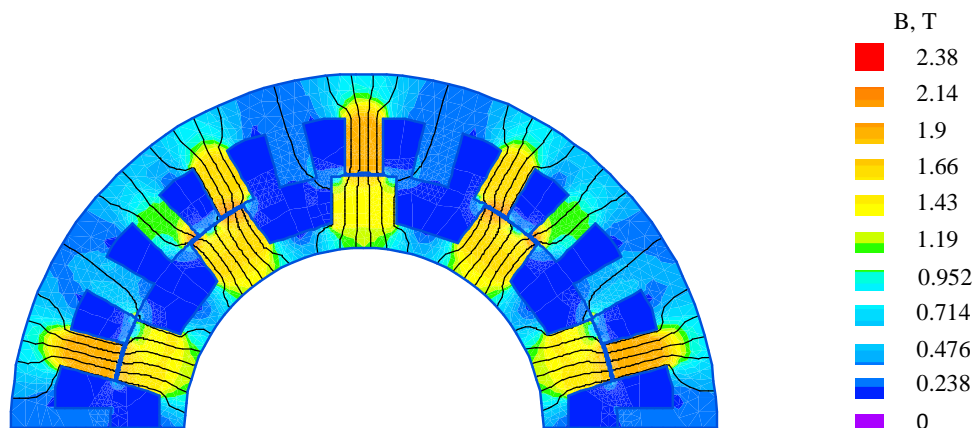
MAŠĪNAS MAGNĒTISKĀ LAUKA MODELĒŠANA, IZMANTOJOT PROGRAMMAS QUICKFIELD un FLUX

Aprēķina rezultātu salīdzināšanas nolūkā tika veikta mašīnas magnētiskā lauka modelēšana ģeneratora šķērsgriezumā, izmantojot programmas QuickField un Flux [96-97].

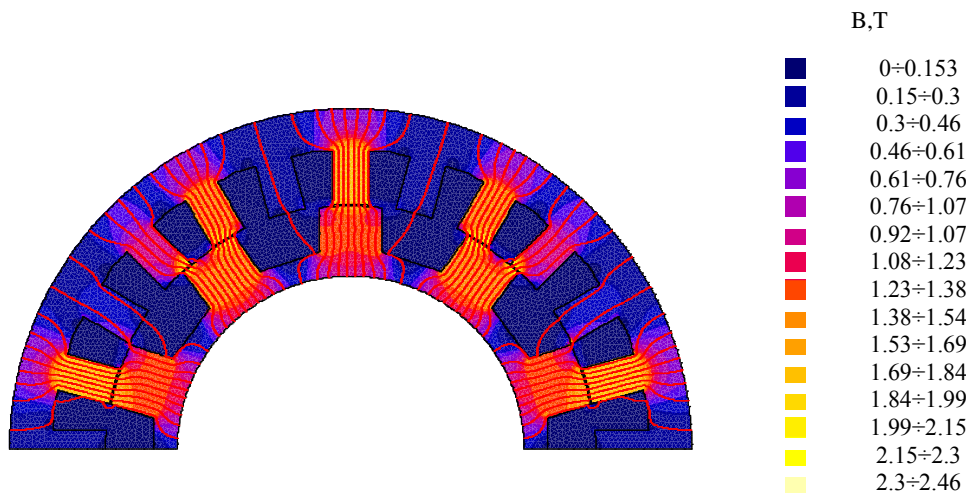
P.1.1.att. parādīta mašīnas ar 24 zobiem statorā un ar 10 zobiem rotorā. Robežnosacījumi tika uzdoti atbilstoši 2. nodaļā sniegtajiem. Tomēr jāatzīmē, ka magnētiskā lauka ārējais avots programmā Flux tiek uzdots caur magnētisko plūsmu Φ (Wb).



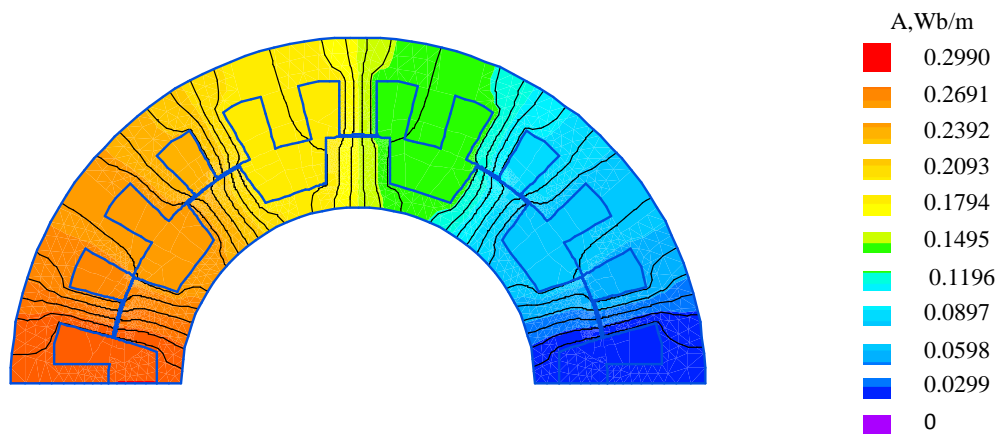
P.1.1.att. Statora un rotora zobu forma vienai elektriskās mašīnas pusei un uzdotie robežnosacījumi



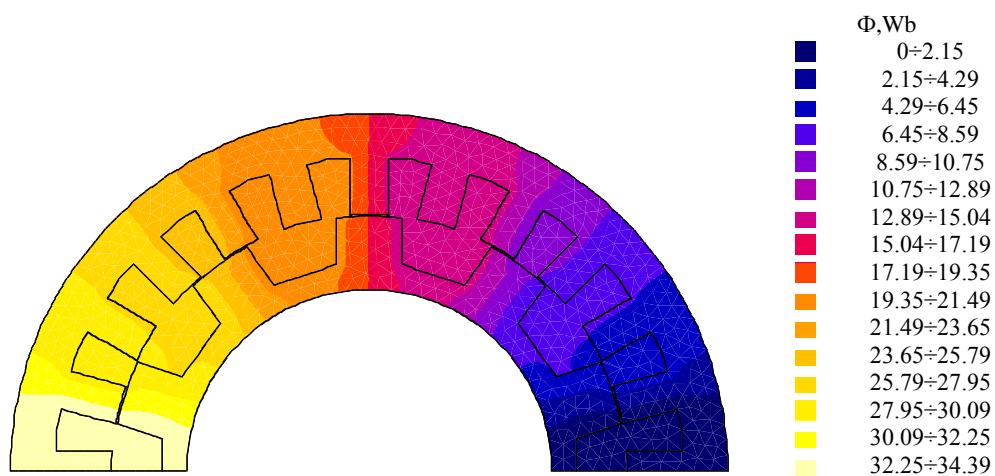
P.1.2.att. Magnētiskās indukcijas sadalījuma aina, kas iegūta, izmantojot programmu QuickField



P.1.3.att. Magnētiskās indukcijas lieluma novērtējums, kas iegūts, izmantojot programmu Flux

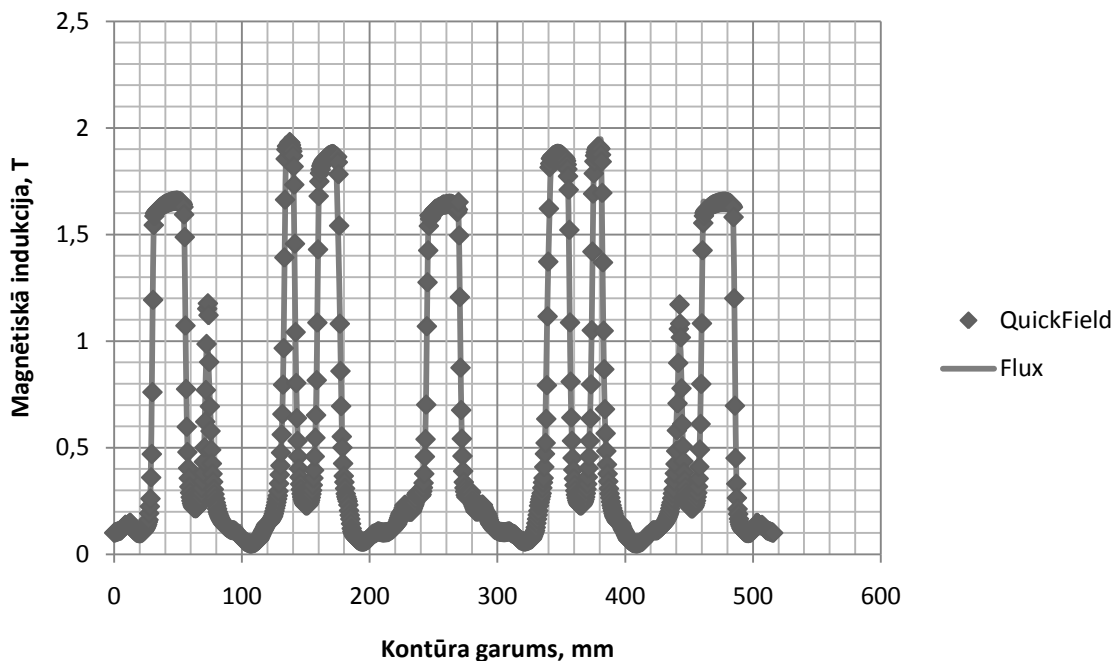


P.1.4.att. Vektoriālā magnētiskā potenciāla sadalījuma aina, kas iegūta izmantojot programmu QuickField

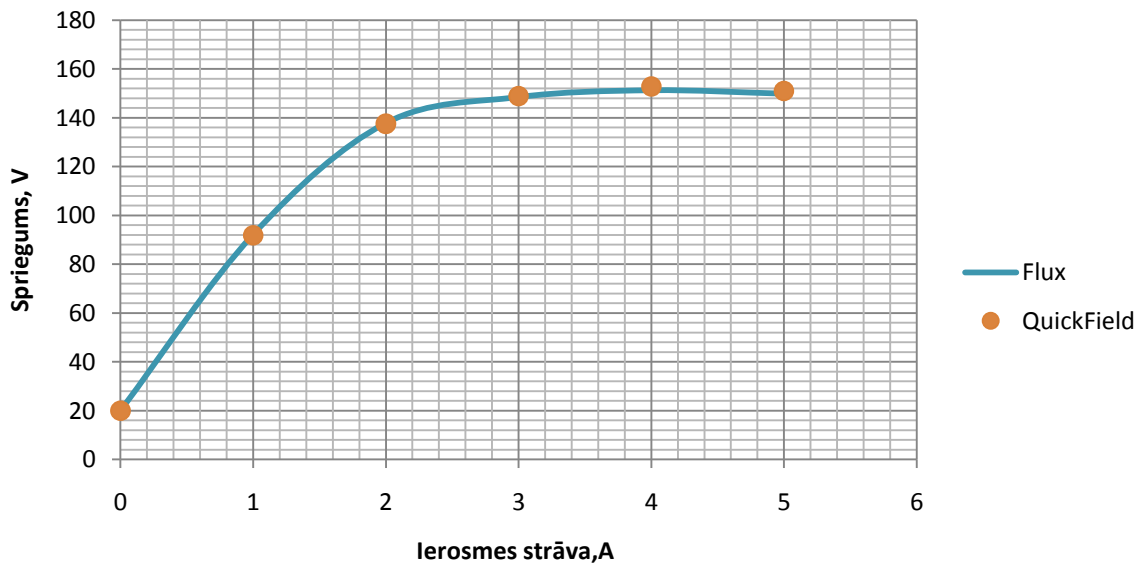


P.1.5.att. Magnētiskās plūsmas sadalījuma aina, izmantojot programmu Flux

P.1.6.attēlā parādītas magnētiskās indukcijas gaisa spraugā atkarības no uzdotajām koordinātēm. Induktorģeneratora tukšgaitas raksturlīknes, kas iegūtas, izmantojot abas programmas, attēlotas P.1.7.att.



P.1.6.att. Magnētiskās indukcijas gaisa spraugā atkarības no uzdotajām koordinātēm

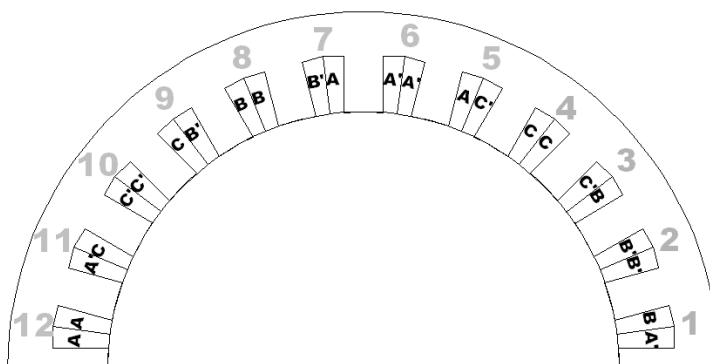


P.1.7. att. Aksiālā induktorģeneratora tukšgaitas raksturlīknes

Kā redzams iegūtajos datos, rezultāti nav atšķirīgi, kas liecina par abu programmu korektumu. Divu programmu atšķirība ir tikai rezultātu iegūšanas ērtībā, jo QuickField ļauj uzdot kontūru un uzreiz iegūt nepieciešamo lielumu uzdotajā punktā, bet Flux vektoriālā potenciāla lielumus iespējams iegūt tikai uzdotajā punktā, tāpēc tālākais aprēķins tiek veikts manuāli.

ELEKTRODZINĒJSPĒKA NOTEIKŠANA AR VIRSĒJO MAGNĒTISKO POTENCIĀLU

Magnētiskā lauka aprēķināšanai darbā tika izmantota programma QuickField, ar kuru tika noteiktas maksimālās un minimālās magnētiskās plūsmas vērtības. Iegūto rezultātu pārbaudes nolūkā tika veikts darbs EDS vērtības noteikšanā caur vidējo virsējo magnētisko potenciālu. P.2.1.att. parādīta aksiālā induktorģeneratora enkura tinuma shēma. P.2.1.tabulā sniegtas vidējā virsējā magnētiskā potenciāla, kas noteikts statora rievās, izmantojot programmu QuickField un Flux, vērtības. Kā redzams P.2.1.tabulā, rezultāti praktiski pilnībā sakrīt.



P.2.1.att. Aksiālā induktorģeneratora $Z_1=24$, $Z_2=10$ enkura tinuma shēma

P.2.1.tabula

Vidējais virsējais magnētiskais potenciāls (Wb/m)

Nr.	QuickField	Flux	Nr.	QuickField	Flux
1.	0.0028	0.0028	7.	0.1723	0.1721
2.	0.0479	0.0480	8.	0.1784	0.1785
3.	0.0582	0.0582	9.	0.2168	0.2167
4.	0.0824	0.0823	10.	0.2410	0.2416
5.	0.1208	0.01206	11.	0.2512	0.2510
6.	0.1267	0.1269	12.	0.2961	0.2958

P.2.2.tabulā noteiktas vidējā virsējā magnētiskā potenciāla vērtības zobos fāzei A, izmantojot ar programmu QuickField iegūtos rezultātus.

Vidējā virsējā magnētiskā potenciāla vērtības zobā

$A_{56}=A_5-A_6=0.1208-0.1267=-0.0059 \text{ Wb}$
$A_{76}=A_7-A_6=0.1723-0.1267=0.0456 \text{ Wb}$
$A_{1211}=A_{12}-A_{11}=0.2961-0.2512=0.0449 \text{ Wb}$
$A_{1312}=A_{12}-A_{13}=0.2961-0.3019=-0.0058 \text{ Wb}$
$A_{13}=A+A_1=0.2991-0.0028=0.3019 \text{ Wb}$

Par cik vērā tiek ņemta tikai puse no mašīnas šķērsriezuma, tad fāzes A plūsmas atrašanas formula būs šāda

$$\Phi_A = \left(\sum_{n=1}^{12} A_k \right) \cdot 2 \cdot l = (-0.0059 + 0.0456 + 0.0449 - 0.0058) \cdot 2 \cdot 0.115$$

$$= 0.018124 \text{ Wb} \quad (P. 2.1.)$$

Ģenerators elektrodzinējspēks tukšgaitā saskaņā ar vienādojumu (2.19) tiek noteikts ar vienādību

$$E_0 = 2 \cdot 4.44 \cdot f_1 \cdot \frac{N_S}{a} \cdot w_k \cdot k_{w1} \cdot \frac{\Phi_A}{8} = 2 \cdot 4.44 \cdot 167 \cdot \frac{24}{4} \cdot 14 \cdot 0.966 \cdot \frac{0.01824}{8}$$

$$= 84.38 \text{ V} \quad (P. 2.2)$$

$$E_l = \sqrt{3} \cdot 84.38 = 146.15 \text{ V} \quad (P. 2.3)$$

Tukšgaitas EDS vērtības, nosakot ar vidējā virspusējā magnētiskā potenciāla vērtībām, ir vienādas ar 146.15 V, bet, nosakot ar magnētisko plūsmu -148.4 V. Rezultātu starpība ir mazāka par 2%, kas liecina par abu veidu izmantošanas pamatotību, tomēr EDS vērtību noteikšana ar magnētisko plūsmu ir daudz ērtāka, jo samazinās virkne nevajadzīgu aprēķinu.

SĒRIJVEIDA ĢENERATORA TUKŠGAITAS RAKSTURLĪKNES APRĒĶINA METODIKA

Zemāk sniegta induktorgenerators raksturlīknes aprēķina metodika, izmantojot spraugas magnētiskās vadītspējas noteikšanas analītisko metodi, ko piedāvā M. Aleksejeva darbs [6]. P.3.1.tabulā sniegti sērijveida ģenerators galvenie izmēri, kurus tālāk izmanto tukšgaitas raksturlīknes noteikšanai. Bet P.3.1.att. parādīts sērijveida ģenerators zobzonas fragments.

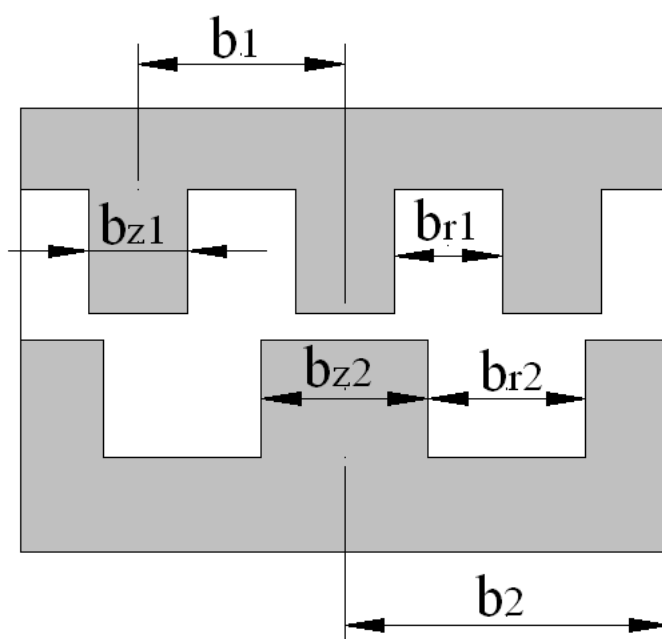
P.3.1.tabula

Sērijveida ģenerators galvenie izmēri

Nosaukumi	Apzīmējumi	Lielumi	Mērvienības
Statora zobu skaits	Z_1	24	-
Rotora zobu skaits	Z_2	10	-
Statora zoba iedaļa	b_1	0.043	m
Rotora zoba iedaļa	b_2	0.01029	m
Statora zoba platums	b_{z1}	0.025	m
Rotora zoba platums	b_{z2}	0.042	m
Statora rievās izciļņa platums	b_{r1}	0.018	m
Rotora rievās platums	b_{r2}	0.0609	m
Gaisa spraugas garums	δ	0.001	m
Paketes garums	l	0.115	m
Tērauda marka	Elektrotehniskais tērauds 2211, loksnes biezums $\Delta = 0.5$ mm		
Paketes aizpildījuma ar tēraudu koeficients	k_{Fe}	0.96	-
Statora zoba šķērsgriezums	$s_{z1} = b_{z1} \cdot l \cdot k_{Fe}$	0.002662	m ²
Rotora zoba šķērsgriezums	$s_{z2} = b_{z2} \cdot l \cdot k_{Fe}$	0.004472	m
Statora zoba augstums	h_{z1}	0.036	m

3.1. tabulas turpinājums

Rotora zoba augstums	h_{z2}	0.03115	m
Rotora ieliktna diametrs	D_{ie}	0.233	m
Rotora serdeņa šķērsgriezums	S_r	0.042617	m ²
Statora jūga diametrs	D_j	0.4885	m
Statora ārējais diametrs	D_a	0.4583	m
Jūga šķērsgriezums	S_j	0.022446	m ²



P.3.1.att. Sērijveida ģenerators zobzonas fragments

Spraugas vadītspējas koeficients statora zobu iedaļas robežās gadījumam, kad zem statora zoba izvietots rotora zobs un kad rotora zobs ir platāks par statora zobu, tiek noteikts šādā veidā:

$$\lambda_z = \frac{b_{z1}}{\delta} + \frac{4.6}{\beta} \cdot \log \left(1 + \frac{\beta \cdot (b_{z2} - b_{z1})}{2 \cdot \delta} \right) + \frac{2.3}{\beta} \cdot \log \left(1 + \frac{\beta \cdot (b_1 - b_{z2})}{\delta + \beta \cdot \frac{b_{z2} - b_{z1}}{2}} \right) = \frac{0.025}{0.001} + \frac{4.6}{1.1} \cdot \log \left(1 + \frac{1.1 \cdot 0.042 - 0.0252 \cdot 0.001}{2 \cdot 0.001} \right) + \frac{2.3}{1.1} \cdot \log \left(1 + \frac{1.1 \cdot 0.043 - 0.0420 \cdot 0.001}{0.001 + 1.1 \cdot \frac{0.042 - 0.0252}{2}} \right) = 29$$

(P.3.1)

Spraugas vadītspējas koeficients statora zobu iedaļas robežās gadījumam, kad zem statora zoba izvietota rotora rieva, tiek atrasts šādā veidā:

$$\lambda_r = 2 \cdot \left(\frac{2.3}{\beta} \cdot \log \left(1 + \frac{\beta \cdot b_{z1}}{2 \cdot (\delta + \beta \cdot (b_{r1} - \frac{b_{z2} - b_{z1}}{2}))} + \frac{b_{r1}}{2 \cdot (\delta + \beta \cdot (b_{r1} - \frac{b_{z2} - b_{z1}}{2}))} \right) \right) = 2 \cdot \left(\frac{2.3}{1.1} \cdot \log \left(1 + \right. \right.$$

$$\left. \left. 1.1 \cdot 0.0252 \cdot 0.001 + 1.1 \cdot (0.018 - 0.042 - 0.0252 + 0.0182 \cdot 0.001 + 1.10 \cdot 0.018 - 0.042 - 0.0252) \right) = 3 \right.$$

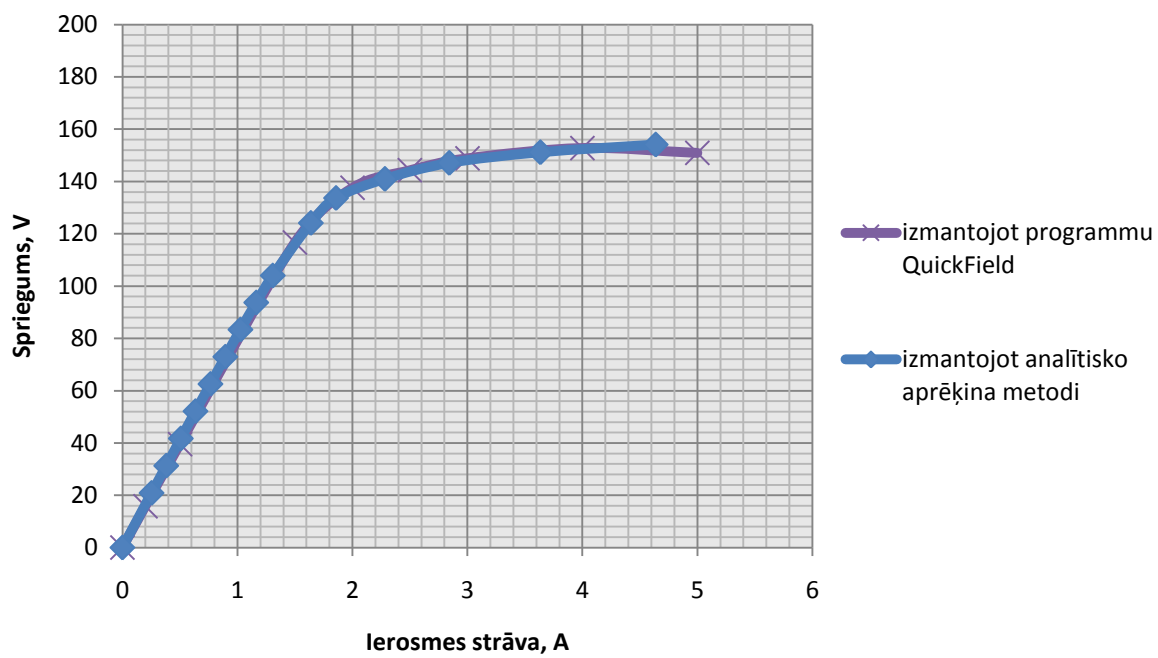
(P.3.2)

P.3.2 tabulā sniegtas formulas, kas nepieciešamas tukšgaitas raksturlīknes aprēķināšanai, kā arī aprēķina rezultāti ar dažādu indukcijas vērtību gaisa spraugā. Bet P.3.2.att. dots sērijveida ģenerators raksturojums, kas iegūts, izmantojot programmu QuickField un izmantojot analītisko aprēķina metodi.

Sērijveida ģenerators tukšgaitas raksturlīknes noteikšana

Nr.	B_{δ}	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
1.	Magnētiskā potenciāla kritums spraugā $F_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}$	318	398	478	557	637	717	796	955	1035	1115	1194	1274	1354
2.	Maksimālā plūsma zobā $\Phi_z = F_{\delta} \cdot l \cdot \lambda_z \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	0.0013	0.0017	0.0020	0.0024	0.0027	0.0030	0.0034	0.0040	0.0044	0.0047	0.0051	0.0054	0.0057
3.	Indukcija statora zobā $B_{z1} = \frac{\Phi_z}{S_{z1}}$	0.51	0.63	0.76	0.89	1.01	1.14	1.27	1.52	1.65	1.77	1.90	2.03	2.15
4.	Magnētiskā lauka intensitāte H_{z1} līknē 1.att.	400	516	642	766	938	1170	1460	3100	4700	11000	20200	31500	44000
5.	Magnētiskā potenciāla kritums statora zobā F_{z1}	14	19	23	28	34	42	53	112	169	396	727.2	1134	1584
6.	Indukcija rotora zobā $B_{z2} = \frac{\Phi_z}{S_{z2}}$	0.30	0.38	0.45	0.53	0.60	0.68	0.75	0.91	0.98	1.06	1.13	1.21	1.28
7.	Magnētiskā lauka intensitāte H_{z2} līknē 1.att.	240	296	360	417	488	554	632	798	898	1000	1150	1290	1520
8.	Magnētiskā potenciāla kritums rotora zobā $F_{z2} = H_{z2} \cdot$	7	9	11	13	15	17	20	25	28	31	36	40	47
9.	Magnētiskā potenciāla kritums zobzonā $F_z = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}$	340	426	512	598	686	776	868	1092	1232	1542	1957	2448	2985
10.	Maksimālā plūsma rievā $\Phi_r = F_z \cdot l \cdot \lambda_r \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	1.48E-04	1.85E-04	2.22E-04	2.59E-04	2.98E-04	3.37E-04	3.77E-04	4.74E-04	5.35E-04	6.69E-04	8.49E-04	1.06E-03	1.30E-03

11.	Plūsmu starpība	$\Phi_z - \Phi_r$	0.0012	0.0015	0.0018	0.0021	0.0024	0.0027	0.0030	0.0036	0.0039	0.0041	0.0042	0.0043	0.0044
12.	Plūsmu summa	$\Phi_z + \Phi_r$	0.0015	0.0019	0.0022	0.0026	0.0030	0.0034	0.0038	0.0045	0.0049	0.0054	0.0059	0.0065	0.0070
13.		$\Phi_M = 5(\Phi_z + \Phi_r)$	0.0075	0.0094	0.0112	0.0131	0.0150	0.0169	0.0188	0.0226	0.0246	0.0270	0.0295	0.0323	0.0352
14.	Indukcija rotora serdenī	$B_r = \frac{\Phi_M}{2 \cdot S_r}$	0.088	0.110	0.132	0.154	0.176	0.198	0.220	0.265	0.289	0.316	0.347	0.379	0.412
15.	Magnētiskā lauka intensitāte	H_r	64	80	104	120	136	152	176	208	224	248	272	296	328
16.	Magnētiskā potenciāla kritums rotorā	$F_r = l_r H_r$	18	22	29	33	38	42	49	58	62	69	76	82	91
17.	Indukcija jūgā	$B_j = \frac{\Phi_M}{0.022}$	0.33	0.42	0.50	0.58	0.67	0.75	0.84	1.01	1.10	1.20	1.32	1.44	1.57
18.	Magnētiskā lauka intensitāte	H_j	264	328	400	470	544	632	724	924	1070	1290	1630	2300	3560
19.	Magnētiskā potenciāla kritums jūgā	$F_j = H_j l_j$	73	91	111	131	151	176	201	257	297	359	453	639	990
20.	Magnētiskā potenciāla kritums	$F_j = 2F_\Sigma + F_p + F_j$	772	965	1164	1360	1561	1770	1987	2498	2824	3511	4443	5618	7049
21.	Tukšgaitas fāzes EDS	$E_0 = 2 \cdot 4.44 \cdot f_1 \cdot \frac{N_s}{a} \cdot w_k \cdot k_{w1} \cdot \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2}$	24	30	36	42	48	54	60	72	77	81	84	87	89
22.	Tukšgaitas līnijas EDS	$E_l = 1.73E_0$	42	52	63	73	83	94	104	124	134	141	146	150	154



P.3.2.att. Sērijveida ģeneratora $Z_1=24$ un $Z_2=10$ tukšgaitas raksturlīkne

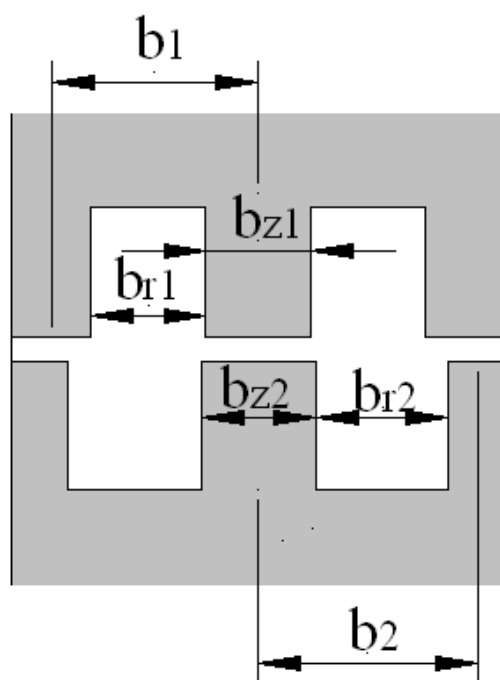
EKSPERIMENTĀLĀ ĢENERATORA TUKŠGAITAS RAKSTURLĪKNES APRĒĶINA METODIKA

P.4.1.tabulā doti eksperimentālā modeļa ģenerators galvenie izmēri, bet 4.1.att. parādīts eksperimentālā ģenerators zobzonas fragments.

P.4.1.tabula

Eksperimentālā modeļa ģenerators galvenie parametri

Nosaukumi	Apzīmējumi	Lielumi	Mērvienības
Statora zobu skaits	Z_1	24	-
Rotora zobu skaits	Z_2	14	-
Statora zoba iedaļa	b_1	0.043	m
Rotora zoba iedaļa	b_2	0.07313	m
Statora zoba platums	b_{z1}	0.025	m
Rotora zoba platums	b_{z2}	0.02719	m
Statora rievās izciļņa platums	b_{r1}	0.018	m
Rotora rievās platums	b_{r2}	0.04594	m
Gaisa spraugas garums	δ	0.001	m
Paketes garums	l	0.115	m
Tērauda marka	Elektrotehniskais tērauds 2211, loksnes biezums $\Delta = 0.5$ mm		
Tērauda paketes aizpildes koef.	k_{Fe}	0.96	-
Statora zoba šķērsgriezums	$S_{z1} = b_{z1} \cdot l \cdot k_{Fe}$	0.002662	m
Rotora zoba šķērsgriezums	$S_{z2} = b_{z2} \cdot l \cdot k_{Fe}$	0.004472	m
Statora zoba augstums	h_{z1}	0.036	m
Rotora zoba augstums	h_{z2}	0.03115	m
Rotora ieliktna diametrs	D_{ie}	0.233	m
Rotora serdeņa šķērsgriezums	S_r	0.042617	m
Statora jūga diametrs	D_j	0.4885	m
Statora ārējais diametrs	D_a	0.4583	m
Jūga šķērsgriezums	S_j	0.022446	m



P.4.1.att. Eksperimentālā ģenerators $Z_2=14$ un $\gamma=1.7$ zobzonas fragments

Spraugas vadītspējas koeficients statora zobu iedaļas robežās gadījumam, kad zem statora zoba izvietots rotora zobs un kad rotora zobs ir platāks par statora zodu, tiek noteikts šādā veidā:

$$\lambda_z = \frac{b_{z2}}{\delta} + \frac{2.3}{\beta} \cdot \log\left(1 + \frac{\beta b_{r1}}{\delta}\right) = \frac{0.02719}{0.001} + \frac{2.3}{1.1} \cdot \log\left(1 + \frac{1.1 \cdot 0.018}{0.001}\right) = 27.76 \quad (\text{P.4.1})$$

Spraugas vadītspējas koeficients statora rievu iedalījuma robežās gadījumam, kad zem statora zoba izvietota rotora rieva, ir vienāds ar:

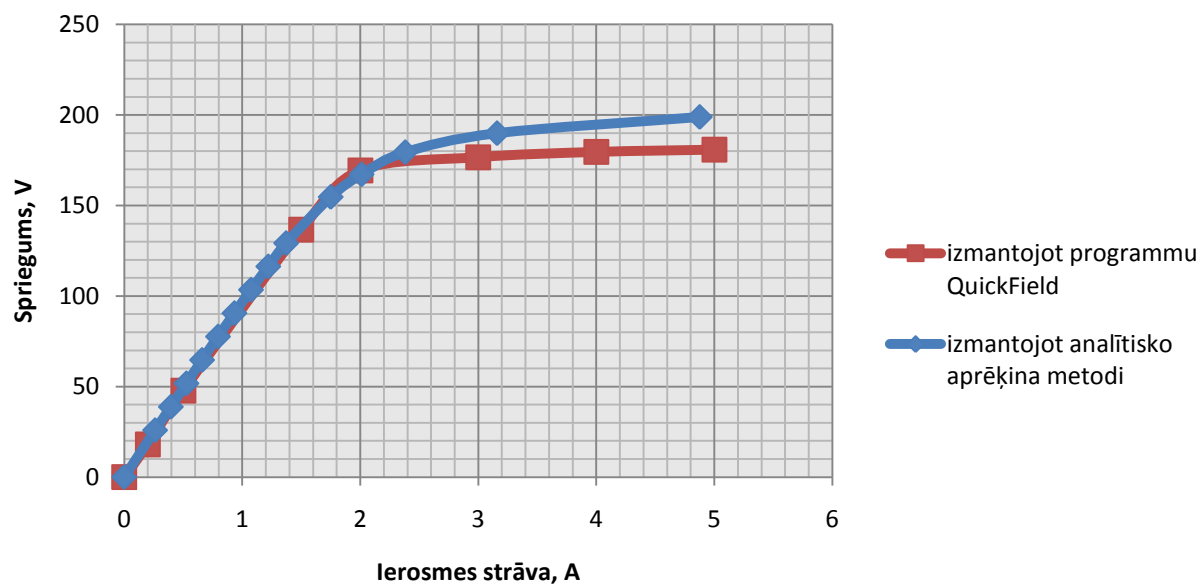
$$\lambda_r = 2 \cdot \left(\frac{2.3}{\beta} \cdot \log\left(1 + \frac{\beta \cdot b_{z1}}{2 \cdot (\delta + \beta \cdot b_{r1})}\right) + \frac{b_{r1}}{2 \cdot (\delta + \beta \cdot b_{r1})} \right) = 2 \cdot \left(\frac{2.3}{1.1} \cdot \log\left(1 + \frac{1.1 \cdot 0.025}{2 \cdot (0.001 + 1.1 \cdot 0.018)}\right) + \frac{0.0182 \cdot 0.001 + 1.1 \cdot 0.018}{2 \cdot (0.001 + 1.1 \cdot 0.018)} \right) = 1.34 \quad (\text{P.4.2.})$$

P.4.2.tabulā dotas formulas, kas nepieciešamas tukšgaitas raksturlīknes aprēķināšanai, kā arī aprēķina rezultāti ar dažādu indukcijas vērtību gaisa spraugā. Bet 4.2.att. dota eksperimentālā ģenerators tukšgaitas raksturlīkne, kas iegūta, izmantojot programmu QuickField un izmantojot analītisko aprēķina metodi.

Eksperimentālā ģenerators tukšgaitas raksturlīknes noteikšana

Nr.	B_{δ}	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
1.	Magnētiskā potenciāla kritums spraugā $F_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}$	318	398	478	557	637	717	796	1035	1115	1194	1274	1354
2.	Maksimālā plūsma zobā $\Phi_z = F_{\delta} \cdot l \cdot \lambda_z \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	0.0013	0.0016	0.00191 5	0.0022	0.00255 4	0.00287 3	0.00319 2	0.00415	0.00446 9	0.00478 8	0.00510 7	0.0054
3.	Indukcija statora zobā $B_{z1} = \frac{\Phi_z}{S_{z1}}$	0.48	0.6	0.72	0.84	0.96	1.08	1.2	1.56	1.68	1.80	1.92	2.04
4.	Magnētiskā lauka intensitāte H_{z1} līknē 1.att.	376	479	593	724	850	1040	1270	3430	5150	12200	20800	32800
5.	Magnētiskā potenciāla kritums statora zobā F_{z1}	13.5	17	21	26	31	37	46	123	185	439	749	1181
6.	Indukcija rotora zobā $B_{z2} = \frac{\Phi_z}{S_{z2}}$	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88	0.99	1.1	1.43	1.54	1.65	1.76	1.87
7.	Magnētiskā lauka intensitāte H_{z2} līknē 1.att.	352	443	544	652	776	911	1090	2300	3320	4850	10500	17100
8.	Magnētiskā potenciāla kritums rotora zobā F_{z2}	10.96	14	17	20	24	28	34	72	103	151	327	533
9.	Magnētiskā potenciāla kritums zobzonā $F_z = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}$	343	429	516	604	692	782	876	1230	1403	1785	2350	3067
10.	Maksimālā plūsma rievā $\Phi_r = F_z \cdot l \cdot \lambda_r \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	6.65E- 05	8.32E- 05	0.0001	0.00011 7	0.00013 4	0.00015 2	0.00017	0.00023 8	0.00027 2	0.00034 6	0.00045 5	0.00059 45

11.	<i>Plūsmu starpība</i>	$\Phi_z - \Phi_r$	0.00121	0.00151 3	0.00181 5	0.00211 7	0.00241 9	0.00272 1	0.00302 2	0.00391 1	0.00419 7	0.00444 2	0.00465 2	0.00483
12.	<i>Plūsmu summa</i>	$\Phi_z + \Phi_r$	0.00134 3	0.00167 9	0.00201 5	0.00235 1	0.00268 8	0.00302 4	0.00336 2	0.00438 8	0.00474 1	0.00513 4	0.00556 3	0.00602
13.		$\Phi_M = 5(\Phi_z + \Phi_r)$	0.00940 3	0.01175 4	0.01410 6	0.01646	0.01881 3	0.02117 1	0.02353 2	0.03071 6	0.03318 5	0.03593 7	0.03894	0.04214
14.	<i>Indukcija rotora serdenī</i>	$B_r = \frac{\Phi_M}{2 \cdot S_r}$	0.11	0.14	0.17	0.19	0.22	0.25	0.28	0.36	0.39	0.42	0.46	0.49
15.	<i>Magnētiskā lauka intensitāte</i>	H_r	88	104	128	152	176	200	216	288	304	336	360	392
16.	<i>Magnētiskā potenciāla kritums rotorā</i>	$F_r = l_r H_r$	24.46	29	36	42	49	56	60	80	85	93	100	109
17.	<i>Indukcija jūgā</i>	$B_j = \frac{\Phi_M}{0.022}$	0.42	0.52	0.63	0.73	0.84	0.94	1.05	1.37	1.48	1.6	1.73	1.88
18.	<i>Magnētiskā lauka intensitāte</i>	H_j	328	417	506	613	724	848	986	1860	2620	4100	9400	17100
19.	<i>Magnētiskā potenciāla kritums jūgā</i>	$F_j = H_j l_j$	91.2	116	141	170	201	236	274	517	728	1140	2613	4754
20.	<i>Magnētiskā potenciāla kritums</i>	$F_f = 2F_z + F_p + F_j$	801	1003	1208	1420	1634	1856	2086	3057	3620	4802	7413	10997
21.	<i>Tukšgaitas fāzes EDS</i>	$E_0 = 2 \cdot 4.44 \cdot f_1 \cdot \frac{N_s}{a} \cdot w_k \cdot k_{w1} \cdot \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2}$	30	37	45	52	60	67	75	97	104	110	115	119
22.	<i>Tukšgaitas līnijas EDS</i>	$E_l = 1.73 E_0$	52	65	78	91	103	116	129	167	179	190	199	207



P.4.2.att. Eksperimentālā ģenerators $Z_1=24$ un $Z_2=10$ tukšgaitas raksturliktne

VEKTORIĀLĀ MAGNĒTISKĀ POTENCIĀLA VĒRTĪBAS NOTEIKŠANAS GRAFISKAIS VEIDS

Virknei vektoriālā magnētiskā potenciāla A vērtībām tika noteiktas ierosmes tinuma MDS vērtības F_f (sk.P.5.1.tab.), uzdotai $F_f=2250$ A vērtībai nepieciešamas atrast vektoriālo magnētisko potenciālu.

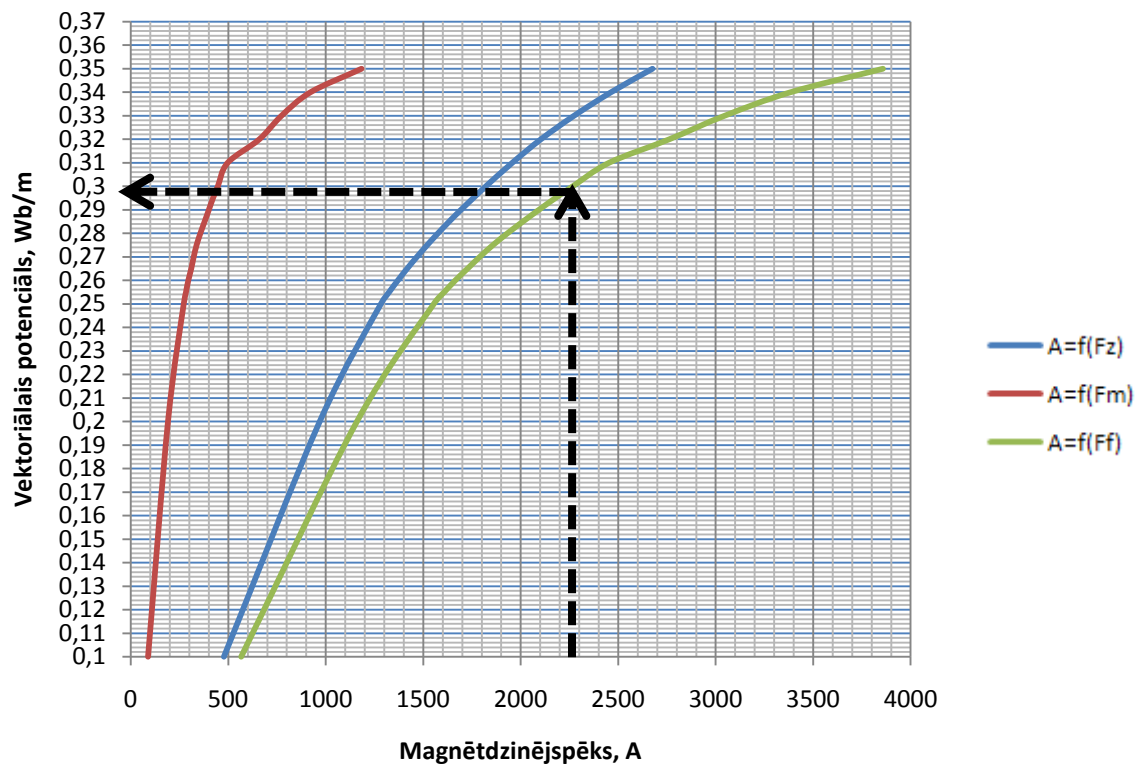
Vektoriālā magnētiskā potenciāla vērtību var noteikt ar vienu no zemāk sniegtajiem veidiem: grafisko, Ņūtona interpolācijas polinomu metodi, vai izmantojot parabolisko interpolāciju. Aprēķina metožu, izmantojot Ņūtona interpolācijas polinomus un parabolisko interpolāciju, teorija aprakstīta darbā [98].

P.5.1.tabula

Lielumi, kas raksturo induktorgeneratora magnētisko lauku

Nr.	$A, \text{Wb/m}$	Φ, Wb	F_z, A	F_m, A	F_f, A
0	0.1	0.023	478.04	88.25352	566.2935
1	0.2	0.046	969.26	190.5895	1159.85
2	0.25	0.058	1282.7	271.2798	1553.98
3	0.255	0.059	1324.7	282.7076	1607.408
4	0.26	0.060	1369.6	294.6283	1664.228
5	0.265	0.061	1417.2	309.7636	1726.964
6	0.27	0.063	1467.4	322.3656	1789.766
7	0.275	0.064	1520	336.9682	1856.968
8	0.28	0.065	1575	356.392	1931.392
9	0.285	0.066	1632.5	378.2564	2010.756
10	0.29	0.067	1692.9	399.927	2092.827
11	0.295	0.068	1756.2	421.1894	2177.389
12	0.3	0.069	1820.5	446.0477	2266.548
13	0.31	0.072	1956.1	496.3723	2452.472
14	0.32	0.074	2102.9	658.8819	2761.782
15	0.33	0.076	2272.6	772.3192	3044.919
16	0.34	0.079	2462.3	920.8408	3383.141
17	0.35	0.081	2675.1	1182.773	3857.873

Tiek izveidots izteiksmes $A=f(F_f)$ grafiks un pēc tā tiek noteikta vektoriālā potenciāla vērtība, sk.P.5.1.att. Šajā gadījumā pie $F=2250$ A – $A=0.298$ Wb/m.



P.5.1.att. Izteiksmju $A=f(F_z)$, $A=f(F_m)$, $A=f(F_f)$ līknes

**VEKTORIĀLĀ MAGNĒTISKĀ POTENCIĀLA VĒRTĪBAS NOTEIKŠANA,
IZMANTOJOT PARABOLISKO INTERPOLĀCIJU**

Saīsināsim mūsu tabulu P.4.1., lai aproksimētu uzdoto funkciju ar septītās pakāpes polinomu

$$P_7(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 + a_7x^7. \quad (\text{P.6.1})$$

P.6.1.tabula

Ierosmes MDS vērtības atkarība no vektoriālā magnētiskā potenciāla lieluma

i	x_i	y_i
0	566.29352	0.1
1	1553.979775	0.25
2	1664.228303	0.26
3	1789.765565	0.27
4	1931.392048	0.28
5	2092.827008	0.29
6	2266.54773	0.3
7	2761.781875	0.32

Uzrakstām vienādojumu sistēmu koeficientu $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ noteikšanai:

$$a_0 + 566.2a_1 + 320688.3a_2 + 181603735a_3 + 1.02841 \cdot 10^{11}a_4 + 5.82382 \cdot 10^{13}a_5 + 3.29799 \cdot 10^{16}a_6 + 1.87 \cdot 10^{19}a_7 = 0.1 \quad (\text{P.6.2})$$

$$a_0 + 1553.9a_1 + 2414853.1a_2 + 3752632941a_3 + 5.83152 \cdot 10^{12}a_4 + 9.06206 \cdot 10^{15}a_5 + 1.41 \cdot 10^{19}a_6 + 2.19 \cdot 10^{22}a_7 = 0.25 \quad (\text{P.6.3})$$

$$a_0 + 1664.2a_1 + 2769655.8a_2 + 4609339642a_3 + 7.670998 \cdot 10^{12}a_4 + 1.27663 \cdot 10^{16}a_5 + 2.1246 \cdot 10^{19}a_6 +$$

$$=3.54*10^{22} a_7=0.26 \quad (\text{P.6.4})$$

$$a_0+1789.7a_1+3203260.7a_2+5733085836a_3+1.02609*10^{13}a_4+1.83646*10^{16}a_5+3.28683*10^{19}a_6 \\ +5.88*10^{22} a_7=0.27 \quad (\text{P.6.5})$$

$$a_0+1931.3a_1+3730275.2a_2+7204623936a_3+1.3915*10^{13}a_4+2.68752*10^{16}a_5+5.19066*10^{19}a_6+ \\ +1*10^{23} a_7=0.28 \quad (\text{P.6.6})$$

$$a_0+2092.8a_1+4379924.8a_2+9166425087a_3+1.91837*10^{13}a_4+4.01483*10^{16}a_5+8.40233*10^{19}a_6 \\ +1.76*10^{23} a_7=0.29 \quad (\text{P.6.7})$$

$$a_0+2266.5a_1+5137238.6a_2+11643796515a_3+2.639*10^{13}a_4+5.9817*10^{16}a_6+ \\ +1.35578*10^{20} a_6+3.07*10^{23} a_7=0.3 \quad (\text{P.6.8})$$

$$a_0+2761.782a_1+7627439a_2+2.11*10^{10}a_3+5.82*10^{13}a_4+1.61*10^{17}a_6+4.44*10^{20}a_6+ \\ +1.23*10^{24} a_7=0.32 \quad (\text{P.6.9})$$

Atrisinot šo sistēmu, iegūstam

$$a_0=3.66;$$

$$a_1=-0.01762;$$

$$a_2=3.44*10^{-5};$$

$$a_3=-3.5*10^{-8};$$

$$a_4=2.08*10^{-11};$$

$$a_5=-7.2*10^{-15};$$

$$a_6=1.35*10^{-18};$$

$$a_7=-1.1*10^{-22};$$

un tabulas veidā uzdotas funkcijas aproksimācijas polinoms ir

$$P_7(x)= 3.66-0.01762x+3.44*10^{-5}x^2-3.5*10^{-8}x^3+2.08*10^{-11}x^4-7.2*10^{-15}x^5+1.35*10^{-18}x^6-1.1*10^{-22}x^7 \quad (\text{P.6.10})$$

Mūsu gadījumā $x=2250$, tad $P_7(x)=0.299033$. Tad meklējamais vektoriālais potenciāls ir vienāds ar $A=0.299033$ Wb/m.

Pakāpeniski samazinot polinomu skaitu, iegūstam:

$$P_6(x)=0.29904$$

$$P_5(x)=0.29906$$

$$P_4(x)=0.29907$$

$$P_3(x)=0.29909$$

$$P_2(x)=0.29911$$

$$P_1(x)=0.2993.$$

**VEKTORIĀLĀ MAGNĒTISKĀ POTENCIĀLA VĒRTĪBAS NOTEIKŠANA,
IZMANTOJOT ŅŪTONA INTERPOLĀCIJAS POLINOMUS**

P.7.1.tabula

Ierosmes MDS vērtības atkarība no vektoriālā magnētiskā potenciāla lieluma

<i>i</i>	<i>x_i</i>	<i>y_i</i>
0	566.29352	0.1
1	1159.84953	0.2
2	1553.97978	0.25
3	1607.40757	0.255
4	1664.22830	0.26
5	1726.96359	0.265
6	1789.76557	0.27
7	1856.96823	0.275
8	1931.39205	0.28
9	2010.75637	0.285
10	2092.82701	0.29
11	2177.38944	0.295
12	2266.54773	0.3
13	2452.47225	0.31
14	2761.78188	0.32
15	3044.91918	0.33
16	3383.14080	0.34
17	3857.87283	0.35

Sastādām galīgo diferencu tabulu (sk.P.4.4.tabulu).

Galīgo diferencu tabula

x_i	y_i	Δy_i	$\Delta^2 y_i$	$\Delta^3 y_i$	$\Delta^4 y_i$	$\Delta^5 y_i$
566.29352	0.02316					
		0.02317				
1159.84953	0.04633		-0.01158			
		0.01159		0.00115		
1553.97978	0.05792		-0.01043		0.00927	
		0.00116		0.01043		-0.01970
1607.40757	0.05908		0.00000		-0.01042	
		0.00116		0.00000		0.01042
1664.22830	0.06024		0.00000		0.00000	
		0.00116		0.00000		0.00000
1726.96359	0.06139		0.00000		0.00000	
		0.00116		0.00000		0.00000
1789.76557	0.06255		0.00000		0.00000	
		0.00116		0.00000		0.00000
1856.96823	0.06371		0.00000		0.00000	
		0.00116		0.00000		0.00000
1931.39205	0.06487		0.00000		0.00000	
		0.00116		0.00000		0.00001
2010.75637	0.06603		0.00000		0.00001	
		0.00116		0.00000		-0.00001
2092.82701	0.06718		0.00000		-0.00001	
		0.00116		0.00000		0.00117
2177.38944	0.06834		0.00000		0.00116	
		0.00116		0.00116		-0.00348
2266.54773	0.06950		0.00116		-0.00232	
		0.00231		-0.00116		0.00348
2452.47225	0.07181		0.00000		0.00116	
		0.00231		0.00000		-0.00117
2761.78188	0.07412		0.00000		-0.00001	
		0.00232		0.00000		0.00001
3044.91918	0.07644		0.00000		0.00001	
		0.00231		0.00000		
3383.14080	0.07875		0.00000			
		0.00232				
3857.873	0.081					

Tā kā funkcija uzdots ar piecām zīmēm aiz komata, tad pēdējā zīme ir noapaļota, un tāpēc aprēķinos aprobežojamies ar piektās kārtas galīgajām diferencēm. Argumenta vērtībai $x=2250$, kas atrodas tabulas beigās, atbilstošo funkcijas vērtību aprēķinām, izmantojot Ņūtona otro interpolācijas formulu un augšupejošās galīgās diferences. Par x_0 vērtību pieņemam $x_0=2266.54773$. Tad

$$t = \frac{2250 - 2266,54773}{89.15829} = -0.1856 \quad (7.1)$$

Un iegūstam

$$\begin{aligned}
P_5(2250) = & 0.3 - 0.1856 \cdot 0.005 + \frac{-0.1856 \cdot (-0.1856+1)}{2} \cdot 0 + \frac{-0.1856 \cdot (-0.1856+1) \cdot (-0.1856+2)}{6} \cdot \\
& 0 + \frac{-0.1856 \cdot (-0.1856+1) \cdot (-0.1856+2) \cdot (-0.1856+3)}{24} \cdot 0 + \\
& \frac{-0.1856 \cdot (-0.1856+1) \cdot (-0.1856+2) \cdot (-0.1856+3) \cdot (-0.1856+4)}{120} \cdot 0 = \\
0.299072 & \qquad \qquad \qquad (7.2)
\end{aligned}$$

Iegūtajos vektoriālā magnētiskā potenciāla vērtību rezultātos starpība ir mazāka par vienu procentu, kas liecina par šo metožu korektumu. Šajā darbā vektoriālā magnētiskā potenciāla noteikšanai tika izmantoti Ņūtona interpolācijas polinomi.

2. Сравнение параметров точек регулировочных характеристик опытного генератора и серийного приведено в Табл.1. Характеристики приведены на Рис.1

Таблица 1

Генератор	Режим	Iвозб., А	n, мин ⁻¹	Параметры нагрузки	
				Uвыпр. В	Iнагр. А
Ротор 14 зубцов	Хол.ход	0,24	3000	142	0
Ротор 10 зубцов		0,35	3000	142	0
Ротор 14 зубцов	P=32кВт	3,0	879	142	226
Ротор 10 зубцов		3,0	952	142	226
По ПМ	Хол.ход	0,2не менее	3000±10	142±0,5	0
	P=32кВт	3±0,1	950±50	142±0,5	226±0,5

3. Сравнение параметров точек характеристик холостого хода при n= 950 мин⁻¹ приведено в Табл.2. Характеристики сравнения напряжений после выпрямителя приведены на Рис.2

Таблица 2

Генератор	Iвозб., А	Улин., В	Uвыпр., В
Ротор 14 зубцов	5	177	245
Ротор 10 зубцов		153	207
Ротор 14 зубцов	4	176	242,8
Ротор 10 зубцов		151	204,4
Ротор 14 зубцов	3	172	237,6
Ротор 10 зубцов		148	200
Ротор 14 зубцов	2	158	217,4
Ротор 10 зубцов		138	186
Ротор 14 зубцов	1	104	140
Ротор 10 зубцов		90	122

Orig. inv. N
Paraksts, datums
Dubl. inv. N
Dubl. inv. N
Paraksts, datums
Dubl. inv. N
Paraksts, datums

izm. Lapa Dokum. N Paraksts Dat.

ОТР121.397

Lapa
2

4. Результаты нагревов в часовом режиме при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $t_{\text{окр}} = 15^\circ \text{C}$ приведены в Табл.3.

Таблица 3

Генератор	Увыпр. В	Инагр. А	Рнагр. кВт	Превыш. Тем., °С		Нагрев, °С			
				Обмотка возб.	Обмотка стат.	Сторона привода		Противоп. сторона	
						Корп.	Подш	Корп	Подш
Ротор 14 зубцов	142	226,0	32,09	78	123	87	54	86	61
Ротор 10 зубцов	142	228,4	32,43	36	64	50	42	55	62
Допустимые по ПМ	142	226	32	50	75	---	45	---	75

5. Точки характеристики короткого замыкания приведены в Табл. 4 .
Характеристика короткого замыкания при $n = 950 \text{ мин}^{-1}$ приведена на Рис. 3

Таблица 4

Ик.з., А	Ив.г., А
275	3
218	2
122	1
63	0,5

6. Осциллограммы форм линейных напряжений приведены на Рис.4

Выводы

1. По контрольной точке регулировочной характеристики видно, что генератор с 14-ти зубцовым ротором принимает нагрузку ниже на 73 мин^{-1} .
2. Нагрев корпуса индуктора генератора по сравнению с серийным увеличился на $31-37^\circ \text{C}$. Нагрев обмоток статора увеличился на 59°C , возбуждения на 42°C и превышает допустимый по ПМ.

Paraksts, datums

Dubl. inv. N

Dubl. inv. N

Paraksts, datums

Orig. inv. N

lzm.	Lapa	Dokum. N	Paraksts	Dat.
------	------	----------	----------	------

ОТР121.397

Лара
3

Orig. inv. N Paraksts, datums
 Inv. N vietā
 Dubl. inv. N Paraksts, datums

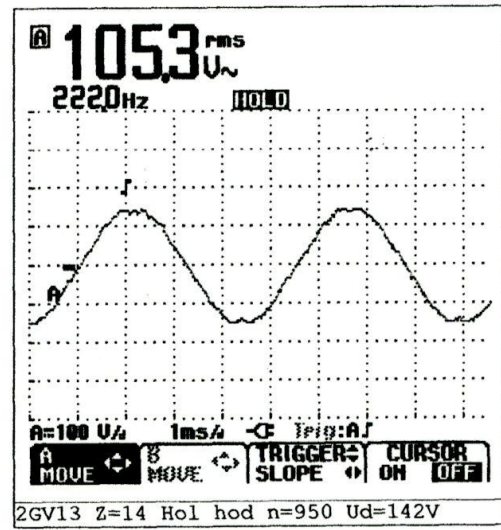
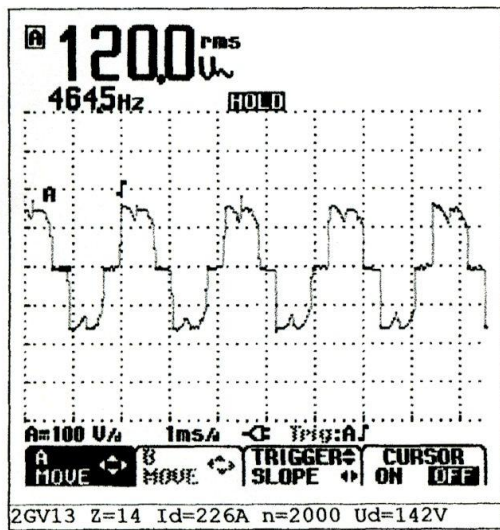
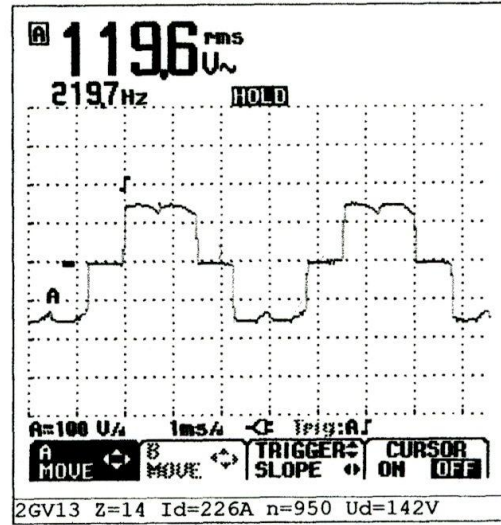
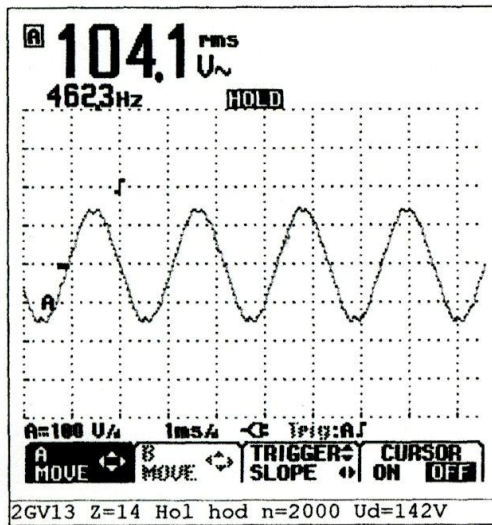


Рис.4 Формы кривых напряжений при $P_n=0\text{kBT}$ и $P_n=32\text{kBT}$

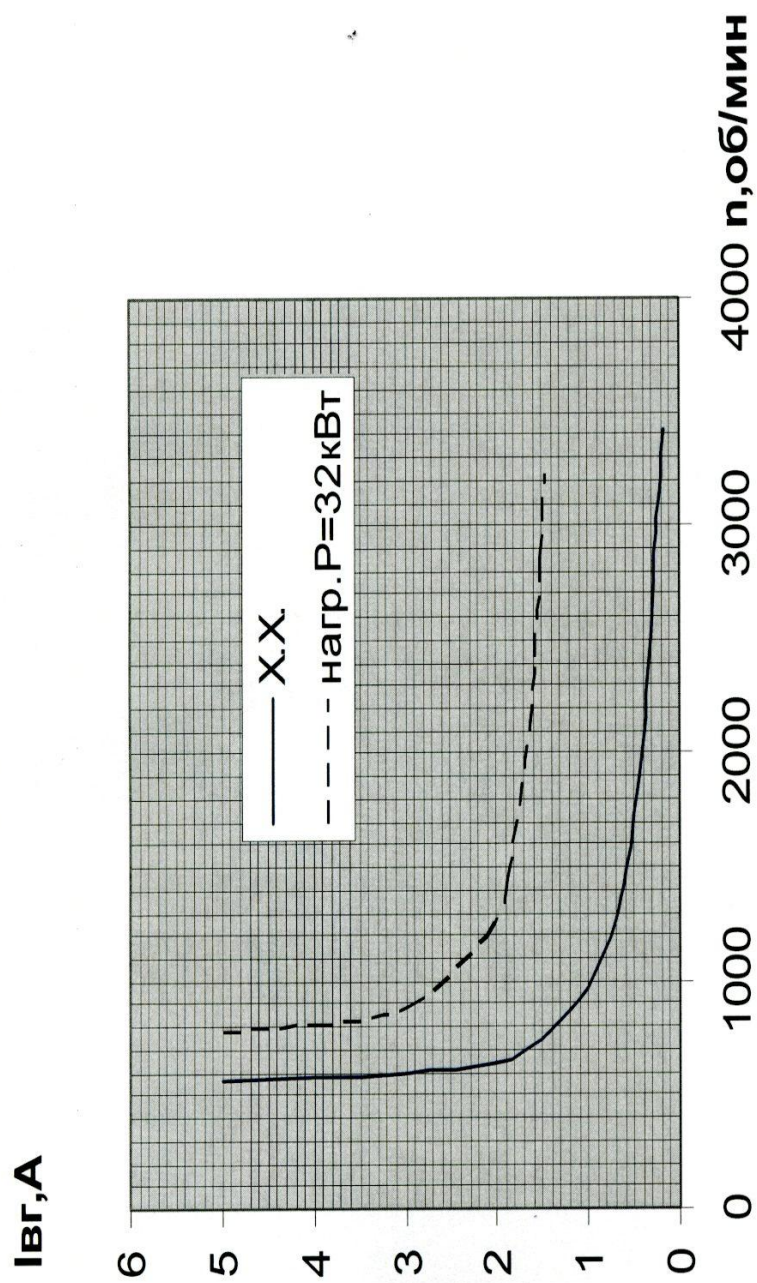


Рис.1 Регулировочные характеристики при $R_H=0$ кВт и $R_H=32$ кВт

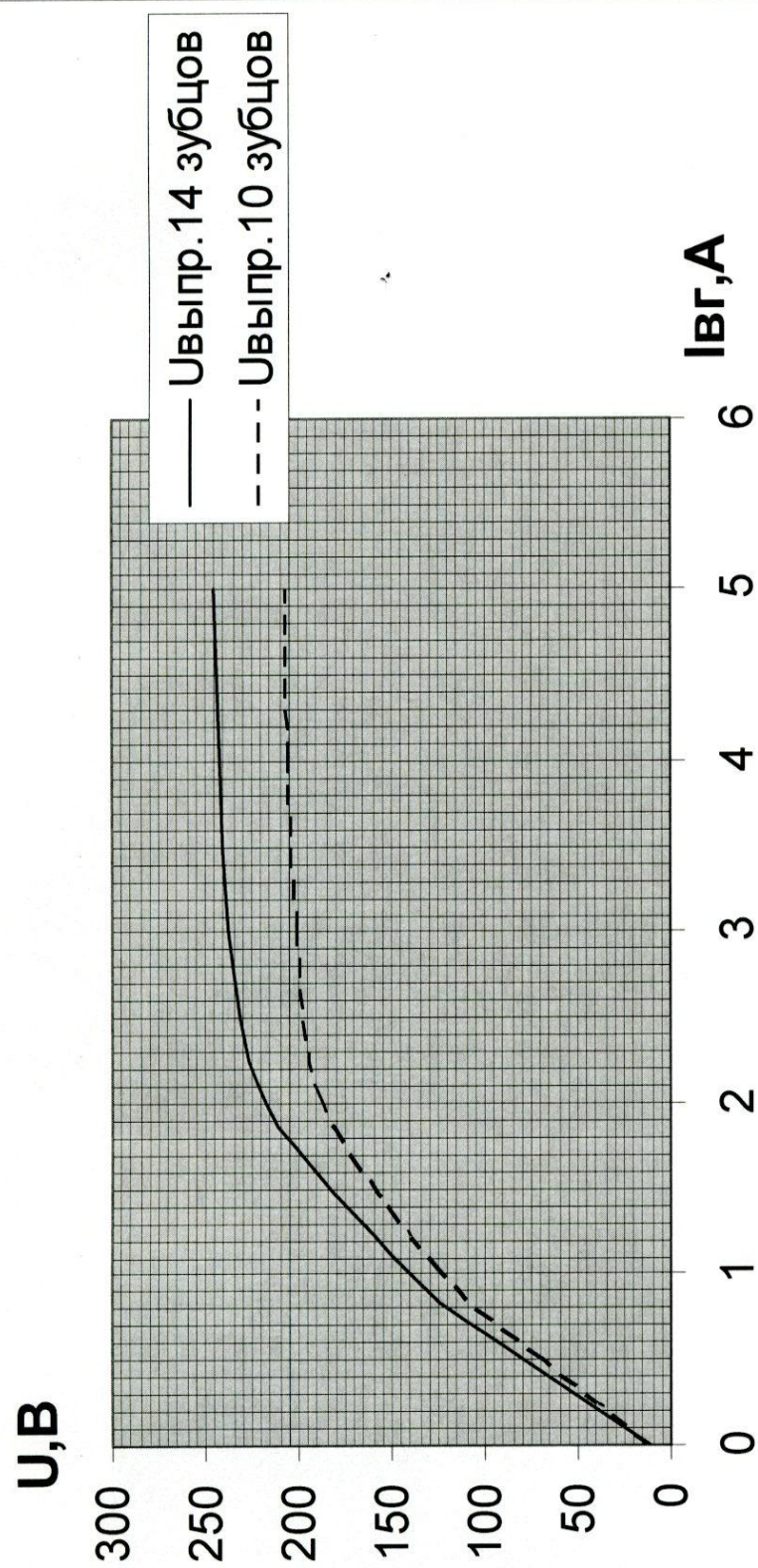


Рис.2 Характеристики холостого хода при $n=950\text{мин}^{-1}$

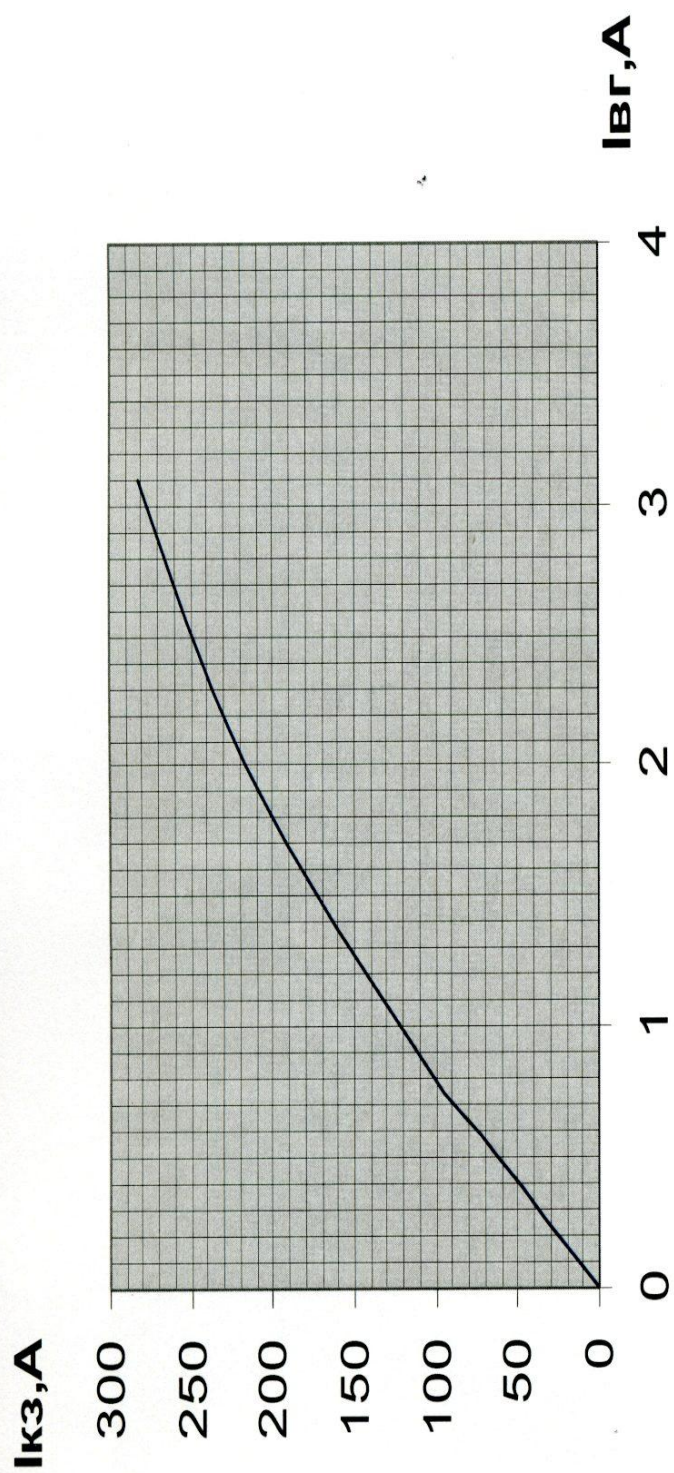


Рис.3 Характеристика короткого замыкания