

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
**Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte**  
**Enerģētikas institūts**

**Aleksandrs Meņajevs**

**MAZJAUDAS VĒJENERĢĒTISKĀS IEKĀRTAS  
EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA AR  
MOMENTELEKTRODZINĒJU BEZ REDUKTORA  
ORIENTĒŠANAS SISTĒMĀ**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs:  
Dr.hab.sc.ing., profesors  
**N. Levins**

**RTU Izdevniecība**  
**Rīga -2006**

# Darba vispārējais raksturojums

## Darba aktualitāte

Pēdējos gados visās pasaules civilizētās valstīs, tai skaitā arī Latvijā, notiek netradicionālo enerģijas avotu izmantošanas tehnoloģiju aktīvi meklējumi. Tas saistīts ar elektropatēriņa pieaugumu, organiskā un kodolreakciju kurināmā krājumu ierobežotību, tā sadārdzinājumu, ar stingrākām ekoloģiskām prasībām. Sevišķa interese ir par atjaunojamiem energoresursiem-Saules, vēja, zema potenciāla ūdenstilpņu, jūru, Zemes siltuma, biomasas enerģiju un par efektīvu pārveidotāju radīšanu šo enerģiju pārveidošanai elektriskā, siltuma un mehāniskā enerģijā. Netradicionālo enerģijas avotu iespējas ir praktiski neierobežotas, bet to utilizācijai vajadzīgas principiāli jaunas sarežģītas tehnoloģijas, dārgi materiāli un ierīces. Tāda netradicionāla atjaunojama enerģijas avota kā vējš izmantošana ir saprātīgs un mērķtiecīgs risinājums arī Latvijai. Vēja enerģija un tās iegūšanai izveidotie pārveidotāji ir ekoloģiski tīri un praktiski neizjauc Zemes enerģētisko līdzsvaru.

Latvijā jau uzstādītas un elektrotīkliem pieslēgtas ārzemju ražojuma vēja elektrostacijas ar kopējo jaudu apmēram  $25 \cdot 10^3$  kW. Šīs modernās, bet dārgas iekārtas paredzētas centralizēto energoapgādes sistēmu energoietilpības palielināšanai.

Nemot vērā Latvijas lauku iedzīvotāju zemo pirkspēju, vēja elektroiekārtām (VEI), kuras izmanto fermeri, jābūt lētām, ar vienkāršu apkalpošanu un drošām ekspluatācijā, vieglām, ekonomiskām, klusām, citādi sakot, ar augstu efektivitāti. Šiem kritērijiem atbilst tiešas piedziņas VEI, kuru sistēmas un mehānismi nesatur zema drošuma multiplikatorus un reduktorus. Tādu vēja iekārtu var konstruēt, piemēram, pielietojot daudzpolu ģeneratoru, kas tieši savienots ar vēja turbīnu. Jau izstrādātas lēngaitas ģenerators konstrukcijas ar labiem masas, gabarītu un enerģētiskiem rādītājiem. Taču tādu VEI azimutālas orientēšanas sistēmā paliek reduktors ar lielu pārnesumskaitli. Tas ir nedrošs elements, kas prasa būtiskus ieguldījumus tehniskā apkalpošanā, izsauc piespiedu dīkstāves profilakses un atjaunošanas remontdarbu veikšanas laikā un samazina azimutālas orientēšanas precizitāti. Pietiek norādīt, ka sakarā ar nepilnībām esošajās azimutālas orientēšanas sistēmās, tiek zaudēti 15 % vēja enerģijas.

Tiek piedāvāts mazjaudas tiešas piedziņas VEI efektivitātes tālākas paaugstināšanas risinājums, izveidojot bezreduktora azimutālas orientēšanas sistēmu, kas vēja turbīnu nepārtraukti tur vēja virzienā. Darbs veltīts šī aktuālā uzdevuma risināšanai.

## Darba mērķis, objekts un pētījumu uzdevumi

Disertācijas mērķis izstrādāt priekšlikumus un rekomendācijas mazjaudas VEI efektivitātes paaugstināšanai, pilnveidojot orientēšanas sistēmu, kas turbīnu tura vēja virzienā.

Pētījuma objekts ir bezreduktora azimutālas orientēšanas sistēma un daudzpolu momentdzinēja izstrādāšana tai.

Lai sasniegtu norādīto mērķi, uzstādīti un risināti sekojoši uzdevumi:

- izstrādāta konstrukcija bezkontakta daudzpolu servodzinējam ar lielu īpatnējo momentu ;
- pamatots šī momentdzinēja matemātiskais modelis;
- optimizēti daudzpolu momentdzinēja konstruktīvie parametri, kas nodrošina minimālu masu un mazu elektropatēriņu;
- izstrādāts algoritms un shēma VEI orientācijai vēja virzienā ar momentdzinēju orientēšanas-vadīšanas kontūrā;

- eksperimentāli pārbaudīti galvenie teorētiskie pieņēmumi par bezreduktora momentdzinēja izmantošanas lietderīgumu VEI orientēšanas sistēmā;
- izvērtēta mazjaudas VEI vēja orientēšanas sistēmas tālākas attīstības un pilnveidošanas perspektīva.

## **Pētījumu metodes**

Izvirzīto uzdevumu risināšana tika realizēta ar matemātiskiem modeļiem matricu formā, izmantojot magnētisko vadāmību izvirzījumus Furjē rindā, pie kam magnētisko vadāmību izvirzījuma koeficientu aprēķināšanai tika pielietota galīgo elementu skaitliskā metode. Aprēķini tika salīdzināti ar eksperimentāliem pētījumiem, kurus veicām AS REM rūpnīcas laboratorijā.

## **Darba zinātniskā novitāte**

Zinātniskā novitāte ir:

- pamatojumā, ka mazjaudas VEI vēja orientēšanas sistēmās ir lietderīgi izmantot liela momenta bezkontakta dzinējus, kuru rotors tieši savienots ar vēja iekārtas gondolu, bet stators ar balsta torni, kas paaugstina VEI drošumu un samazina tās masu;
- piedziņas momentdzinēju, kas izveidoti pēc daudzpolu aksiālo induktormašīnu ar pastāvīgo magnētu ierosmi, shēmas izmantošanā;
- bezkontakta momentdzinēju ar daudzpolu beztinumu rotoru izvēlē un to izpētes metodes pamatošanā;
- pielietotā matemātiskā modeļa, daudzpolu momentdzinēja racionālu konstrukciju un režīmu izmantošanā;
- galveno sakarību noteikšanā, kas nodrošina VEI orientēšanas sistēmas momentdzinēja augstu īpatnējo momentu un minimālu elektropatēriņu;
- funkcionālās shēmas izstrādē VEI azimutālās orientēšanas momentdzinēju vadīšanai pēc vējrāža signāliem, šīs sistēmas galveno dinamisko parametru noteikšanā un tās droša darba ar nepieciešamo leņķisko precizitāti apstiprināšanā.
- momentdzinēju matemātisko modeļu, kurus var izmantot dažādu jaudu VEI bezreduktoru azimutālās orientēšanas sistēmu izstrādē un izveidošanā, pielietošanas lietderības pamatošanā.

Darba zinātniskās novitātes elementi aizstāvēti ar diviem patentiem un izgudrojumiem.

## **Darba praktiskā nozīme**

Darba praktiskā nozīme ir:

- jaunas konstrukcijas daudzpolu momentdzinēju izstrādāšana;
- shēmu izstrāde VEI orientēšanai vēja virzienā;
- liela momenta induktordzinēju izgatavošanas un izmēģinājumu tehnoloģijas izstrāde.

## **Darba rezultātu realizācija**

Rūpnīcā RER izstrādāta konstruktordokumentācija daudzpolu momentdzinēju ražošanai un izgatavoti VEI orientēšanas sistēmas momentdzinēju konstrukcijas iespējamo variantu izmēģinājuma paraugi.

## Darba aprobācija

Disertācijas darba galvenie rezultāti tika ziņoti

### - starptautiskās konferencēs:

- Elektrisko induktormašīnu teorijas izstrādne un tehniski ekonomisko rādītāju uzlabošana // 42. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga 2001 / Enerģētika un elektrotehnika, 4. Sērija, 4. Sējums, Rīga, 2001, 23-29 lpp;
- Daudzpolu momentdzinējs // 43. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga 2003; / Enerģētika un elektrotehnika, 4. Sērija, 10. Sējums, Rīga, 2003, 90-96 lpp;
- Многополюсный моментный двигатель индукторного типа. // The 13th International Conference ..Alternating Current Electric Drives" Proceeding, Ekaterinburg, Russia, 2005, pp 49-54;
- Multipole Double Feed High-Torque Electric Motors // The 11th European Conference on Power Electronics Proceeding. N0619, Dresden, Germany, 2005, 5pp;

### - citās konferencēs:

- Синтез аппроксимирующих выражений для определения характеристик синхронных генераторов. Тезисы докладов конф. вузов Прибалтики, Белоруссии и Молдавии, Вильнюс, 1985;
- Sinhrono ģeneratoru ātrdarbīgas automātiskas regulēšanas sistēmas", 40. RTU studentu zinātniskas un tehniskas konferences materiāli, 1999.g., lpp78-82;
- Kombinētas ierosmes induktor - ģenerators. 41. RTU studentu zinātniskas un tehniskas konferences materiāli, 2000.g., lpp.58-62.

## Izgdrojumi

1. Bezsmertnijs A., Pugačovs V., Mesņajevs A. Latvijas patents uz izgudrojumu "Kombinētas ierosmes induktorģenerators" LV 11715B, 1997.g.
2. Bezsmertnijs A., Levins N., Pugačovs V., Mesņajevs A. Latvijas patents uz izgudrojumu "Vēja enerģētiska ietaise" LV 11917B, 1998.g.

## **Publikācijas**

Disertācijas darba saturs publicēts 7 zinātniskos referātos un divos rakstos.

## **Darba apjoms**

Disertācija sastāv no anotācijas, ievada, 4 nodaļām, slēdzieniem un literatūras saraksta ar 62 nosaukumiem. Darbs izklāstīts uz 147 lappusēm, satur 45 zīmējumus un 16 tabulas.

## **Darba struktūra**

### **Anotācija**

#### **Ievads**

#### **1. Nodaļa. Mazjaudas vēja enerģētisko iekārtu efektivitātes paaugstināšanas iespēju analīze.**

- 1.1. Latvijas vēja enerģijas potenciāls un tā visefektīvākās izmantošanas iespējas.
- 1.2. Vēja enerģētisko iekārtu efektivitātes paaugstināšanas ceļi.
- 1.3. Daudzpolu momentdzinēju izmantošanas lietderīgums VEI orientēšanas sistēmās.
- 1.4. Secinājumi, pētījuma mērķi un uzdevumi.

#### **2. Nodaļa. Daudzpolu momentdzinēju konstrukcijas un to matemātiskie modeļi**

- 2.1. Daudzpolu momentdzinēju izpētes metodes.
- 2.2. Laidenas rotācijas daudzpolu momentdzinēja konstrukcija.
- 2.3. Laidenas rotācijas daudzpolu momentdzinēja matemātiskais modelis.
- 2.4. Diskrētas griešanās momentdzinēja konstrukcijas īpatnības.
- 2.5. Diskrētas griešanās momentdzinēja matemātiskais modelis.
- 2.6. Laidenas un diskrētas griešanās daudzpolu momentdzinēju salīdzinošā analīze.
- 2.7. Secinājumi.

#### **3. Nodaļa. Daudzpolu momentdzinējs VEI orientēšanas sistēmā**

- 3.1. Daudzpolu momentdzinēja racionāla konstrukcija.
- 3.2. Momentdzinēja optimālie parametri.
- 3.3. Momentdzinēja masas un gabarītu rādītāju un zudumu novērtējums.
- 3.4. VEI azimutālās orientēšanas sistēmas ar momentdzinēju vadība.

3.5. Orientēšanas sistēmas dinamikas īpatnības, pielietojot diskrētas griešanās momentdzinēju,

3.6. Secinājumi

#### **4. Nodaļa. Momentdzinēju izmēģinājumu paraugu eksperimentālie pētījumi**

4.1. Eksperimentālo pētījumu programma un tās metroloģiskais nodrošinājums.

4.2. Asinhronā daudzpolu induktortipa dzinēja eksperimentālo pētījumu rezultāti.

4.3. Induktortipa momentdzinēja ar zobu tinumiem eksperimentālo pētījumu rezultāti.

4.4. Momentdzinēja ar zobu zonas ķemmveida struktūru efektivitātes palielināšanas iespēju eksperimentāla pārbaude

4.5. Divu polu izciļņu aptverošu vadības tinumu spoļu, izmantošanas priekšrocības.

4.6. VEI azimutālās orientēšanas momentdzinēju attīstības un pilnveidošanas perspektīvas.

4.7. Secinājumi.

**Slēdzieni**

**Literatūra**

# DARBA SATURS

## Anotācija

Noteikts darba virziens un tā aktualitāte. Raksturots kopējais apjoms. Izklāstīti pētījumu rezultāti.

## Ievads

Pēdējos gados Latvijā notiek netradicionālu enerģijas avotu izmantošanas tehnoloģiju meklējumi. Tāda netradicionāla atjaunojamas enerģijas avota kā vējš izmantošana ir saprātīgs un mērķtiecīgs risinājums arī Latvijai. Vēja elektroenerģija un pārveidotāji, kuri izveidoti tās ražošanai, ir ekoloģiski tīri un praktiski neizjauc Zemes enerģētisko līdzsvaru.

Latvijā jau uzstādīts desmitiem ārzemju ražojuma vēja elektrostaciju, kas pieslēgtas elektriskajiem tīkliem. Tās ir pietiekami dārgas iekārtas un paredzētas centralizētās elektroapgādes sistēmas energoietilpības palielināšanai. Vienlaikus daudziem lauku patērētājiem nav pieejami centralizētie tīkli, bet citiem, kaut arī ir pieslēgums pie kopējā elektrotīkla, elektroenerģija ir pārāk dārga un ne vienmēr pietiekami augstas kvalitātes. Tāpēc lauku fermeriem rodas vajadzība iegādāties autonomas mazjaudas vēja elektroiekārtas.

Visefektīvākās lauku mazas jaudas VEI ir vēja iekārtas, kurās pielietoti gredzenveida daudzpolu induktorģeneratori vai ģeneratori ar pastāvīgiem magnētiem, kas tieši savienoti ar vēja turbīnu.

Vēja enerģētisko iekārtu izstrādāšanā un izveidošanā ir panākumi ārzemju firmām: Nordex, Enercon, Pith Wind, Danish Wind Technology, JEC Energy, Ветрэн u.c. Latvijā ar VEI teoriju attīstību un pilnveidošanu nodarbojas LZA Fizikālās enerģētikas institūts, Rīgas Tehniskā universitāte, rūpnīca RER, kā arī vesela rinda firmu. Lielu ieguldījumu vēja enerģētikas teorijā un praksē devuši Latvijas zinātnieki un inženieri: V. Apsītis, A. Bezsmertnijs, V. Bezrukovs, J. Greivulis, A. Grundulis, Ļ. Domburs, J. Dirba, K. Ketners, N. Levins, V. Pugačevs, L. Ribickis, Z. Sīka, A. Serebjakovs. Vienlaikus VEI orientēšanas sistēmās līdz šim tiek izmantotas zema drošuma, dārgas un nepietiekoši precīzas ierīces, kas bāzējas uz mehāniskā reduktora ar lielu pāktresumskaitli izmantošanu.

Darbā, lai tālāk palielinātu tiešas piedziņas mazjaudas VEI efektivitāti, tiek piedāvāts tajās izmantot bezreduktora orientēšanas sistēmu ar daudzpolu momentdzinēju.

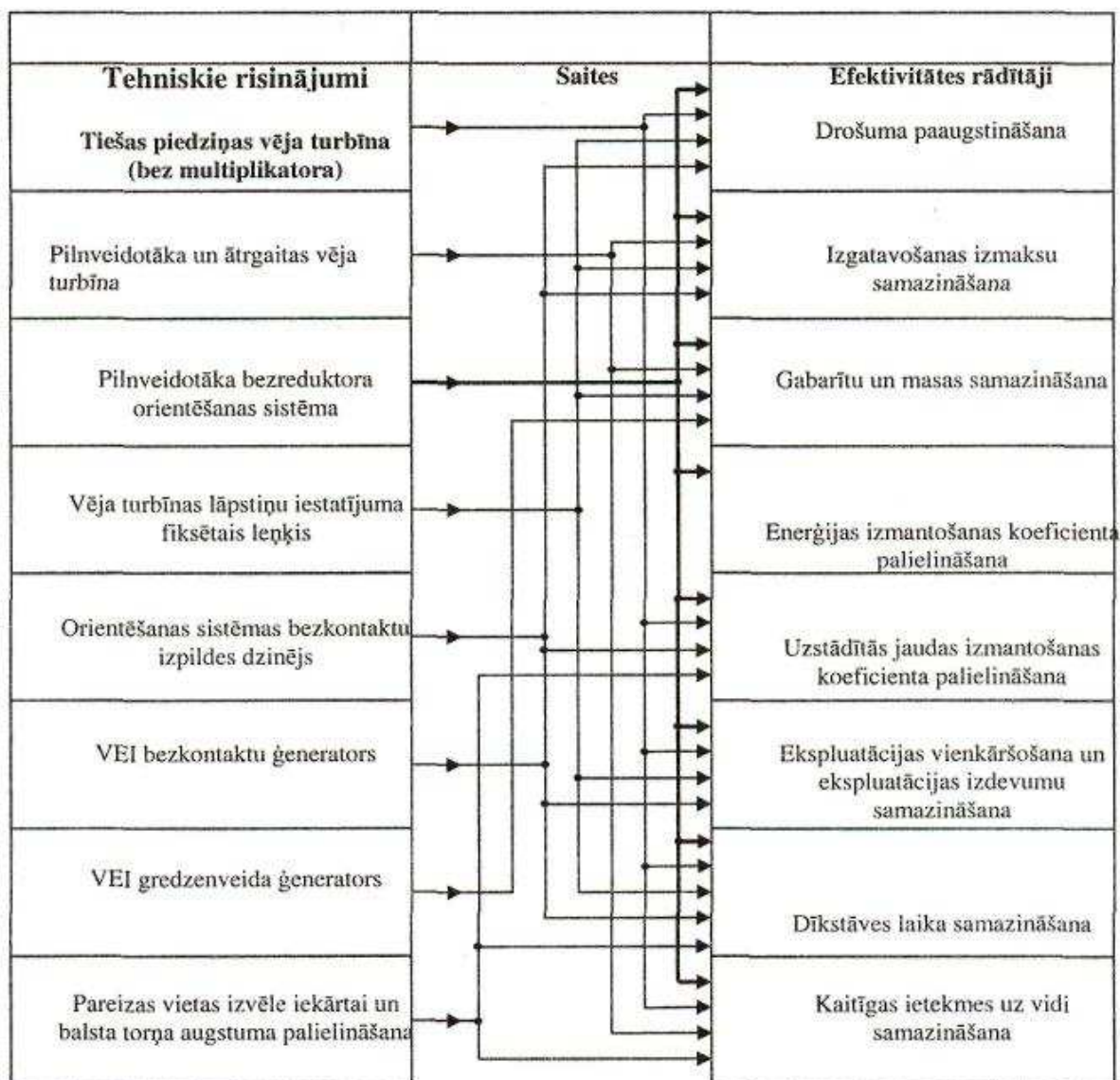
## 1. Mazjaudas vēja enerģētisko iekārtu efektivitātes paaugstināšanas ceļu analīze

Nodaļā tiek analizēts Latvijas vēja enerģētikas potenciāls un tiek noteikti rajoni, kur ir mērķtiecīgi uzstādīt VEI, kuras paredzētas pieslēgt elektrotīkliem, t.i. lielas jaudas VEI, gan arī mazjaudas autonomas VEI - lauku energopatērētājiem.

Tiek apstiprināts, ka VEI, kas domātas lauku rajoniem, jābūt ar ierobežotām jaudām - 4, 7 un 12 kW un tās mērķtiecīgi ir izvietot tikai trijās no četrām Latvijā esošām vēju zonām.

Parādīts, ka lauku VEI jābūt ar augstu efektivitāti, kas atkarīga no daudziem apstākļiem. Detalizēti analizēti visi apstākļi, no kuriem atkarīgs mazjaudas VEI drošums, gabarīti un masa,

to cena, uzstādītās jaudas un vēja enerģijas izmantošanas koeficienti un ekspluatācijas izdevumi, kā tas parādīts 1. zīm.



Zīm. 1 Mazjaudas VEI efektivitātes paaugstināšanas ceļu ilustrācija

Patreiz tiek izmantoti daudzi tehniski risinājumi, kuri padara mazjaudas VEI efektīvākas. No tiem galvenie ir tiešas piedziņas vēja iekārtu izveidošana. Tomēr pagaidām nedroša paliek VEI orientēšanas iekārta, kas veidota, izmantojot mehānisko reduktoru ar lielu pārnēsuskaaitli.

Izanalizēta virkne azimutālās orientēšanas sistēmas izveidošanas tehnisko risinājumu bez reduktora, t.i. ar tiešu izpildes orgānu piedziņu. Parādīts, ka visefektīvāk ir izmantot daudzpolu momentdzinēju. Pamatojoties uz izklāstīto, formulēti pētījuma mērķis un uzdevumi, kuri norādīti augstāk minētā nodaļā „Darba vispārējais raksturojums”



## 2. Daudzpolu momentdzinēju konstrukcijas un to matemātiskie modeļi

Otrajā nodaļā tiek pamatota daudzpolu momentdzinēju pētījumu kombinētā metode. Elektriskās mašīnās enerģijas pārveidošana notiek ar magnētiskā lauka starpniecību, kura enerģijas galvenā daļa ir koncentrēta gaisa spraugā. Induktoru un relaktances mašīnās rotors ir zobains bez tinumiem. Gaisa spraugai tādās mašīnās ir sarežģīta konfigurācija. Ir daudzas metodes lauka uzdevumu risināšanai. Tomēr vajadzība precīzāk un ātrāk aprēķināt magnētisko lauku un mašīnas raksturlīknes, lai veiktu parametru optimizāciju, lika griezties pie skaitļošanas tehnikas izmantošanas.

Ar esošām aprēķinu metodēm nevar pilnībā atrisināt problēmu, kas saistīta ar jaunu konstrukciju sintēzi un motivēšanu, ar jaunradīto elektrisko mašīnu optimālo parametru savstarpējo attiecību noteikšanu, kas ņemtu vērā šo mašīnu pielietojuma nosacījumus (griezes momentu, griešanās frekvenci, enerģijas zudumus, vadības ērtības, tehnisko apkālpju vienkāršošanu u.c). Kā pamatpaņēmieni daudzpolu momentdzinēju izpētē, izdevīgi pielietot magnētisko vadāmību metodi. Šī metode balstīta uz magnētiskās ķēdes ekvivalento shēmu izmantošanu un statora aktīvo elementu (aptīto polu izciļņu) magnētisko vadāmību attēlošanu, kā rotora pagrieziena leņķa periodisku funkciju Metode paredz šīs periodiskās funkcijas izvērējuma Furjē rindā koeficientu noteikšanai, izmantot magnētiskā lauka aprēķina skaitliskās metodes, piemēram, galīgo elementu metodi (GEM). Magnētisko vadāmību metode ir ērta gan analīzes, gan jaunu konstrukciju sintēzes un to salīdzināšanas un optimālo parametru izvēles gadījumos. Izmantojot magnētisko vadāmību metodi, kas balstās uz atsevišķu sarežģītas konfigurācijas apgabalu starp ferromagnētiskiem elementiem vadītspējas noteikšanu ar precīzu aprēķinu paņēmieniem, vieglāk ievērot visus apstākļus, kuri rodas, aprēķinot un analizējot elektriskās mašīnas ar sarežģītas formas apgabaliem starp statoru un rotoru ar divpusēju zobainību un iespējamu nesimetriskumu.

Saskaņā ar izvēlēto metodi statora  $k$ -tā zoba vadītspēja  $\lambda_k$  tiek izteikta ar Furjē rindu. Šo rindu izdevīgi veidot tikai no locekļiem ar atbilstošu leņķu kosinusiem, kas raksturo statora un rotora zobu savstarpējo stāvokli. Vispārīgā gadījumā katram statora polu izcilnim pie atbilstošām harmonikām būs savi koeficienti:

$$\lambda_k = \alpha_{0k} + \cos(Z_R \alpha - \gamma_k) + \alpha_{2k} \cos 2(Z_R \alpha - \gamma_k) + \dots + \alpha_{vk} \cos v_R \alpha - \lambda_k \quad (1)$$

Nākošais uzdevums ir noteikt polu izciļņu magnētiskās vadāmības izvērējuma Furjē rindā koeficientus  $\alpha_{0k}$  un  $\alpha_{1k}$  un tādas zobu zonas ģeometrijas pamatošana, kurā augstāko harmoniku komponentes ir ļoti mazas, t.i. praktiski to nav. Šim nolūkam izmantota viena no izplatītākajām skaitlisko aprēķinu metodēm - galīgo elementu metode (GEM).

Darbā dotas sakarības  $\lambda_R, \lambda_{RR}, \lambda_0 = \lambda_R - 0,5\lambda_{RR}$  un  $\lambda_\delta = \frac{b_z}{\delta}$ , kā arī piesātinājuma

koeficients  $k_{Fe}$  kā statora zoba platuma attiecības pret gaisa spraugu funkcijas, kuras atrastas no polu izciļņu magnētisko lauku aprēķiniem ar GEM zobu skaitam  $\alpha = 9$ , pie dažādām magnētiskās indukcijas  $B_\delta$  vērtībām gaisa spraugā un dažādām elektrotehniskā tērauda šķirnēm.

Tālāk tiek piedāvāts magnētiskās vadāmības koeficientus noteikt pēc formulām:

$$\alpha_0 = \frac{F \cdot \alpha \cdot l \cdot \mu_0}{2k_{Fe}} (\lambda_\delta + \lambda_{RR} + 2k_{Fe} \lambda_R);$$

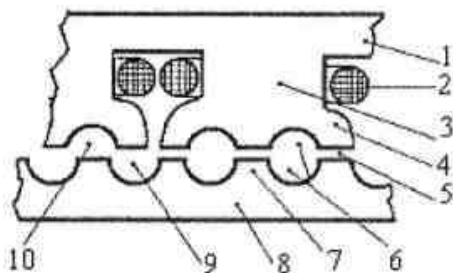
$$\alpha_1 = \frac{F \cdot \alpha \cdot l \cdot \mu_0}{2k_{Fe}} (\lambda_\delta + \lambda_{RR} - 2k_{Fe} \lambda_R),$$

kur  $\lambda_R$ ,  $\lambda_{RR}$  un  $\lambda_\delta = \frac{b_z}{\delta}$  - īpatnējās magnētiskās vadāmības, kuru fizikālā būtība paskaidrota 2. zīm. ;

$l$  — statora paketes biezums, m;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  - magnētiskā caurlaidība,  $\frac{H}{m}$ ;

$a$  - zobu skaits uz statora polu izciļņiem.



2. zīm. Induktordzinēja ar ķemmveida zobu zonas struktūru statora un rotora fragmenti, 1 - statora jūgs; 2 - tinumu spolīte; 3 - statora ar trim zobiem pola izvirzījums, 4 - statora zobs; 5 - gaisa sprauga starp statora

un rotora zobiem ar īpatnējo (uz statora paketes platuma / vienību) magnētisko vadāmību  $\lambda_\delta = \frac{b_z}{\delta}$ ; 6 - pretimstāvošās statora un rotora rievas ar kopējo īpatnējo magnētisko vadāmību  $\lambda_{RR}$ ; 7 - rotora zobs ar soli, kas vienāds ar soli pa statora zobu polu izvirzījuma robežās; 8 - rotora jūgs; 9 - rotora rieva ar īpatnējo magnētisko vadāmību attiecībā pret statora zobu  $\lambda_R$ ; 10 - statora rieva ar īpatnējo magnētisko vadāmību attiecībā pret statora zobu  $\lambda_R$

Šajā nodaļā tiek apskatītas arī dažādas momentdzinēju konstrukcijas VEI azimutālai orientācijai. Tiek piedāvāta daudzpolu asinhronā momentdzinēja ar plūdeņu griešanas konstrukcija (3. zīm.) un tās matemātiskais modelis matricas formā:

$$[u_{ik}] = [R_{ik}] \times [i_{ik}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{ik}] \quad (3)$$

Šeit

$[u_{ik}]$  - primāro un sekundāro spriegumu stabiņveida matrica;

$[R_{ik}]$  - primārā un sekundārā tinuma aktīvo pretestību un papildus rezistoru summāro pretestību diagonālā matrica;

$[i_{ik}]$  - fāzu vijumu strāvu stabiņveida matrica;

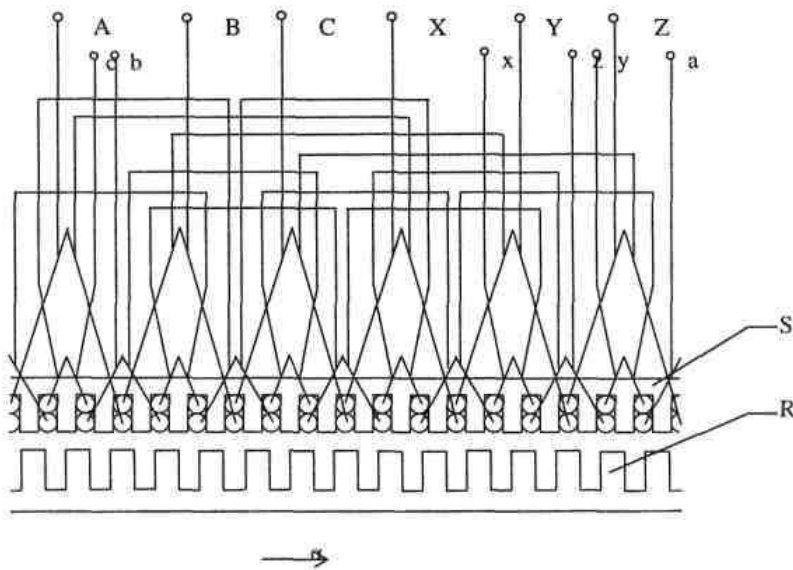
$[\lambda_{ik}]$  - statora polu izciļņu magnētisko vadāmību diagonālā matrica;

$[\Psi_{ik}] = [w_{ik}] \times [\lambda_{ik}] \times [w_{ik}]^T \times [\lambda_{ik}]$  fāžu tinumu magnētisko plūsmu saķēdējumu stabiņveida matrica;

kur

$$[w_{ik}] = \begin{bmatrix} w_1 & w_1 & w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -w_1 & -w_1 & -w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -w_1 & -w_1 & -w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_1 & w_1 & w_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_1 & w_1 & w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -w_1 & -w_1 \\ w_1 & 0 & 0 & 0 & -w_2 & 0 & 0 & 0 & w_2 & w_2 & 0 & 0 & 0 & -w_2 & 0 & 0 & w_2 \\ 0 & 0 & w_2 & w_2 & 0 & 0 & 0 & -w_2 & 0 & 0 & 0 & w_2 & w_2 & 0 & 0 & 0 & -w_2 \\ 0 & -w_2 & 0 & 0 & 0 & w_2 & w_2 & 0 & 0 & 0 & -w_2 & 0 & 0 & 0 & w_2 & w_2 & 0 \end{bmatrix}$$

tinumu spoļu vijumu taisnstūra matrica ar izmēriem 6x18 (pēc kopējā fāžu un polu izciļņu skaita).



3. zīm. Induktortipa asinhronā momentdzinēja konstruktīvā shēma ar parametriem  $m_f = m_2 - 3$ ,  $n_p = 18$ ,  $a = 1$ ,  $Z_R = 15$ ; kur S - stators, R - rotors, A-X, B-Y, C-Z primārais tinums; a-x, b-y, z-c - sekundārais tinums.

Izdarot pārveidojumus saskaņā ar (3) un diferencējot, pārejam uz vienādojumu komplekso formu:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 + j \dot{I}_1 X_1 - \dot{E}_1; \\ \dot{E}_2' &= \dot{I}_2' \frac{R_2'}{s} + j \dot{I}_2' X_2' - j \dot{I}_2' \frac{X_{\sigma k}'}{s^2}; \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2', \end{aligned} \quad (4)$$

kur  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{I}_1$  - primārais spriegums un strāva;

$\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -j3a_1 w_1^2 \omega_1$  - primārās un sekundārās ķēdes EDS;

$X_1 = (6a_0 + X_{\sigma 1} - 3\alpha_1)w_1^2\omega_1$  - primārā tinuma izkļiedes pretestība;

$X_2' = X_2 \frac{w_1^2}{w_2^2} = (6\alpha_0 + \lambda_{\sigma 2} - 3\alpha_1)w_1^2\omega_1$  - sekundārā tinuma izkļiedes pretestība, reducēta

uz primāro ķēdi;

$R_1, R_2' = R_2 \frac{w_1^2}{w_2^2}$  - sekundārā un primāra aktīva pretestība, reducēta uz primāro ķēdi;

$I_2' = I_2 \frac{w_2}{w_1}$  - sekundārā strāva, reducēta uz primāro ķēdi;

$X_{ck}' = X_{ck} \frac{w_1^2}{w_2^2} = \frac{1}{\omega_1 C_k} \cdot \frac{w_1^2}{w_2^2}$  - kompensējošā kondensatora (kurš, var tikt ieslēgts

sekundārā ķēdē, lai palielinātu sekundārās strāvas,) pretestība, reducēta uz primāro ķēdi;

$\lambda_{\sigma 1}$ , un  $\lambda_{\sigma 2}$  rievu un pieres daļu izkļiedes vadāmības.

Iegūto vienādojumu (4) analīze parāda, ka tie pilnībā atbilst vienādojumiem, kas atspoguļo daudzpolu asinhronā momentdzinēja ar trīsfāžu tinumiem uz statora un rotora sakarības un darbības principus. Tādā kārtā sintezētā induktortipa momentdzinēja ar plūdeņu rotora griešanas (3. zīm.) konstrukcija atbilst iepriekš reprezentētajam modelim.

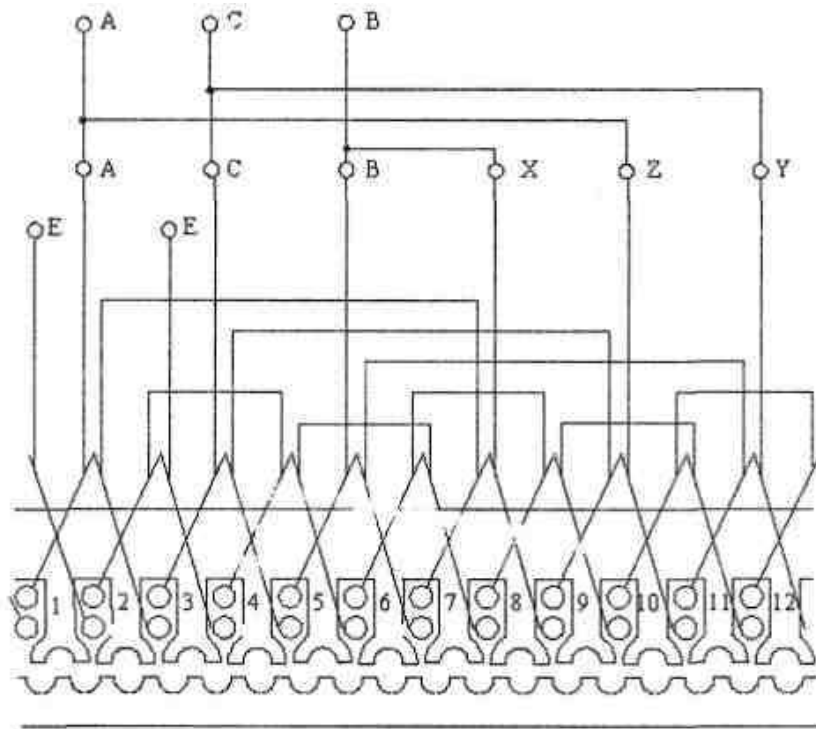
Moments, ko attīsta elektrodzinējs, ņemot vērā papildus pretestību  $R_p$ ,

$$M = \frac{3Z_R U_1^2}{2\pi f_1 \left[ 4(r_2' + R_p') \frac{\alpha_0^2}{\alpha_1^2} + 2R_1 \frac{\alpha_0}{\alpha_1} \right]}. \quad (5)$$

Ar reprezentētā matemātiskā modeļa palīdzību, var atrisināt sekojošus inženierizdevumus:

- noteikt dzinēja galvenos ģeometriskos izmērus un parametrus;
- noteikt attīstāmo momentu un izvēlēties nepieciešamo dzinēja vadības shēmu;
- optimizēt dzinēja konstrukciju;
- noskaidrot pārejas procesu īpatnības u.t.t.

Tālāk izstrādāta un aprakstīta konstrukcija diskrētas griešanās momentdzinējam ar divpadsmit polu izciļņiem, no kuriem uz ikkatra ir divi zobi ( $a = 2$ ). Vadības fāžu skaits  $m = 3$ , kuras saslēgtas trīsstūrī, bet uzmagnetizēšanai paredzēts ierosmes tinums (E - E). 4. zīmējumā parādītā konstruktīvā shēma pagaidām nav optimizēta vadība pēc fāžu skaita ( $m = 3$ ), tāpēc tā turpmāk var tikt izmainīta.



4. zīm. Viena no iespējamām konstruktīvām shēmām induktortipa momentdzinējam ar diskrēto griešanos: 1-12 -polu izvirsījumi, A-X, B-Y, C-Z- vadības tinumu fāzes, E-E- papildmagnetizēšanas (ierosmes) tinums

Daudzpolu momentdzinēja ar diskrēto griešanos konstrukcijas pamatā ir sekojoši principi:

- induktortipa dzinējs, ar ķemmveida zobu zonu, m -vadības fāzēm un ierosmes tinumu;
- statora (rotora) zoba platums ir vienāds ar vienu trešdaļu no rotora zobu iedaļas, dobumam (rievai) starp zobiem ir pusriņķa forma, magnētisko vadāmību izvirsījumā Furjē rindā izslēgtas augstāko harmonisko komponentes.

Izvēlētā elektrodzinēja matemātiskais modelis pēc struktūras analogs dzinēja modelim ar plūdenu rotora griešanos, t.i.

$$[u_{ik}] = [R_{ik}] \times [i_{ik}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{ik}] \quad (6)$$

Izmantojot plūsmu saķēdējuma izteiksmes  $[\Psi_{ik}] = [w_{ik}] \times [\lambda_{ik}] \times [w_{ik}]^T \times [i_{ik}]$ , var iegūt elektromagnētiskā momenta vienādojumu:

$$\begin{aligned}
M &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{i=1}^4 \Psi_i i_i = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \alpha} [L_k i_A^2 + 2L_m i_E i_A \cos(Z_R \alpha - 345^\circ) + \\
&+ L_k i_B^2 + 2L_m i_E i_B \cos(Z_R \alpha - 105^\circ) + L_k i_C^2 + 2L_m i_E i_C \cos(Z_R \alpha - 225^\circ) + L_E i_E^2] = \quad (7) \\
&= -L_m Z_R i_E [i_A \sin(Z_R \alpha - 345^\circ) + i_B \sin(Z_R \alpha - 105^\circ) + i_C \sin(Z_R \alpha - 225^\circ)]
\end{aligned}$$

kur  $L_E = 12\alpha_0 w_E^2$ ,  $L_K = 4\alpha_0 w_k^2$  - ierosmes tinuma un vadības fāzes tinuma induktivitāte;  
 $L_m = 3,87a_l w_E w_k$  - ierosmes un fāzes tinuma savstarpējā induktivitāte.

Reprezentēto momentdzinēja ar diskrēto griešanos matemātisko modeli, var izmantot stacionārā un pārejas procesu analīzei, kā arī tas var kalpot par pamatu galveno izmēru izvēlei, projektējot VEI azimutālās orientēšanas piedziņu.

Nodaļas beigās veikta izvēlēto dzinēju salīdzināšana pēc trim parametriem: drošuma, maksimālā griezes momenta un elektropatēriņa. Dzinējam ar plūdeņu griešanos ir  $m_1 + m_2 = 3 + 3 = 6$  elektrisko ķēžu, bet ar diskrēto - tikai 4.

Jau pēc ķēžu skaita var secināt, ka dzinējam ar diskrēto griešanos defektu varbūtība ir būtiski zemāka.. Šī dzinēja drošums augstāks arī tāpēc, ka tā normālai darbībai nav nepieciešamas kompensējošas kapacitātes, kuru klātbūtne var būt iemesls kaitīgiem pārspriegumiem. Dzinējiem ar laideņu griešanos mazus zudumus un mazus ātrumus var nodrošināt, tikai barojot primāro un sekundāro tinumus ar tuvas frekvences maiņstrāvām. Vadības fāzes barojot ar maiņstrāvu rodas apstākļi, pie kuriem parādās zudumi tēraudā. Reaktīvas jaudas klātbūtne maiņstrāvas ķēdēs papildus noslogo barošanas avotu.

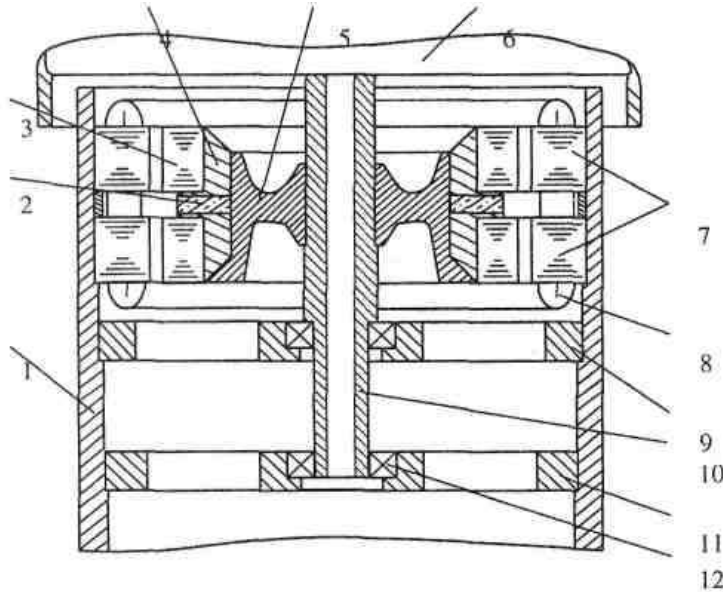
Dzinējiem ar diskrēto griešanos, pārslēdzot fāzes ar zemu frekvenci fāzi (ap 1 - 2Hz), tādi zudumu rašanās apstākļi nerodas. Tādā kārtā energopatēriņa ziņā momentdzinējs ar diskrēto griešanos ir drošāks un izdevīgāks. No darbā minētiem aprēķiniem redzams, ka momentdzinēja ar diskrēto griešanos maksimālais moments (pie vienādiem gabarītiem, tinumu datiem un rotora zobu skaitu ar asinhrono dzinēju) vairāk kā divas reizes pārsniedz dzinēja ar laideņu griešanos maksimālo momentu.

Tātad momentdzinējs ar diskrēto griešanos un trīs vadības fāzēm, kas saslēgtas trīsstūrī un kam ir ierosmes tinums, ir pārāks par dzinēju ar laideņu griešanos pēc visiem rādītājiem: attīstāmā griezes momenta, drošuma, izgatavošanas tehnoloģijas un arī pēc ekonomiskuma.

### 3. Daudzpolu momentdzinējs VEI orientēšanas sistēmā.

Trešā nodaļā noskaidrota momentdzinēja ar diskrēto griešanos optimālā konstrukcija. Ieteikts izgatavot dzinēju divpakešu induktormašīnas veidā ar aksiālo ierosmi (no gredzenveida magnēta), ar ķemmveida zobu zonu, ar vadības tinumu spolēm, kas aptver divus polu izciļņus. Tāda elektrodzinēja elektropatēriņu var papildus pazemināt, bet

tehnoloģiskumu paaugstināt, ja dzinēju novieto balsta torņa iekšienē. Acīmredzama priekšrocība ir tā, ka torni var izmantot kā dzinēja magnētvasdošu korpusu, un ierosmes tinumu var aizvietot ar gredzenveida pastāvīgo magnētu, kā tas parādīts 5. zīmējumā.



5. Zīm. Orientēšanas sistēmas momentdzinēja shematiskais novietojums uz VEI: 1 - atbalsta tornis; 2 - ierosmes gredzenveida magnēts; 3 - rotora pakete; 4 - rotora ieliktnis, 5 - rotora nemagnētiskais ieliktnis; 6 - gondola; 7 - statora pakete; 8 - statora tinums; 9,11 - balsta krusteņi; 10 - dobajā vārpsta; 12 - gultņi

6. zīmējuma dota tāda dzinēja statora paketes viena moduļa shēma ar vadības tinuma fāzēm. Kā parādīts 6. zīmējumā, vadības tinumu ir mērķtiecīgi izveidot tā, lai katra spole aptvertu statora divu polu izciļņus, t.i. būtu ar divu polu izciļņu soli, kas nodrošinātu starp šo izciļņu elektromagnētiskajiem procesiem  $300^\circ$  jeb  $60^\circ$  fāzu nobīdi. Modulī polu izciļņu skaits ir  $n_p = 2m = 6$ . Tikai šai gadījumā tiek nodrošināta vadības trīsfāžu shēmas formēšana un efektīva visu polu izciļņu, kas aptverti ar vadības spolēm, darbības momentu summēšana,. Divu polu izciļņu moments salīdzinājumā ar viena izciļņa momentu palielinās V3 reizes pie elektromagnētisko procesu fāžu nobīdes  $300^\circ$  vai  $60^\circ$  Šādā veidā noteikta zobu zonas struktūra, noskaidrota tinumu optimālā shēma un ierosmes princips (6. zīm.).

Lai atrastu statora un rotora optimālo zobu skaitu, uzrakstīsim vadības tinumu plūsmu sakārdējumus un ierosmes vienādojumus:

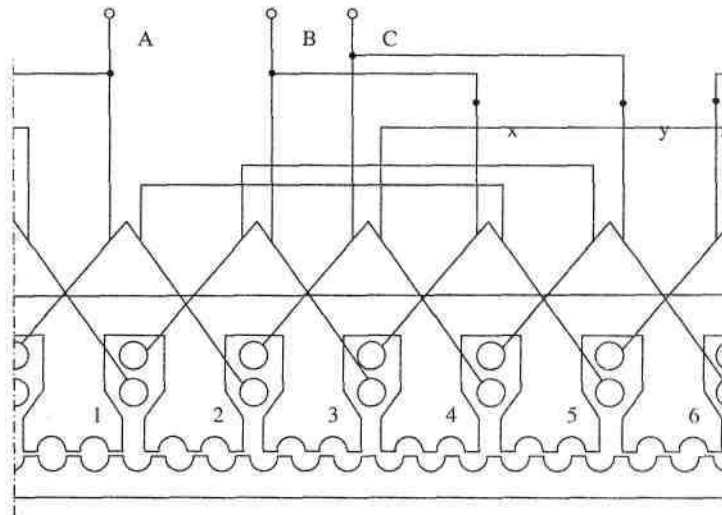
$$\begin{aligned}
 \Psi_A &= L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{AE}i_E; \\
 \Psi_B &= L_{BB}i_B + L_{BA}i_A + L_{BC}i_C + L_{BE}i_E; \\
 \Psi_C &= L_{CC}i_C + L_{CA}i_A + L_{CB}i_B + L_{CE}i_E; \\
 \Psi_E &= L_E i_E + L_{EA}i_A + L_{EB}i_B + L_{EC}i_C.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

kur  $L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = 8\alpha_0 w_k^2$  - moduļu pāra (t.i. divu pakešu) vadības tinuma fāzes pašinduktivitāte;

$L_E = 3w_E^2 \alpha_0$  - ierosmes tinuma induktivitāte;

$L_{AB} = L_{AC} = L_{BC} = 4\alpha_0 w_k^2$  - divu moduļu (pirmās un otrās paketes); vadības tinumu fāžu savstarpējā induktivitāte;

$L_{AE} = L_{BE} = L_{CE} = 2\sqrt{38}w_k w_E \alpha_1$  - savstarpējas induktivitātes starp ierosmes tinumiem un katras paketes (pirmās vai otrās) vadības tinumu fāzēm.



6. zīm. Momentdzineja moduļa konstruktīva shēma:  
1.-6. statora polu izciļņi; A, B, C - vadības tinumu fāzes

Vienādojumi (8) iegūti matricu pārveidojumu rezultātā, ņemot vērā 6. zīm atbilstošu tinumu matricu

$$[w_{ik}] = \begin{bmatrix} w_k & w_k & 0 & -w_k & -w_k & 0 \\ 0 & w_k & w_k & 0 & -w_k & -w_k \\ w_k & 0 & w_k & w_k & 0 & -w_k \\ \frac{w_E}{2} & \frac{w_E}{2} & \frac{w_E}{2} & \frac{w_E}{2} & \frac{w_E}{2} & \frac{w_E}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Šeit un vienādojumos

$w_k$  - tinumu skaits vadības tinumu spolē;

$w_E$  - tinumu skaits ierosmes spolē. Matricā (9) tas ievietots ar reizinātāju  $\frac{1}{2}$ , jo šis tinums apkalpo divas paketes.

Ja tiek analizēta vairākmoduļu shēma, tad (8) norādītās induktivitātes tiek reizinātas ar moduļu skaitu  $n_m$  katrā paketē. Pakešu skaits jau ņemts vērā vienādojumā (8).

Pāreja no vienādojuma (8) uz sistēmā uzkrātās enerģijas vienādojumu

$$A = \frac{1}{2} \sum_{(k=A,B,C,E)} \Psi_k i_k \quad (10)$$



un parciālā diferencēšana pēc leņķa «, ļauj iegūt induktordzinēja, ar vienu moduli katrai paketei, attīstāmo momentu,:

$$M_m = 2\sqrt{3} w_k w_E a_1 Z_R i_E \left[ i_A \sin(Z_R \alpha + 30^\circ) + i_B \sin(Z_R \alpha - 270^\circ) + i_C \sin(Z_R \alpha - 210^\circ) \right]. \quad (11)$$

Kā piemērs apskatīts strāvas impulsa radītais moments, kad spriegumam pieslēgtas fāzes «A» un «C», pie kam «A» - pozitīvam potenciālam, bet fāze «C» - negatīvam (fāze „B” atslēgta). Tad ierosmes strāva, kas nonāk uz vienu statora paketi  $i_A = -j'_c = I_a$ ,  $I_B = 0$ ,  $I_E = 0,5I_E$ . Šo strāvu ielikšana vienādībā (11), ļauj iegūt viena moduļa  $\sqrt{3}$  reizes palielināto maksimālo momentu

$$M_m = 6w_k w_E a_1 Z_H(0,5I_E) I_a. \quad (12)$$

Šeit skaitlis „6” atbilst polu izciļņu skaitam vienā modulī. Ja dzinējs sastāv no vairākiem moduļiem, tad vienādojums (12) iegūst galīgo veidu

$$M_m = n_p w_k w_E a_1 Z_R(0,5I_E) I_a, \quad (13)$$

kur  $n_p$  - polu izciļņu skaits statora vienā paketē.

Ja statora polu izcilnim ir tikai viens zobs (« = 1), tad skaitlis  $n_p = Z_s$ . un dzinējam ar vienzoba polu izcilni

$$M_m = Z_s Z_R w_k w_E a_1 I_a(0,5 I_E). \quad (14)$$

Izmantojot iepriekš ieviestos parametrus, kas raksturo magnētiskās vadāmības  $\lambda_\delta = \frac{b_z}{\delta}$ ,  $\lambda_R$ ,  $\lambda_{RR}$ ,  $\lambda_0$ ), ka arī attiecību  $b_z = \frac{\pi D}{3Z_R}$ , kur D statora iekšējās virsmas diametrs,

tika iegūta šāda attīstāmā momenta izteiksme:

$$M_m = w_k w_E (0,5I_E) I_a l \mu_0 Z_R \left( Z_R + \frac{n_p}{6} \right) \left( \frac{\pi D}{6Z_R \delta k_F} + 0,5\lambda_{RR} - \lambda_R \right). \quad (15)$$

Šī momenta formula pierāda, ka lietderīgi izgatavot daudzpolu ( $p = Z_{li} > 100$ ) dzinēju gredzena veidā ar nelieliem radiāliem izmēriem, kas vienādi ar 0,15-0,20 no statora iekšējās virsmas diametra.

Iegūtā vienādojuma analīze un momenta maksimuma noteikšana, ļauj atrast momentdzinēja rotora un statora optimālo zobu skaitu:

$$Z_{Ropt} = \frac{\pi D}{12 \delta k_p (\lambda_R - 0,5\lambda_{RR})} \pm \frac{n_p}{12}. \quad (16)$$

Lai noteiktu polu izciļņu optimālo skaitu un citus parametrus, kas nodrošinātu lielu īpatnējo momentu, pārveidojam agrāk iegūto formulu (12) sekojošā formā:

$$M_m = n_p \frac{B_{\delta E}}{\mu_0^2} \delta^2 B_a k_{Fe}^2 Z_R a_1, \quad (17)$$

kur  $0,5w_E I_E = \frac{B_{\delta E}}{\mu_0} \delta k_{Fe}$  - ierosmes MDS, kas nepieciešams vienai spraugai  $\delta$  ar magnētisko indukciju  $B_{\delta E}$ ;

$$w_k I_a = \frac{B_a}{\mu_0} \delta k_{Fe} \quad - \text{vadības tinumu reakcijas MDS};$$

$\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  - gaisa magnētiskā caurlaidība,  $\frac{H}{m}$ .

Ķemmveida zobu zonas struktūras gadījumā ar pusriņķa rievām, kad zoba vainaga platums  $b_z$  ir viena trešdaļa no rotora zoba iedaļas, gaisa spraugā var pieļaut ierosmes indukciju  $B_{SE} = 1,7 T$ . Piesātinājuma koeficients pie zoba minimālā platuma  $b_z = 5\delta$  ir 1,22,

12 kW VEI balsta torņa diametrs augšējā daļā ir 0,468 m. Tērauda caurules sienīņu biezums šinī vietā ir 10 mm. Šādā balsta tornī ievietota momentdzinēja statora ārējais (5. zīm.) diametrs ir 0,44 m, bet statora iekšējās virsmas diametrs vēl mazāks - ap 0,390 m. Pie šāda statora iekšējās virsmas diametra pieļautā gaisa sprauga bija  $\delta = 0,9mm$ .

12 KW VEI momentdzinējam nepieciešams attīstīt maksimālo momentu  $M_m=400N \cdot m$ . Tad, ja pieņemt, ka magnētiskā indukcija, ko nosaka vadības tinumu reakcija, ir  $B_a=0,5T$  (lielākas tās vērtības palielinās zudumus vadības tinumos, tā kā  $\Delta Py \equiv B_a^2$ ), tad izmantojot (17), var iegūt:

$$a_1 = \frac{M_m \cdot \mu_0^2}{n_p B_{SE} B_a \delta^2 k_{FI}^2 Z_R} = \frac{400 \cdot (4\pi \cdot 10^{-7})^2}{12 \cdot 1,7 \cdot 0,5 \cdot 0,9^2 \cdot 1,22^2 \cdot 107 \cdot 10^{-6}} = 0,48 \cdot 10^{-6} H. \quad (18)$$

$$\text{Šeit } Z_R = \frac{\pi D}{12 \lambda_0 \delta k_{FI}} - \frac{n_p}{12} = \frac{\pi \cdot 0,390}{12 \cdot 0,86 \cdot 0,9 \cdot 1,22 \cdot 10^{-3}} - 1 = 107 \quad (19)$$

kur  $\lambda_0 = \lambda_\delta = 0,5 \lambda_{RR} = 0,86$  - vispārinātā magnētiska vadāmība.

Pagaidām pieņemsim polu izciļņu skaitu  $n = 12$ . Tad

$$a = \frac{Z_R}{n_p} = \frac{107}{12} = 9 \quad (20)$$

un precizētais rotora zobu skaits

$$Z_R = n_p a - 2 = 12 \cdot 9 - 2 = 106. \quad (21)$$

Optimizējot polu izciļņu skaitu, jāņem vērā sekojoši apstākļi:

- polu izciļņu skaita palielināšana samazina pola magnētisko plūsmu, līdz ar to samazinās statora un rotora pakešu jūga augstums un kopējā dzinēja masa;
- polu izciļņu skaita palielināšana samazina rievas platumu un laukumu vadības tinuma ievietošanai, kā sekas - palielinās zudumi vadības tinumos no piespiestās vadu šķērsriezuma samazināšanas;
- polu izciļņu skaita samazināšana noved pie statora un rotora jūga augstuma palielināšanās, bet tas savukārt palielina rievas laukumu tinuma izvietojumam, kas noved pie zudumu samazināšanās vadības tinumos.

Tādā veidā, polu izciļņu skaita optimāla izvēle ir pretrunīga uzdevuma risinājums. Darbā veiktie aprēķini ļāva iegūt 12 kW VEI sekojošus optimālos parametrus orientēšanas sistēmas momentdzinējam (sk. 1. tabulu).

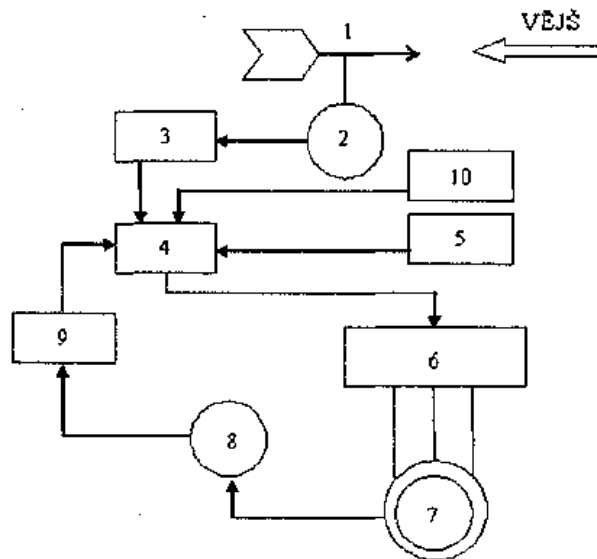
Tabula 1

Momentdzinēja masas-gabarītu un enerģētiskie rādītāji

№ p/k	Parametrs	Dimensij st	Skaitliskā vērtība
1	Dzinēja moments	N·m	400
2	Ārējais diametrs	m	0,448
3	Rotora iekšējais diametrs	m	0,333
4	Statora paketes garums	m	0,05
5	Statora paketes masa	kg	23
6	Rotora paketes masa	kg	9
7	Rotora bukses masa	kg	11
8	Magnēta gredzena masa	kg	1,25
9	Vadības tinumu masa	kg	9,3
10	Magnēta izmēri	m <sup>3</sup>	0,373×0,333×0,01
11	Dzinēja kopēja masa	kg	54
12	Vadības spoles vijumu skaits	—	155
13	Vadības tinumu vadu šķērsgriezums	mm <sup>2</sup>	0,985
14	Vadības tinumu fāžu pretestība	Ω	9
15	Spriegums starp vadības tinuma galiem	V	25
16	Vadības tinumu strāva	A	2,8
17	Patērējamā jauda pie vienlaicīgas divu vadības tinumu ieslēgšanas	W	140
18	Vadības laika konstante	s	0,06

Kā redzams tabulā 1, dzinēja kopējā masa nepārsniedz 54 kg, kas ir 1,5 reizes mazāk, nekā esošās 12 kW VEI orientēšanas sistēmai, kurā izmantota t.s. „vēja roze” Dzinējam, kas var attīstīt  $M_m = 400 \text{ N} \cdot \text{m}$  momentu, masa ir  $G = 54 \text{ kg}$  un neliela patērējamā jauda - tikai 140 W. Rotora zobu skaits  $Z_R = 106$  ; polu izciļņu skaits  $n_p = 12$  ; zobu skaits uz polu izciļņiem 9.

7. zīmējumā parādīta VEI orientēšanas sistēmas dzinēja vadības funkcionālā shēma



7. zīm. VEI azimutālās orientēšanas funkcionālā shēma: 1 - vēja rādītājs; 2 - rotējošs transformators; 3 - analoga signāla pārveidotājs diskretā-kodā; 4 - mikrokontrolers; 5 - vēja spēka sensors; 6 - vadības bloks ar momentdzinēju; 7 - momentdzinējs; 8 - rotējošs transformators; 9 - analoga signāla pārveidotājs diskretā-kodā 10 - turbīnas griešanās frekvences sensors

Diferenciālvienādojumam, kas apraksta dzinēja rotora kustību kopā ar gondolu un vēja turbīnu, ir sekojošs veids:

$$J_A \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + D_k \frac{d\alpha}{dt} = M_{\text{g}} - M_A - M_0. \quad (22)$$

Izmēģinātajai 12 kw VEI bija:

$J_A = 50,4$  - gondolas inerces moments attiecībā pret vertikālo asi, ( $kg \cdot m^2$ );

$D_k = J_V \omega_{\text{max}} = 1700 \frac{2\pi \cdot 150}{60} = 26690$  - slāpēšanas koeficients, ko nosaka vēja turbīnas žiroskopiskais moments pie tās inerces momenta  $1700 kg \cdot m^2$  un griešanās ātruma

$$n = 150 \text{ min}^{-1}, \left( \frac{kg \cdot m^2}{s} \right);$$

$$M_{\text{g}} = M_m \left( 1 - \frac{\alpha}{\alpha_s} \right) \approx 377 \cdot (1 - 100\alpha) \quad \text{- piedziņas dzinēja rezultējošā momenta}$$

lineanzētā funkcija ( $N \cdot m$ );

$M_A = 13,2$  - aerodinamisko spēku moments, ( $N \cdot m$ );

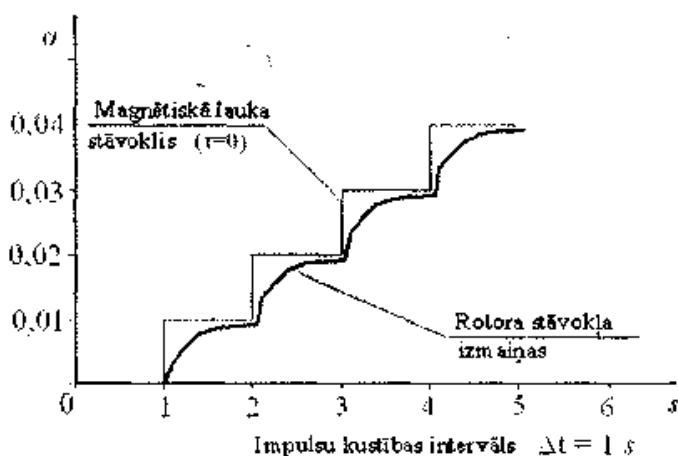
$M_0 = 10$  - gultņu berzes moments ( $N \cdot m$ );

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{2m \cdot Z_R} = \frac{6,28}{2 \cdot 3 \cdot 106} = 0,01 \quad \text{- dzinēja solis}$$

Vienādojuma (21) risinājums, ļauj iegūt (bez ātri dziestošām komponentēm) soļa atstrādes aperiodisko procesu, VEI pagriežoties vēja virzienā:

$$\alpha_n = 0,01 \cdot (1 - e^{-2t}) \quad (23)$$

VEI azimutālās orientēšanas programmas atstrādes dinamiskais process ir aperiodisks, stipri slāpēts un bez pašsvārstībām (abas vienādojuma saknes - reālas). Tas apstiprina, ka sistēma var normāli funkcionēt pie vadības impulsu sekošanas frekvences 1 Hz, kā tas parādīts 8. zīm.



8. zīm. Orientēšanas sistēmas programmas atstrādes diagramma pie vēja turbīnas griešanās frekvences  $n = 150 \text{ min}^{-1}$ . Vadības tinumu elektromagnētiskā laika konstante  $\tau = 0,06 \text{ s}$ ,  $\Delta t = 0,06 \text{ s}$

#### 4. Momentdzinēju izmēģinājumu paraugu eksperimentālie pētījumi

Eksperimentālo pētījumu galvenais uzdevums bija apstiprināt piedāvāto momentdzinēju matemātisko modeļu pamatotību un novērtēt to pielietojumu piedāvātajos konstruktīvajos risinājumos mazjaudas VEI orientēšanas sistēmās. Ar šo mērķi eksperimentālo pētījumu programmā bija iekļauti 5 etapi:

- stenda izstrādāšana un uzstādīšana momentdzinēju ar laideno un diskreto griešanos rūpnīcā RER izgatavoto izmēģinājumu paraugu pētījumiem;
- izmēģinājumu paraugu pētīšanas metroloģiska nodrošināšana;
- uz asinhrono induktortipa mašīnu bāzes izveidotā momentdzinēja konstrukcijas efektivitātes un lietderīguma pārbaude;
- diskretās griešanās momentdzinēja ar zobu zonas ķemmveida struktūru izmantošanas efektivitātes pārbaude;
- rekomendāciju izstrāde zudumu samazināšanai momentdzinējiem ar diskreto griešanos un to pilnveidošanas perspektīvu analīze.

Asinhronā daudzpolu induktortipa dzinēja ar 2. tabulā dotiem parametriem, izmēģinājumu rezultāti doti 3. tabulā.

Tabula 2.

Asinhronā dzinēja eksperimentālā parauga parametri

N p/k	Parametrs	Dimensijas	Skaitliskās vērtības
1	Nominālais fāzes spriegums	V	180
2	Primārās strāvas frekvence	Hz	50
3	Primārā (sekundārā) tinuma fāžu skaits	-	3
4	Polu pāru skaits	-	15
5	Statora zobu skaits	-	18
6	Statora iekšējās virsmas diametrs	m	0,153
7	Statora paketes biezums	m	0,1
8	Gaisa spraugas lielums	m	0,0004
9	Sekundārās ķēdes pretestība, ieskaitot rezistora papildus pretestību	$\Omega$	50
10	Tinumu pretestība (aktīvā maiņstrāvai $R_1; R_2$ )	$\Omega$	14,2; 24
11	Primārā (sekundārā) tinuma vijumu skaits	-	150
12	Primārā tinuma fāžu induktīvā pretestība	$\Omega$	102
13	Sekundārā tinuma fāžu induktīvā pretestība	$\Omega$	109
14	Savstarpējās indukcijas pretestība	$\Omega$	37
15	Kompensējošās kapacitātes lielums	mkF	10
16	Attīstāmais moments	N·m	10
17	Zudumi tinumos	W	174
18	Dzinēja masa	kg	18,2
19	Īpatnējais moments	N·m/kg	0,55
20	Īpatnējais elektropatēriņš	W/N·m	17,4

Tabula 3.

Zudumu un momentu eksperimentālo un aprēķinu datu salīdzināšana, barojot no primārā tinuma puses. Sekundārais tinums noslēgts uz kondensatoriem

N p/k	Parametri Pievadītais spriegums, V (simetrisks režīms)	Aprēķins		Eksperiments	
		Zudumi	Moments	Zudumi	Moments
		W	N·m	W	N·m
1	60	20,9	1	21	1
2	80	37,7	1,8	42	2
3	105	64,9	3,1	68	3,2
4	120	84,8	4,05	84	4
5	140	121,4	5,8	125	6
6	165	159,1	7,6	167	8
7	180	188,4	9	209	10

Izmēģinājumi parādīja, ka visefektīvākais variants ir asinhronā mašīna ar divkāršu barošanu. Pēc īpatnējiem rādītājiem tā ir pārāka par ārzemju konstrukcijām. Salīdzinājuma rezultāti doti 4.tabulā.

Tabula 4

Momentdzinēju ar laidenas griešanas salīdzinošie dati

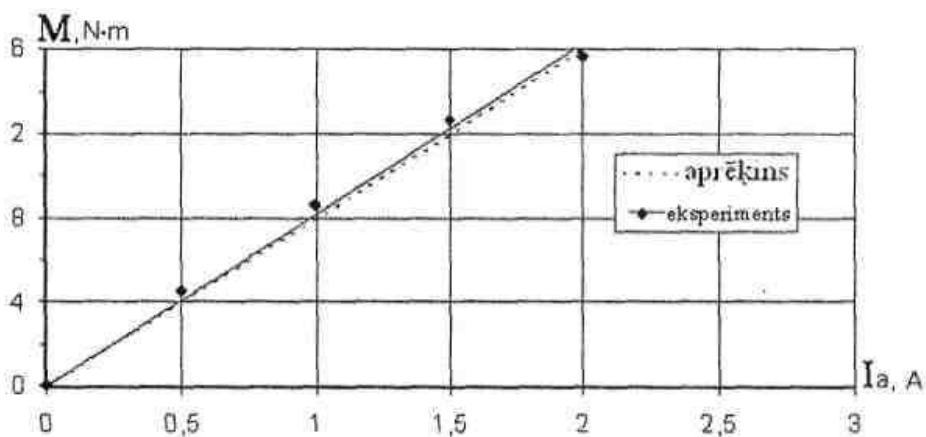
N p/k	Dzinēja tips Parametrs	Размерность	4A80J8Y3	2ПББ325	2ДБУ165	ДБУ165М	M-100	Asinhronais	Divēja barošana
1	Moments	N·m	8,6	11	11	10	29	10	10
2	Polu pāru skaits		4	2	4	4	20	15	15
3	Patērējamā jauda	W	135	240	400	350	600	300	174
4	Masa	kg	17,4	19,8	17	26,1	80	18,2	18,2
5	Moments pie pieļaujamās sasīšanas	N·m	1,1	11	11	10	29	10	10
6	Īpatnējais moments	N·M/kg	0,063	0,56	0,65	0,38	0,35	0,55	0,55
7	Zemu griešanās frekvenču iegūšanas iespējas		nav	nav	nav	nav	nav	nav	jā
8	Īpatnējais elektropatēriņš	W/N·m	123	22	36	35	21	30	17,4

Zemāk 5. tabulā doti divpakešu konstrukcijas diskretās griešanās momentdzinēja ar vadības tinuma vienzoba fāžu spolēm izmēģinājuma modeļa konstruktīvie parametri, bet 9. zīm. atspoguļoti šī modeļa pētījumu rezultāti.

Tabula 5

Galvenie parametri izmēģinājuma modelim induktormāšīnai ar vadības tinumu vienzoba fāžu spolēm

N p/k	Parametrs	Dimensija	Skaitliskā vērtība
1	Statora iekšējās virsmas diametrs	$m$	0,153
2	Paketes biezums	$m$	0,028
3	Vijumu skaits vadības tinumu spolē	-	135
4	Statora zobu skaits	-	18
5	Rotora zobu skaits	-	12
6	Vadības tinumu pretestība maiņstrāvai	$\Omega$	11,0
7	Ierosmes tinumu pretestība līdzstrāvai	$\Omega$	60
8	Ierosmes tinumu vijumu skaits	-	1500
9	Vadības tinumu strāva	$A$	2,0
10	Ierosmes strāva	$A$	1,2
11	Moments (maksimālais)	$N\cdot m$	16,4
12	Dzinēja masa	$kg$	23,5
13	Īpatnējais elektropatēriņš	$W/N\cdot m$	11



9. zīm. Griezes momentu raksturlīknes

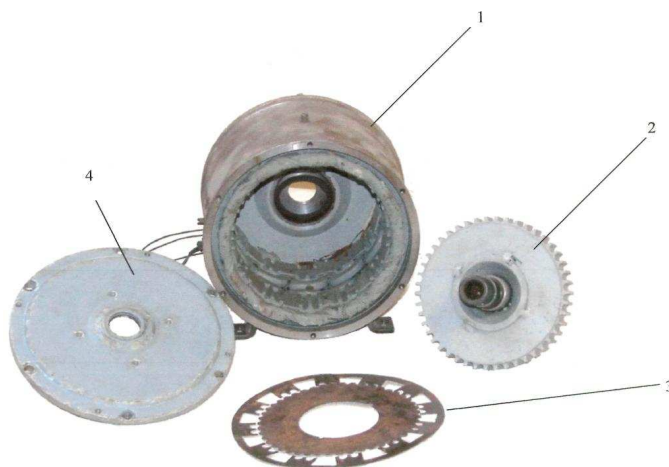


Pētījumi parādīja, ka vislabākie bija momentdzinēja ar ķemmveida zobu zonu izmēģinājumu rezultāti (6. tabula).

Tabula 6  
Momentdzinēja ar ķemmveida zobu zonu  
eksperimentālo pētījumu rezultāti

N p/k	Parametrs	Dimensijas	Vadības strāvas, A					
			0	0,5	1,0	1,5	2,0	
1	Moments	$N \cdot m$	1,1	7,1	13,8	19,7	26	
2	Ierosmes jauda	W	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	
3	Vadības jauda	W	0	5,5	22	49,5	88	
4	Īpatnējais moments	eksp.	$\frac{N \cdot m}{kg}$	0,047	0,3	0,59	0,84	1,1
		aprēķ.		0,045	0,285	0,56	0,8	1,05
5	Īpatnējais elektropatēriņš	Eksp.	$\frac{W}{N \cdot m}$	25	4,6	3,6	3,9	4,4
		aprēķ.		24	4,4	3,4	3,7	4,1

Šāda dzinēja konstrukcija un atsevišķas detaļas parādītas 10. zīm. Katrs statora pola izcilnis te aptverts ar vienu vadības tinumu spoli. Uz katra pola izciļņa ir trīs zobi.



10. zīm. Induktortipa momentdzinējs ar ķemmveida zobu zonu: 1 - korpuss ar divām sapresētām un aptītām statora paketēm; 2- rotora zobainā pakete; 3 ~ statora un rotora lapas (elektrotehniskā skārda biezums 0,5 mm); 4 - priekšējais vāks

Lai pārlicinātos par vadības tinuma ar divkāršu soli pielietošanas priekšrocības momentdzinējā ar diskrēto griešanos, tika izgatavots speciāls izmēģinājuma modelis. Tas tika izveidots ar divu iepriekšējo konstruktīvo risinājumu gabarītiem un ar tādiem pašiem svāra raksturlielumiem. Dzinēja galvenie dati doti 7. tabulā. Konstrukcija, atsevišķie tās elementi un sakomplektētais dzinējs parādīts 11. zīm.

7. tabulā doti arī momentdzinējā ar divzobu spolēm izmēģinājumu rezultāti. Tie parāda šī dzinēja konstrukcijas efektivitāti un izstrādāto matemātisko modēju pilnīgu pamatotību.

Tabula 7

Momentdzinējā ar diskrēto griešanos un vadības tinumu divzobu spolēm galvenie parametri

N p/k	Parametrs	Dimensija s	Skaitliskās vērtības	
			Eksp.	Aprēķ.
1	Statora iekšējās virsmas diametrs	<i>m</i>	0,153	0,153
2	Gaisa sprauga	<i>m</i>	0,0004	0,00042
3	Statora paketes biezums	<i>m</i>	0,028	0,028
4	Statora polu izciļņu (zobu) skaits		18	18
5	Rotora zobu skaits		15	15
6	Vadības tinumu spoļu vijumu skaits		70	70
7	Vadības tinumu pretestība	$\Omega$	3,26	3,5
8	Vijumu skaits ierosmes spolē		1500	1500
9	Ierosmes tinumu pretestība	$\Omega$	32	35
10	Vadības tinumu pretestība	<i>A</i>	3,0	3,0
11	Ierosmes strāva	<i>A</i>	1,5	1,5
12	Polu izciļņu magnētiskās vadāmības pirmā harmoniskā	<i>H</i>	$0,34 \cdot 10^{-6}$	$0,32 \cdot 10^{-6}$
13	Maksimālais moments	<i>N · m</i>	23,1	22,5
14	Dzinēja masa	kg	23,5	24
15	Īpatnējais moments	$\frac{N \cdot m}{kg}$	0,98	0,94
16	Patērējamā jauda	W	101	110
17	Īpatnējais elektropatēriņš	$\frac{W}{N \cdot m}$	4,4	4,9

Tālākā analīze, kas izdarīta izmantojot matemātisko modeli, ļāva secināt, ka induktortipa soļu dzinēja vadības tinumu fāžu optimālais skaits ir  $m = 5$ . Vadības fāžu skaita palielināšana  $m > 5$  nav lietderīga, tā kā tas sarežģī konstrukciju, samazina īpatnējo momentu

un palielina elektropatēriņu. Piecfažu konstrukcija ar tinumiem, kas saslēgti daudzstūrī, jāizveido ar ierosmi no pastāvīgiem magnētiem un ar ķemmveida zobu zonu. Griezes momenta papildus palielināšanai jāveido divkārsa soļa vadības tinumu spoles, lai katra no tām aptver divus blakus polu izciļņus.



1 l.zīm. Momentdzinējs ar divkārsa soļa vadības tinumu spolēm

## SLĒDZIENI

Disertācijas darbā atspoguļoti pētījumu rezultāti, kas pierāda, ka iespējams tālāk paaugstināt energoefektivitāti mazas jaudas VEI, kuras paredzētas fermeru saimniecībām. Pētījumu rezultātā ir konstatēts:

1. Būtisku VEI efektivitātes paaugstināšanos var panākt, izslēdzot no ģenerēšanas un vēja iekārtu azimutālās orientēšanas sistēmām multiplikatorus un reduktorus. Parādīts, ka, lai arī mazu un pat lielu jaudu vēja ģeneratoru tiešas piedziņas izpildījuma praktiskie tehniskie risinājumi ir jau apgūti, šo vēja iekārtu orientēšanas sistēmās līdz šim izmanto smagos un tehnisko apkopju ziņā darbietilpīgos mehāniskos reduktorus ar lielu pārnesumskaitli un zemu drošumu.
2. Ieteikts mazas jaudas VEI orientēšanas sistēmu drošuma paaugstināšanai un masas samazināšanai, izmantot šajās sistēmās liela griezes momenta bezkontakta dzinējus, kuru rotors tieši savienots ar vēja iekārtas gondolu, bet stators ar balsta torni.
3. Lai samazinātu šo dzinēju masu un elektropatēriņu un palielinātu īpatnējo momentu, rekomendēts piedziņas momentdzinējus izveidot uz daudzpolu aksiālo induktormašīnu bāzes ar ierosmi no pastāvīgiem magnētiem.
4. Izvēlēta un nopamatota bezkontakta momentdzinēju ar beztinumu zobainu rotoru pētījumu metode. Metodes pamatā ir magnētiskās ķēdes daļu, kas aptvertas ar tinumu spolēm (polu izciļņu), periodiski mainīgo magnētisko vadāmību izteiksmes, kas dotas kā rotora pagrieziena leņķa funkcijas. Šo funkciju izvirzījumu Furjē rindā koeficientus aprēķinam ar galīgo elementu skaitlisko metodi un attēlojam ar līknēm, kuras atspoguļo šo parametru atkarību no rotora (statora) attiecinātā zobu platuma pie dažādiem magnētvasda piesātināšanās apstākļiem.
5. Darbā nopamatotas daudzpolu momentdzinēju racionālās konstrukcijas, to izmantošanas režīmi un matemātiskie modeļi matricu formā. Pētījumos noskaidrots, ka pie tam jāievēro sekojošas īpatnības:
  - dzinējam jābūt induktortipa, gredzenveida ar pastāvīgo magnētu aksiālu ierosmi;
  - vadības tinumu piecām fāzēm jābūt saslēgtām daudzstūrī, ar iespēju pieslēgt tā virsotnes līdzstrāvas avota spriegumam, tinumiem jābūt savstarpēji savienotiem no virknē saslēgtām spolēm, pie kam katrai no tām jāaptver divi polu izciļņi;
  - zobu zonai jābūt ķemmveida, ar polu izciļņu skaitu, kas dalās ar seši, pie kam statora (rotora) katra zoba platumam jābūt vienai trešdaļai no rotora zobu daļējuma, bet iedobumam starp zobiem jābūt izveidotam pusriņķa formā;
  - dzinēja darba režīmam jābūt impulsveida, ar trīsstūra, kura malas veido vadības tinumu fāzes, virsotņu pamīšus pieslēgšanu, līdzstrāvas spriegumam.
6. Darbā atrastas galvenās sakarības liela griezes momenta un minimāla elektropatēriņa nodrošināšanai VEI orientēšanas sistēmas momentdzinējam:
  - polu izciļņu skaitam jābūt skaitlim, kas dalās ar seši;
  - zobu skaitu uz katra pola izciļņa aprēķina pēc formulas

$$\alpha = \frac{Z_R + \frac{n_p}{6}}{n_p},$$

kur  $Z_R = \frac{\pi D}{10 \delta k_{Fe}}$  - rotora zobu skaits, kurš jākorrigē ā, lai zobu skaits „a” uz katra pola izciļņa būtu vesels skaitlis.

7. Izstrādāta funkcionālā shēma VEI orientēšanas sistēmas vadīšanai ar momentdzinēju pēc vēja rādītāja signāliem, noteikti tās galvenie dinamiskie raksturlielumi un pamatota sistēmas drošas darbības iespēja ar nepieciešamo leņķisko ātrumu un precizitāti.
8. Izpildīti daudzi laboratorijas eksperimenti un skaitliskie aprēķini ar četriem daudzpolu momentdzinējiem ar plūdeņu un diskreto griešanos. Pierādīta momentdzinēju matemātisko modeļu pamatotība, kurus var izmantot dažādu jaudu VEI bezreduktora azimutālās orientēšanas sistēmas izstrādāšanā un izveidošanā.

### **Aizstāvēšanai tiek izvirzīti sekojoši jauni zinātniski un praktiski rezultāti**

1. Konceptija mazas jaudas bezreduktora VEI orientēšanas sistēmu izstrādāšanai, kas balstīta uz liela griezes momenta daudzpolu dzinēju ar diskreto griešanas izmantošanu, kuru beztinumu zobainais rotors tieši savienots ar gondolu, bet stators ar balsta torni.
2. Konstruktīvas īpatnības un matemātiskais modelis daudzpolu momentdzinējam, kurš izveidots uz asinhronās induktormašīnas ar ķemmveida zobu zonu bāzes, pie kam vadības tinumi ar divkārtša soļa spolēm izvietoti uz divpakešu statora, bet ierosmi realizē gredzenveida pastāvīgais magnēts, kas novietots starp zobainā rotora paketēm.
3. Mazas jaudas VEI azimutālās orientēšanas sistēmas momentdzinēja diskretas vadības veids un funkcionālā shēma, kuras pamatā ir secīga dzinēja vadības tinumu fāžu trīsstūra slēguma virsotņu pieslēgšana līdzstrāvas avotam pēc vējrādītāja signāliem.
4. Momentdzinēja konstruktīvā izveidojuma principi, kas nodrošina tālāku īpatnējā momenta palielināšanu un elektropatēriņa samazināšanu, vadības tinumu fāžu skaitu palielinot līdz 5, polu izciļņu skaitu izvēloties tādu, kas dalās ar seši un ar katru vadības tinumu spoli, aptverot divus polu izciļņus.
5. 12 kW VEI azimutālās orientēšanas sistēmas momentdzinējs, kura katra statora pakete izveidota ar 12 polu izciļņiem, uz katra no kuriem izvietoti a=9 zobi ar kopējo polu pāru skaitu, t.i. rotora zobu skaitu  $Z_R = 106$  zobu, un kura īpatnējais

$$\text{moments ir } M_{y\partial} = 7,41 \frac{N \cdot m}{kg} \quad \text{un īpatnējais elektropatēriņš } P_{y\partial} = 0,35 \frac{W}{N \cdot m}.$$

## **Autora publikācijas**

1. L. Ribickis, V. Pugachov, N. Levin, A. Mesņajev, A.Zhiravecka. Multipole Doubly-Fed High-Torque Electric Motor. - 11<sup>th</sup> EPE Conference, Dresden, Germany, Proceeding N06019, 2005, 51pp.
2. Левин Н., Месняев А., Пугачев В., Рибицкис Л. Многополюсный моментный двигатель индукторного типа. The 13<sup>th</sup> International Conference, Alternating Current Electrical Drives, Proceeding, Ekaterinburg, Russia, 2005, pp 49-54.
3. Levins N., Pugačevs V., Daškova - Golovkina J., Kamoliņš E., Mesņajevs A. Daudzpolu momentdzinēja izmantošana vēja iekārtas azimutālās orientēšanas bez reduktora sistēmā. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Riga, 2005, N° 3, lpp 37-42.
4. Levins N., Dirba J., Ketners K., Mesņajevs A. Induktortipa momentdzinēja iespēju izpēte. // Latvian Journal of physics and technical sciences. Rīga, 2003., N° 5, lpp.30-36.
5. Dirba J., Levins N., Mesņajevs A., Pugačevs Elektrisko induktormašīnu teorijas izstrāde un tehniski ekonomisko rādītāju uzlabošana, 42. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte , Enerģētika un elektrotehnika, 4. Sērija, 4. Sējums, Rīga, 2001, 23-29 lpp.
6. Levins N., Dirba J., Mesņajevs A. Daudzpolu momentdzinējs, Rīgas Tehniskā universitāte , Enerģētika un elektrotehnika, Sērija, 10. Sējums, Rīga, 2003, 90-96 lpp.
7. Mesņajevs A., Dirba J. Kombinētas ierosmes induktor - ģenerators. 41. RTU studentu zinātniskas un tehniskas konferences materiāli , Rīga, 2000.g., 5 lpp.
8. Mesņajevs A., Dirba J. Sinhrono ģeneratoru ātrdarbīgas automātiskas regulēšanas sistēmas", 40. RTU studentu zinātniskas un tehniskas konferences materiāli, Rīga, 1999.g., 5 lpp.
9. Bezsmertnijs A., Levins N., Pugačovs V., Mesņajevs A. Latvijas patents uz izgudrojumu " Vēja enerģētiska ietaise" LV 11917B, 1998.g.
10. Bezsmertnijs A., Pugačovs V., Mesņajevs A. Latvijas patents uz izgudrojumu "Kombinētas ierosmes induktorģenerators" LV 11715B, 1997.g.
11. Анфимов В., Дирба Я., Месняев А. Синтез аппроксимирующих выражений для определения характеристик синхронных генераторов. Тезисы докладов конф. вузов Прибалтики, Белоруссии и Молдавии, Вильнюс, 1985, 2 стр.