

VAIRĀKĀTRUMU SINHRONO DZINĒJU IZVEIDOŠANAS PAMATPRINCIPI UN IESPĒJAS BASIC RULES AND POSSIBILITIES FOR MULTISPEED SYNCHRONOUS MACHINES CREATION

Rihards Elmanis-Helmanis, *Ph. D. student, Mg.Sc.Ing.*

Rīga Technical University
Institute of Power Engineering
Address: Kronvalda bulv. 1, LV 1010 Rīga, Latvia
Phone: (+371) 7089929
e-mail: rihards.elmanis@latvenergo.lv

Andrejs Zviedris, *Associate Professor, Dr.Sc.Ing.*

Rīga Technical University
Institute of Power Engineering
Address: Kronvalda bulv. 1, LV 1010 Rīga, Latvia
Phone: +7089929
e-mail: aaazzz@eef.rtu.lv

Andrejs Podgornovs, *lector, Mg.Sc.Ing.*

Rīga Technical University
Institute of Power Engineering
Address: Kronvalda bulv. 1, LV 1010 Rīga, Latvia
Phone: (+371) 7089928
e-mail: andreisp@eef.rtu.lv

Atslēgas vārdi: Magnētiskais lauks, rotācijas frekvences regulēšana, sinhronais dzinējs

Ievads

Kā zināms, sinhronos dzinējus līdzīgi asinhronajiem dzinējiem izmanto dažādu mehānismu piedziņai (sūkņu, kompresoru, ventilatoru un drupinātāju piedziņai, motorģeneratoru agregātos, kravas vai pasažieru liftos u.c.).

Kritēriji asinhrono vai sinhrono dzinēju izvēlei mehānismu un iekārtu piedziņai ir tehniski ekonomiskais novērtējums, kurā būtu jāievēro šādi galvenie faktori:

- 1) sinhrono un asinhrono dzinēju izmaksas;
- 2) enerģētiskie un ekspluatācijas rādītāji (zudumi un lietderības koeficients, jaudas koeficients ($\cos\varphi$));
- 3) iespējas realizēt dažādus režīmus (mainīga slodze, barojošā tīkla sprieguma izmaiņa, regulēšana u.tml.)
- 4) ietekme uz barojošo tīklu.

Salīdzinot sinhrono dzinēju, kura $\cos\varphi$, ar asinhrono dzinēju, kura reaktīvā jauda tiek kompensēta ar kondensatoriem, ir pierādīts [1], ka sinhronie dzinēji noteiktā jaudas diapazonā ir lētāki un tiem ir mazāki zudumi salīdzinājumā ar asinhronajiem dzinējiem (ja ievēro kondensatoru bateriju izmaksas).

Sinhrono dzinēju izmantošanas lietderīgumu būtu jānovērtē nevis pēc vispārīgiem, aprēķiniem, bet veicot vispusīgus salīdzinošus tehniski ekonomiskos aprēķinus, vadoties pēc vairākiem kritērijiem [1], no kuriem galvenie ir materiālu un ražošanas izmaksas, zudumi, ekspluatācijas izdevumi, kā arī atsevišķas īpatnējas prasības, piemēram, sprieguma regulēšanas iespējas, īslaicīgi palielinot reaktīvo jaudu, ja tīklā samazinās spriegums. Pēdējais apstāklis ir ļoti būtisks, jo dažos gadījumos sinhrono dzinēju izmantošana ļauj novērst stabilitātes traucējumus, kas saistīti ar sprieguma lavīnām atsevišķos slodzes mezglos, kuros ir liels pieslēgto asinhrono dzinēju īpatsvars. Īpaši nelabvēlīgi apstākļi rodas, ja asinhronie dzinēji darbojas ar slodzi, kas tuva nominālajai, jo šajā gadījumā sprieguma pazemināšana izraisa asinhrono dzinēju patērētās reaktīvās jaudas palielināšanos.

Sinhrono un asinhrono dzinēju izmaksas salīdzinājumus [1] parāda, ka visām rotācijas frekvencēm asinhrono dzinēju materiālu izmaksas palielināšanās sakarā ar to aktīvo garuma palielināšanos ir lielāka par sinhrono dzinēju materiālu izmaksām. Piemēram, īsslēgto asinhrono dzinēju rotoru stieņu vara izmaksas aptuveni ir 2 reizes lielākas par sinhrono dzinēju ierosmes tinuma materiālu masu. Vienlaikus jānorāda, ka sinhrono dzinēju ražošanas izmaksas ir 30 ÷ 40 % augstākas par asinhrono dzinēju ražošanas izmaksām.

Var atzīmēt arī vēl dažas sinhrono dzinēju priekšrocības salīdzinājumā ar asinhronajiem dzinējiem.

Visvērtīgākā sinhrono dzinēju īpašība ir tā, ka šie dzinēji var darboties ar $\cos\varphi = 1$, bet, darbojoties ar pārierosmi, tie pat var atdot reaktīvo jaudu tīklā, tādējādi uzlabojot tīkla $\cos\varphi$ un samazinot sprieguma kritumu un zudumus tīklā.

Sinhronie dzinēji ir mazāk jutīgi pret tīkla sprieguma samazināšanos, jo to maksimālais moments (pārslodzes spēja) ir proporcionāla sprieguma pirmajai pakāpei ($M_{MAX} \sim U$), turpretī asinhronajiem dzinējiem $M_{MAX} \sim U^2$. Turklāt momenta samazināšanos, kas var rasties tīkla sprieguma pazemināšanās dēļ, sinhronajos dzinējos iespējams kompensēt ar ierosmes strāvas palielināšanu.

Vienlaikus jāatzīmē, ka viens no sinhrono dzinēju galvenajiem trūkumiem ir ierosmes sistēmas nepieciešamība. Arī sinhrono dzinēju palaišana ir sarežģītāka un to rotācijas frekvences nepārtrauktās (laidenas) regulēšanas iespējas salīdzinājumā ar asinhronajiem dzinējiem ir daudz ierobežotākas.

Tomēr elektriskajā piedziņā ir gadījumi, kuros lietderīgi izmantot lēcienveidīgu rotācijas frekvences regulēšanu, t.i., mainīt rotācijas frekvenci, piemēram, attiecībā 1 : 2, līdzīgi to veic vairākātrumu asinhronajiem dzinējiem.

Sinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšana ar polu skaita maiņu

Kā zināms [3,4], viens no asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieniem ir statora tinumu polu skaita maiņa. To veic, asinhrono dzinēju statora tinumu izveidojot tā, lai šādu izmaiņu varētu realizēt pārslēdzot statora tinumu spoļu grupas, kur dažādiem slēgumiem atbilstu dažāds polu skaits. Tehniski ekonomisku apsvērumu dēļ šādu rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieni lieto tikai īsslēgta rotora asinhronajiem dzinējiem, kad rotoru polu skaits mainās automātiski, t.i., atbilstoši statora tinumu polu skaitam. Principā šādu regulēšanu var izmantot arī dzinējiem ar fāžu rotoru, tikai tad attiecīgi pārslēgšanu jāveic arī rotorā tinumam.

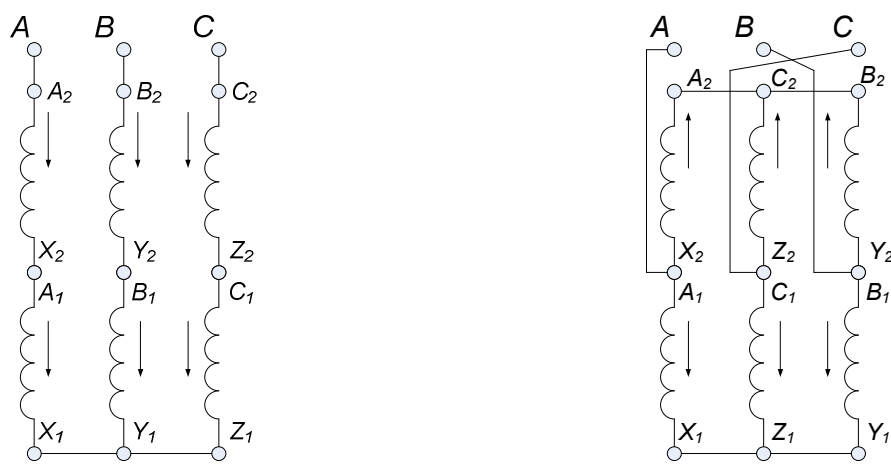
Aplūkojot vairākātrumu sinhronos dzinējus, statora (enkura) tinumu pārslēgšanu uz dažādu polu skaitu varētu veikt tāpat kā vairākātrumu asinhronajiem dzinējiem [3 - 6].

Praksē lieto daudz un dažādus vairākātrumu asinhrono dzinēju statora tinumu slēgumus (vairākās to kombinācijās):

- zvaigznes (Y);
- trīsstūra (Δ);
- dubultzvaigznes (YY).

Turpmāk aplūkosim tikai sinhronos dzinējus, kuru rotācijas frekvenci un polu skaitu maina attiecībā 1:2, jo citi varianti (piemēram, 1:3, 1:4 u.t.t.) no tehniski ekonomiskiem apsvērumiem vairumā gadījumu nav lietderīgi.

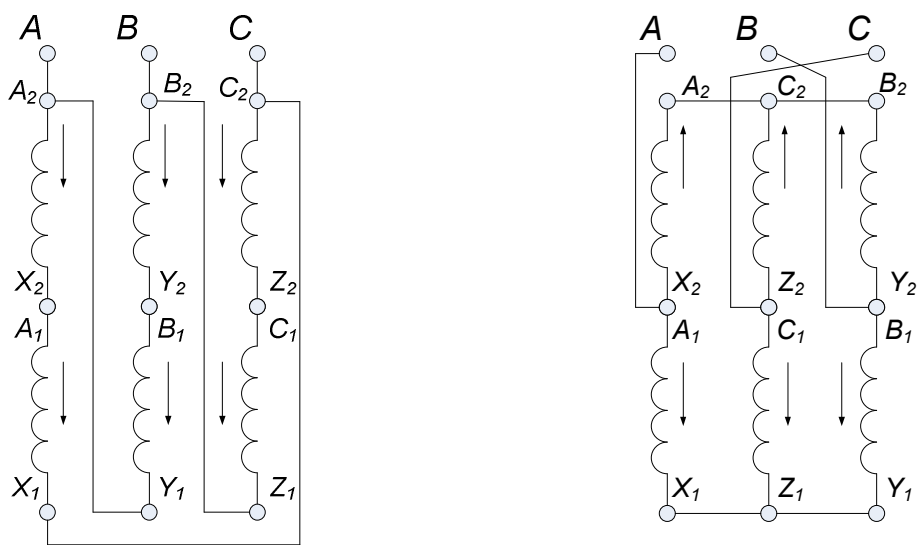
No visām iespējamām statoru tinumu pārslēgšanas shēmām visizplatītākās ir 1. un 2. attēlā parādītās shēmas [2, 7].



$$Y \quad 2 p_2 = 4 (8, 12, \dots) p_1$$

$$YY \quad 2 p_2 = 2 (4, 6, \dots) p_1$$

1. att. Statora tinumu slēguma shēmas dažādam polu skaitam, pārejot no zvaigznes slēguma uz dubultzvaigznes slēgumu



$$\Delta \quad 2 p_2 = 4 (8, 12, \dots) p_1$$

$$YY \quad 2 p_2 = 2 (4, 6, \dots) p_1$$

2. att. Statora tinumu slēguma shēmas dažādam polu skaitam, pārejot no trīsstūra uz dubultzvaigznes slēgumu

Pārslēdzamo polu tinumu katrā fāzē sastāv no divām daļām ar vienādu spoļu grupu skaitu katrā no tām. Ja abās šajā tinumu daļās plūst viena virziena strāva, tinumu slēgums nodrošina magnētisko lauku ar lielāku polu skaitu, bet, izmainot strāvas virzienu viena no tinumu daļām, polu skaits 2 reizes samazinās.

Tā kā pārslēdzot polu skaitu attiecībā 2:1, polu iedaļa izmainās 2 reizes, tad fāžu zonas platumš, kā arī tinumu relatīvais solis $\beta = y/\tau$ izmainās tādā pašā attiecībā. Lai nodrošinātu to pašu rotācijas virzienu, pārslēdzot polus un mainot strāvas virzienu tinumu divās daļās, vienlaikus jāpārslēdz arī statora tinumu divi fāžu gali (piemēram, B un C (sk. 1. un 2. attēlu)).

3. attēlā parādīts, kā var izmainot rotoru ar dažādu polu skaitu attiecībā 2:1. To var panākt ar ierosmes tinumu atsevišķo spoļu dažādiem slēgumiem. Šajā attēlā vienkāršoti parādīts ierosmes lauka (magnētiskās indukcijas B sadalījums), pieņemot, ka tas ir sinusoidāls, gadījumam, kad polu skaita attiecība ir $8 : 4 = 2 : 1$.

No 3. attēlā parādītajiem variantiem praktiska nozīme ir slēgumiem a un b. Slēgumi c un d, kuri arī nodrošina polu skaita attiecību 2 : 1, no tehniski ekonomiskiem apsvērumiem varētu būt lietderīgi tikai īpašos gadījumos un režīmos, kas prasa veikt detalizētus pētījumus.

4. attēlā parādīta ierosmes tinumu spoļu pārslēgšanas shēma ar divpolu pārslēdzī, ja polu skaitu maina attiecībā 8 : 4.

Ar polu pārslēgšanu saistītie teorētiskie un praktiskie jautājumi un to risināšanas ceļi.

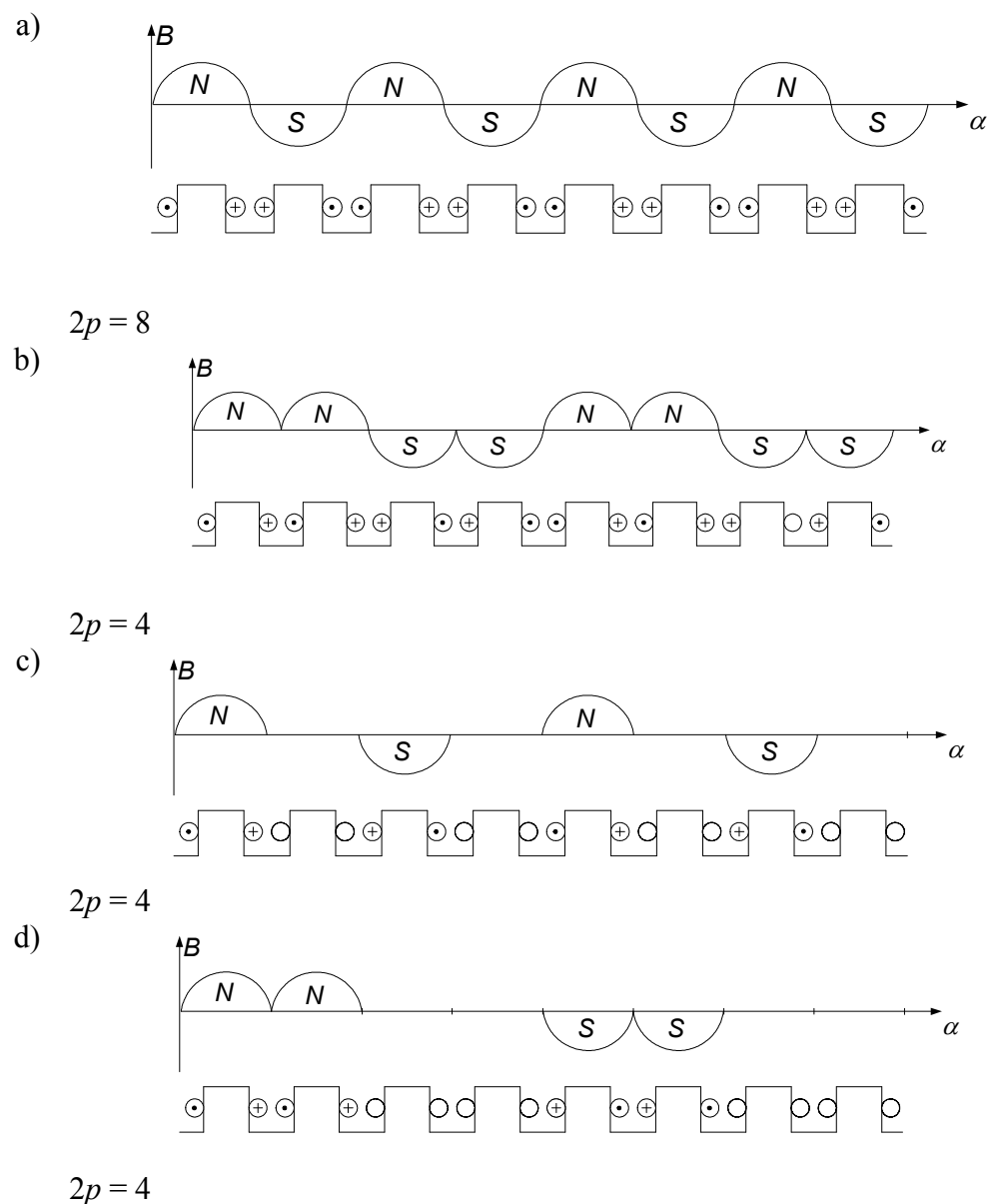
Vienātrumu sinhrono dzinēju darba režīmu un raksturlielņu aprēķinu var veikt ar dažādām pazīstamām un praksē pārbaudītām metodēm. Šīs metodes nosacīti var iedalīt divās lielākās grupās – grafoanalītiskās un skaitliskās. Pirmajā gadījumā izmanto elektrisko un magnētisko ķēžu

teorijas elementus un vektoru diagrammas, bet otrajā gadījumā elektromagnētiskā lauka teoriju (Maksvela vienādojumus) un magnētiskā lauka modelēšanu, kas balstīta uz galīgo elementu metodi.

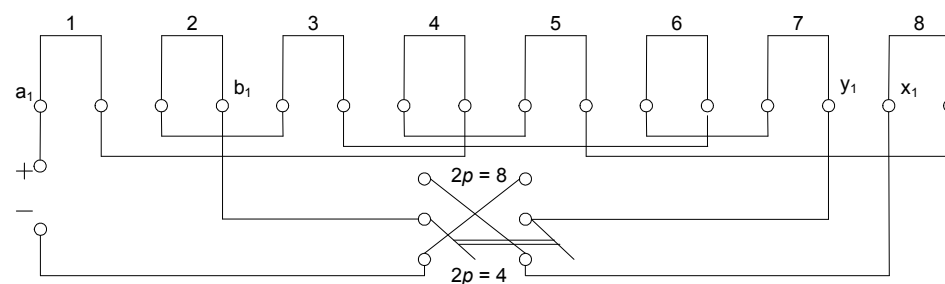
Divātrumu sinhronajos dzinējos, kuri darbojas režīmos ar lielāku ātrumu, t.i., kad $p < p_{max}$, magnētiskajam laukam ir vairākas kvalitatīvas un kvantitatīvas īpatnības salīdzinājumā ar tradicionāla izpildījuma (vienātruma) sinhronajiem dzinējiem.

Galvenās no tām ir:

- 1) magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā kā tukšgaitas, tā slodzes režīmā raksturojas ar to, ka mazākām polu skaitam ir stipri izteikta trešā harmonika;
- 2) magnētiskās sistēmas un tās atsevišķo elementu piesātinājuma ietekme, kuru nav iespējams korekti ievērot, veicot magnētiskās ķēdes aprēķinus ar klasiskajām metodēm;
- 3) enkura reakcijas ietekme uz rezultējošo lauku dažādos režīmos, kuru klasiskajās metodēs ievēro ar laika formas koeficientiem (piemēram, [2, 8]);
- 4) praktiskajos aprēķinos plaši izmantojamo parametru X_{ad} un X_{aq} u.c., noteikšana, jo sinhronajos dzinējos ar $p = p_{max}$ $X_{ad} > X_{aq}$, bet dzinējos ar $p < p_{max}$ $X_{ad} \approx X_{aq}$, turklāt divu reakciju teorijas izmantošana piesātinātām mašīnām nedod tās priekšrocības, kuru dēļ šī teorija tika radīta.



3. att. Ierosmes lauka vienkāršota aina sinhronā mašīnā ar polu maiņu (α - leņķiskā koordināta elektriskajos grādos)



4. att. Ierosmes tinuma spoļu pārslēgšanas shēma

Projektēšana

Elektrisko mašīnu, tajā skaitā sinhrono dzinēju, projektēšanā jāņem vērā divi galvenie faktori, kas saistīti ar nepieciešamību nodrošināt:

- 1) mazāku pašizmaksu (galvenokārt uz materiālu ietaupīšanas rēķina);
- 2) mazākus ekspluatācijas izdevumus (galvenokārt uz zudumu samazināšanas rēķina).

Divātrumu sinhrono dzinēju īpatnība ir tā, ka nodrošināt minētos tehniski ekonomiskos rādītājus būtu vēlams abiem ātruma režīmiem. Tāpēc projekta uzdevumā atšķirībā no parastajiem (vienātruma) sinhronajiem dzinējiem būtu jāuzdod slodzes grafiks (individuāls, statistiski vidējais vai tipveida).

Lai izvēlētos tinumu pārslēgšanas piemērotāko shēmu (Y / YY vai Δ / YY), jānorāda, vai pārejot uz citu ātrumu, jā saglabā nemainīgs moments vai nemainīga jauda.

Projektēšanas gaitā sākotnēji jāizvēlas virkne lielumu, kuru iespējamās vērtības var atrasties šaurākā vai plašākā diapazonā. Tālākajā gaitā šo lielumu vērtības, izmantojot optimizācijas elementus vai citus novērtēšanas kritērijus tiek precizētas.

Šādi lielumi ir:

- 1) magnētiskā indukcija atsevišķos magnētiskās ķēdes posmos, piemēram, statora zobos ($B_z=1,6 \div 2T$), statora jūgā ($B_a=1,2 \div 1,4 T$);

- 2) pārslēdzamā enkura tinuma soļa y_l izvēle (šeit jāievēro, ka $y_l = \beta \frac{Z}{z_p}$ kur y_l - ir nemainīgs lielums neatkarīgi no polu skaita). Tas nozīmē, ka dzinējam ar lielāku polu skaitu ($p = p_{max}$) $\beta_{min} < 1$, bet dzinējam ar mazāku polu skaitu ($p = p_{min}$) $\beta_{max} > 1$. Ja nav nekādu papildus nosacījumu, soli var izvēlēties tā, lai β būtu vidējā aritmētiskā vērtība;
- 3) polu sistēmas ģeometriskie izmēri (gaisa sprauga δ , magnētiskā gaisa sprauga δ_m , polu uzgaļu platums b_p);
- 4) iespēja izmantot enkura tinuma trīsstūra slēgumu, kura katrā fāzē inducētā EDS trešā harmonika rada strāvas trešo harmoniku, kas noslēdzas pa trīsstūra kontūru un izraisa papildzudumus tinumā. Šī parādība, projektējot vairākātrumu sinhronos dzinējus, ir atbilstoši jānovērtē un, ja nepieciešams, jāparedz papildus pasākumi magnētiskā lauka trešās harmonikas samazināšanai;
- 5) izmantojot magnētiskā lauka modelēšanas skaitliskās metodes, jāveic papildus pētījumi par dažādu lielumu ietekmi uz divātruma sinhrono dzinēju raksturlīknēm un šo dzinēju tehniski ekonomiskajiem rādītājiem.

Secinājumi

- 1) Vispusīgi novērtējot sinhrono dzinēju izmantošanas lietderīgumu elektriskajā piedziņā, var secināt, ka tiem ir vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar plaši izplatītajiem asinhronajiem dzinējiem.
- 2) Sinhrono dzinēju izmantošanu zināmā mērā ierobežo to rotācijas frekvences regulēšanas iespējas. Tomēr ir gadījumi, kuros lietderīgi izmantot lēcienveidīgu rotācijas frekvences regulēšanas regulēšanu, līdzīgi kā to veic vairākātrumu asinhronajiem dzinējiem, t.i., ar polu skaita maiņu.
- 3) Lai mainītu polu skaitu, jāparedz iespēja atbilstoši pārslēgt statora un ierosmes tinuma spoles.
- 4) Polu pārslēgšanas rezultātā kvalitatīvi un kvantitatīvi mainās magnētiskā lauka raksturs, kas, savukārt rada nepieciešamību izstrādāt šādu vairākātrumu dzinēju projektēšanas metodiku.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas “Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēc doktorantūras pētījumiem” projekta “Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

Literatūra

1. Сыромятников И.А. Техничко - экономические преимущества синхронных двигателей / Сборник статей под ред. И.А. Сыромятникова - М.: Госэнергоиздат, 1959, 260с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины - Л.: Энергия, 1978, 832 с.
3. A. Zviedris. Elektriskās mašīnas. – Rīga: “Zvaigzne”, 1984, 368 lpp.
4. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др. под ред. Б.М. Петрова и А.Э. Кравчика. - М.: Энергия, 1980, 488 с.
5. Обмоточные данные асинхронных двигателей. под ред. П.И. Цибулевского. - М.: Энергия, 1971, 392 с.
6. Обмотки Электрических машин / Б.И. Зимин, М.Я. Коплан, А.М. Палей и др. - Л.: Энергия, 1970, 472 с.
7. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. ч. 1. Машины переменного тока. - Л. Энергия, 1973.
8. Проектирование Электрических машин. Под ред. И.П. Копылова. - М.: Энергия, 1980, 496с.

Elmanis-Helmanis R., Zviedris A, Podgornovs A. Vairākātrumu sinhrono dzinēju izveidošanas pamatprincipi un iespējas

Darbā apskatīti teorētiskie un praktiskie jautājumi, kas saistīti ar vairākātrumu sinhrono dzinēju izmantošanu elektriskajā piedziņā un problēmām šādu dzinēju izveidē. Formulēti galvenie kritēriji, kas nosaka sinhrono dzinēju izmantošanas lietderīgumu salīdzinājumā ar asinhronajiem dzinējiem (materiālu un ekspluatācijas izmaksas, reaktīvās jaudas kompensācijas iespēja u.c.). Aplūkots un analizēta sinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšana ar polu skaitu maiņu, ko (līdzīgi kā asinhronajiem dzinējiem) veic ar statora tinumu atsevišķo spoļu grupu pārslēgšanu. Aplūktas dažādas pārslēgšanas shēmas, kas nodrošina polu skaita (un tātad arī rotācijas frekvences) izmaiņas attiecībā 1:2. Parādīts, kā praktiski var īstenot sinhronā dzinēja ierosmes tinuma spoļu pārslēgšanu, lai iegūtu magnētisko lauku ar dažādu polu skaitu. Aplūkoti ar spoļu pārslēgšanu saistītie teorētiskie un praktiskie jautājumi. Parādīts, ka vairākātrumu sinhrono dzinēju tehniski ekonomisko rādītāju (pašizmaksu un zudumu) samazināšanai būtu vēlams nodrošināt tā rādītājus abiem ātruma režīmiem. Tas nozīmē, ka projektēšanas uzdevumā atšķirībā no parastajiem (vienātruma) sinhronajiem dzinējiem būtu jāuzdod slodzes grafiki. Turklāt, lai izvēlētos tinuma pieslēgšanas piemērotāko shēmu (zvaigzne – dubultzvaigzne vai trīsstūris – dubultzvaigzne), jānorāda, vai, pārejot uz citu rotācijas frekvenci, jānodrošina nemainīgs moments vai nemainīga jauda.

Elmanis-Helmanis R., Zviedris A., Podgornovs A. Basic rules and possibilities for multispeed synchronous machines creation

At the work are describe theoretical and practical questions, which are linked with multi speed synchronous motors application in the electric drive, ground rules, possibilities and problems in creation of such engines. The most important criteria, which stipulate application effectiveness of synchronous motor comparison with asynchronous engines, are formulated (material and exploitation payments, indemnifications of the reagent power). Examined and analyzed speed regulation in synchronous motors with pole strength exchanging, which (alike as the asynchronous motors) execute with switching of separate spool groups in stator windings. The various switching charts are examined, what provide to exchanging quantity of poles at correlation 1 : 2 (and also synchronous motor speed). Shown, how practical can be realize winding spools switching in the synchronous motor's rotor, that obtain the magnetic field with a various pole numbers. Shown, that for decrease of economic values (prime price and loses) for multi speed synchronous motor's must provide this indices to both modes. This mean, than in a planning task unlike the ordinary (one speed) synchronous engines there are instruct the loading graphs.

Элманис-Хелманис Р., Звиедрис А., Подгорнов А. Возможности и основные принципы создания многоскоростных синхронных двигателей

В работе рассмотрены теоретические и практические вопросы, связанные с использованием многоскоростных синхронных двигателей в электрическом приводе, а также проблемы связанные с выполнением таких двигателей. Сформулированы основные критерии, которые определяют целесообразность использования по сравнению с асинхронными двигателями (расход материалов, эксплуатационные расходы и возможность компенсировать реактивную мощность). Рассмотрена и проанализирована возможность изменения скорости способом изменения числа полюсов (аналогично как и у асинхронных двигателей) . Рассмотрены разные схемы переключения, которые позволяют изменить число полюсов (и скорости) в отношении 1:2. Показано, как практически можно реализовать переключения обмоток возбуждения в синхронных двигателях, чтобы получить магнитное поле с различным числом полюсов. Рассмотрены связанные с переключением полюсов теоретические и практические вопросы. Показано, что для улучшения технико - экономических показателей (себестоимость и потери) необходимо это обеспечить для обоих режимов работы. Это означает, что в задании проектирования в отличие от обычных (односкоростных) синхронных двигателей необходимо задавать графики нагрузки.