

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Svetlana KĻUJEVSKA

**ELEKTRISKO MAŠĪNU SISTĒMAS DINAMIKAS IZPĒTE AR
MATEMĀTISKĀS MODELĒŠANAS METODI**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga - 2005

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Svetlana KĻUJEVSKA
Elektrisko mašīnu un aparātu doktora programmas doktorants

**ELEKTRISKO MAŠĪNU SISTĒMAS DINAMIKAS IZPĒTE AR
MATEMĀTISKĀS MODELĒŠANAS METODI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.sc.ing., profesors
K.KETNERS

Rīga – 2005

UDK 621. 313. 3

S.Kļujevska. Elektrisko mašīnu sistēmas dinamikas izpēte ar matemātiskās modelēšanas metodi. Promocijas darba kopsavilkums. R.: RTU, 2005, 30 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Enerģētikas institūta 2005. gada 10. septembra lēmumu, protokols Nr.17(51).



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

ISBN

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2005.g. 1. decembrī plkst. 15.30 Rīgas Tehniskās Universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, aktu zālē.

OFICIĀLIE OPONENTI

Profesors, tehn. zin. doktors Vitalijs Boronins,
S.-Peterburgas Valsts Tehniskā universitāte,
Elektrotehnisko zinātņu akadēmijas akadēmiķis,
Krievija

Dr.habil. Sc. ing. Vladislavs Pugačovs,
Latvijas ZA Fizikālās enerģētikas institūta
vadošais pētnieks, Latvija

Asoc. Profesors, Dr. Sc. ing. Andrejs Zviedris,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Svetlana Kļujevska

(Paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts krievu valodā, satur 4 nodaļas, slēdzienus, 69 attēlus un ilustrācijas, kopā 159 lappuses. Promocijas darbā ir literatūras saraksts ar 167 nosaukumiem.

SATURS

Darba aktualitāte.....	5
Darba mērķis.....	5
Zinātniskā novitāte.....	6
Pētījumu metodes un līdzekļi	6
Darba saturs	
1. Elektromehānisko sistēmu modelēšana.....	6
1.1. Eksistējošo modelēšanas metožu apskats.....	6
1.2. Koordinātu asu sistēmas izvēle.....	9
1.3. Dažādās koordinātu sistēmās uzdotu mainīgo saskaņošana.....	9
2. Maiņstrāvas elektrisko mašīnu modelēšanas vispārīgie jautājumi.....	10
3. Elektrisko mašīnu sistēmas dinamikas pētīšanas metodika ar matemātiskās modelēšanas metodi.....	11
3.1. Elektrisko mašīnu sistēmas vienādojumu sastādīšanas metode, izmantojot sistēmas elementu vienādojumus.....	11
3.2. Sinhronās mašīnas matemātiskais modelis.....	16
3.3. Asinhronās mašīnas matemātiskais modelis.....	19
3.4. Statiskās slodzes matemātiskais modelis.....	21
4. Elektrisko mašīnu sistēmas dinamikas izpētes metodikas realizācija	21
4.1. Individuālā un grupāla asinhrono dzinēju atbildīgo mehānismu izskreja un pašpalaide.....	21
4.2. No viena avota barota asinhronā un sinhronā dzinēja pārslēgšanas režīmi.....	25
Darba galvenie rezultāti un secinājumi.....	29
Autora publikācijas.....	30

DARBA AKTUALITĀTE

Elektrisko mašīnu (EM) matemātisko modeļu izmantošana paver jaunas perspektīvas elektrisko mašīnu pētīšanā vispār. Iespēja objektu aizvietot ar tā matemātisko modeli dod lielas priekšrocības elektrisko mašīnu pētīšanai. Skaitliskais eksperiments ļauj pētīt un optimizēt daudzparametru nelineāros procesus tajos gadījumos, kad šo procesu pētīšana ar tradicionālām metodēm ir apgrūtināta, vai pat neiespējama. Elektrisko mašīnu natūrpētīšanai nepieciešama eksperimentālo paraugu izveidošana un lieli materiālie ieguldījumi, turklāt tā nenodrošina visas tās iespējas, kuras dod skaitliskie eksperimenti.

Matemātiskā modelēšana ar modernās datortehnoloģijas līdzekļiem dod iespēju ar pietiekamu precizitātes pakāpi izpētīt gan stacionāros, gan pārejas procesus kā atsevišķos elementus, tā arī sistēmā kopumā.

Ir zināms, ka pārejas procesu pētīšana pat vienā atsevišķas elektroenerģētiskās sistēmas (EES) elementā – ģeneratorā, dzinējā utt. – ir saistīta ar zināmām grūtībām, jo katra sistēmas elementa dinamiskie režīmi tiek aprakstīti ar augstas kārtas nelineāru diferenciālvienādojumu sistēmu. Šīs grūtības palielinās tad, ja šādi elementi ir apvienoti energosistēmā.

Mūsdienās projektizstrādņu kvalitātes paaugstināšana ir iespējama tikai plaši izmantojot datortehniku. Elektroenerģētiskās sistēmas matemātiskais modelis dod iespēju, ar modelēšanas līdzekļiem un datortehniku novērtēt elektroenerģētiskās sistēmas dinamiskās īpašības gan normālajos ekspluatācijas, gan avārijas režīmos, kurus bieži nav iespējams eksperimentāli realizēt reālajās iekārtās ekonomisku apsvērumu dēļ, kā arī īpašu ražošanas apstākļu dēļ.

Sakarā ar dažādas komutācijas un aizsardzības aparatūras atdarbības palielināšanas tendenci, pieaug nepieciešamība precīzāk noteikt elektrisko mašīnu režīmu parametrus, lai izvēlētos aizsardzības, vadības un komutācijas aparātus.

Veiktā analīze parāda, ka pazīstamie programmu kompleksi daudzmašīnu sistēmu pārejas procesu modelēšanai neļauj pietiekami precīzi noteikt sistēmā ietilpstošo elektrisko mašīnu režīmu parametrus. Vairākums šo programmu ir orientēts uz ilgstošo režīmu analīzi (līdz dažām sekundēm), bet nepietiekami atspoguļo elektromagnētisko pārejas procesu norisi statoru kontūros pārejas procesa sākotnējā posmā.

DARBA MĒRĶIS

Šī darba mērķis ir:

- izstrādāt maiņstrāvas elektrisko mašīnu funkcionālos modeļus, kas savā struktūrā ietver vienotā sistēmā apvienotus ģeneratorus un patērētājus;
- izstrādāt sistēmas elektrisko mašīnu dinamikas pētīšanas metodiku, kas balstās uz strukturālas modelēšanas metodi, izmantojot Parka-Goreva vienādojumus un kas dod iespēju pētīt elektromagnētiskos pārejas procesus elektrisko mašīnu statoru ķēdēs, turklāt, ņemot vērā to savstarpējo ietekmi;
- iekļaut modeļu elementus energosistēmas funkcionālajā modelī, lai izpētītu elektrisko mašīnu sistēmas dinamiku ar matemātiskās modelēšanas metodi.

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi jāatrisina šādi uzdevumi:

- jāizvēlas elementu apvienošanas veids sistēmā;
- jāpārveido elektrisko mašīnu diferenciālvienādojumu sistēmu ērtā veidā modelēšanai, lai iekļautu elementus sistēmā;
- jāizstrādā maiņstrāvas elektrisko mašīnu funkcionālie modeļi;
- jāizvēlas nelineāro diferenciālvienādojumu sistēmu skaitliskās integrēšanas metode.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

- Izstrādāta daudzmašīnu sistēmas vienādojumu sastādīšanas metode, pamatojoties uz Parka-Goreva elementu vienādojumiem, izmantojot pētāmās daudzmašīnu sistēmas modeļa konstruēšanas strukturālo principu.
- Izstrādāts paņēmiens elementu saišu izveidošanai vienādojumu sistēmā;
- Izmantojamā metodika dod iespēju sastādīt vienādojumus un izpētīt jebkuras konfigurācijas radiāla tipa elektrisko mašīnu sistēmas.

PĒTĪJUMU METODES UN LĪDZEKĻI

Darbā izmantotas šādas pētījumu metodes un līdzekļi:

- Strukturālā modelēšana;
- Līdzības teorija un elektrisko mašīnu teorija elektrisko mašīnu matemātisko modeļu izstrādei;
- Parka-Goreva diferenciālvienādojumi;
- Nelineāro diferenciālvienādojumu sistēmu skaitliskās integrēšanas metodes;
- Programmēšanas valoda FORTRAN, kā arī programma Microsoft Excel.

DARBA SATURS

1. ELEKTROMEĢĀNISKO SISTĒMU MODELĒŠANA

Lai atrisinātu uzdevumu kopumu, kas saistīts ar EES procesu modelēšanu, darba pirmajā daļā veikta esošo modelēšanas metožu salīdzināšana. Doti vispārējie un atsevišķie procesu algoritimizācijas principi maiņstrāvas elektroenerģētiskajā sistēmā, aplūkotas pazīstamās elektroenerģētiskās sistēmas vienādojumu sastādīšanas metodes un grūtības, kas rodas šajā gadījumā, tādas kā koordinātu asu sistēmu izvēle, koordinātu transformēšana.

1.1. Esošo modelēšanas metožu apskats

Izstrādāti daudz un dažādi programmu kompleksi, kas dod iespēju modelēt elektroenerģētisko sistēmu dažādus darba režīmus, ieskaitot autonomās elektroenerģētiskās sistēmas. Šeit varētu minēt tādas programmas kā: EUROSTAG, MATLAB SIMULINK, MUSTANG u.c.

Jāatzīmē, ka izstrādājot programmu algoritmus, jāizpilda virkne prasību, kuras lielā mērā ir pretrunīgas. Pie tām pieskaita šādas:

- objektu matemātiskajā modelēšanā izmantojamo modeļu pietiekams pilnīgums;
- ievērojams elektroenerģētiskās sistēmas apjoms, kas satur vairākus desmitus ģenerējošo staciju un vairākus tūkstošus mezglu un atzarojumu;
- programmu maksimālā ātrdarbība;
- skaitlisko metožu pietiekama precizitāte.

Tā kā nav iespējams apmierināt visas šīs prasības, programmu izstrādātājiem jāizmanto dažāda veida ierobežojumi un kompromisi. Sakarā ar to elektromehānisko pārejas procesu matemātiskās modelēšanas attīstībā ir iezīmējušies divi virzieni. Pirmais virziens raksturojas ar universālu programmu izstrādāšanu, kas paredzētas energosistēmu daudzmašīnu modeļu stabilitātes analīzei. Tās ir, galvenokārt, paredzētas projektēšanas un ekspluatācijas organizācijām. Izveidojot šādas programmas, izšķirošie faktori ir iespēja modelēt liela apjoma struktūras un programmu ātrdarbība. Šīs kvalitātes tiek sasniegtas, izmantojot vienkāršotus

ģeneratoru, ierosmes regulatoru, elektriskās sistēmas slodžu modeļus, kā arī pielietojot vienkāršotas un tuvinātas skaitliskās integrēšanas metodes.

Otrs virziens ir saistīts ar energosistēmu vienkāršu struktūras modeļu analīzi, kad ir iespēja precizēt kādu matemātiskā modeļa daļu un iegūt pareizāku priekšstatu par pārejas procesa norises atsevišķām īpatnībām. Tādus risinājumus izmanto salīdzinošajiem novērtējumiem, kā arī algoritmisko risinājumu pilnveidošanai, ko vēlāk izmanto sarežģītās programmās.

Lielu elektroenerģētisko sistēmu pārejas procesu pētījumi, kad sistēmā pastāv straujas ierosas, vispārīgā gadījumā ir saistīti ar vairāku augstas kārtas nelineāro diferenciālvienādojumu risināšanu. Vienādojumi kļūst vēl komplicētāki tad, ja ievēro elektrisko mašīnu u.c. elektromagnētisko ierīču magnētvasda piesātinājumu. Tāpēc cenšas vairākās programmās ieviest vienkāršojumus, kas ļauj pazemināt diferenciālvienādojumu kārtu. Rezultātā:

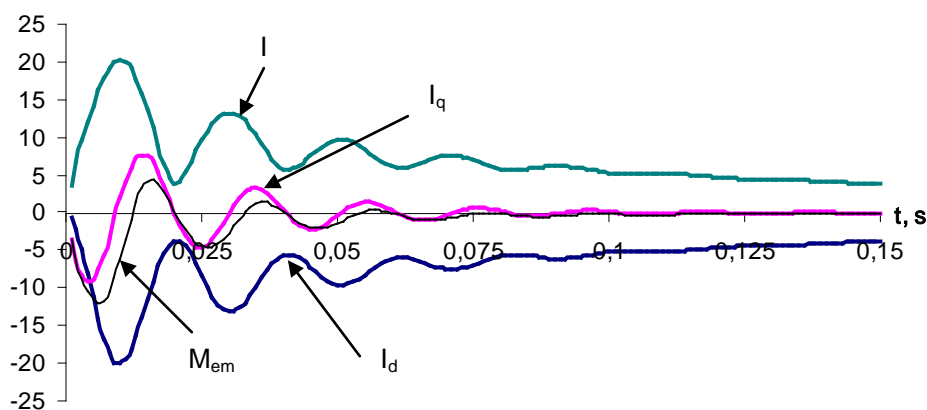
- sinhronā ģeneratora vienādojumos neievēro statora strāvas aperiodisko komponenti, pieņemot, ka virspārejas induktīvā garenpretestība un šķērpretestība ir vienādas;
- asinhronā dzinēja vienādojumos neievēro statora ķēdes aktīvo pretestību, vai neievēro statora strāvas aperiodisko komponenti, vai arī, neievēro elektromagnētiskos pārejas procesus.

Tādējādi praktiski neievēro strāvu izmaiņu pārejas procesa sākotnējā posmā.

Sinhronā ģeneratora (SG) īsslēguma pārejas procesa modelēšanas piemērā, salīdzināsim SG statora ķēžu strāvas, kas iegūtas analītiski, pēc Parka-Goreva vienādojumiem, neievērojot statora aktīvo pretestību un neievērojot statora strāvu aperiodisko komponenti.

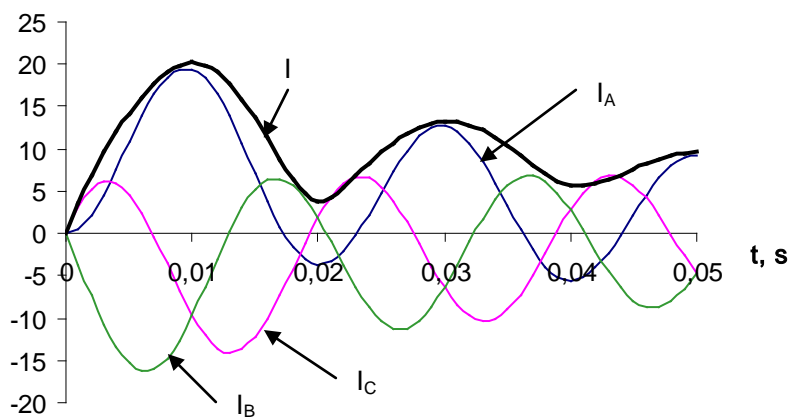
1.1. attēlā parādītas sinhronā ģeneratora statora strāvu komponentu I_d , I_q un rezultējošās strāvas I izmaiņa, kas iegūtas, aprēķinot īsslēgumu pēc pilniem Parka-Goreva vienādojumiem ar Runge-Kutas skaitliskās integrēšanas metodi.

Šeit un tālāk kopsavilkumā visu režīmu elementu izmaiņas parametri attēloti relatīvajās vienībās (r.v.)



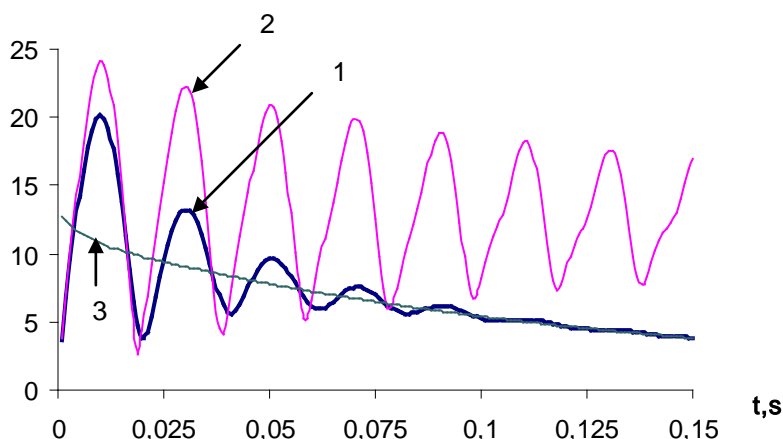
1.1.att. Sinhronā ģeneratora īsslēguma statora strāvas komponentes, rezultējošā strāva un elektromagnētiskais moments.

1.2. att. salīdzināta strāva, kas iegūta, modelējot pēc pilniem Parka-Goreva vienādojumiem, ar fāžu strāvas izmaiņām, kas iegūtas analītiski. No salīdzinājuma var secināt, ka modelī iegūtais strāvas izmaiņas raksturs praktiski sakrīt ar fāžu strāvu aptvērējliķni, kas apstiprina to aprēķinu pareizību, kas veikta modelējot. Rezultātu nesakrišanu var izskaidrot ar skaitļošanas kļūdu, un tā atrodas pieļaujamās robežās.

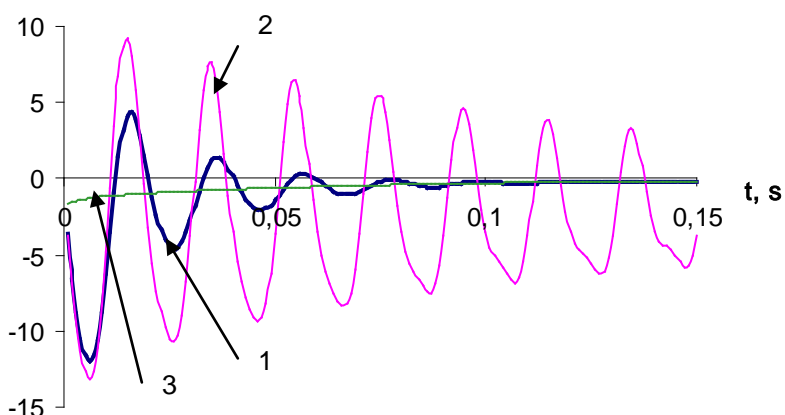


1.2.att. Rezultējošā strāva, kas iegūta pēc pilniem Parka-Goreva vienādojumiem un analītiski iegūtās fāzu strāvas.

Strāvu grafiku (1.3. att.) analīze neapstiprina iespēju izmantot vienkāršotus modeļus. 1.4.attēlā atspoguļotas elektromagnētiskā momenta analogiskas raksturlīknes. Statora aktīvās pretestības neievērošana pilnīgi sagroza gan kvantitatīvo, gan kvalitatīvo procesa ainu. Kā redzams no attēliem, tas noved pie nerimstošo svārstību procesa parādīšanās, kas neatbilst realitātei. Aperiodiskās komponentes neievērošana dod iespēju iegūt procesa kvalitatīvo novērtējumu un īsslēguma strāvas stacionāro vērtību, gadījumā ja bojājums netiek savlaicīgi likvidēts.



1.3.att. Strāvu izmaiņas raksturlīknes, kas iegūtas pēc pilniem vienādojumiem (1), neievērojot statora aktīvu pretestību (2) un aperiodisko komponenti (3).



1.4.att. Elektromagnētiskā momenta izmaiņas raksturlīknes, kas iegūtas pēc pilniem vienādojumiem (1), neievērojot statora aktīvu pretestību (2) un aperiodisko komponenti (3).

Pamatojoties uz veikto salīdzinājumu, darbā tiek piedāvāts izmantot elementu modeļus, kuri izveidoti pēc pilniem Parka-Goreva vienādojumiem, nevis izmantot jau gatavus, standarta programmu kompleksus. Visi iepriekšminētie programmu kompleksi risina

savus elektroenerģētisko sistēmu modelēšanas uzdevumus, bet nedod iespēju izsekot elektromagnētiskos virspārejas procesus to sākuma stadijā (procesi ar ilgumu līdz dažām sekundēm daļām).

Turklāt, modelējot dažādus pārejas procesus, jāievēro tiešā vienas mašīnas ietekme uz otru, ja to statoru ķēdes ir savienotas, tas nozīmē – *izpētīt elektrisko mašīnu sistēmas dinamiku.*

1.2. Koordinātu asu sistēmas izvēle

Zinot elektroenerģētiskās sistēmas atsevišķo elementu diferenciālvienādojumus, var sastādīt kopējo vienādojumu sistēmu, kura apraksta stacionāro un pārejas procesu norisi daudzmašīnu sistēmā. Tieši pirms kopējās elektrisko mašīnu sistēmas vienādojumu sistēmas sastādīšanas ir jānosaka, kādā koordinātu sistēmā būtu lietderīgi uzrakstīt atsevišķo elementu vienādojumus.

Izvēloties rotējošo koordinātu asu sistēmu, par vispārīgo principu uzskata elektroenerģētiskās sistēmas visu pārejas procesu vienādojumu maksimālu vienkāršību. Sinhrono mašīnu, asinhrono dzinēju, statiskās slodzes un saišu vienādojumu kopumam jābūt pēc iespējas vienkāršākam (minimālais periodisko koeficientu, kā arī rotācijas elektrodzinējspēku raksturojošo lacekļu skaits). Elementi, kuri nosaka koordinātu sistēmas racionālo izvēli vienādojumu uzrakstīšanai, parasti ir sinhronās mašīnas.

Sinhrono mašīnu elementu vienādojumiem jābūt uzrakstītiem $d, q, 0$ koordinātu asu sistēmā, kas cieši saistīta ar atsevišķu sinhrono mašīnu rotoriem. Šis apstāklis viennozīmīgi ļauj atbildēt uz jautājumu par EES sinhrono mašīnu vienādojumu ieviešanas nelietderīgumu gan kopējās $d, q, 0$ koordinātu asu sistēmā, kas rotē ar sinhrono ātrumu, gan $d, q, 0$ koordinātu asu sistēmā, un kas cieši saistītās ar vienu no sinhronajām mašīnām.

1.3. Dažādās koordinātu sistēmās uzdotu mainīgo saskaņošana

EES strukturālo modelēšanu īsteno, savienojot elementu matemātiskos modeļus vienā veselumā. Šajā gadījumā jānodrošina robežnosacījumi – atbilstoša koordinātu transformācija, kas nepieciešama, ja izmanto strukturālas modelēšanas metodes.

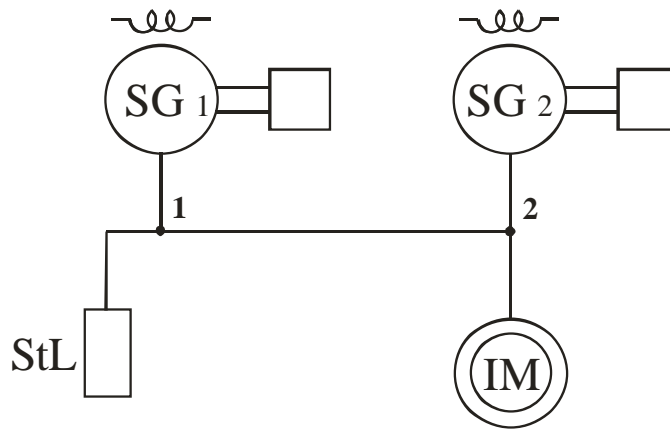
Analizējot elektromehāniskos pārejas procesus sistēmā, kas satur patvaļīgu sinhrono mašīnu skaitu, jāpieļauj iespēja, kas starp sinhrono mašīnu rotoriem var rasties nesaskaņojuma leņķis. Turklāt, to leņķiskās rotācijas frekvences arī būt dažādas. Koordinātu sistēmu skaits, modelējot daudzmašīnu sistēmu, ir noteikts ar sinhrono mašīnu skaitu neatkarīgi no tā, vai tie darbojas ģenerators vai slodzes režīmā.

Šis apstāklis neļauj realizēt Kirhofa likumu mezgla punktā tiešā veidā:

$$\sum |I_i| = 0.$$

Tieša strāvu summēšana būtu iespējama, ja visu elementu strāvas būtu aprakstītas vienā un tajā pašā koordinātu sistēmā. Darbā piedāvāts apvienot elementus, izmantojot elementu statoru ķēžu vienādojumus. Elektrisko mašīnu sistēmas dinamikas pētīšanas metodikas izstrādāšanas princips dots 3.nodaļā. Šim nolūkam darbā piedāvāta statiskās slodzes mezglu izdalīšanas metode sinhronā ģenerators izejā, kas ļauj noteikt slodzes sprieguma komponentes, un tāpat, elektrisko mašīnu sistēmas nākošā elementā ieejā.

Ja pieņem, ka statiskās slodzes strāva piesaistīta pirmā ģenerators koordinātu sistēmai (SG_1), tad rodas nepieciešamība otrā ģenerators strāvu reducēt uz pirmā ģenerators koordinātu sistēmu (1.6.att.).



1.6.att. Modelējamas sistēmas shēma (*SG* – sinhronais ģenerators, *IM* – asinhronais dzinējs, *StL* – statiskā slodze).

Tādējādi par vissarežģītāko posmu daudzmašīnu sistēmas dinamikas pētīšanas metodikas izstrādāšanā ir jāuzskata koordinātu saskaņošana, saišu vienādojumu sastādīšana un to risināšana attiecībā pret mezglu spriegumiem.

2. MAIŅSTRĀVAS ELEKTRISKO MAŠĪNU MODELĒŠANAS VISPĀRĪGIE JAUTĀJUMI

Darba otrajā daļā apskatīti modelēšanas vispārīgie jautājumi: modelēšanas procesa struktūra, elektrisko mašīnu matemātisko modeļu attīstības vēsture, pamatpieņēmumi elektrisko mašīnu modelēšanā, kā arī nelineāro diferenciālvienādojumu sistēmu skaitliskās integrēšanas metodes izvēles pamatojums un integrētās matemātiskās sistēmas salīdzinājums.

Maiņstrāvas mašīnās norisošo matemātisko procesu apraksta uzdevumu var atrisināt ar lielāku vai mazāku tuvinājumu. Turklāt, pētījums reālos sarežģītos apstākļos tiek aizstāts ar pētījumu vienkāršākos, ideālizētos apstākļos. Bez pieņēmumiem analītiskais pētījums sarežģītas, un dažreiz kļūst pārāk apgrūtināts, pat ja izmanto mūsdienu datortehnoloģiju. Turpretim, ja šādi pieņēmumi ir rupji, iespējams iegūt pētāmā procesa nepareizu ainu. Ne vienmēr iespējams procesu pētīt analītiski reālā elektriskajā mašīnā.

Tāpēc matemātiskajā modelēšanā ievēro tikai galvenos faktorus, ignorējot mazsvarīgos. Daudzgadīga pieredze elektrisko mašīnu matemātisko modeļu pētīšanā dod pamatu izmantot tā saucamo idealizēto EM. Tajā pat laikā noteiktie pieņēmumi, kas idealizē mašīnu, ļauj saglabāt pieļaujamo noviržu robežas to procesu reālo ainu, kuri noris reālajā mašīnā. Turklāt, iespējams iegūt pietiekami precīzus vienādojumus idealizētajai mašīnai, kuri ir pilnīgi pieņemami risinājuma precizitātes ziņā inženieru aprēķiniem.

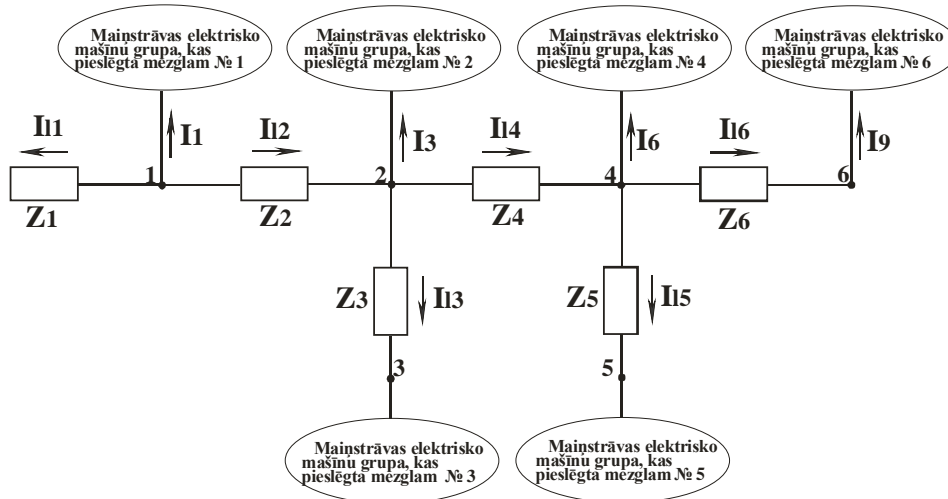
Veicot pētījumus un aprēķinus, modelējot pārejas procesus EM, kā arī risinot nelineāro diferenciālvienādojumu sistēmas, uzdevuma nostādne paredz arī racionālas metodes izvēli, kas atkarīga no katras metodes īpatnībām. Par galvenajiem skaitlisko metožu izvēles kritērijiem, kuri nosaka noteiktā algoritma izmantošanas lietderīgumu analīzes vai sintēzes uzdevuma risināšanai, uzskata precizitāti, skaitlisko stabilitāti, mašīnlaika patēriņu, algoritma struktūru, kas dod iespēju izmantot to plašas klases uzdevumu risināšanai. Ir pietiekami daudz skaitlisko metožu, katrai no kurām ir savs skaitļošanas algoritms.

Gadījumos, kad ir nepieciešams veikt pārejas procesu detalizētu analīzi ģeneratoros, ņemot vērā arī slāpētājtinumu ietekmi, kā arī turbīnas jaudas regulēšanas sistēmas un ģeneratora ierosmes ietekmi, aprēķinus veic ar augstas kārtas integrēšanas metožu palīdzību. Tās ir stabilākas un nepieļauj ievērojamu kļūdas uzkrāšanos skaitļošanas procesā. Aprakstot procesus ģeneratoros pēc pilniem Parka-Goreva vienādojumiem, ieteicams izmantot Runge-Kutas IV kārtas metodi un II kārtas prognozes un korekcijas metodi ar laika soli 0,001 s.

3. ELEKTRISKO MAŠĪNU SISTĒMAS DINAMIKAS PĒTĪŠANAS METODIKA AR MATEMĀTISKAS MODELĒŠANAS METODI

Darba trešajā daļā iztirzāta metodika un starpelementu saišu vienādojumu uzbūves princips (3.1.att). Parādīti sinhronās, asinhronās mašīnas un statiskās slodzes modeļi modelēšanai ērtā veidā.

3.1. Daudzmašīnu sistēmas vienādojumu sastādīšanas metode, izmantojot sistēmas elementu pilnos vienādojumus



3.1.att. Modelējamās sistēmas shēma.

Jebkuras sistēmas analīze parāda, ka to var sadalīt sastāvdaļās: sinhronais ģenerators (*SG*), asinhronais dzinējs (*IM*), statiskā slodze (*StL*). Ja ir iespēja uzdot spriegumu U un tā komponentes U_d , U_q pieslēgšanas punktā, tad, uzrakstot elektroenerģētiskās sistēmas atsevišķo elementu diferenciālvienādojumus, var sastādīt kopējo vienādojumu sistēmu, kura apraksta stacionāro un pārejas procesu norisi.

Šajā gadījumā var piedāvāt šādu darbības secību:

- Mezgla punktā nosaka spriegumu. Saskaņā ar elektrotehnikas likumiem šis spriegums ir vienāds visiem elementiem.
- Šo spriegumu izmanto visu elementu modeļos, kas pieslēgti attiecīgajam mezglam. Nosaka režīma parametrus (strāvas komponentes).
- Saskaņā ar pirmo Kirhofa likumu (strāvu summa mezglā ir vienāda ar 0), atrod pirmdotā elementa strāvu. Par tādu elementu var būt aktīvi induktīva slodze, kuru var vienmēr izdalīt jebkurā sistēmā.

Diferenciālvienādojumus sastāda visiem sinhronajiem ģeneratoriem, ņemot vērā sistēmas parametrus līdz punktam, kurā pievienota ekvivalentā slodze.

Asinhrono dzinēju diferenciālvienādojumus ievieš arī, ņemot vērā tīkla parametrus līdz punktam, kur barotājliniju pievieno kopnei. Pretstības momenti uz piedziņas vārpstām tiek pieņemti saskaņā ar piedziņu raksturu.

Izmantojot elementu pilnos vienādojumus, tos apvieno visu statoru ķēžu kopējā vienādojumu sistēmā. Mezglu punkta spriegumu, kuram ir pieslēgti visi sistēmas elementi, aktīvi induktīvai slodzei var aprēķināt kā:

$$\begin{cases} U_{d1} = R_1 I_{d1} + L_1 \frac{dI_{d1}}{dt} - L_1 \omega I_{q1} \\ U_{q1} = R_1 I_{q1} + L_1 \frac{dI_{q1}}{dt} + L_1 \omega I_{d1} \end{cases}, \quad (3.1)$$

vai matricu formā:

$$\begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{q1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{q1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -L_1 \omega \\ L_1 \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{q1} \end{bmatrix}.$$

Šī pati vienādība saīsināta formā:

$$\begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{q1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 & -L_1 \omega \\ L_1 \omega & R_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{q1} \end{bmatrix}.$$

Jeb, izmantojot saīsinātus simboliskos apzīmējumus:

$$U_{i1} = L_1 \frac{d}{dt} I_{i1} + Z_1 I_{i1}, \quad (3.2)$$

$$\text{kur } Z_1 = \begin{bmatrix} R_1 & -L_1 \omega \\ L_1 \omega & R_1 \end{bmatrix}.$$

Pirmajā mezgla punktā ieslēdz pretestību Z_1 , ar kuru uzdod spriegumu. Pretestības $Z_2 - Z_6$ atbilst savienotājliniju pretestībām starp mezgla punktiem. Uzskatām, ka koordinātu sistēma katrā mezgla punktā ir vienīga. Virzoties no pēdējā mezgla uz pirmo, izteiksim līniju strāvu vērtības ar mezglu elementu strāvām:

$$I_{16} = I_{\Sigma 6}; \quad (3.3)$$

$$I_{15} = I_{\Sigma 5}; \quad (3.4)$$

$$I_{14} = I_{\Sigma 4} + I_{15} + I_{16} = I_{\Sigma 4} + C_{45} I_{\Sigma 5} + C_{46} I_{\Sigma 6}; \quad (3.5)$$

$$I_{13} = I_{\Sigma 3}; \quad (3.6)$$

$$I_{12} = I_{\Sigma 2} + I_{13} + I_{14} = I_{\Sigma 2} + C_{23} I_{\Sigma 3} + C_{24} I_{\Sigma 4} + C_{25} I_{\Sigma 5} + C_{26} I_{\Sigma 6}; \quad (3.7)$$

$$I_{11} = -I_{\Sigma 1} - I_{12} = -(I_{\Sigma 1} + C_{12} I_{\Sigma 2} + C_{13} I_{\Sigma 3} + C_{14} I_{\Sigma 4} + C_{15} I_{\Sigma 5} + C_{16} I_{\Sigma 6}), \quad (3.8)$$

kur C_{ij} – to lielumu transformācijas matrica, kura iegūta 1. punkta koordinātu asīs, un kas reducētas uz 2. punkta koordinātu asīm, no otrā punkta uz trešo utt.:

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} \cos \delta_{ij} & -\sin \delta_{ij} \\ \sin \delta_{ij} & \cos \delta_{ij} \end{bmatrix}.$$

Izmantojot vienādojumu (3.8), atrodam līnijas strāvas atvasinājumu pēc laika:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{11} = & -\left(\frac{d}{dt} I_{\Sigma 1} + C_{12} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 2} + C_{13} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 3} + C_{14} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 4} + C_{15} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 5} + C_{16} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 6} \right) - \\ & - (C'_{12} I_{\Sigma 2} + C'_{13} I_{\Sigma 3} + C'_{14} I_{\Sigma 4} + C'_{15} I_{\Sigma 5} + C'_{16} I_{\Sigma 6}), \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\text{kur } C'_{ij} = \frac{d}{dt} C_{ij}.$$

Izteiksmes (3.9.) diferencēšanas operācija ir pieļaujama, jo katrs saskaitāmais, ja izmanto pilnus diferenciālos vienādojumus, būtībā ir nepārtraukta diferencējamā funkcija.

Noteiksim arī citu strāvu atvasinājumus pēc laika, izmantojot izteiksmes (3.3)-(3.7):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{12} = \frac{d}{dt} I_{\Sigma 2} + C_{23} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 3} + C_{24} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 4} + C_{25} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 5} + C_{26} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 6} + \\ C'_{23} I_{\Sigma 3} + C'_{24} I_{\Sigma 4} + C'_{25} I_{\Sigma 5} + C'_{26} I_{\Sigma 6}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt} I_{13} = \frac{d}{dt} I_{\Sigma 3}, \quad (3.11)$$

$$\frac{d}{dt} I_{14} = \frac{d}{dt} I_{\Sigma 4} + C_{45} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 5} + C_{46} \frac{d}{dt} I_{\Sigma 6} + C'_{45} I_{\Sigma 5} + C'_{46} I_{\Sigma 6}, \quad (3.12)$$

$$\frac{d}{dt} I_{15} = \frac{d}{dt} I_{\Sigma 5}, \quad (3.13)$$

$$\frac{d}{dt} I_{16} = \frac{d}{dt} I_{\Sigma 6}. \quad (3.14)$$

Shēmas mezglu spriegumus izteiksim ar līnijas strāvām:

$$U_2 = C_{21} U_1 - Z_2 I_{12} - L_2 \frac{d}{dt} I_{12}, \quad (3.15)$$

$$U_3 = C_{32} U_2 - Z_3 I_{13} - L_3 \frac{d}{dt} I_{13}, \quad (3.16)$$

$$U_4 = C_{42} U_2 - Z_4 I_{14} - L_4 \frac{d}{dt} I_{14}, \quad (3.17)$$

$$U_5 = C_{54} U_4 - Z_5 I_{15} - L_5 \frac{d}{dt} I_{15}, \quad (3.18)$$

$$U_6 = C_{64} U_4 - Z_6 I_{16} - L_6 \frac{d}{dt} I_{16}, \quad (3.19)$$

Jāatzīmē, ka mezglu spriegumu izteiksmes nav atkarīgas no pieņemtā līniju strāvu virziena, turklāt, novērojama šāda likumsakarība:

- visos gadījumos mezgla balstspriegums (pirmdotā elementa ieslēgšanas vietā) ir izteikts kā pirmdotās pretestības un sadales shēmas visu elementu statoru ķēžu strāvu reizinājums;
- sprieguma kritums savienošanas līnijā starp n un $n+1$ mezgla punktiem ir proporcionāls visu elementu strāvām, kas atrodas aiz $n+1$ mezgla punkta.

Šīs likumsakarības ir spēkā jebkurai sarežģītai radiālā tipa sadales shēmai, jo katrs nākošais spriegums būs izteikts caur iepriekšējā mezgla punkta spriegumu, atņemot sprieguma kritumu savienošanas līnijā.

Ievietojot vienādojumā (3.2.) līnijas strāvas vērtības no (3.8.) un tās atvasinājumus no (3.9.), kā arī mezglu spriegumus vienādojumos (3.15)-(3.19) ievietojot strāvu vērtības (3.3)-(3.7) un to atvasinājumus (3.10)-(3.14), iegūstam šādu vienādojumu sistēmu, kura atspoguļota bloku matricu veidā:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ C_{21} U_1 \\ C_{32} U_2 \\ C_{42} U_3 \\ C_{54} U_4 \\ C_{64} U_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_6 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ 0 & 1 & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \begin{vmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_6 \end{vmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ 0 & 1 & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\ & \times \frac{d}{dt} \begin{vmatrix} I_{\Sigma 1} \\ I_{\Sigma 2} \\ I_{\Sigma 3} \\ I_{\Sigma 4} \\ I_{\Sigma 5} \\ I_{\Sigma 6} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & C'_{12} & C'_{13} & C'_{14} & C'_{15} & C'_{16} \\ 0 & 0 & C'_{23} & C'_{24} & C'_{25} & C'_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C'_{45} & C'_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} I_{\Sigma 1} \\ I_{\Sigma 2} \\ I_{\Sigma 3} \\ I_{\Sigma 4} \\ I_{\Sigma 5} \\ I_{\Sigma 6} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Pamatojoties uz iegūto vienādojumu, nevar aprēķināt shēmas mezgla spriegumus mezglu kā elementu summārās strāvas funkciju, kuras sākotnējās vērtības ir uzdotas katrā integrēšanas solī, jo vienādojuma labā puse satur elementus, kas proporcionāli statora elementu strāvu atvasinājumiem pēc laika.

Jāievēro, ka izstrādātais modelis satur diferenciālvienādojumu sistēmas katram sistēmas elementam, kas tiek atrisinātas attiecībā pret strāvu atvasinājumiem pēc laika.

Pieņemot sistēmas elementu vienādojumu atrisinājuma noteiktu formu attiecībā pret strāvu atvasinājumiem pēc laika, sakarība, kas izsaka statoru strāvu vektoru projekcijas atvasinājumus pēc laika, ir šāda:

$$\frac{d}{dt} I = QU + H, \quad (3.21)$$

kur

$$[H] = [A][I] + [B] \text{-sinhronai mašīnai;}$$

$$[H] = [A][I] \text{-asinhronai mašīnai un statiskai slodzei.}$$

Matrica Q ir atkarīga tikai no mašīnas parametriem, bet matricu H aprēķina no uzdotajiem parametriem un sākotnējām mainīgo lielumu vērtībām. Tādējādi izteiksme (3.21.) savā būtībā ir vispārīgā forma, kas izsaka statoru ķēžu elementu diferenciālvienādojumus, tāpēc summārā attēlotājvektora atvasinājumu no n mezgla punkta ar k elementiem var izteikt ar šādu sakarību:

$$\frac{d}{dt} I_{\Sigma n} = \left(\sum_{i=1}^k Q_{in} \right) U_n + \sum_{i=1}^k H_{in} = Q_{\Sigma n} U_n + H_{\Sigma n}. \quad (3.22)$$

Ievietojot atrasto sakarību (3.22.) izteiksmē (3.20.), iegūsim matricas algebrisko izteiksmi sadales shēmas statoru ķēdēm, no kuras var atrast mezglu spriegumus. Izmantojot saīsinātu matricu pierakstu, ieejošo sprieguma izteiksmē, var iegūt izteiksmi mezgla spriegumu attēlotājvektoram šādā veidā:

$$[U] = -([K_1] + [L] [K_2] [Q_{\Sigma}])^{-1} \{ [L] [K_2] [H_{\Sigma}] + ([L] [K_2]' + [Z] [K_2]) [I_{\Sigma}] \}, \quad (3.23)$$

kur $[K_2]' = \frac{d}{dt} [K_2];$

$[K_1], [K_2]$ – koordinātu matrica, kas attēlo daudzmašīnu sistēmas struktūru;

$[L]$ – savienotājliniju induktivitātes diagonālā matrica;

$[Z]$ – starpmezglu savienotājliniju pretestību matrica;

$[Q]$ – mezglu elementu parametru matrica Q_{Σ} ;

$[H_{\Sigma}]$ – elementu H_{Σ} matrica-kolonna, kuru aprēķina zinot strāvu sākumvērtības;

$[I_{\Sigma}]$ – mašīnas statoru ķēžu strāvu un mezglu punktiem slodžu pieslēgto matrica.

Ar piedāvātas izteiksmes (3.23) palīdzību var modelēt un analizēt gan normālos ekspluatācijas režīmus, gan avārijas režīmus, līdz pat režīmam, kas tuvs tiešam īsslēgumam ($Z_I=0$). Ja $Z_I=0$ būs ciešs īsslēgums punktā I . Analogiska bojājuma imitācija citos mezgla punktos, nemainoties pieslēguma punktam, kas uzdod pretestību, nav iespējama. Kaut gan režīmus, pietiekami tuvus tiešiem īsslēgumiem, var iegūt, ja iepriekš paredz pasīvo $R-L$ ķēžu pieslēgšanu nepieciešamajos mezglu punktos.

Bāzes vienību izvēles īpatnības, modelējot daudzmašīnu sistēmu

Darbā rotējošo elementu vienādojumi pierakstīti relatīvo vienību sistēmā (sistēma X_{ad}), jeb relatīvo vienību sistēmā ar vienādām mijinduktivitātes pretestībām un vienādiem magnetizējošiem spēkiem (MS). Ja sistēmā ir daudz ģeneratoru, tad vairākos gadījumos, par bāzes lielumu parasti pieņem to pilnu kopējo jaudu. Izmantojot šādu pieeju, jāpārreķina EES visu elementu parametri, ja mainās ģeneratoru skaits.

Darbā piedāvāta bāzes vienību izvēles metode, kura šādu nepieciešamību izslēdz. Par bāzes vienību katram elementam, neatkarīgi no kopēja elementu skaita, tiek pieņemta tā pilnā jauda. Tā, piemēram, divu ģeneratoru darbības laikā, ja tie baro trīs asinhronos dzinējus, ar visu elementu nominālo slodzi, elektroenerģijas avotu divkārsā strāva būs vienāda ar trīskārtīgu slodzes strāvu. Šīs pretrunas novēršanai nepieciešams samazināt katru no strāvām, pareiznot ar mēroga koeficientiem, kuru lielumus varētu noteikt kā elementa pilnās jaudas attiecību pret enerģijas avotu pilno jaudu:

$$m_i = \frac{S_i}{\Sigma S_{SG}}$$

Lai modelēšanai izmantotu elektrisko mašīnu parametrus, kuri aprēķināti savās bāzes vienībās, mezglu spriegumu attēlotājvektora vienādojuma izteiksmē (3.23) $[Q]$, $[H]$ un $[I]$ matricu elementus reizina ar mērogu koeficientiem. Ja modelējamā sistēmā ir tikai viens barošanas avots, sinhronā ģeneratora mēroga koeficientam jābūt $m_{SG} = 1$. Sistēmā ar ģeneratoru skaitu, kas lielāks par vienu, jānosaka summārā ģenerātā jauda ΣS_{SG} un mēroga koeficienti jānosaka, attiecinot pret summāro:

$$m_{SG1} = \frac{S_{SG1}}{\Sigma S_{SG}}; \quad m_{SG2} = \frac{S_{SG2}}{\Sigma S_{SG}}; \quad \text{u.t.t.}$$

Piedāvātā metodika ļauj modelēt sistēmu ar vairākiem barošanas avotiem. Jebkura shēmas elementa atslēgšana algoritmā atbilst mēroga koeficienta nulles vērtībai. Šī elementa atkārtotai ieviešanai darba režīmā vai pieslēgšanai no jauna nepieciešams uzdot mēroga koeficienta vērtību atbilstoši elementa jaudai. Slodzes elementiem (asinhronie, sinhronie dzinēji, statiskā slodze) mēroga koeficienti ir šādi:

$$m_{AD} = \frac{S_{AD}}{\Sigma S_{SG}}; \quad m_{SD} = \frac{S_{SD}}{\Sigma S_{SG}}; \quad m_{sIL} = \frac{S_{sIL}}{\Sigma S_{SG}}$$

Tad izteiksmi (3.23) var pierakstīt šādi:

$$[U] = -([K_1] + [L] [K_2] [mQ_{\Sigma}])^{-1} \{ [L] [K_2] [mH_{\Sigma}] + ([L] [K_2] + [Z] [K_2]) [mI_{\Sigma}] \}. \quad (3.24)$$

Aplūkotajai mērogošanas metodei ir tā papildpriekšrocība, ka tā ļauj mainīt stacijas slodzi, izmainot mēroga koeficientu. Ja $m_i = 0$, atbilstoša elementa ietekmes uz sistēmu nav, t.i. šis elements ir atslēgts no sistēmas.

3.2. Sinronās mašīnas matemātiskais modelis

Kā tika atzīmēts, pārejas procesu aprēķina algoritmus, kad sistēmā notiek straujas ierosas, būtu lietderīgi konstruēt, balstoties uz pārveidotajiem diferenciālvienādojumiem. Šāds algoritms ir vienkāršāks, jo vienādojumu skaits pēc pārveidošanas kļūst mazāks un periodiski mainīgos koeficientus aizstāj ar konstantiem koeficientiem.

Lai pētītu rotējošo elektrisko mašīnu pārejas procesu, tai skaitā sinhrono, nepieciešams sastādīt statoru un rotoru elektrisko kontūru vienādojumus un rotora kustības diferenciālvienādojumus. Šo vienādojumu forma ir atkarīga no koordinātu asu izvēles un strāvas pozitīvā virziena. Par mašīnas darba pamatrežīmu var pieņemt ģenerators vai dzinēja režīmu. Tā kā sinhronās mašīna pielietojums galvenokārt ir saistīts ar elektriskās enerģijas ražošanu, tālāk par pamatrežīmu ir pieņemts ģenerators režīms.

Maiņstrāvas elektrisko mašīnu modelis fāžu koordinātu sistēmā:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= R i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} \\ u_b &= R i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} \\ u_c &= R i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} \\ u_f &= R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 &= R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \\ 0 &= R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (3.25)$$

kur Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c – pilnais plūsmas saķēdējums ar fāzes tinumiem a, b, c ;

u_a, u_b, u_c – fāzes spriegumu momentānās vērtības;

i_a, i_b, i_c – fāzes strāvu momentānās vērtības;

R_a, R_b, R_c – fāzes tinumu aktīvas pretestības (statoru simetrijas gadījumā

$R_a = R_b = R_c = R$);

u_f, i_f, Ψ_f, r_f – attiecīgi ierosmes tinumam pievadītais spriegums, ierosmes tinuma strāva, pilnais plūsmas saķēdējums un šī tinuma aktīvā pretestība.

Mašīnas rotora kustības vienādojums ir:

$$M_M = M_{em} + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.26)$$

kur M_M – mehāniskais moments uz vārpstas;

M_{em} – elektromagnētiskais moments;

$J \frac{d\omega}{dt}$ – dinamiskais moments;

ω – rotora leņķiskā frekvence;

J – rotējošo masu inerces moments.

Pārejot no vienādojumiem, kas satur periodiskus koeficientus, uz vienādojumiem ar nemainīgiem koeficientiem, fāžu koordinātu sistēmu aizstāj ar $d, q, 0$ koordinātām, fāzes mainīgie (piemēram, strāvas i_a, i_b, i_c) pārveidojas par jauniem mainīgajiem $d, q, 0$ koordinātu sistēmā (strāvas i_d, i_q, i_0). Šī pārveidojuma realizēšanai izmanto attēlotājvektoru metodi. Visi vienādojumi ir pierakstīti relatīvājās vienībās (sistēma X_{ad}), jeb relatīvo vienību sistēmā ar vienādām mijinduktivitātes pretestībām un vienādiem MS.

Sinhrono mašīnu matemātiskais modelis $d, q, 0$ koordinātās:

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= \frac{d\Psi_0}{d\tau} + i_0 R; \\ u_d &= \frac{d\Psi_d}{d\tau} - \Psi_q \omega + i_d R; \\ u_q &= \frac{d\Psi_q}{d\tau} + \Psi_d \omega + i_q R; \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{d\tau} + i_f R_f; \\ 0 &= \frac{d\Psi_D}{d\tau} + i_D R_D; \\ 0 &= \frac{d\Psi_Q}{d\tau} + i_Q R_Q, \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

kur $\tau = \omega t$ – laiks elektriskajos radianos vai sinhronajās sekundēs.

Rotora kustības vienādojums ir:

$$T_M \frac{d\omega}{d\tau} = M_M - (\Psi_q \cdot i_d - \Psi_d \cdot i_q), \quad (3.28)$$

kur T_M – mašīnas mehāniskā laika konstante elektriskajos radianos.

Visu mašīnas konturu plūsmas saķēdējumi ir pierakstīti $d, q, 0$ koordinātēs un satur tikai no laika neatkarīgas konstantes – induktīvās pretestības:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_0 &= X_0 i_0; \\ \Psi_d &= X_d i_0 + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D; \\ \Psi_q &= X_q i_q + X_{aq} i_Q; \\ \Psi_f &= X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_D; \\ \Psi_D &= X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_D i_D; \\ \Psi_Q &= X_{aq} i_q + X_Q i_Q. \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

Lai iegūtu sinhrono mašīnu modelēšanas diferenciālvienādojumus, kas izteikti ar strāvu mainīgajiem, vienādojumu sistēmā (3.27) ievietosim (3.29). Tad, atrisinot atteicībā pret strāvas atvasinājumiem, iegūsim:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_d \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_d \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{kur } Q_1 &= \frac{X_D X_f - X_{ad}^2}{\Delta d}; \quad Q_2 = \frac{X_Q}{\Delta q}; \quad Q_3 = -\frac{X_{sD} X_{ad}}{\Delta d}; \quad Q_4 = -\frac{X_{sf} X_{ad}}{\Delta d}; \quad Q_5 = -\frac{X_{aq}}{\Delta q}; \\ \Delta d &= X_d X_f X_D - X_{ad}^2 (X_d + X_D + X_f - 2X_{ad}); \quad \Delta q = X_q X_Q - X_{aq}^2; \\ a_{11} &= -R_a Q_1; \quad a_{12} = X_q \omega Q_1; \quad a_{13} = -R_f Q_3; \quad a_{14} = -R_D Q_4; \quad a_{15} = X_{aq} \omega Q_1; \\ a_{21} &= -\omega X_d Q_2; \quad a_{22} = -R_a Q_2; \quad a_{23} = -X_{ad} \omega Q_2; \quad a_{24} = -X_{ad} \omega Q_2; \quad a_{25} = -R_Q Q_5; \\ a_{31} &= -R_a Q_3; \quad a_{32} = X_q \omega Q_3; \quad a_{33} = -\frac{X_d X_D - X_{ad}^2}{\Delta d} R_f; \quad a_{34} = \frac{X_s X_{ad}}{\Delta d} X_D; \quad a_{35} = X_{aq} \omega Q_3; \\ a_{41} &= -R_a Q_4; \quad a_{42} = X_q \omega Q_4; \quad a_{43} = \frac{X_s X_{ad}}{\Delta d} R_f; \quad a_{44} = -\frac{X_d X_f - X_{ad}^2}{\Delta d} R_D; \quad a_{45} = X_{aq} \omega Q_4; \\ a_{51} &= -X_d \omega Q_5; \quad a_{52} = -R_a Q_5; \quad a_{53} = -X_{ad} \omega Q_5; \quad a_{54} = -X_{ad} \omega Q_5; \quad a_{55} = -\frac{X_q}{\Delta q} R_Q. \\ B_1 &= Q_3 u_f; \quad B_2 = 0; \quad B_3 = \frac{X_d X_D - X_{ad}^2}{\Delta d} u_f; \quad B_4 = -\frac{X_s X_{ad}}{\Delta d} u_f; \quad B_5 = 0. \end{aligned}$$

$$\text{Vai} \quad \frac{d}{dt} [I_{SG}] = [Q_{SG}] [U_{SG}] + [H_{SG}], \quad (3.30)$$

$$\text{kur} \quad [H_{SG}] = [A_{SG}] [I_{SG}].$$

Lai ievērotu *magnētiskās ķēdes piesātinājumu no galvenās plūsmas* ir nepieciešams plūsmas saķēdējumu izteiksmēs izmantot mijindukcijas pretestības vērtību X_{ad} , kas atkarīga no piesātinājuma. Šo pretestību var aprēķināt, izmantojot mašīnas magnetizēšanas līkni un no tās iegūto funkcionālo sakarību atkarībā no rezultējošā plūsmas saķēdējuma mašīnas gaisa spraugā:

$$X_{ad} = f(\Psi_s),$$

kur Ψ_s – rezultējošais plūsmas saķēdējums.

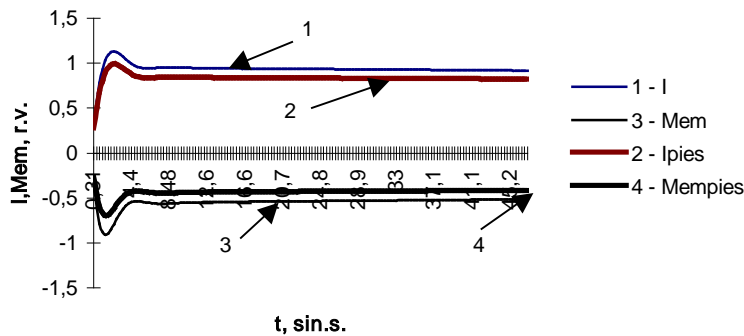
Šim mērķim izmanto konkrētas mašīnas tukšgaitas raksturlīkni relatīvajās vienībās. Ja šāda raksturlīkne nav pieejama, var izmantot normālo tukšgaitas raksturlīkni.

Sinhrono un asinhrono mašīnu diferenciālvienādojumi, kas apraksta dinamiskos procesus, pierakstīti relatīvo vienību sistēmā (sistēma X_{ad}). Tas ļauj viegli pārrēķināt normālo tukšgaitas raksturlīkni konkrētai mašīnai, ņemot vērā, ka “sistēmā X_{ad} ” ja $i_f = 1,0$, $EDS - E_f = i_f X_{ad}$ ir vienāds ar pretestības X_{ad} nepiesātināto vērtību relatīvajās vienībās.

Izmantojot datortehniku, tukšgaitas raksturlīkne, kas parasti uzdota tabulas veidā, tiek aproksimēta ar analītisku izteiksmi. Iegūtā analītiskā izteiksme ļauj iegūt linearizēto piesātinātas mašīnas raksturlīkni jebkurai gaisa spraugas MDS F_δ vērtībai un noteikt pretestības X_{ad} piesātināto vērtību:

$$X_{ad} = \frac{E_\delta}{F_\delta}.$$

Ir izstrādāts X_{ad} piesātinātās vērtības noteikšanas algoritms. Šo algoritmu kā atsevišķu moduli iekļaujot datorprogrammā, katrā integrēšanas solī, izejot no mašīnas strāvu vērtībām, var aprēķināt minēto pretestību. Izmantojot sinhronās mašīnas matemātisko modeli, 3.2. attēlā parādīti sinhronā ģenerators režīmu aprēķinu rezultāti: strāvas I un griezes momenta M_{em} izmaiņas laikā režīmam, kad tiek pieslēgta nominālā statiskā slodze ja $\cos \varphi = 0,8$ ar un bez piesātinājuma ievērošanas. Salīdzinot šīs līknes, var secināt, ka, ievērojot piesātinājumu, iegūstam mazākas strāvas un momenta vērtības, kas atbilst fizikālam priekšstatam par mašīnas darbību.



3.2.att. Sinhronā ģenerators strāvu un momenta izmaiņas slodzes režīmā.

3.3. Asinhronās mašīnas matemātiskais modelis

Asinhronās mašīnas (AM) vienādojumus var iegūt kā izvirzītu polu SM atsevišķu gadījumu. Par AM darba pamatrežīmu pieņemts dzinēja režīms. Pēc pārveidojumiem diferenciālvienādojumu sistēma AD ar īsslēgtu rotoru $d,q,0$ koordinātēs ir šāda (nullsecības vienādojumi nav doti):

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega_k \Psi_{sq} + \frac{d\Psi_{sd}}{d\tau} \\ u_{sq} &= R_s i_{sq} + \omega_k \Psi_{sd} + \frac{d\Psi_{sq}}{d\tau} \\ 0 &= R_r i_{rd} - (\omega_k - \omega) \Psi_{rq} + \frac{d\Psi_{rd}}{d\tau} \\ 0 &= R_r i_{rq} + (\omega_k - \omega) \Psi_{rd} + \frac{d\Psi_{rq}}{d\tau} \end{aligned} \right\}; \quad (3.31)$$

$$T_M \frac{d\omega}{d\tau} = [X_{ad} (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) - M_{sl}]; \quad (3.32)$$

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{sd} &= X_s i_{sd} + X_{ad} i_{rd}; \\ \Psi_{sq} &= X_s i_{sq} + X_{ad} i_{rq}; \\ \Psi_{rd} &= X_r i_{rd} + X_{ad} i_{sd}; \\ \Psi_{rq} &= X_r i_{rq} + X_{ad} i_{sq}; \end{aligned} \right\}. \quad (3.33)$$

Vienādojumi (3.31)-(3.33) ļauj aprēķināt jebkurus AD elektromehāniskos procesus, turklāt ir nepieciešams uzdot režīma parametrus u_{sd} , u_{sq} un izvēlē ω_k - koordinātu sistēmas $d, q, 0$ leņķisko frekvenci.

Vienādojumu sistēmu var atrisināt attiecībā pret strāvas atvasinājumiem, pierakstot vienādojumus šādā veidā:

$$\frac{d}{dt}[I_{IM}] = [Q_{IM}][U_{IM}] + [H_{IM}], \quad (3.34)$$

kur

$$[H_{IM}] = [A_{IM}][I_{IM}];$$

$$[I_{IM}] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}; \quad [Q_{IM}] = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_4 \end{bmatrix}; \quad [U_{IM}] = \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix}; \quad [H_{IM}] = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix};$$

$$[A_{IM}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{23} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{24} & a_{34} & a_{44} \end{bmatrix};$$

$$a_{11} = -\frac{R_s}{X'_d}; \quad a_{12} = \left(\omega_k - \frac{X_{ad}^2 \omega}{X_r X'_d} \right); \quad a_{13} = \frac{X_{ad} R_r}{X_r X'_d}; \quad a_{14} = \frac{X_{ad} \omega}{X'_d};$$

$$a_{21} = -\left(\omega_k + \frac{X_{ad}^2 \omega}{X_r X'_d} \right); \quad a_{22} = -\frac{R_s}{X'_d}; \quad a_{23} = -\frac{X_{ad} \omega}{X'_d}; \quad a_{24} = \frac{R_r X_{ad}}{X'_d X_r};$$

$$a_{31} = \frac{R_r X_{ad}}{X_r X'_d}; \quad a_{41} = \frac{X_{ad} X_s}{X_r X'_d} \omega,$$

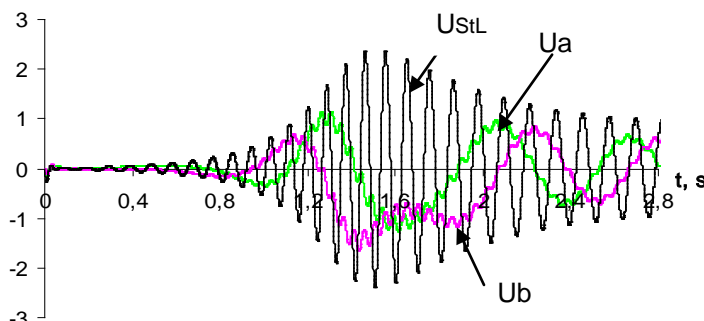
$$\text{kur } X'_d = X_s - \frac{X_{ad}^2}{X_r}; \quad Q_1 = Q_2 = \frac{1}{X'_d}; \quad Q_3 = Q_4 = -\frac{X_{ad}}{X_r X'_d}.$$

Magnētiskās ķēdes piesātinājuma ievērošana no galvenās plūsmas notiek līdzīgi kā sinhronajā mašīnā. Programmas modulis, kurš ļauj aprēķināt pretestības X_{ad} piesātināto vērtību, iekļauts kopējā datorprogrammā. Tādējādi katrā integrēšanas solī, izejot no mašīnas strāvu vērtībām, var aprēķināt minēto pretestību.

Magnētiskās ķēdes piesātinājuma ietekme no galvenās plūsmas paradīta ģenerators pašierosmes procesa piemērā.

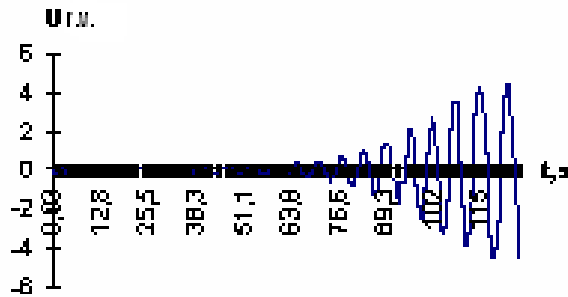
Aplūkots ģenerators pašierosmes process ar kondensatoru bateriju slodzes režīmā.

3.3. att. paradītas spriegumu u_a, u_b, u_{StL} izmaiņas pašierosmes procesa laikā.



3.3.att. Asinhronā ģenerators spriegumu raksturlīknes ar slodzi pašierosmes procesa laikā ar piesātinājuma ievērošanu.

Īpaši jāatzīmē, ka asinhronā ģenerators dinamisko procesu izpēte bez piesātinājuma ievērošanas praktiski nav pieļaujama. Aplūkojot šo procesu bez piesātinājuma ievērošanas, sprieguma vērtības nesasniedz nostabilizējošos lielumu, un tāds modelis neatbilst fizikālajam priekšstatam (skait. 3.4.att.).



3.4.att. Asinhronā ģenerators sprieguma raksturlīkne ar slodzi pašierosmes procesa laikā bez piesātinājuma ievērošanas.

3.4. Statiskās slodzes matemātiskais modelis

Jauktas aktīvi induktīvas slodzes gadījumā diferenciālvienādojumus d , q , 0 koordinātu sistēmā var pierakstīt līdzīgi sinhronās un asinhronās mašīnas statoru strāvu vienādojumiem. Pārveidojot statiskās slodzes vienādojumus vienādojumam (3.34) līdzīgā formā, iegūstam statiskās slodzes vienādojumus modelēšanai ērtākā veidā:

$$\frac{d}{dt} [I_{StL}] = [Q_{StL}] [U_{StL}] + [H_{StL}] \quad (3.35)$$

kur

$$[H_{StL}] = [A_{StL}] [I_{StL}]$$

4. ELEKTRISKO MAŠĪNU SISTĒMAS DINAMIKAS IZPĒTES METODIKAS REALIZĀCIJA

Darba ceturtajā daļā aplūkots elektrisko mašīnu sistēmas vienādojumu sastādīšanas metodes realizācija, izmantojot sistēmas elementu pilnos diferenciālvienādojumus. Aplūkoti asinhrono dzinēju atbildīgo piedziņas mehānismu izskrejas režīmi (individuāla un grupāla) un pašpalaide, kā arī dzinēju (asinhronā un sinhronā) pārslēgšanas režīma izpēte, ja šie dzinēji tiek baroti no viena un tā paša avota.

4.1. Individuālā un grupālā asinhrono dzinēju atbildīgo mehānismu izskreja un pašpalaide

Visu parejas procesu var aplūkot kā satāvošu no diviem secīgiem posmiem:

- Pirmais posms – agregātu izskreja (individuālā vai grupālā)
- Otrais posms – pašpalaide un darba režīma atjaunošana.

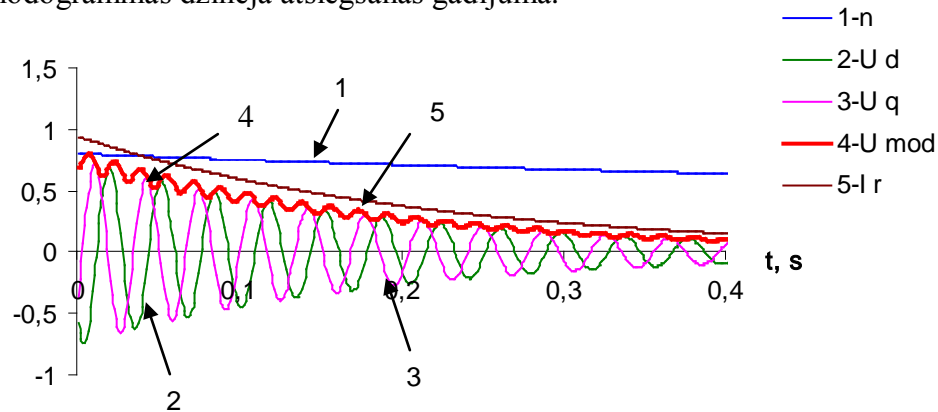
Asinhronā dzinēja individuālā izskreja

Specifisku darba režīmu pētījumos nepieciešams noskaidrot rotora ātruma izmaiņas raksturu, tiek atslēgta barošana. Tas izskaidrojums, pirmkārt, ar to, ka AD ekspluatācijas praksē bieži rodas gadījumi, kad dzinēja atkārtota pieslēgšana notiek pēc īsa laika kopš atslēgšanas, piemēram, patērētāju pārslēgšana uz rezerves barošanas avotu sprieguma pazemināšanās dēļ. Šajā gadījumā barošanas pārtraukuma laiks ir noteikts ar barošanas automātiskā pārslēdža nostrādes laiku.

AD darba dinamisko procesu izpēte barošanas pārtraukuma gadījumā (barojošās ķēdes pārtraukšana) ļauj pareizi noteikt AD darba režīmu un nākamā pieslēgšanā izvēlēties relejaizsardzības un automātikas aparātu iestatījumus, kas kopumā paaugstina patērētāju elektroapgādes drošumu.

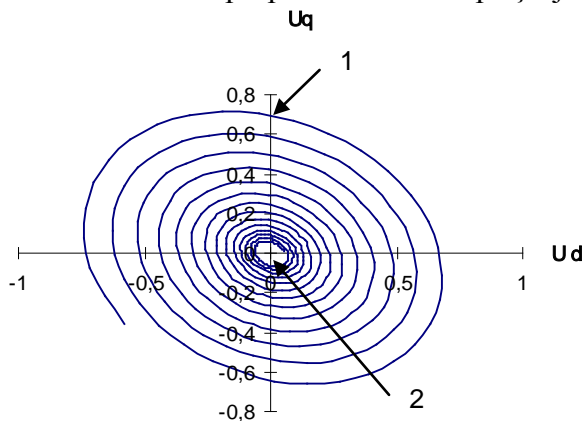
Darbā aplūkots asinhronās mašīnas pārslēgšanas modelēšanas piemērs: dzinēja palaišanas režīma parametru noteikšanai atkarībā no dotās slodzes; atslēgšanas režīms vai sprieguma pēkšņa pazemināšanās, kad notiek asinhronās mašīnas izskreja; atkārtotas pieslēgšanas režīms uz pamatbarošanas avotu vai rezerves tīklu.

4.1.att. parādītas rotora rotācijas frekvences, sprieguma un strāvas raksturlielnes viena asinhronā dzinēja izskrejas gadījumā. 4.2.att. un 4.3.att. parādītas strāvas un paliekošā sprieguma hodogrammas dzinēja atslēgšanas gadījumā.

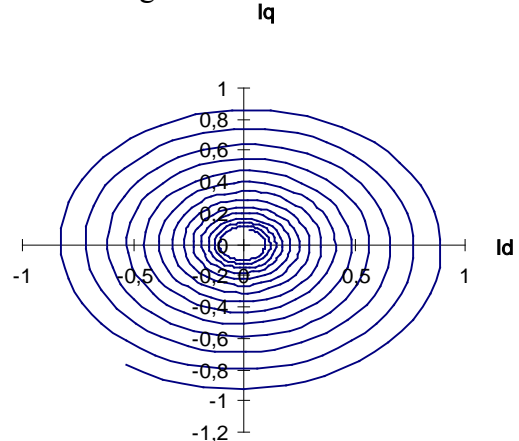


4.1.att. Rotora ω , U, I_r izmaiņas raksturlielnes izskrejas režīmā.

Statora paliekošā sprieguma attēlotājvektora stāvokli atkarībā pret tīkla spriegumu nosaka nākamā pašpalaišanas režīma pieļaujamību un tā sekmīgu norisi.

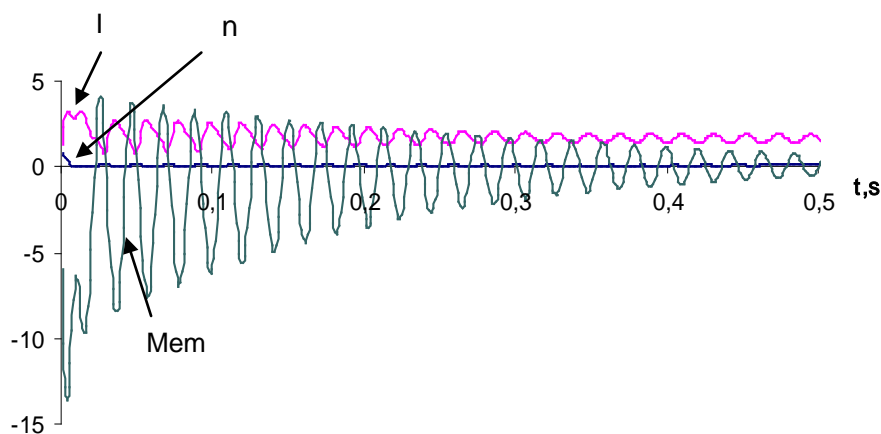


4.2.att. AD rotora sprieguma hodogramma dzinēju atslēdzot.

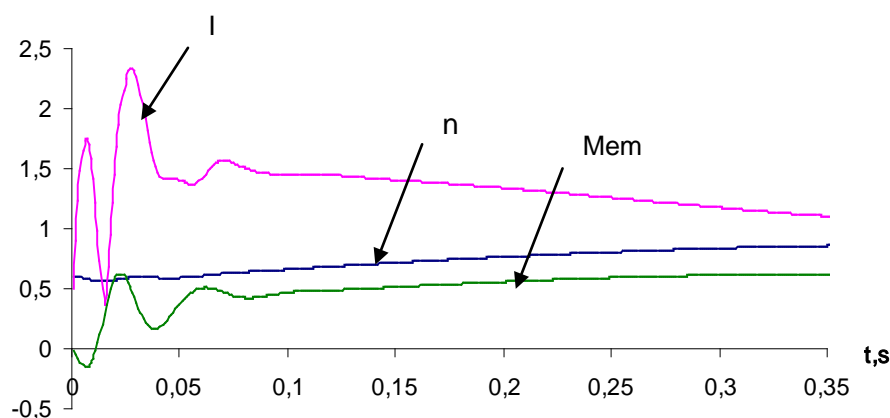


4.3.att. AD paliekošās strāvas hodogramma dzinēju atslēdzot.

4.4.att. parādīta strāvas, rotācijas frekvences un momenta izmaiņa, ja atkārtotā ieslēgšana notiek punktā 1, bet 4.5.att., ja punktā 2.



4.4.att. n , I_s , M_{em} izmaiņas raksturs ieslēdzot dzinēju punktā 1.



4.5.att. n , I_s , M_{em} izmaiņas raksturs ieslēdzot dzinēju punktā 2.

Veiktā AD izskrejas aprēķinu sērija, variējot dzinēja jaudu un tā mehānisko laika konstanti, ļauj sacināt:

- palielinoties jaudai, palielinās palielošā sprieguma amplitūda;
- piedziņas mehānisma mehāniskās laika konstantes palielināšanās, palielina sprieguma līknes rimšanas koeficientu un līdz ar to arī palēnina pārejas procesu;
- lai noteiktu visizdevīgāko pārslēgšanas laiku, kad summārais EDS atkārtotā pārslēgšanā nepārsniedz nominālo vērtību, nepieciešams veikt atbilstošus individuālus aprēķinus.

AD atkalieslēgšana notiek pārslēgšanas režīmā. Tada režīma nepieciešamība rodas atbildīgu patērētāju lietošanas laikā, kuri neļauj ilgstošus barošanas pārtraukumus vai barošanas sprieguma samazināšanu savas darbības specifikas dēļ. Tīkla spriegumam samazinoties, AD pārslēdz uz rezerves tīklu (sprieguma atjaunošanās – prētēja pārslēgšana). Plaša mikroprocesoru sistēmu ieviešana jaunu automātiskās vadības un aizsardzības ierīču izveidošanā nodrošina šo ierīču ātrdarbību un pārslēgšana notiek tik ātri, ka elektromehāniskie procesi nespēj norimt. Atkārtota pieslēgšana notiek jau ne pie nulles sākumnosacījumiem, bet tad, kad rotora tinumā vēl plūst strāva un EDS uz rotora spailēm vēl nav norimis. Ja barošanas pārtraukums ir sekundes simtdaļas, tad pašpalaišanas procesa veiksmīgu norisi nevar nodrošināt. Īpaši tas ir raksturīgs mazjaudas AD ar mazu mehānisko laika konstanti.

Veikti atkalieslēgšanas režīma un pašpalaišanas procesa aprēķini dažādiem AD ar dažādām mehāniskajām laika konstantēm. Modelēšanas rezultāti atkarībā no dažāda ilguma barošanas pārtraukuma apkopoti 4.1.tabulā.

4.1.Tabula

Barošanas pārtraukuma laiks, s.	0.001	0.0412	0.06	0.08	0.1
Rotācijas frekvence ieslēgšanas laikā, r.v.	0.991	0.918	0.887	0.857	0.830
Paliekošais spriegums: <i>modulis, r.v.</i>	0.807	0.430	0.325	0.248	0.188
<i>komponente U_d, r.v.</i>	0.191	-0.068	-0.046	0.191	0.013
<i>komponente U_q, r.v.</i>	-0.784	-0.424	-0.322	-0.158	-0.187
Statora strāva, I_{max} , r.v.	84.392	21.519	19.042	13.546	14.531
Elektromagnētiskais moments, M_{max} , r.v.	-77.675	-29.153	-19.696	-16.149	-10.641
<i>Atkārtotas ieslēgšanas rezultāts</i>	nesekmīgs	nesekmīgs	nesekmīgs	sekmīgs	sekmīgs

Kā rada aprēķini un ekspluatācijas pieredze, atkalieslēgšana ir bīstams darba režīms, īpaši pretslēguma gadījumā ar paliekošo spriegumu. Momenta negatīvo vērtību maksimumi turklāt liecina par statora elektromagnētiskā procesa ietekmes palielināšanos uz visiem pārejas procesiem un tie izraisa ātruma samazināšanos (4.4-4.5.att.).

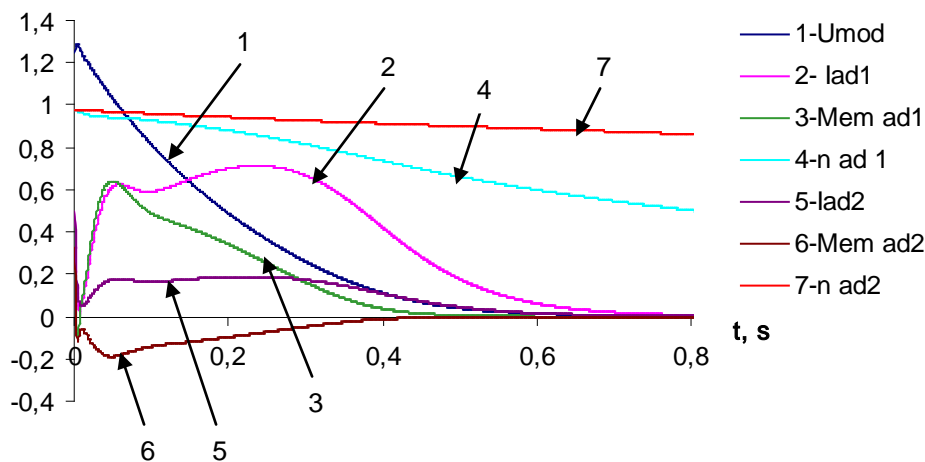
Asinhrono dzinēju atbildīgo mehānismu grupālā izskreja

Grupālā izskreja notiek, vienlaicīgi vairākus dzinējus atslēdzot, kuri baroti no viena avota. Grupālas izskrejas sākumposmā elektroapgādes traucējumu laikā elektriskie dzinēji elektriski ir saistīti viens ar otru ar kopējām kopnēm, pat tad, ja tie tiek atslēgti no tīkla. Turklāt dzinēji ar uzkrātu kinētiskās enerģijas lielu rezervi pāriet ģeneratora darba režīmā un tiem ir papildu bremzējoši momenti salīdzinājumā ar brīvo izskreju. Dzinējos ar mazāku kinētiskās enerģijas rezervi darbojas dzenošie momenti, kas rodas sakarā ar papildbarošanu no pirmās mašīnu grupas.

Sistēmas darba režīmu modelēšanai pieņemta šāda aprēķinu secība:

- AD palaide no sinhronā ģeneratora ($m_{SG}=1$);
- barošanas avota atslēgšanas režīma modelēšana ($m_{SG}=0$).

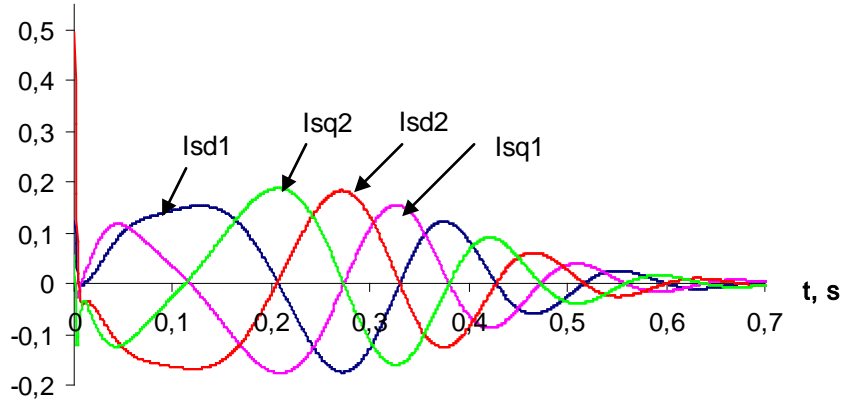
4.6.att. parādītas U , I_{AD1} , $M_{em AD1}$, n_{AD1} , I_{AD2} , $M_{em AD2}$, n_{AD2} izmaiņas pēc atslēgšanas diviem asinhronajiem dzinējiem pēc to vienlaicīgas atslēgšanas. Otrā dzinēja jauda ir 4 reizes, bet mehāniskā laika konstante 10 reizes lielāka nekā pirmajam dzinējam.



4.6.att. Paliekošā sprieguma, strāvas, momenta un rotācijas frekvences izmaiņa divu asinhrono dzinēju izskrejas gadījumā.

Modelēšanas rezultāti parāda sprieguma sistēmas spaiļu izmaiņas raksturu. Elektromagnētiskais moments, ko attīsta otrais dzinējs, ir bremzējošs, bet pirmais dzinējs turpina strādāt dzinēja režīmā.

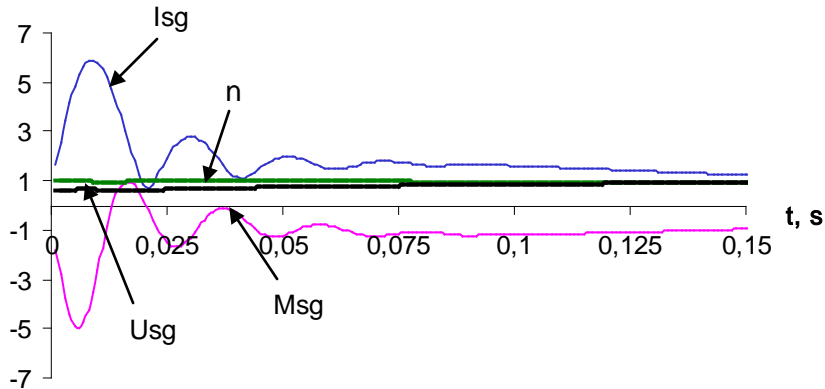
4.7.att. parādītas statoru strāvu komponentu izmaiņas grupālās izskrejas režīmā.



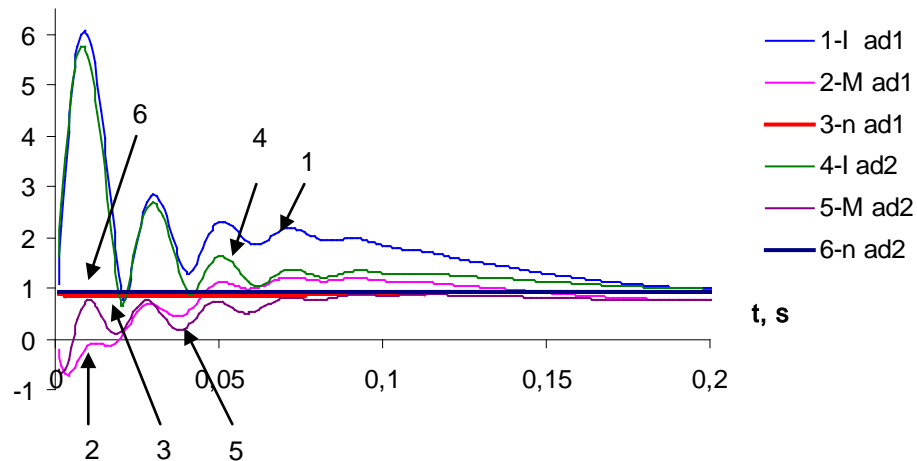
4.7.att. Statoru strāvu komponentu izmaiņa grupālās izskrejas gadījumā.

Atjaunojot spriegumu ($m_{SG}=0$ aizvietojam ar $m_{SG}=1$), ir iespēja ar piedāvāto modeli modelēt asinhrono dzinēju atkalieslēgšanas režīmu.

4.8.att. parādītas sinhronā ģeneratora U , I_{SG} , M_{SG} , $n_{SG}=f(t)$ izmaiņas raksturlīknes pēc SG atkalieslēgšanas, bet 4.9.att. — AD raksturlīknes I , M , $n=f(t)$ pēc atkalieslēgšanas.



4.8.att. SG sprieguma, strāvas, momenta un rotācijas frekvences izmaiņas raksturs pēc atkārtotas ieslēgšanas.



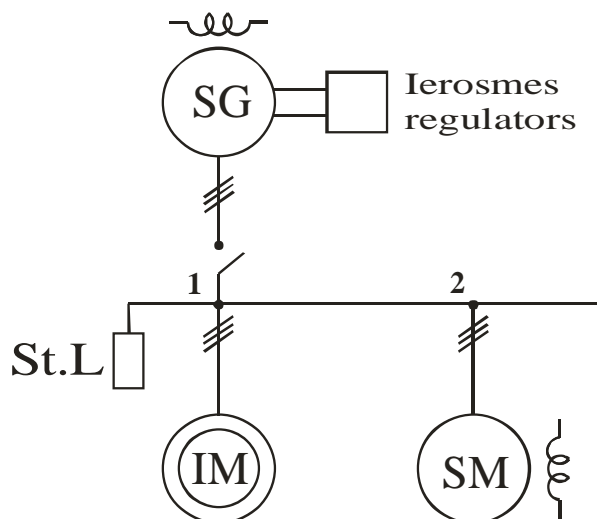
4.9.att. AD1 un AD2 strāvas, momenta un rotācijas frekvences izmaiņas raksturs pēc atkārtotas ieslēgšanas.

Modelēšanas rezultāti parāda, ka asinhrono dzinēju atkārtota ieslēgšana, ja nav beigusies grupālā izskreja, nav bīstams režīms atšķirtībā no viena atsevišķa dzinēja atkārtotas ieslēgšanas pēc izskrejas.

4.2. No viena avota barota asinhronā un sinhronā dzinēja pārslēgšanas režīmi

Piedāvātas metodikas izmantošanas iespējas elektrisko mašīnu sistēmu modelēšanas praktisko uzdevumu risināšanai, kas ietver sinhrono ģeneratoru (SG), statisko slodzi (StL) un dinamiskas slodzes: sinhronais (SD) un asinhronais (ID) dzinējs (4.10.att.), ir aplūkotas dzinēju pārslēgšanas režīmu pētīšanas piemērā, ja šie dzinēji darbojas no viena barošanas avota. Ar izstrādātā modeļa palīdzību piedāvāts izpētīt asinhronā un sinhronā dzinēja savstarpējo ietekmi, ja tie atslēgti no barošanas avota. Lai modelētu šo režīmu, tika izvēlēta sistēma ar vienu barošanas avotu, vienu asinhrono un vienu sinhrono dzinēju un statisko aktīvi induktīvo slodzi.

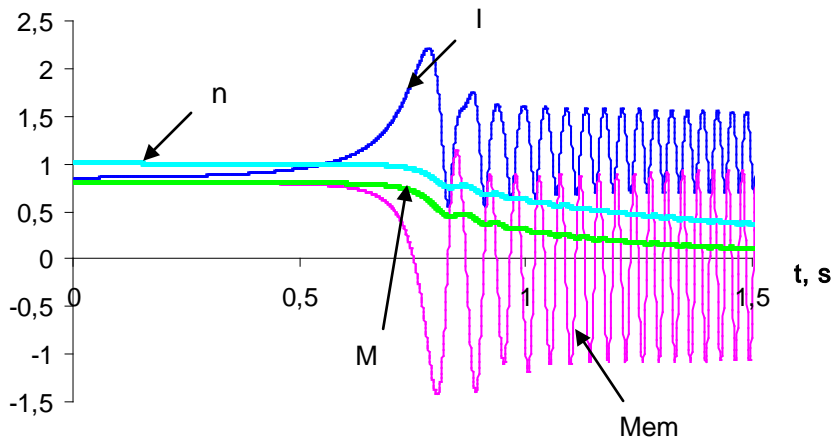
Jāatzīme, ka barošanas pārtraukuma sākumposmā (barojošās ķēdes pārtraukšana) dzinēji ir elektriski saistīti viens ar otru ar kopējām kopnēm. Dzinēju magnētiskā plūsma kāda īsa laika periodā tiek uzturēta ar strāvām, kas inducējas rotoru tinumos atslēgšanas momentā. Dzinēji turpina griezties uz uzkrātās kinētiskās enerģijas rēķina. Dzinēju statora tinumos tiek ģenerēts spriegums, kas rimst, samazinoties leņķiskajai rotācijas frekvencei. Šis spriegums nosaka savstarpējo saiti starp visiem dzinējiem, kas pieslēgti pie kopējām kopnēm.



4.10.att. Pētījamās sistēmas shēma.

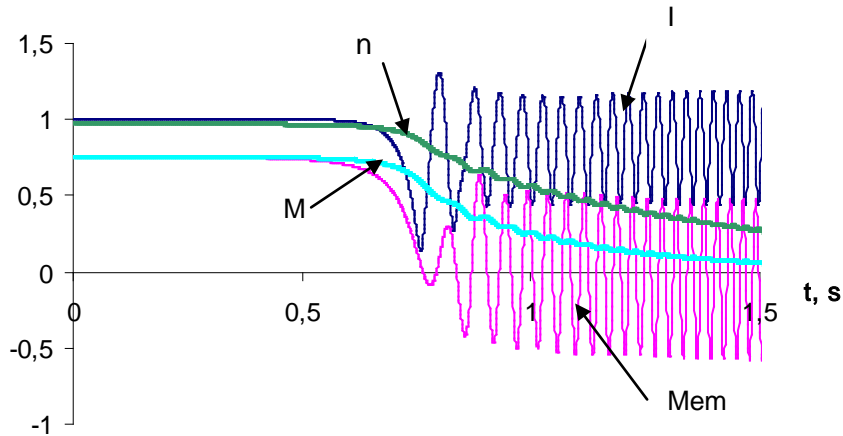
Lai modelētu pārslēgšanas režīmu vai elektroenerģijas patērētāju (asinhronie un sinhronie dzinēji) atslēgšanas režīmu, nepieciešams modelēt izejas stacionāro režīmu. Lai atvieglotu šo modelēšanas procesu, piedāvāts par sākumnosacījumiem pieņemt nosacījumus, kad ieskreja sākas no mašīnas rotora nekustīga stāvokļa, t.i., kad rotācijas frekvence ir vienāda ar nulli. Sinhronais ģenerators tiek modelēts, ievērojot ierosmes regulatora darbību. Pieņem, ka sinhronajam dzinējam ir nemainīgs ierosmes spriegums.

4.11.att. parādītas sinhronā dzinēja strāvas, momentu un rotācijas frekvences izmaiņas raksturlīknes, atslēdzot barošanas avotu.



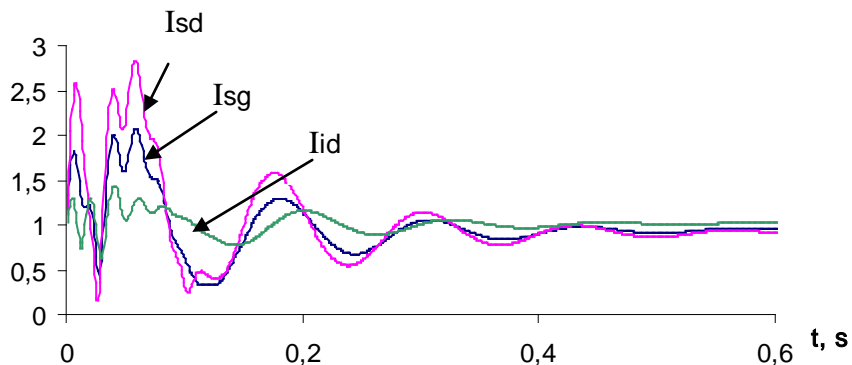
4.11.att. Sinhronā dzinēja strāvas, momentu un rotācijas frekvences izmaiņas raksturlīknes, atslēdzot barošanas avotu.

4.12.att. parādītas tās pašas raksturlīknes asinhronajam dzinējam atslēgšanas režīmā. Statoru tinumu kopējās ķēdes, noved pie asinhronā dzinēja izskrejas procesa palēnināšanās.

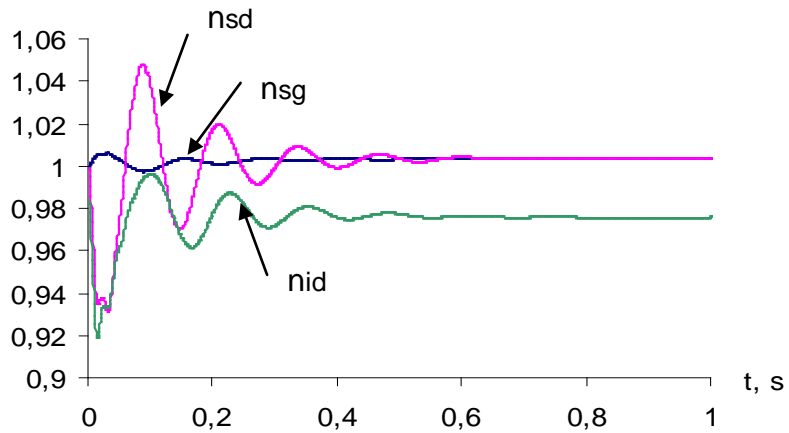


4.12.att. Asinhronā dzinēja strāvas, momentu un rotācijas frekvences izmaiņas raksturlīknes, atslēdzot barošanas avotu.

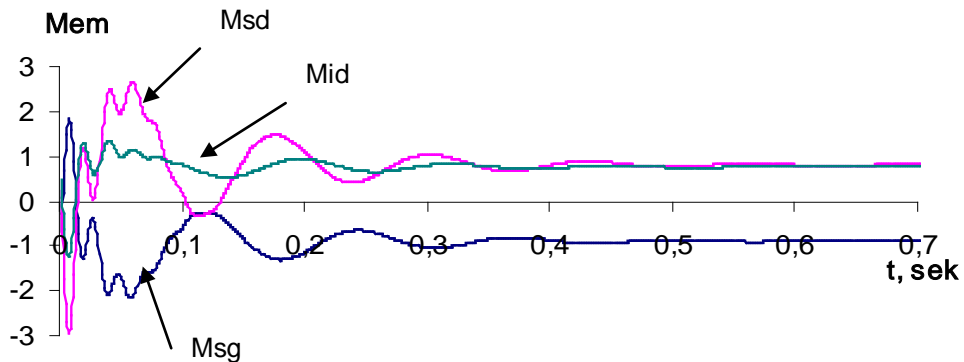
4.13-4.15.att. parādīts sistēmas elementu — sinhronā ģenerators, sinhronā un asinhronā dzinēja — strāvas, rotācijas frekvences un elektromagnētiskā momenta izmaiņas raksturs, atjaunojot spriegumu pēc 0,5 sekundēm. No attēliem redzams, ka pateicoties SD ierosmei, dzinēju apstāšanās process ieilgst un ir iespēja atjaunot darba režīmu.



4.13.att. Sinhronā ģenerators, sinhronā un asinhronā dzinēju strāvu izmaiņu raksturlīknes pēc barošanas atjaunošanas.



4.14.att. Sinhronā ģeneratora, sinhronā un asinhronā dzinēju rotācijas frekvences izmaiņu raksturlīknes pēc barošanas atjaunošanas.



4.15. Sinhronā ģeneratora, sinhronā un asinhronā dzinēju momentu izmaiņu raksturlīknes pēc barošanas atjaunošanas.

Tādējādi, modelēšanas rezultāti parāda, ka atkārtota sprieguma atjaunošana pēc īslaicīgas asinhrono un sinhrono dzinēju barošanas pārtraukšanas, pateicoties SD paliekošai ierosmei, parasti nav bīstams režīms, ja tie pieslēgti kopējām kopnēm.

DARBA GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

- Izstrādāta energosistēmas elektrisko mašīnu dinamikas pētījumu metodika, kas balstās uz strukturālās modelēšanas metodi, izmantojot Parka-Goreva elementu vienādojumus un strukturālo uzbūves principu pētījamā elektrisko mašīnu sistēmas modeļa izveidošanai. Izstrādāti maiņstrāvas elektrisko mašīnu funkcionālie modeļi, kas apvienoti kopējā sistēmā.
- Darbā piedāvāta pētījumu metodika un elementu saišu vienādojumu sastādīšanas metode maiņstrāvas elektrisko mašīnu sistēmā, izmantojot statiskās slodzes mezgla izdalīšanas metodi. Parādīta dažādu režīmu pētījumu iespēja atkarībā no shēmas komutācijas. Izmantojamā metode dod iespēju sastādīt vienādojumus un izpētīt jebkuras konfigurācijas radiāla tipa elektrisko mašīnu sistēmas.
- Piedāvāts veikt modelēšanu relatīvo vienību sistēmā, kur elementu parametri izteikti savās bāzes vienībās.
- Modelis ļauj pētīt kā ilgstošus pārejas procesus, tā arī pārejas procesus statoru konturos pārejas procesa sākumposmā.
- Piedāvātais modelis ļauj izpētīt dzinēja slodzes dažādos režīmus, ievērojot tās mijietekmi, kas ir svarīgi gan pašai mašīnai, gan arī komutācijas, aizsardzības un automātikas aparātu izvēlei.
- Pamatojoties uz SM, AM un statiskās slodzes matemātiskajiem modeļiem izstrādāti atsevišķi programmas moduļi, kurus var izmantot darba režīmu analīzei un mašīnas optimālo režīmu parametru noteikšanai un kuri nodrošina tās stabilu darbību jebkurām sprieguma un frekvences izmaiņām.
- AM modeli var izmantot kā automatizētas piedziņas sistēmas sastāvdaļu, aizvietojojt vadības objektu vai energosistēmas sastāvdaļu ar ekvivalentu asinhronu slodzi.
- Pārejas režīmu pētījumos pēc izstrādātas metodikas var noteikt lielumus, kuri nepieciešamie elektrisko mašīnu režīmu projektēšanā un ekspluatācijā, lai izvēlētos relejaizsardzības un automātikas aparātus un to pareizus iestatījumus.

AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

Darba saturs atspoguļots 10 rakstos:

1. S.Zimina¹, N.Kostikova, G.Feščenko, A.Kanbergs, J.Voitkāns. Mazjaudas elektromikseru atteices un diagnostika // 39. RTU Studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, Rīga, 1998., 1.lpp.
2. S.Zimina, K.Ketners. Asinhronā ģenerators algoritms // 40. RTU Studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, Rīga, 1999., 1.lpp.
3. S.Zimina, A.Zviedris. Runges-Kutas metodes precizitātes novērtēšana pārejas procesu aprēķinos // 41. RTU Studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, Rīga, 2000., 1.lpp.
4. E.Ketnere, S.Zimina, K.Ketners. Pārejas procesu modelēšana elektriskajās mašīnās ar piesātinātu elektrisko ķēdi // 42. RTU Studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, Rīga, 2001., 1.lpp.
5. E.Ketnere, S.Zimina. Pārejas procesu modelēšana maiņstrāvas elektriskajās mašīnās ar piesātinātu magnētisko ķēdi // Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti / Enerģētika un elektrotehnika, 4.sējums, "RTU", Rīga, 2001., 54-60.lpp.
6. J. Dirba, K.Ketners, E.Ketnere, S.Zimina. "Simulation of the switching processes of critical mechanism's". VII International Conference "Problems of present-day Electromechanics-2002", Kyiv, Ukraine, 65-69.p.
7. E.Ketnere, S.Zimina "Maiņstrāvas elektrisko mašīnu īsslēguma režīma modelēšana" / Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti / Enerģētika un elektrotehnika, 4.sējums, "RTU", Rīga, 2002., 22-27.lpp.
8. Ketnere E., Ketners K., Zimina S. "The electromechanical transient process mathematical simulation of motors of the important mechanisms on the electric power station" / RTU Zinātniskie raksti / Enerģētika un elektrotehnika, 8.sējums, "RTU", Rīga, 2003., 112-120.lpp.
9. J.Dirba, E.Ketnere, K.Ketners, S.Zimina „Simulation of the switching processes of synchronous and induction motors”. VIII International Conference "Problems of present-day Electromechanics-2004", Kyiv, Ukraine, 6.p.
10. S. Zimina, E. Ketnere, K. Ketner, J. Dirba "The Multimachine System's Dynamic Research's Technique by a Method of Mathematical Simulation" / 11th International Power Electronics and Motion Control Conference — EPE-PEMC 2004 Riga, Proceedings Vol.3 of 7 / Electrical Machines, Actuators and Drives, 426-429p.

¹Uzvārds Zimina mainīts uz uzvārdu Kļujevska 2004.gadā.