



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

Raimundas Gaidys

**SINCHRONINIO GENERATORIAUS AUTOMATINIS ŽADINIMO
REGULIAVIMAS
AUTOMATIC EXCITATION REGULATION OF SYNCHRONOUS
GENERATOR**

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa
Automatinių sistemų specializacija
Elektros inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas doc. dr. Bronius Karaliūnas

Vilnius, 2004

Vilniaus Gediminas technical university
Faculty of Electronics
Department of Automatics

ISBN ISSN
Number of copies 3
Data 2004 06 01

Thesis submitted for the degree of MA in Electronics
Automatic excitation regulation of synchronous generator

Raimundas Gaidys, gr. AUSm - 2

Language

Lithuanian

Other

SUMMARY

In the final dissertation a new perspective excitation systems of powerful synchronous generators, which are operating in the common energetic system, are considered, their classification and function diagram are presented. The differential equations system, transfer functions and structural diagram of excitation system, as the automatic regulation object, were obtained according to general presumptions. In the cases of deep crashes in the energetic system the mathematical description of electromechanical transient processes are very complicated and limited. In that cases the efficiency of the excitation current regulator one can be increased by using the combined algorithms of the simplex search. According to obtained expressions the synthesis diagram with adaptation and optimization blocks is created.

Magistratūros baigiamasis darbas (tezės)

Pavadinimas Sinchroninio generatoriaus automatinis žadinimo reguliavimas

Raimundas Gaidys, gr. AUSm - 2

Kalba

lietuvių

užsienio

ANOTACIJA

Magistro darbe analizuojamos galingų sinchroninių generatorių, veikiančių bendroje energetikos sistemoje, naujos perspektyvios žadinimo sistemos, pateikta jų klasifikacija ir funkcinė schema. Atsižvelgiant į bendrąsias prielaidas, sudaryta žadinimo sistemos, kaip automatinio reguliavimo objekto, diferencialinių lygčių sistema, gautos perdavimo funkcijos ir struktūrinė schema. Parodyta, kad sunkių avarinių situacijų atvejais energetikos sistemoje vykstančių elektromechaninių pereinamųjų procesų matematinis aprašymas yra gana sudėtingas ir ribotas. Tokiais atvejais žadinimo srovės regulatoriaus sintezės efektyvumą galima padidinti taikant kombinuotos simpleksinės paieškos metodus. Pagal gautas išraiškas sudaryta generatoriaus adaptyviosios žadinimo reguliavimo sistemos sintezės schema su adaptavimo ir optimizavimo blokais, kurie leidžia išvengti paieškos krypties paklaidos.

REIKŠMINIAI ŽODŽIAI

Sinchroninis generatorius, žadinimas, reguliavimas, kintamos struktūros regulatorius.

TURINYS

| | |
|--|----|
| 1. ĮVADAS..... | 3 |
| 1.1. BENDROSIOS ŽINIOS APIE SINCHRONINES MAŠINAS..... | 4 |
| 1.2. KOMPIUTERINĖS ĮRANGOS PAIEŠKA..... | 6 |
| 2. SINCHRONINIO GENERATORIAUS AUTOMATINIS ŽADINIMO REGULIAVIMAS..... | 17 |
| 2.1. GALINGŲ SINCHRONIŲ GENERATORIŲ ŽADINIMO SISTEMA..... | 17 |
| 2.2. SINCHRONINIO GENERATORIAUS DARBO CHARAKTERISTIKOS..... | 21 |
| 2.2.1. SANTYKINIŲ DYDŽIŲ SISTEMA..... | 21 |
| 2.2.2 TRUMPOJO JUNGIMO CHARAKTERISTIKOS..... | 22 |
| 2.2.3. TRUMPOJO JUNGIMO SANTYKIS (TJS)..... | 23 |
| 2.2.4. IŠORINĖ CHARAKTERISTIKA..... | 24 |
| 2.2.5. REGULIAVIMO CHARAKTERISTIKA..... | 25 |
| 2.2.6. APKROVOS CHARAKTERISTIKA..... | 26 |
| 2.2.7. KAMPINĖS CHARAKTERISTIKOS..... | 27 |
| 2.3. ĮTAMPOS IR DAŽNIO STABILIZAVIMO SCHEMOS..... | 30 |
| 3. SINCHRONINIO GENERATORIAUS AUTOMATINIS ŽADINIMO REGULIAVIMAS..... | 36 |
| 3.1.SINCHRONINIO GENERATORIAUS KAIP REGULIAVIMO OBJEKTO PAGRINDINĖS LYGTYS..... | 36 |
| 3.2.GENERATORIAUS AUTOMATINIS ŽADINIMO REGULIAVIMO SISTEMOS STRUKTŪRINĖ SCHEMA IR PERDAVIMO FUNKCIJA..... | 39 |
| 3.3 ŽADINIMO SROVĖS IR ĮTAMPOS REGULIATORIAUS SINTEZĖ IR REZULTATŲ ANALIZĖ..... | 42 |
| 4. IŠVADOS..... | 51 |
| 5. LITERATŪRA..... | 52 |

1. Įvadas

Galingų sinchroninių generatorių, veikiančių bendroje energetikos sistemoje, automatinis žadinimo reguliavimas (AŽR) yra viena iš svarbiausių priemonių, užtikrinančių sistemos stabilumą, patikimumą ir kuriamos energijos kokybę. Numatoma mūsų šalies energetikos plėtra ir siekis integruoti ją į Rytų ir Vakarų šalių bendrą energetikos sistemą kelia naujus, žymiai griežtesnius reikalavimus sistemos valdymo tikslumui, santykiniam stabilumui, reakcijos greičiui ir pereinamųjų procesų kokybei. Pastarųjų metų kiekybiniai ir kokybiniai pakitimai šiuolaikinėse energetikos sistemose verčia ieškoti naujų, tobulesnių AŽR sistemų, prisiderinančių ne tik prie greitai kintančių išorinių trikdžių, bet ir prie sistemos parametrų ir jos darbo režimų pasikeitimų. Dabartiniu metu esamos sinchroninių generatorių AŽR sistemos ne visada atitinka padidėjusius reikalavimus, ypač energetikos sistemos valdymo kokybinėms charakteristikoms. Be statinio stabilumo ir patikimumo ribų išplėtimo, AŽR sistemos sprendžia daugybę kitų uždavinių: išplečia dinaminio stabilumo ribas, intensyvina generatorių rotorų švytavimų slopinimą, didina sistemos stabilumą, esant harmoniniams trikdžiams, kurie atsiranda sistemoje dėl atskirų generatorių asinchroninės veikos.

Pastaruoju metu pasirodo mokslinių darbų [1, 2, 3], kuriuose nagrinėjamos sinchroninių generatorių žadinimo srovės automatinio reguliavimo problemos, siekiant panaudoti naujos kartos reguliatorius ir adaptacijos principus. Literatūroje [4] pateiktas adaptyvios AŽR sistemos sintezės metodas pagrįstas fazi – reguliatoriaus panaudojimu, kuris užtikrina uždarnosios automatinio valdymo sistemos asimptotinį stabilumą. Sinchroninių generatorių, veikiančių mažose elektrinėse, įtampos ir dažnio reguliavimo algoritmai ir priemonės, panaudojant kompiuterinį valdymą, analizuojami darbuose [5, 6].

Šiuolaikinės įvairių objektų, iš jų ir sinchroninių generatorių, valdymo ir reguliavimo sistemos, kuriose naudojami loginiai valdikliai ir naujos automatizavimo priemonės, išnagrinėtos darbuose [7, 8]. Literatūroje [9] pateiktas naujas fiksuotos struktūros reguliatorių analitinis sintezės principas, kuris susieja sintezuojamus reguliatoriaus parametrus su automatinės sistemos kokybinėmis charakteristikomis.

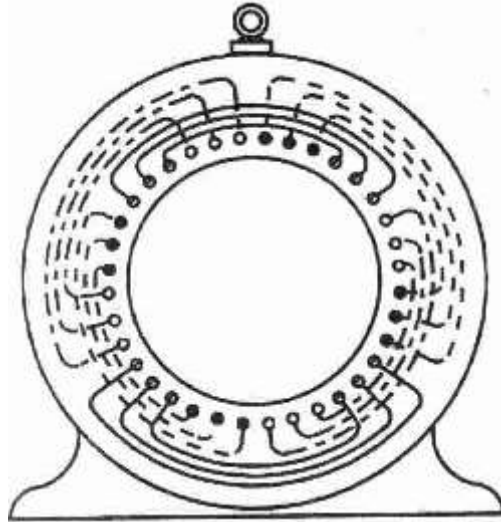
Literatūros analizė rodo, kad žinomos sinchroninių generatorių AŽR sistemos neužtikrina reikiamų kokybės rodiklių, ypač tais atvejais, kai tuo pačiu metu vyksta gana sudėtingi, tarpusavyje susiję elektromagnetiniai ir elektromechaniniai pereinamieji procesai ne tik energetikos sistemoje, bet ir pačioje sinchroninio generatoriaus žadinimo sistemoje. Tokių procesų matematinis aprašymas yra gana sudėtingas ir dėl to ribotas, o avarinių situacijų atvejais vykstančių procesų matematinio aprašymo iš viso nėra. Tada AŽR sistemose tikslinga taikyti adaptacijos principus, panaudojant žadinimo srovės reguliavimui kintamųjų parametrų ir struktūros reguliatorius [10, 11, 12].

Šio darbo tikslas – sinchroninio generatoriaus automatinio žadinimo reguliavimas.

1.1. BENDROSIOŠ ŽINIOS APIE SINCHRONINES MAŠINAS

Sinchroninės mašinos gali veikti generatoriaus, variklio ir kompensatoriaus režimais. Elektrinių elektros energijos generatoriai - tai sinchroninės mašinos.

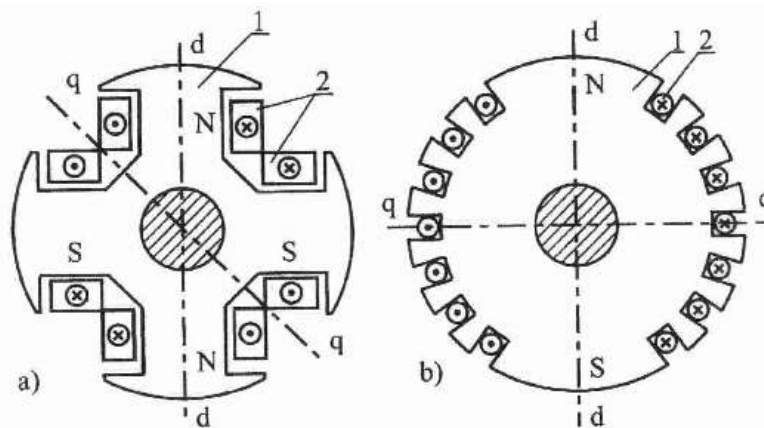
Sinchroninė mašina sudaryta iš dviejų stambių mazgų: statoriaus ir rotoriaus. Sinchroninės mašinos statorius primena asinchroninės mašinos statorių (1 pav.).



1 pav. Sinchroninės mašinos statoriaus eskizas

Statoriaus grioveliuose sukloti daugiafazė (trifazė) apvija. Sinchroninių mašinų rotoriai esti dvejopi: ryškiapoliai (2 pav., a) ir neryškiapoliai (2 pav., b). Žadinimo lauką kuria rotoriaus žadinimo apvija tekanti nuolatinė srovė. Vadinasi, sinchroninės mašinos darbui būtinas nuolatinės įtampos šaltinis - žadintuvas.

Sinchroninės mašinos mazgas, kuriantis žadinimo srautą, vadinamas induktoriumi, o mazgas, kuriame indukuojama elektrovara, vadinamas inkaru. Induktorius - tai rotorius, o inkaras - statorius (1 ir 2 pav.).



2 pav. Sinchroninių mašinų rotorų eskizai: a) ryškiapolis rotorius; b) neryškiapolis rotorius; čia: 1 - rotoriaus magnetolaidis;

2 - žadinimo apvija; d - d išilginė ašis; q - q skersinė ašis.

Šiandien didelės galios sinchroninės mašinos (šiluminių elektrinių, hidroelektrinių ir hidroakumuliacinių elektrinių generatoriai) dažniausiai veikia generatoriaus režimu. Šiluminėse elektrinėse veikia neryškiapoliai sinchroniniai generatoriai (turbogeneratoriai), o hidroelektrinėse - ryškiapoliai sinchroniniai generatoriai (hidrogeneratoriai).

Mažesnė jų dalis veikia variklio režimu. Pastaruoju metu gaminamos sinchroninės mašinos, veikiančios generatoriaus ir variklio režimu. Tai hidroakumuliacinių elektrinių sinchroninės mašinos: apkrovos piko metu sinchroninė mašina dirba generatoriaus režimu, o kai elektros energijos paklausa mažiausia - variklio režimu; tuomet sinchroninė mašina suka siurblius, kurie kelia vandenį į viršutinį tvenkinį iš apatinio. Tokios sinchroninės mašinos pastatytos Kruonio hidroakumuliacinėje elektrinėje.

Sinchroninė mašina, be dviejų minėtų režimų, gali veikti ir kompensatoriaus režimu: tai darbo režimas, kada sinchroninė mašina teikia į tinklą arba iš jo ima reaktyviąją galią. Elektros sistemų ir tinklų reaktyviąją energiją kompensuoja ir statiniai kompensatoriai - galios kondensatoriai, tačiau jų trūkumas tas, kad jie reaktyviąją galią gali tik tiekti į tinklą.

Sinchroninės mašinos darbo esmė skiriasi nuo asinchroninės mašinos tuo, kad jos rotoriaus sukimosi dažnis n proporcingas tinklo dažniui $n = f/p$.

Čia: (p - polių porų skaičius).

Esant dvipolei mašinai ($p = 1$) ir įtampos dažniui $f = 50$ Hz, sukimosi dažnis $n = 50$ l/s = 3000 l/min. Šitokie dideli sūčiai lemia dideles išcentrines jėgas, todėl tokio sukimosi dažnio rotoriai gaminami neryškiapoliai, o jų skersmuo neviršija 1,250 m. Vadinasi, turbogeneratorių rotoriai santykinai ilgi.

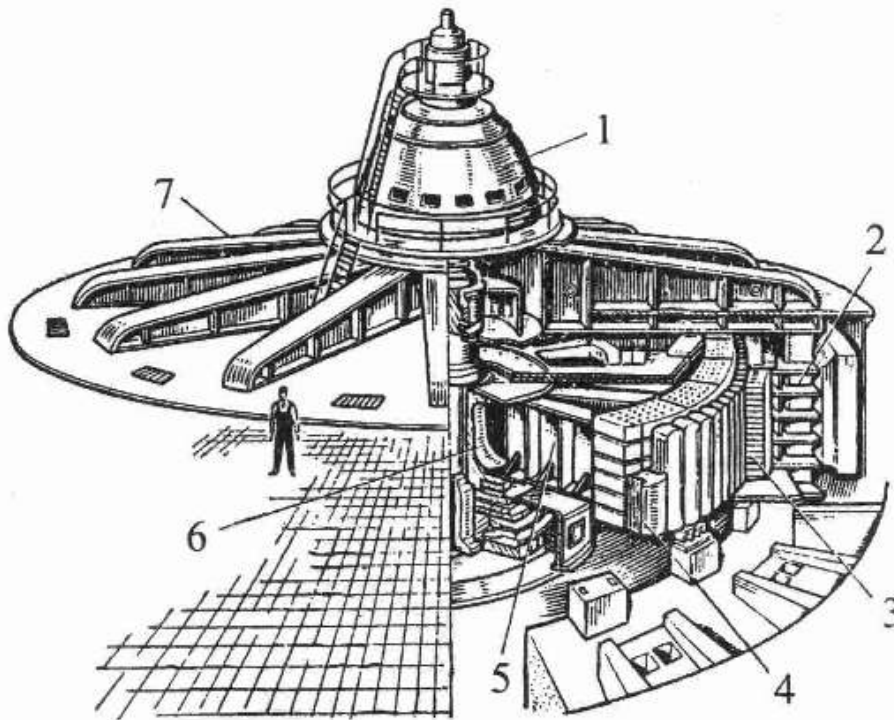
Turbogeneratorių rotoriai gaminami iš vientiso aukštos kokybės legiruoto plieno. Rotoriaus paviršiuje išfrezuojami žadinimo apvijų grioveliai. Ribinių galių (iki 1200 MW) turbogeneratorių rotoriaus žadinimo apvijų dažnai esti superlaidžios (krioturbogeneratoriai); tai įgalina pagerinti sinchroninės mašinos naudingumo faktorių iki 99,2% ir sumažinti medžiagų sąnaudas iki 0,500 kg/kW.

Rotoriaus ir statoriaus apvijų intensyviai aušinamos dujomis (oru arba vandeniliu) arba skysčiais (vandeniu).

Hidrogeneratorių rotoriaus velenas sujungtas su vandens turbinos veleno. Kadangi rotoriaus sukimosi dažnis mažas ($428.6 \text{ min}^{-1} \div 62.5 \text{ min}^{-1}$), tai rotoriaus skersmuo siekia nuo 3.50 iki 12.92 m. Akivaizdu, kad hidrogeneratorių masė ir medžiagų sąnaudos didesnės negu turbogeneratorių.

Pastaruoju metu vis plačiau diegiami kapsuliniai hidrogeneratoriai, kurių rotoriaus velenas horizontalus. Generatorius uždaromas hermetiškoje kapsulėje, o ši panardinama vandens sraute (upėje); rotoriaus velenas sujungiamas su vandens turbinos rotoriumi, kurį suka vandens srovė. Kapsulinių hidrogeneratorių elektrinės santykinai pigios, o jų galia siekia dešimtis megavatų.

Ryškiapolio sinchroninio generatoriaus bendras vaizdas pateiktas (3 pav.). Šiandien dvipolių turbogeneratorių su intensyviu aušinimu galia siekia 1200 MVA, o hidrogeneratorių- 712 MVA.



3 pav. Hidrogeneratoriaus bendras vaizdas;

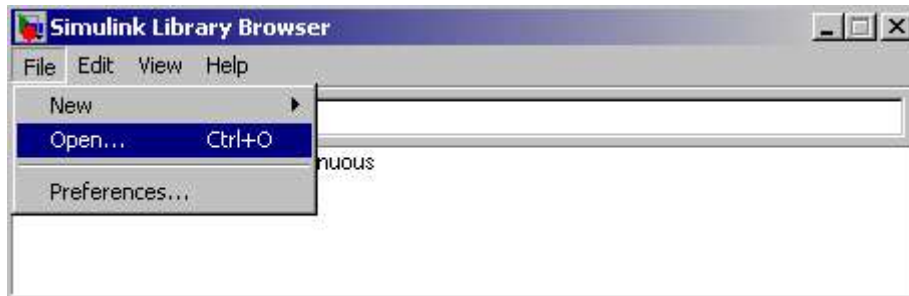
- čia: 1 - žadintuvas;
2 - statoriaus korpusas;
3 - statoriaus magnetolaidis;
4 - rotoriaus polius;
5 - rotoriaus stipinai;
6 - rotoriaus įvorė;
7 - statoriaus atraminė kryžmė.

1.2. Kompiuterinės įrangos paieška

Šiame tiriamajame darbe sinchroninio variklio modelį sudarysime programiniu paketu „**Matlab/Simulink**“. **Simulink** yra šiuolaikinė programavimo kalba, paremta dinaminių sistemų struktūrinių schemų modelių koncepcija. Dirbti su šia kalba gana paprasta: sudarant sistemos struktūrinę schemą, jos komponentus galima parinkti ir nukopijuoti iš **Simulink** funkcinių elementų bibliotekos.

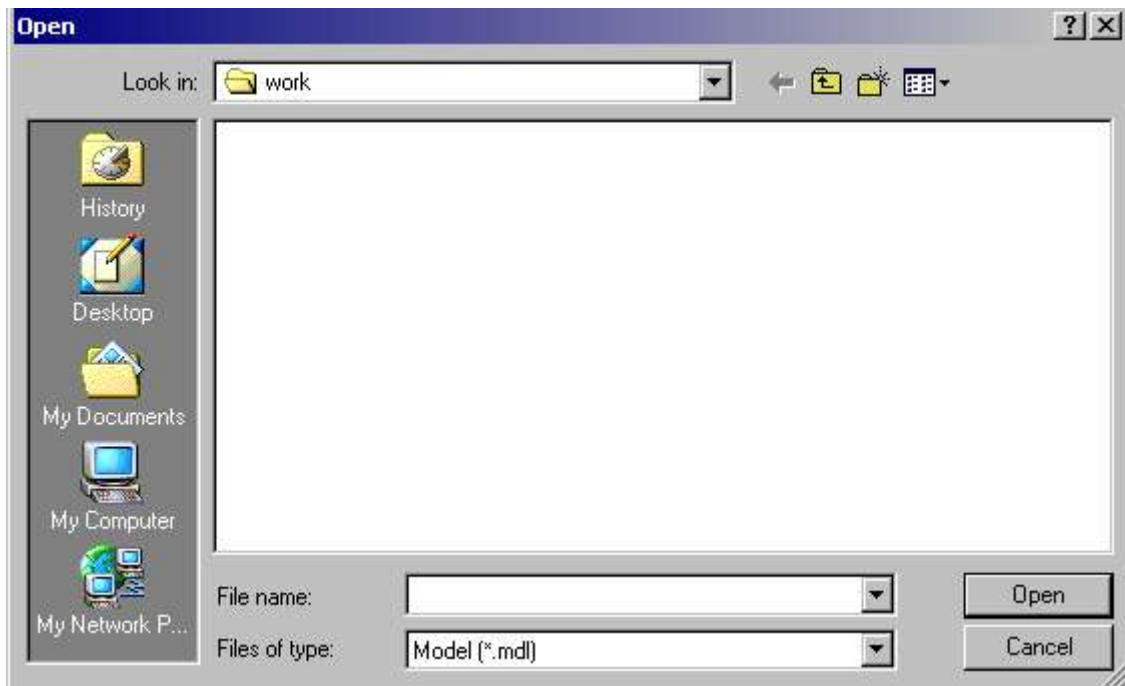
Simulink funkcinių elementų standartinė biblioteka yra suskirstyta į keletą posistemų, grupuojant elementus pagal jų elgseną. Dinaminės sistemos modeliui sudaryti taip pat galima panaudoti kitų bibliotekų ir modelių elementus. Be to, galima naudoti individualią elementų biblioteką.

Simulink vartotojo sąajos pagrindas – keturi atveriamieji meniu, rodomi **Simulink** lango viršuje esančioje meniu eilutėje. Pavyzdžiui, iš meniu eilutės parenkant **File** ir atveriamąjį meniu **Open** (4 pav.) bus rašoma **File: Open**.



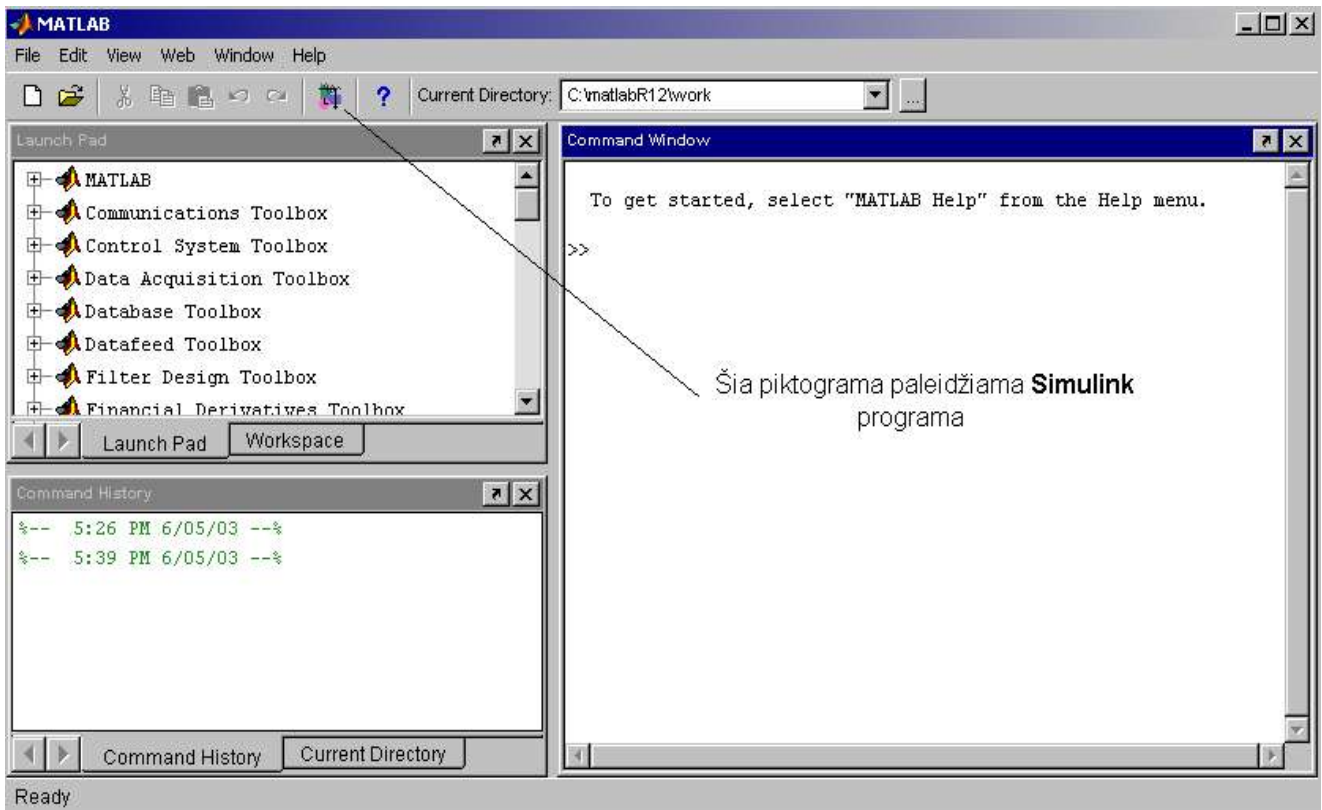
4 pav. Meniu parinkimas

Modeliuojamos sistemos komponentams konfigūruoti ir jų parametrus nustatyti **Simulink** plačiai naudoja dialogo blokus. Pavyzdžiui, parinkus **File: Open**, atsiveria 5 pav. Pavaizduotas dialogo blokas. Šio dialogo bloko laukai yra **Look in**, **File name** ir **Files of type**.



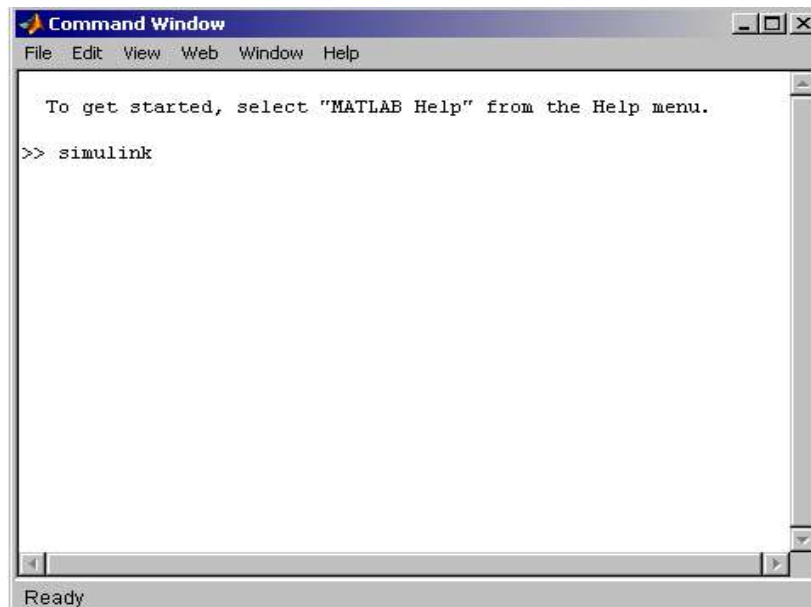
5 pav. **File: Open** dialogo blokas

Simulink yra **Matlab** programų paketo plėtinys, todėl turi būti išskviečiama iš **Matlab**. **Simulink** pradedama vykdyti **Matlab** instrumentų eilutėje kairiuoju pelės klavišu (KPK) spragtelėjus ties **Simulink** piktograma (6 pav.).



6 pav. **Simulink** paleidimas

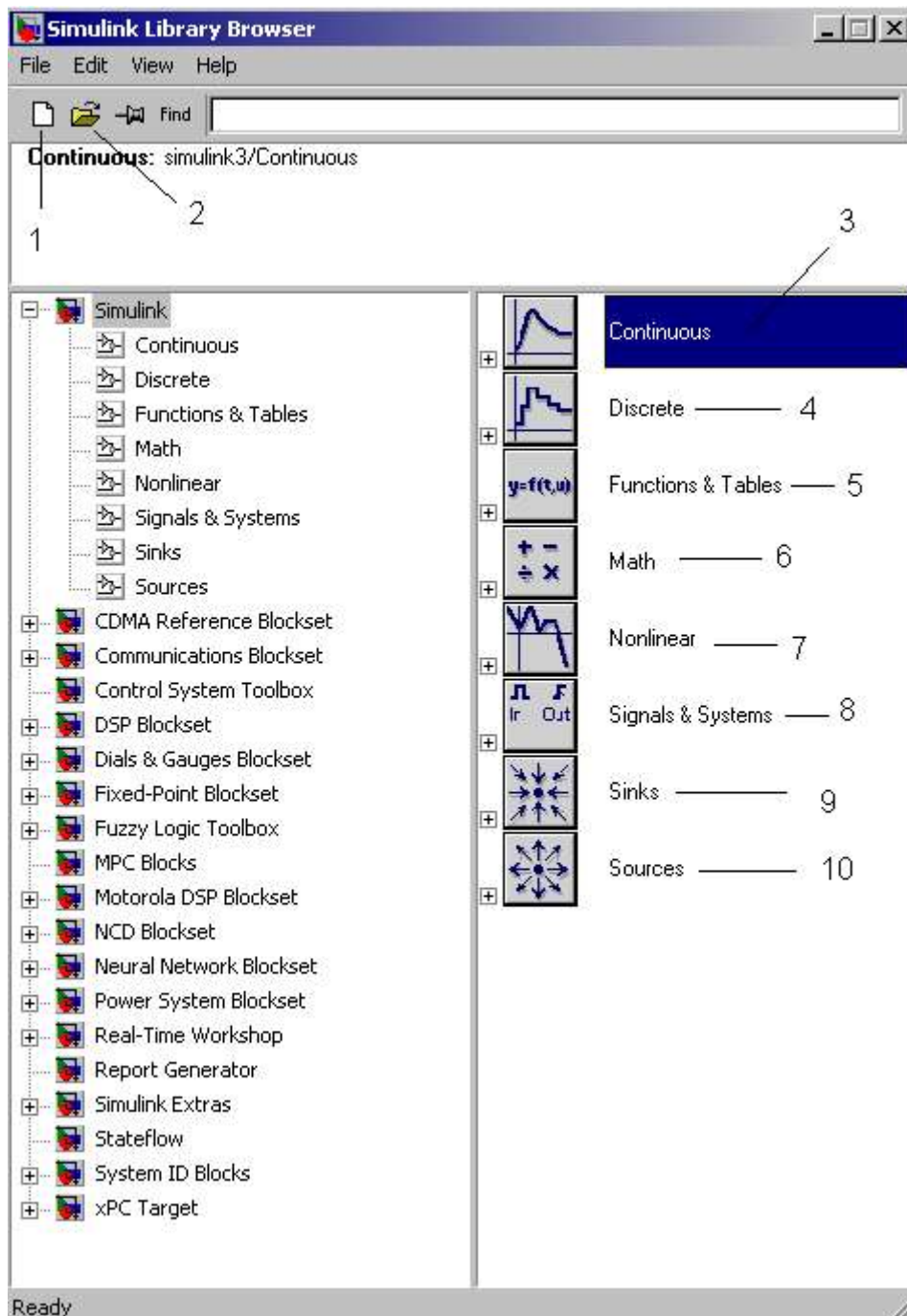
Simulink galima paleisti ir **Matlab** komandų lange įvedus komandą `>>simulink`, kaip parodyta 7 paveiksle.



7 pav. **Matlab** komandų langas

Šia komanda atveriami du nauji langai. Pirmasis langas yra **Simulink** funkcinių elementų peržvalgos langas (8 pav.). Šiame lange galima pasirinkti:

- a) veiksmus su modeliais:



8 pav. **Simulink** bibliotekos peržiūros langas

1 – Create a new model (sukurti naują modelį);

2 – Open a model (atidaryk modelį);

b) sistemos struktūrinei schemai sudaryti reikiamus funkcinių elementų rinkinius:

3 – Continuous (tolydžiųjų elementų);

4 – Discrete (diskrečiųjų elementų);

5 – Functions&Tables (funkcijų ir funkcijų lentelių);

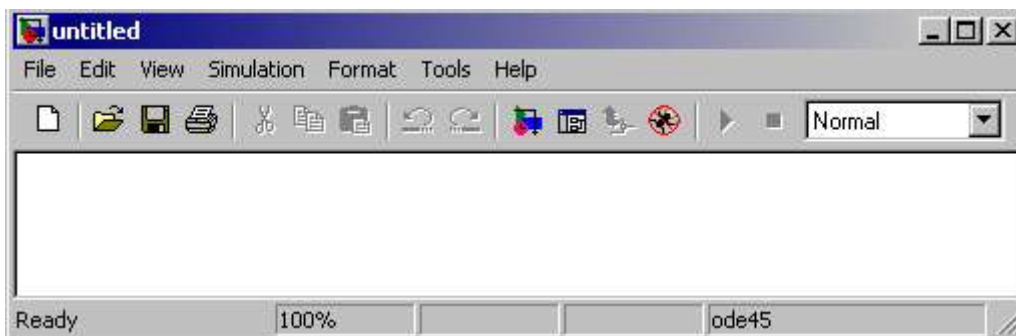
6 – Math (matematikos);

7 – Signals&Systems (signalų ir sistemų);

8 – Sinks (registratorių);

9 – Sources (šaltinių).

Antrasis langas yra tuščias modelio langas (9 pav.) be pavadinimo (untitled), kuriame bus sudaromas **Simulink** modelis.



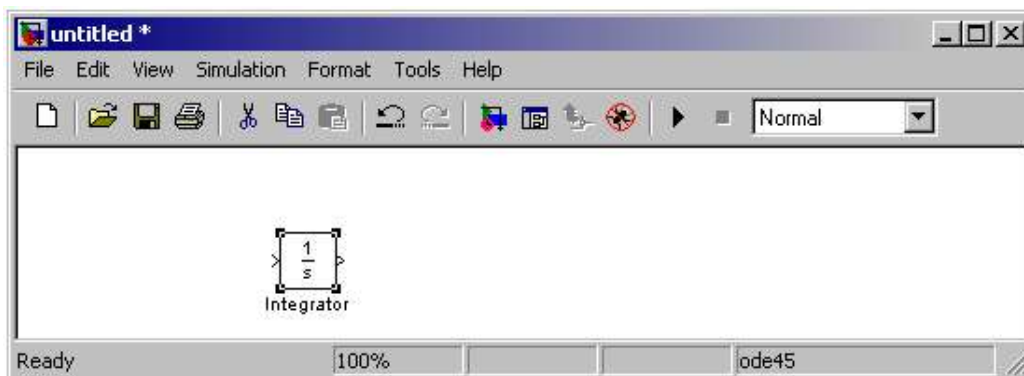
9 pav. Tuščias modelio langas

Dabar sudarysime kaip pavyzdį paprastą **Simulink** modelį, kuris išspręstų pirmosios eilės netiesinę diferencialinę lygtį, kai pradinė sąlyga $x(0) = 100$:

$$\frac{dx}{dt} + x(0.5x - 1) = 0 \quad (1)$$

Šiai pirmosios eilės diferencialinei lygčiai išspręsti reikia integratoriaus, kurio įėjimas yra dx/dt , o išėjimas – x . Modeliui sudaryti (1) lygtį pertvarkome taip:

$$\frac{dx}{dt} = -0.5x^2 + x \quad (2)$$



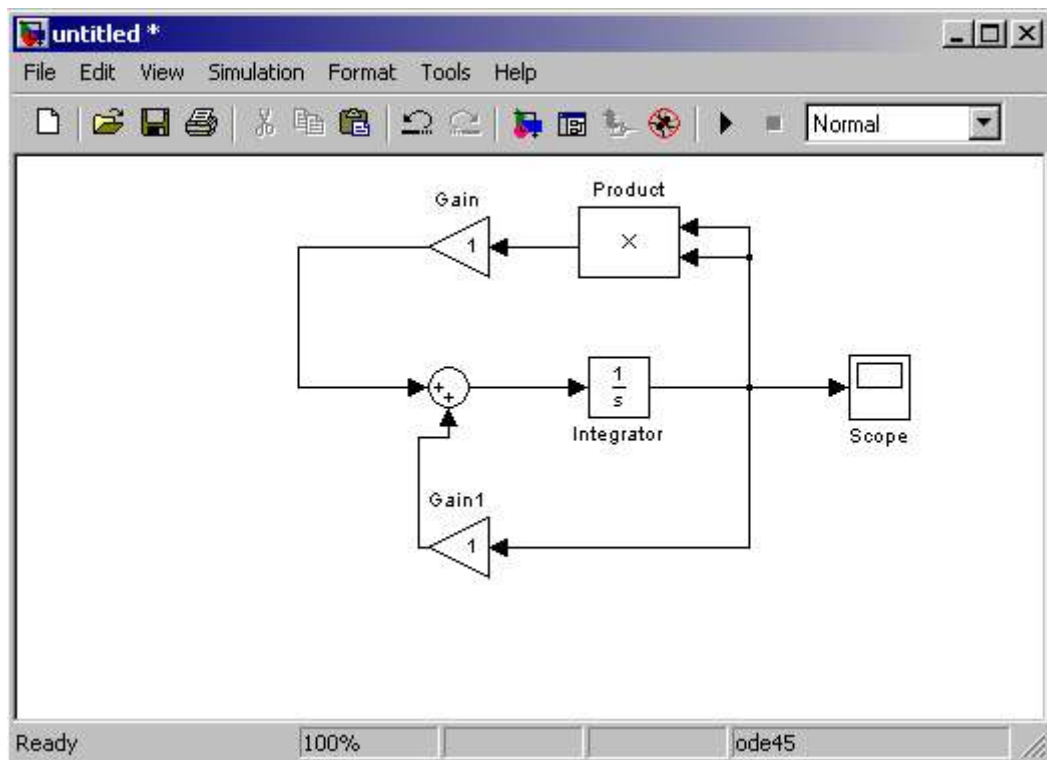
10 pav. Modelio langas su integratoriumi

Visų pirma atversime tolydžiųjų elementų (Continuous) rinkinio langą. Iš jo į tuščią modelio langą perkopijuojame integratorių (Integrator). Tuomet atidarę matematikos rinkinio (Math) langą, iš jo į modelio langą perkopijuojame sumatorių (Sum), daugybos elementą (Product) ir du stiprintuvus (Gain ir Gain1). Daugybos elementas bus naudojamas diferencialinės lygties kintamojo kvadratui x^2 gauti. Iš registratorių rinkinio (Sinks) langą. Iš jo į modelio langą perkopijuojame indikatorius (Scope). Visų elementų standartinė orientacija yra tokia, kad jų įvesties prievadai yra kairiojoje briaunoje, o išvesties

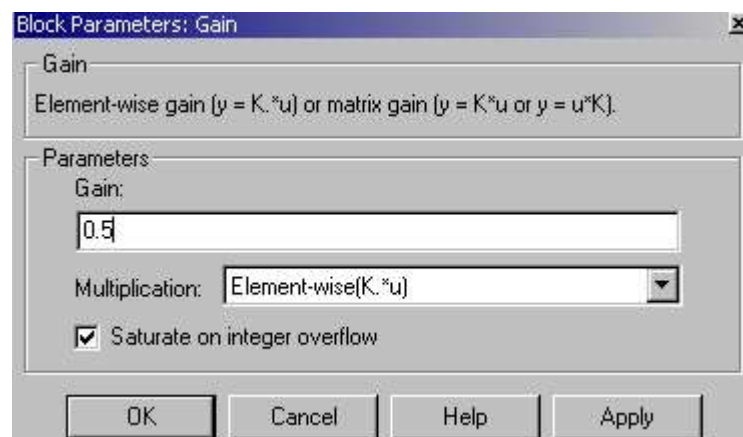
– dešiniojoje. Sudaromo modelio struktūrą bus lengviau suvokti, jei daugybės elementą ir stiprintuvus apsuksime taip, kad jų įvesties prievada būtų dešiniojoje briaunoje, o išvesties – kairiojoje.

Pažymėkite daugybės elementą (spragtelėję ties juo kairiuoju pelės klavišu). Jo kampuose atsiradusios valdymo rankenėlės (handle) parodo, kad šis elementas yra pažymėtas.

Iš modelio lango meniu eilutės pasirinkite **Format:Flip Block**. Dabar elemento įvesties prievada yra dešinėje, o išvesties prievadas – kairėje pusėje. Elemento pasukimo operacija pakartojama su kiekvienu stiprintuvu. Nubrėžkite signalo liniją nuo sumatoriaus išvesties prievado ir liniją nuo integratoriaus išvesties prievado iki indikatorius įvesties prievado. Toliau reikia nubrėžti signalo linijos, jungiančios integratorių ir indikatorius, atšaką į apatinį stiprintuvą. Nuspaudę mygtuką Ctrl, spragtelėkite KPK ties signalo linijos atšakos tašku. Žymeklis virsta kryžiu. Nuspaudę pelės klavišą, atleiskite mygtuką Ctrl. Kryžiuką traukite nuo signalo linijos atšakos taško iki apatinio stiprintuvo įvesties prievado. Ši signalo linija yra punktyrinė, o žymeklis virsta dvigubu kryžiu, kai pasiekiamas stiprintuvo įvesties prievadas. **Simulink** automatiškai nukreipia signalo liniją, naudodama 90° alkūnes. Analogiškai nubrėžiame signalų linijos, jungiančios integratorių ir indikatorius, atšaką į daugybės elemento viršutinį įvesties prievadą. Nubrėžiame signalų linijos, prijungtos prie daugybės elemento viršutinio įvesties prievado, atšaką į apatinį šio elemento įvesties prievadą. Dabar daugybės elemento išėjimo signalas yra x^2 . Nubrėžiame signalo liniją, jungiančią daugybės elemento išvesties prievadą su viršutinio stiprintuvo įvesties prievadu. Nubrėžiame signalo liniją nuo viršutinio stiprintuvo išvesties prievado iki viršutinio sumatoriaus įvesties prievado. Visų pirma nubrėžiame linijos atkarpa nuo išvesties prievado iki pirmosios alkūnės vietos. Šioje vietoje atleidžiamas pelės klavišas. Signalo linija užsibaigs atvira rodykle. Toliau, signalo linija pratęsiama nuo atvirosios rodyklės iki viršutinio sumatoriaus įvesties prievado. Analogiškai nubrėžiame signalo liniją, jungiančią apatinio stiprintuvo išvesties prievadą su apatiniu sumatoriaus įvesties prievadu. Modelio struktūra jau yra sudaryta, tačiau būtina pertvarkyti kai kuriuos elementus. Dabartinių stiprintuvų stiprinimo koeficiento reikšmės yra sudaryta, tačiau būtina pertvarkyti kai kurios elementus. Dabartinių stiprintuvų stiprinimo koeficiento reikšmės yra standartinės – lygios 1.0. Be to, sumatorius, užtuot skaičiavęs įėjimo signalų skirtumą, skaičiuoja jų sumą. Reikia nustatyti integratoriaus išėjimo signalo pradinę reikšmę, atitinkančią diferencialinės lygties pradinę sąlygą $x(0)$. Pertvarkome viršutinį stiprintuvą: kairiuoju pelės klavišu (KPK) du kartus spragtelėję ties šiuo elementu, atveriam jo parametrų dialogo bloką.

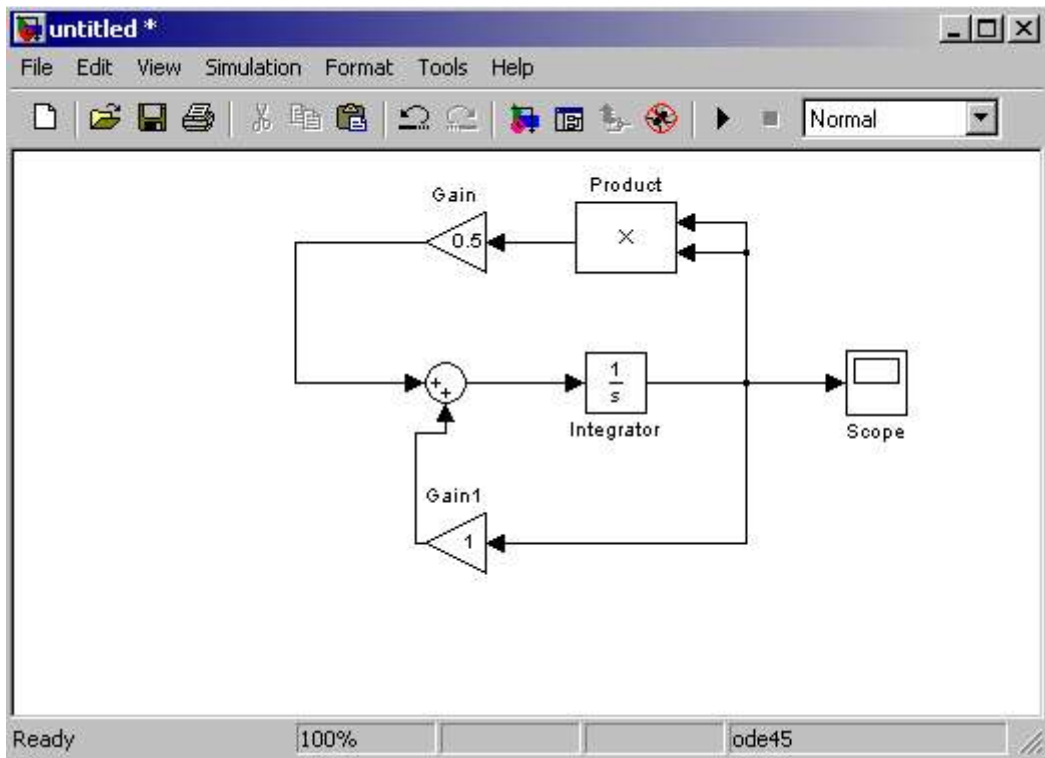


11 pav. Simulink modelio schema



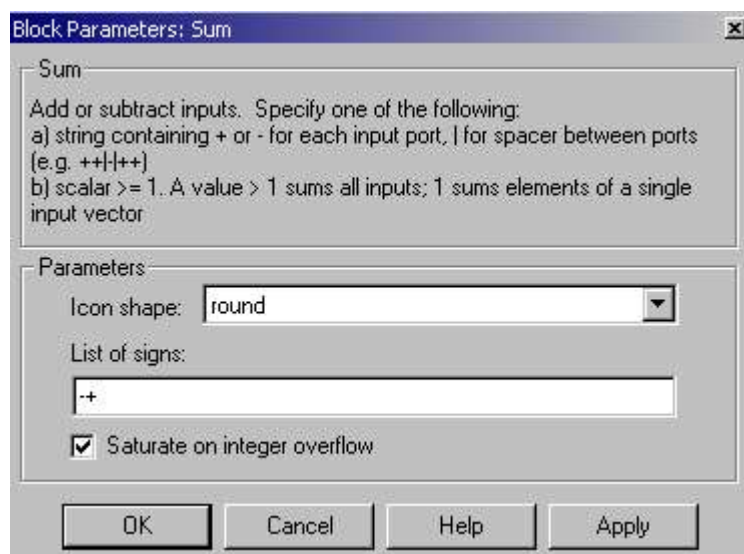
12 pav. Parametrų blokas

Šio dialogo bloko lauke **Gain** standartinę stiprinimo koeficiento reikšmę pakeičiame į 0.5. Spragtelime KPK ties OK. Modelio lange pasikeičia viršutinio stiprintuvo ankstesnioji stiprinimo koeficiento reikšmė.



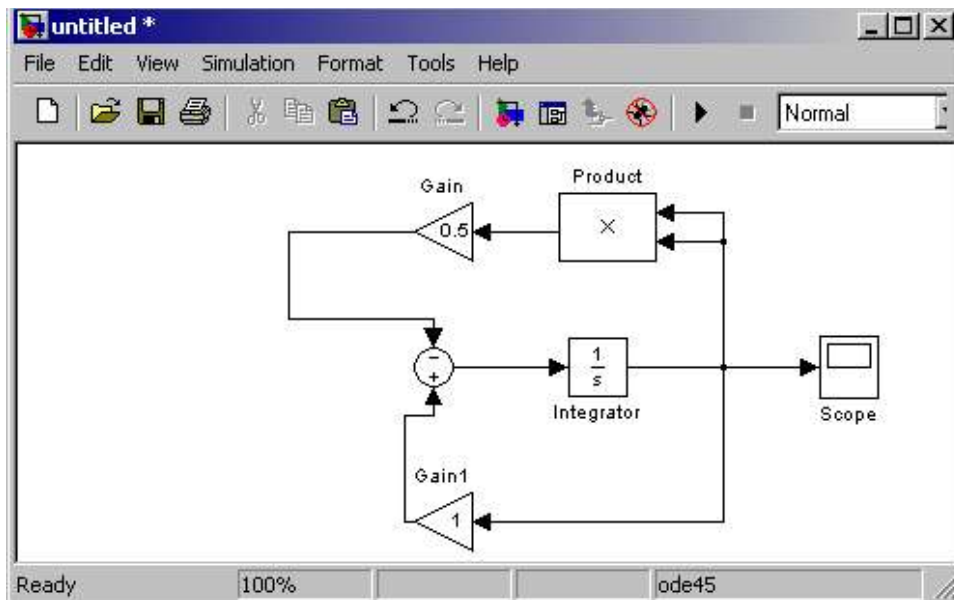
13 pav. **Simulink** modelio schema

Pertvarkome sumatorių: kairiuoju pelės klavišu (KPK) du kartus spragtelkime ties šiuo elementu, atversim jo parametrų bloką.



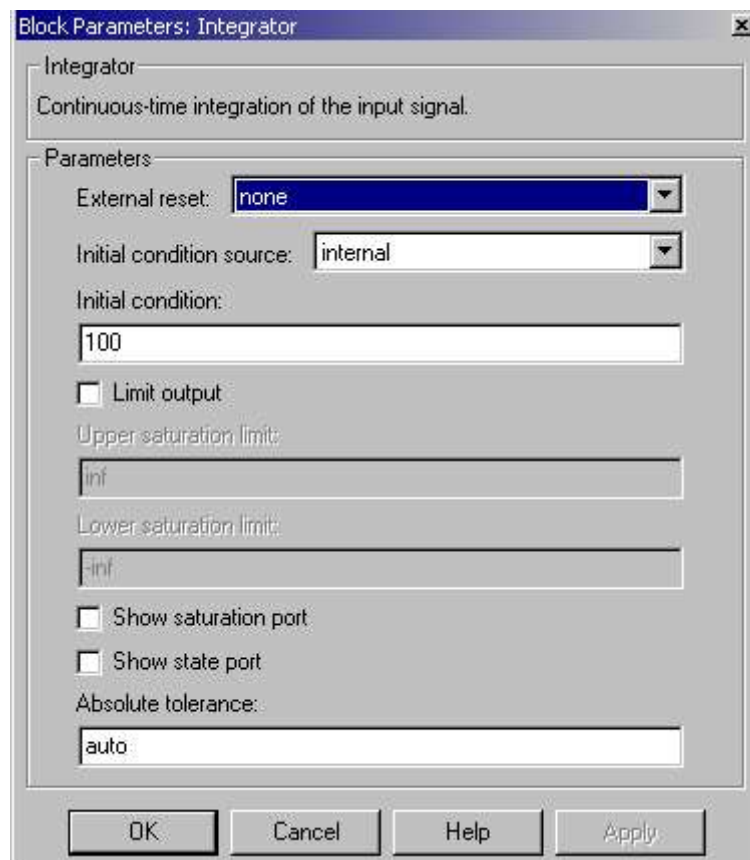
14 pav. Parametrų blokas

Šiame dialogo bloko lauke **List of signs** ankstesnę ženklų seką ++ keičiame į -+. Spragtelime KPK ties OK. Modelio lange pasikeičia sumatoriaus ženklai. Dabar sumtorius atlieka dx/dt skaičiavimus, atitinkančius (2) lygtį.



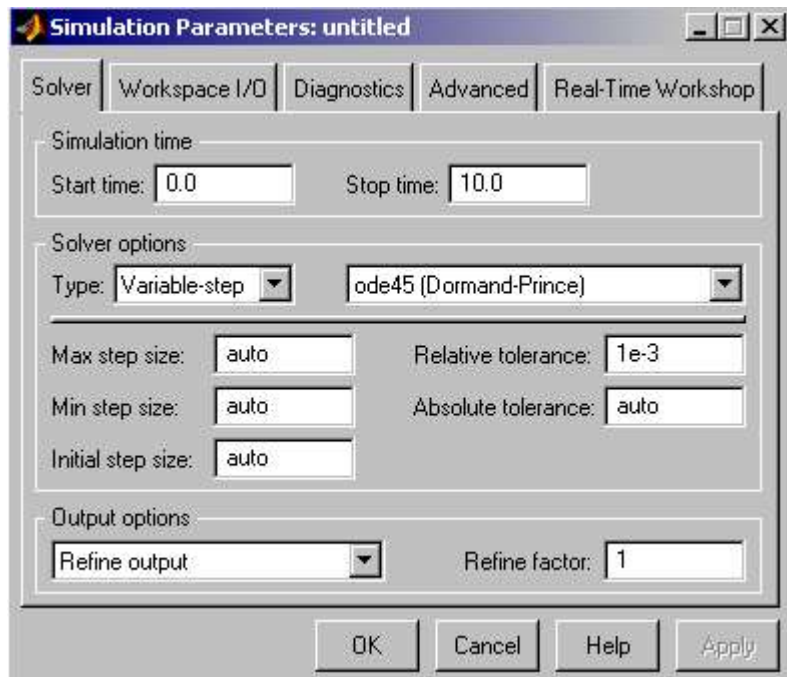
15 pav. **Simulink** modelio schema

Nustatome integratoriaus išėjimo signalo pradinę reikšmę, atitinkančią diferencialinės lygties pradinę sąlygą $x(0)=100$: du kartus spragtelėję KPK ties integratoriumi, atveriamė šio elemento parametrų bloką. Šio bloko **Initial condition** esamą (standartinę) reikšmę 0.0 pakeičiame į 100. Spragtelime KPK ties OK.



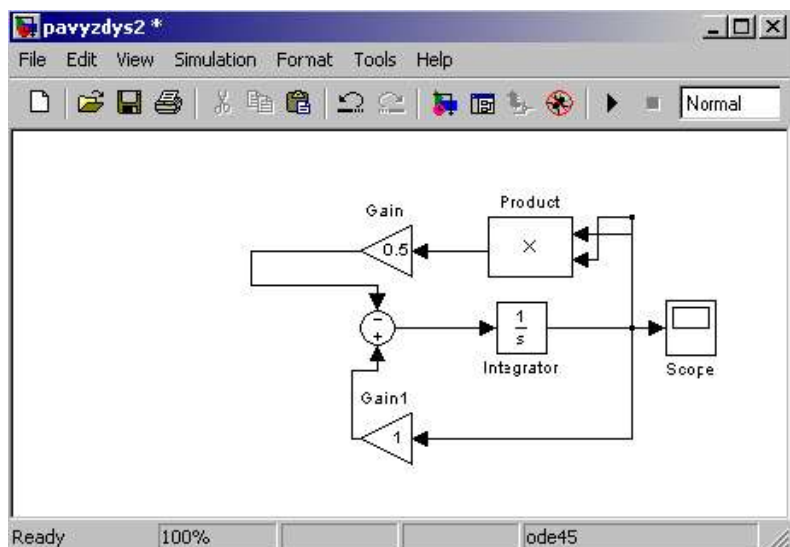
16 pav. Parametrų blokas

Standartinis modeliavimo paleisties laikas (start time) yra 0.0, o stabdos laikas (stop time) – 10.0. Norėdami pakeisti stabdos laiko reikšmę į 1.0, modelio lango meniu eilutėje **Simulation** pasirinkite atveriamąjį meniu **Parameters**. Atvertame modeliavimo parametrų dialogo bloko lauke **Stop time** nustatykite stabdos laiko reikšmę į 1.0. Spragtelime KPK ties OK.



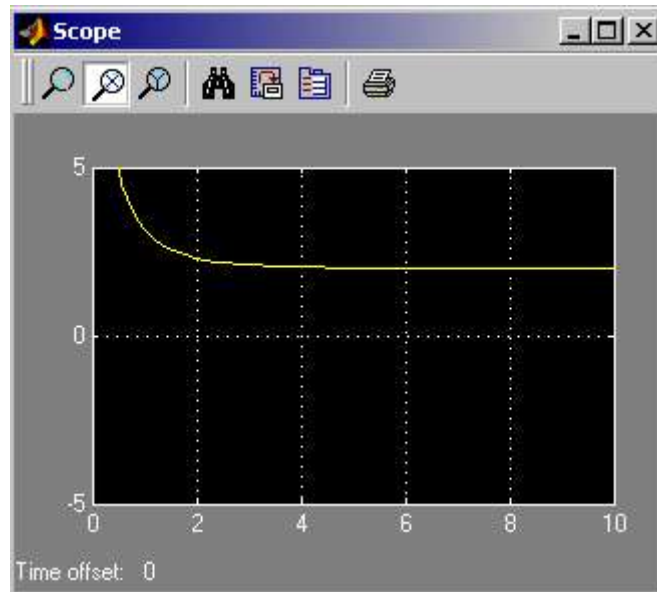
17 pav. Paleisties parametrų blokas

Dabar modelis yra visiškai sudarytas ir parengtas skaičiuoti. Prieš atliekant skaičiavimus, visuomet patariama modelį įsiminti. Modelis įsimenamas taip: modelio lango eilutėje pasirenkame **File: Save** ir įveskite modelio failo vardą, pavyzdžiui, **pavyzdys 2** (be plėtinio **.mdl**). Modelio lango vardas iš **untitled** keičiamas į **pavyzdys 2**.



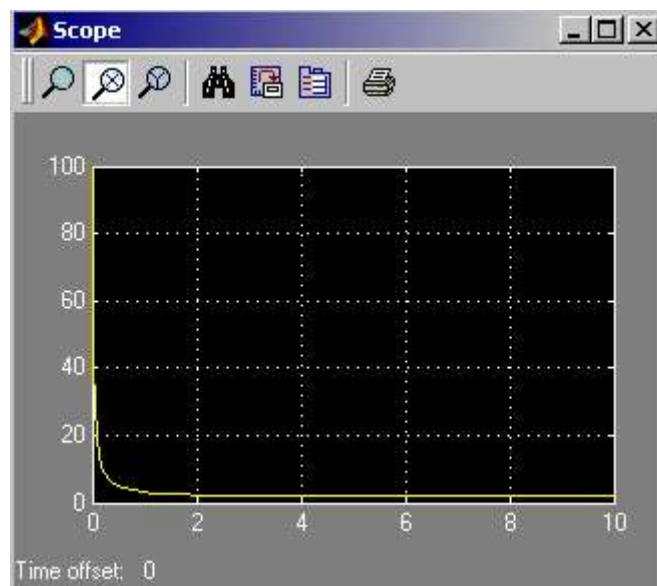
18 pav. Simulink modelio schema

Kairiuoju pelės klavišu (KPK) du kartus spragtelėję ties modelio lango indikatoriaus elementu (Scope), atversite indikatoriaus langą. Iš modelio lango meniu eilutės pasirinkite **Simulation: Run**. Indikatoriaus lange matomi skaičiavimo rezultatai (19 pav.).



19 pav. Indikatoriaus langas

Indikatoriaus lango instrumentų eilutėje spragtelėsime KPK ties automatiškai nustatomo mastelio piktograma. Indikatoriaus lange matyti visos diferencialinės lygties (1) sprendinio $x(t)$ grafikas.



20 pav. Indikatoriaus langas po mastelio pakeitimo

Čia buvo aprašyta kaip sumodeliuoti nesudėtingą matematinį modelį, visas šias žinias pritaikysime modeliuodami sinchroninio variklio matematinį modelį.

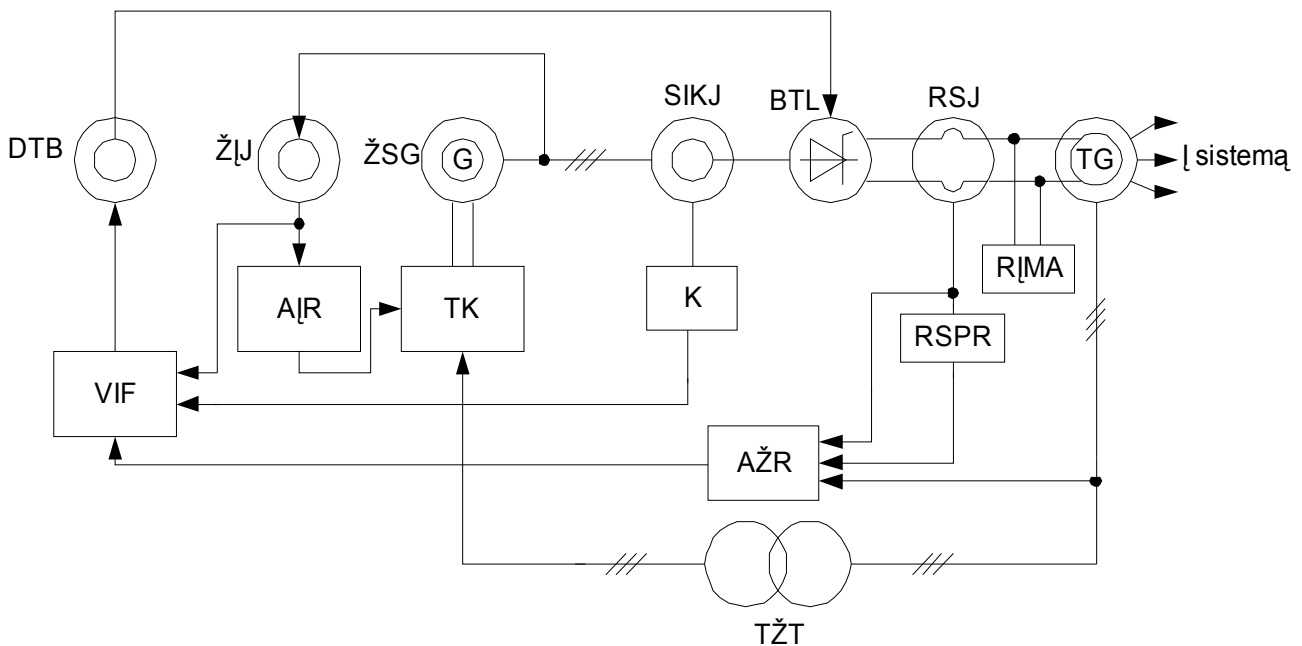
2. SINCHRONINIO GENERATORIAUS AUTOMATINIS ŽADINIMO REGULIAVIMAS

2.1. Galingų sinchroninių generatorių žadinimo sistema

Pastaruoju metu galingų sinchroninių generatorių žadinimui naudojami greita veikės, bešepetės žadinimo sistemos su adaptyviniais žadinimo srovės reguliatoriais. Visos žadinimo sistemos galima suskirstyti į tokias grupes [13, 14]:

- ne priklausomojo žadinimo bešepetės sistemos su besisukančiais tiristoriais;
- tiristorinės savižadinimo sistemos be nuosekliųjų autotransformatorių;
- bešepetės sistemos su besisukančiais diodais;
- aukštadažnės žadinimo sistemos;
- aukštadažnės sistemos su stabilizavimo įtaisais;
- elektromašininės žadinimo sistemos su nuolatinės srovės žadintuvais.

Pirmosiose trijose sistemose panaudoti unifikuoti žadinimo srovės reguliatoriai su puslaidininkiniais elementais, o taip pat reguliatoriai su magnetiniais stiprintuvais. Aukštadažnėse ir elektromašininėse sistemose pritaikyti proporcinio tipo žadinimo reguliatoriai su generatoriaus įtampos koregavimo įtaisais. 21 pav. parodyta 1000 MW galios turbogeneratoriaus bešepetės tiristorinės žadinimo sistemos funkcinė schema [14]:



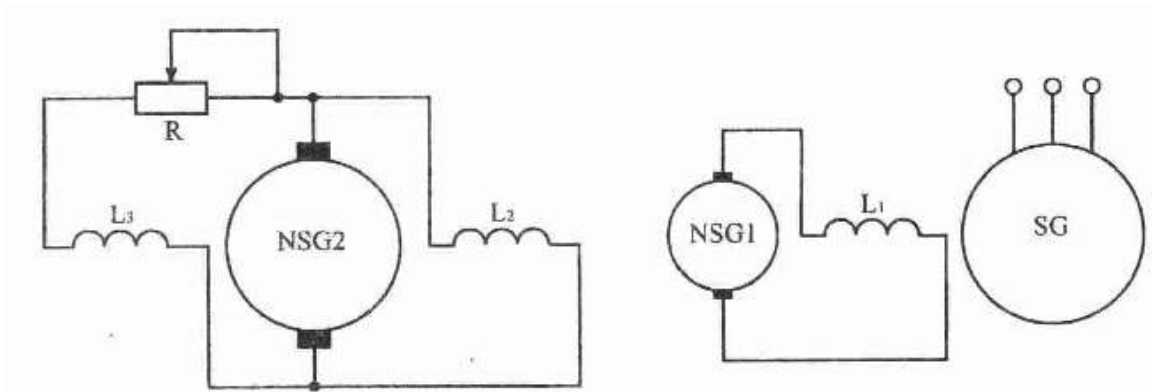
21 pav. Galingo turbogeneratoriaus bešepetės tiristorinės žadinimo sistemos funkcinė schema
čia funkcinėje schemoje pažymėta:

TG – turbogeneratorius;
ŽSG – žadintuvo sinchroninis generatorius;
DTB – dinaminų transformatorių blokas;
ŽĮJ – žadintuvo įtampos jutikliai;
SIKJ – srovės impulsų kontrolės jutikliai;
BTL – besisukantis tiristorinis lygintuvas;
RSJ – rotoriaus srovės elektromagnetiniai jutikliai;
AĮR – žadintuvo generatoriaus įtampos (ŽSG) įtampos reguliatorius;
TK – tiristorinis keitiklis;
K – bekontaktės besisukančio lygintuvo (BTL) kontrolės blokas;
RSPR – rotoriaus srovės perkrovos relė;
RĮMA – rotoriaus įtampos matavimo ir apsaugos blokas;
AŽR – automatinis žadinimo reguliatorius;
VIF – tiristorių valdymo impulsų formavimo blokas;
TŽT – trifazis žeminantis transformatorius.

Šioje schemoje vienas iš svarbiausių ir atsakingiausių elementų yra žadinimo srovės reguliatorius (AŽR), nuo kurio priklauso visos TG žadinimo sistemos patikimas veikimas, ypač avariniais energetinės sistemos atvejais ir esant nenormaliems TG darbo režimams. TG žadinimo srovė keičiama lygintuvo BTL tiristoriais, kuriems valdymo impulsus formuoja blokas VIF pagal žadinimo įtampos jutiklį (ŽĮJ), kontrolės bloko (K) ir automatinio žadinimo reguliatoriaus (AŽR) signalus.

Sutrikus sinchroninio generatoriaus žadinimui, sumažėja aktyvioji jo galia ir kartu pablogėja statinio stabilumo sąlygos: generatorius gali netekti sinchronizmo. Todėl žadinimo sistemai skiriamas ypatingas dėmesys.

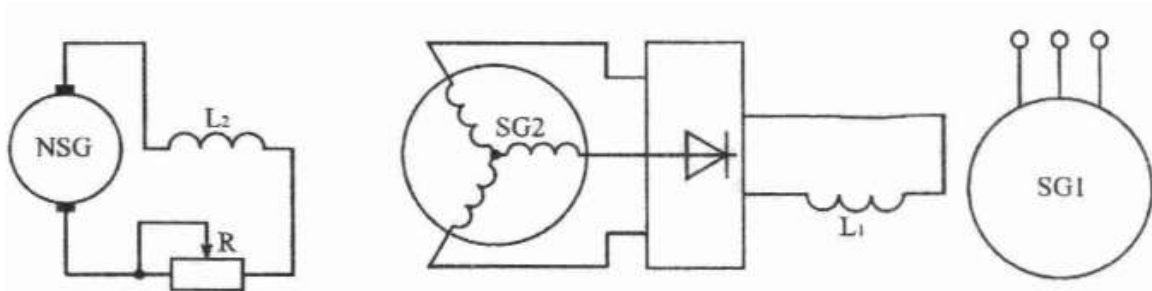
Labai dažnai kaip sinchroninės mašinos žadintuvas dirba nuolatinės srovės kolektorinis lygiagrečiojo žadinimo generatorius. Jeigu sinchroninė mašina greitaeigė (turbogeneratorius), tai ir žadintuvas, ir sinchroninė mašina turi bendrą veleną. Jeigu kolektoriniame žadintuve iškyla komutacijos problemų ($n=3000 \text{ min}^{-1}$), tai žadintuvas montuojamas atskirai su asinchroniniu varikliu, kuris maitinamas arba iš bendrų šynų, arba iš generatoriaus išvadų. Įvykus avarijai (trumpajam jungimui), generatoriaus ir šynų įtampa krinta. Kadangi asinchroninio variklio sukimo momentas priklauso nuo įtampos kvadrato, asinchroninio variklio slydimas gali išaugti, o žadintuvo įtampa - kristi. To galima išvengti, jei žadintuvo velenas sujungtas su smagračiu, arba asinchroninis variklis maitinamas iš rezervinio šaltinio, kurio įtampa pastovi.



22 pav. Sinchroninio generatoriaus žadinimo sistema

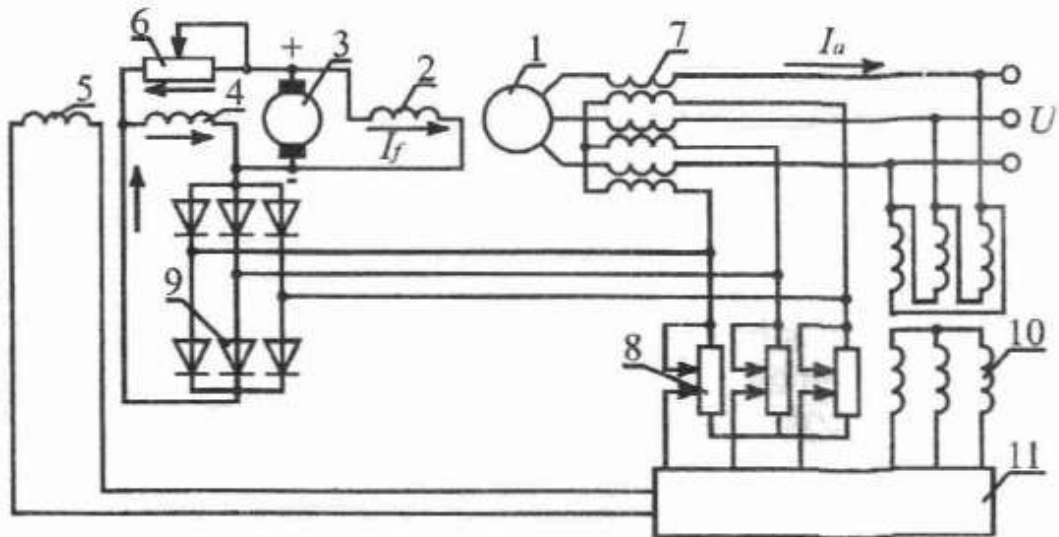
Didelės galios sinchroninių generatorių žadinimo sistema gali būti sudaryta iš žadintuvo NSG1 ir subžadintuvo NSG2 (22 pav.). Žadinimo srovė reguliuojama su NSG2, kurio galia sudaro 5÷10% NSG1 galios. Vadinasi, reguliavimo aparatūra gerokai supaprastėja ir atpinga. Be to, mažos galios elektros mašinų laiko pastovioji taip pat mažesnė. Taigi reguliavimo greitaveika padidėja. Toks sinchroninio generatoriaus žadinimo būdas vadinamas nepriklausomu. Jo neigiamos savybės: kolektorinis generatorius nelabai patikimas (kolektoriaus mazgas). Vietoj nuolatinės srovės kolektorinės mašinos vis dažniau naudojami induktoriniai sinchroniniai generatoriai, kurių kintamoji įtampa išlyginama ir per žiedus perduodama į sinchroninio generatoriaus žadinimo apviją.

Vis dažniau taikoma žadinimo sistema, parodyta 23 pav. Čia pagrindinis sinchroninis generatorius SG1 ir sinchroninis generatorius SG2 – žadintuvas sumontuoti ant vieno veleno, SG2 inkaras yra rotoruje, o induktorius, kurio žadinimo apviją L_2 , yra statoriuje. Žadinimo apviją L_2 maitina santykinai mažos galios nuolatinės srovės generatorius NSG. Lygintuvas sukasi kartu su SG1 ir SG2 rotoriais. Tai įgalina maitinti žadinimo apviją L_1 be žiedų.



23 pav. Sinchroninio generatoriaus žadintuvas su lygintuvu

Dabar plačiai imta taikyti mišrųjį žadinimą. Čia žadinimo srovė priklauso nuo sinchroninio generatoriaus darbo režimo. 24 pav. parodyta tokio žadinimo principinė schema.



24 pav. Mišriojo žadinimo principinė schema

Čia 1 - synchroninis generatorius, 2 - synchroninio generatoriaus žadinimo apvija, 4, 5 - nuolatinės srovės generatoriaus žadinimo apvijoms, 6 - žadinimo apvijoms 4 srovės reguliatorius, 7 - srovės transformatorius, 8 - kompaundavimo reguliavimo reostatai, 9 - nevaldomieji lygintuvai, 10 - įtampos transformatorius, 11 - įtampos korektorius, maitinantis žadinimo apviją 5.

Nuolatinės srovės generatoriaus žadinimo apvija 4 sujungta lygiagrečiai su žadintuvo inkaru; be to, ji maitinama per lygintuvą 9 iš srovės transformatoriaus 7. Didėjant synchroninio generatoriaus srovei I_a , didėja žadinimo apvijoms 4 srovė, didėja žadintuvo įtampa ir synchroninio generatoriaus 1 žadinimo srovė I_f . Tuo būdu kompensuojamas įtampos kritimas. Įtampos korektorius įgalina tiksliau reguliuoti synchroninio generatoriaus įtampą. Esant tokiai žadinimo sistemai, synchroninio generatoriaus įtampos pokytis neviršija $\pm 2\%$.

Keletas žodžių apie žadinimo srovės forsuoimą. Įvykus trumpajam jungimui tarp generatoriaus gnybtų arba tarp fazės ir neutralės, pažeistų fazių įtampa smarkiai sumažėja, vadinasi, sumažėja synchroninio generatoriaus galia. Pirminio variklio (turbinos) galia išlieka nepakitusi. Apkrovos kampas Θ ima augti ir auga tol kol turbinos ir generatoriaus aktyviosios galios (sukimo momentai) susilygina. Jeigu apkrovos kampas $\Theta > \pi/2$ – synchroninis generatorius ims dirbti nestabiliai (neteks synchronizmo). Tai labai pavojinga avarija, kurios visomis išgalėmis reikia vengti.

Nedidelės galios synchroninių mašinų žadinimo srovė reguliuojama įtampos proporcingumo dėsniumi. Tam tikslui dažnai naudojami angliniai (grafitiniai) reguliatoriai. Grafitinis reguliatorius sudarytas iš grafito diskų stulpelio, kurį spaudžia mechaninė spyruoklė. Spyruoklės spaudimo jėgą didina arba mažina elektromagnetas, kurio apvija maitinama iš įtampos šaltinio $\Delta U = U_a - U_{aN}$; čia U_a - inkaro besikeičianti įtampa; U_{aN} - inkaro nominalioji įtampa. Tarkime, synchroninio generatoriaus įtampa smarkiai sumažėjo, t. y. $\Delta U < 0$. Elektromagneto apvijoms srovės poveikis sutampa su

mechaninės spyruoklės, ir grafito stulpelio suminė spaudimo jėga padidėjo; taigi sumažėjo grafito stulpelio aktyvioji varža. Jeigu grafitinis stulpelis įjungtas į žadinimo grandinę nuosekliai - padidės ir žadinimo srovė. Taip sinchroninio generatoriaus įtampa bus grąžinta. Regulatoriai, kurių veikimo principas remiasi proporcingumo dėsniu, nėra tobuli. Jie nereaguoja į įtampos pokyčio spartumą, t. y. į du/dt . Tikrai, esant dideliame įtampos kitimo spartumui dėl mechaninės ir elektromagnetinės inercijos, srovės regulatorius veiks labai vėluodamas. Tai gali baigtis avarija. Didelės galios sinchroninių mašinų žadinimo sistemoje yra regulatoriai, kurie veikia pagal proporcingumo dėsnį, ir regulatoriai, kurie reaguoja į kintamojo dydžio laiko išvestinę. Tokie regulatoriai vadinami stipriojo poveikio regulatoriais.

Norint sumažinti mechaninę ir elektromagnetinę inerciją, naudojami statiniai regulatoriai (elektroniniai), kurie neturi judamųjų dalių. Gerai suprojektuota reguliavimo sistema garantuoja sinchroninės mašinos stabilų darbą. Žadinimo sistemos forsotą režimą apibūdina tokie dydžiai:

$U_{f\max} / U_{fN} \geq 2$, čia $U_{f\max}$ - žadinimo grandinės įtampos maksimumas; įtampos kitimo spartumas

$$U_f / \Delta t = (0.8 - 1.2) \cdot U_{fN}.$$

Panašias žadinimo sistemas turi ir sinchroniniai kompensatoriai bei varikliai. Sutrikus tinklo įtampai, žadinimo srovės forsotė iš dalies grąžina įtampą bei padidina sinchroninio variklio darbo stabilumą (variklis nepraranda sinchronizmo).

2.2. Sinchroninio generatoriaus darbo charakteristikos

2.2.1. Santykinių dydžių sistema

Santykinis dydis - tai nominaliojo dydžio dalis.

Santykinė inkaro srovė:

$$I_{a*} = I_a / I_{aN}. \quad (3)$$

Santykinė įtampa:

$$U_{a*} = U_a / U_{aN}. \quad (4)$$

Santykinė galia:

$$P_* = P / P_N = \frac{m \cdot U_a \cdot I_a}{m \cdot U_{aN} \cdot I_{aN}} = U_{a*} \cdot I_{a*}. \quad (5)$$

Santykinis kampinis greitis:

$$\omega_* = \omega / \omega_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{2 \cdot \pi \cdot n_N} = n / n_N = n_*. \quad (6)$$

Santykinis momentas:

$$M_* = M / M_N .$$

(7)

Santykinė varža:

$$Z_* = Z / Z_N . \quad (8)$$

čia: $Z_N = U_{aN} / I_{aN} .$

Santykinis bazinis laikas:

$$t_B = 1 / \omega_B . \quad (9)$$

čia: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_B$ - bazinis kampinis greitis.

2.2.2 Trumpojo jungimo charakteristikos

Trumpojo jungimo charakteristika – tai priklausomybė $I_a = f(I_f)$, kai $U_a=0$, $n=n_N$.

Galingų sinchroninių generatorių $R_a \ll X_a$. Todėl teigiama, kad $R_a \approx 0$. Įjungus inkaro apvijas trumpai, gaunama grynai induktyvioji mašinos apkrova, kuri sukuria išilginę išmagnetinančiąją inkaro reakciją:

$$I_{aq} = 0; \quad I_{ad} = I_a; \quad \Psi = \pi / 2.$$

$$U_{-a} = E_M + E_{ad} + E_{aq} + E_{aa}; \quad E_{au} = 0; \quad E_{\&} = 0, \quad \text{gauname } I_{-ak} = I_{-ad} .$$

Iš 25 paveikslo aiškėja, kad trumpojo jungimo atveju:

$$E_{a\sigma} = E_{\delta} = 4.44 \cdot f \cdot w \cdot k_{w1} \cdot \Phi_{\delta k} . \quad (10)$$

čia: $\Phi_{\delta k}$ – oro tarpo srautas trumpojo jungimo režimo metu.

Taip pat galioja priklausomybė:

$$E_{ad} = 4.44 \cdot f \cdot w \cdot k_w \cdot \Phi_{ad} . \quad (11)$$

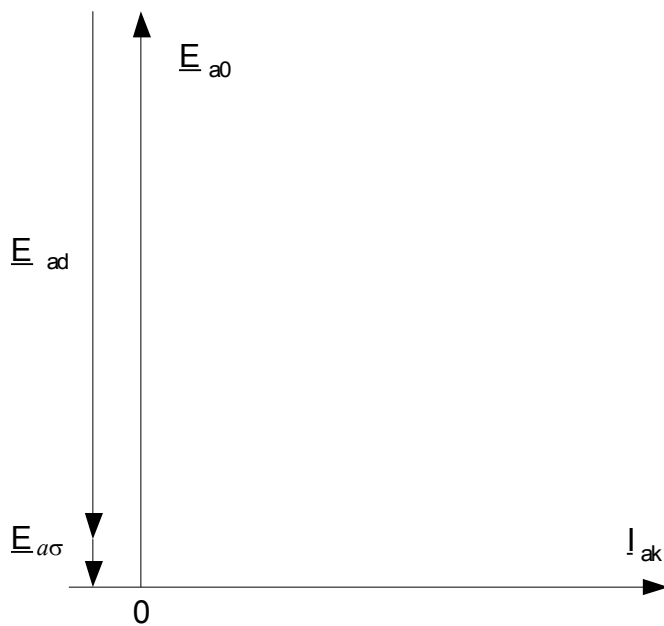
Kadangi $X_{a\sigma} \ll X_{ad}$, tai iš 25 paveikslo:

$$E_{a\sigma} \ll E_{ad} \approx E_{a0} . \quad (12)$$

Iš (10), (11), (12) formulių paaiškėja, kad:

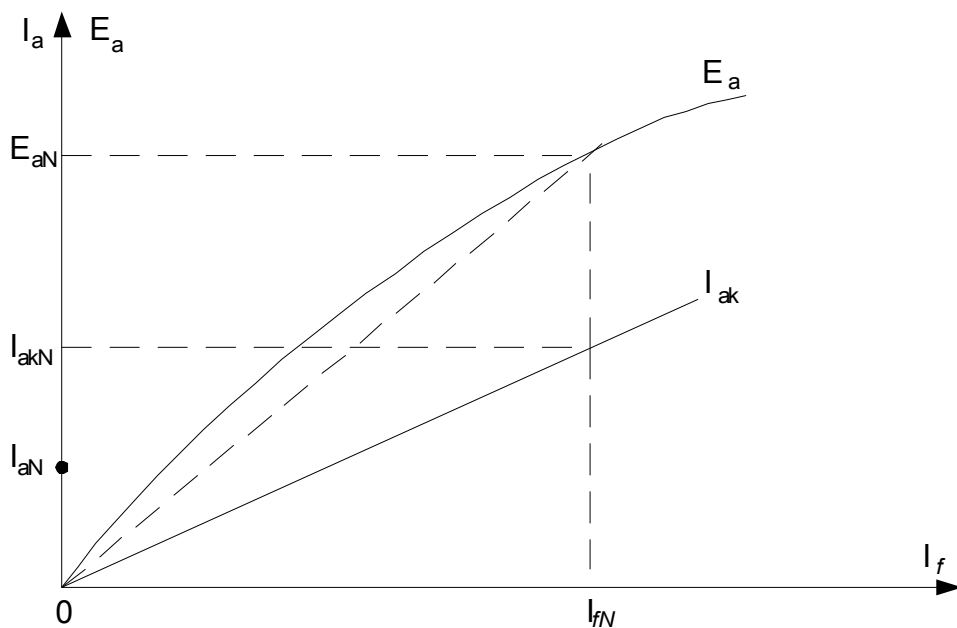
$$\Phi_{\delta k} \ll \Phi_{ad} \approx \Phi_{\delta 0} . \quad (13)$$

čia: $\Phi_{\delta 0}$ – oro tarpo srautas dirbant tuščiosios veikos režimu.



24 pav. Sinchroninio generatoriaus vektorių diagrama

Vadinasi trumpojo jungimo metu sinchroninio generatoriaus magnetinė grandinė neišotinta, taigi priklausomybė $I_{ak}=f(I_f)$ yra tiesinė (25 pav.).



25 pav. Sinchroninio generatoriaus charakteristikos TJS nustatyti

2.2.3. Trumpojo jungimo santykis (TJS)

Trumpojo jungimo santykis apibrėžiamas:

$$TJS = I_{akN} / I_{aN}; \quad (14)$$

čia: I_{aN} – nominalioji inkaro srovė;

I_{akN} – trumpojo jungimo srovė, esant tokiai žadinimo srovei I_{fN} , kurią atitinka nominalioji tuščiosios veikos elektrovara E_{aN} (25 pav.).

Įrodysime, kad TJS yra santykinis išilginės sinchroninės induktyviosios varžos X_{d*} atvirkštinis dydis.

$$TJS = I_{akN} / I_{aN} = (E_{aN} / X_d) / I_{aN} = 1 / X_{d*}; \quad (15)$$

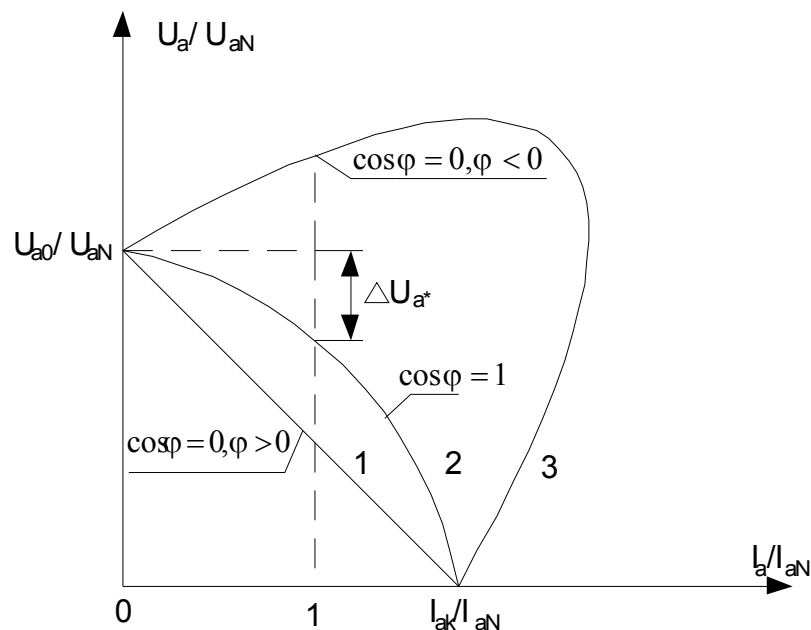
čia remiamės (8) formule.

TSJ didėja, didėjant oro tarpo ilgiui δ . Sinchroninės mašinos statinio stabilumo atsarga didėja, didėjant TJS. Tačiau tokios mašinos brangesnės, nes sunaudojama daugiau vario induktoriaus apvijai, o pats induktorius ir, aišku, inkaras yra didesni.

2.2.4. Išorinė charakteristika

Išorine charakteristika vadinsime priklausomybę $U_a = f(I_a)$, kai $I_f = const$, $\cos \varphi = const$, $f = f_N$.

Iš sinchroninės mašinos įtampų balanso lygties $\underline{U}_a = \underline{E}_{a0} + \underline{E}_d + \underline{E}_q + \underline{E}_{aR}$ aiškėja, kad, esant induktyviajai apkrovai ir didėjant inkaro srovei, didėja išilginė išmagnetinančioji reakcija, kuri mažina oro tarpo srautą, taip pat didina įtampų kritimą varžose R_a ir $X_{a\delta}$. Vadinasi, fazinė įtampa sumažėja; tai pavaizduota 26 pav. kreive 1. Koordinačių ašyse atidėti santykiniai dydžiai. Esant aktyviajai apkrovai, didėjant I_a įtampos kritimas bus mažesnis, nes išilginė išmagnetinančioji inkaro reakcija bus lygi nuliui. Tai pavaizduota kreive 2. Esant talpinei apkrovai, išilginė įmagnetinančioji inkaro reakcija, kuri didina oro tarpo srautą, o kartu ir įtampą U_a . Šitas atvejis pavaizduotas 26 pav. kreive 3.



26 pav. Sinchroninio generatoriaus išorinės charakteristikos

Nominalusis generatoriaus įtampos pokytis - tai skirtumas tarp tuščiosios veikos (t.v.) įtampos ir nominaliosios įtampos. Paprastai $\Delta U_{a^*} = (25 \div 35)\%$.

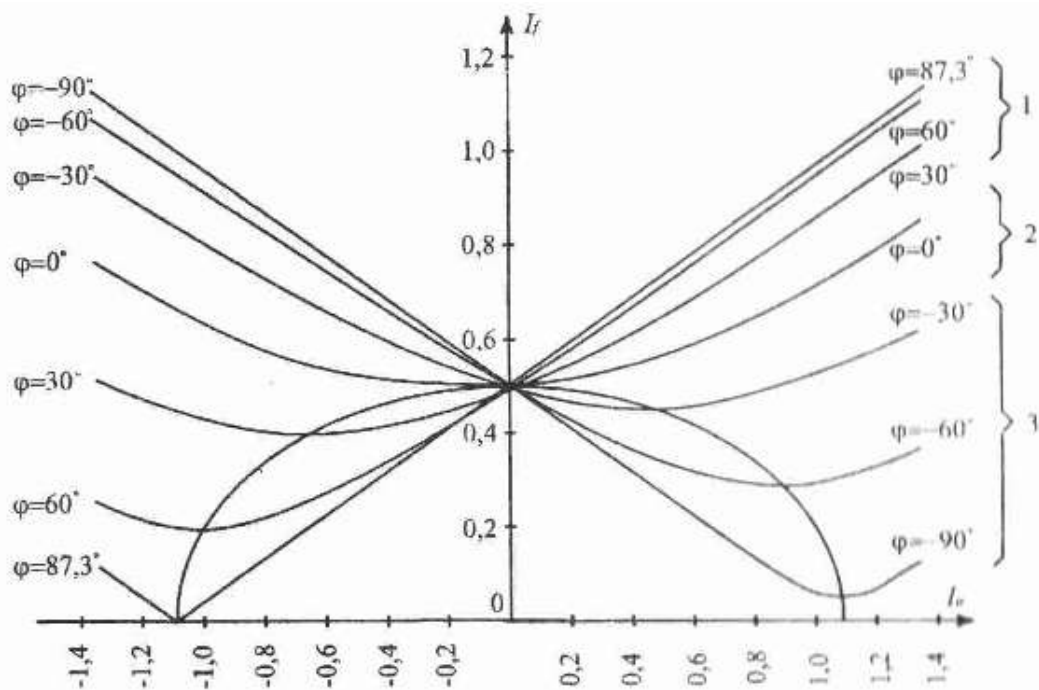
Jeigu ordinačių ašyje atidėta ne santykiniai dydžiai, bet vardiniai, tai $\Delta U_{a^*}\% = \Delta U_a / U_{aN} \cdot 100\%$.

2.2.5. Reguliavimo charakteristika

Reguliavimo charakteristika vadinsime priklausomybę $I_f = f(I_a)$, kai $U_a = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, $f = f_N$.

Jeigu apkrova induktyvioji, tai, augant inkaro srovei, išilginė išmagnetinančioji inkaro reakcija taip pat didėja, mažindama oro tarpo magnetinį srautą. Taip pat dėl įtampų kritimo varžose R_a ir $X_{a\sigma}$ įtampa U_a mažės.

Norint išlaikyti $U_a = \text{const}$, tenka didinti I_f . Tai vaizduoja kreivės 1 (27 pav.). Esant aktyviajai apkrovai, įtampa U_a kris tik varžose R_a ir $X_{a\sigma}$ (išilginė išmagnetinančioji inkaro reakcija lygi nuliui), todėl, augant I_a , kai $U_a = \text{const}$, žadinimo srovę reikės mažiau didinti (2 kreivės). Esant talpinei apkrovai, išilginė išmagnetinančioji inkaro reakcija didins oro tarpo srautą, dėl to kils įtampa U_a . Norint išlaikyti $U_a = \text{const}$, reikia mažinti žadinimo srovę. Tai vaizduojama 27 pav. 3 kreivėmis.

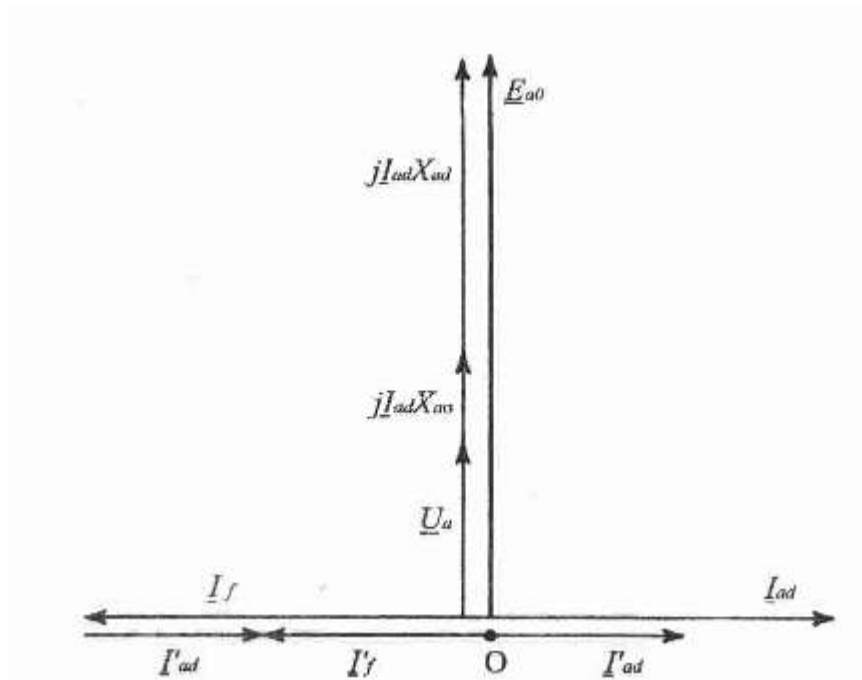


27 pav. Sinchroninio generatoriaus reguliavimo charakteristikos

2.2.6. Apkrovos charakteristika

Apkrovimo charakteristika vadinsime priklausomybę $U_a=f(I_f)$, kai $I_a=\text{const}$, $\cos\varphi=\text{const}$, $f=f_N$. Iš apibrėžimo matyti, kad tuščiosios veikos charakteristika yra apkrovimo charakteristikos atvejis, kai $I_a=0$.

28 pav. Pavaizduota tuščiosios veikos charakteristika – 1 ir apkrovimo induktyvioji charakteristika – 2, kai $I_a=I_{aN}$, $\cos\varphi=0$, $\varphi>0$. Tarkime, kad $R_a=0$. Tuomet induktyviosios apkrovos vektorių diagrama atitiks vaizduojamą 28 paveiksle.



28 pav. Sinchroninio generatoriaus induktyviosios apkrovos vektorių diagrama

Esant $I_a=\text{const}$, didėjant žadinimo magnetovarai F_f , didėja ir U_a , nes $jI_{ad}X_{ad}$, $jI_{ad}X_{as}$ lieka pastovūs. Tarkime, kad $U_a=0$. Tuomet iš tuščiosios veikos charakteristikos ir iš vektorių diagramos aiškėja, kad norint sukurti elektrovarą $E_{as}=-jI_{ad}\cdot X_{as}$, žadinimo srovę reikia padidinti iki 0^0 C (29 pav.). Jeigu nebūtų išilginės išmagnetinančiosios inkaro reakcijos, didinant žadinimo srovę toliau, inkaro fazinė įtampa kistų pagal kreivę 2 (29 pav.). Išilginė išmagnetinančioji inkaro reakcija veikia taip, kad iš pradžių reikia nugalėti įtampos kritimą varžoje X_{ad} . Taigi taške A, kai žadinimo srovė OA , įtampų kritimai inkaro fazėje yra $AD=I_{aN}\cdot X_{as}+I_{aN}\cdot X_{ad}$.

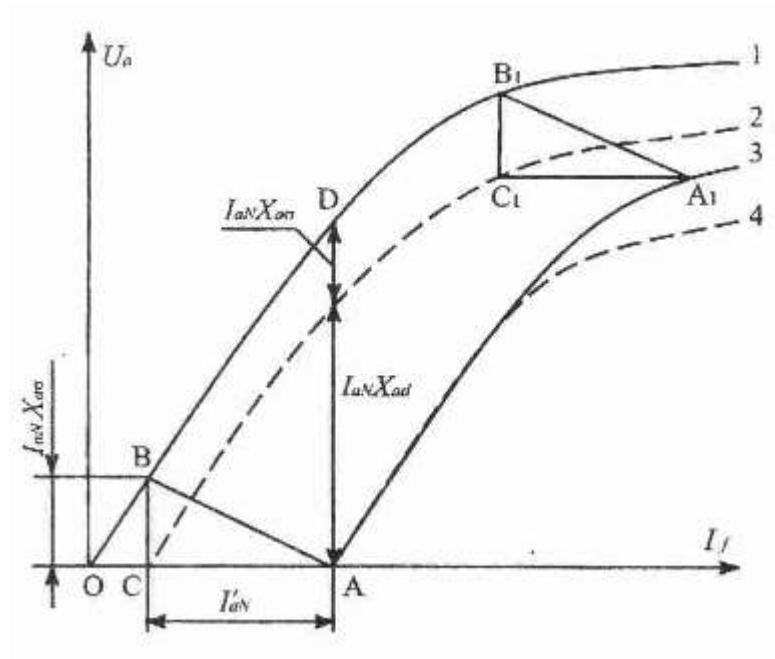
Didinant žadinimo srovę I_f toliau, fazės gnybtų įtampa augs nuo nulio pagal 3 kreivę.

Atkarpa CA – inkaro išilginės išmagnetinančiosios reakcijos srovė redukuota induktoriui. Statusis trikampis ABC vadinamas reaktinguoju trikampiu, arba Potjė trikampiu.

29 pav. 3 kreivę gali būti gauta, judant Potjė trikampiu lygiagrečiai taip, kad jo viršūnė B brėžtų tuščiosios veikos charakteristiką. Dėl įsotinimo reiškinių tikroji induktyviojo apkrovimo

charakteristika bus žemiau (brūkšninė kreivė 4). Pagal induktyviojo apkrovimo charakteristiką galima surasti neįsotintą X_d reikšmę:

$$X_d = AD / I_{aN} . \quad (16)$$

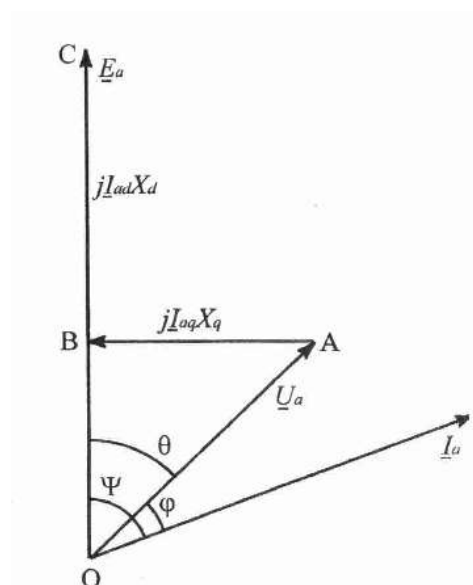


29 pav. Sinchroninio generatoriaus induktyviosios apkrovos charakteristika

2.2.7. Kampinės charakteristikos

Aktyviosios galios kampinės charakteristikos - tai $P = f(\theta)$, kai $E_a = \text{const}$, $U_a = \text{const}$, $f = f_N$.

Remkimės neįsotintos ryškiapolės sinchroninės mašinos vektorių diagrama, kai $R_a = 0$, nevaizduodami rotoriaus apvijos magnetovaros trikampio (30 pav.).



30 pav. Ryškiapolio sinchroninio generatoriaus suprastinta vektorinė diagrama

Sinchroninio generatoriaus aktyvioji galia:

$$P = m \cdot U_a \cdot I_a \cdot \cos \varphi ; \quad (17)$$

čia: $\varphi = \Psi - \Theta$.

Gauname:

$$P = m \cdot U_a \cdot I_a \cdot (\cos \Psi \cdot \cos \Theta + \sin \Psi \cdot \sin \Theta) = m \cdot U_a \cdot (I_a \cdot \cos \Psi \cdot \cos \Theta + I_a \cdot \sin \Psi \cdot \sin \Theta) = m \cdot U_a \cdot (I_{aq} \cdot \cos \Theta + I_{ad} \cdot \sin \Theta). \quad (18)$$

I_{ad} , I_{aq} surasime iš vektorių diagramos. Iš ΔOAB :

$$I_{aq} X_q = U_a \cdot \sin \Theta, \quad BC = OC - OB, \quad I_{ad} X_d = E_a - U_a \cdot \cos \Theta.$$

Taigi:

$$I_{aq} = U_a \cdot \sin \Theta / X_q. \quad (19)$$

$$I_{ad} = (E_a - U_a \cdot \cos \Theta) / X_d. \quad (20)$$

Pastarąsias srovių reikšmes įrašome į (18) formulę:

$$P = \frac{m \cdot E_a \cdot U_a}{X_d} \cdot \sin \Theta + \frac{m \cdot U_a^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\Theta. \quad (21)$$

Padaliję pastarosios lygybės abi puses iš rotoriaus kampinio greičio Ω , gausime elektromagnetinio momento lygtį:

$$P / \Omega = M = \frac{m \cdot E_a \cdot U_a}{\Omega \cdot X_d} \cdot \sin \Theta + \frac{m \cdot U_a^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot \Omega \cdot X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\Theta. \quad (22)$$

Pastarosios lygtys - tai galios ir elektromagnetinio momento kampinės charakteristikos.

Neryškiapolės sinchroninės mašinos atveju ($X_d = X_q$) (21) lygtis supaprastėja:

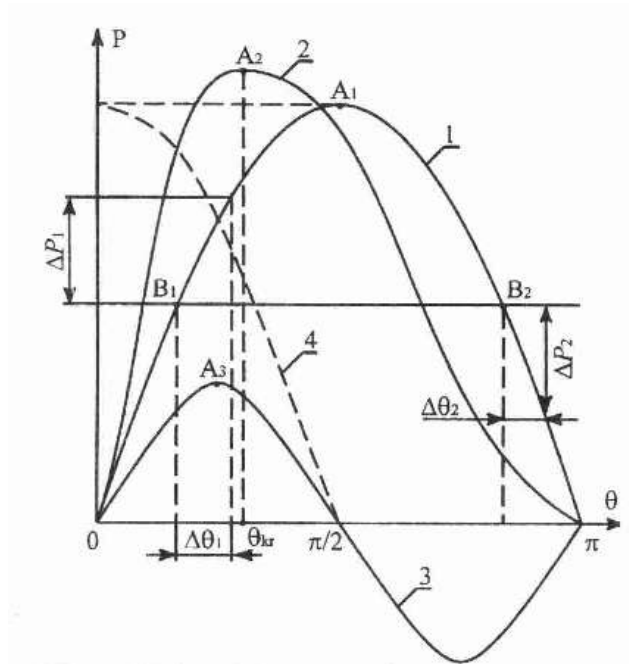
$$P = m \cdot E_a \cdot U_a \cdot \sin \Theta / X_d. \quad (23)$$

31 paveiksle pavaizduotas grafikas funkcijos (23) (1 kreivė), kurios maksimumas yra taške A_1 :

$$P_m = P_{\Theta=\pi/2} = m \cdot E_a \cdot U_a / X_d. \quad (24)$$

Įsitikinsime, kad stabilus asinchroninio generatoriaus darbas įmanomas sinusoidės lanke OA_1 , kuri atitinka apkrovos kampo intervalas $0 \leq \delta < \pi/2$.

Tarkime, kad dirbant sinchroniniam generatoriui taške "B₁", turbinos momentas gavo teigiamą pokytį, kuri atitinka teigiamas apkrovos kampo pokytis $\Delta\Theta_1$. Iš 31 pav. matome, kad tuo atveju sinchroninio generatoriaus galia taip pat įgauna teigiamą pokytį $\Delta P_1 > 0$. Taigi padidėjusią turbinos galią (momentą) atitinka padidėjusi sinchroninio generatoriaus galia, kuri grąžina galių balansą. Jeigu $\Delta\Theta_1 \rightarrow 0$, generatorius giūžta į pradinę padėtį "B₁". Toks darbo režimas vadinamas statiškai stabiliu režimu.



31 pav. Sinchroninio generatoriaus kampinės charakteristikos

Dabar tarkime, kad sinchroninis generatorius dirba "B₂" taške. Padidėjus turbinos galiai (momentui), rotorius bus suteiktas pagreitis, ir apkrovos kampas (įgis pokytį $\Delta\Theta_2$, kurį atitinka sinchroninio generatoriaus galios pokytis $\Delta P_2 < 0$). Vadinasi, padidėjus turbinos aktyviajai galiai (momentui), sinchroninio generatoriaus galia (momentas) sumažėja. Dėl tos priežasties rotorius įgaus papildomą pagreitį; tada $\Delta\Theta_2$ ima augti neribotai. Vadinasi, čia statinio stabilumo nėra.

Apibendrinami šiuos samprotavimus, galime pasakyti: tiriamajame taške sinchroninė mašina dirba statiškai stabiliai, jeigu:

$$\Delta P = \Delta \Theta > 0 \text{ arba } dP / d\Theta > 0; \quad (25)$$

tiriamajame taške sinchroninė mašina dirba statiškai nestabiliai, jeigu:

$$dP / \Delta \Theta < 0 \text{ arba } dP / d\Theta < 0. \quad (26)$$

Sinchroninės mašinos galios išvestinė:

$$dP / d\Theta = P_s = \frac{m \cdot E_a \cdot U_a}{X_d} \cdot \cos \Theta. \quad (27)$$

vadinsime sinchronizuojančiąja galia (4 kreivė, 16 pav.). Matome, kad statiškai stabiliuose taškuose $P_s > 0$, o statiškai nestabiliuose taškuose $P_s < 0$.

Ryškiapolės sinchroninės mašinos kampinė charakteristika pavaizduota kreive 2 (31 pav.). Matome, kad ryškiapolės mašinos galios maksimumas (taškas A₂) padidėjo, bet statinio stabilumo intervalas sumažėjo $\Theta_{kr} < \pi/2$.

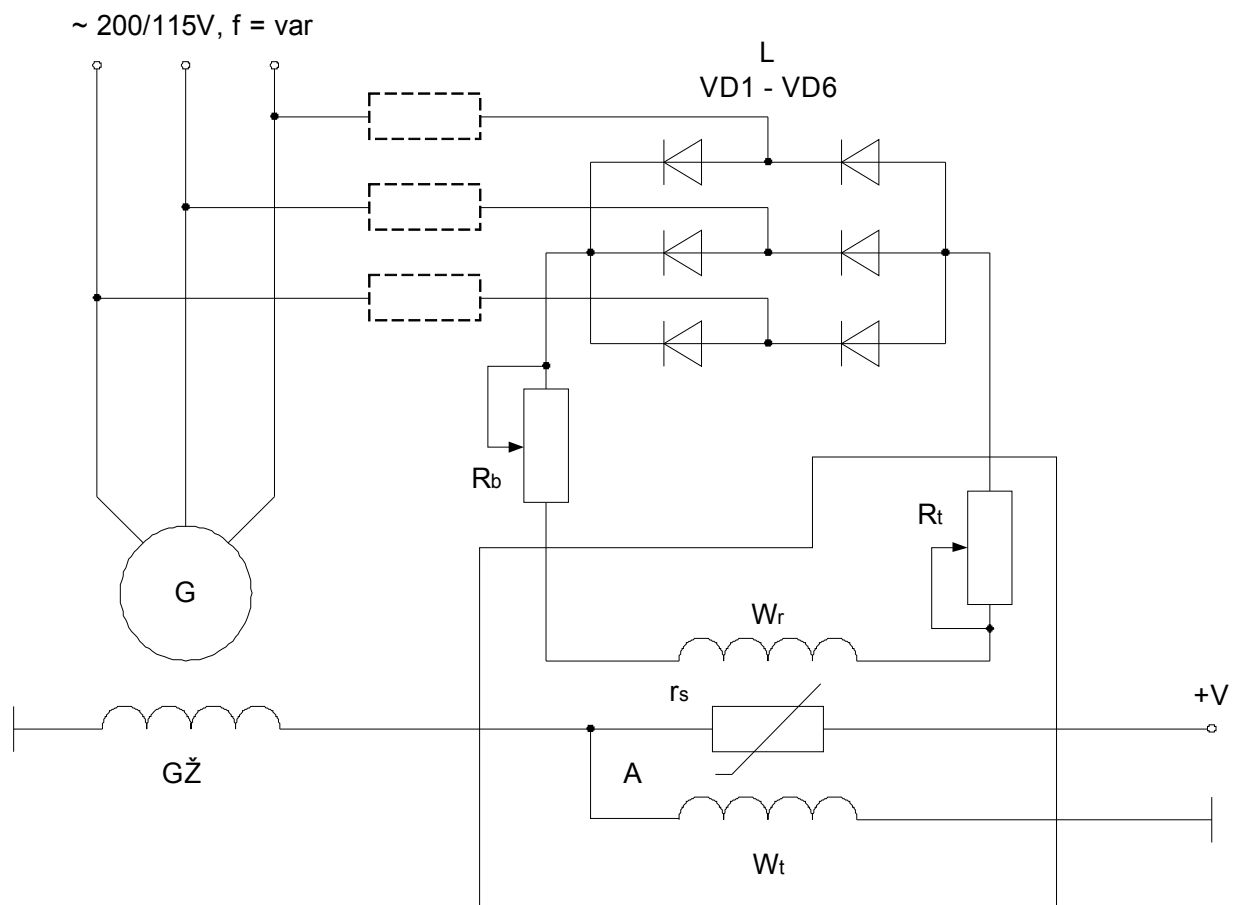
Jeigu ryškiapolio sinchroninio generatoriaus žadinimo srovė lygi nuliui ($E_a = 0$), tai aktyvioji jo galia (3 kreivė, 31 pav.):

$$P_2 = \frac{m \cdot U_a^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\Theta. \quad (28)$$

Vadinasi, ryškiapolis sinchroninis generatorius teikia aktyviają galią ir, nutrūkus žadinimui, tik tos galios maksimumas gerokai mažesnis (taškas A_3 , 16 pav.), o statinio stabilumo intervalas lygus $0 \leq \Theta < \pi/4$. Toks sinchroninis generatorius dažnai vadinamas reaktyviuoju.

2.3. Įtampos ir dažnio stabilizavimo schemos

Trifazio nepriklausomojo žadinimo sinchroninio generatoriaus ir jo įtampos regulatoriaus principinė schema parodyta 32 pav.

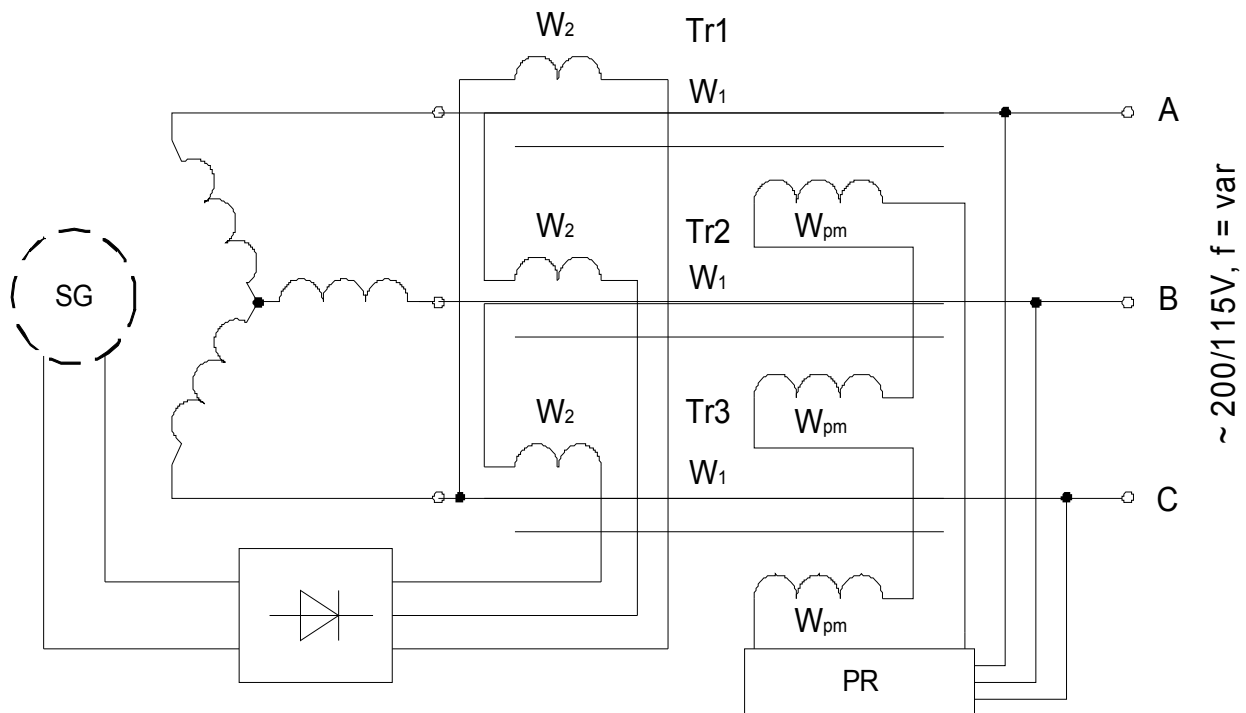


32 pav. Trifazio sinchroninio generatoriaus ir anglinio įtampos regulatoriaus principinė elektrinė schema

Šioje schemoje kintamosios srovės dažnis nereguliuojamas, galimas tik generatoriaus įtampos reguliavimas. Regulatoriaus anglinio stulpelio varža r_s įjungta nuosekliai su generatoriaus žadinimo apvija (GŽA) ir yra maitinama iš nuolatinės srovės tinklo. Generatoriaus statoriaus apvių įtampa išlyginama trifaziu nevaldomu lygintuvu VD1 – VD6. Išlyginta įtampa maitina regulatoriaus nuosekliają grandinę R_b - W_r - R_t . pagrindinis tokios schemos trūkumas yra nepakankamai patikimas šliaužiantis kontaktas, per kurį maitinama GŽA, esanti rotoriuje.

Sinchroninių generatorių įtampos regulatoriui vietoje anglinių regulatorių plačiai taikomi nekontaktiniai reguliatoriai su magnetiniais stiprintuvais, tranzistoriais, tiristoriais, o taip pat kombinuoti (mišrus) įtampos reguliatoriai. Tie reguliatoriai turi dar papildomus blokus, kurie tolygiai paskirsto apkrovos srovės reaktyviają dedamąją tarp lygiagrečiai dirbančių generatorių.

33 pav. parodyta sinchroninio generatoriaus su kombinuotu įtampos regulatoriumi principinė elektrinė schema.



33 pav. Nepriklausomojo žadinimo sinchroninio generatoriaus (SG) su kombinuotu įtampos regulatoriumi principinė elektrinė schema:

Tr1-Tr3 – kompaundiniai transformatoriai; W_1 – pirminės transformatorių apvijos; W_2 – antrinės transformatorių apvijos; W_{pm} – pamagnetinimo apvijos; LT – trifazis lygintuvinis tiltelis; PR – pagalbinis įtampos regulatorius

Šioje schemoje panaudoti trys kompaundiniai transformatoriai Tr1-Tr3, kurių pirminės apvijos W_1 (šynos) įjungtos nuosekliai į SG statoriaus fazes. Antrinės transformatorių apvijos maitina trifazį lygintuvą LT, kuris priklausomai nuo SG apkrovos keičia SG žadinimo srovę. SG įtampos

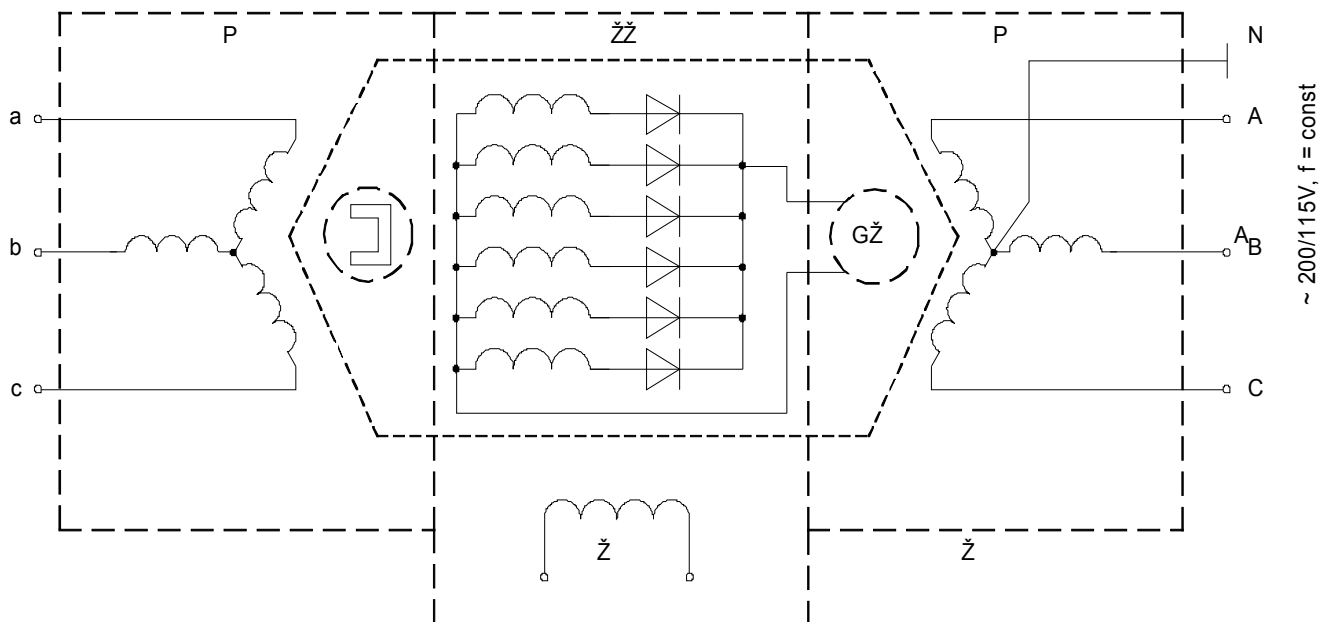
koregavimui panaudotas pagalbinis reguliatorius PER, kuris maitina tris transformatorių pamagnetinsimo apvijos W_{pm} , sujungtos tarp savęs nuosekliai.

Padidėjus generatoriaus apkrovai, jo gnybtų A, B, C įtampa mažėja. Bet apvijoje W_2 indukuojama didesnė elektrovara ir trifazis lygintuvas LT padidina SG žadinimą.

Yra paplitę trijų tipų nekontaktiniai generatoriai:

- Sinchroniniai generatoriai su besisukančiais lygintuvais;
- Generatoriai su vidiniu uždaru magnetolaidžiu, kurie kartais vadinami selsinai;
- Magnetoelektriniai generatoriai, kuriuose žadinimo sistemą sudaro stiprus nuolatiniai magnetai.

Pirmosios grupės generatorius yra kombinuota elektros mašina, susidedanti iš trijų kaskadiniu būdu sujungtų kintamosios srovės generatorių. Tokio bekontakčio generatoriaus principinė elektrinė schema parodyta 34 pav.



34 pav. Bekontakčio sinchroninio generatoriaus su besisukančiais lygintuvais principinė elektrinė schema: PG – pagrindinis generatorius; GŽA – pagrindinio generatoriaus žadinimo apvija;

Ž – žadintuvas; ŽŽA – žadintuvo žadinimo apvija; PŽ – pagalbinis žadintuvas

Šioje schemoje punktyriniai apskritimai žymi ryškiapolį besisukančių rotorių, turinti koncentruotą (nepaskirstytą) žadinimo apviją ir ryškiapolį rotorių su nuolatiniais žadinimo magnetais.

Generatoriaus statoriuje įrengtas PG trifazė žvaigžde sujungta apvija, žadintuvo žadinimo apvija ŽŽA ir pagalbinio žadintuvo statoriaus taip pat trifazė apvija. Visos šios trys apvijos darbo metu nesisuka (stovi).

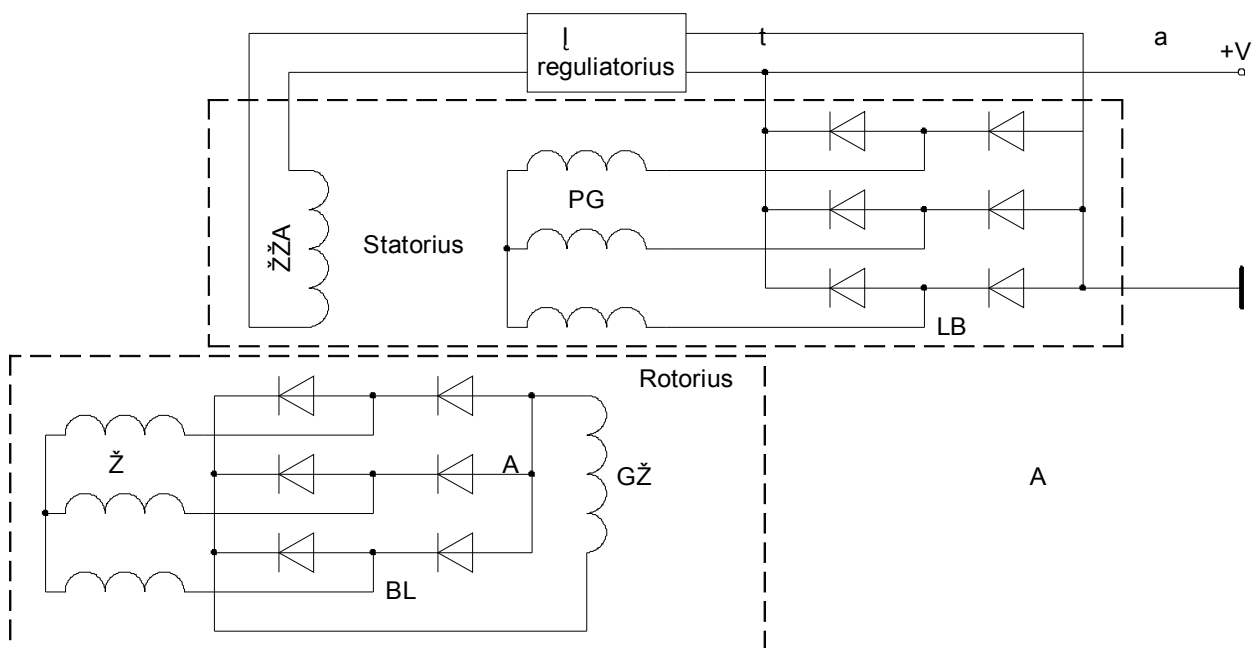
Generatoriaus rotorijoje taip pat įtengtos trys apvijos, kurios darbo metu sukasi. Tai žadintuvo darbinė šiašiafazė apvija, sujungta su silicio diodų bloku, PG žadinimo apvija ir pagalbinio žadintuvo ryškiapulis rotorius su nuolatiniais magnetais.

PG įtampa reguliuojama specialiu reguliatoriu keičiant žadinimo srovę apvijoje ŽŽA. Dėl to keičiasi žadintuvo darbinėje apvijoje indukuota elektrovara ir išlygintos GŽA apvijos srovė. ŽŽA per specialią schemą maitinama reguliuojamo dydžio nuolatine srove iš pagalbinio žadintuvo trifazės apvijos. Tokio generatoriaus žadinimas yra automatiškas ir GŽA maitinti nereikalinga 27V nuolatinės srovės tinklas. Tai leido sumažinti visos maitinimo sistemos svorį, eksploataavimo išlaidas, padidinti patikimumą.

Žadintuvo šešiafazė darbinė apvija leidžia sumažinti išlygintos įtampos pulsacijas. Tokio generatoriaus galia gali būti iki 150 kVA.

Bekontakčio generatoriaus schemoje vietoje diodų gali būti panaudoti tiristoriai. Tada, keičiant jų valdymo kampą, galima reguliuoti PG žadinimo srovę, o tuo pačiu ir jo įtampą.

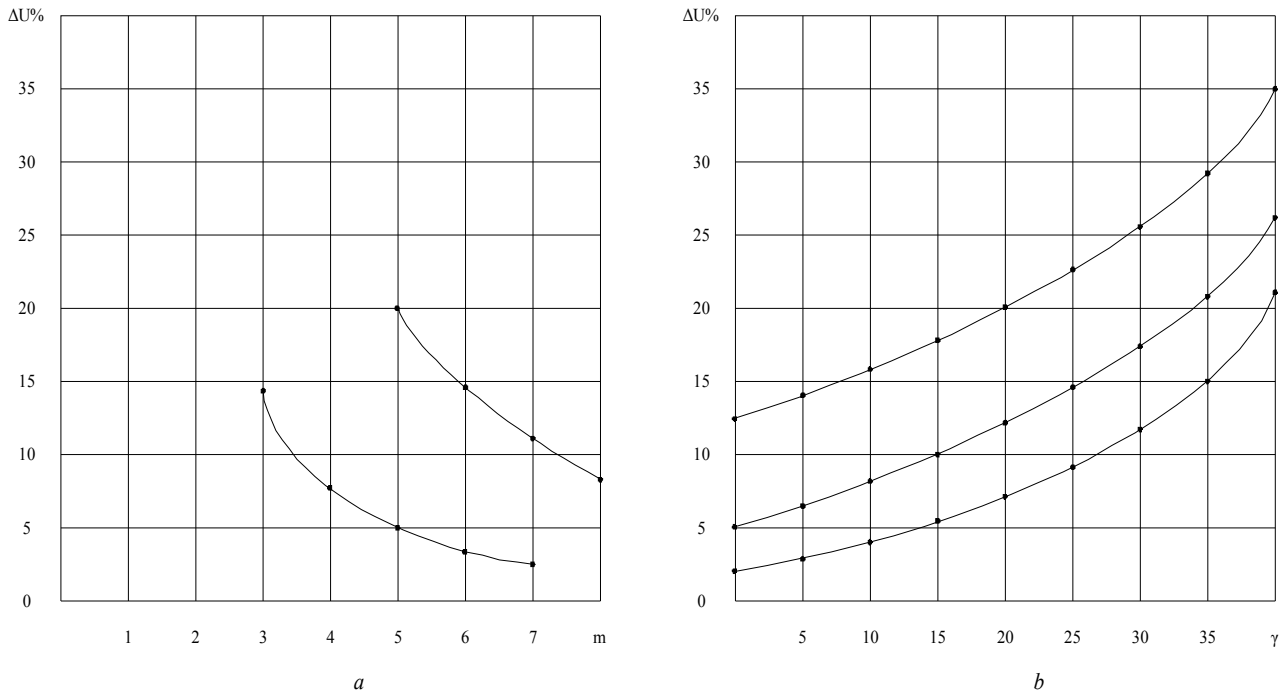
Papildomai panaudojus SG įtampos lygintuvą, bekontakčiai ventiliniai generatoriai taikomi ir nuolatinės srovės 27V, ar aukštesnės įtampos maitinimo sistemoje. Tokio generatoriaus schema su įtampos reguliatoriumi parodyta 35 pav.



35 pav. Bekontakčio ventilinio generatoriaus su įtampos reguliatoriumi principinė schema

Šioje schemoje elementų ir apvijų žymenys tokie pat kaip ir 34 pav. schemoje., tik čia nėra papildomo žadinimo. Rotorijoje įmontuotos generatoriaus žadinimo apvija GŽA, žadinimo trifazė darbinė apvija ŽA ir besisukančio lygintuvo blokas BL. Įtampos reguliatorius reaguoja į išėjimo išlygintos įtampos nuokrypius (+27V) ir automatiškai keičia žadintuvo generatoriaus PG statoriaus

apvijos ŽŽA srovę. Pagrindinio generatoriaus PG statoriaus trifazėje apvijoje indukuojama kintamoji elektrovara, kuri po to lygintuvų bloku LB išlyginama.

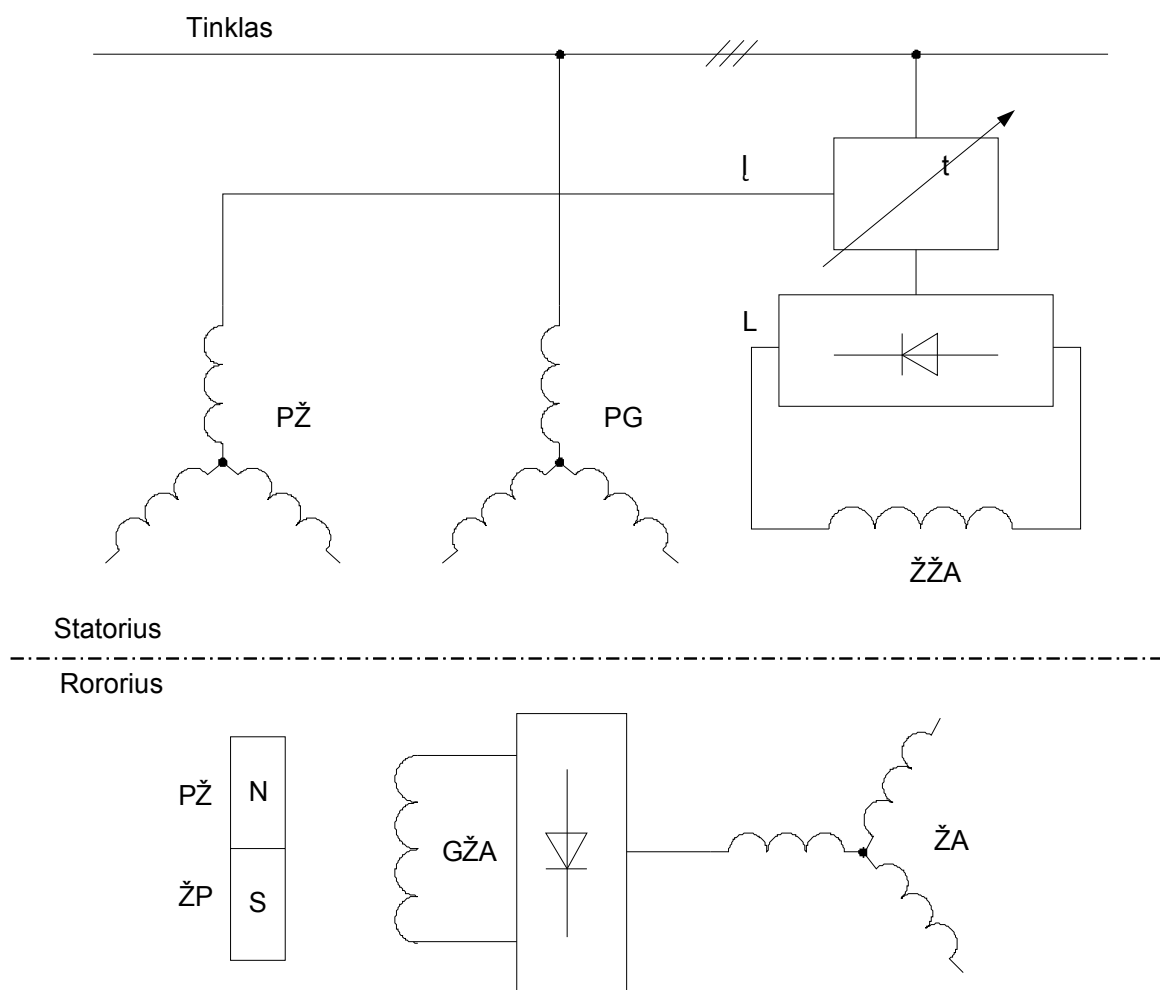


36 pav. Įtampos pulsacijos priklausomybės nuo generatoriaus fazių skaičiaus m (a) ir nuo ventilių komutacijos kampo γ (b)

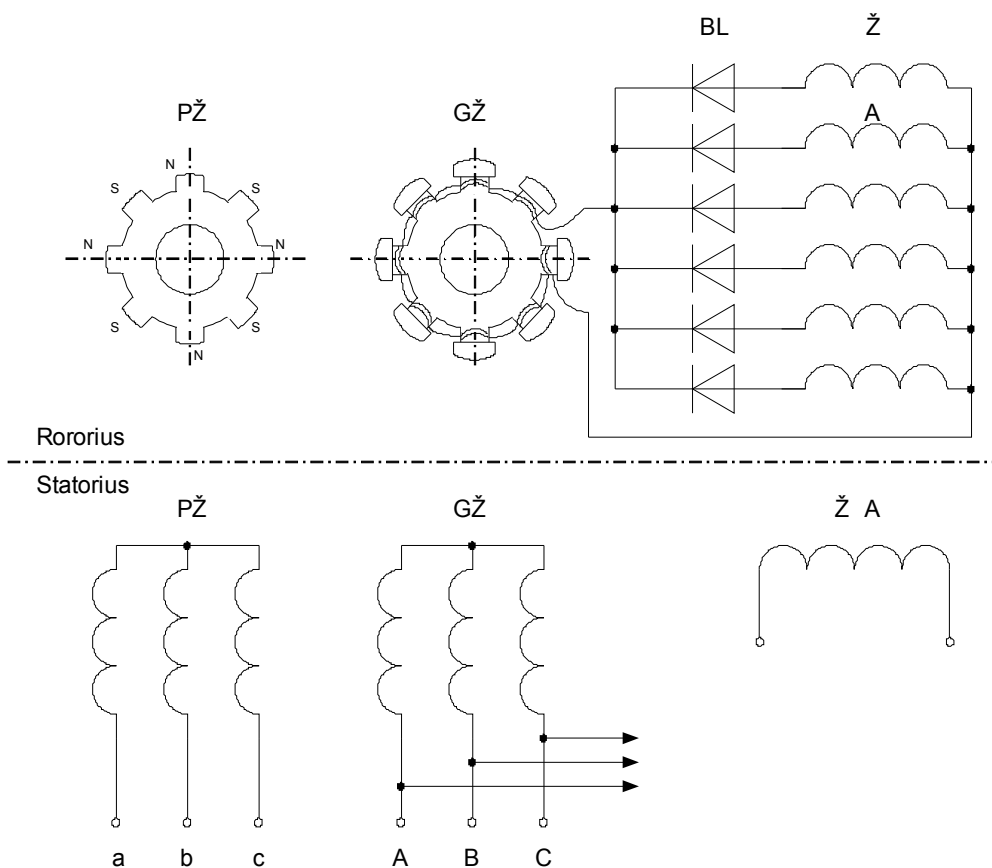
Tokių generatorių išėjimo įtampos pulsacijų dydis yra ribojamas iki leistinų ir neturi viršyti 8% nuo pagrindinės harmonikos defektinės vertės. Pulsacijų mažinimui naudojami generatoriai su nelyginiu fazių skaičiumi.

36 pav. parodytos pulsacijų santikinių amplitudžių priklausomybės nuo fazių skaičiaus m (a) ir nuo ventilių komutacijos kampo γ (b). pulsacijų mažinimui taip pat naudojami filtrai.

Kai kuriuose šaltiniuose pateiktos tokios supaprastintos nekontaktinių ventilių generatorių schemas (37 pav., 38 pav.).



37 pav. Supaprastinta bekontakčio ventilinio generatoriaus schema



38 pav. Supaprastinta bekontakčio ventilinio generatoriaus schema

Visos išnagrinėtos generatorių schemas gali būti naudojamos visų tipų kintamosios srovės tiek kintamojo dažnio, tiek pastovaus dažnio maitinimo sistemose.

3. SINCHRONINIO GENERATORIAUS AUTOMATINIS ŽADINIMO REGULIAVIMAS

3.1 Sinchroninio generatoriaus kaip reguliavimo objekto pagrindinės lygtys

Išvedant sinchroninio generatoriaus, kaip automatinio reguliavimo objekto diferencialines lygtis, įvertinamos šios bendrosios prielaidos: generatoriaus magnetinė grandinė neįsotinta; magnetinis laukas oro tarpelyje kinta sinuso dėsnio; statoriaus apvijos sudaro trifazę simetrinę sistemą; rotoriuje nėra slopinančiųjų kontūrų; histerezės reiškinys paneigiamas. Tada sinchroninio generatoriaus žadinimo srovės reguliavimo linearizuota diferencialinių lygčių sistema mažų pokyčių aplinkoje užrašoma taip [29]:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_m \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \Delta P = 0 \\ T_{d0} \frac{d^2 \Delta E_{q1}}{dt} + \Delta E_q = \Delta E_{q2} \\ \Delta E_{q2} = \frac{k_U}{\left(T_z \frac{d^2 \Delta U_G}{dt} + 1 \right)} \Delta U_G ; \\ \Delta U_r = k_r \Delta \delta + k_d \Delta \omega + \frac{k_I}{\Delta \omega} \\ \Delta \omega = \frac{d \Delta \delta}{dt} \end{array} \right. \quad (29)$$

čia: T_m – rotoriaus elektromechaninė laiko pastovioji;

T_{d0} – generatoriaus žadinimo apvijų elektromagnetinė laiko pastovioji;

T_z – žadintuvo laiko pastovioji;

$\Delta \delta$ – rotoriaus ašies posūkio kampo pokytis;

ΔE_q – statoriaus elektrovaros pokytis;

ΔE_{q1} – elektrovaros laisvosios dedamosios, sąlygojamos žadinimo srovės pereinamųjų procesų pokytis;

ΔE_{q2} – elektrovaros priverstinės dedamosios pokytis;

k_U – reguliavimo koeficientas pagal įtampos nuokrypį;

k_r , k_d , ir k_I – proporcinio, diferencialinio ir integralinio reguliatoriaus stiprinimo koeficientai;

$\Delta \omega$ – rotoriaus kampinio greičio pokytis.

Pirmoji pateiktos sistemos lygtis išreiškia turbinos, generatoriaus ir dinaminės galios balansą, kai dėl išorinių trikdžių atsiranda rotoriaus kampo pokytis $\Delta \delta$ ir greičio švytavimai $\Delta \omega$. Antroji lygtis charakterizuoja statoriaus apvijose indukuotų elektrovarų balansą, kai reguliuojama žadinimo srovė. Trečioji lygtis susieja generatoriaus įtampos pokytį su priverstinės elektrovaros, sąlygojamos AŽR, pokyčiu ΔE_{q2} . Žadinimo srovės, o tuo pačiu ir reguliatoriaus įtampos keitimo dėsnį, kurį bendru atveju gali formuoti kintamų parametrų ir kintamos struktūros reguliatorius, išreiškia ketvirtoji lygtis.

Generatoriaus įtampos pokytis išreiškiamas tokia lygtimi:

$$\Delta U_G = \frac{\sigma U_G}{\sigma E_q} \Delta E_q + \frac{\sigma U_G}{\sigma \delta} \Delta \delta . \quad (30)$$

Dalinės išvestinės (30) lygtyje priklauso nuo generatoriaus darbo režimo ir tai apibūdina netiesines nagrinėjamos sistemos savybes.

Vienas iš svarbiausių parametru, charakterizuojančių generatoriaus apkrovos dydį ir pobūdį, yra apkrovos kampas δ . Sinchroninės mašinos vektorių diagramoje tas kampas susidaro tarp generatoriaus elektrovaros ir jo gnybtų arba energetikos sistemos įtampos vektorių. Fizikine prasme šis kampas reiškia rotoriaus išilginės ašies posūkį atžvilgiu generatoriaus sinchroninės ašies. Labai padidinus generatoriaus apkrovą ir padidėjus šiam kampui, generatorius iš sinchroninio darbo režimo gali pereiti į asinchroninę veiklą. Tada sistemoje generuojami periodiniai trikdžiai ir sutrinka normalus sistemos darbas. Todėl, norint užtikrinti generatoriaus ir sistemos stabilų darbą, šio kampo švytavimai turi būti kuo mažesni arba jų iš viso neturi būti.

Sprendžiant lygčių sistemą (29), visų kintamųjų pokyčius tikslinga išreikšti per kampo δ ir elektrovaros E_q pokyčius. Generatoriaus ir turbinos galios yra netiesinės dviejų kintamųjų (δ , E_q) funkcijos, todėl jų skirtumą galima išreikšti dalinėmis išvestinėmis:

$$\Delta P = \frac{\sigma P}{\sigma \delta} \Delta \delta + \frac{\sigma P}{\sigma E_q} \Delta E_q. \quad (31)$$

Generatoriaus elektromagnetinės galios santykis $\frac{\sigma P_{el}}{\sigma \delta}$ turi sinchronizuojančios galios prasmę. Atitinkamai elektrovaros laisvosios dedamosios pokytis bus:

$$\Delta E_{q1} = \frac{\sigma E_{q1}}{\sigma \delta} \Delta \delta + \frac{\sigma E_{q1}}{\sigma E_q} \Delta E_q. \quad (32)$$

Įvertinus žadinimo apvijoje vykstančius pereinamuosius procesus, ΔE_q galima išreikšti taip:

$$\Delta E_q = \frac{\Delta E_{q2} - p \Delta \delta T_{d1} \frac{x_{d1}}{x_{d2}} \frac{\sigma \Delta E_{q1}}{\sigma \delta}}{1 + p T_{d1}}; \quad (33)$$

čia $T_{d1} = T_{d0} \frac{\sigma E_{q1}}{\sigma E_q}$; x_{d1} ir x_{d2} – kontūrų induktyvinės varžos.

Gautas pokyčių išraiškas įstačius į (29) sistemos lygtis ir užrašius operatorine forma, turėsime:

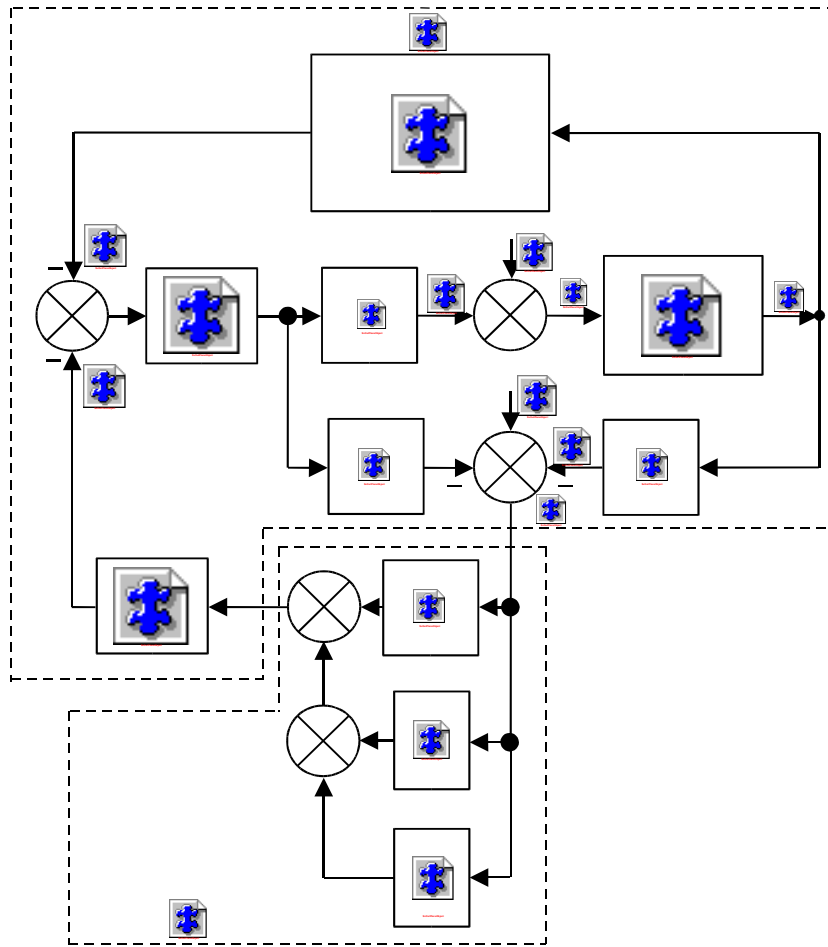
$$\left(T_m p^2 + \frac{\sigma P}{\sigma \delta} \right) \Delta \delta + \frac{\sigma P}{\sigma E_q} \Delta E_q = 0; \quad (34)$$

$$\left[p T_{d1} \frac{x_{d1}}{x_{d2}} \frac{\sigma E_{q1}}{\sigma \delta} - \frac{\sigma U_G}{\sigma \delta} \frac{k_U k_d k_I}{(p T_z + 1)} \right] \Delta \delta + \left[1 + p T_{d1} - \frac{\sigma U_G}{\sigma E_q} \frac{k_U k_d k_I}{(p T_z + 1)} \right] \Delta E_q = 0. \quad (35)$$

Galių balanso lygtyje (34) suminės galios pokytis susideda iš turbinos galios ΔP_t bei generatoriaus elektromagnetinės galios ΔP_{el} pokyčių. Tada, (34) lygtį išsprendę $\Delta \delta$ atžvilgiu, turėsime:

$$\Delta \delta = \frac{\Delta P_t - \sigma P_{el} / \sigma E_q}{T_m p^2 + \sigma \delta P_{el} / \sigma \delta} \Delta E_q. \quad (36)$$

3.2 Generatoriaus automatinis žadinimo reguliavimo sistemos struktūrinė schema ir perdavimo funkcija



39 pav. Sinchroninio generatoriaus AŽR sistemos struktūrinė schema

AŽR (automatinis žadinimo reguliavimas) sistemos struktūrinė schema sudaryta pagal (32) – (36) lygtis parodyta 39 pav.

Generatoriaus vidinėje struktūroje egzistuoja du grįžtamieji ryšiai:

- lankstus neigiamasis ryšys su perdavimo funkcija $pT_{d1} \frac{x_{d1}}{x_{d2}} \left(-\frac{\sigma E_{q1}}{\sigma \delta} \right)$, kuri sąlygoja elektrovaros ΔE_{q1} prieaugį, kai kampas $\Delta \delta$ didėja;
- vidinis ryšys su perdavimo funkcijomis $\frac{\sigma U_G}{\sigma E_q}$ bei $\frac{\sigma U_G}{\sigma \delta}$, kurios formuoja generatoriaus įtampos prieaugį priklausomai nuo jo darbo režimo.

Iš pateiktos 39 pav. struktūros matyti, kad sinchroninis generatorius, dirbantis energetikos be išorinių grįžtamųjų ryšių, pasižymi švytavimų ir nestabilaus darbo galimybėmis.

Žadinimo srovės regulatoriaus sintezei (33), (34) ir (35) lygtyse esančios dalinės išvestinės laikomos pastoviais dydžiais ir 39 pav. Parodytoje struktūrinėje schemoje pakeistos tokiais koeficientais:

$$c_1 = \frac{\sigma P}{\sigma \delta}; \quad (37)$$

$$c_2 = \frac{\sigma E_{q1}}{\sigma \delta}; \quad (38)$$

$$c_3 = \frac{\sigma U_G}{\sigma \delta}; \quad (39)$$

$$b_1 = \frac{\sigma P_{el}}{\sigma E_q}; \quad (40)$$

$$b_2 = \frac{\sigma U_G}{\sigma E_q}; \quad (41)$$

Sinchroninio generatoriaus dinaminė galios charakteristika išreiškiama taip:

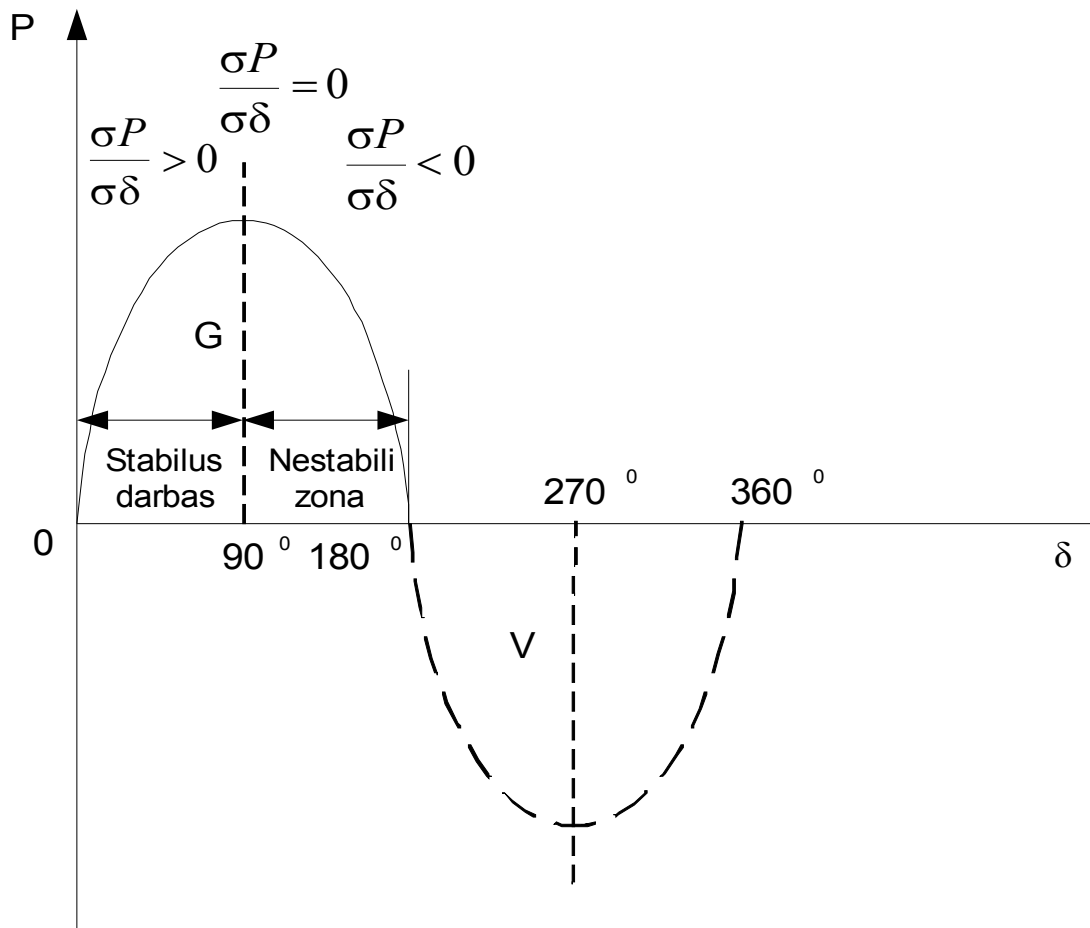
$$P_{Eq} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2 (x_d - x'_d)}{2 x_{d\Sigma} x'_{d\Sigma}} \sin 2\delta; \quad (42)$$

čia $x_{d\Sigma}$ - suminė induktyvioji varža;

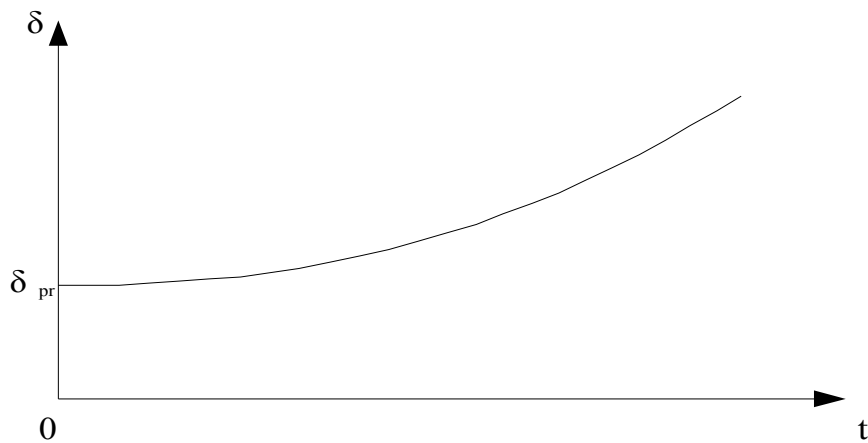
x'_d – sinchroninė išilginė varža, sąlygojama žadinimo srovės laisvosios dedamosios.

Generatoriaus kampinė charakteristika ir stabilaus darbo zona parodytos 40 pav.

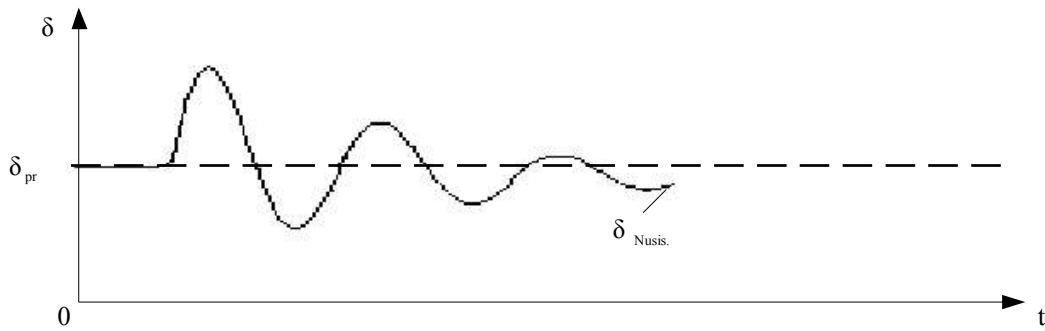
Apkrovos kampo δ galimi kitimo laike atvejai parodyti 41, 42, 43 pav.



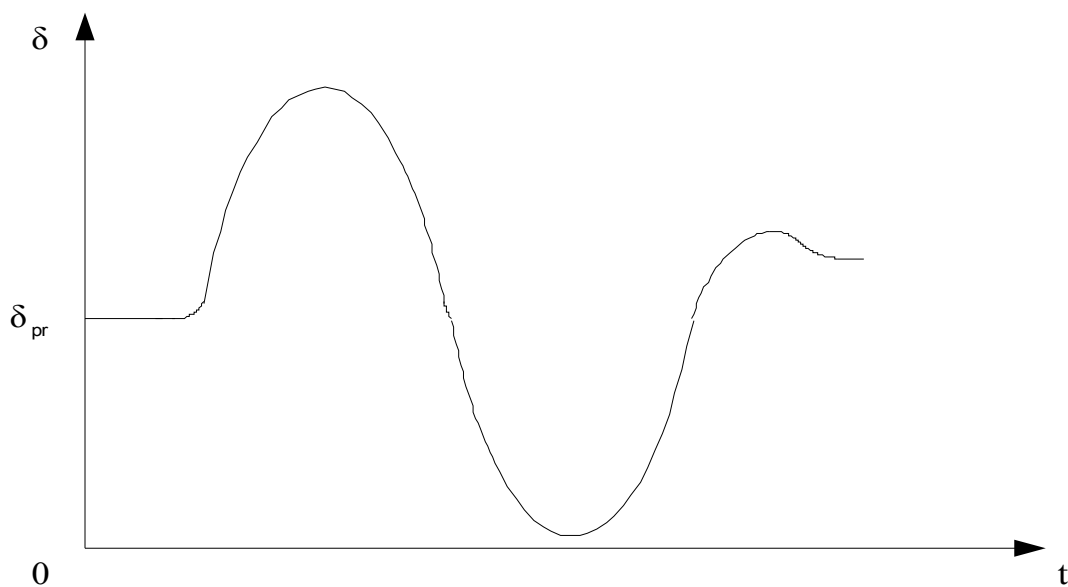
40 pav. Sinchroninio generatoriaus kampinė charakteristika



41 pav. Sinchroninio generatoriaus apkrovos kampo kitimo laike grafikas. Sinchronizmo praradimas gilios avarijos metu



42 pav. Sinchroninio generatoriaus apkrovos kampo kitimo laike grafikas. Kampo švytavimai, kai nusistovi nauja kampo reikšmė



43 pav. Sinchroninio generatoriaus apkrovos kampo kitimo laike grafikas. Kampo švytavimas, ties stabilumo riba

3.3 Žadinimo srovės ir įtampos regulatoriaus sintezė ir rezultatų analizė

Sistemos, kurioje dirba galingas sinchroninis generatorius su $A\check{Z}R$, asimptotiniam stabilumui užtikrinti turi būti tenkinama sąlyga:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta U_G| = 0. \quad (43)$$

Šiuo atveju sintezės uždavinys formuluojamas taip: atsižvelgiant į sistemos darbo stabilumo reikalavimus ir į reguliuojamojo objekto pereinamųjų procesų kokybės reikalavimus nustatoma žadinimo sistemos struktūra, jos rūšis, reguliavimo dėsnis ir parenkami regulatoriaus parametrai. Užtikrinant reikiamą generatoriaus įtampos palaikymo tikslumą ir aperiodinio stabilumo sąlygas pagal statinę kampinę generatoriaus charakteristiką, parenkami valdymo pagal nuokrypį koeficientai.

Sprendžiant sintezės uždavinius, ypatingas dėmesys kreipiamas į generatoriaus ir energetikos sistemos nuosavųjų švytavimų slopinimą.

Kaip jau buvo minėta žadinimo srovei reguliuoti gali būti panaudota adaptyvioji stabilizavimo sistema su kintamos struktūros regulatoriumi. Šiuo atveju formuluojant kintamos struktūros valdymo sistemos sintezės uždavinį, reikia rasti parametrų β_i , nuo kurių priklauso regulatoriaus struktūra, kitimo dėsnius [44, 45]. Tam tikslui panaudojant vektoriaus β komponentų β_i , $i=1, \dots, m$ diskretines vertes valdymo intervale $t_0 \leq t \leq t_f$, kai $t_0=0$, įvedamas k – matis vektorius:

$$x = \{x_1 = \beta_1[0], x_2 = \beta_1[1T], \dots, x_{k-1} = \beta_m[(r-2)T], x_k = \beta_m[(r-1)T]\}; \quad (44)$$

čia $T=t_f/r$ – kvantavimo periodas; $k = mr$.

Kadangi vektorius x sudaro parametrų β_i kitimo dėsnį $\beta(x, t)$ intervale $t_0 \leq t \leq t_f$, kintamos struktūros sistemos uždavinį galima suformuluoti paieškinės optimizacijos būdu. Reikia surasti tokį vektorių x^* , kuris užtikrintų funkcionalo

$$J(x) = J[y, \beta(x, t)]; \quad t_0 \leq t \leq t_f; \quad (45)$$

minimumą, laikantis apribojimų:

$$h_i[y, \beta(x, t)] = 0; \quad i = 1, \dots, p < k; \quad (46)$$

$$g_j[y, \beta(x, t)] \leq 0; \quad j = 1, \dots, p; \quad (47)$$

$$x \in \Omega_x; \quad (48)$$

čia J , h , g – valdymo kokybės rodikliai (reguliavimo laikas t_r , maksimalus dinaminis nuokrypis σ , valdymo paklaida Δy ir kt.).

Paieškinės optimizacijos uždavinys (44)-(48), taikant baudos funkcijų metodą, gali būti užrašytas paprastesne forma:

$$I_1[x] = I(x) + \sum_{i=1}^p \Psi_i h_i^2[y, \beta(x, t)] - \sum_{j=1}^q \varphi_j g_j[y, \beta(x, t)] \{1 - \text{sign } g_j[y, \beta(x, t)]\}; \quad (49)$$

$$x \in \Omega_x; \quad y \in \Omega_y; \quad (50)$$

čia Ψ_i – svorio koeficientai.

Kai valdymo objektą veikia įvairūs kontroliuojami, bet nevaldomi trikdžiai arba tiesiog kinta generatoriaus parametrai (pavyzdžiui, $\partial P / \partial \delta$, $\partial U_G / \partial \delta$ ir t.t.), nuo kurių priklauso išėjimo signalas, regulatoriaus sintezės efektyvumą galima padidinti taikant aktyvios-pasyvios (kombinuotos) simpleksinės paieškos algoritmą [45, 46]. Šiuo atveju paieškinės optimizacijos metu atliekama lokalinė tikslo funkcijos aproksimacija separabeline lygtimi:

$$\hat{J}(x, z) = \sum_{i=1}^k a_m f_i(x) + \sum_{i=1}^e b_m \varphi_i(z); \quad (51)$$

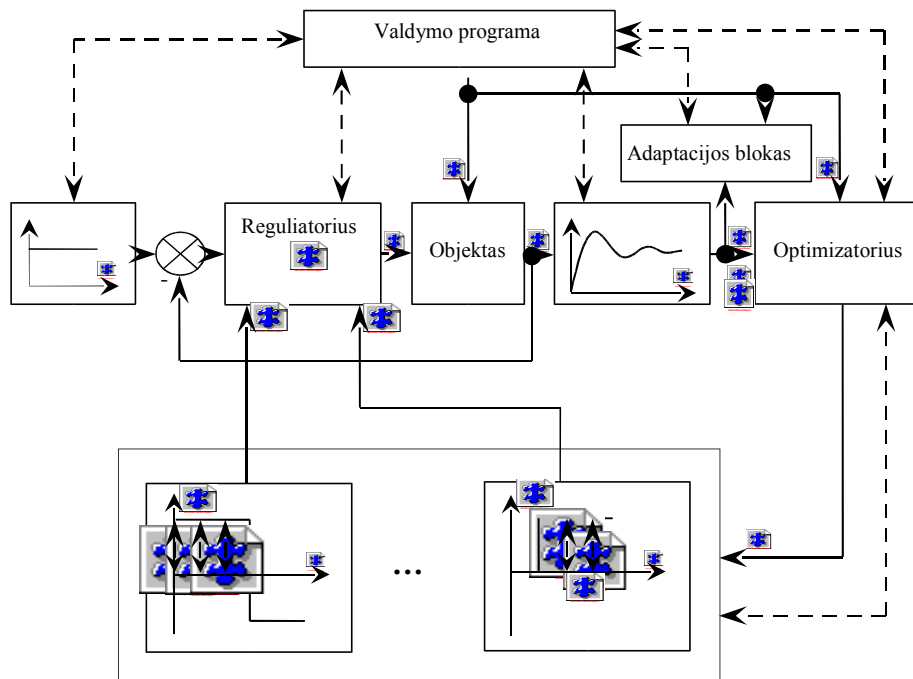
čia a_m, b_m – nuo paieškos žingsnio n priklausantys koeficientai; $f_i(x), \varphi(z)$ – duotos funkcijos.

Atliekant paieškos žingsnį, naudojamos sukoreguotos tikslo funkcijos reikšmės paskutinio simplekso viršūnėse:

$$E_j = J_j - \sum_{i=1}^e b_m \varphi(z_j), \quad j = 1, \dots, k+1. \quad (52)$$

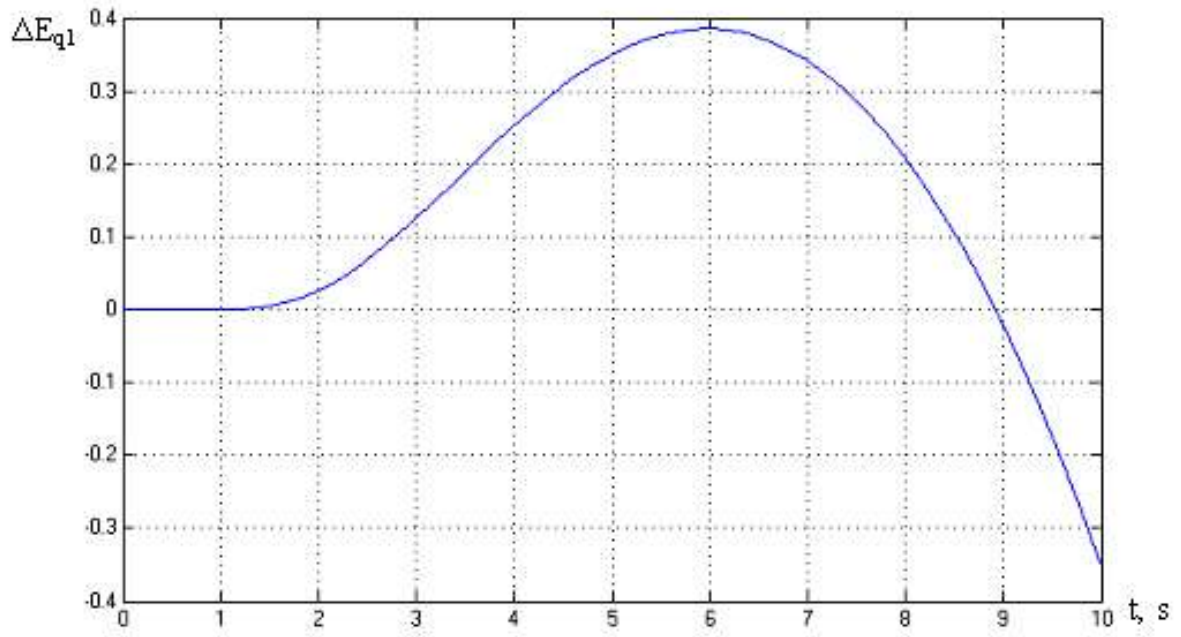
Taigi, naudojantis informacija apie kontroliuojamų trikdžių ir parametrų pokyčius, galima pašalinti paieškos krypties paklaidą, kuri yra z_j kitimo rezultatas. Kombinuotos simpleksinės paieškos adaptyvaus algoritmo realizacija, t. y. parametrų z_j prognozė, parametrų a_m, b_m skaičiavimas ir t. t. atliekama naudojant einamąją informaciją apie sistemos parametrus ir būseną [45].

Visi sistemų sintezės uždaviniai, sudaryti (44) - (52) lygčių forma, naudojant informaciją apie kontroliuojamus parametrus z_j , sprendžiami programiniu paketu *Kvazio 1* [50]. Į šio paketo sudėtį įeina simpleksinės paieškos algoritmo programos (optimizatorius), sistemos parametrų, valdymo poveikių formavimo, objekto modeliavimo, valdymo kokybės rodiklių ir adaptavimo programos. 44 pav. parodyta adaptyviosios žadinimo reguliavimo sistemos sintezės schema, realizuojanti paketo *Kvazio 1* programines galimybes.

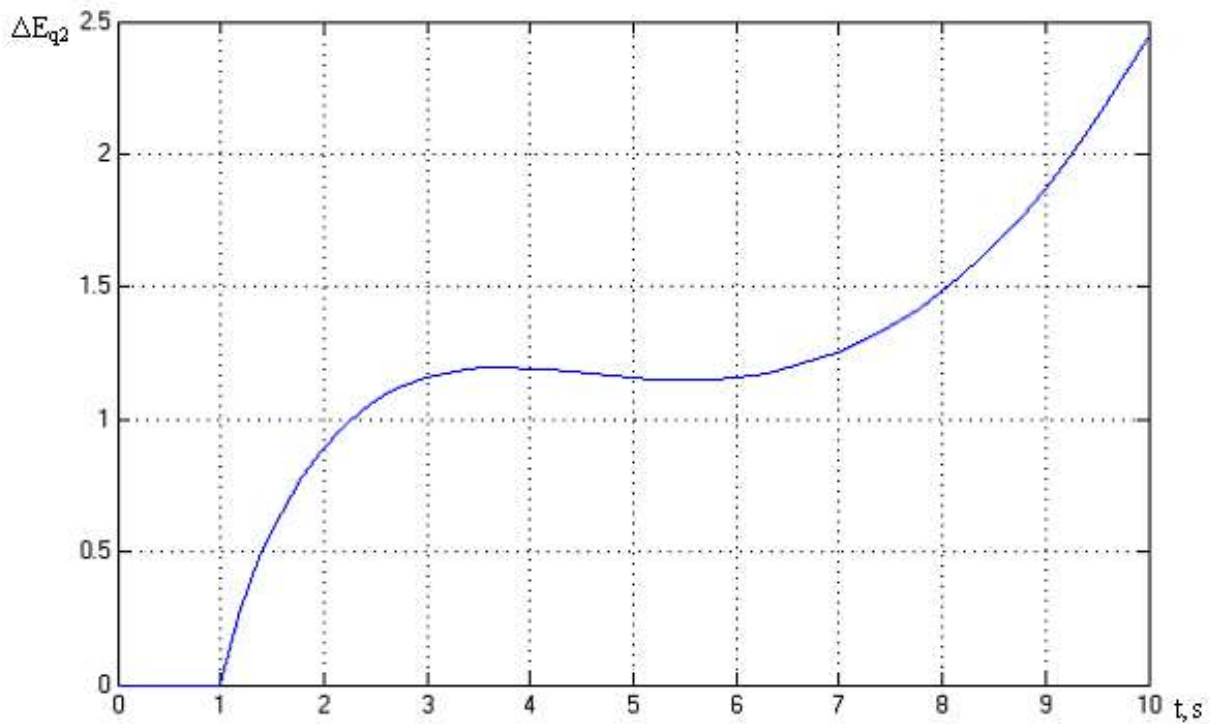


44 pav. Sinchroninio generatoriaus adaptyviosios žadinimo reguliavimo sistemos sintezės schema

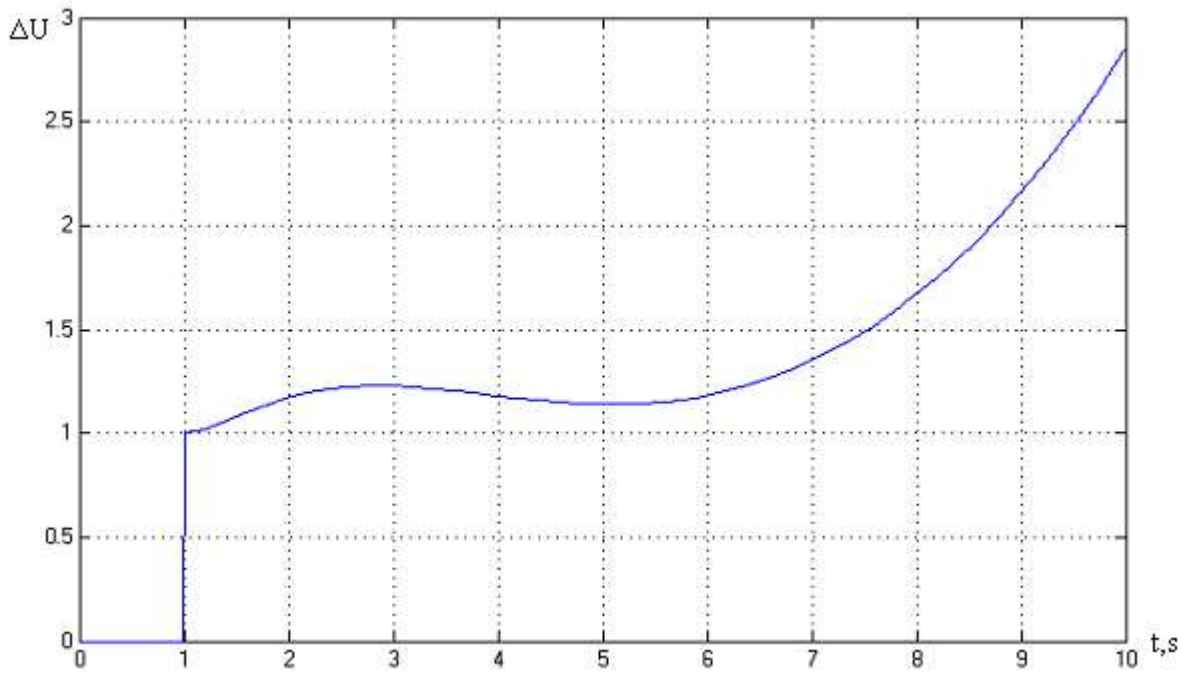
Pasinaudojant programiniu paketu „Matlab 6.5“ apskaičiuoti ir pateikti sinchroninio generatoriaus charakteristikų pereinamieji procesai neįvedus kintamos struktūros regulatoriaus.



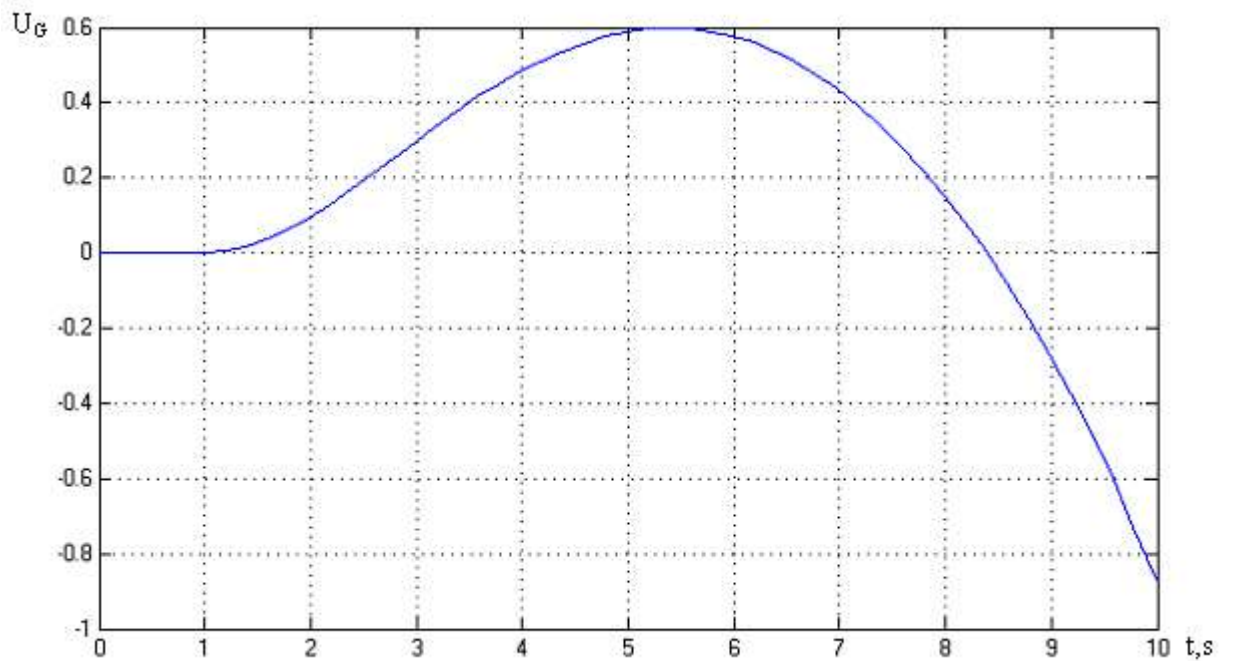
45 pav. Sinchroninio generatoriaus ΔE_{q1} elektrovaros laisvosios dedamosios, sąlygojamos žadinimo srovės pereinamųjų procesų, pokytis



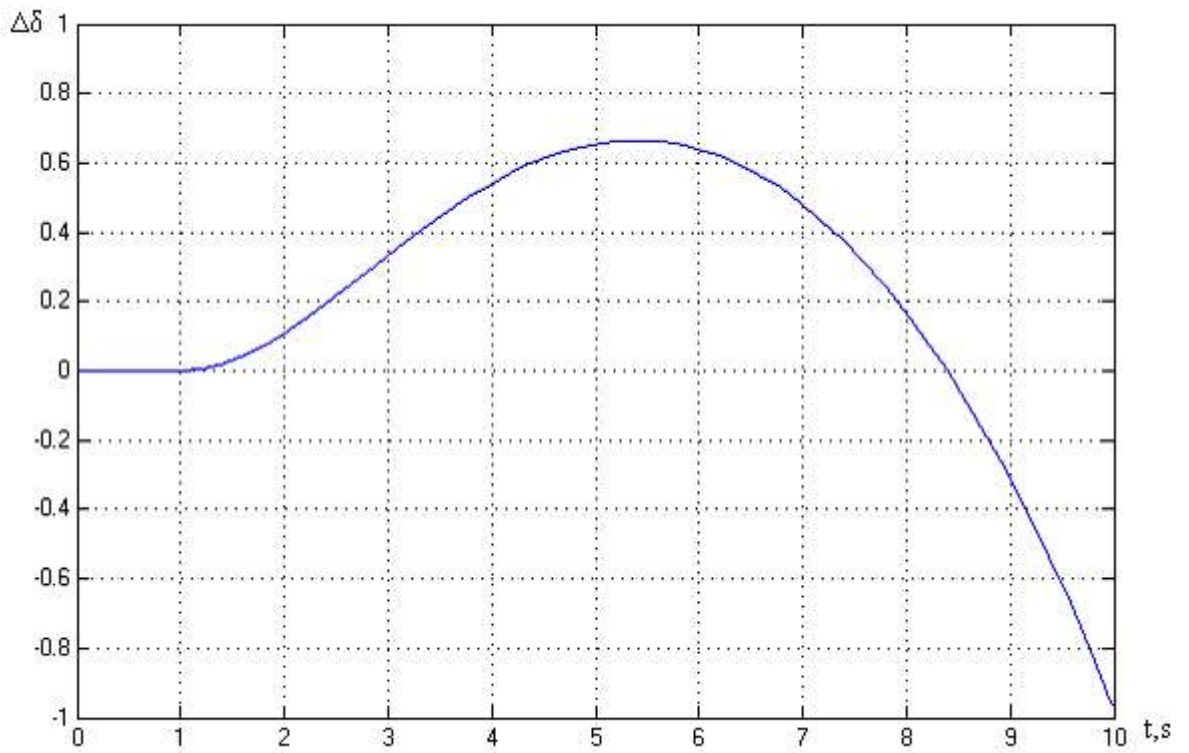
46 pav. Sinchroninio generatoriaus ΔE_{q2} elektrovaros priverstinės dedamosios pokytis



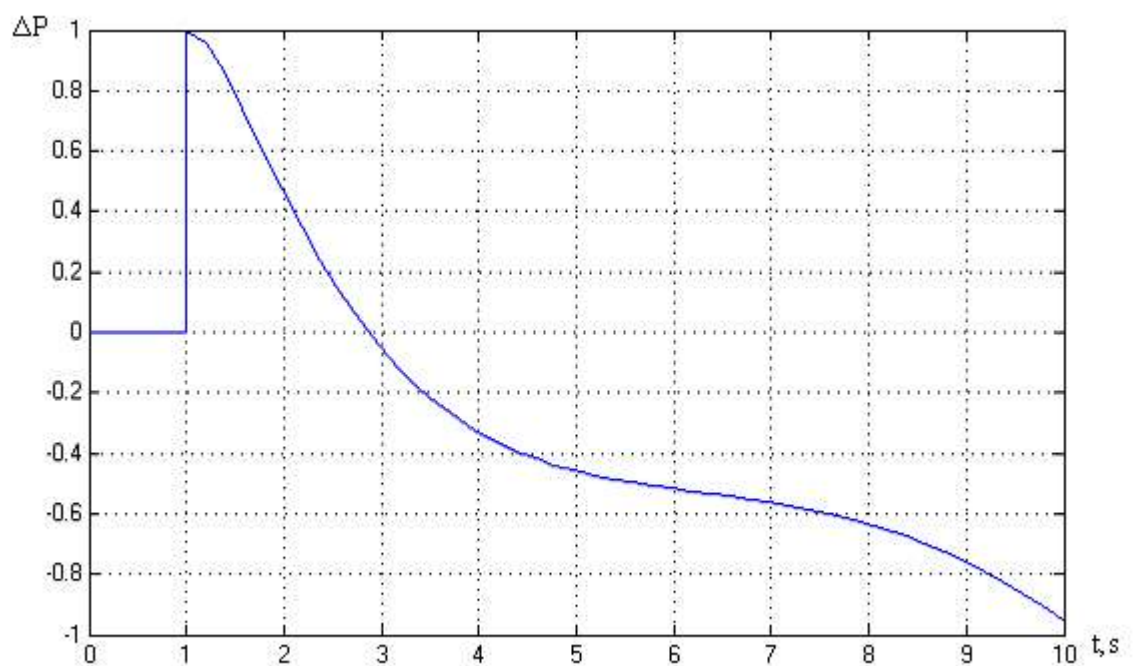
47 pav. Sinchroninio generatoriaus įtamos pokytis veikiant trikdžiui



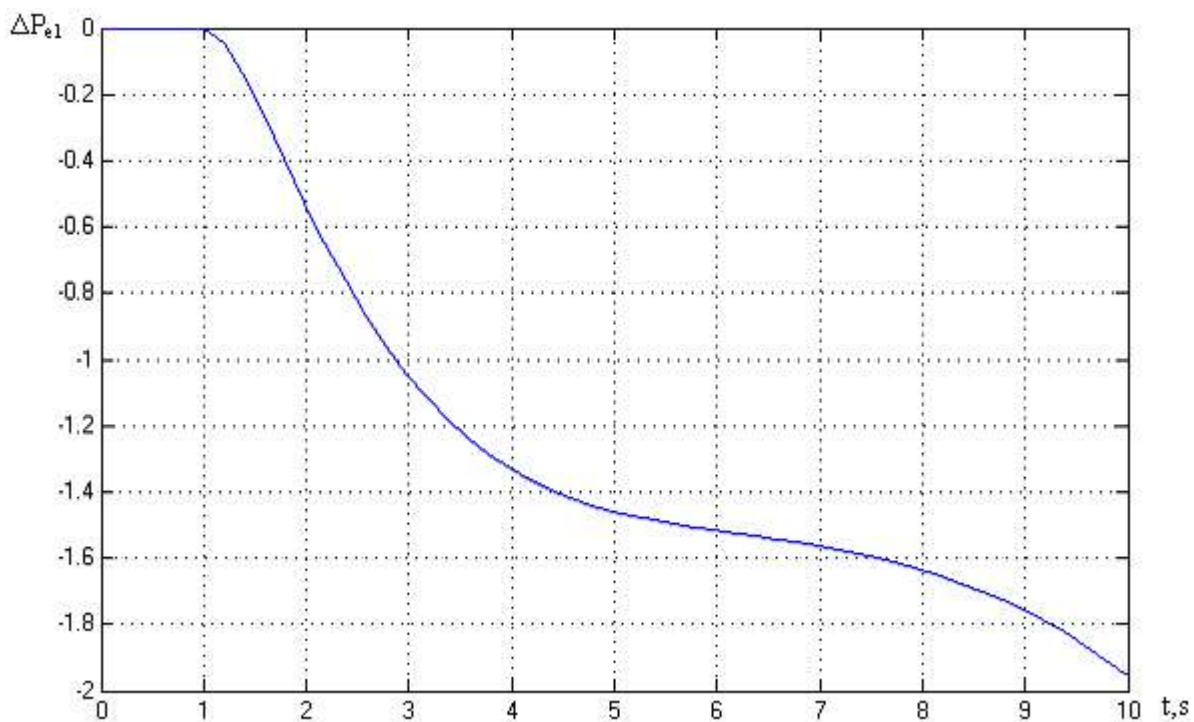
48 pav. Sinchroninio generatoriaus įtamos pereinamasis procesas, kai neįvestas kintamos struktūros reguliatorius



48 pav. Sinchroninio generatoriaus apkrovos kampo pokytis, veikiant trikdžiui

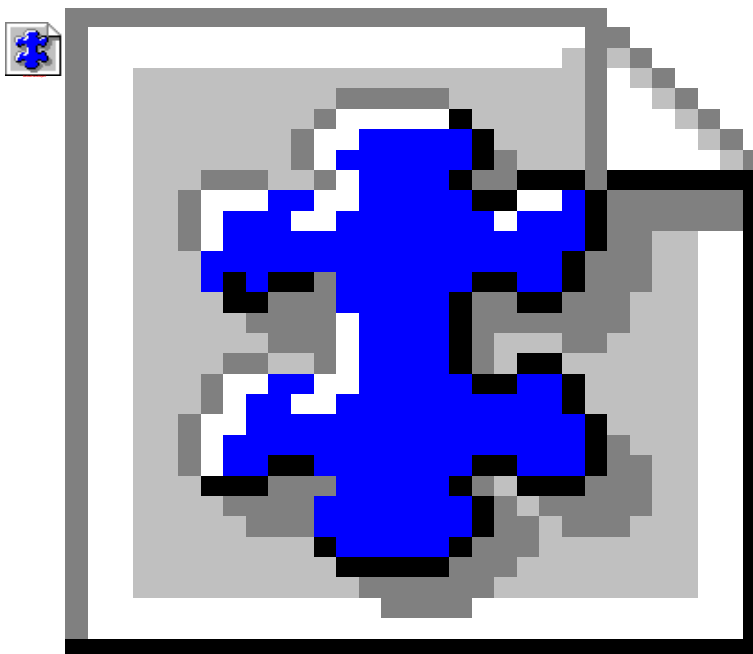


49 pav. Sinchroninio generatoriaus aktyviosios galios pokytis, veikiant trikdžiui



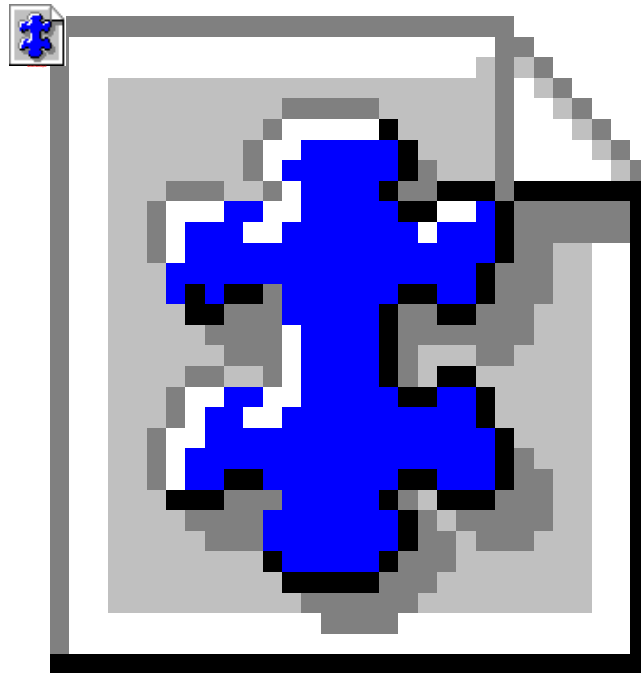
50 pav. Sinchroninio generatoriaus elektromagnetinės galios pokytis

Pagal gautas lygtis ir 39 pav. struktūrinę schemą, naudojant programų paketą *Kvazio 1*, kompiuteriu buvo apskaičiuotas sistemos pereinamasis procesas (51 pav.) stabilizuojant apkrovos kampą δ .

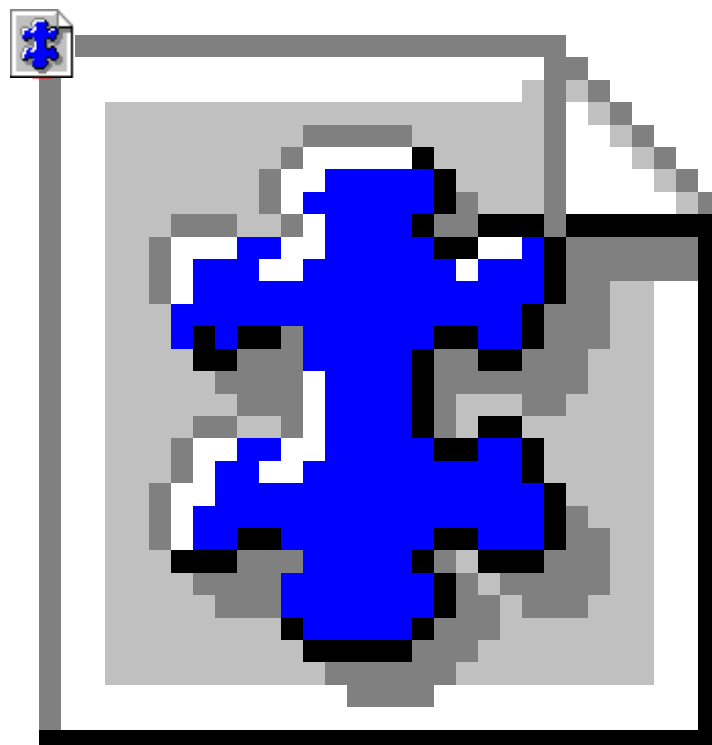


51 pav. Sinchroninio generatoriaus AŽR sistemos pereinamasis procesas

Pagal pateiktą metodiką programiniu paketu *Kvazio 1* buvo formuojami stiprinimo grandies koeficiento $k_r(t)$ ir diferencijavimo grandies koeficiento $k_d(t)$ kitimo dėsniai. Jie pateikti atitinkamai 52 ir 53 pav., o 54 pav. parodytas generatoriaus adaptyvosios AŽR sistemos pereinamasis procesas.



52 pav. Diferencijavimo grandies stiprinimo koeficiento kitimo dėsnis



53 pav. Proporcinės grandies stiprinimo koeficiento kitimo dėsnis



54 pav. AŽR sistemos su kintamais parametrais pereinamasis procesas

Tyrimų rezultatai rodo, kad algoritminiais sistemų sintezės metodais galima rasti artimus optimaliems regulatoriaus struktūros kitimo dėsnius, netgi tais atvejais, kai matematinis modelis yra sudėtingas ar netikslus.

4. IŠVADOS

1. Analitinėje dalyje apžvelgtos sinchroninės mašinos, kompiuterinė įranga, kurią naudojame modelio analizei, galingų sinchroninių generatorių žadinimo sistemos. Pateikti sinchroninio generatoriaus darbo charakteristikų pavyzdžiai. Išanalizuotos sinchroninių generatorių įtampos ir dažnio stabilizavimo schemas.

2. Išnagrinėtos galingų sinchroninių generatorių, veikiančių bendroje energetikos sistemoje, automatinio žadinimo reguliavimo problemos. Atsižvelgiant į bendrąsias prielaidas, sudaryta žadinimo sistemos, kaip automatinio reguliavimo objekto, diferencialinių lygčių sistema, gautos perdavimo funkcijos ir struktūrinė schema.

3. Sinchroninio generatoriaus automatinio žadinimo reguliavimo modeliavimo rezultatai atlikti „Matlab 6.5“ ir „Kvazio1“ programiniais paketais.

4. Tyrimų rezultatai rodo, kad algoritminiais sistemų sintezės metodais galima rasti artimus optimaliems reguliatoriaus struktūros kitimo dėsnius, netgi tais atvejais, kai matematinis modelis yra sudėtingas ar netikslus, t.y. kai klasikinių kintamos struktūros ir optimalaus valdymo sistemų sintezės metodų taikyti neįmanoma.

5. Kai valdymo objektą veikia įvairūs kontroliuojami, bet nevaldomi trikdžiai arba tiesiog kinta objekto parametrai, reguliatoriaus sinezės efektyvumą galima padidinti taikant aktyvios-pasyvios simpleksinės paieškos algoritmą.

6. Parodyta, kad sunkių avarinių situacijų atvejais energetikos sistemoje vykstančių elektromechaninių pereinamųjų procesų matematinis aprašymas yra gana sudėtingas ir ribotas.

7. Žadinimo srovės reguliatoriaus sintezės efektyvumą galima padidinti taikant kombinuotos simpleksinės paieškos metodus. Pagal gautas išraiškas sudaryta generatoriaus adaptyviosios žadinimo reguliavimo sistemos sintezės schema su adaptavimo ir optimizavimo blokais, kurie leidžia išvengti paieškos krypties paklaidų.

5. LITERATŪRA

1. Chown G. A., Hartman R. C. Design and Experience with a Fuzzy logic Controller for Automatic Generation control // IEEE Trans. on Power Systems.–1998.–Vol. 13, Nr. 3. –p. 202-208.
2. Ho Dac Loc. Adaptive fuzzy logic control of nonlinear dynamic systems // Preprints EURASIP. – Budapest, Hungary, 2001. –p. 1-11.
3. Narendra K. S. Advances in adaptive control. – New York, IEEE press, 1991. –410 p.
4. Коломейцева М. Б., Хо Дак Лок. Синтез адаптивной системы автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора на основе фаззи-регулятора // Электричество. –2002. –№6. –с.13–15.
5. Коломейцева М. Б., Митрофанов В. Е., Пихлецкий В. В. Система регулирования частоты и напряжения мини-ГЭС с помощью ЭВМ // Электричество. –1998. –№7. –с.27–32.
6. Домбровский В. В., Коломейцева М. Б., Орахелашвили Б. М. Моделирование гидродинамических процессов малой ГЭС для задачи управления частотой гидроагрегата // Электрические станции. –2002. –№2. –с. 37-44.
7. Dorf R. C. Modern control systems.– Addison-Wesley, London, 1990.–P. 603.
8. Ogata K. Modern Control Engineering.– New Jersey: Prentice Hall, International, Inc., 1997. –P. 404–410.
9. Daunoras J., Januškevičius V. S. Vienas reguliatorių sintezės principas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2002. – Nr. 5(40). – P. 67-67.
10. Растрингин Л. А. Адаптация сложных систем. –Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
11. Dambrauskas A. Simpleksinės paieškos metodai. –Vilnius: Technika, 1995. –230 p.
12. Dambrauskas A. Automatinių valdymo sistemų optimizacijos uždaviniai // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2001. – Nr. 5(34). – P. 59-66.
13. Глебов И. А. Системы возбуждения мощных синхронных машин. – Ленинград: Наука, 1979. –314 с.
14. Федоров В. Ф., Воробей В. К. Безщеточные системы возбуждения мощных синхронных машин // Сб. научн. тр. – Ленинград: ВНИИЭЛЕКТРОМАШ, 1986. –172 с.
15. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах.– Москва: Высшая школа, 1985. –536 с.
16. Dambrauskas A., Šulskis D. Kvazioptimalių ir kintamos struktūros sistemų sintezės programinė įranga. Mokomoji knyga.- Vilnius: Technika, 2002. –64p.
17. В.И.Ключев. Теория электропривода. Москва: Энергоатомиздан, 1985. 559 с.

18. A. Smilgevičius. Elektromechaninės sistemos. D.2, Labor. darbų aprašymai ir metodika. Vilnius: Technika, 1994. 50 p.
19. A. Smilgevičius, B. Karaliūnas. Elektromechaninės sistemos. Labor. darbų aprašymai. D.1. Vilnius: Technika, 1993. 33 p.
20. V. Ažubalis. Pereinamieji procesai elektros sistemose. Kaunas: Technologija, 2003. 27 p.
21. M.G. Čilikinas. Automatizuotų elektros pavarų pagrindai. Vilnius: Mokslas, 1978. 422 p.
22. Ričardas Dalibogas. Pereinamieji procesai elektros pavarose. Kaunas: LŽŪU leidyb. centras, 1998. 38 p.
23. R. K. Masteika. Elektros pavarų mechanika. Kaunas: Technologija, 1996. 40 p.
24. R. Masteika. Elektros pavarų laboratoriniai darbai. Kaunas: Technologija, 1994. 87 p.
25. L. Radzevičius. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius, 1986. 76 p.
26. V. Geleževičius, K. Kriščiūnas, V. Kubilius. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius: Mokslas, 1990. 358 p.
27. J. Bukšnaitis. Elektromechanikos įvadas (paskaitų konspektas). Kaunas: LŽŪU Leidyb. centras, 1998. 87 p.
28. Веников, Валентин Андреевич. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Москва: Высшая школа, 1978. 415 с.