

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėja

Dr. Eleonora Guseinovicė

(Mokslinis laipsnis, vardas, pavardė)

PRAMONĖS ELEKTROS ĮRANGA IR AUTOMATIKA
STUDIJŲ PROGRAMOS NR. 621H60002
MAGISTRO TEZĖS

REAKTYVIŲJŲ SINCHRONINIŲ
ŠVYTUOJAMŲJŲ VARIKLIŲ MODELIAVIMAS
VISSIM TERPĖJE

Recenzentas:

Vadovas: dr. Algirdas Brazaitis

Rengė: Andrius Byčius

KLAIPĖDA, 2012

ANOTACIJA

Baigiamajame magistro darbe atliekamas reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio modeliavimas VISSIM terpėje.

Įvade aptarta švytuojamųjų variklių vystymo raida, šiuolaikinio matematinio modeliavimo galimybės.

Analitinėje – metodinėje dalyje pateikiama reaktyviojo švytuojamojo variklio matematinio modelio ir struktūrinės programos VISSIM terpėje sudarymo eiga. Aprašytas projektuojamo maitinimo šaltinio, formuojančio stačiakampius impulsus impulsiniu – platuminiu principu, veikimo algoritmas bei struktūrinės programos schemas sudarymas.

Metodinėje – tiriamojoje dalyje atlikti teoriniai skaičiavimai, panaudojant realaus variklio parametrus. Analizė atlikta naudojant tolydžią sinusinę įtampą stačiakampę, sudaryta impulsiniu – platuminiu principu. Pateikti energetinių parametų skaičiavimo rezultatai bei sudaryto maitinimo šaltinio modelio įtampos ir variklio srovės grafikai.

Išvadose pateikti gautų rezultatų apibendrinimai, tolimesnės galimybės maitinimo šaltinio struktūrinės programos tobulinimui bei sudarytų modelių taikymo galimybės.

Darbą sudaro 4 dalys: pasirinktos temos apžvalga ir analizė, analitinė – metodinė dalis, virtualus eksperimentas, išvados ir pasiūlymai.

Atskirai pridedami darbo priedai, kuriuose pateiktos reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio, energetinių parametų skaičiavimo, sudaryto maitinimo šaltinio struktūrinės programos schemas VISSIM aplinkoje.

Prasminiai žodžiai: reaktyvusis švytuojamasis variklis, modeliavimas, energetiniai parametrai, impulsinis maitinimo šaltinis.

ANNOTATION

The simulation of synchronic reactive oscillating motors in VISSIM environment is carried out in this final MA thesis.

Introduction overviews the development processes of oscillating motors and the potential of up-to-date mathematical simulation.

The analytic-methodical part of the thesis presents the compositional process of reactive oscillating motor mathematical model and the formation of structured program in VISSIM environment. Moreover, it also delineates the operating algorithm of the designed pulse power source and also describes the composition of the diagrams of the structured program.

While in the methodical-investigative part, the theoretical calculations in reference with corresponding motor parameters and sine and pulse voltage source are carried out. In addition, the results of the energy parameter calculations and the diagrams of pulse power source voltage and the flow of the motor are provided.

Conclusions summarises the results of the analysis and also provides suggestions for the development of structured program of pulse power source and the appliance possibilities of the created models.

The MA thesis consists of seven parts: an introduction, the overview and analysis of the selected subject, an analytic-methodical part, an experimental-investigative part, conclusions and suggestions, a list of references and appendices.

Attached appendices provide the calculations of synchronic reactive oscillating motor energy parameters that were carried out in accordance with the structured program of pulse power source in VISSIM environment.

Keywords: reactive oscillating motor, modeling, pulse power source, energy parameters.

TURINYS

ĮVADAS.....	5
BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI.....	6
1. PATVIRTINTOS TEMOS APŽVALGA IR ANALIZĖ.....	7
2. ANALITINĖ – METODINĖ DALIS	
2.1. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio matematinis modelis.....	12
2.2. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio matematinio modelio paruošimas kompiuteriniam modeliavimui VISSIM terpėje.....	13
2.3. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio struktūrinė programa.....	14
2.4. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio aktyviosios galios skaičiavimo struktūrinė schema.....	15
2.5. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio pilnutinės galios skaičiavimo struktūrinė schema.....	16
2.6. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio reaktyviosios galios skaičiavimo struktūrinė schema.....	17
2.7. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio galios koeficiento skaičiavimo struktūrinė schema.....	18
2.8. Sudarytų struktūrinių schemų tikrinimas.....	19
2.9. Sinusinės įtampos, formuojamos impulsiniu - platuminiu principu, maitinimo šaltinis.....	19
2.10. Suprojektuoto maitinimo šaltinio modelio veikimo principas.....	20
2.11. Impulsinio maitinimo šaltinio struktūrinės programavimo schemos sudarymas VISSIM terpėje.....	22
3. VIRTUALUS EKSPERIMENTAS	
3.1. Sudaryto reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio modelio analizės pradinės sąlygos.....	29
3.2. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio modeliavimo VISSIM terpėje rezultatai.....	29
3.3. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio modeliavimo VISSIM rezultatų palyginimas.....	35
4. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	39
NAUDOTOS LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	40

IVADAS

Vykdam mokslinius ir inžinerinius darbus, kai norima pasiekti puikių rezultatų su mažiausiomis laiko ir finansų sąnaudomis, prieš pradėdant fizinius bandymus, atliekamas sistemos modeliavimas. Užrašius procesą aprašančias matematinės lygtis, belieka atlikti skaičiavimus ir gauti dominančius rezultatus. Anksčiau, kai kompiuteriai dar nebuvo išvystyti iki aukšto lygio, skaičiavimų atlikimas buvo gana sudėtingas uždavinys. Tai liudija Kauno politechnikos instituto mokslinio – tiriamojo darbo ataskaitoje „Švytuojančio judesio elektros variklių tyrimas“ (1975 m.) išsakyta problema dėl netiesinių operacijų modeliavimo tikslumo, kai modeliavimas atliekamas analoginėmis skaičiavimo mašinomis [2]. Šiuolaikinė kompiuterinė technika leidžia per trumpą laiką atlikti įvairaus sudėtingumo skaičiavimus, tad modeliavimas tapo efektyviu įrankiu.

Modeliavimo programų sudarymą galima išskirti į dvi grupes – aukšto lygio programavimo kalba programavimo terpėje arba struktūrinio programavimo aplinkos naudojimas. Programavimas aukšto lygio programavimo kalbos, kai programa turi tekstinę formą, rezultatų vaizdavimas pasižymi lankstumu, tačiau reikalauja daug laiko ir pastangų užrašant šią programą. Kitu atveju, kai naudojama struktūrinio programavimo terpė, programų sudarymas nepasižymi lankstumu, tačiau lengvai įsisavinamas ir greitai atliekamas. Be to, struktūrinio programavimo terpėje sudarytos programos nesusietos su konkrečia programavimo kalba, todėl su nedideliais pakeitimais gali būti lengvai pritaikomos kitiems struktūrinio programavimo programų paketams.

Apžvelgus mokslinius straipsnius galima pastebėti, kad dažniausiai, analizuojant sistemų struktūras, modeliavimas atliekamas MATLAB programa bei viena jos sudedamųjų dalių SIMULINK. Tai lemia platus funkcijų ir veiksmų asortimentas, daug programų pavyzdžių galima rasti internete, be to apie tai yra daug literatūros. Tačiau ši programa yra komercinė, o licenzija – gana brangi. Kaip alternatyvą SIMULINK programiniam paketui, galima rinktis VISSIM Skirtingų programų naudojimas leidžia įvairiapusiškiau įvertinti modeliuojamas sistemas, išnaudojant jų privalumus bei eliminuojant jų trūkumus.

Šiame baigiamajame magistro darbe pateikiamas reaktyviojo švytuojamojo variklio matematinis modelis, kompiuterinis modeliavimas atliekamas VISSIM terpėje. Parengtos ir aprašytos intergralinių parametrų skaičiavimo programos bei sudarytas maitinimo šaltinio struktūrinis modelis, kuris sinusinę maitinamo šaltinio įtampą konvertuoja į impulsinę įtampą, adekvačią sinusinei. Atlikti palyginimai rezultatų, kai maitinimo šaltinio įtampa sinusinės ir kai stačiakampių impulsų formos.

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI

Darbo tikslas – VISSIM terpėje sudaryti švytuojamojo sinchroninio variklio modelį, kurio panaudojus būtų galima gauti integralinius variklio parametrus: aktyviają, reaktyviają bei pilnutinę galią, galios koeficientą $\cos\phi$. Sudaryti maitinimo šaltinį formuojantį impulsus impulsiniu-platuminiu principu.

Siekiant šio tikslo, reikia išspręsti šiuos klausimus:

- Išanalizuoti švytuojamųjų variklių tyrimo metodus.
- Sudaryti matematinį švytuojamojo sinchroninio variklio modelį.
- Sudaryti programą lygčių sprendimui VISSIM terpėje.
- Sudaryti kompiuterinį impulsinio maitinimo šaltinio modelį.
- Atlikti virtualų eksperimentą. Palyginti rezultatus, gautus modeliuojant, kai maitinimo įtampa sinusinė ir kai sinusinė įtampa suformuota impulsiniu-platuminiu principu.
- Apibendrinti tyrimo rezultatus ir suformuluoti išvadas.
- Pateikti pasiūlymus šio modelio taikymui.

1. PATVIRTINTOS TEMOS APŽVALGA IR ANALIZĖ

Rengiant šį baigiamąjį magistro darbą buvo peržiūrėta literatūra, kurioje aprašomos švytuojamosios elektros mašinos, moksliniai straipsniai, kuriuose tyrinėjami įvairūs švytuojamųjų elektros mašinų panaudojimai, darbo režimai, vienu parametru priklausomybės nuo kitų bei maitinimo šaltinio įtampos formos. Didžiausias dėmesys skirtas švytuojamųjų elektros mašinų matematiniam modeliavimui ir lygčių sprendimui kompiuterinėmis programomis „Matlab“, „VisSim“, „MathCad“.

2008 metais prof. habil. dr. Sigitas Kudarauskas išleistoje monografijoje „Švytuojamosios elektros mašinos“ pateikiamos švytuojamųjų elektros mašinų konstrukcijos, mašinų klasifikacija, veiklos analizės principai. Pateikta daug švytuojamųjų elektros mašinų praktinio pritaikymo iliustracijų, charakteristikų, įvairias priklausomybes aprašančių formulių, schemų, vaizduojančių energijos keitimo procesus ir darbo režimus. Autoriaus pateikta švytuojamųjų elektros mašinų vystymo raida, jų įvairovė, praktinio pritaikymo galimybės leidžia suprasti, kad šių mašinų grupė verta didesnio mokslininkų, inžinierių dėmesio, sprendžiant aktualias problemas, susijusias su šių mašinų tyrinėjimu bei pritaikymu [1].

Daug vertingos informacijos apie dinaminių sistemų modeliavimą galima rasti A. Brazaičio 2007 metais išleistoje knygoje „Dinaminių sistemų modeliavimas“. Knygoje aprašomi elektros inžinerijos magistrantų atliekami laboratoriniai darbai. Autorius leidinyje pateikia ne tik laboratorinių darbų užduotis, bet ir teorijos santrauką, metodinius nurodymus, gausu lygčių sprendimo ir matematinio modeliavimo, struktūrinių schemų pavyzdžių. Didelis dėmesys skirtas sistemų modeliavimui MATLAB ir VISSIM terpėse [2].

Kauno politechnikos instituto Klaipėdos vakarinio fakulteto Elektrotechninių disciplinų katedra vykdė įvairiapusių švytuojamojo judesio elektros variklių tyrimus, kuriems vadovavo tuometinis katedros vadovas doc. dr. S. Kudarauskas (šiuo metu prof. habil. dr.). 1975 metų mokslinio – tiriamojo darbo ataskaitoje pateikiama informacija apie švytuojamųjų mašinų vystymo raidą, jų klasifikaciją, konstrukcijas, švytuojamojo judesio elektros mašinų teoriją, taip pat pateikti skaičiavimo, matematinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatai. Išvadose tyrimo autoriai reziumuoja, kad atliktų tyrimų rezultatai leidžia sudaryti sinchroninių švytuojamojo judesio variklių skaičiavimo metodikos pagrindus [3].

Žurnale „Elektronika ir elektrotechnika“ 2011 m. Nr. 4(110) publikuojamas straipsnis „Švytuojamųjų sinchroninių pulsuojamųjų srovės variklių energetinių parametrų tyrimas“. Straipsnyje pateikiamos švytuojamojo tiesiaegio judesio pulsuojamųjų srovės variklių charakteristikos ir tirti energetiniai parametrai, gauti maitinant variklį įvairių formų įtampomis, keičiant maitinimo įtampos

dažnį, apkrovą. Sudarytoms variklio diferencialinėms lygtims spręsti panaudota skaitinio modeliavimo programa „Matlab“ [4].

Tiesiaeigio švytuojančiojo judesio pulsuojamosios srovės sinchroninės mechatroninės pavaros, maitinamos pastovios amplitudės, stačiakampės formos įtampos impulsais, energetinių parametrų tyrimas aprašytas žurnalo „Elektronika ir elektrotechnika“ 2009 m. Nr. 5(93) publikuotame straipsnyje. Atlikus matematinį modeliavimą ir fizinius eksperimentus, padaryta išvada, kad aukščiausi energetiniai rodikliai yra tų pavarų, kurių apvijos jungiamos tiltelių įstrižainėse. Pateiktas tirtu objekto brėžinys, elektrinės schemas, matematinės modeliavimo lygtys. Modeliavimo rezultatai pateikti grafine forma [5].

Atliekant matematinius modeliavimus ir apibendrinant gautus rezultatus, vienas svarbiausių klausimų yra gautųjų rezultatų atitikimas eksperimentiniu būdu gautiems rezultatams. Matematinio modeliavimo ir fizinio eksperimento adekvatumo tyrimas aprašytas žurnalo „Elektronika ir elektrotechnika“ 2008 m. Nr. 7(87) publikuojamame straipsnyje „Švytuojamojo judesio mechatroninės pavaros fizinio ir matematinio modelių adekvatumo tyrimas“. Straipsnyje lyginami dviejų matematinio modeliavimo metodų adekvatumas fiziniam eksperimentui. Autoriai, apibendrinami tyrimo rezultatus, nurodo, kad matematinio modeliavimo, naudojant baigtinių elementų metodą, rezultatai yra artimesni fiziniam eksperimentui nei modeliuojant sistemą, kai elektromagnetinė jėga apskaičiuojama imant pirmąjį laipsnių eilutės narį [6].

Naujas metodas skaitinių valdymo įtaisų naudojimas objektų valdymui, kai jutiklio formuojamas impulsas τ yra matuojamo dydžio funkcija ir perduodama mikrovaldikliui skaitiniu kodu, aprašytas žurnale „Elektronika ir elektrotechnika“ 2008 m. Nr. 2(90). Apibendrinant pateiktas autorių išvadas, galima pasakakyti, kad pateiktas metodas yra efektyvesnis. Straipsnyje pateiktas aktyvatoriaus valdymo algoritmas, jį aprašančios matematinės lygtys, modeliavimo metu gautų rezultatų grafikai [7].

Švytuojamojo pulsuojamosios srovės variklio – bespyruoklinio kompresoriaus centro poslinkio tyrimo eksperimentas bei jo rezultatai pateikiami žurnalo „Elektronika ir elektrotechnika“ 2007 m. Nr. 7(79) 63–66 puslapiuose. Eksperimentu siekta nustatyti variklio energetinių parametrų priklausomybes nuo judžiosios dalies centro poslinkio. Pateikiami grafiniai eksperimento rezultatai. Autoriai išvadose nurodo, kad energetinės charakteristikos pablogėja, esant švytavimų centro poslinkiui. Sudaryta tiriamos sistemos lygčių sistema modeliuota MATLAB programiniu paketu. Pateiktos eksperimente naudotos schemas [8].

Vektorinės diagramos ir ekvivalentinės schemas kintamosios srovės mašinų galiai skaičiuoti naudojamos gana seniai. Tačiau tradicinės vektorinės diagramos tinka galios skaičiavimui pagal maitinimo šaltinio įtampą ir variklio srovę. Žurnale „Elektronika ir elektrotechnika“ 2007 m. Nr. 6(78)

publikuotame straipsnyje pristatomos išplėtos vektorinės diagramos ir ekvivalentinės schemas, kuriose panaudotos skersinė ir išilginė induktyviosios varžos, papildomos aktyviosios varžos, o atskirose grandinės šakose atskirtos inkaro srovės skersinė ir išilginė dedamosios. Pateiktos vektorinės diagramos ir ekvivalentinės schemas leidžia teisingai apskaičiuoti elektros mašinos galią, sėkmingiau analizuoti jos savybes [9].

Individualių matematinių modelių sudarymas pavarų tyrimams atima nemažai laiko tokių modelių parengimui ir jų tikrinimui. Šios problemos sprendimo siūlymas pateikiamas žurnalo „Elektronika ir elektrotechnika“ 2006 m. Nr. 6(70) publikuojamame straipsnyje „Švytuojamųjų pavarų automatizuotojo projektavimo matematinis modelis“, kuriame pateikiamas universalus pavarų su švytuojamaisiais varikliais matematinio modelio sudarymo metodas ir jo ypatumai [10].

Paprasčiausių konstrukcijų induktyviųjų elektros mašinų magnetinės dalies ypatybių nagrinėjimo rezultatai pateikti straipsnyje, atspausdintame žurnale „Elektronika ir elektrotechnika“ 2003 m. Nr. 4(46). Naudotas baigtinių elementų analizės metodas magnetinės grandinės analizei. Aprašomas analizės principas gali būti naudojamas įvairių konstrukcijų specialiosioms ir induktyviosioms elektros mašinoms tirti. Išvadose akcentuojama, kad induktyviųjų elektros mašinų magnetinės dalies analizei tikslinga skaičiuoti magnetinį lauką, sudarant jų ekvivalentines schemas. Induktyviųjų mašinų magnetiniai laidžiai daro įtaką elektromechaniniam energijos keitimui, kurie kinta priklausomai nuo mechaninės būsenos. Straipsnyje pateiktos tirtų elektros mašinų magnetinių dalių schemas, kuriose pavaizduoti magnetinių laukų vaizdai, ekvivalentinės schemas ir jos elementus aprašančios lygtys [11].

Šiuo metu yra sukurta daug kompiuterinės programinės įrangos, kuri leidžia modeliuoti fizinius, gambinius, socialinius ir kitokių tipų procesus. Kompiuterinio modeliavimo programas galima suskirstyti į standartines ir specializuotas. Standartinių programų universalumas leidžia modeliuoti įvairių tipų procesus viena programa. Gebėjimas naudotis standartine programine įranga leidžia specialistui greitai perprasti ir modeliavimo darbus vykdyti specializuotomis programomis, todėl dažnai standartinės programos, tokios kaip MATLAB ar VISSIM, plačiai taikomos mokymo įstaigose. Tai lemia didelę funkcinių blokų bibliotekos gausą, o brangios programų licenzijos verčia ieškoti vieno universaliausio sprendimo. Tačiau, kai vykdomi modeliavimo darbai apima labai siaurą sritį, standartinių programų taikymas yra finansiškai nenaudingas. Dažnai standartinių programų funkcinių blokų bibliotekos nepakanka norimam procesui modeliuoti, todėl tenka pačiam kurti specializuotus funkcinius blokus.

Kompanijos „MathWorks“ sukurta MATLAB programa apima skaitinę analizę, veiksmus su matricomis ir masyvais, signalų apdorojimą ir grafiką. Programa skirta sistemų matematiniam apdorojimui ir vizualizacijai. MATLAB taikoma šiose srityse: matematika ir skaičiavimai, algoritmų

sudarymas, modeliavimas, duomenų analizė ir maketavimas, mokslinė ir inžinerinė grafika, taikomųjų programų kūrimas. Sistemų struktūrų modeliavimui naudojama MATLAB SIMULINK struktūrinio programavimo kalba. Šios programos privalumai: galimybė modeliuoti ir derinti inžinerines sistemas, platus funkcijų ir veiksmų asortimentas, dažnas naudojimas mokymo įstaigose, galimybė rasti daug literatūros ir programų pavyzdžių internete. MATLAB trūkumai: naudojama speciali programavimo kalba, nėra grafinių modelių bibliotekos. MATLAB - komercinė programa, kurios naudojimui reikia įsigyti licenziją [12].

Firmos „Visual Solutions, Incorporated“ struktūrinio programavimo paketas VISSIM skirtas sudėtingų netiesinių dinaminių sistemų modeliavimui. Vienas didžiausių VISSIM išskirtinumų iš kitų struktūrinio programavimo kalbų yra galimybė animuoti valdymo elementus. Programos skaičiavimo sistema užtikrina greitus ir tikslus skaičiavimus, modeliavimo proceso nenutrūkstamumą. Paprastas struktūrinių programų sudarymas, gausi funkcinių blokų biblioteka leidžia VISSIM taikyti įvairių sistemų modeliavimui. Dėl struktūrinių programavimo schemų sudarymo paprastumo, programos naudojimas ne toks populiarus mokymo įstaigose, be to VISSIM neturi tekstinio programavimo aplinkos, tad lygčių sprendimui reikės naudoti kitą programavimo aplinką. VISSIM tikslinga naudoti aukšto lygio specialistams, neturintiems didelių tekstinio programavimo įgūdžių [13].

CENTAURUS – Kauno technologijos universiteto specialistų sukurta programinė įranga, heterogeninių ir netiesinių valdymo sistemų analizei bei sintezei. Specializuota programinė įranga leidžia modeliuoti sistemas, turinčias algoritminę dalį, aprašomą Petri tinklo elementais bei analoginę dalį, kuri vaizduojama struktūrine schema. Programos pakete naudojami keturi tradiciniai Petri tinklo elementai – „pozicija“, „perdava“, „ryšiai“, „procesas“. Šių elementų naudojimas leidžia modeliuoti dideles gamybines sistemas, kurių elementai tarpusavyje susieti telekomunikacijos elementais. Struktūrinės programos sudaromos išdėliojant funkcinius blokus ir juos sujungiant ryšiais. Sudarytos struktūrinės programos schemas trūkumai: modeliavimo schemeje funkcinių blokų skaičius turi būti mažesnis kaip 65025; funkcinių blokų įėjimai ir išėjimai gali būti invertuojami, tad modeliuojant reikia sekti blokų funkcionavimą; netiesinėms funkcijoms neleidžiamas daugiareikšmiškumas; nėra netiesinių funkcijų ribojimų bendro pavidalo perdavimo funkcijoms; vėlinimo blokas [14].

„Generic Logic“ kompanijos programinis paketas GLG TOOLKIT skirtas kurti ir animuoti informacines sistemas, kurti ir stebėti gamybinius procesus. Programinis paketas palaiko C/ C++, Java, Active X komponentus, tad galima modeliuoti ir dinaminius procesus. Kompanija yra išleidusi tris GLK TOOLKIT versijas – Basic, Professional ir Enterprise, kurios skiriasi įrankių ir grafikos elementų bibliotekomis [15].

Kompanijos “Siemens”, “Omron”, “Mitsubishi”, “Crouzet” ir kitos, kurios kuria techninę programinę įrangą, savo kuriamų valdiklių programavimui yra sukūrusios specializuotas struktūrinio

programavimo aplinkas, programų kūrimui konkretiems mikrovaldikliams. Taip siekiama populiarinti savo produkciją, nes struktūrinis programavimas lengviau įsisavinamas, lengviau koreguojamos struktūrinės programos, be to įmonės gali sutaupyti finansinių išteklių, nes nereikia komandoje turėti brangiai apmokamų tekstinio programavimo specialistų. Prie specializuotų programų galima priskirti grupės WorkBench programas, kurios skirtos pneumatikos, elektronikos, elektrotechnikos sistemų modeliavimui. Tokiose programose naudojami sistemų jutikliai, vykdikliai, pneumatiniai cilindrai, vožtuvai, elektrotechnikos ir elektronikos elementai. Sudarytos struktūrinės programos leidžia gauti skaitinę informaciją apie dominančius objektus nusistovėjusiam režime. Tokių sistemų trūkumas yra tas, kad negalima gauti informacijos apie pereinamuosius procesus.

Paminėti plačiausiai naudojamami struktūriniai paketai, visus aprašyti šiame darbe netikslinga. Galima pastebėti, kad programinių paketų kūrėjai naudoja įvairius metodus savo tikslams pasiekti. Vienose programose yra stipri matematinė bazė, kitose – daugiau dėmesio skirta grafinėms bibliotekoms ir funkciniais blokams. Visiems struktūrinio programavimo paketams bendra tai, kad rezultatai pateikiami funkcinuose blokuose skaitine arba grafine forma, tai leidžia gauti dominantį rezultatą, nesigilinant į proceso matematiką.

Šiame baigiamajame magistro darbe pasirinkta VISSIM programavimo aplinka, nes užsibrėžtiems tikslams pasiekti numatoma naudoti tekstinę programavimo kalbą, o siūloma funkcinų blokų įvairovė tenkina. Be to, įvairių programų populiarumas lemia jų konkurencingumą, dėl ko mažėja programinių paketų licenzijos kaina. Tad vienas iš netiesioginių šio darbo tikslų yra programinio paketo VISSIM populiarinimas.

2. ANALITINĖ – METODINĖ DALIS

2.1. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio matematinis modelis

Švytuojamojo sinchroninio variklio matematinis modelis – tai diferencialinių lygčių sistema, kuri aprašo elektromagnetinę ir mechaninę sistemas. Dėl netiesinio ryšio tarp magnetomechaninių keitiklių yra išvystomos mechaninės jėgos ir iš elektromagnetinės sistemos kintamųjų turime netiesinę sistemą, taigi ir diferencialinės lygtys, aprašančios variklį – netiesinės. Sistemos netiesiškumui įtakos daro ir sistemos elementų netiesinės savybės. Įvertinant tai, kad tarp elektrinių ir magnetinių kintamųjų yra fiksuotas ryšys, sistema gali būti aprašyta elektriniais arba magnetiniais kintamaisiais [1].

Remiantis antruoju Kirchhofo dėsniu, švytuojamojo sinchroninio variklio elektros grandinė aprašoma:

$$u = r \cdot i + w \cdot E. \quad (2.1)$$

Čia: u – maitinimo šaltinio įtampa;

r – visų elementų, kurie išsklaido elektros energiją, aktyvioji varža;

w – ritės vijų skaičius;

E – magnetinė srovė. [1]

Mechaninės sistemos būseną charakterizuoja judžiosios dalies koordinatė, kuri aprašoma jėgų balanso diferencialine lygtimi, sudaryta pagal d'Alamberto principą.

$$\sum f_{\lambda} = m \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} + R \cdot \frac{dh}{dt} + c \cdot h. \quad (2.2)$$

Čia: $\sum f_{\lambda}$ – suminė elektromagnetinė jėga;

m – judžiosios dalies masė;

h – judžiosios dalies koordinatė;

R – mechaninė varža;

c – spyruoklės konstanta. [1]

Remiantis (2.1) ir (2.2) formulėmis sudaroma pirmosios eilės diferencialinių lygčių sistema:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{c}{m} \cdot x_1 - \frac{R}{m} \cdot x_2 + \frac{1}{2 \cdot m} \cdot L'(x_1) \cdot x_3^2, \\ \frac{dx_3}{dt} = [-(r + L'(x_1) \cdot x_2) \cdot x_3 + u] \cdot L^{-1}(x_1). \end{cases} \quad (2.3)$$

Čia: x_1 – h , judžiosios dalies koordinatė;

x_2 – judžiosios dalies koordinatės išvestinė;

x_3 – i, variklio apvijų srovė.

2.2. Reaktyviojo švytuojamąo sinchroninio variklio matematinio modelio paruošimas kompiuteriniam modeliavimui VISSIM terpėje

Baigtinių elementų metodas – vienas efektyviausių ir universaliausių šiuo metu taikomų diferencialinių lygčių sprendimo būdų. Naudojant šį metodą pasirinkta sritis suskaidoma į mažas dalis, po to priimama prielaida, kad kiekvienoje suskaidytoje dalyje ieškomas dydis kinta tiesiniu dėsnium. Diferencialinė lygtis pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą, kurią išsprendus gaunamas atsakymas. Šis atsakymas bus apytikslis. Tai lemia priimta prielaida dėl ieškomo dydžio tiesiško kitimo, tačiau realiai kitimas gali būti nebūtinai tiesinis [16].

Sprendžiant sudėtingus uždavinius yra svarbu sudaryti optimalią programą ir pasirinkti tinkamą rezultatų analizės būdą. Priklausomai nuo to, ar domina tik nusistovėjęs režimas, ar pereinamasis procesas ir nusistovėjęs režimas, galimi du švytuojamųjų sinchroninių variklių analizės būdai. Jei domina tik nusistovėjęs režimas, tuomet daroma prielaida apie kvazisinusitinį nusistovėjusį režimą ir matematinio modelio analizė skaitiniu metodu vykdoma iš anksto pasirenkant nusistovėjusį režimą. Kai domina pereinamasis procesas ir nusistovėjęs režimas, matematinio modelio diferencialinės lygtys sprendžiamos pasirinktam laiko intervalui, įvertinant parametrus ir pradines sąlygas [1].

Prieš pradėdant modeliuoti, sudaroma švytuojamąo variklio švytuoklės magnetinio laidžio priklausomybė nuo koordinatės. Nagrinėjamas atvejis, kai magnetinio laidžio priklausomybė nuo koordinatės yra aproksimuota tiesine funkcija. Induktyvumo kitimą charakterizuoja (2.4) formulė.

$$L(h) = L_0 + kh. \quad (2.4)$$

Čia: L_0 – induktyvumas, kai $h = 0$;

k – koeficientas, charakterizuojantis induktyvumo kitimo spartą.

Sprendžiant (2.3) lygčių sistemą, skaičiuojama induktyvumo priklausomybės nuo koordinatės išvestinė, kuri lygi koeficientui k . Tad programavimo schemeje elementas $L'(x_1)$ pakeičiamas konstanta k .

Kai induktyvumo kitimas yra hiperbolinio ar kitokio charakterio, uždavinys sprendžiamas analogiškai.

Modeliuojant yra svarbu parinkti tinkamą diskretizavimo periodą, priešingu atveju – gauti modeliavimo rezultatai gali būti nepriimtini dėl didelių paklaidų. Kotelnikovo teorema tvirtina, kad analoginį signalą laiko atžvilgiu keičiant į diskrečiąsias reikšmes ir jas perduodant fizine terpe, atkurtas signalas bus pakankamai tikslus, jei diskretizavimo dažnis bus daugiau nei dvigubai didesnis už pradinės

funkcijos pačios aukščiausios harmonikos dažnį. Jei maitinimo įtampos periodas T , tai diskretizavimo periodas T_0 turi tenkinti (2.5) sąlygą [2].

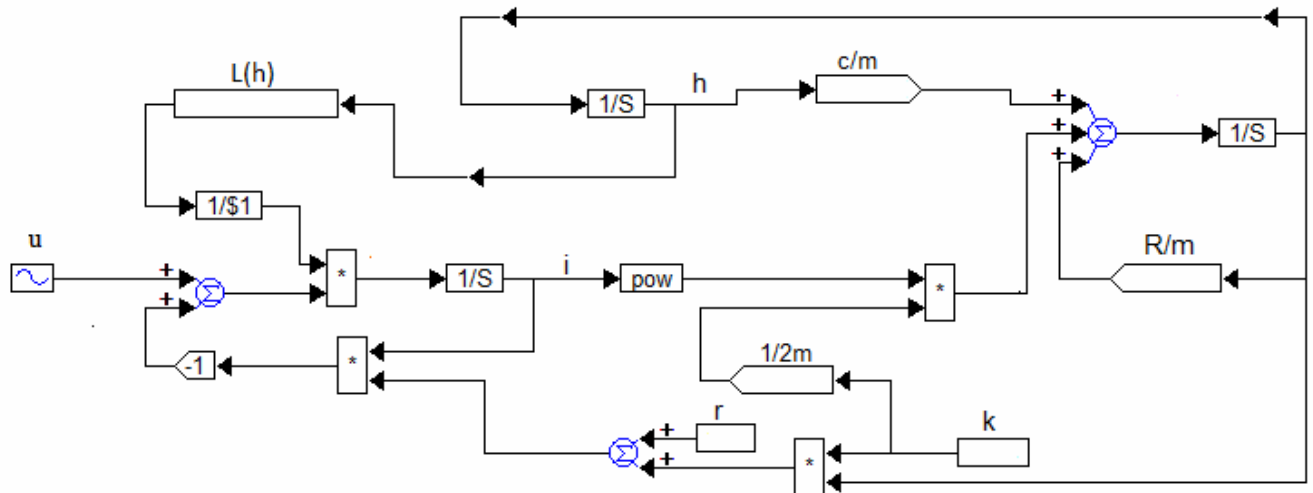
$$T = 2T_0n. \quad (2.5)$$

Čia: T_0 – diskretizavimo periodas;
 T – maitinimo įtampos periodas;
 n – sveikasis skaičius.

Svarbu užtikrinti, kad integravimo intervalas turėtų sveiką periodų skaičių.

2.3. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio struktūrinė programa

Pagal (2.3) lygčių sistemą sudaroma VISSIM aplinkoje programavimo schema 2.1 pav.



2.1 pav. Švytuojamojo sinchroninio variklio struktūrinė programavimo schema VISSIM aplinkoje

Prieš pradėdant modeliuoti, į atitinkamus schemas blokus turi būti įrašytos apskaičiuotos vertės, įvertinant šiuos parametrus: suminė aktyvioji varža r (Ω), induktyvumo kitimą įvertinantis koeficientas k (H/m), mechaninė varža R (Ns/m), judžiosios dalies masė m (kg), spyruoklės konstanta c (N/m) bei maitinimo įtampos amplitudė ir dažnis.

Sistemos kompiuterinis modeliavimas teikia informaciją apie variklio srovės ir koordinatės kitimą. Norint gauti informaciją apie kitų dominančių dydžių kitimą arba jų nusistovėjusias vertes, turi būti sudaromos papildomos programavimo schemas.

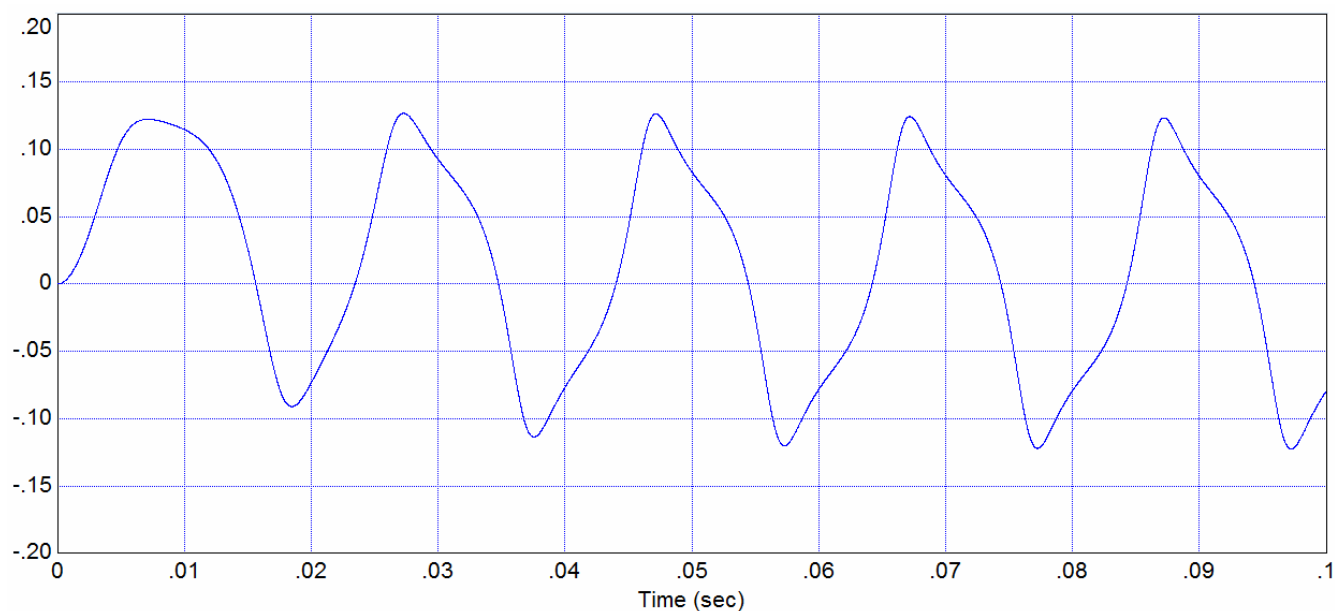
2.4. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio aktyviosios galios skaičiavimo struktūrinė schema

Aktyvioji galia – svarbus energetinis parametras, teikiantis informaciją apie negrįžtamai sueikvotą elektros energiją. Be to, šis parametras yra svarbus, norint įvertinti elektros mašinos naudingumo koeficientą.

Kintamos įtampos grandinėse aktyvioji galia skaičiuojama kaip vidutinė momentinės galios reikšmė per periodą [17].

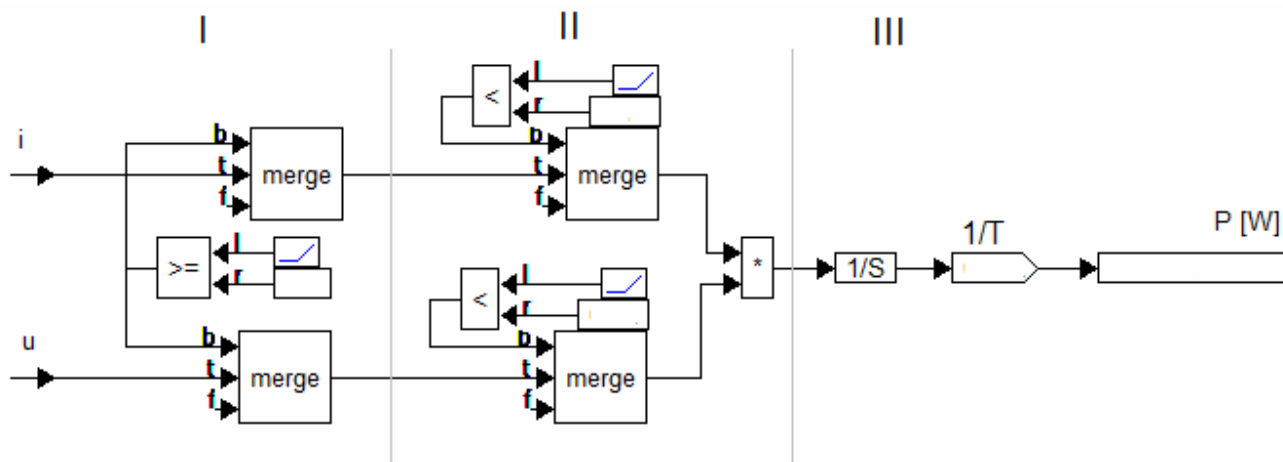
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt. \quad (2.6)$$

Prieš atliekant aktyviosios galios skaičiavimą, būtina atlikti švytuojamojo sinchroninio variklio modeliavimą pagal schemą 2.1 pav., kad būtų nustatyta pereinamojo proceso pabaiga. Pereinamojo proceso pabaiga ir nusistovėjusio režimo pradžia nustatoma vizualiai įvertinant srovės kitimo grafiką. Nusistovėjusio režimo pradžia imamas maitinimo įtampos periodas, po kurio srovės kitimo kreivės per periodą – identiškos. 2.2 pav. pateiktas srovės kitimo grafikas, kuriame aiškiai matyti, kad antrojo ir trečiojo periodo metu srovės kreivės identiškos, taigi skaičiuojant aktyviają galią galima imti visus, išskyrus pirmąjį periodą.



2.2 pav. Švytuojamojo sinchroninio variklio srovės grafikas

2.3 pav. pateikta aktyviosios galios skaičiavimo programa VISSIM aplinkoje. Programos veikimo principo paaiškinimui programa suskirstoma į tris zonas.



2.3 pav. Aktyviosios galios skaičiavimo struktūrinė programavimo schema VISSIM aplinkoje

Pirmojoje zonoje vyksta periodo, per kurį skaičiuojama vidutinė momentinė galia, pradžios momento nustatymas. VISSIM blokas „ramp“ realizuoja vienetinę funkciją, kurios skaitinė reikšmė yra adekvati laikui. Į bloko „merge“, kuris vykdo sąlygos funkciją, „b“ įėjimą ateina signalas, kuris nurodo momentą, kada pradėti vykdyti aktyviosios galios skaičiavimo procesą. Aktyviosios galios skaičiavimo proceso pradžios laikas nurodomas bloko „greater that“ „r“ įėjime. Nuo to momento, kai tenkinama periodo pradžios sąlyga, daugybos elementas skaičiuoja momentinės srovės ir įtampos verčių sandaugą. u – maitinimo šaltinio įtampa, i – variklio srovė, gaunama prijungus bloko „merge“ „t“ įėjimą, prie integravimo bloko išėjimo, kaip pavaizduota 2.1 pav.

Antrojoje zonoje nustatoma periodo, per kurį skaičiuojama vidutinė momentinė galia, pabaigos momentas. VISSIM bloke „less that“ „r“ įėjime įrašomas skaičiuojamo periodo pabaigos momentas.

Trečiojoje zonoje blokas „integrator“ sumuoja momentinės galios reikšmę per periodą. Gautas rezultatas – vidutinė aktyvioji galia.

2.5. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio pilnutinės galios skaičiavimo struktūrinė schema

Modeliuojant aukščiau pateiktą švytuojamojo sinchroninio variklio matematinį modelį, pilnutinės galios apskaičiavimas leidžia ne tik įvertinti elektromechaninės sistemos galią, jei galios koeficientas būtų lygus vienetui, bet ir apskaičiuoti reaktyviąją galią bei galios koeficientą.

Pilnutinės galios skaičiavimo programa VISSIM aplinkoje sudaroma remiantis teorinėje elektrotechnikoje nurodoma pilnutinės galios išraiška [17]:

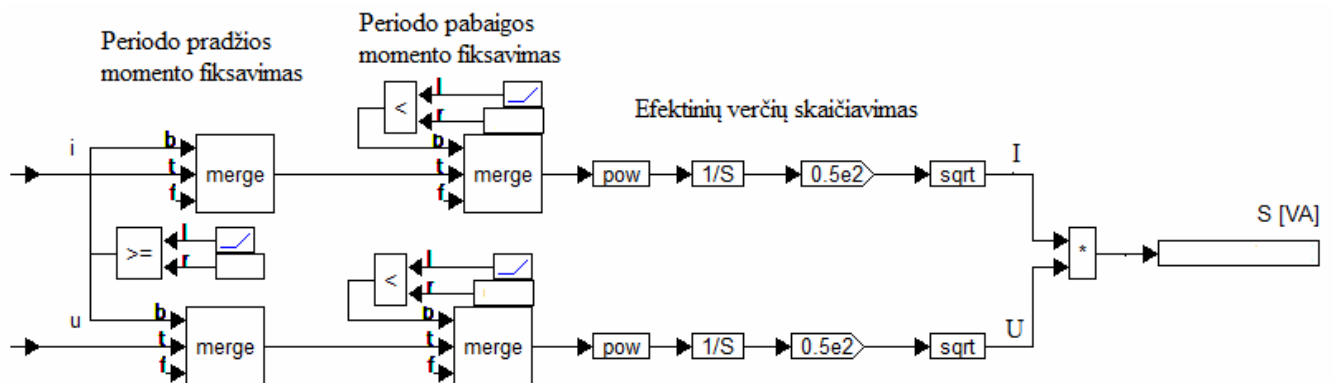
$$S = U \cdot I. \quad (2.7)$$

Čia: U ir I – efektinė maitinimo šaltinio įtampa ir efektinė srovė.

Efektinei įtampai ir srovei apskaičiuoti reikia sudaryti atskirą struktūrinę programą pagal (2.8) ir (2.9) formules [17].

$$U = \sqrt{\int_0^T \frac{1}{T} \cdot u^2(t) dt}. \quad (2.8)$$

$$I = \sqrt{\int_0^T \frac{1}{T} \cdot i^2(t) dt}. \quad (2.9)$$



2.4 pav. Pilnutinės galios skaičiavimo struktūrinė programavimo schema VISSIM aplinkoje

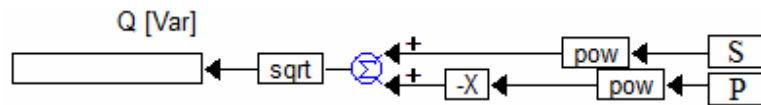
2.4 pav. Pavaizduota pilnutinės galios skaičiavimo programa VISSIM aplinkoje. Blokuose „merge“ nurodomas periodo pradžios ir pabaigos momentas. Toliau vyksta efektnių verčių apskaičiavimas, o daugybos bloko išėjime turime pilnutinės galios vertę. u – maitinimo šaltinio įtampa, i – variklio srovė.

2.6. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio reaktyviosios galios skaičiavimo struktūrinė schema

Reaktyviosios galios žinojimas leidžia įvertinti grįžtamuosius periodinius energijos kaitos procesus. Žinant aktyviąją ir pilnutinę galias, reaktyvioji galia apskaičiuojama remiantis galių trikampiū [17].

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (2.10)$$

Skaičiavimo programa VISSIM aplinkoje sudaroma vadovaujantis formule (2.10). Struktūrinė programavimo schema pavaizduota 2.5 pav.



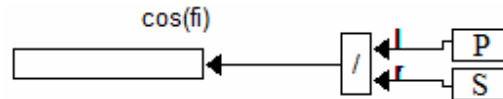
2.5 pav. Reaktyviosios galios skaičiavimo struktūrinė programavimo schema VISSIM aplinkoje

2.7. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio galios koeficiento skaičiavimo struktūrinė schema

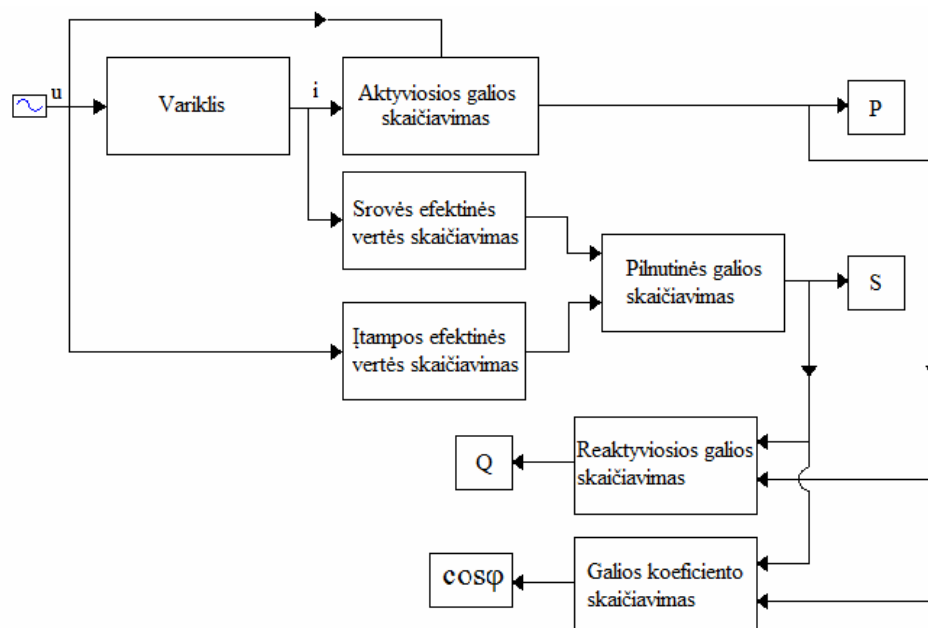
Galios koeficientas nurodomas visiems elektros energijos imtuvams, kurie turi induktyviuosius arba talpuminius elementus savo elektros grandinėse, tad ne išimtis ir švytuojamieji sinchroniniai varikliai. Šio energetinio rodiklio didinimas – gana aktualus rodiklis, tobulinant švytuojamąsias elektros mašinas. Galios koeficientas apskaičiuojamas kaip aktyviosios ir pilnutinės galios santykis [17].

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (2.11)$$

Galios koeficiento skaičiavimo programa VISSIM aplinkoje sudaroma vadovaujantis formule (2.11). Struktūrinė programavimo schema pavaizduota 2.6 pav.



2.6 pav. Galios koeficiento skaičiavimo struktūrinė programavimo schema VISSIM aplinkoje



2.7 pav. Maitinimo šaltinio, sudaryto reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio, energetinių parametrų skaičiavimo struktūrinių programų išdėstymas ir sujungimas VISSIM modeliavimo aplinkoje

2.8. Sudarytų struktūrinių schemų tikrinimas

Sudarytų aktyviosios, pilnutinės, reaktyviosios galių ir galios koeficiento skaičiavimo struktūrinių schemų tikrinimui atlikti skaičiavimai VISSIM terpėje pagal 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 paveiksluose pavaizduotas struktūrines schemas, ir MATHCAD aplinkoje pagal 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 formules. Maitinimo šaltinio įtampa $u=311\sin(314t)$, o srovė $i=2\sin(314t)$. Rezultatai pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Struktūrinių schemų modeliavimo VISSIM aplinkoje ir skaičiavimų MATHCAD aplinkoje rezultatai

	S [VA]	P [W]	Q [Var]	cosφ	U [V]	I [A]
VISSIM	311,158	311,158	0	1	219,967	1,415
MATHCAD	311,158	311,158	0	1	219,967	1,415

Įvertinus 2.1 lentelėje pateiktus rezultatus, galima daryti išvadą, kad struktūrinės programavimo schemas energetiniams parametrams skaičiuoti, yra teisingos.

2.9. Sinusinės įtampos, formuojamos impulsiniu - platuminiu principu, maitinimo šaltinis

Elektromechaninių sistemų veikimui ženklią įtaką turi maitinimo šaltinis. Keičiant maitinimo šaltinio įtampą, dažnį, galima gauti įvairių dydžių priklausomybes nuo maitinimo įtampos. Pramoninis kintamos įtampos tinklas 230 V įtampos ir 50 Hz dažnio. Švytuojamiesiems varikliams maitinimo įtampos dažnis lemia švytuoklės švytavimų dažnį. Praktikoje taikant švytuojamąsias elektros mašinas reikalingi įvairaus dažnio švytavimai, o maitinimo įtampos dažnio keitimui reikalingi dažnio keitikliai yra brangūs. Tad ši problema daro didelę įtaką tokių variklių pritaikymui.

Dažnio keitiklio naudojimo galima išvengti panaudojant impulsinės - platuminės moduliacijos principu veikiančią maitinimo šaltinį. Projektuojamo impulsinio maitinimo šaltinio išėjime turime nustatytos amplitudės ir trukmės impulsų seką, kurios efektinė vertė turi būti lygi sinusinės įtampos efektinei vertei. Elektronikoje plačiai naudojami impulso pločio modulatoriai, kurių išėjime įtampos impulsai yra vienodos amplitudės ir trukmės. Nors efektinė įtampos vertė ir lygi sinusinės įtampos efektinei vertei, tačiau įtampos paskirstymas, lyginant su sinusine įtampa, ženkliai skiriasi.

Apibendrinant elektrotechnikos ir signalų teorijos žinias, galima daryti išvadą, kad svarbu ne įtampos impulso forma, o impulso plotas. Remiantis šia teorija, šiame darbe suprojektuotas impulsinis maitinimo šaltinio modelis VISSIM struktūrinio programavimo aplinkoje, kuris, remiantis impulsiniu-platuminiu principu, sinusinę įtampą paverčia impulsine, vienodos amplitudės ir nevienodos trukmės įtampa, o jos efektinė reikšmė ir įtampos pasiskirstymas per periodą adekvatus tolydziai sinusinei įtampai.

2.10. Suprojektuoto maitinimo šaltinio modelio veikimo principas

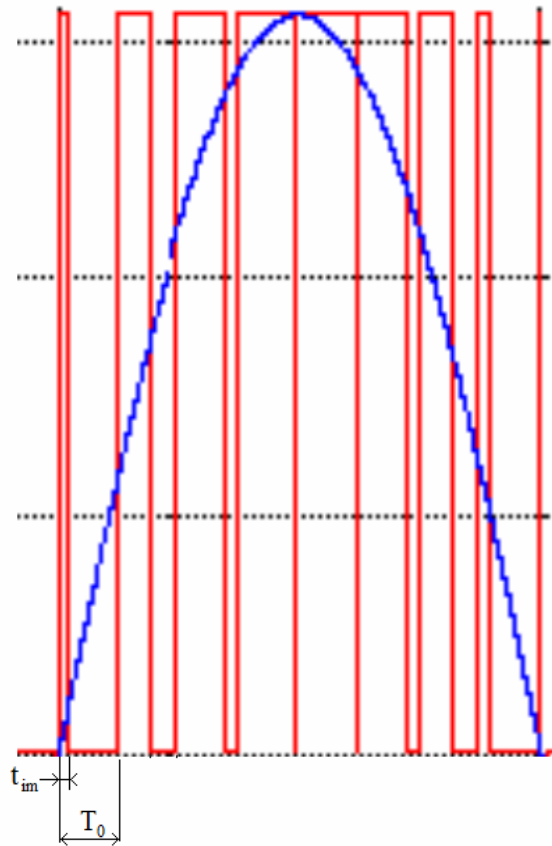
Projektuojamam impulsiniam maitinimo šaltiniui pradinės sąlygos yra: maitinimo įtampos amplitudinė vertė, maitinimo įtampos dažnis. Jos nustatomos VISSIM programos „sunusoid“ bloke. Nurodant dažnį, svarbu nepamiršti, kad matavimo dydis yra rad/s, o ne Hz. Nagrinėjamoje sistemoje naudojama pramoninio dažnio maitinimo įtampa, kurios amplitudinė vertė yra 311 V, o dažnis 314 rad/s.

Nustačius pradines sąlygas, kitas žingsnis – nuspręsti, koku tikslumu pageidaujame atlikti tyrimą. Mažesnis impulsų skaičius per periodą realizuojamas paprasčiau, mažesnė programa, tačiau įtampos pasiskirstymas per periodą mažiau adekvatus sinusinei įtampai. Priešingu atveju, didinant maitinimo impulsų skaičių, rezultatas – artimesnis sinusinei įtampai, tačiau struktūrinė programavimo schema sudėtingesnė.

Naudojant sinusinę įtampą, impulso formavimo programą galima ženkliai sumažinti. Tai lemia sinusinio dydžio simetriškumas, taigi užtenka atlikti skaičiavimus tik pirmam periodo ketvirčiui. Vėliau gautus rezultatus panaudoti praleidžiant reikiamu momentu pro atitinkamą „raktą“. Taikant šį metodą, svarbu pasirinkti lyginį impulsų skaičių per pusę periodo. Priešingu atveju reikia programą pertvarkyti taip, kad skaičiuotų visą pusperiodį. O tai didina programą, mažina skaičiavimų greitį. Programos veikimo aiškinimui pasirinktas 16 impulsų per periodą modeliavimas. Impulsinės įtampos intervalo trukmė lygi $T_0 = T/16$.

Kai pasirinktas norimas impulsų skaičius per periodą, kitas žingsnis – impulso formavimas. Prieš atliekant amplitudinės vertės impulso modeliavimą reikia sužinoti jo trukmę. Tai atliekama, skaičiuojant sinusinės įtampos plotą, nustatyto intervalo T_0 ribose. Sinusinė įtampa suskaidoma į 16 dalių per periodą. Nagrinėjamu atveju, trukmė $t_{im} = 0,00125$ s. Įtampos plotas nustatyto impulso intervale skaičiuojamas integravimo būdu. Įvertinant tai, kad programos sudėtingumo mažinimo tikslu tos pačios grandys naudojamos ir kitų dydžių skaičiavimui, įtampos ploto skaičiavimui, integralo ribos nurodomos ne laiko, o įtampos vertės atžvilgiu. Tai reiškia, kad reikia patogiausiu būdu papildomai apskaičiuojamos sinusinės įtampos vertės $m \cdot T_0$ (čia $m = 1, 2, 3, 4$) momentais. Gautos sinusinės įtampos momentinės vertės įrašomos impulsinio maitinimo šaltinio struktūrinės VISSIM programos atitinkamuose blokuose. Amplitudinės

vertės impulso trukmė apskaičiuojama padalijus sinusinės įtampos plotą (T_0 ribose) iš amplitudinės įtampos vertės.



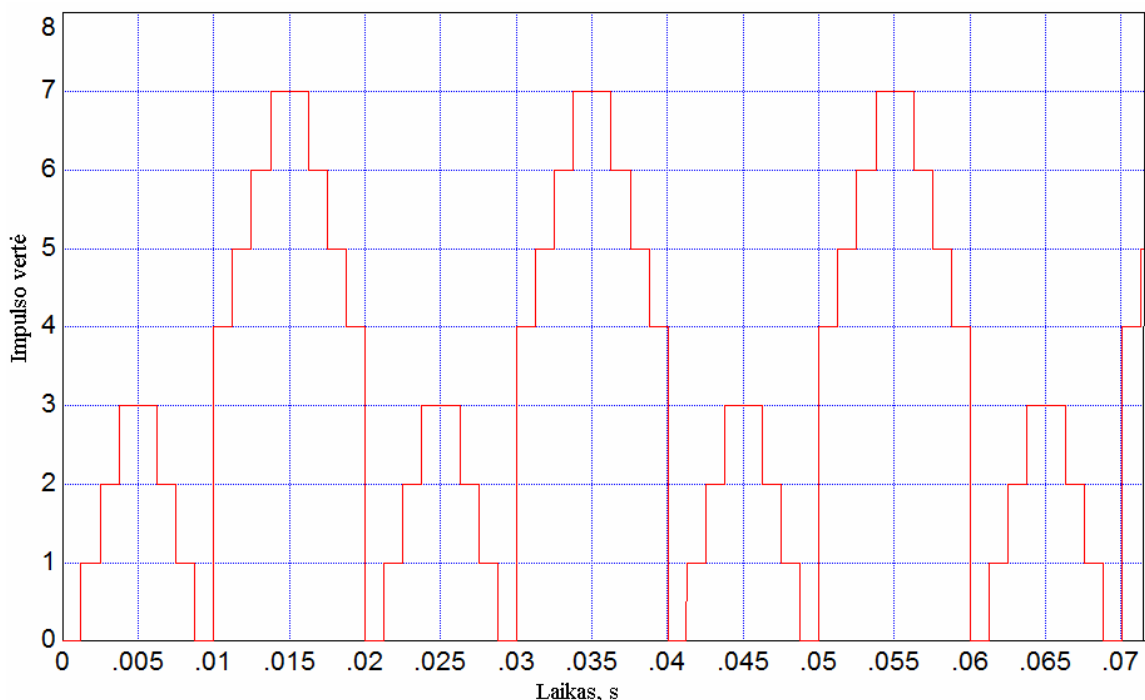
2.8 pav. Sinusinės įtampos ir jai adekvačios impulsinės įtampos grafikas

Kai turima informacija apie pirmojo ketvirčio amplitudinės vertės impulsų trukmės, toliau projektuojama schema, kuri reikiamu momentu, kas 0,00125 s, į impulsinio maitinimo šaltinio išėjimą paduotų reikiamos trukmės impulsą, per laiką T_0 . 2.8 pav. matyti, kad periodo pirmojo ketvirčio impulsai vienodi. Skiriasi tik jų išdėstymas. Sudarant programą, į impulsinio maitinimo išėjimą, antrojo ketvirčio metu, paduodami impulsai atvirkštine tvarka nei buvo pirmojo ketvirčio metu. Šiam uždaviniui realizuoti sudaroma impulsinė periodinė funkcija. Ji reikalinga tam, kad reikiamu metu būtų atidaromi VISSIM bloko „case“ išėjimai.

2.9 pav. pateikta funkcija sudaroma logikos pagrindu. Kol skaičiuojamas pirmo ketvirčio sinusinės įtampos plotas per pirmąjį žingsnį, generuojamas signalas „0“. Kai skaičiuojamas antrasis žingsnis, generuojamas signalas „1“. Toliau procesas vykdomas analogiškai. Pirmąjį periodo ketvirtį charakterizuoja impulsai 0-1-2-3. Norint realizuoti antrąjį periodo ketvirtį, impulsai suformuojami atvirkštine tvarka 3-2-1-0. Tokiu būdu per atitinkamą bloko „case“ kanalą praleidžiamas reikiamas

signalas. Trečiojo ir ketvirtojo periodo ketvirčio impulsai generuojami pakeičiant pirmojo ketvirčio amplitudinės vertės impulsus neigiamais, kurie patenka į bloko „case“ 4, 5, 6, 7 kanalus. Neigiamas impulsinės įtampos pusperiodis suformuojamas, kai į bloką „case“ ateina signalai 4-5-6-7-7-6-5-4.

Priklausomai nuo to, kokia funkcija paduodama į bloko „case“ nustatymo kanalą, atitinkama bus ir impulsinio maitinimo šaltinio išėjimo įtampa. Galima atlikti bandymus naudojant tik teigiamus pusperiodžius ar kas antrą periodo ketvirtį, ar simuliacijos procesą atlikti tik tam tikro periodo dalies ribose ir taip toliau. Viskas priklauso nuo to, kokį bandymą, kokių tikslumu ir kuriuo laiko momentu norima atlikti.



2.9 pav. VISSIM bloko „case“ kanalų atidarymo funkcija

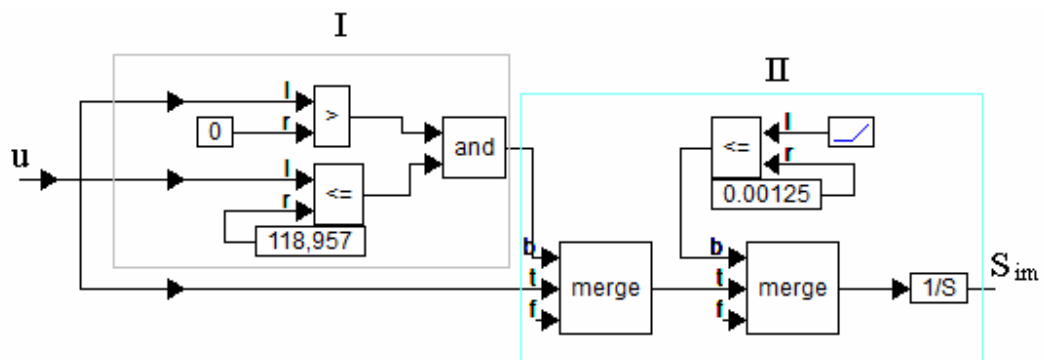
2.11. Impulsinio maitinimo šaltinio struktūrinės programavimo schemos sudarymas

VISSIM terpėje

Struktūrinę impulsinio maitinimo šaltinio programą galima suskirstyti į šias pagrindines funkcines dalis:

1. Sinusinės įtampos plotas nustatyto žingsnio ribose apskaičiavimas;
2. Amplitudinės impulso trukmės apskaičiavimas;
3. Nustatyto žingsnio impulso formavimas, kurį sudaro amplitudinis ir nulinis impulsai;
4. Bloko „case“ valdybos funkcijos sudarymas.

Kaip jau buvo aptarta, projektuojamo impulsinio maitinimo šaltinio algoritmo aprašyme po to, kai nustatomos sinusinės įtampos amplitudės ir dažnio vertės bei pasirenkamas norimas impulsų skaičius per periodą, reikia apskaičiuoti $m \cdot T_0$ (čia $m = 1, 2, 3, 4$) momentais momentines sinusinės įtampos vertes. 2.10 pav. pavaizduotas struktūrinės programos fragmentas, kuris paduotą į jėjimą sinusinę įtampą u , išėjime pateikia įtampos ploto vertę per nustatytą intervalą. Zonoje I, išėjimo signalas yra loginis “1” arba “0”. “1” generuojamas tol, kol sinusinės įtampos vertė kinta ribose $0 \text{ V} \div 118,957 \text{ V}$. Įtampos vertė $118,957 \text{ V}$ apskaičiuota $0,00125 \text{ s}$ momentu. Tai laikas, kada baigiasi pirmasis ir prasideda antrasis intervalas. Zonoje II vykdomas įtampos ploto skaičiavimas. Skaičiuojama tol, kol į pirmojo “merge” bloko jėjimą “b” ateina signalas “1”. Kad kompiuteris nebūtų apkrautas nereikalingu darbu, įvedamas antrasis blokas “merge”, kuris po pirmojo intervalo pabaigos generuoja signalą “0”, o tai reiškia, kad integravimo procesas nebevykdomas ir turima pastovi S_{im} vertė.

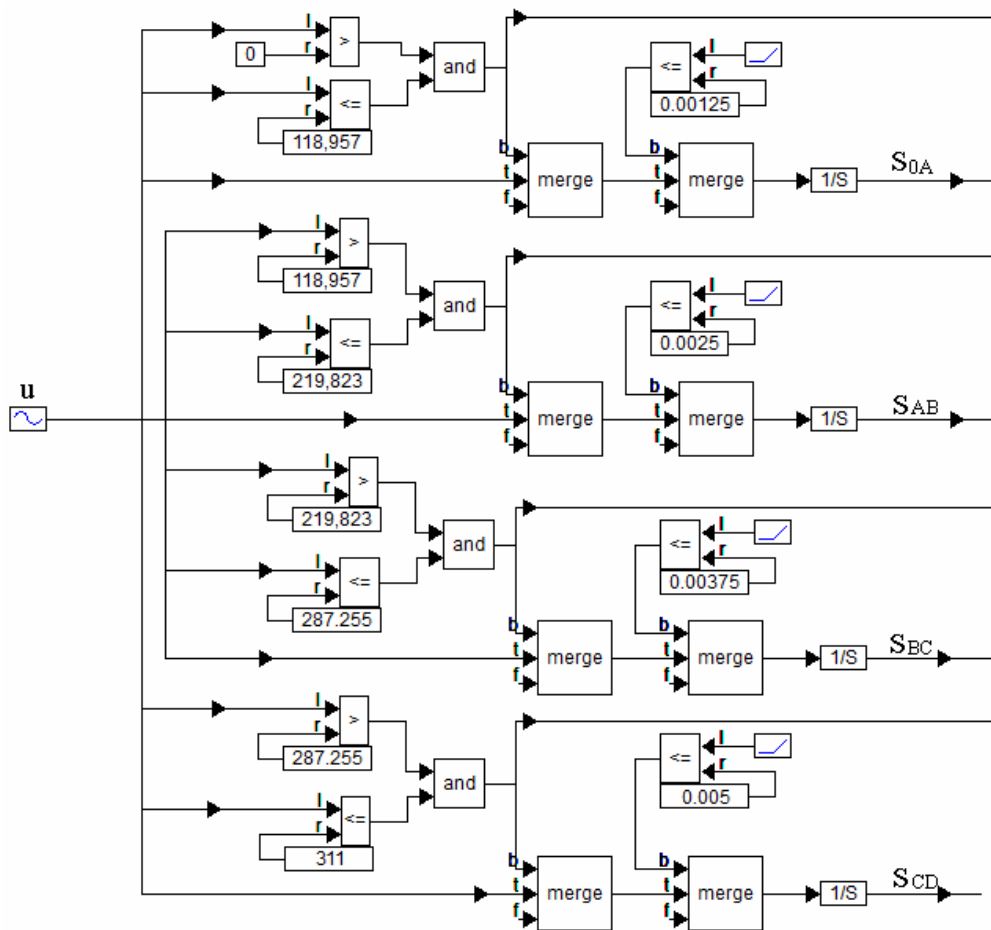


2.10 pav. Sinusinės įtampos ploto per nustatytą intervalą skaičiavimas

Priklausomai nuo to, kiek įtampos impulsų per pusperiodį pasirinkta, priklauso 2.10 pav. pateiktų blokų skaičius. Jei pasirinktas impulsų skaičius per pusperiodį lyginis, tuomet šių blokų skaičius bus lygus $\frac{1}{4}$ impulsų skaičiui per pusperiodį, priešingu atveju – $\frac{1}{2}$. Atitinkamai didės ir kitų reikalingų blokų skaičius.

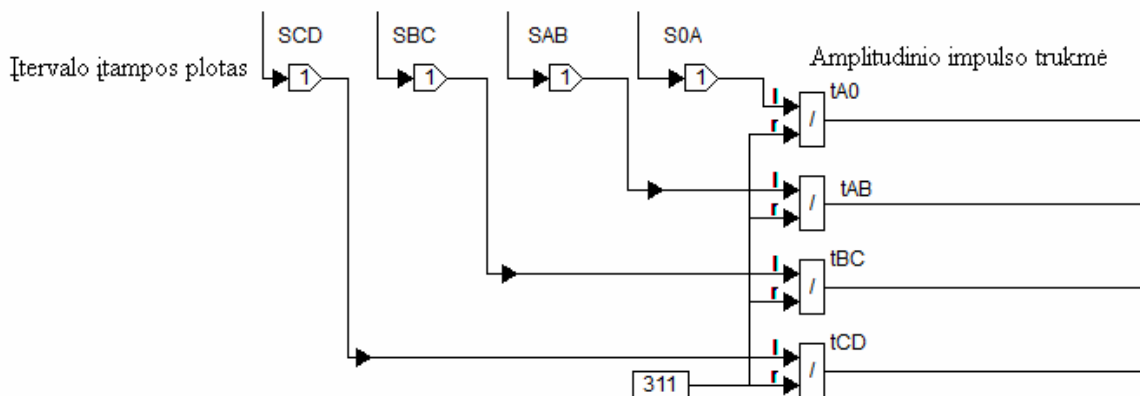
2.11 pav. pavaizduota projektuojamo impulsinio maitinimo šaltinio struktūrinės programos dalis, kuri skaičiuoja sinusinės įtampos plotą per nustatytą intervalą. $S_{OA}, S_{AB}, S_{BC}, S_{CD}$ rezultatai paduodami į amplitudinio impulso trukmės skaičiavimo dalį, kurios struktūrinė programa pateikta 2.11 pav. Impulsų intervalas per periodą yra 16, taigi pusperiodžio intervalų skaičius lygus 8. Sinusinė įtampa yra simetriška, todėl pakanka skaičiuoti tik pirmą sinusinės įtampos pusperiodžio ketvirtį.

Pirmos zonos 2.10 pav. loginis išėjimo signalas taip pat panaudojamas bloko „case“ valdymo funkcijai sudaryti 2.11 pav.



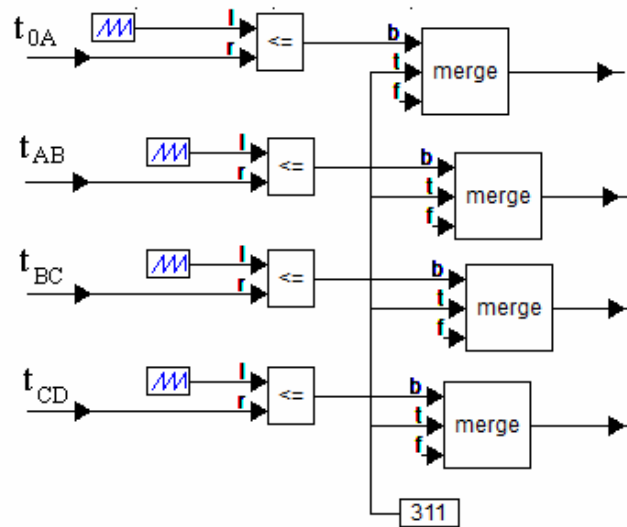
2.11 pav. Sinusinės įtampos ploto per nustatytą intervalą skaičiavimo struktūrinė schema

2.11 pav. pavaizduoti apskaičiuotų intervalų plotų sumos rezultatai S_{0A} , S_{AB} , S_{BC} , S_{CD} patenka į amplitudinės vertės impulso trukmės skaičiavimo dalį, kuri pavaizduota 2.12 pav.



2.12 pav. Amplitudinio impulso trukmės skaičiavimo struktūrinė programa

Apskaičiuotos intervalų trukmės toliau naudojamos amplitudiniam ir nuliniam impulsui formuoti. Struktūrinė programavimo schema pavaizduota 2.13 pav.



2.13 pav. Struktūrinė programa, skirta amplitudinių ir nulinių impulsų formavimui per pasirinktą intervalą

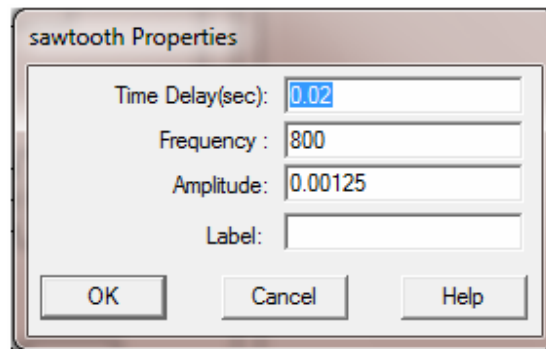
Bloko „merge“ išėjime galimi du išėjimo signalai. Tai amplitudinė vertė arba nulinė vertė. Amplitudinė vertė išėjime bus tuo metu, kai į „merge“ bloko „b“ įėjimą ateinantis signalas bus lygus „1“. Sąlygos blokas mažiau arba lygu lygina funkcijos, kurios vertė adekvati laikui, vertę su apskaičiuota amplitudinio impulso trukme. Kol sąlyga tenkinama, „merge“ bloko išėjime bus amplitudinis signalas, o kai sąlyga netenkinama – generuojamas nulinis signalas. 2.13 pav. pavaizduotos struktūrinės schemas „merge“ bloką išėjimas patenka į bloko „case“ atitinkamus kanalus.

VISSIM aplinkoje periodinė funkcija realizuojama bloko „sawtooth“ dėka. Bloko išėjime generuojami periodiniai stačiojo trikampio formos impulsai, kurio įžambinės vertė adekvati laikui. Kad būtų tenkinama įžambinės vertės lygybė laiko skaitinei vertei, reikia atlikti bloko nustatymus.

Skiltyje „Time Delay (sec):“ pagal programos kūrėjų nustatymus visada bus lygus „0“. Modeliuojant VISSIM aplinkoje šiame darbe pateikiamą impulsinį maitinimo šaltį, vėlinimo skiltyje reikia nurodyti naudojamos sinusinės įtampos periodo trukmę sekundėmis, nes turi būti pasibaigę amplitudinės vertės impulso trukmės skaičiavimai. Vėlinimo skiltyje periodo trukmė nurodoma tik pirmam blokui, kurio vertę lygina su t_{0A} signalu. t_{AB} signalas generuojamas antrojo intervalo metu, tad prie periodo reikia pridėti intervalo trukmę. Analizuojamu atveju, antrojo intervalo generavimui, „sawtooth“ bloko vėlinimo skiltyje įrašoma 0,002125. Toliau kitiems blokams vėlinimo trukmė didinama analogiškai.

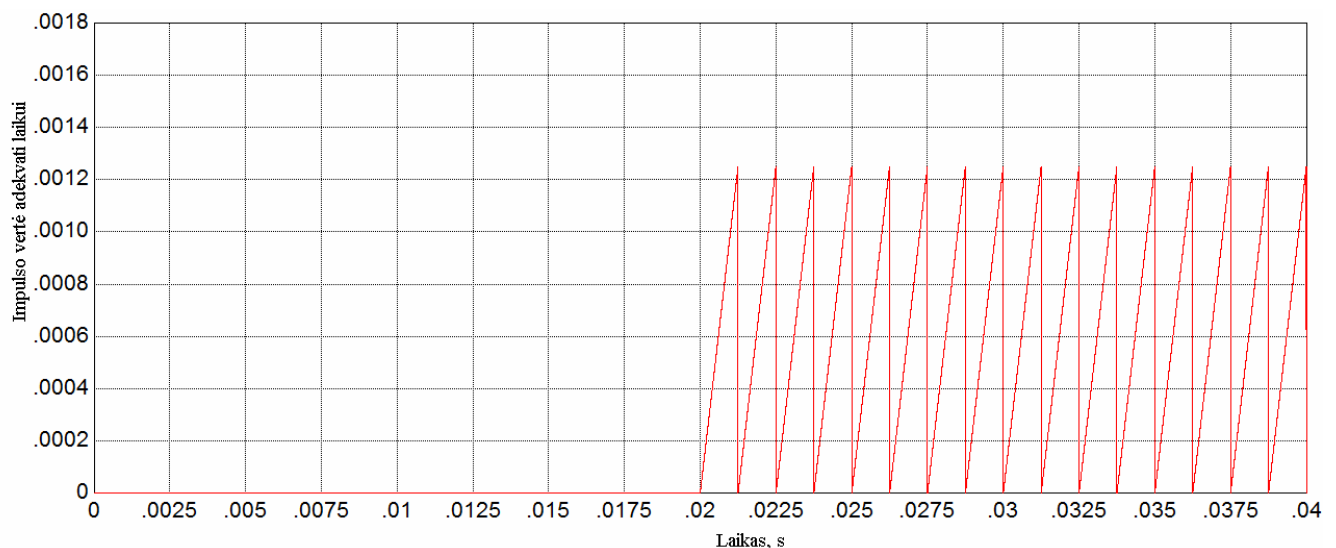
Dažnio skiltyje „Frequency“ nurodomas impulsų dažnis, kuris apskaičiuojamas pasirinktą įtampos impulsų skaičių padauginus iš naudojamos sinusinės įtampos dažnio (Hz).

Norint gauti funkciją, kurios įžambioji dalis adekvati laikui, skiltyje „Amplitude“ įrašoma t_{im} vertė.



2.14 pav. VISSIM bloko „sawtooth“ nustatymai

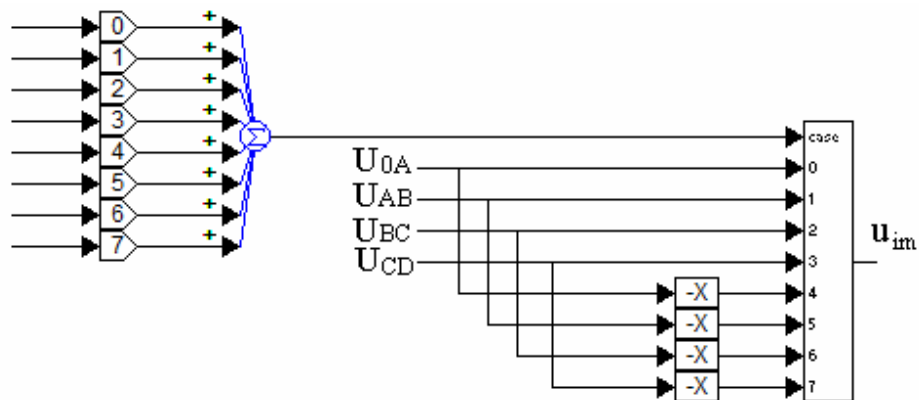
Jei viskas atlikta teisingai, „sawtooth“ bloko išėjime turi būti gaunamas signalas, kaip pavaizduota 2.15 pav. Grafike matome, kad pirmo periodo metu, impulsai negeneruojami, nes vyksta amplitudinių impulsų trukmės skaičiavimas. Todėl, prieš atliekant tiriamąjį švytuojamojo sinchroninio variklio modeliavimą, turi būti įvesta proceso vėlinimo trukmė, priešingu atveju išeis neteisingas pereinamojo proceso rezultatas.



2.15 pav. VISSIM bloko „sawtooth“ išėjimo signalas

VISSIM bloko „case“ veikimas panašus į tranzistoriaus veikimo principą. Į bloko „case“ valdymo signalo įėjimą „case“ padavus signalą, kurio vertė „3“, išėjime turėsime informaciją, kuri ateina į „3“

kanalą. Todėl reikia sudaryti funkciją, kurios reikšmės kistų šuoliu ir turėtų sveikas vertes. Be to, funkcijos intervalų trukmė turi būti lygi trukmei, kuri buvo pasirinkta sprendžiant impulsų skaičių per periodą. Akivaizdu, kad pagal aukščiau atliktus žingsnius, norint impulsinio maitinimo šaltinio išėjime gauti impulsinę įtampą adekvačią sinusinei, reikia sudaryti „case“ bloko valdymo funkciją, kuri laiko intervale $T_i \div T_j$ ($i = 0, 1, 2, \dots, 15$; $j = 1, 2, 3, \dots, 16$) kistų žingsniu 0,00125 ir įgytų reikšmes tokia seka: 0, 1, 2, 3, 3, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 7, 6, 5, 4.

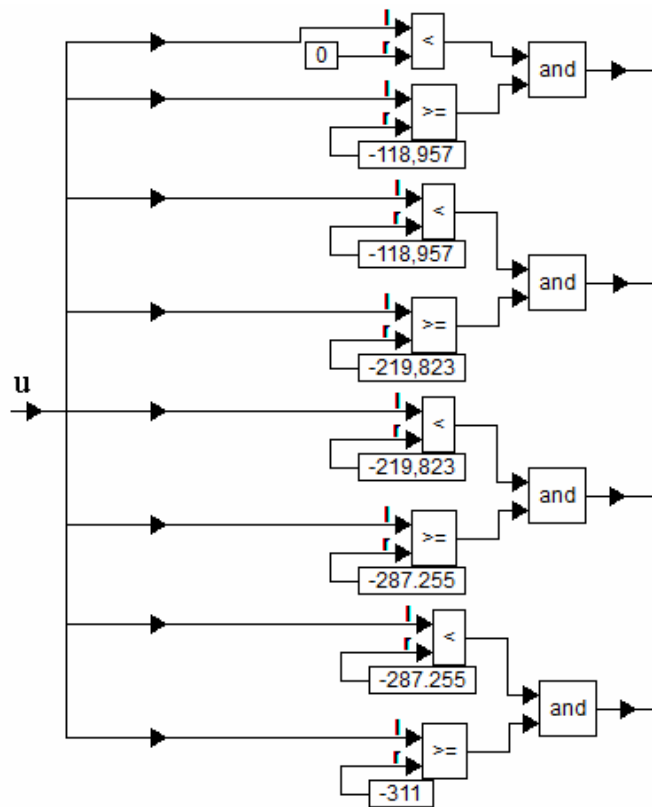


2.16 pav. VISSIM „case“ bloko valdymo funkcijos generavimas

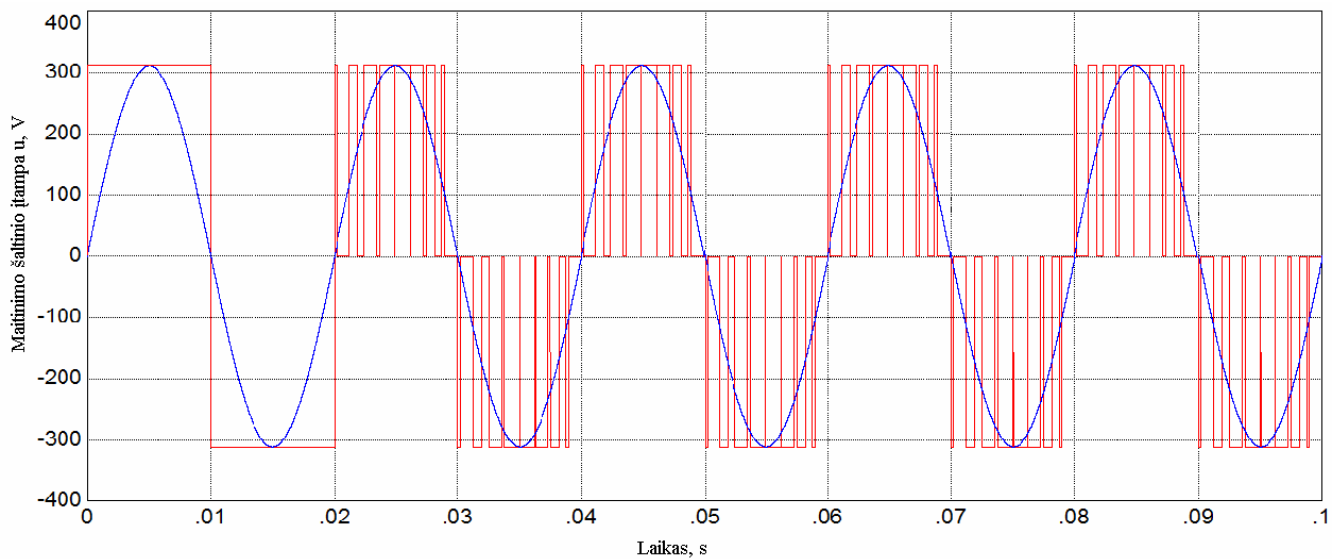
Informaciją apie vieno intervalo pradžią ir pabaigą teikia 2.10 pav. I zonoje pavaizduotas grandies loginis išėjimas. Išėjimo signalas padauginamas iš tokio koeficiento, kad reikiamu laiko momentu blokas „case“ praleistų informaciją pro reikiamą kanalą. 2.16 pav. pavaizduota struktūrinė programavimo schema bloko „case“ valdymo signalui generuoti. Kanalai 0, 1, 2, 3 apdoroja teigiamo pusperiodžio informaciją, todėl iškyla problema, kaip programa turi atpažinti, kada prasideda ir, kada baigiasi neigiamas pusperiodis. Šios problemos sprendimui tenka panaudoti schemą 2.17 pav. Panaudojant anksčiau apskaičiuotas momentines įtampos vertes bei atitinkamai pertvarkius sąlygos blokus, gaunama informacija apie neigiamą sinusinės įtampos pusperiodį. Schemos veikimas analogiškas kaip ir skaičiuojant teigiamą pusperiodį. Loginio elemento „and“ išėjimo signalai atitinkamai padauginami iš 4, 5, 6, 7.

Neigiamo pusperiodžio metu amplitudinės ir vertės signalų formavimas nevykdomas. Paimama anksčiau gauta informacija apie impulso trukmę, o amplitudinis impulsas padauginamas iš „-1“.

Jei teisingai atlikti struktūrinės programos blokų nustatymai, tai impulsinio maitinimo išėjime gausime rezultatą, pavaizduotą 2.18 pav. Paveiksle pateiktas ir sinusinės įtampos grafikas, kad būtų galima įvertinti gautą rezultatą. VISSIM programos „simulation“ nustatymuose rekomenduojama nustatyti $1 \cdot 10^{-6}$ skaičiavimo žingsnį. Jei žingsnis bus mažesnis, tai rezultatai gali turėti dideles paklaidas, priešingu atveju – simuliacijos proceso trukmė gerokai pailgėja, o tai nenaudinga, kai greitai norimi gauti dominantys tikslūs rezultatai.



2.17 pav. VISSIM struktūrinė programa, sinusinės įtampos neigiamo pusperiodžio intervalų pradžios ir pabaigos nustatymui



2.18 pav. Sinusinės tolydžios (mėlyna spalva) ir impulsinės stačiakampės formos įtampos grafikai

5. VIRTUALUS EKSPERIMENTAS

5.1. Sudaryto reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio modelio analizės pradinės sąlygos

Virtualaus eksperimento tikslas – nustatyti, kaip reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio srovė ir švytuoklės koordinatės kitimas priklauso nuo maitinimo šaltinio įtampos formos.

Atlikti keturi virtualūs eksperimentai.

- I. Maitinio šaltinio įtampa – tolydi, sinusinės formos.
- II. Maitinimo šaltinio įtampa – stačiakampės formos, suformuotos impulsiniu – platuminiu principu. Impulsų skaičius per periodą – 8.
- III. Maitinimo šaltinio įtampa – stačiakampės formos, suformuotos impulsiniu – platuminiu principu. Impulsų skaičius per periodą – 16.
- IV. Maitinimo šaltinio įtampa – stačiakampės formos, suformuotos impulsiniu – platuminiu principu. Impulsų skaičius per periodą – 32.

Realaus variklio techniniai parametrai, reikalingi sudaryto reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio analizei, pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Techniniai variklio parametrai

m [kg]	r [Ω]	R [Ns/m]	C [N/m]	K [2450]	H_m [m]
0,034	640	8	11000	2450	$0,9699 \cdot 10^{-3}$

Pradinės sąlygos:

1. Diskretizavimo žingsnis - $1 \cdot 10^{-6}$ s.
2. Sinusinės įtampos maitinimo šaltinio įtampos amplitudinė vertė – 311 V.
3. Sinusinės įtampos dažnis – 314 rad^{-1} .

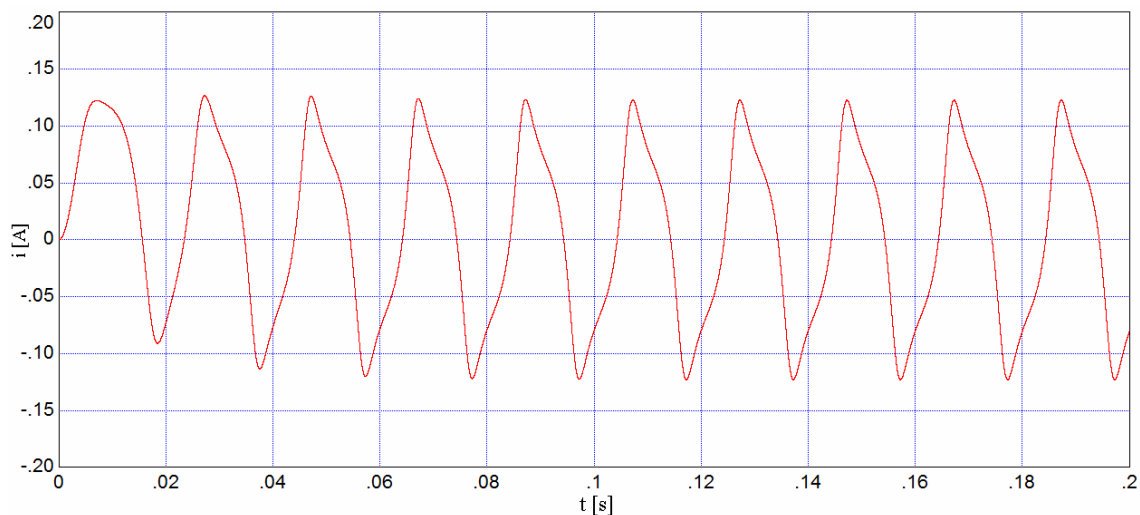
3.2. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio modeliavimo VISSIM terpėje rezultatai

3.2.1. I virtualus eksperimentas

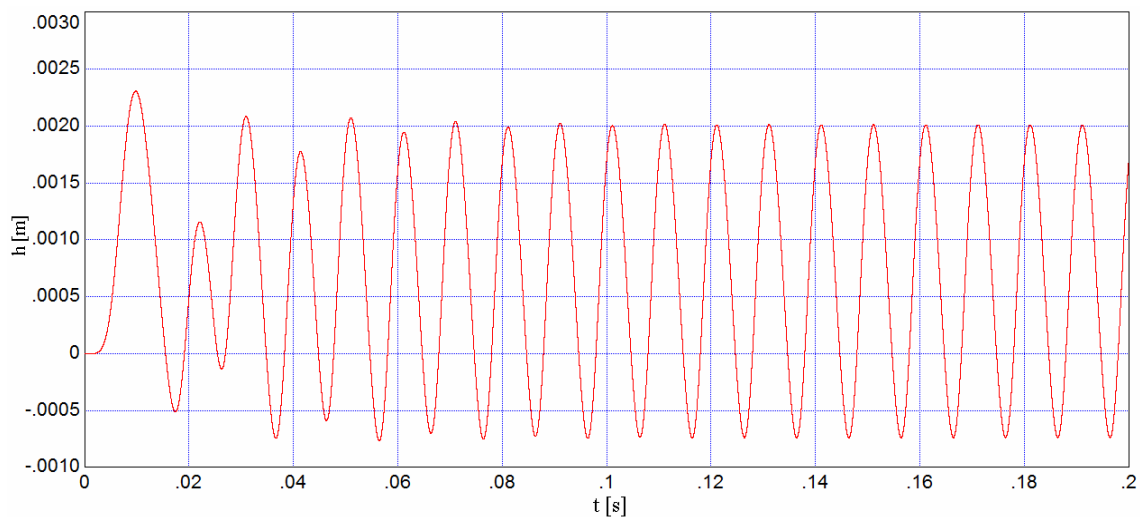
Maitinio šaltinio įtampa – tolydi, sinusinės formos. Modeliavimo metu gauti integraliniai energetiniai parametrai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. I- ojo virtualaus eksperimento metu gautų energetinių parametų vertės.

P [W]	Q [Var]	S [VA]	Cosφ
6,90	15,7	17,2	0,40



3.1 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio srovės grafikas I- ojo eksperimento metu



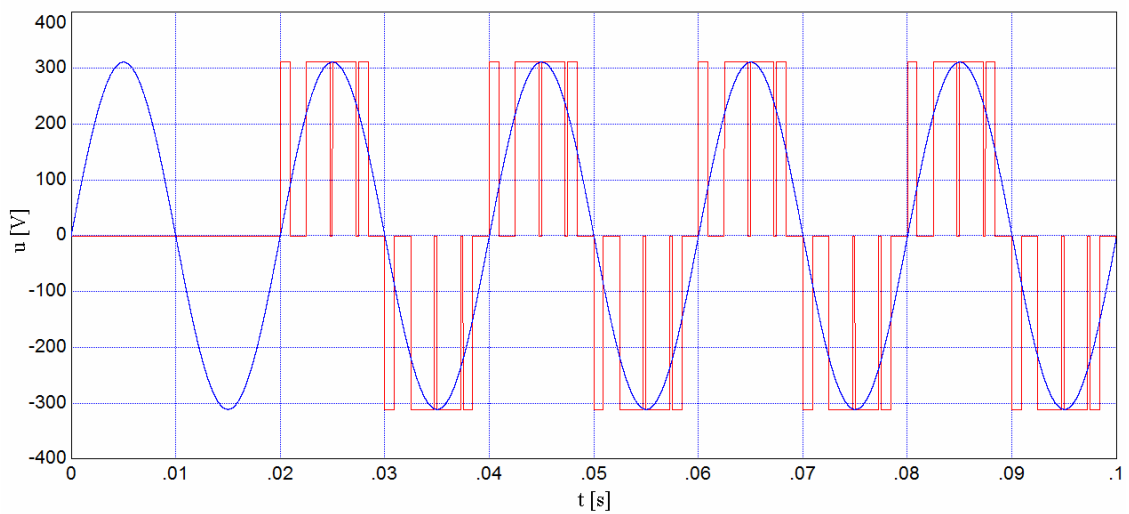
3.2 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio švytuoklės koordinatės kitimo grafikas I- ojo eksperimento metu

3.2.2. II virtualus eksperimentas

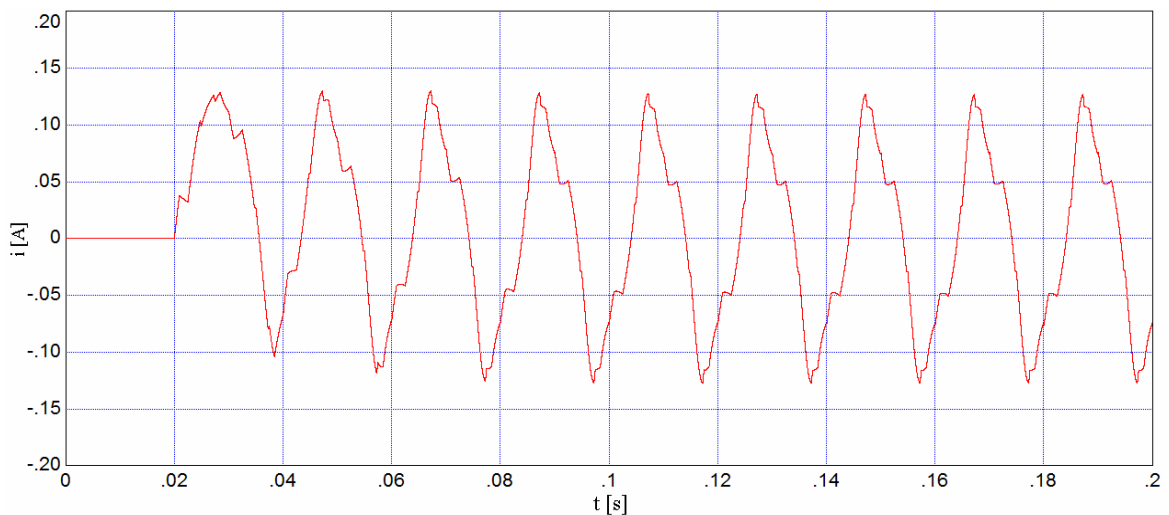
Maitinimo šaltinio įtampa – stačiakampės formos, suformuotos impulsiniu – platuminiu principu. Impulsų skaičius per periodą – 8. Modeliavimo metu gauti integraliniai energetiniai parametrai pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. II- ojo modeliavimo metu gautų energetinių parametų vertės.

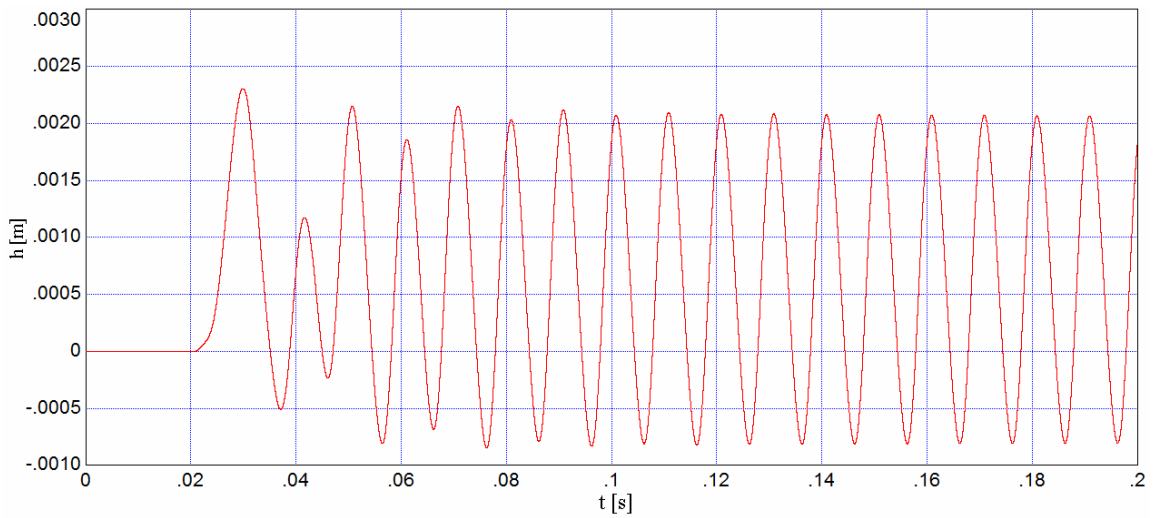
P [W]	Q [Var]	S [VA]	Cosφ
7,07	17,6	19,0	0,37



3.3 pav. Maitinimo šaltinio įtampos grafikas II- ojo eksperimento metu



3.4 pav. Reaktyviojo synchroninio švytuojamojo variklio srovės grafikas II-ojo eksperimento metu



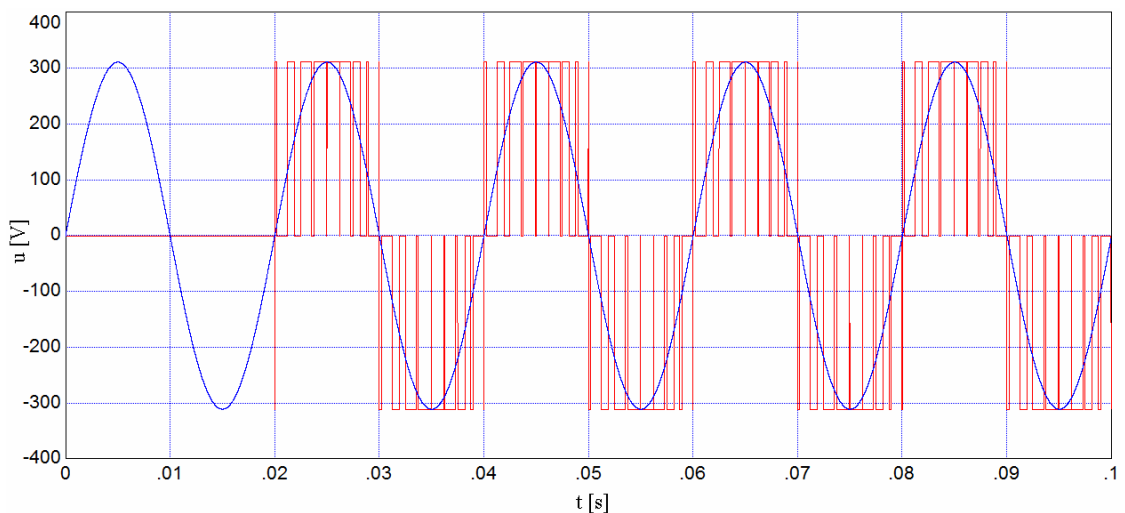
3.5 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio švytuoklės koordinatės kitimo grafikas II- ojo eksperimento metu

3.2.3. III virtualus eksperimentas

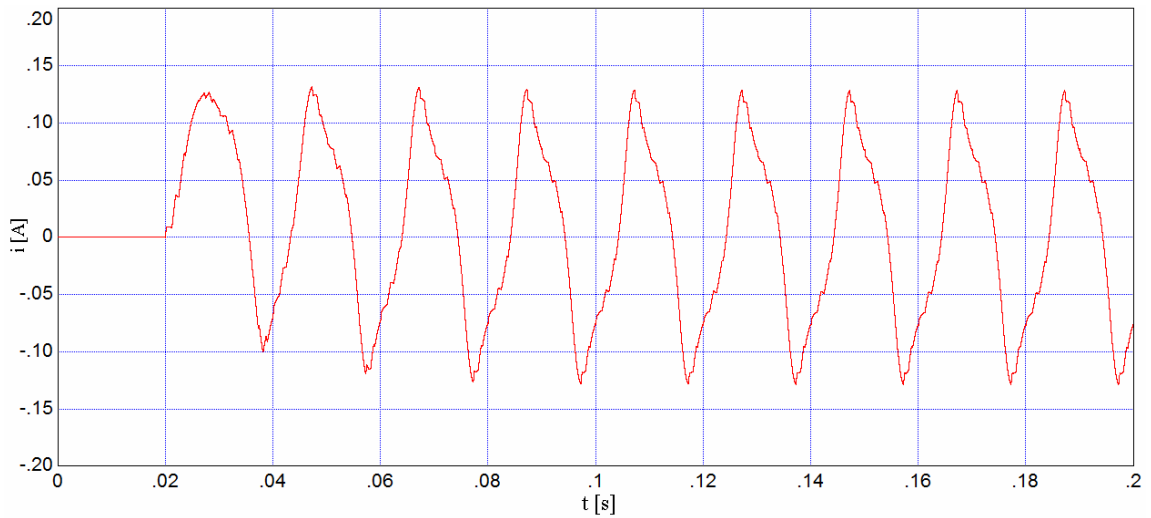
Maitinimo šaltinio įtampa – stačiakampės formos, suformuotos impulsiniu – platuminiu principu. Impulsų skaičius per periodą – 16. Modeliavimo metu gauti integraliniai energetiniai parametrai pateikti 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. III- ojo modeliavimo metu gautų energetinių parametų vertės.

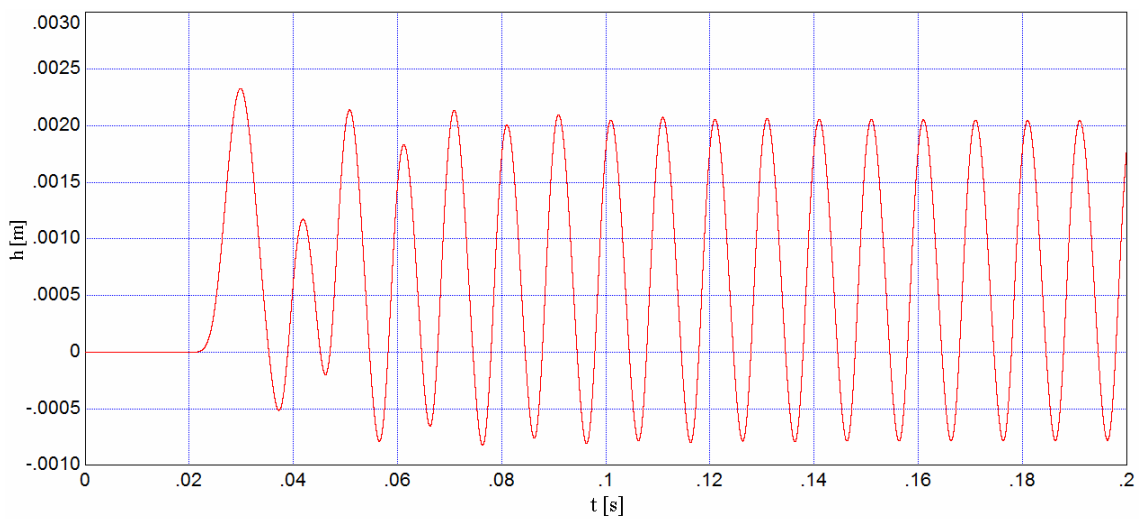
P [W]	Q [Var]	S [VA]	Cosφ
7,11	17,9	19,29	0,37



3.6 pav. Maitinimo šaltinio įtampos grafikas III- ojo eksperimento metu



3.7 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio srovės grafikas III- ojo eksperimento metu



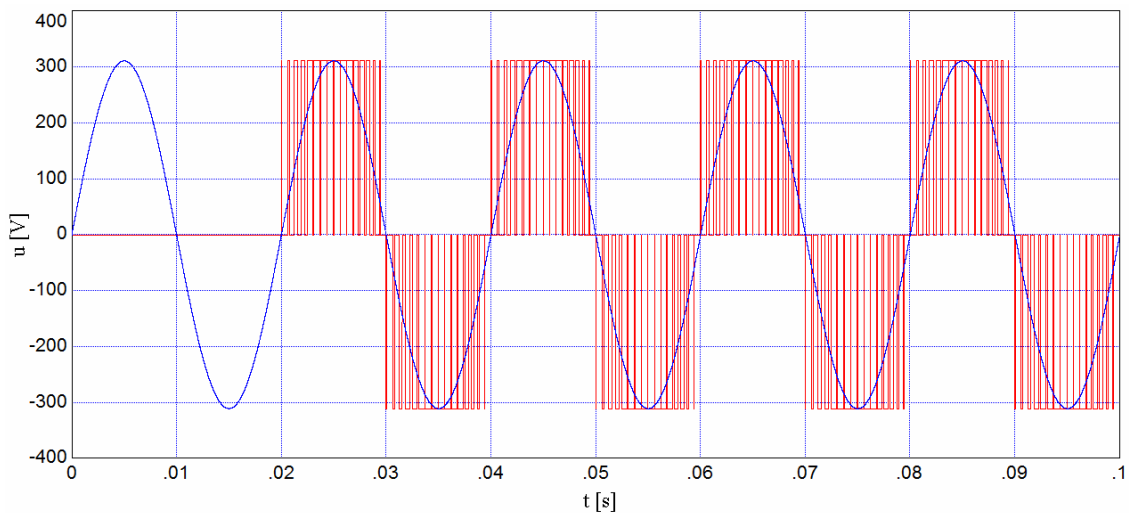
3.8 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio švytuoklės koordinatės kitimo grafikas III- ojo eksperimento metu

3.2.4. IV virtualus eksperimentas

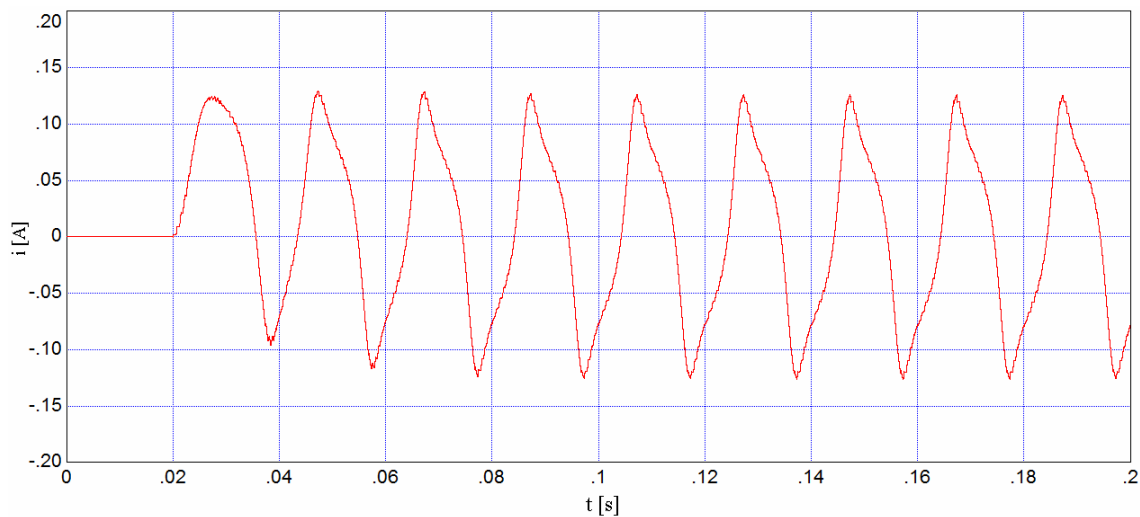
Maitinimo šaltinio įtampa – stačiakampės formos, suformuotos impulsiniu – platuminiu principu. Impulsų skaičius per periodą – 32. Modeliavimo metu gauti integraliniai energetiniai parametrai pateikti 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. IV- ojo modeliavimo metu gautų energetinių parametrų vertės.

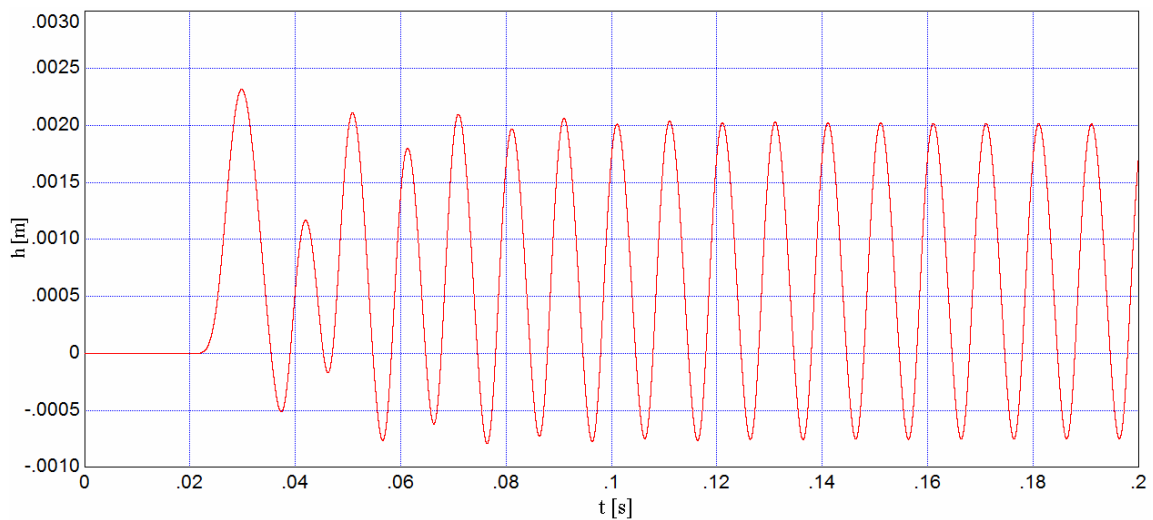
P [W]	Q [Var]	S [VA]	Cosφ
6,97	18,0	19,3	0,36



3.9 pav. Maitinimo šaltinio įtampos grafikas IV- ojo eksperimento metu



3.10 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio srovės grafikas IV- ojo eksperimento metu



3.11 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio švytuoklės koordinatės kitimo grafikas IV- ojo eksperimento metu

3.3. Reaktyviojo švytuojamojo sinchroninio variklio modeliavimo VISSIM rezultatų palyginimas

Modeliavimo metu gauti rezultatai, kai naudojamas impulsinės įtampos šaltinis, lyginami su rezultatais, gautais modeliuojant sistemą, kai maitinimo įtampa sinusinės formos. Siekiama nustatyti, kokią įtaką reaktyviųjų švytuojamųjų variklių darbui turi suprojektuoto impulsinio maitinimo šaltinio panaudojimas.

3.3.1. Energetinių parametų palyginimas

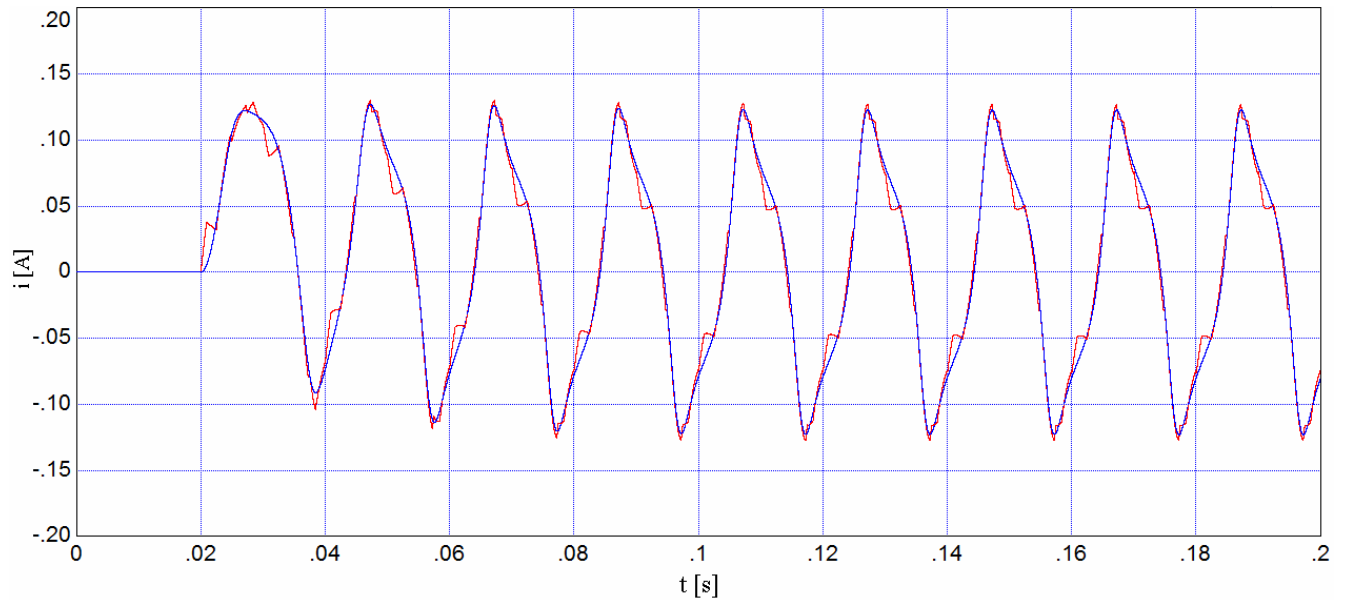
Energetinių parametų palyginimas pateiktas 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. I, II, III, IV virtualaus eksperimento metu gautų energetinių parametų palyginimas

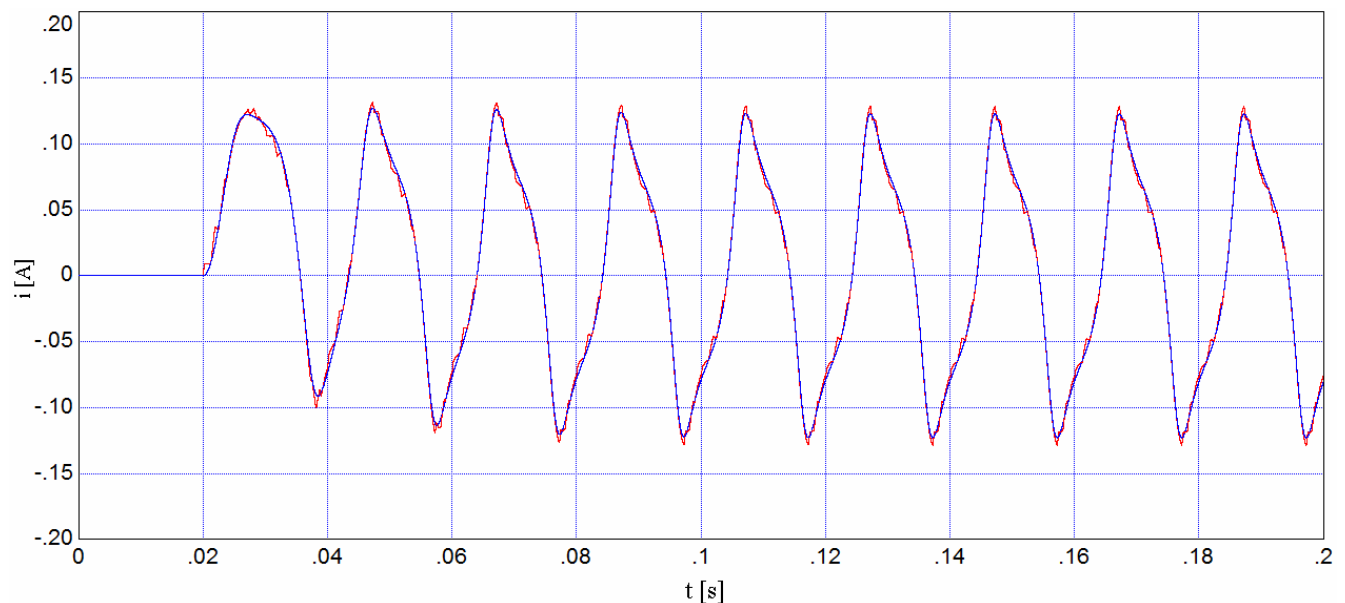
Parametras	I modeliavimas	II modeliavimas	III modeliavimas	IV modeliavimas
	Rezultatas	Rezultatas	Rezultatas	Rezultatas
S [VA]	17,2	19,0	19,29	19,3
P [W]	6,90	7,07	7,11	6,97
Q [Var]	15,7	17,6	17,9	18,0
cosφ	0,40	0,37	0,37	0,36

3.3.2. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio srovės kitimo grafinis palyginimas

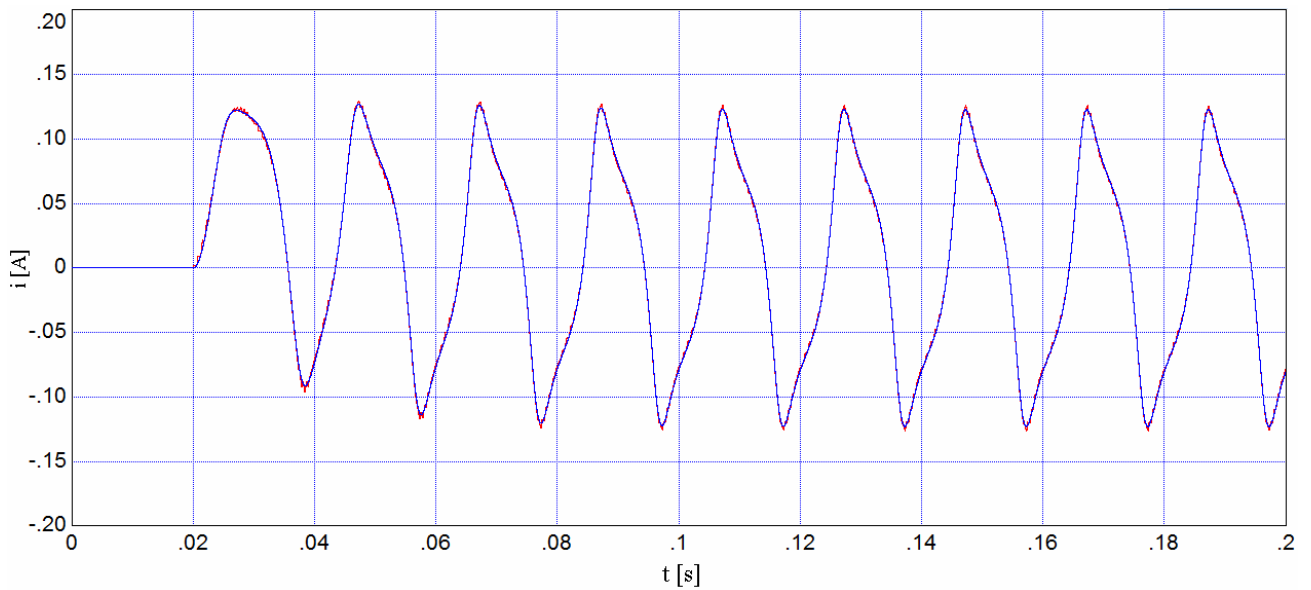
3.12 pav., 3.13 pav., 3.14 pav. mėlynos spalvos srovės grafikas vaizduoja srovės kitimą, kai maitinimo šaltinio įtampa yra sinusinės formos, o raudonos spalvos, kai maitinimo šaltinio įtampa yra impulsinės formos.



3.12 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio srovės grafikų, gautų atlikus I ir II eksperimentus, palyginimas



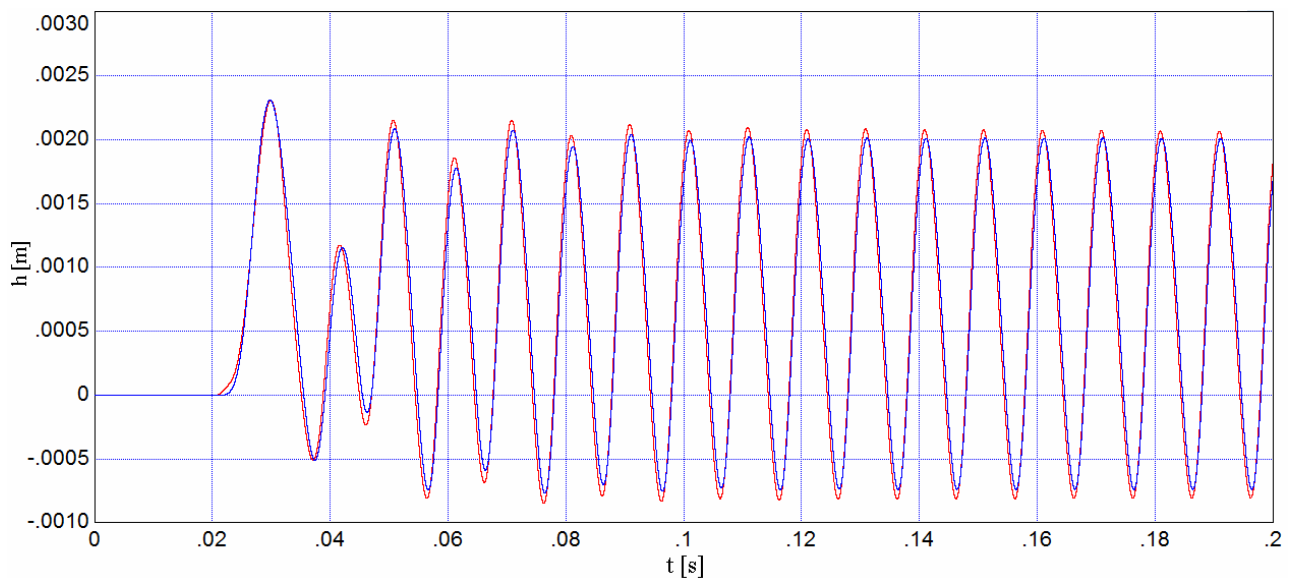
3.13 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio srovės grafikų, gautų atlikus I ir III eksperimentus, palyginimas



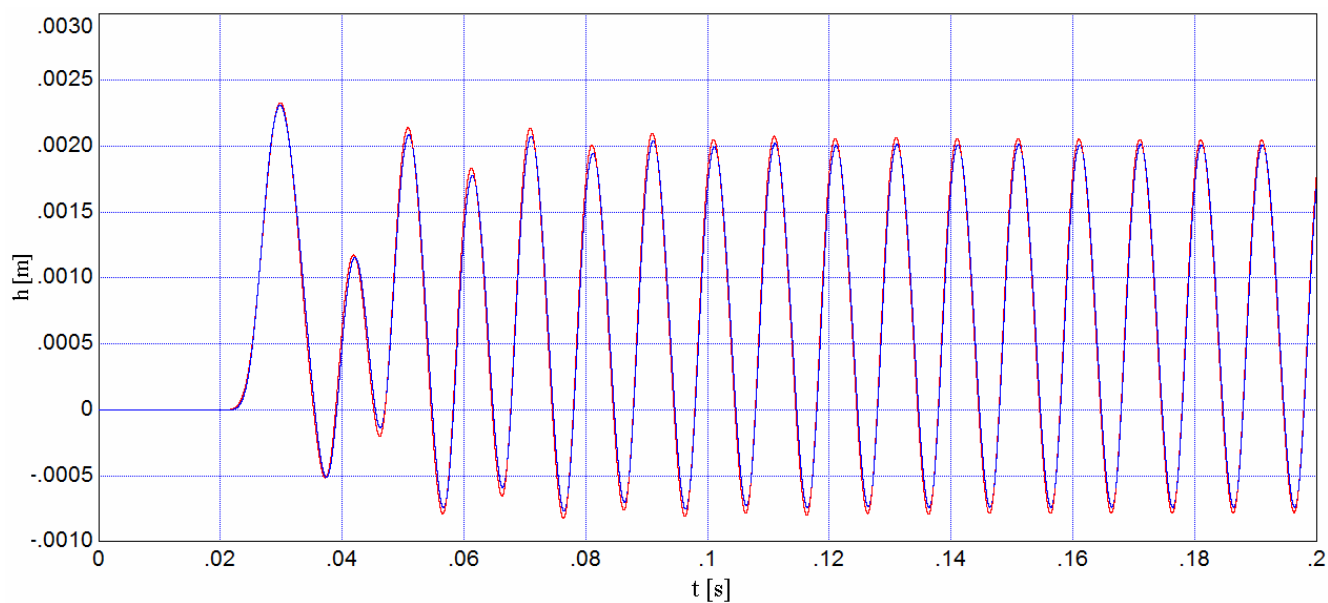
3.14 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio srovės grafiku, gautų atlikus I ir IV eksperimentus, palyginimas

3.3.3. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio švytuoklės koordinatės kitimo grafinis palyginimas

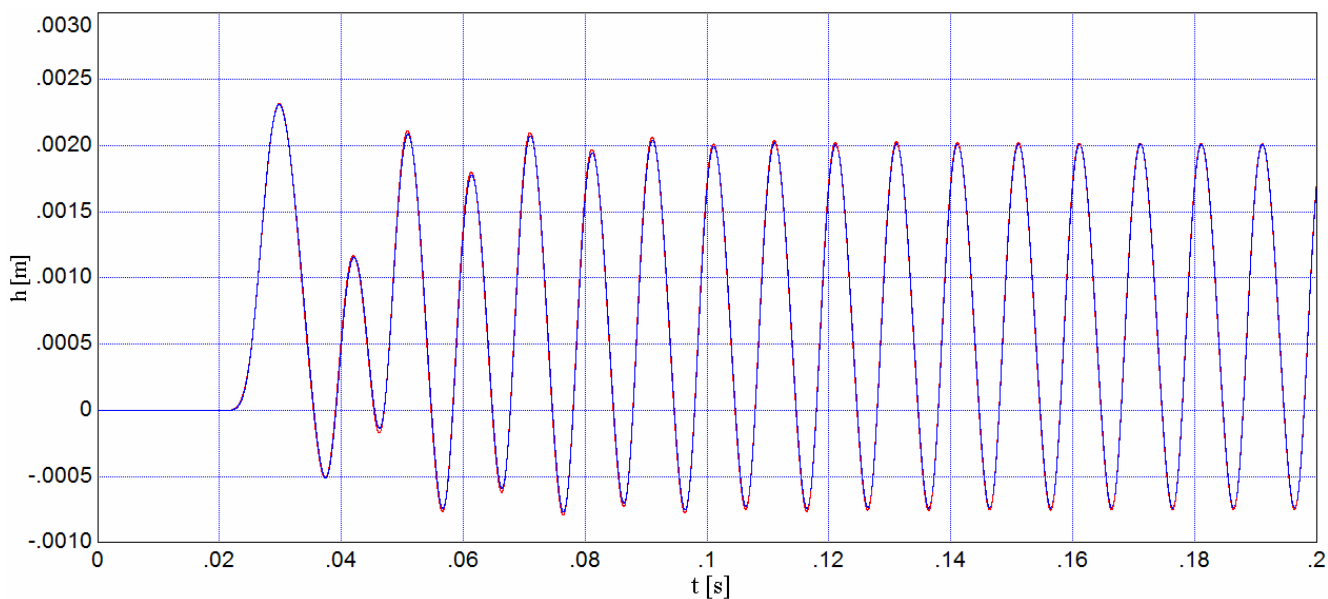
3.15 pav., 3.16 pav., 3.17 pav. mėlynos spalvos švytuoklės koordinatės kitimo grafikas vaizduoja koordinatės kitimą, kai maitinimo šaltinio įtampa yra sinusinės formos, o raudonos spalvos, kai maitinimo šaltinio įtampa yra impulsinės formos.



3.15 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio švytuoklės koordinatės kitimo grafiku, gautų atlikus I ir II eksperimentus, palyginimas



3.16 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio švytuoklės koordinatės kitimo grafiku, gautų atlikus I ir III eksperimentus, palyginimas



3.17 pav. Reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio švytuoklės koordinatės kitimo grafiku, gautų atlikus I ir IV eksperimentus, palyginimas

Baigiamojo magistro darbo prieduose (kompaktiniame diske) pateiktos struktūrinės programos VISSIM terpėje, kurios buvo naudotos atliekant aukščiau aprašytus virtualius eksperimentus.

4. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Atlikus literatūros apžvalgą pagal pasirinktą magistro baigiamojo darbo temą, susidurta su literatūros stokos problema. Lyginant su kitomis elektros mašinomis, švytuojamųjų elektros mašinų klasėje aprašomosios literatūros gerokai mažiau. Tai sukelia nepatogumų, kai norima pasirinkti optimalų tyrimo metodą, pagrįsti daromas išvadas.
2. Sudarytas reaktyviojo sinchroninio variklio matematinis modelis pagrįstas lygtimis, nurodytomis S. Kudarausko „Švytuojamosios elektros mašinos“ knygoje, tad galima daryti prielaidą, kad lygtys yra teisingos, o modeliuojant gaunami teisingi rezultatai, jei teisingai įrašyti techniniai variklio parametrai ir nustatytos tinkamos pradinės sąlygos.
3. Sudaryta struktūrinė programa, pagal reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio matematinį modelį, VISSIM terpėje leidžia greitai gauti koordinatės kitimo ir variklio srovės grafikus. Tai ženkliai sutrumpina laiką, kai norima sužinoti, kaip variklio srovė ar švytuoklės švytavimai priklauso nuo maitinimo įtampos ar variklio techninių parametrų.
4. Suprojektuoto maitinimo šaltinio įtampos adekvatumą tolydžiai sinusinei įtampai liudija 3.3, 3.6, 3.9 paveikslai. Iš grafikų matyti, kad pavyko suprojektuoti maitinimo šaltinį formuojanti stačiakampius įtampos impulsus impulsiniu – platuminiu principu, o įtampos efektinė įtampa ir įtampos pasiskirstymas per periodą adekvatus tolydžiai sinusinei įtampai.
5. Naudojant sudarytą maitinimo šaltinio modelį, reaktyviojo sinchroninio švytuojamo variklio galia apskaičiuojama didesnė, o naudingumo koeficientas mažesnis, nei naudojant maitinimo šaltinį, kurio išėjime tolydžios sinusinės formos įtampa.
6. Kuo didesnis sudaryto maitinimo šaltinio įtampos impulsų skaičius per periodą, tuo srovės ir koordinatės kitimo grafikas artimesnis rezultatui, kuris gaunamas naudojant sinusinės formos įtampą.
7. Pateiktas struktūrinės, reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio ir impulsinio maitinimo, programavimo schemas VISSIM terpėje, su nedideliais pakeitimas, galima pritaikyti kitoms struktūrinio programavimo kalboms. Šį išvada daroma remiantis tuo, kad struktūrinio programavimo schemoms sudaryti panaudoti klasikiniai struktūrinio programavimo blokai.
8. Šiame baigiamajame darbe pateiktos originalios schemas. Struktūrinės programos lengvai koreguojamos, tad esant reikalui galima greitai pertvarkyti, patobulinti struktūrinę programą.
9. Sudarytus maitinimo šaltinio ir reaktyviojo sinchroninio švytuojamojo variklio modelius galima panaudoti kaip įrankį atliekant virtualius eksperimentus, panaudoti sudarytos programos dalis kitose programose. Taip inžinieriui, mokslininkui sutaupant brangaus laiko.

NAUDOTOS LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. *Kudarauskas S.* Švytuojamosios elektros mašinos: Knyga skirsta elektros mašinų ir pavarų, elektromechanikos, mechatronikos, mechatronikos bei mechanikos specialistams, ypač šių disciplinų dėstytojams, doktorantams studentams. – Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, 2008. – 302 p.
2. *A. Brazaitis* Dinaminių sistemų modeliavimas: Mokomoji knyga. Laboratoriniai darbai elektros inžinerijos magistrantams. – Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, 2007. – 219 p.
3. Švytuojančio judesio elektros variklių tyrimas. Mokslinio – tiriamojo darbo ataskaita / KPI; temos vadovas S. Kudarauskas. – Klaipėda, 1975.- 83 p.
4. *L. Urmonienė, S. Gečys, E. Guseinovicė, V. Cirtautas* Švytuojamųjų sinchroninių pulsuojamiosios srovės variklių energetinių parametrų tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2011. – Nr. 4(110). – p. 17-20.
5. *V. Jankūnas, D. Eidukas, E. Guseinovicė, V. Cirtautas* Mechatroninės tiesiaieigės pavaros elektrinio maitinimo galimybių tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2009. – Nr. 5(93). – p. 25-28.
6. *V. Jankūnas, E. Guseinovicė, L. Urmonienė* Švytuojamojo judesio mechatroninės pavaros fizinio ir matematinio modelių adekvatumo tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2008. – Nr. 7(87). – P. 69-72.
7. *A. Brazaitis, E. Guseinovicė* Mechatroninių įtaisų aktyvatorių valdymas, informaciją perduodant realaus laiko signalu // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2008. – Nr. 2(90). – P. 89-94.
8. *A. Senulis, E. Guseinovicė, V. Jankūnas, L. Urmonienė, A. Andziulis, R. Didžiokas* Švytuojamojo pulsuojamiosios srovės variklio – bespyruoklinio kompresoriaus švytavimų centro poslinkio eksperimentinis tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2007. – Nr. 7(79). – P. 63-66.
9. *S. Kudarauskas, L. Simanygienė* Ryškiapolės sinchroninės mašinos vektorinės diagramos ir ekvivalentinės schemos plėtojimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2007. – Nr. 6(78). – P. 13-16.
10. *A. Brazaitis, E. Guseinovicė* Švytuojamųjų pavarų automatizuoto projektavimo matematinis modelis // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2006. – Nr. 6(70). – P. 19-22.

11. *E. Guseinoviėnė, L. Simanyniėnė, A. Senulis, S. Kudarauskas* Specialiųjų elektros mašinų magnetiniai laukai ir magnetinės grandinės // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 4(46). – P. 74-77.
12. MathWorks internetinė svetainė.–Tekstas angl.k. www.mathworks.se (2012-04-01)
13. Visual Solutions, Incorporated internetinė svetainė.-Tekstas angl. k. www.vissim.com (2012-04-01)
14. CENTAURUS modeliavimo galimybės.–Tekstas liet., k. <http://ediadlit.vtk.ktu.lt> (2012-04-22)
15. Generic Logic internetinė svetaitė.–Tekstas angl.k. <http://www.genlogic.com/index.html> (2012-04-22)
16. *R. Čiegis* Diferencialinių lygčių skaitiniai sprendimo metodai. Vadovėlis. Vilnius: Technika 2003.
17. *P. Pukys* Teorinė elektrotechnika. Vadovėlis. Kaunas: Technologija 2000. – 276 p.