



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

Jevgenij Gusev

**TIESIAEIGIŲ ASINCHRONINIŲ PAVARŲ
VALDYMO CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS
INVESTIGATION INTO CONTROL CHARACTERISTICS
OF LINEAR INDUCTION DRIVES**

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62101T101

Automatinių sistemų specializacija

Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2007

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Automatikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 3
Data 2007-05-30

Automatikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas: Tiesiaeigių asinchroninių pavarų valdymo charakteristikų tyrimas

Autorius: Jevgenij Gusev

Vadovas: prof. habil. dr. Roma Rinkevičienė

Kalba

☒ X

lietuvių

☐ užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe apžvelgiamos tiesiaeigių asinchroninių variklių taikymo sritis, analizuojami reiškiniai, susiję su tiesiaeigio asinchroninio variklio atvira magnetine grandine, trumpai apžvelgiami variklių valdymo būdai. Pagal tiesiaeigio variklio matematinį modelį sudaromi kompiuteriniai simetrinio ir nesimetrinio tiesiaeigio asinchroninio variklio modeliai. Gauti ir ištirti dažniu valdomos pavaros dinaminiai režimai. Aprašomas sudarytas nesimetrinio tiesiaeigio variklio modelis ir jo imitavimo rezultatai. Sudarytas modelis nesimetrinio variklio srovėms simetrizuoti, taikant srovės grįžtamuosius ryšius. Remiantis gautais rezultatais, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir pasiūlymai.

Darbą sudaro penkios dalys: įvadas, analitinė dalis, tiriamoji dalis, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 67 p. teksto be priedų, 65 iliustr., 5 lent., 26 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: tiesiaeigis asinchroninis variklis, kraštų efektai, srovių asimetrija, matematinis modelis, kompiuterinis modelis, grįžtamieji ryšiai.

Vilnius Gediminas Technical University
Electronics faculty
Automatics department

ISBN ISSN
Copies No. 3
Date 2007-05-30

Automatics study programme master thesis

Title: Investigation into control characteristics of linear induction drives

Author: Jevgenij Gusev

Academic supervisor: prof. habil. dr. Roma Rinkevičienė

Kalba

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

The introductory part of the final master thesis gives an overview of linear induction motors applications, condition analyses from open magnetic circuit and short review about motors control methods. Using linear induction motor mathematical model regular and irregular linear induction motor computer models are created. Dynamic modes of drive with frequency control are found and investigated. The created asymmetric linear induction motor model and results of its simulation are described. A model for symmetrization of currents of asymmetric motor is created using current feedback signals. According obtained results delivered conclusions and suggestions of final work.

Structure: introduction, analytical part, investigative part, conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 67 p. text without appendixes, 65 pictures, 5 tables, 26 bibliographical entries.

Keywords: linear induction motor, end effects, skewness of currents, mathematical model, computer model, feedback signals.

TURINYS

1. ĮVADAS	7
2. TEORINĖ DALIS	9
2.1. Tiesiaiegių asinchroninių variklių taikymo sritys	9
2.2. TAV pasireiškiantys kraštų efektai ir jų įvertinimas	15
2.3. TAP valdymo būdai.....	18
2.4. TAV matematinis modelis.....	20
2.4.1. Sukiosios trifazės mašinos transformacija į ekvivalenčią dvifazę.....	20
2.4.2. Sukiosios mašinos lygčių kintamųjų transformavimas	23
2.4.3. TAV lygtys transformuotoje α, β koordinačių sistemoje.....	27
2.5. Dažniu valdomos TAP modelio sudarymas	28
2.6. Nesimetriniu būdu valdomos TAP modelio sudarymas	33
3. TIRIAMOJI DALIS	37
3.1. Dažniu valdomos TAP dinaminių režimų imitacija ir tyrimas.....	37
3.2. Nesimetriniu būdu valdomos TAP dinaminių režimų imitacija.....	46
3.2.1. Simetrinės mašinos dinaminių režimų imitacija.....	46
3.2.2. Nesimetrinės mašinos dinaminių režimų imitacija, kai yra padidintas vienos fazės sklaidos induktyvumas	49
3.2.3. Nesimetrinės mašinos dinaminių režimų imitacija, kai yra padidintas dviejų fazių sklaidos induktyvumas	58
4. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	65
5. LITERATŪROS SĄRAŠAS	66

1. ĮVADAS

Elektros pavaros yra sudėtingi elektrotechniniai įrenginiai, jungiantys elektros mašinų, pramoninės elektronikos, techninės kibernetikos ir kitų mokslo bei technikos sričių elementus į vieningą sistemą [1].

Apie 50 % serijinių sukiųjų elektros variklių naudojama slenkamajam arba grįžtamajam-slenkamajam judesiui gauti. Tam tarp variklio ir vykdymo elemento įmontuojamos įvairios mechaninės grandys (sraigtinės ir krumpliaratinės pavaros, alkūniniai mechanizmai, būgnas su lynu, reduktoriai, rato ir bėgio mechanizmai, grandinės ir diržinės pavaros), kurios keičia variklio sukamąjį judesį slenkamuju bei suderina vykdymo mechanizmo ir variklio greičius. Visos šios grandys didina elektros pavaros gabaritų, masę bei kainą ir blogina visos sistemos dinamines savybes [2]. Todėl, norint efektyviai automatizuoti technologinius procesus, dažnai reikia taikyti elektros pavaras su tiesiaeigiais elektros varikliais [3], tiesiogiai perduodančiais judesį vykdymo elementui. Tai supaprastina pavaros kinematinę schemą, sumažina nuostolius ir padidina mechanizmo patikimumą.

Pagal [4] tiesiaeigių elektros variklių bei pavarų atliekamos funkcijos yra:

- kietoms, birioms, skystoms ir dujinėms medžiagoms transportuoti;
- elektros energijai keisti į slenkamojo, slenkamojo-grįžtamojo bei švytuojamojo judesio mechaninę energiją;
- elektros energijai keisti į mechaninio smūgio energiją;
- elektromagnetiniu lauku sudaryti kontaktinį ir nekontaktinį mechaninį ryšį;
- elektromagnetiniam stabdymui;
- elektromagnetiniu lauku orientuoti elektros srovei laidžius kūnus;
- elektromagnetinių slopintuvų, elektromagnetinių spyruoklių, elektrinių keltuvų pavarose;
- pakelti ir atskirti judamąją dalį nuo nejudamos (magnetinė pakaba);
- elektros aparatuose laukui gesinti.

Greta svarbiausios funkcijos – suteikti judesį įvairiems pavieniams arba technologinio proceso susietims mechanizmams – jos atlieka daugybę lokalinės automatizacijos funkcijų, priklausančių nuo konkretaus mechanizmo paskirties tam tikrame technologiniame procese. Automatinės pavaros vykdo mechanizmų paleidimo ir stabdymo operacijas, reguliuoja ir stabilizuoja jų greitį, sukimo momentą, nustato judamų dalių padėtį, įgalina keisti technologinio proceso darbo režimą (operatoriaus nuožiūra arba automatiškai pagal programą). Tai palengvina operatoriaus darbą, nes jam lieka tik ribotas valdymo operacijų skaičius [1].

Elektromechaninio energijos keitimo teorijoje paprastai kalbama apie simetrinius elektros variklius. Bet praktiškai tiesiaeigiai elektros varikliai yra nesimetriniai.

Nesimetrines elektros mašinas galima suskirstyti į mašinas su elektrine, erdvine ir magnetine asimetrija. Prie mašinų su elektrine asimetrija priskiriamos mašinos, kuriose fazių aktyviosios ir induktyviosios varžos yra skirtingos. Pavarose su erdvine asimetrija šalia esančių fazių apvijų ašys perstumtos erdvėje kampu, kuris skiriasi nuo $2\pi/m$ (čia m – elektros mašinos fazių skaičius) radianų. Elektros mašinų su magnetine asimetrija oro tarpas yra netolyginis, kai kuriais atvejais tokios mašinos turi nesimetrinę magnetolaidį. Nesimetrinių mašinų dinaminiai režimai skiriasi nuo simetrinių mašinų atitinkamų režimų didesniu sukimosi greičio netolygumu, didesnėmis momento pulsacijomis, tuščiosios veikos greičio sumažėjimu ir pereinamojo proceso laiko padidėjimu [5].

Šio darbo tikslas yra sudaryti nesimetrinio tiesiaeigio asinchroninio variklio modelį, sudaryti uždarnosios valdymo sistemos induktoriaus srovėms simetrizuoti modelį, ištirti nesimetrinės pavaros ir pavaros su srovės grįžtamaisiais ryšiais pereinamuosius procesus.

2. TEORINĖ DALIS

2.1. Tiesiaeigių asinchroninių variklių taikymo sritys

Jeigu įsivaizduosime, kad paprasto asinchroninio variklio apvalus statorius perpjautas išilgai sukimosi ašies ir ištiesintas plokštumoje, tai gausime tiesiaeigės asinchroninės mašinos statorių (induktorių). Tokio induktoriaus trifazė apvija oro tarpe kuria bėgamąjį magnetinį lauką. Jis judamojoje dalyje (antriniame elemente) indukuoja sroves, kurios sąveikauja su magnetiniu lauku. Dėl to atsiranda elektromagnetinės jėgos, veikiančios antrinį elementą. Antrinis elementas gali turėti šerdį iš elektrotechninio plieno lakštų su narveline apvija [6].

Vienas iš būdų atpiginti tiesiaeigį asinchroninį variklį (TAV) – antrinį elementą su trumpai sujungta apvija pakeisti aliuminio ar kito laidaus metalo šyna [2]. Siekiant sumažinti magnetinės grandinės varžą, ši šyna dažniausiai patalpinama tarp dviejų elektrotechninio plieno plokštelių paketų. Apviją gali turėti tik vienas arba abu paketai [3]. TAV, kurio vienas iš induktorių neturi apvijos, vadinamas elektriškai vienpusiu, bet magnetiškai dvipusiu, o TAV, turintis vieną induktorių – elektriškai ir magnetiškai vienpusiu [7].

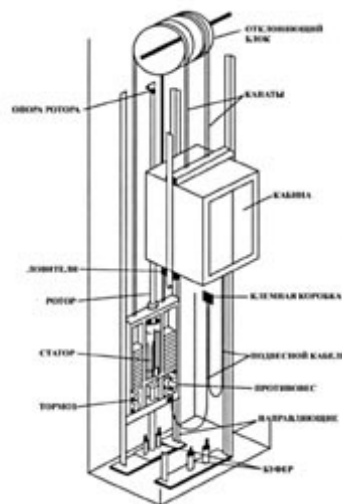
Pagrindinės tiesiaeigių variklių taikymo sritys yra šios [4]:

- greitaeigis transportas;
- magnetinės hidrodinamikos įrenginiai;
- pramonės įrenginiai ir įtaisai;
- automatikos įtaisai ir prietaisai.

Pramonėje tiesiaeigiai varikliai gali būti taikomi, pavyzdžiui, skysto metalo arba plazmos transportavimui, maišymui [8], nemagnetinio metalo arba medžiagos lakštų padavimui į šampavimo zoną [9], pašto rūšiavimo įrenginiuose, tekstilės pramonės mechanizmuose ir



2.1 pav. Liftai pastato išorėje

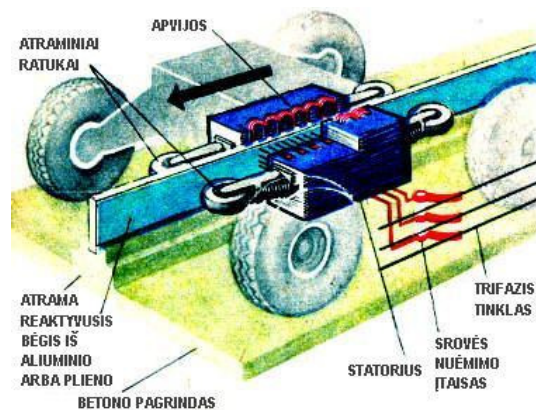


2.2 pav. Liftas su TAV

tiksliose pozicionavimo sistemose: mikroskopo stalo pastūmai, staklių stalo padėčiai nustatyti, jungtuvų, sklendžių, stūmiklių pavarose [10]. TAV taikomi ir liftų konstrukcijose [11].

2.2 pav. parodytas firmos OTIS sukurtas ir išbandytas liftas su TAV. Tokiam liftui nereikalinga mašininė patalpa ir reduktorius. TAV yra atsvaros dalis, o antrinis elementas yra aliuminio vamzdis. Lifto kabinos greitis siekia 1,75 m/s. Tokios konstrukcijos privalumas – nereikia įprastos gervės ir mažesni energijos nuostoliai.

Labai perspektyvus yra tiesiaeigių asinchroninių pavarų (TAP) taikymas transporto priemonėse. 1910 metais (kitų šaltinių duomenimis 1912 m.) E. Bašėlė Prancūzijoje pastatė pirmą vagoną, kuris kabėjo magnetiniame lauke, modelį. Praktiškai tuo pačiu metu, 1911 m. Tomsko technologinio instituto profesorius Vainberg B. P. (Вайнберг Б. П.) sukūrė traukinį su elektromagnetine pakaba, judesį kuriam suteikdavo tiesiaeigis sinchroninis variklis.



2.3 pav. Vežimėlio su tiesiaeigiu varikliu bendras vaizdas

1967 m. Kijeve buvo pastatytas 525 metrų ilgio žiedo pavidalo kelias, kurio aukštis virš žemės 6-9 metrai. Nedideli vagonai (juose tilpdavo tik 8 žmonės) siekdavo 40-50 km/h greitį. Dvipusis TAV buvo kietai susietas su vežimėliu. Jis parodytas 2.3 pav. Naudojant šią technologiją, 1970 m. buvo sukurtas ir išbandytas vežimėlis su 40 kW varikliu 44-60 keleivių vagonui. Buvo planuojama statyti ir kitas linijas 120 keleivių ir 120 km/h greičio traukiniams, bet šio projekto darbai 70-aisiais metais buvo sustabdyti [12].

Kai kurių kuriamų ir bandomųjų ekipažų su tiesiaeigiais varikliais techniniai duomenys pateikiami 2.1 lentelėje [12].

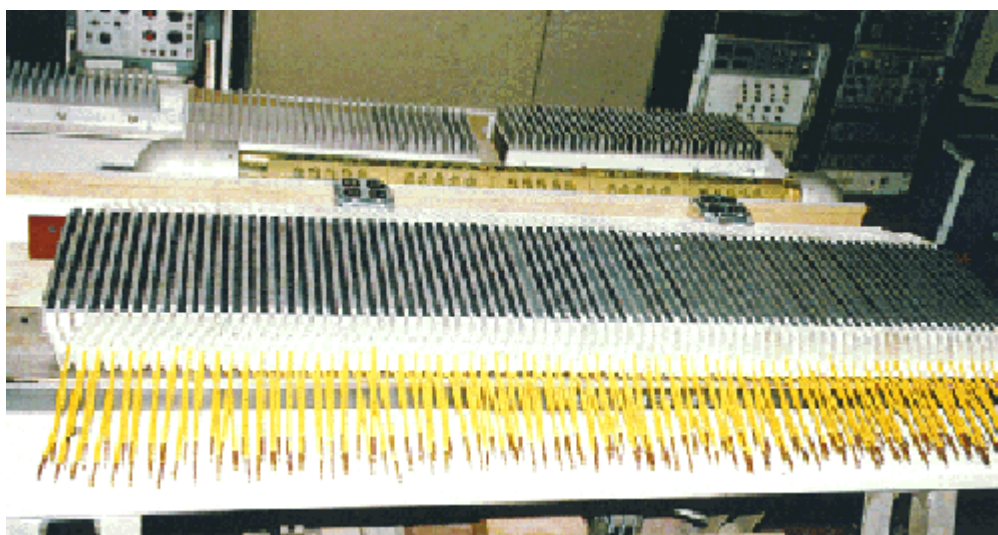
2.1 lentelė. Ekipažų techniniai duomenys

Parametras \ Ekipažas	HSST-03 Japonija	TR-06 Vokietija	MAGLEV Didžioji Britanija	MAGNI-BUS Rumunija
Matmenys, m	13,8-2,95-3,0	54,2-3,7-4,2	6,0-2,25-3,5	4,0-2,5-3,0
Masė, t	12,0	102	5,0	4,0
Naudinga apkrova, t	3,0	6,0	3,0	-
Greitis, km/h	30,0	400	54,0	54,0
Kelio magnetolaidžių masė, t	150,0	192,0	78,0	58,5
Kelio apvijų masė, kg/m	-	15,3	-	-

TAV gamina tokios firmos: „Power Superconductor Applications Corporation“ [13], „H2W Technologies, Inc.“ [14], „Baldor“ [15], „Aerotech“ [16] ir kitos. Išvardintų gamintojų TAV techniniai parametrai ir nuotraukos pateikiamos žemiau.

2.2 lentelė. Firmos „Power Superconductor Applications Corporation“ gaminamų TAV techniniai parametrai

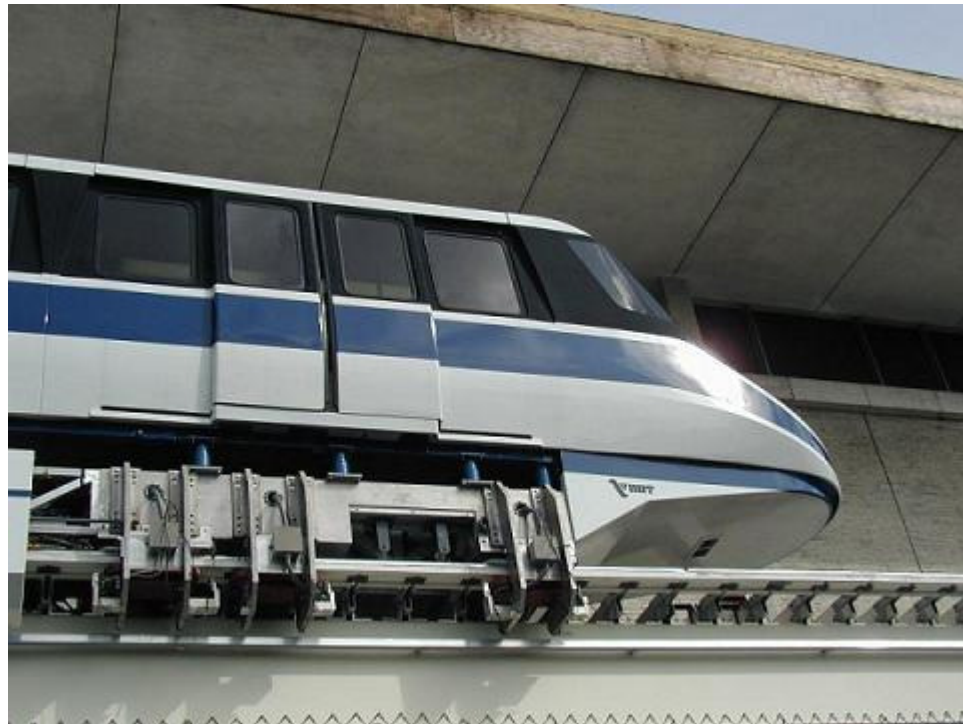
Modelis	LIM-200	LIM-300	LIM-400	LIM-600	LIM-800	LIM-1000	LIM-1025	LIM-1250	LIM-1350	LIM-2300
Jėga, N	1 000	1 000	1 330	2 275	3 030	4 500	4 500	5 500	6 000	10 000
Greitis, m/s	10	15	30	33	33	35,5	45,5	55,6	66,7	112
Maksimalus dažnis, Hz	60	60	180	60	60	60	86	115	190	215
Maksimali galia, kW	10	15	40	75	100	160	200	308	400	1120
Maitinimo įtampa, V	240	480	480	480	480	480	560	560	750	1200
Oro tarpas, mm	3	4	4	5	6	4	4,5	4,5	5	7
Statoriaus paviršiaus plotas, m ²	0,035	0,104	0,104	0,208	0,393	0,205	0,238	0,312	0,396	0,521
Griovelių gylis, mm	78	89	89	89	100	90	100	105	105	110
Bendras plotis, mm	235	290	290	290	455	305	305	406	455	508
Standartinis ilgis, mm	280	591	591	1182	1560	2050	1560	2050	1560	2050
Masė, kg	18	63	63	126	285	290	345	450	575	756



2.4 pav. Firmos „Power Superconductor Applications Corporation“ TAV

„Power Superconductor“ TAV pagrindu naudojami greitaeigiam transportui. 2.5 pav. parodyto traukinio parametrai yra tokie:

- vienas modulis sukuria (2 500 – 28 000) N jėgą;
- maža inercija, pagreitis iki 2 G;
- greitis (0 – 100) km/h (gali būti ir (0 – 250) km/h);
- induktorius ir bėgiai atsparūs sprogamams;
- greitis valdomas naudojant impulsų pločio moduliaciją;
- didesnei galiai gauti galimas induktoriaus aušinimas vandeniu.



2.5 pav. Traukinys su TAV

2.3 lentelė. Firmos „H2W Technologies, Inc.“ gaminamų TAV techniniai parametrai

Modelis	LMA-03-020	LMA-05-030	LMB-03-026	LMB-05-038	LMB-07-051	LMC-07-066	LMC-09-081	LMD-09-101	LMD-11-118	LMD-14-143	LME-14-164	LME-16-189	LME-18-214
Ilgalaikė apkrova, N	18	27	23	34	45	59	72	90	105	127	146	168	190
Maksimali jėga, N	90	135	115	170	225	295	360	450	525	635	730	840	950
Ilgalaikio režimo srovė, A	0,6	0,9	0,7	1	1,4	1,7	2,1	2,6	3	3,7	4,2	4,8	5,4
Maksimali srovė, A	3	4,5	3,5	5	7	8,5	10,5	13	15	18,5	21	24	27
Ilgis, mm	175	280	175	280	390	390	500	500	605	710	710	820	925
Plotis, mm	140	140	160	160	160	190	190	220	220	220	250	250	250
Masė, kg	6,0	10,0	7,5	12,5	18,0	23,0	30,0	37,0	45,0	53,0	63,0	73,0	83,0



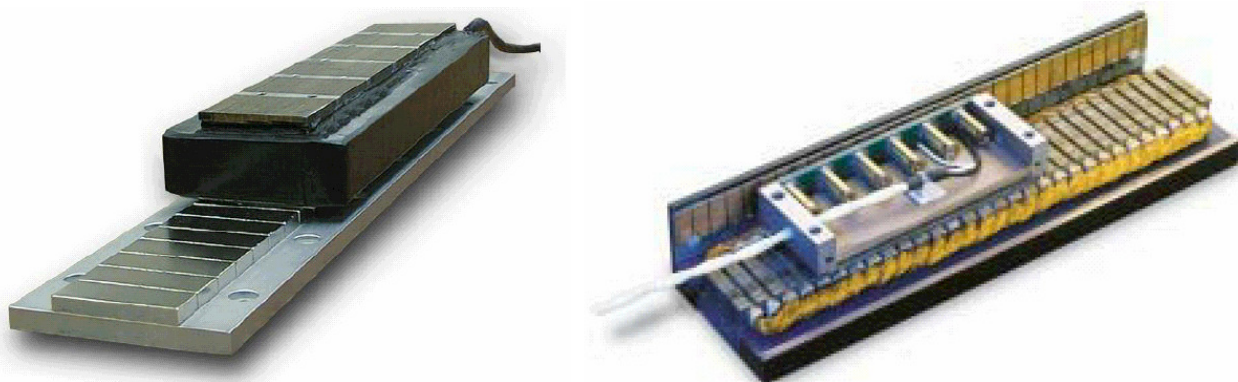
2.6 pav. Firmos „H2W Technologies, Inc.“ TAV

„H2W Technologies“ TAV taikomi tokiose srityse:

- konvejerių sistemos;
- kranai;
- bagažo pervežimas;
- vaizdo stebėjimo įranga;
- asmeninės greito transporto sistemos;
- parko vežimėliai.

2.4 lentelė. Firmos „Baldor“ gaminamų TAV techniniai parametrai

Modelis	LMAC1607C23D15	LMAC1609C23D15	LMAC1611C23D15	LMAC1614C23D15	LMAC1616C23D15	LMAC3207C23D15	LMAC3209C23D15	LMAC3211C23D15	LMAC3214C23D15	LMAC3216C23D15
Ilgalaikė apkrova, N	62	106	142	204	258	124	195	275	400	445
Kartotinė trumpalaikė apkrova, N	311	534	711	1023	1289	622	978	1378	2000	2224
Ilgalaikio režimo srovė (3~460 V AC), A	2,3	3,7	5,0	7,3	8,0	4,4	6,8	9,5	13,5	14,7
Kartotinio režimo srovė (3~460 V AC), A	11,5	18,5	25	36,5	40	22	34	47,5	67,5	73,5
Masė, kg	20	31	41,6	57,9	68,8	39,8	61,5	83,3	115,8	137,6
Ilgis, mm	400					800				
Plotis, mm	165,1	215,9	266,7	342,9	394	165,1	215,9	266,7	342,9	394



2.7 pav. Firmos „Baldor“ gaminami TAV

2.5 lent. Firmos „Aerotech“ gaminamų TAV techniniai parametrai

Modelis	BLMUC-143	BLMC-367	BLM-386	BLMH-382	BLMX-502	BLMF-386	BLMFS5-382
Ilgalaikė apkrova, N	73,1	193	384,7	822	1186	116	376,8
Maksimali jėga, N	292	770	1538,9	3288	4744	464	1507,2
Ilgalaikio režimo srovė, A	4,54	6,01	6,58/3,29	19,8/9,9	12,59/25,03	5,9	19,7/9,85
Varža, Ω (25°C)	8,9	10,9	8,0/32,0	2,8/11,0	5,1/1,3	8,0	0,56/2,24
Maksimali įtampa, V	160	320	320	320	320	320	320
Induktoriaus masė, kg	0,20	0,52	1,70	3,1	4,45	2,30	3,81
Induktoriaus ilgis, mm	143,0	267,0	386,1	382,0	502,0	386,0	382,0

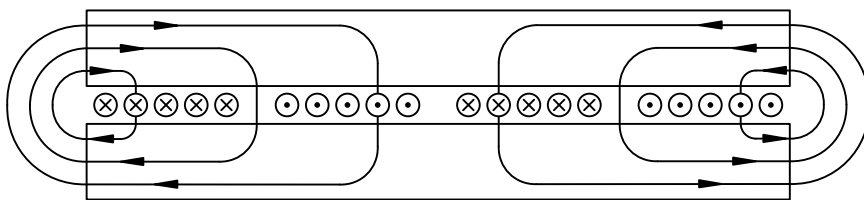


2.8 pav. Firmos „Aerotech“ gaminami TAV

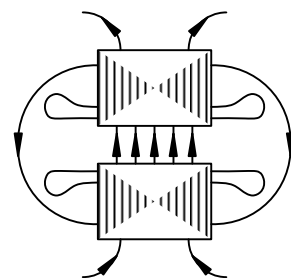
2.2. TAV pasireiškiantys kraštų efektai ir jų įvertinimas

Tiesiaeigių variklių esminis trūkumas yra atsispindėjusių bangų atsiradimas oro tarpe. Magnetinio lauko bėgančioji banga, atsispindėdama nuo magnetolaidžio kraštų, išsikraipo, sudarydama daugelį atsispindėjusių nuo abiejų kraštų magnetinio lauko bangų. Šis reiškinys vadinamas kraštų efektu. Kraštų efektai didina nuostolius ir mažina mašinos naudingąją galią [17]. Kraštų efektai būna išilginiai ir skersiniai, o išilginiai kraštų efektai skirstomi į pirminius ir antrinius.

Išilginio kraštų efekto (galų reiškinių) prasmė. Perpjovus sukamojo judesio variklį ir jį ištiesinus, atsiranda variklio kraštai, kurių nebuvo besisukančiame variklyje. Esant baigtiniam induktoriaus ilgiui, jo kraštai iškreipia atskirų variklio fazių kuriamus magnetinius srautus, nes pasikeičia magnetinių grandinių varža (elektrinio lauko linijos užsidaro per orą, kurio magnetinė skvarba yra mažesnė). Todėl atsiranda atskirų fazių srovių asimetrija (iki 20 %). Šis efektas vadinamas pirminiu [3]. 2.9 pav. [8] matyti, kaip induktoriaus kuriamų magnetinių srautų linijos užsidaro už aktyviosios zonos ribų.



2.9 pav. TAV induktoriaus kuriami magnetiniai srautai

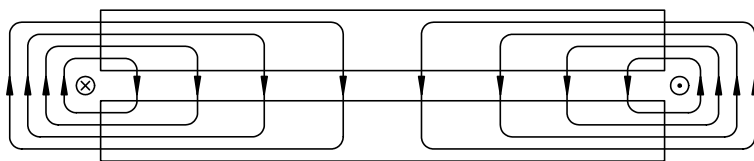


2.10 pav. Šuntuojantys magnetiniai srautai

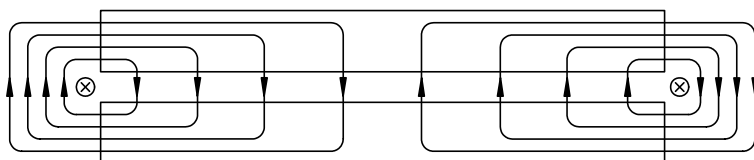
Literatūroje [8] įrodoma, kad dar atsiranda tam tikro didžio šuntuojantys srautai tarp magnetolaidžių šonų (2.10 pav.). Šie srautai pulsuoja laike sinuso dėsnio, bet nejuda erdvėje. Dėl to tokius laukus ir srautus vadina pulsuojančiais. Tam tikrais laiko momentais pulsuojančių laukų nėra. Tada oro tarpe egzistuoja normalus bėgamasis laukas, kurio kreivė yra simetrinė abscesės ašies atžvilgiu. Kitais laiko momentais, kada pulsuojančio magnetinio lauko amplitudė yra tarp nulio ir maksimumo, magnetinės indukcijos linijos yra tarpinio pobūdžio. Šis atvejis lemia tai, kad oro tarpe išlieka bėgamasis laukas, bet jis išsikraipo ir todėl skirtingais laiko momentais skirtinguose taškuose indukcijos amplitudės nėra lygios tarpusavyje.

Vienas iš būdų sumažinti arba kompensuoti pulsuojamąjį magnetinį lauką – padaryti aplink induktorių papildomą ritę su srove, kurios fazė suderinta su apvijos srovės faze (žr. 2.11 pav.). Ši ritė aktyvioje zonoje ir už jos ribų kuria magnetinį lauką tokio pat pobūdžio, kaip ir kraštų efekto pulsuojamasis laukas, bet priešingos krypties. Todėl pulsuojamasis laukas

yra kompensuojamas. Vietoj papildomos kompensavimo ritės galima padaryti kompensavimo



2.11 pav. Pulsuojamojo lauko kompensavimo principas naudojant papildomą ritę su kintama srove



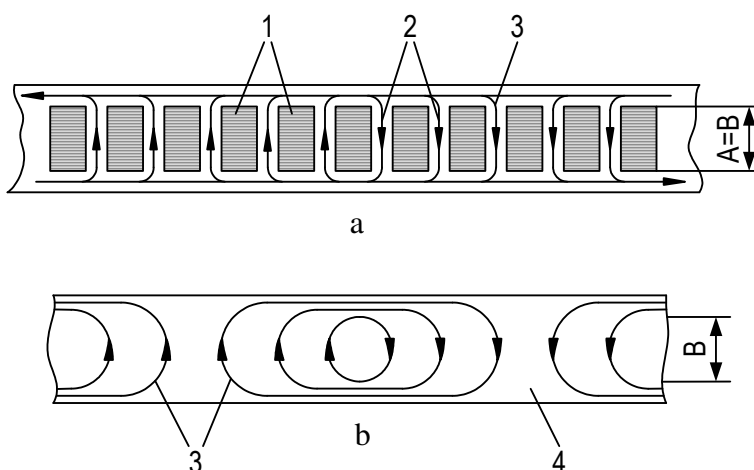
2.12 pav. Pulsuojamojo lauko, kintančio hiperbolinio sinuso dėsnio, kompensavimo principas

(arba koregavimo) elementus pačioje apvijoje. Šių elementų laidininkai yra induktoriaus galuose ir kuria reikiamo dydžio ir atitinkamos fazės kompensuojančią jėgą.

Iš šių reiškinių analizės išplaukia pulsuojančio lauko, kintančio išilgai oro tarpo hiperbolinio sinuso dėsnio, kompensavimo principas. Iš abiejų induktoriaus pusių patalpinus laidininkus su vienodos

krypties kintamosiomis srovėmis (2.12 pav.), šie laidininkai sukurs aktyviojoje zonoje tokio pobūdžio magnetinį lauką, koks yra induktoriaus pulsuojantis laukas. Todėl, tinkamai suderinus šių srovių fazes, galima kompensuoti pulsuojamąjį lauką [8].

Antrinis išilginis kraštų efektas atsiranda dėl to, kad, antriniam elementui įeinant į zoną tarp induktorių, jame indukuojamos elektrovaros jėgos (toliau – EVJ), proporcingos srauto pokyčiui. EVJ kuria sroves, o dėl jų ir induktoriaus magnetinio lauko sąveikos susidaro papildomos jėgos. Analogiški reiškiniai vyksta ir ties kitu induktoriaus kraštu, kur antrinis elementas išeina iš darbo zonos. Šios jėgos egzistuoja ir tuomet, kai variklio antrinio elemento greitis lygus sinchroniniam (t. y. bėgamojo magnetinio lauko) greičiui.



2.13 pav. Srovių pasiskirstymas TAV trumpai sujungtame (a) ir monolitiniame (b) antriniame elemente: 1 – elektrotechninio plieno plokštelės, 2 – trumpai sujungta apvija, 3 – srovių linijos, 4 – laidinėferomagnetinė plokštelė, A – aktyviųjų laidininkų ilgis, B – induktoriaus plotis

Skersinio kraštų efekto (šonų reiškinio) prasmė. Kai TAV trumpai sujungtas antrinis elementas pakeičiamas laidžia monolitine plokšte, pasikeičia antrinio elemento srovių linijos. Monolitiniame antriniame elemente (2.13 pav., b) srovės linijos ne visame induktoriaus plote yra statmenos jo judėjimo kryptčiai. Todėl šis efektas yra tolygus aktyviųjų laidininkų sutrumpini-

mui (2.13 pav., a). Kartu sumažėja variklio kuriamoji jėga [3].

Skaičiuojant antrinio elemento varžas, formulėse dalyvauja koeficientas, kuriuo įvertinami kraštų efektai. Šis koeficientas turi aktyviąją ir reaktyviąją dalis [18]:

$$k_a = \frac{1}{1 + \varepsilon^2} \left[1 - \frac{(2m^2 - \varepsilon^2) \operatorname{sh} 2m\xi + \varepsilon(2m^2 + 1) \sin 2n\xi}{2m\xi \sqrt{1 + \varepsilon^2} (\operatorname{sh} 2m\xi + \cos 2n\xi)} \right] = \frac{a_1 + b_1 \varepsilon_{0N} \beta}{1 + \varepsilon_{0N}^2 s^2}; \quad (2.1)$$

$$k_r = \frac{1}{1 + \varepsilon^2} \left[\varepsilon - \frac{(2m^2 + 1) \operatorname{sh} 2m\xi + \varepsilon(2m^2 - \varepsilon^2) \sin 2n\xi}{2m\xi \sqrt{1 + \varepsilon^2} (\operatorname{sh} 2m\xi + \cos 2n\xi)} \right] = -\varepsilon_{0N} \beta \frac{a_2 + b_2 \varepsilon_{0N} \beta}{1 + \varepsilon_{0N}^2 s^2}, \quad (2.2)$$

čia: $\varepsilon = \varepsilon_{0N} s$ – magnetinis Reinoldso (Reynolds) skaičius; ε_{0N} – sustabdyto TAV magnetinis Reinoldso skaičius; $m = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \varepsilon^2}}$; $n = \frac{\varepsilon}{2m}$; $\xi = \frac{\pi a}{\tau}$; $2a$ – antrinio elemento plotis, lygus induktoriaus pločiui; τ – induktoriaus poliaus žingsnis; a_1, b_1, a_2, b_2 – aproksimacijos koeficientai: $a_1 = 1 - \frac{\tau}{\pi a}$; $b_1 = \frac{\tau}{\pi a \sqrt{3}}$; $a_2 = 1 - \frac{3\tau}{2\pi a}$; $b_2 = 0,4 \frac{\tau}{\pi a}$.

Kadangi tiriamojo variklio poliaus žingsnis τ yra 0,06 m., tai jo greitis, esant 50 Hz dažniui, $v = \frac{\omega \tau}{\pi} = \frac{2\pi f \tau}{\pi} = 2 \cdot 50 \cdot 0,06 = 6$ m/s. Tai yra mažo greičio TAV. Sudarant tokio TAV matematinį modelį paprastai daromos tokios prielaidos: neatsižvelgiama į apvijų magnetovarų nesimetriškumą ir magnetinio lauko netolygumą oro tarpe, analizuojant dinامينius procesus tariama, kad mašinos magnetinė grandinė neišsotina ir magnetinė skvarba yra didelė, laikoma, kad daugiafazė mašina yra simetrinė, todėl ekvivalentinės dvifazės mašinos fazių pilnutinės varžos yra lygios [17, 19].

Šiame darbe yra atsižvelgiama į kraštų efekto įtaką. Kraštų efektas keičia magnetinio lauko pobūdį. Skirtingai negu sukiųjų asinchroninių mašinų atveju, tiesiaieigio asinchroninio variklio magnetinis laukas yra netolygus. Prie induktoriaus kraštų magnetinio lauko linijos užsidaro per oro tarpą, todėl šiose srityse sumažėja magnetinio lauko stipris ir atsiranda variklio fazinių srovių asimetrija, t. y. sumažėja atskirų fazių srovių amplitudės. Sumažėjus srovių efektinėms vertėms, sumažėja TAV sukuriama traukos jėga. Norint to išvengti, reikia simetrizuoti variklio induktoriaus fazines sroves. Tai galima padaryti maitinant TAV iš impulsiniu būdu valdomo dažnio keitiklio [20]. Srovių amplitudės simetrizuojamos, parenkant reikiamą ventilių įjungimo trukmę, o fazės – parenkant reikiamą impulsų, formuojančių atskirų fazių įtampas, skaičių.

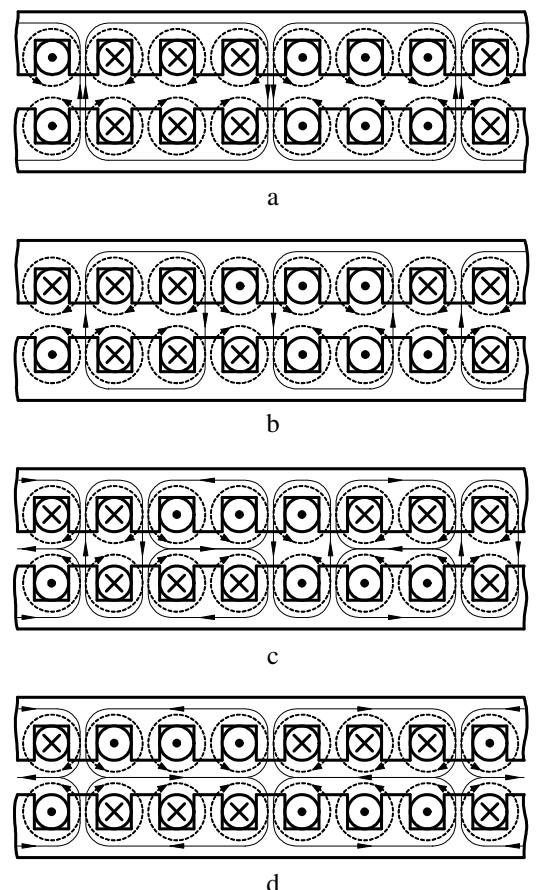
2.3. TAP valdymo būdai

Tiesiaeigių asinchroninių variklių greičiui reguliuoti reikia galios keitiklio. Šiuolaikinių elektroninių galios keitiklių valdymo sistemos sudaromos naudojant mikroprocesorius arba mikrokompiuterius, o paties variklio greičiui stabilizuoti arba reguliuoti naudojamos automatinio valdymo sistemos. Kadangi tiesiaeigio asinchroninio variklio veikimo principas yra analogiškas sukiųjų asinchroninių variklių veikimo principui, tai TAV greitį galima reguliuoti visais žinomais asinchroninių sukiųjų variklių greičio reguliavimo metodais, pavyzdžiui, keičiant TAV maitinimo įtampos dažnį bei dydį arba vien tik įtampos dydį impulsiniu arba kitais metodais. Taip pat TAV greitį galima keisti ir netradiciniais būdais: keičiant antrinio elemento varžą (naudojant iš skirtingų metalų pagamintus antrinius elementus); elektrinis ir magnetinis dvipusio TAV greičio reguliavimas, pastumiant induktorius vieną išilgai kito poliaus žingsnio rišose; mechaninių charakteristikų superpozicija netradicinėse nesimetrinėse sistemose, kai tiesiaeigė elektros pavara veikia trumpalaikiu režimu; TAV induktorių elektromagnetinės sąveikos jėgų panaudojimas elektromechaniniam stabdžiui valdyti [21, 4].

Greičio reguliavimas keičiant maitinimo įtampos dydį pagrįstas tuo, kad TAV maksimali jėga yra tiesiai proporcinga maitinimo įtampos kvadratui ir TAV mechaninė charakteristika artima tiesinei. Taigi, esant tai pačiai apkrovai, didinant maitinimo tampą, didėja maksimali jėga, o todėl didėja ir greitis. Analogiškai, mažinant maitinimo įtampą, greitis mažėja. Toks greičio reguliavimas yra sklandus, bet greičio pokytis priklauso nuo apkrovos, reguliavimo diapazonas D yra nedidelis ir siekia 10.

Greičio reguliavimas keičiant maitinimo įtampos dažnį realizuojamas naudojant tiristorinius dažnio keitiklius. Šis greičio reguliavimo būdas vis dažniau naudojamas, nes šiuolaikiniai puslaidininkiniai dažnio keitikliai yra nedidelės masės ir gabaritų, reguliavimo diapazonas gali siekti 100, greitį galima reguliuoti abiem kryptim (t. y. didinti ir mažinti), reguliavimas yra sklandus, ekonomišką.

Dvipusio TAV greičio reguliavimo, perstumiant induktorius vieną išilgai kito poliaus



2.14 pav. TAV greičio reguliavimas, pastumiant induktorius vieną išilgai kito poliaus

žingsnio ribose, principas parodytas 2.14 pav. Pradinėje padėtyje poliai su vienodomis srovių kryptimis yra vienas prieš kitą. Šiuo atveju variklis kuria maksimalią jėgą, nes visų polių kuriami magnetiniai srautai nukreipti statmenai antrinio elemento plokštumai. Pastūmus viršutinį induktorių per vienio griovelio plotį į kairę, sumažėja griovelį, kuriančių antrinio elemento atžvilgiu statmeną magnetinį lauką, skaičius. Du grioveliai, turintys skirtingos krypties sroves, kuria magnetinį lauką, kuris yra lygiagretus antrinio elemento plokštumai. Todėl kampas tarp antrinio elemento ir rezultatyviojo magnetinio lauko pasidaro nelygus 90° . Dėl to sumažėja variklio kuriamoji jėga, kuri apskaičiuojama pagal formulę (2.3):

$$F = IlB \sin \alpha, \quad (2.3)$$

čia: I – antrinio elemento srovė [A]; l – laidininko ilgis [m] (šiuo atveju l yra antrinio elemento dalies ilgis, kurioje srovė yra statmena induktoriaus arba antrinio elemento judėjimo kryptčiai (žr. 2.13 pav.)); B – magnetinė indukcija [T]; α – kampas tarp srovės ir magnetinės indukcijos vektorių.

Dar pastūmus viršutinį induktorių į kairę, kampas α dar sumažėja, todėl sumažėja ir jėga. 2.14 pav., d parodytas atvejis, kai visų polių kuriamo magnetinio lauko linijos yra lygiagrečios antrinio elemento plokštumai. Taigi, kampas $\alpha = 0$, todėl ir jėga, apskaičiuojama pagal (2.3) formulę, yra lygi nuliui.

Greičio reguliavimas naudojant iš skirtingų metalų pagamintus antrinius elementus [4] pagrįstas tų metalų skirtinga specifine varža. Šis reguliavimo būdas ekvivalentiškas sukiųjų asinchroninių variklių su faziniu rotoriumi greičio reguliavimui. Jungiant papildomas varžas į fazinio rotoriaus grandinę, galima keisti mechaninės charakteristikos kietumą, o tuo pačiu ir rotoriaus sukimosi greiti esant tam pačiam apkrovos momentui.

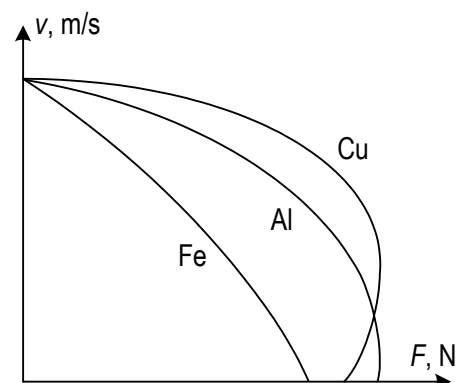
Kai kurių metalų specifinės varžos:

Cu (0,0175 – 0,0182) $\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$;

Al (0,0279 – 0,0283) $\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$;

Fe (0,1 – 0,5) $\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$;

Naudojant didesnės varžos antrinį elementą, mechaninės charakteristikos nuolydis didėja (charakteristika pasidaro minkštesnė). Tokio greičio reguliavimo būdo reguliavimo diapazonas nėra didelis ir gali siekti 10.



2.15 pav. TAV mechaninės charakteristikos, atitinkančios antrinį elementą iš Cu, Al ir Fe

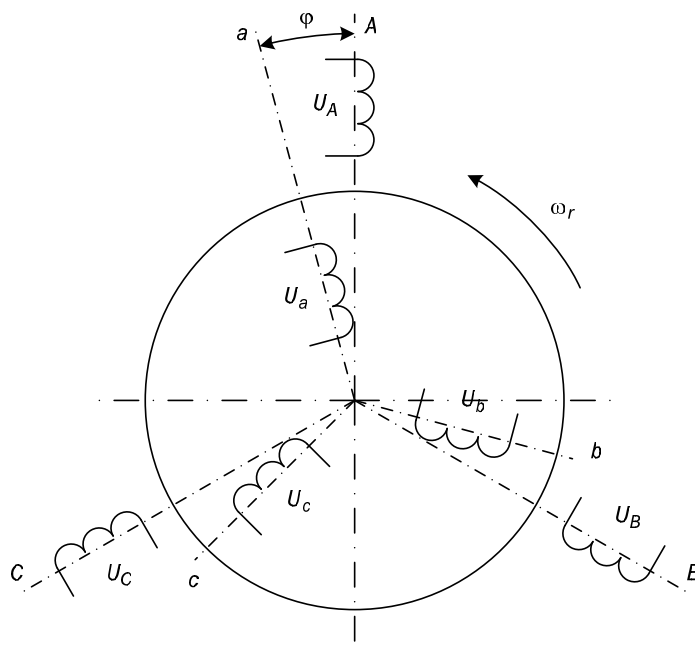
2.4. TAV matematinis modelis

2.4.1. Sukiosios trifazės mašinos transformacija į ekvivalenčią dvifazę

Teoriškai įrodyta [5], kad bet kurią daugiafazę elektros mašiną su n -faze statoriaus apvija ir m -faze rotorius apvija, galima pakeisti ekvivalentiniu dvifaziu modeliu. Tokia transformacija leidžia apibendrintai aprašyti besisukančios elektros mašinos matematinius elektromechaninės energijos keitimo procesus taikant idealizuoto dvifazio elektromechaninio keitiklio matematines lygtis. Literatūroje toks keitiklis yra vadinamas apibendrintąja elektros mašina.

Idealizuota elektros mašina yra suprastintas realiosios mašinos modelis. Realiojoje mašinoje apvijų magnetivaros yra nesinusinės, oro tarpas netolygus. Idealizuotos mašinos grioveliuose esantys laidininkai su sinusine srove kuria sinusines magnetovaras, o oro tarpo netolygumai paneigiami. Analizuojant dinامينius procesus idealizuotoje elektros mašinoje daroma prielaida, kad mašinos magnetinė grandinė neįsisotina ir turi labai didelę magnetinę skvarbą.

Analizei imama idealizuota trifazė mašina (2.16 pav.), kurios trifazės statoriaus ir rotorius apvijos maitinamos iš trifazių simetrinių įtampų šaltinių ir visi parametrai yra linijiniai.



2.16 pav. Trifazės idealizuotos mašinos erdvinis modelis

Tokios mašinos apvijų įtampų diferencialinės lygtys netransformuotoje fazinių ašių A, B, C (statoriaus), a, b, c (rotorius) koordinačių sistemoje gaunamos iš antrojo Kirchhofo dėsnio ir atrodo taip:

$$\begin{cases} u_A = i_A R_A + \frac{d\Psi_A}{dt}; \\ u_B = i_B R_B + \frac{d\Psi_B}{dt}; \\ u_C = i_C R_C + \frac{d\Psi_C}{dt}; \\ u_a = i_a R_a + \frac{d\Psi_a}{dt}; \\ u_b = i_b R_b + \frac{d\Psi_b}{dt}; \\ u_c = i_c R_c + \frac{d\Psi_c}{dt}, \end{cases} \quad (2.4)$$

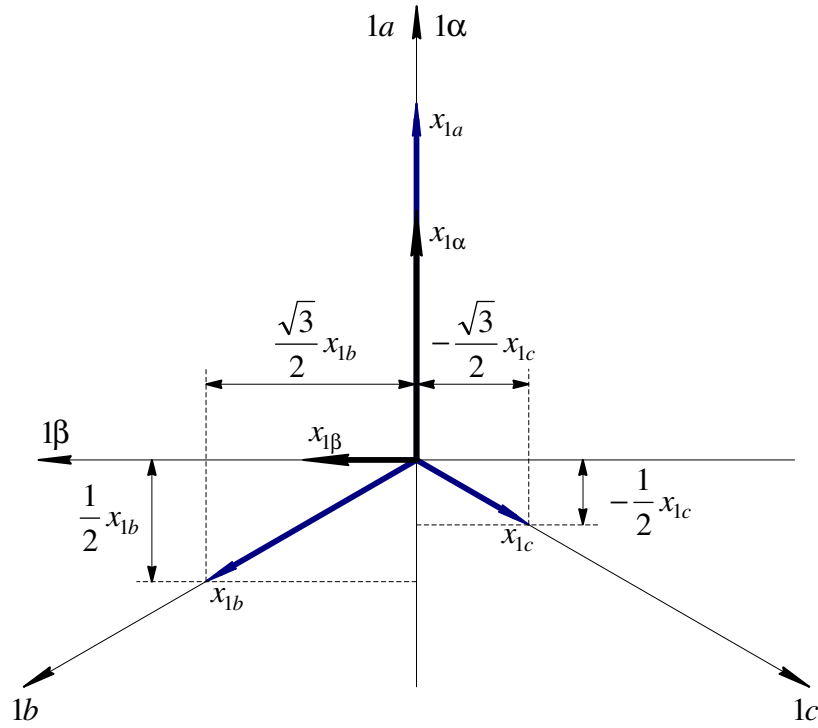
čia: u_i – įtampos ($i = A, B, C, a, b, c$) [V]; i_i – srovės [A]; R_i – statoriaus ir rotorius fazių aktyviosios varžos [Ω]; Ψ_i – srautai [Wb].

Atsižvelgus į srovių kryptis, rotorius posūkio kampą ir į tai, kad mašina yra simetrinė, asinchroninio variklio lygtys gali būti užrašytos taip:

$$\begin{cases} \Psi_A = L_1 i_A + M_S (i_B + i_C) + M_{SR} [i_a \cos \varphi + i_b \cos(\varphi + 120^\circ) + i_c \cos(\varphi - 120^\circ)]; \\ \Psi_B = L_1 i_B + M_S (i_A + i_C) + M_{SR} [i_a \cos(\varphi - 120^\circ) + i_b \cos \varphi + i_c \cos(\varphi + 120^\circ)]; \\ \Psi_C = L_1 i_C + M_S (i_A + i_B) + M_{SR} [i_a \cos(\varphi + 120^\circ) + i_b \cos(\varphi - 120^\circ) + i_c \cos \varphi]; \\ \Psi_a = L_2 i_a + M_R (i_b + i_c) + M_{SR} [i_A \cos \varphi + i_B \cos(\varphi - 120^\circ) + i_C \cos(\varphi + 120^\circ)]; \\ \Psi_b = L_2 i_b + M_R (i_a + i_c) + M_{SR} [i_A \cos(\varphi + 120^\circ) + i_B \cos \varphi + i_C \cos(\varphi - 120^\circ)]; \\ \Psi_c = L_2 i_c + M_R (i_a + i_b) + M_{SR} [i_A \cos(\varphi - 120^\circ) + i_B \cos(\varphi + 120^\circ) + i_C \cos \varphi], \end{cases} \quad (2.5)$$

čia: L_1 ir L_2 – statoriaus ir rotorius savieji induktyvumas [H]; M_{SR} – statoriaus ir rotorius ričių abipusis induktyvumas, kai ričių ašys sutampa [H]; M_S (M_R) – skirtingų statoriaus (rotorius) apvijų ričių abipusis induktyvumas [H]; φ – kampas tarp rotorius ir statoriaus apvijų ašių elektriniais laipsniais.

(2.4) ir (2.5) lygtys su harmoniniu dėsniu kintančiais kintamaisiais aprašo sukiojo asinchroninio variklio elektromagnetinius pereinamuosius procesus. Jas spręsti gana sudėtinga, net ir taikant šiuolaikinę kompiuterinę techniką. Trifazio asinchroninio variklio lygtims supaprastinti naudojami variklio matematiniai modeliai ortogonalioje koordinačių sistemoje. Panaudojant dvifazę mašiną kaip ekvivalentinį modelį, sumažinamas lygčių, aprašančių dinaminis procesus, skaičius bei parametrų lygtys skaičius. Lygtys transformuotoje koordinačių sistemoje neturi harmoniniu dėsniu kintančių koeficientų.



2.17 pav. Trifazės mašinos kintamųjų transformavimo principas

Transformacija pakeičia trifazės mašinos statoriaus ir rotoriaus realius kintamuosius x_{1a} , x_{1b} , x_{1c} į ortogonaliąją koordinačių sistemą α , β , t. y. į ekvivalentinės dvifazės mašinos statoriaus ir rotoriaus realiuosius kintamuosius. Laikant, kad trifazės mašinos realieji kintamieji yra vektoriai ir kad transformuoti kintamieji α , β ašyse yra nelygūs, o proporcingi realiųjų kintamųjų x_{1a} , x_{1b} , x_{1c} projekcijų ašyse α , β sumai, remiantis schema, pavaizduota 2.17 pav. galima užrašyti:

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = k_s \left(x_{1a} - \frac{1}{2} x_{1b} - \frac{1}{2} x_{1c} \right); \\ x_{1\beta} = k_s \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x_{1b} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1c} \right), \end{cases} \quad (2.7)$$

čia $k_s = \sqrt{\frac{2}{3}}$ – proporcingumo koeficientas, užtikrinantis invariantiškumo sąlygą transformuojant kintamuosius.

Jeigu atsižvelgiama į nulinės sekos dedamąją x_{10} (ji atsiranda nesimetrinės mašinos atveju), t. y. $x_{1a} + x_{1b} + x_{1c} \neq 0$, tada tiesioginės kintamųjų transformacijos formulės yra:

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(x_{1a} - \frac{1}{2} x_{1b} - \frac{1}{2} x_{1c} \right); \\ x_{1\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x_{1b} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1c} \right); \\ x_{10} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} x_{1a} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{1b} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{1c} \right). \end{cases} \quad (2.8)$$

Pagal analogiją sudaromos atvirkštinės transformacijos formulės:

$$\begin{cases} x_{1a} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(x_{1\alpha} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right); \\ x_{1b} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} x_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\beta} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right); \\ x_{1c} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} x_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\beta} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right). \end{cases} \quad (2.9)$$

Kintamųjų transformavimo formulės (2.8) ir (2.9) naudojamos tiriant simetrinės trifazės mašinos nesimetrinius režimus.

2.4.2. Sukiosios mašinos lygčių kintamųjų transformavimas

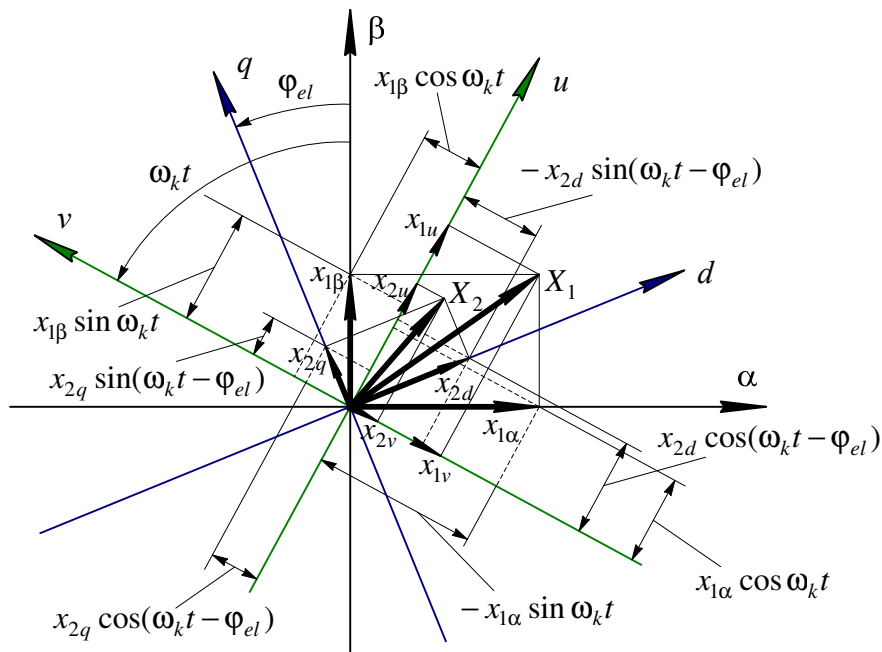
Matematiniam elektromechaninio energijos keitimo aprašyme kaip nepriklausomi kintamieji naudojamos realios apibendrintosios mašinos apvijų srovės ir realios jų maitinimo įtampos (lygčių sistema (2.4)). Tai yra šio matematinio modelio privalumas. Jis suteikia informacijos apie sistemos fizikinius procesus, bet lygtis analizuoti yra sunku, nes jose yra harmoniniu dėsniu kintantys parametrai.

Sprendžiant daugelį uždavinių, elektromechaninio energijos keitimo matematinį aprašymą galima supaprastinti, panaudojant elektromechaninio keitiklio lygčių sistemos tiesinį transformavimą. Čia esami kintamieji pakeičiami naujaisiais, išsaugant adekvatų fizikinio modelio matematinį aprašymą. Naujieji kintamieji gali būti realūs ar kompleksiniai dydžiai, susiję su realiaisiais kintamaisiais pagal transformavimo formules.

Transformavimo tikslas yra tam tikras duotojo dinaminio procesų matematinio modelio supaprastinimas. Jį taikant, pašalinama apvijų induktyvumų ir abipusių induktyvumų

priklausomybė nuo rotoriaus posūkio kampo, atsiranda galimybė operuoti ne sinuso dėsnio kintančiais kintamaisiais, bet jų amplitudėmis ir pan.

Elektros mašinos kintamųjų momentinės vertės pateikiamos vektoriais (2.18 pav.). Vektoriaus kryptis susieta su nagrinėjamąją apviją atitinkančia koordinačių ašimi, o modulis kinta laike, keičiantis vaizduojamam kintamajam. Apvijų kintamieji pažymėti raide x su atitinkamu indeksu, kuris parodo duotojo kintamojo priklausomybę tam tikrai koordinačių ašiai. Taip pat parodytas susijusių su statoriumi ašių α, β ir susijusių su rotoriumi ašių d, q bei besisukančių nejudančio statoriaus atžvilgiu ortogonalinių koordinačių u, v sistemos tarpusavio išdėstymas laikui bėgant.



2.18 pav. Įvairių koordinačių sistemų apibendrintosios mašinos kintamieji

α, β koordinačių sistemai priklauso statoriaus kintamieji, o d, q koordinačių sistemai – rotoriaus kintamieji. Norint pereiti prie tam tikru greičiu ω_k besisukančios koordinačių sistemos u, v , reikia atlikti kintamųjų tiesioginę transformaciją (žr. 2.18 pav.):

$$\begin{cases} x_{1u} = x_{1\alpha} \cos \omega_k t + x_{1\beta} \sin \omega_k t; \\ x_{1v} = -x_{1\alpha} \sin \omega_k t + x_{1\beta} \cos \omega_k t; \\ x_{2u} = x_{2d} \cos(\omega_k t - \varphi_{el}) + x_{2q} \sin(\omega_k t - \varphi_{el}); \\ x_{2v} = -x_{2d} \sin(\omega_k t - \varphi_{el}) + x_{2q} \cos(\omega_k t - \varphi_{el}). \end{cases} \quad (2.10)$$

Apibendrintosios mašinos dinamika aprašoma keturiomis lygtimis, nusakančiomis jos apvijų grandinių elektrinę pusiausvyrą, ir elektromechaninės energijos keitimo lygtimi, kuri

išreiškia elektros variklio sukuriamą elektromagnetinį momentą M elektrinių ir mechaninių sistemos koordinačių funkcija:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = i_{1\alpha} R_1 + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = i_{1\beta} R_1 + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_{2d} = i_{2d} R_2 + \frac{d\Psi_{2d}}{dt}; \\ u_{2q} = i_{2q} R_2 + \frac{d\Psi_{2q}}{dt}; \\ M = \frac{m}{2} \sum_{i=1\alpha}^{i=2q} \Psi_i i_i, \end{cases} \quad (2.11)$$

čia: $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$, – statoriaus įtampos [V]; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ ir $\Psi_{1\alpha}$, $\Psi_{1\beta}$ – statoriaus srovių [A] ir surišųjų srautų [Wb] projekcijos į α , β ašis; u_{2d} , u_{2q} – rotorius įtampos [V]; i_{2d} , i_{2q} ir Ψ_{2d} , Ψ_{2q} – rotorius srovių [A] ir surišųjų srautų [Wb] projekcijos į d , q ašis; R_1 ir R_2 – statoriaus fazės ir rotorius fazės aktyviosios varžos [Ω]; m – fazių skaičius.

Lygčių sistemos (2.11) pirmos keturios lygtys transformuojamos naudojant (2.10) lygtis. Po tam tikrų pertvarkymų gaunama:

$$\begin{cases} u_{1u} = i_{1u} R_1 + \frac{d\Psi_{1u}}{dt} - \omega_k \Psi_{1v}; \\ u_{1v} = i_{1v} R_1 + \frac{d\Psi_{1v}}{dt} + \omega_k \Psi_{1u}; \\ u_{2u} = i_{2u} R_2 + \frac{d\Psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega_{el}) \Psi_{2v}; \\ u_{2v} = i_{2v} R_2 + \frac{d\Psi_{2v}}{dt} + (\omega_k - \omega_{el}) \Psi_{2u}. \end{cases} \quad (2.12)$$

čia: ω_k – koordinačių sistemos u , v sukimosi greitis [rad/s]; ω_{el} – rotorius sukimosi greitis [rad/s].

Lygčių sistemoje (2.12) esantys srautai išreiškiami per apvijų induktyvumus ir sroves:

$$\begin{cases} \Psi_{1u} = L_1 i_{1u} + L_{12} i_{2u}; \\ \Psi_{1v} = L_1 i_{1v} + L_{12} i_{2v}; \\ \Psi_{2u} = L_2 i_{2u} + L_{12} i_{1u}; \\ \Psi_{2v} = L_2 i_{2v} + L_{12} i_{1v}, \end{cases} \quad (2.13)$$

čia: L_1 ir L_2 – pilnutiniai ekvivalentiniai statoriaus ir rotorius fazių induktyvumas [H]; L_{12} – įmagnetinimo induktyvumas [H].

Neryškiapolės mašinos momentas užrašomas taip:

$$M = p_p L_{12} [(i_{1\beta} i_{2d} - i_{1\alpha} i_{2q}) \cos \varphi_{el} - (i_{1\beta} i_{2q} - i_{1\alpha} i_{2d}) \sin \varphi_{el}], \quad (2.14)$$

čia p_p – asinchroninio variklio polių porų skaičius; φ_{el} – kampas tarp statoriaus ir rotorius apvijų ašių elektriniais laipsniais.

Pakeičiant (2.14) lygtyje realiuosius kintamuosius į transformuotuosius pagal lygčių sistemą (2.10) ir pasinaudojus (2.13) lygtimis, gaunamos tokios formulės apibendrintosios mašinos elektromagnetiniam momentui rasti:

$$M = p_p (\Psi_{1u} i_{1v} - \Psi_{1v} i_{1u}); \quad (2.15)$$

$$M = p_p (\Psi_{2u} i_{2v} - \Psi_{2v} i_{2u}); \quad (2.16)$$

$$M = \frac{p_p L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}} (\Psi_{1v} \Psi_{2u} - \Psi_{1u} \Psi_{2v}). \quad (2.17)$$

Apjungus elektromechaninės charakteristikos (2.12) lygtis su viena iš elektromagnetinio momento lygtimi (2.15) – (2.17), gaunamas variklio mechaninių charakteristikų matematinis aprašymas koordinačių sistemoje u, v :

$$\begin{cases} u_{1u} = i_{1u} R_1 + \frac{d\Psi_{1u}}{dt} - \omega_k \Psi_{1v}; \\ u_{1v} = i_{1v} R_1 + \frac{d\Psi_{1v}}{dt} + \omega_k \Psi_{1u}; \\ u_{2u} = i_{2u} R_2 + \frac{d\Psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega_{el}) \Psi_{2v}; \\ u_{2v} = i_{2v} R_2 + \frac{d\Psi_{2v}}{dt} + (\omega_k - \omega_{el}) \Psi_{2u}; \\ M = \frac{m}{2} \frac{p_p L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}} (\Psi_{1v} \Psi_{2u} - \Psi_{1u} \Psi_{2v}). \end{cases} \quad (2.18)$$

Ši lygčių sistema papildoma pagrindine pavaros judesio lygtimi:

$$M - M_{st} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.19)$$

čia: M_{st} – veleno apkrovos (statinis) momentas [$N \times m$], J – inercijos momentas [$kg \times m^2$].

Be to

$$\omega_{el} = p_p \omega, \quad (2.20)$$

čia ω – rotoriaus sukimosi greitis [rad/s].

2.4.3. TAV lygtys transformuotoje α, β koordinačių sistemoje

Tiesiaeigio variklio modeliui sudaryti nejudančioje koordinačių sistemoje α, β imamos dvifazės asinchroninės mašinos lygtys (2.18) ir, įrašant $\omega_k = 0$ ir $\omega_{el} = \frac{\pi}{\tau} v$ (čia v – antrinio elemento greitis [m/s]; τ – poliaus žingsnis [m]), jos pertvarkomos tiesiaeigiam varikliui.

Tiesiaeigio variklio jėga apskaičiuojama taikant galių balanso sąlygą [10]

$$F = M \cdot \frac{\pi}{\tau p_p} \quad (2.21)$$

ir gaunama:

$$F = \frac{m \pi}{2 \tau} \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}} (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}). \quad (2.22)$$

Taigi, įvertinus anksčiau pasakyta, tiesiaeigio asinchroninio variklio lygtys nejudančioje koordinačių sistemoje α, β atrodo taip:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = i_{1\alpha} R_1 + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = i_{1\beta} R_1 + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_{2\alpha} = i_{2\alpha} R_2 + \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} + \frac{\pi}{\tau} v \cdot \Psi_{2\beta}; \\ u_{2\beta} = i_{2\beta} R_2 + \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ F = \frac{m}{2} \frac{\pi}{\tau} \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}} (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}). \end{cases} \quad (2.23)$$

Slenkamojo judesio atveju pagrindinė pavaros judesio lygtis gaunama iš antrojo Niutono dėsnio $F = m_1 a$:

$$F - F_{st} = m_1 \frac{dv}{dt}, \quad (2.24)$$

čia: F – tiesiaieigio variklio išvystoma jėga [N]; F_{st} – statinė pasipriešinimo jėga [N]; m_1 – antrinio elemento masė [kg]; v – antrinio elemento greitis [m/s].

Antrinio elemento nueitas kelias randamas integravus iš (2.24) lygties gautą greitį.

2.5. Dažniu valdomos TAP modelio sudarymas

Kompiuterinis modelis yra sudaromas Matlab Simulink 6.3 aplinkoje. Sudarant visus modelius buvo naudojamos literatūra [22, 23, 24].

Programa Simulink yra matematinio paketo Matlab priedas (arba išplėtimas). Atliekant modeliavimus Simulink aplinkoje, realizuojamas vizualinio programavimo principas. Tam vartotojas iš standartinių blokų bibliotekos kompiuterio ekrane sukuria reikiamo įtaiso modelį ir atlieka skaičiavimus. Vartotojui nereikia studijuoti programavimo kalbos ir matematikos skaitinių metodų, o pakanka turėti darbo su kompiuteriu pagrindinių įgūdžių ir turėti žinių iš tos srities, kurioje jis atlieka modeliavimą.

Simulink yra pakankamai savarankiškas Matlab įrankis ir dirbant jo aplinkoje visiškai nebūtina mokėti dirbti su pačia Matlab programa arba kitais jos priedais. Atliekant modeliavimus, vartotojas gali pasirinkti diferencialinių lygčių sprendimo metodą, o taip pat modeliavimo laiko pasikeitimo metodą (naudoti fiksuotą arba kintantį žingsnį). Modeliavimo eigoje yra galimybė stebėti procesus, vykstančius sistemoje. Tam naudojami specialūs stebėjimo

blokai iš Simulink elementų bibliotekos. Modeliavimo rezultatai gali būti pateikiami grafikų arba lentelių pavidalu [22].

Tiriamąjo variklio techniniai parametrai yra:

induktoriaus apvijų aktyvioji varža	R_1	2,82 Ω ;
antrinio elemento apvijų aktyvioji varža	R_2	48,82 Ω ;
pagrindinė įmagnetinimo induktyvioji varža	X_m	8,24 Ω ;
induktoriaus sklaidos induktyvioji varža	$X_{1\sigma}$	5,96 Ω ;
antrinio elemento sklaidos induktyvioji varža	$X_{2\sigma}$	1,23 Ω ;
poliaus žingsnis	τ	0,06 m;
antrinio elemento masė	m_1	3 kg.

Viso modelio pagrindu imama lygčių sistema (2.23). Kadangi šios sistemos kiekviena lygtis turi po du kintamuosius (srovė ir srautas), tai norint sumažinti jų skaičių, srovės išreiškiamos per srautus Ψ naudojant (2.13) lygtis. Kadangi tiesiaiegis asinchroninis variklis yra trifazis, tai skaičiuojant jėgą F yra imamas koeficientas $3/2$. Variklio išvystoma jėga skaičiuojama per srautus Ψ , todėl patogumo dėlei jie išreiškiami per kitus narius. Atlikus visus pertvarkymus, gaunama:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} = u_{1\alpha} - R_1 \left(\frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1\alpha} - \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2\alpha} \right); \\ \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} = u_{1\beta} - R_1 \left(\frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1\beta} - \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2\beta} \right); \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = u_{2\alpha} - R_2 \left(\frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2\alpha} - \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1\alpha} \right) - \frac{\pi}{\tau} v \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = u_{2\beta} - R_2 \left(\frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2\beta} - \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1\beta} \right) + \frac{\pi}{\tau} v \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}). \end{cases} \quad (2.25)$$

Variklio parametrų skaičiavimas:

- induktoriaus sklaidos induktyvumas

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2\pi f} = \frac{5,96}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0190 \text{ H};$$

- antrinio elemento sklaidos induktyvumas

$$L_{2\sigma} = \frac{X_{2\sigma}}{2\pi f} = \frac{1,23}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00392 \text{ H};$$

- įmagnetinimo induktyvumas

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{8,24}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0262 \text{ H};$$

- pilnutinis ekvivalentinis induktoriaus induktyvumas

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,0190 + 0,0262 = 0,0452 \text{ H};$$

- pilnutinis ekvivalentinis antrinio elemento induktyvumas

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_m = 0,00392 + 0,0262 = 0,0301 \text{ H};$$

- abipusis induktyvumas

$$L_{12} = L_m = 0,0262 \text{ H}.$$

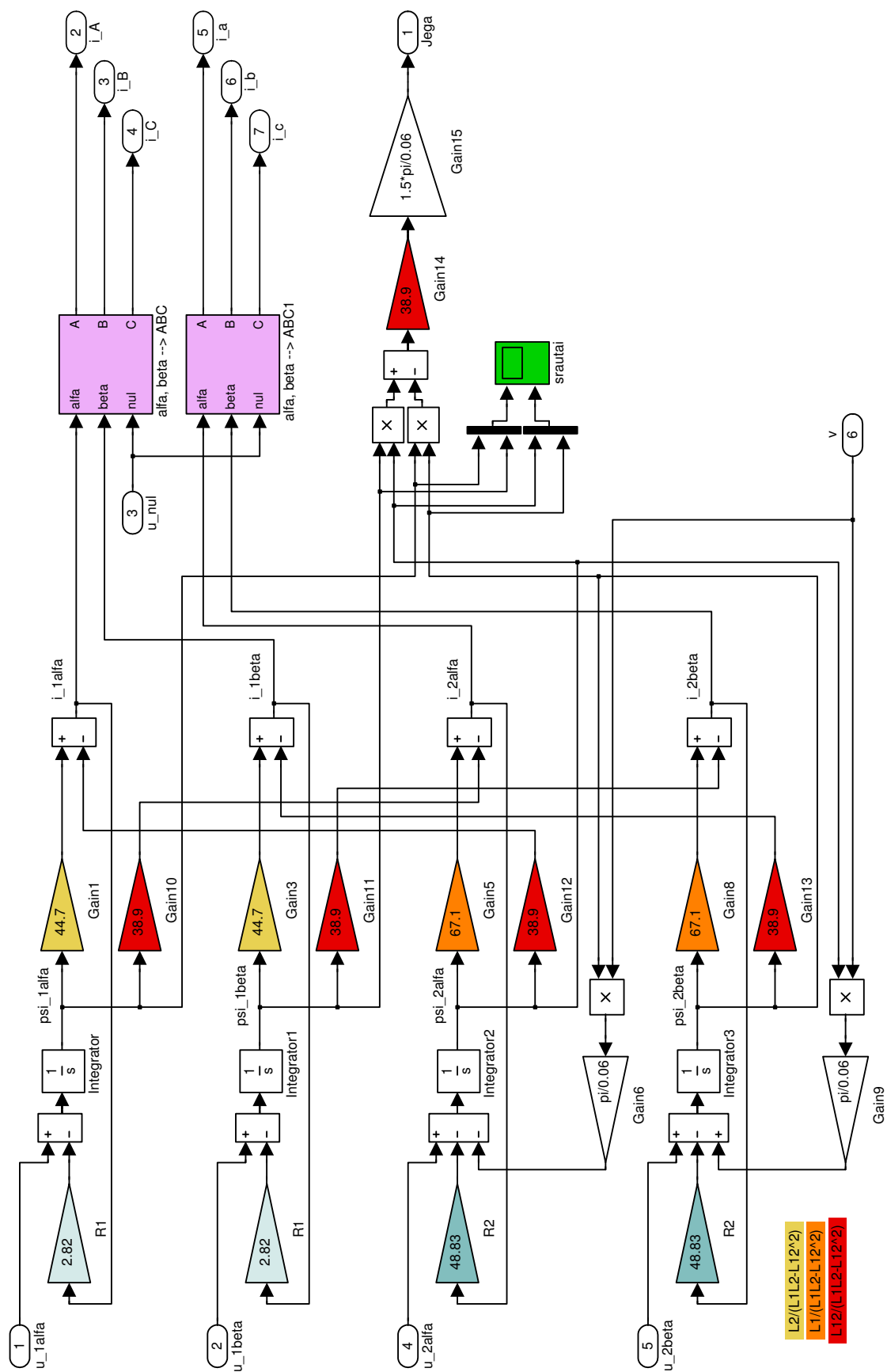
Lygčių sistemos (2.25) koeficientų skaičiavimas:

$$\frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \frac{0,0452}{0,0452 \cdot 0,0301 - 0,0262^2} = 67,1;$$

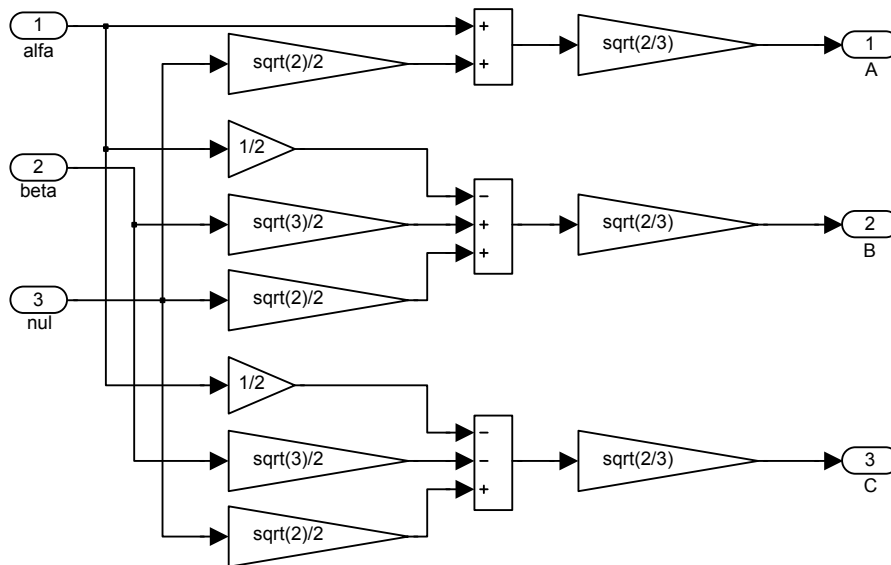
$$\frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \frac{0,0301}{0,0452 \cdot 0,0301 - 0,0262^2} = 44,7;$$

$$\frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \frac{0,0262}{0,0452 \cdot 0,0301 - 0,0262^2} = 38,9.$$

Pagal (2.25) lygtis sudarytas modelis parodytas 2.19 pav. Šitame modelyje yra du blokai (alfa, beta --> ABC), kurie atlieka induktoriaus ir antrinio elemento srovių atvirkštines transformacijas iš dvifazės α, β koordinačių sistemos į realiąją trifazę koordinačių sistemą pagal lygčių sistemą (2.9). Tokio bloko modelis parodytas 2.20 pav.

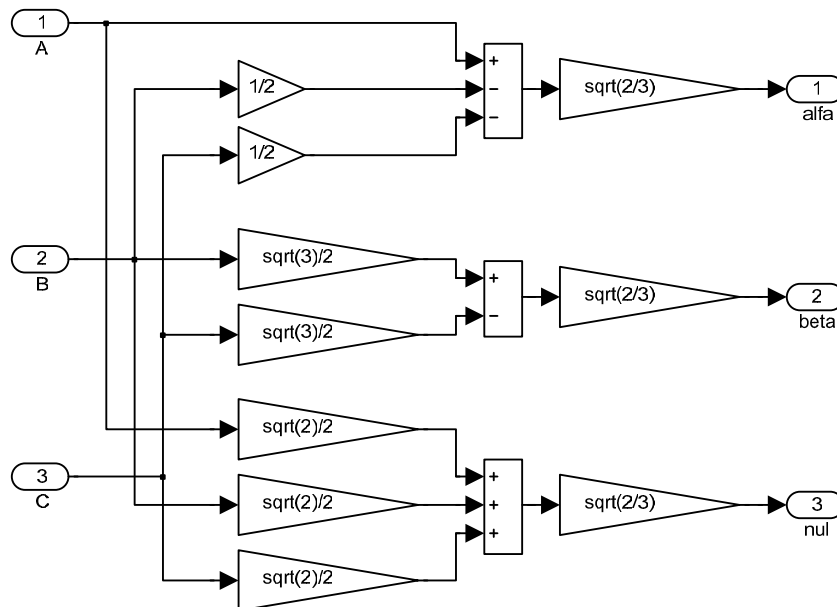


2.19 pav. Trifazio dažniu valdomo TAV modelis α , β koordinatų sistemoje



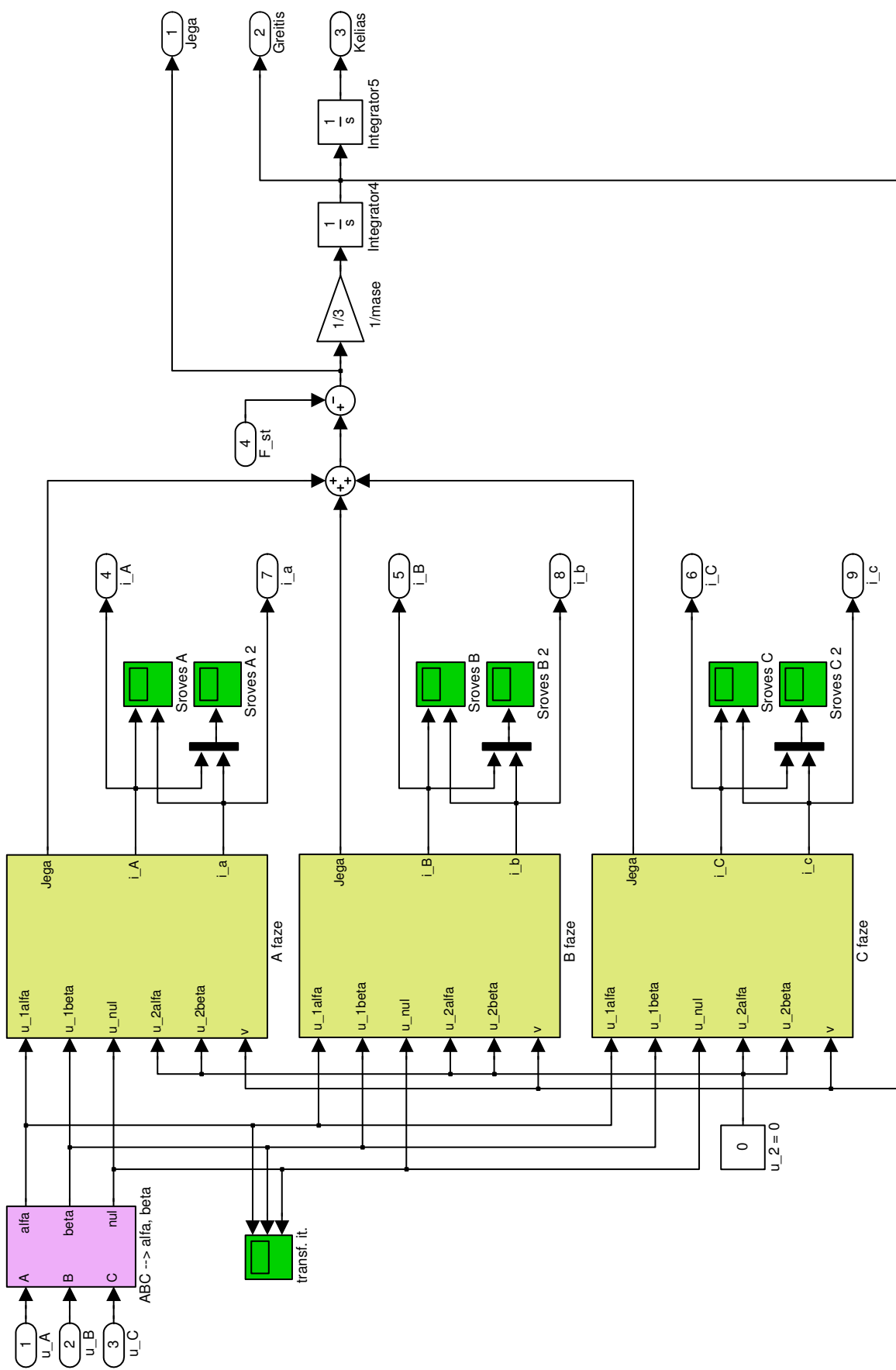
2.20 pav. Blokas, atliekantis atvirkštinę koordinačių transformaciją iš dvifazės koordinačių sistemos į trifazę

Modelio įėjime yra trys sinusinio signalo blokai, kurie modeliuoja trifazį simetrinį maitinimo tinklą (žr. 2.22 pav.). Todėl reikalingas blokas, atliekantis tiesioginę maitinimo įtampų transformaciją į ekvivalenčias dvifazės sistemos įtampas. Toks blokas, sudarytas pagal (2.8) lygtis, parodytas 2.21 pav.

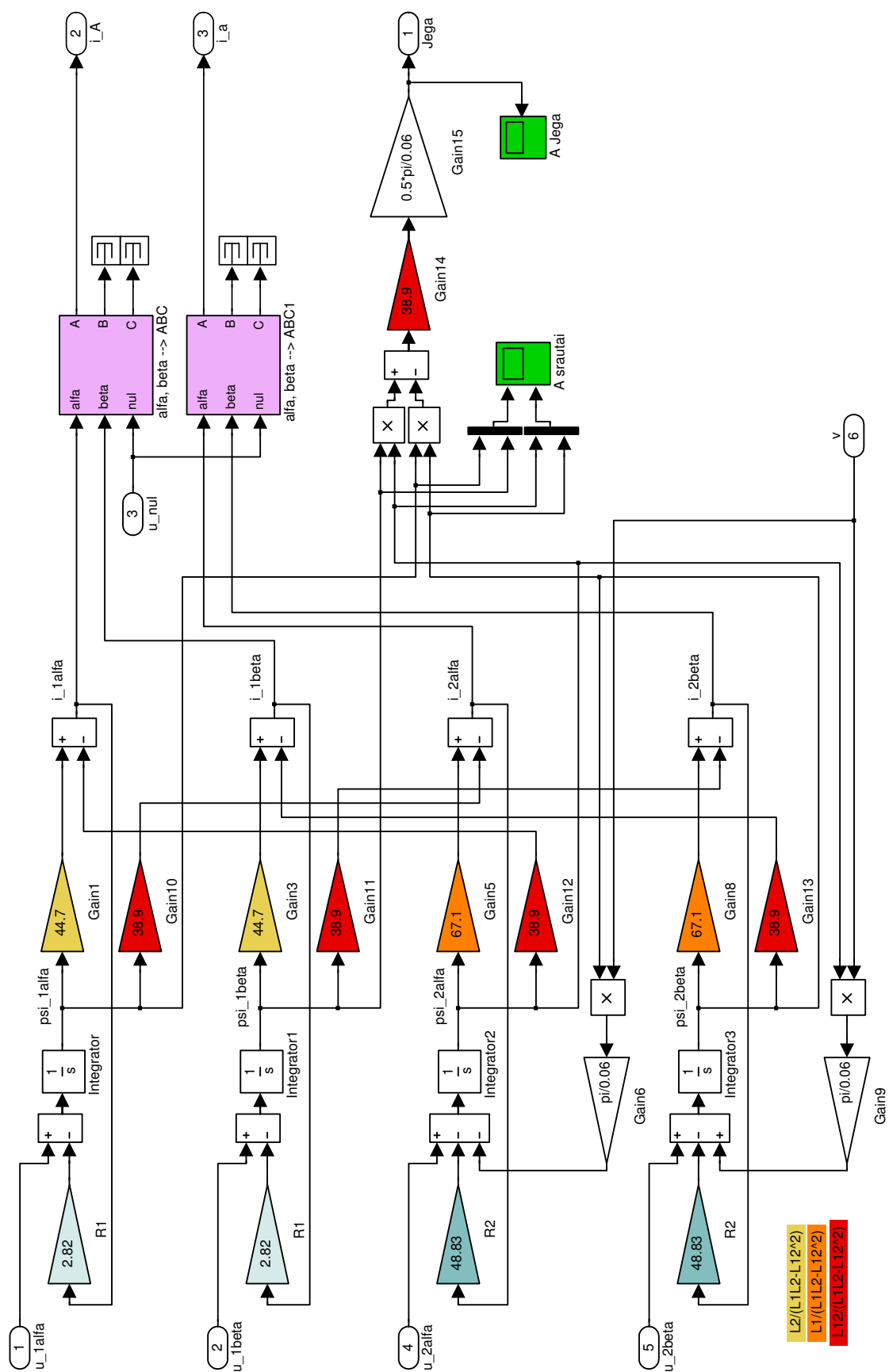


2.21 pav. Blokas, atliekantis tiesioginę koordinačių transformaciją iš trifazės koordinačių sistemos į dvifazę

Modelis, parodytas 2.19 pav., sudaro atskirą posistemę (2.22 pav.), kurios įėjimai yra: transformuotos indukatoriaus maitinimo įtampos $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$, u_{nul} , antrinio elemento maitinimo įtampos $u_{2\alpha}$, $u_{2\beta}$ (jos lygios nuliui) ir antrinio elemento greičio v grįžtamasis ryšis.



2.23 pav. Trifazio nesimetriniu būdu valdomo TAV modelis α, β koordinatų sistemoje

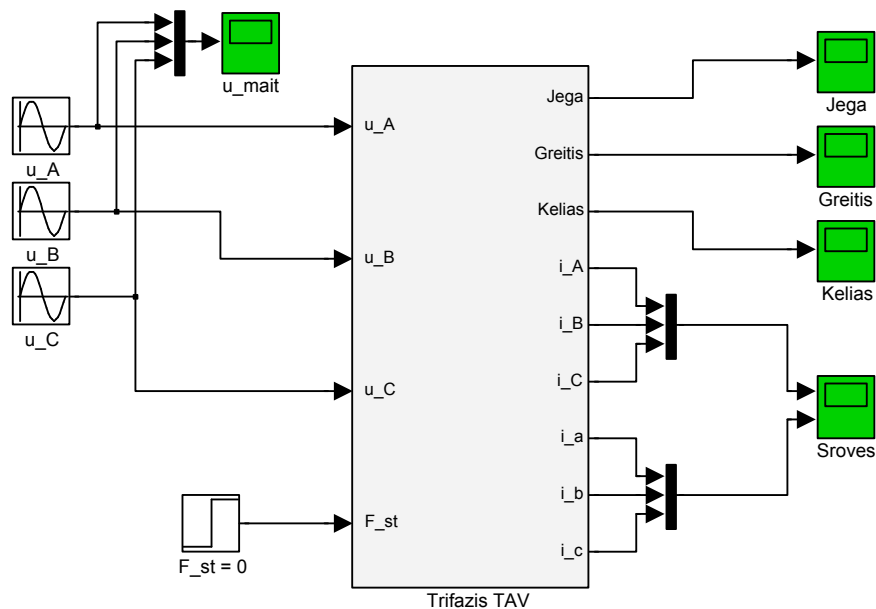


2.24 pav. Trifazio nesimetrinio būdu valdomo TAV vienos fazės modelis α , β koordinatų sistemoje

antrinio elemento srovė i_a . Prie kitų atvirkštinės α, β transformacijos blokų išėjimų yra prijungti vadinamieji „terminatoriai“, kurie uždaro nenaudojamus išėjimus. Analogiškai iš B ir C fazių modelių išėjimuose yra srovės i_B, i_b, i_C ir i_c atitinkamai. Kiti šių blokų srovių išėjimai uždaryti „terminatoriais“.

2. Stiprinimo blokas „Gain15“, kuriame įrašomi jėgos skaičiavimo koeficientai $\frac{m}{2} \frac{\pi}{\tau}$ (čia m – fazių skaičius [5]). Trifazio variklio atveju $m/2 = 1,5$, o nesimetriniu būdu valdomo variklio atveju $m/2 = 0,5$, kas atitinka sąlyginę trifazio variklio vienos fazės kuriamąją jėgą.

Bendras nesimetriniu būdu valdomo trifazio TAV modelio vaizdas pateikiamas 2.25 pav. Čia visas variklis vaizduojamas kaip 2.23 pav. pateikto modelio posistemė.



2.25 pav. Nesimetriniu būdu valdomos trifazės TAP modelio bendras vaizdas

Bendro modelio įėjimai yra netransformuotos maitinimo įtampos u_A, u_B, u_C ir apkrovos jėga F_{st} . Modelio išėjimai yra variklio kuriamoji jėga, antrinio elemento greitis ir nueitas kelias, induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kurios savo ruožtu išeina iš trijų atskirų variklio fazių modelių.

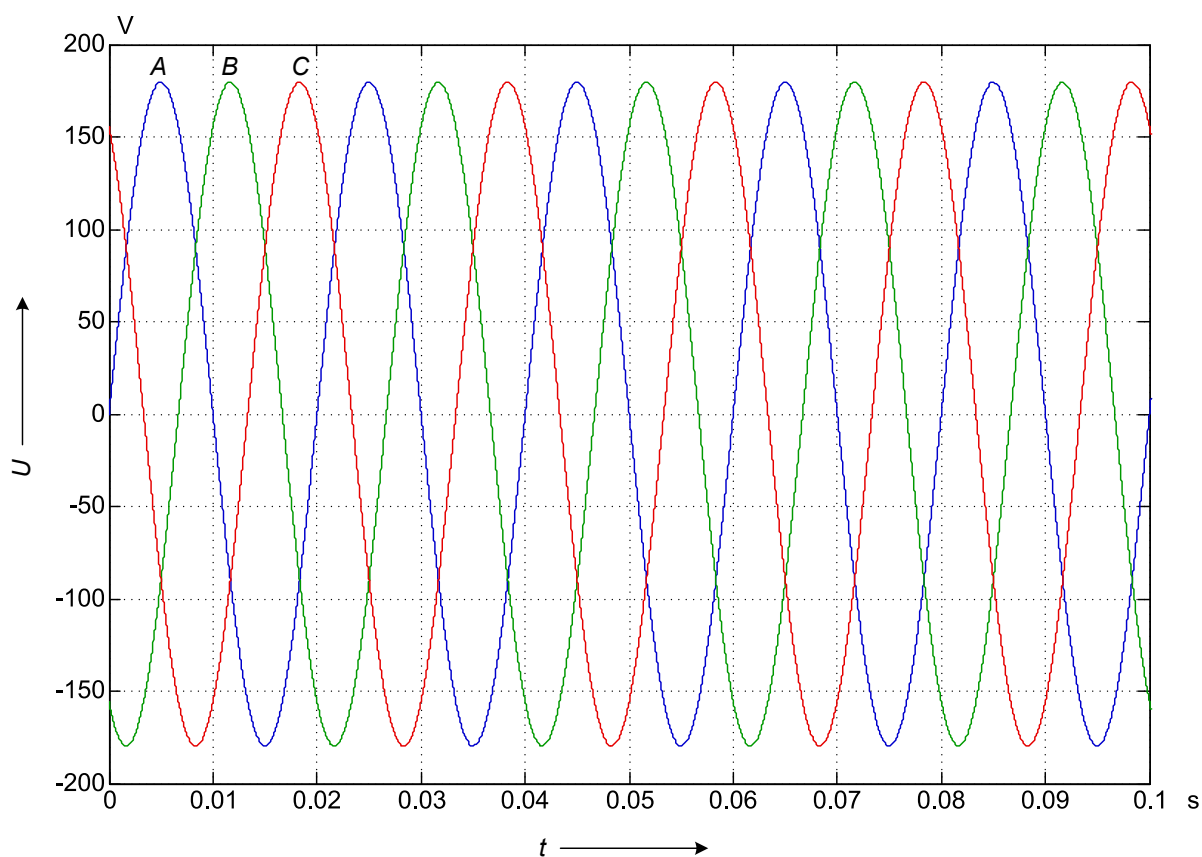
3. TIRIAMOJI DALIS

3.1. Dažniu valdomos TAP dinaminų režimų imitacija ir tyrimas

Modeliavimo laikas t parenkamas lygus 1 s. Modeliavimas atliekamas naudojant fiksuoto žingsnio režimą. Žingsnio dydis yra 2×10^{-5} s. Visos charakteristikos gaunamos neapkrautam varikliui. Dinaminų režimų imitacijai parenkami trys maitinimo įtampos dažniai f :

- 30 Hz;
- 50 Hz;
- 60 Hz.

Iš pradžių atliekamas modeliavimas maitinimo įtampos dažniui esant 50 Hz. Maitinimo įtampas, gautos iš rezultatų stebėjimo bloko „u_mait“ (žr. 2.22 pav.), pateikiamos 3.1 pav.

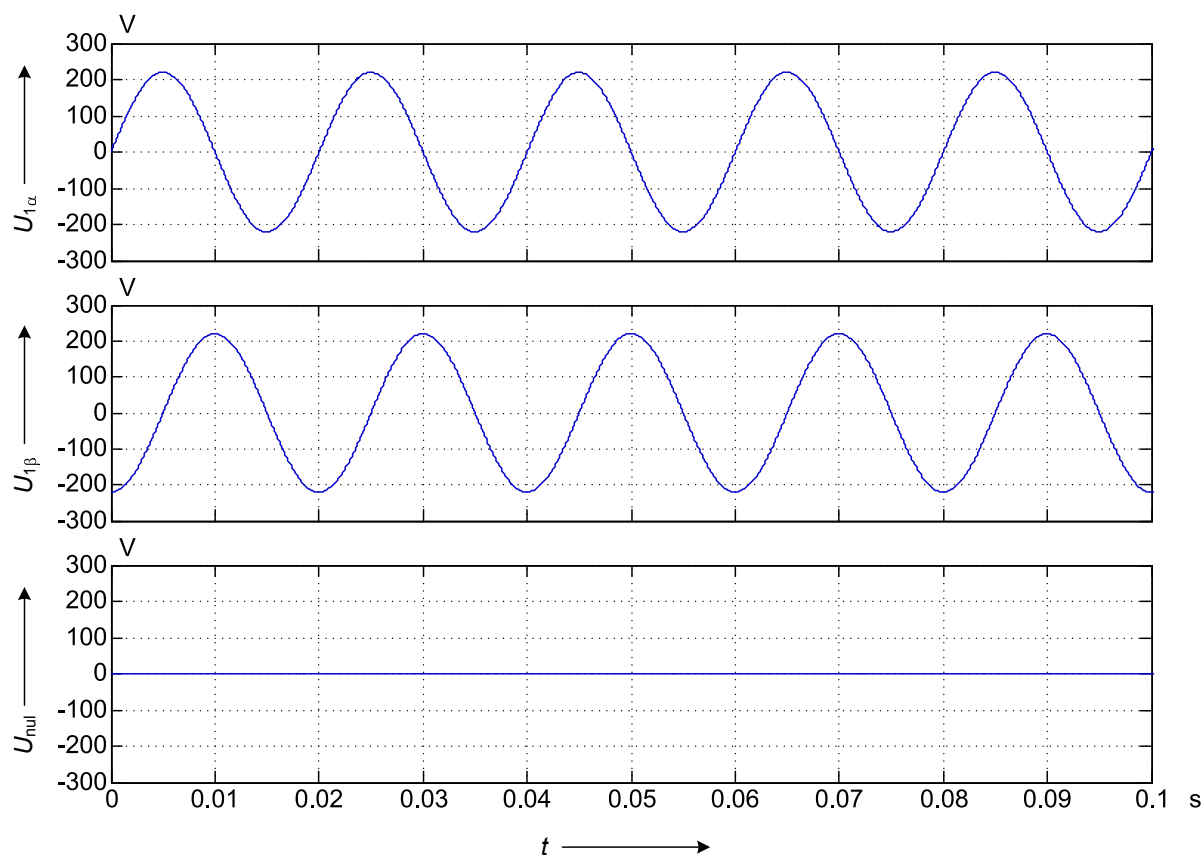


3.1 pav. Modeliuojamo TAV 50 Hz dažnio maitinimo įtampas

Variklis yra maitinamas iš trifazio simetrinio tinklo 127 V fazine įtampa. Kiekvienos fazės įtampos amplitudė yra $127\sqrt{2} = 180$ V. Maitinimo įtampų amplitudės modeliavimo laiko bėgyje nesikeičia, todėl aukščiau parodytame paveikslėlyje laiko atkarpa yra 0,1 s.

Kadangi TAV modelis sudarytas dvifazėje α, β koordinačių sistemoje, tai maitinimo įtampas reikia transformuoti iš trifazės sistemos į dvifazę. Tokią transformaciją atlieka blokas

„ABC --> alfa, beta“, kurio modelis pateiktas 2.21 pav. Transformuotos modelio maitinimo įtampos pateikiamos žemiau.



3.2 pav. Transformuotos modelio maitinimo įtampos

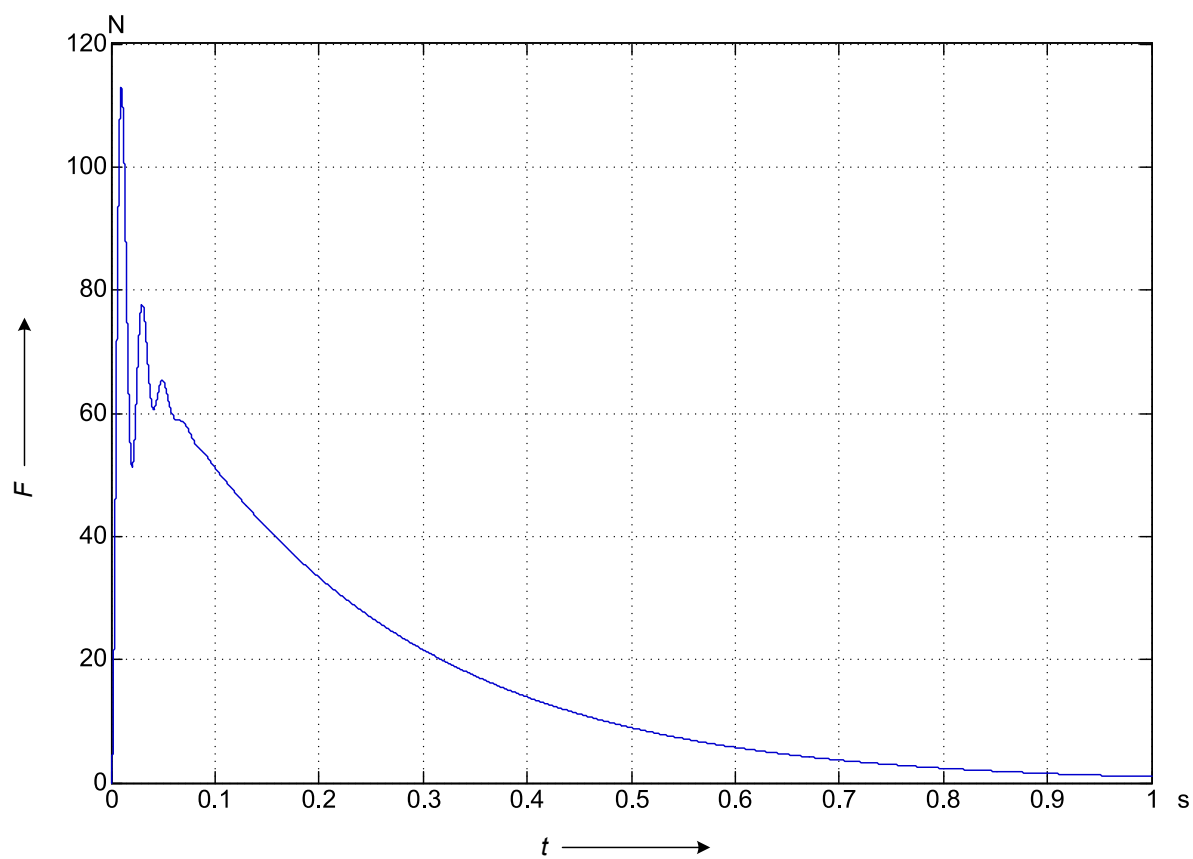
Realios maitinimo įtampos (3.1 pav.) yra simetrinės, todėl nulinė dedamoji yra lygi nuliui. Transformuotų įtampų amplitudė yra 220 V, o kampas tarp įtampų yra 90°

TAV kuriamosios jėgos pereinamasis procesas parodytas 3.3 pav. Per labai trumpą laiką jėga padidėja nuo nulio iki maksimumo. Laiko momentu $t = 0,01$ s variklis sukuria maksimalią jėgą 113 N. Vėliau jėga sumažėja ir vėl padidėja, t. y. prasideda jėgos švytavimai. Laikui bėgant, jie nuslopsta, ir jėga pradeda eksponentiškai mažėti iki nulio, kadangi variklis yra neapkrautas.

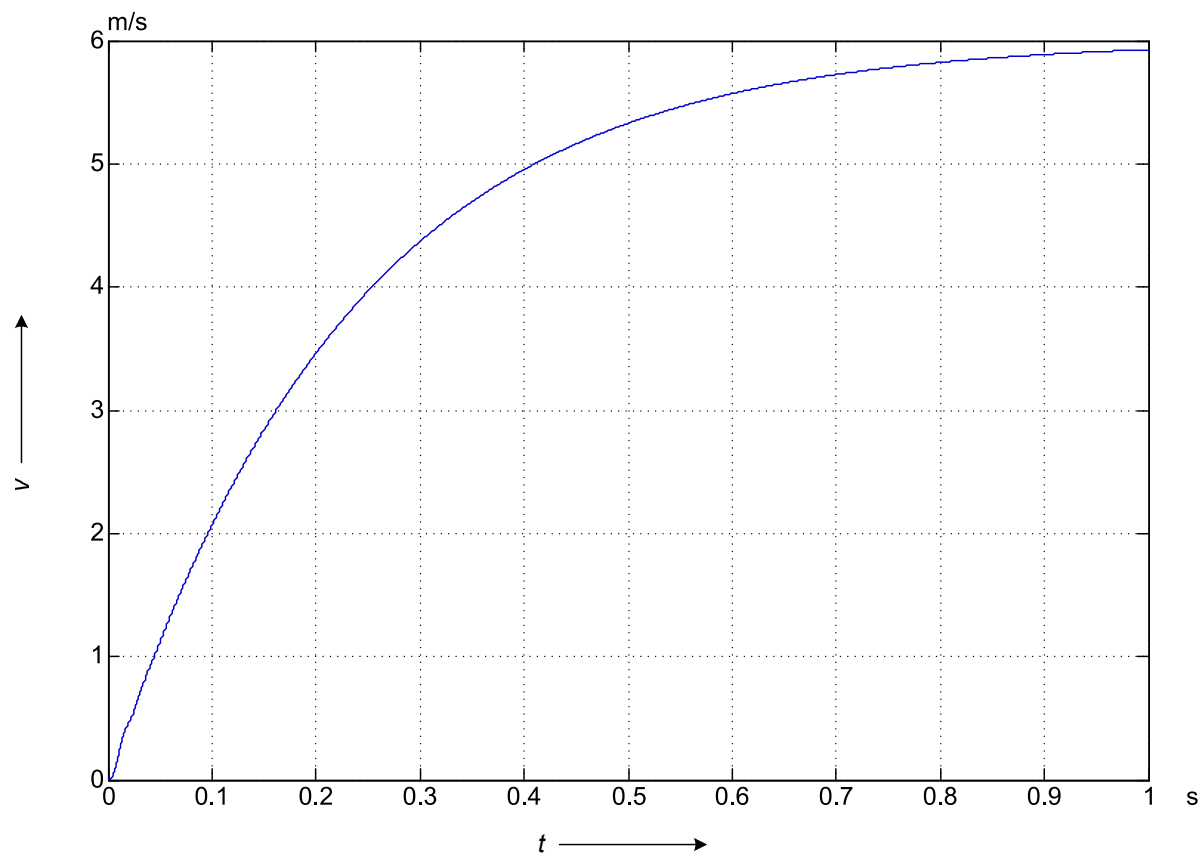
3.4 pav. yra parodyta TAV antrinio elemento greičio priklausomybė nuo laiko. Laikui bėgant, greitis eksponentiškai didėja ir artėja prie sinchroninio greičio

$$v_0 = 2\pi f = 2 \cdot 0,06 \cdot 50 = 6 \text{ m/s.}$$

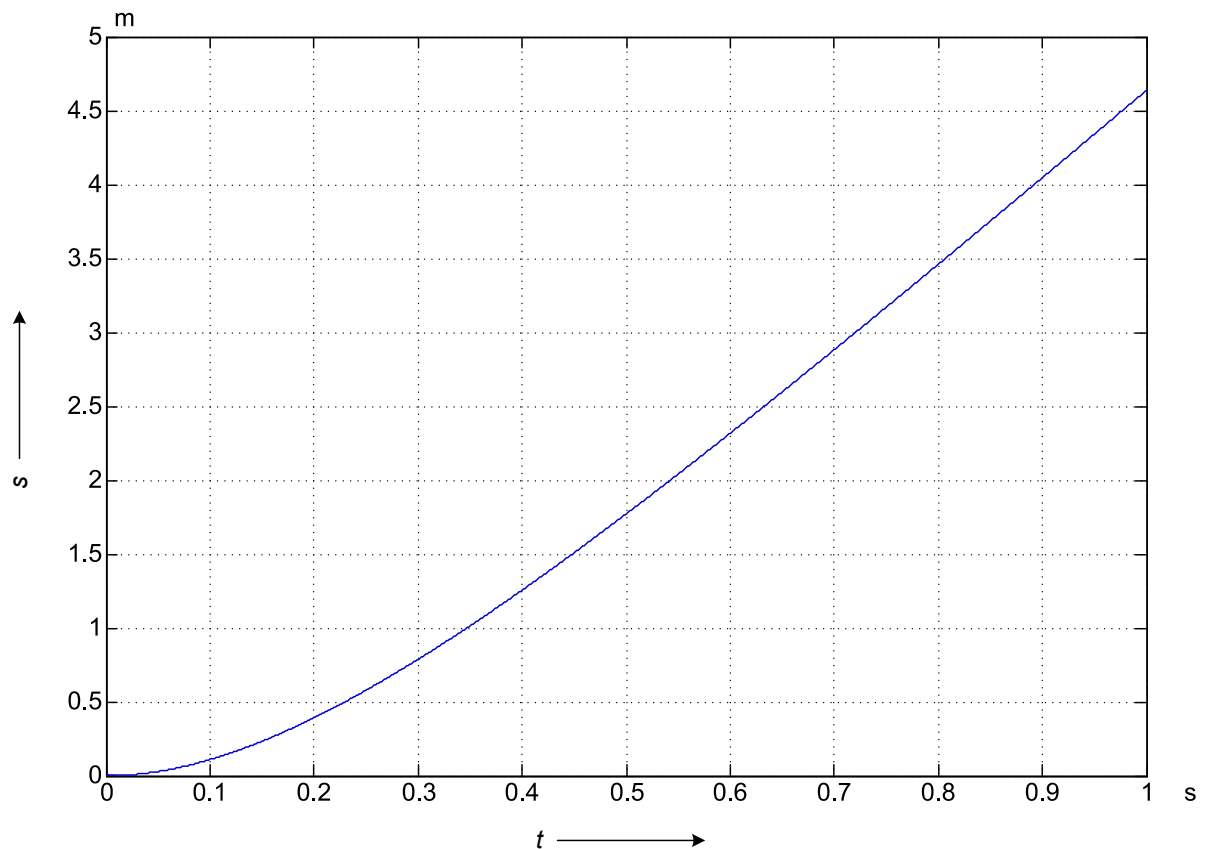
Pačioje charakteristikos pradžioje matomas nedidelis staigus greičio pakilimas, kurį nulemia šiuo laiko momentu atsirandantis jėgos maksimumas.



3.3 pav. Dažniu valdomo TAV jėgos pereinamasis procesas, kai maitinimo įtampos dažnis yra 50 Hz



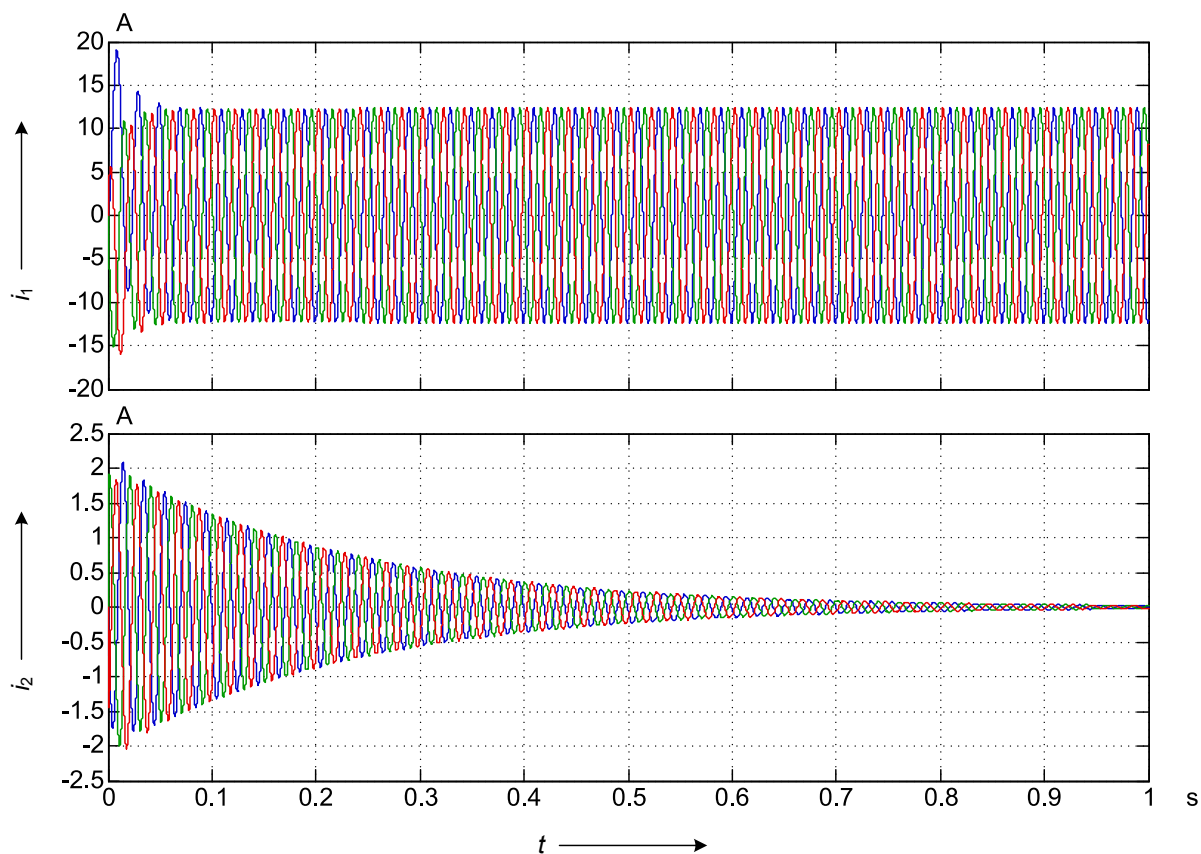
3.4 pav. Dažniu valdomo TAV greičio pereinamasis procesas, kai maitinimo įtampos dažnis yra 50 Hz



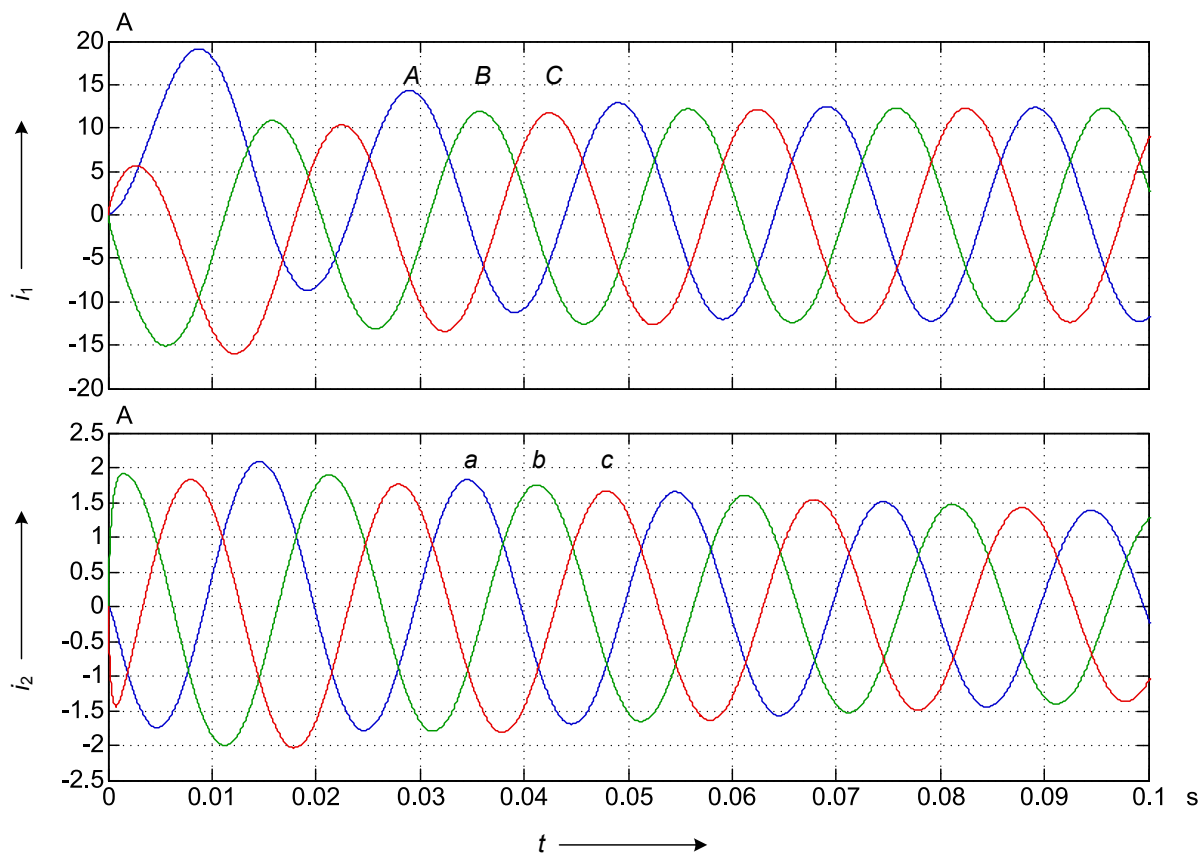
3.5 pav. Dažniu valdomo TAV antrinio elemento nueito kelio priklausomybė nuo laiko, kai maitinimo įtampos dažnis yra 50 Hz

TAV antrinio elemento nueito kelio priklausomybė nuo laiko pateikiama 3.5 pav. Charakteristika kyla parabolės dėsnio apytiksliai 0,6 s, kol antrinio elemento greitis didėja eksponentiškai, t. y. kol egzistuoja pagreitis. Po 0,6 s greitis jau praktiškai nusistovėjęs, todėl antrinio elemento nueito kelio priklausomybė nuo laiko pasidaro tiesinė.

3.6 pav. ir 3.7 pav. yra parodyti induktoriaus ir antrinio elemento srovių pereinamieji procesai. Iš pateiktų paveikslėlių gerai matyti, kad modeliavimo pradžioje induktoriaus srovių amplitudės skiriasi tarpusavyje. Tą patį galima pasakyti ir apie antrinio elemento sroves. Vėliau induktoriaus srovių amplitudės nusistovi apie 12,4 A, o antrinio elemento srovių amplitudės pradeda eksponentiškai mažėti ir artėti prie nulio.

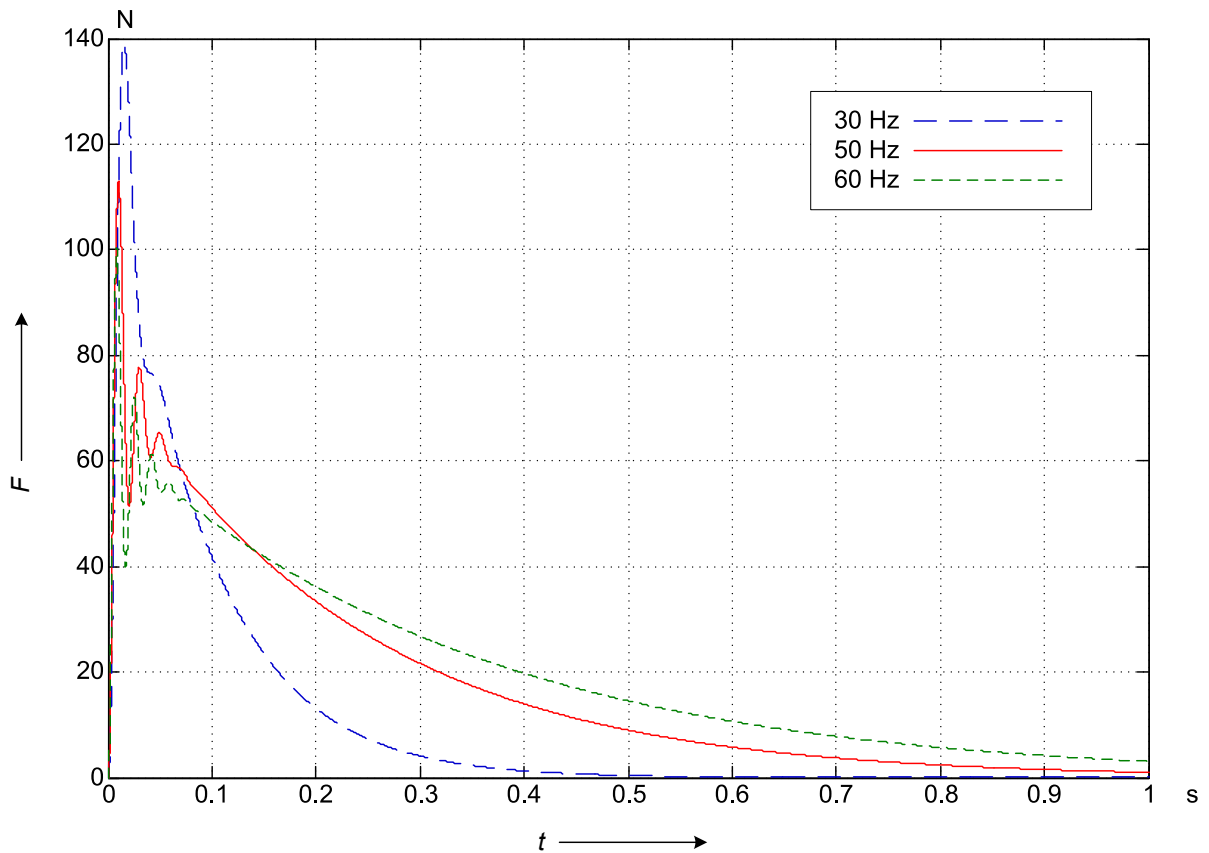


3.6 pav. Dažniu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai maitinimo įtampos dažnis yra 50 Hz



3.7 pav. Dažniu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai maitinimo įtampos dažnis yra 50 Hz. Imitavimo proceso pradžia

Maitinimo įtampų dažnis pakeičiamas į 30 Hz, o vėliau į 60 Hz. Toliau yra pateikiami jėgos (3.8 pav.), greičio (3.9 pav.), kelio (3.10 pav.) bei srovių (3.11 pav., 3.12 pav., 3.13 pav., 3.14 pav.) pereinamieji procesai, maitinant TAV skirtingo dažnio įtampomis.

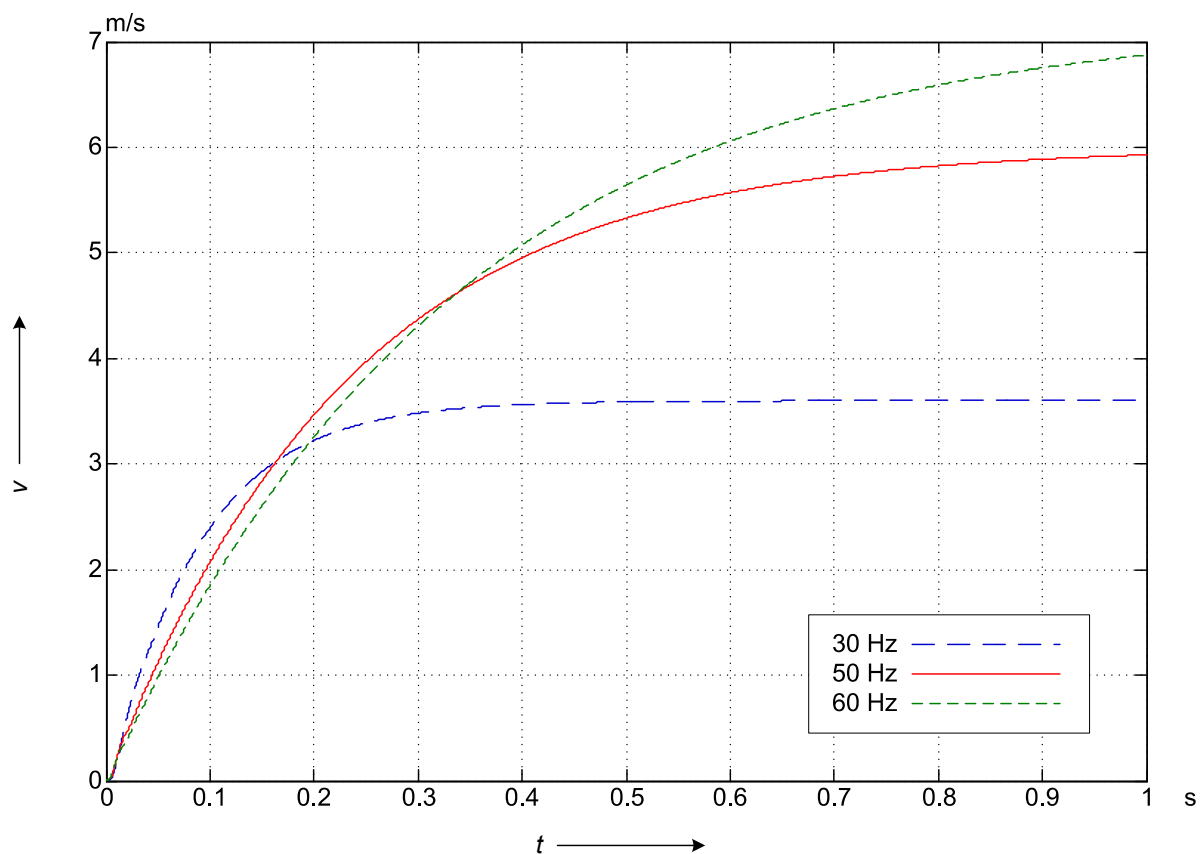


3.8 pav. Dažniu valdomo TAV jėgos pereinamieji procesai esant skirtingiems maitinimo įtampos dažniams

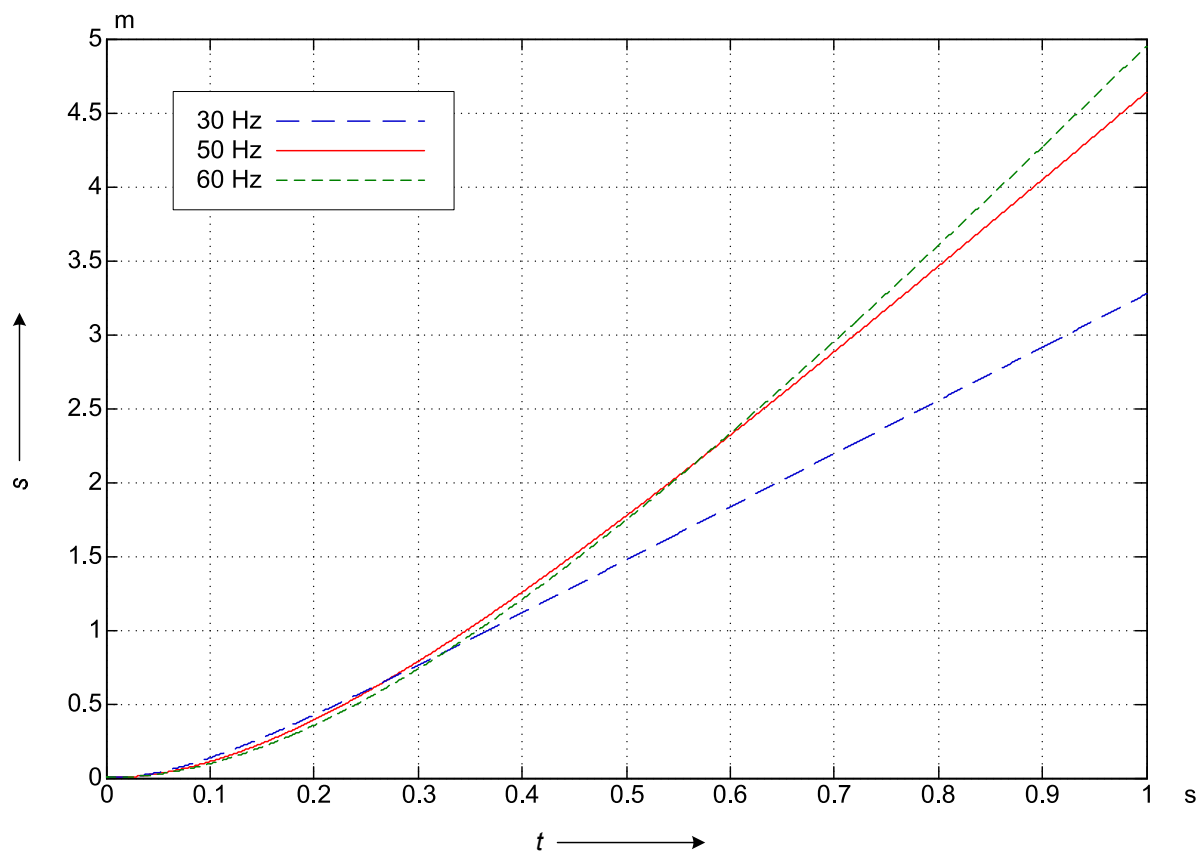
Iš 3.8 pav. matyti, kad kuriamos jėgos maksimumas ir maitinimo įtampos dažnis turi atvirkštinę priklausomybę: kuo mažesnis yra TAV maitinimo įtampos dažnis, tuo didesnis yra jėgos maksimumas. Be to, mažinant dažnį, mažėja jėgos švytavimai ir pereinamojo proceso laikas.

3.9 pav. leidžia dar kartą įsitikinti, kad TAV antrinio elemento greitis tiesiogiai priklauso nuo maitinimo įtampos dažnio. Taip pat matyti, kad esant mažesniai dažniui greičio pereinamojo proceso charakteristika imitavimo pradžioje yra statesnė.

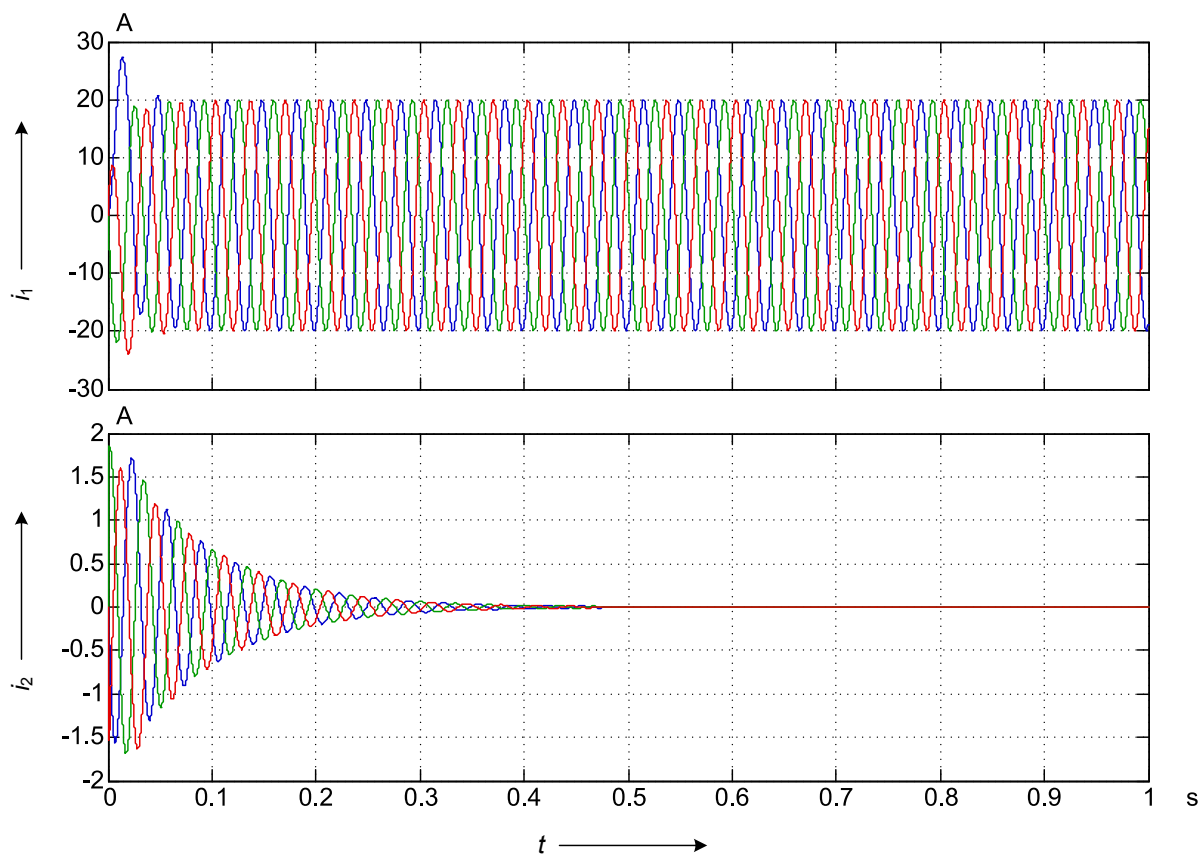
Iš 3.10 pav. daroma tokia išvada: kuo maitinimo dažnis didesnis, tuo ilgiau antrinio elemento nueito kelio priklausomybė nuo laiko auga pagal parabolės dėsnį. Esant maitinimo įtampos dažniui $f=30$ Hz, kelio priklausomybė nuo laiko praktiškai iš karto po imitavimo pradžios yra tiesinė.



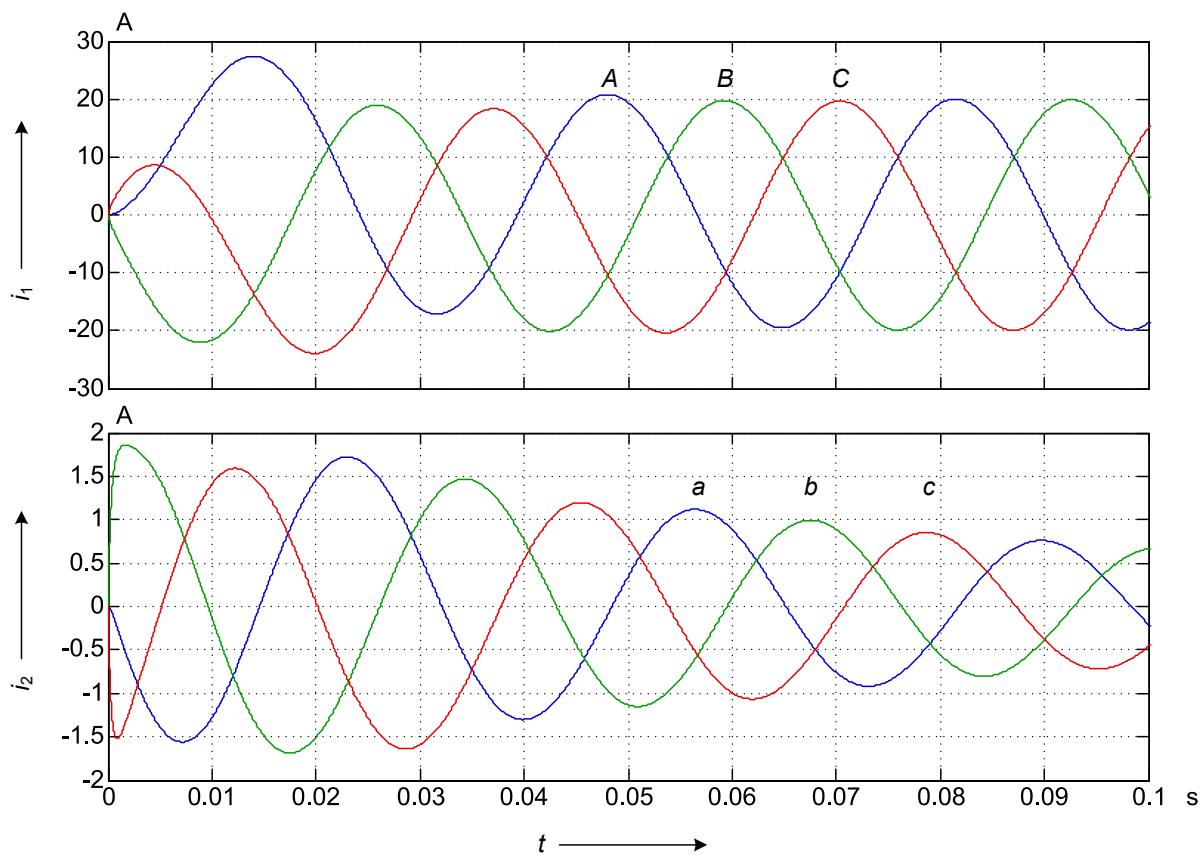
3.9 pav. Dažniu valdomo TAV greičio pereinamieji procesai esant skirtingiems maitinimo įtampos dažniams



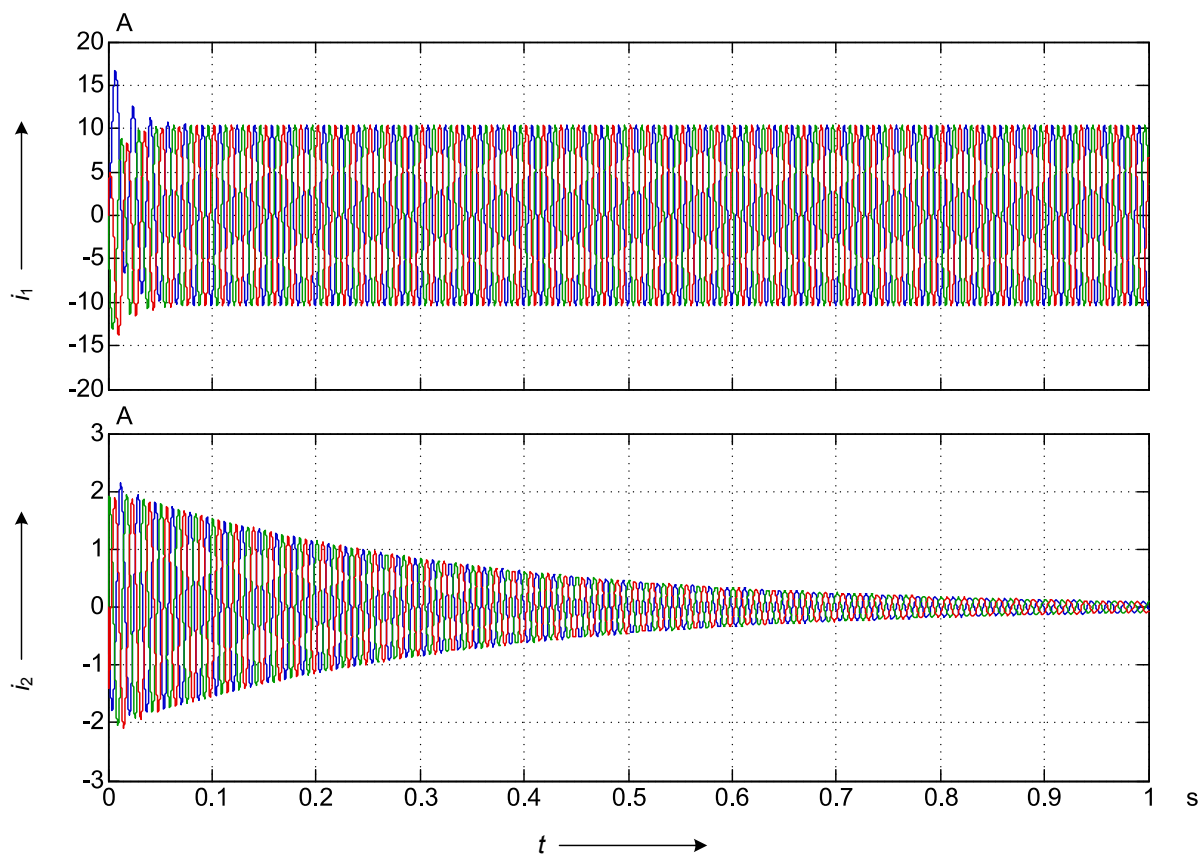
3.10 pav. Dažniu valdomo TAV kelio pereinamieji procesai esant skirtingiems maitinimo įtampos dažniams



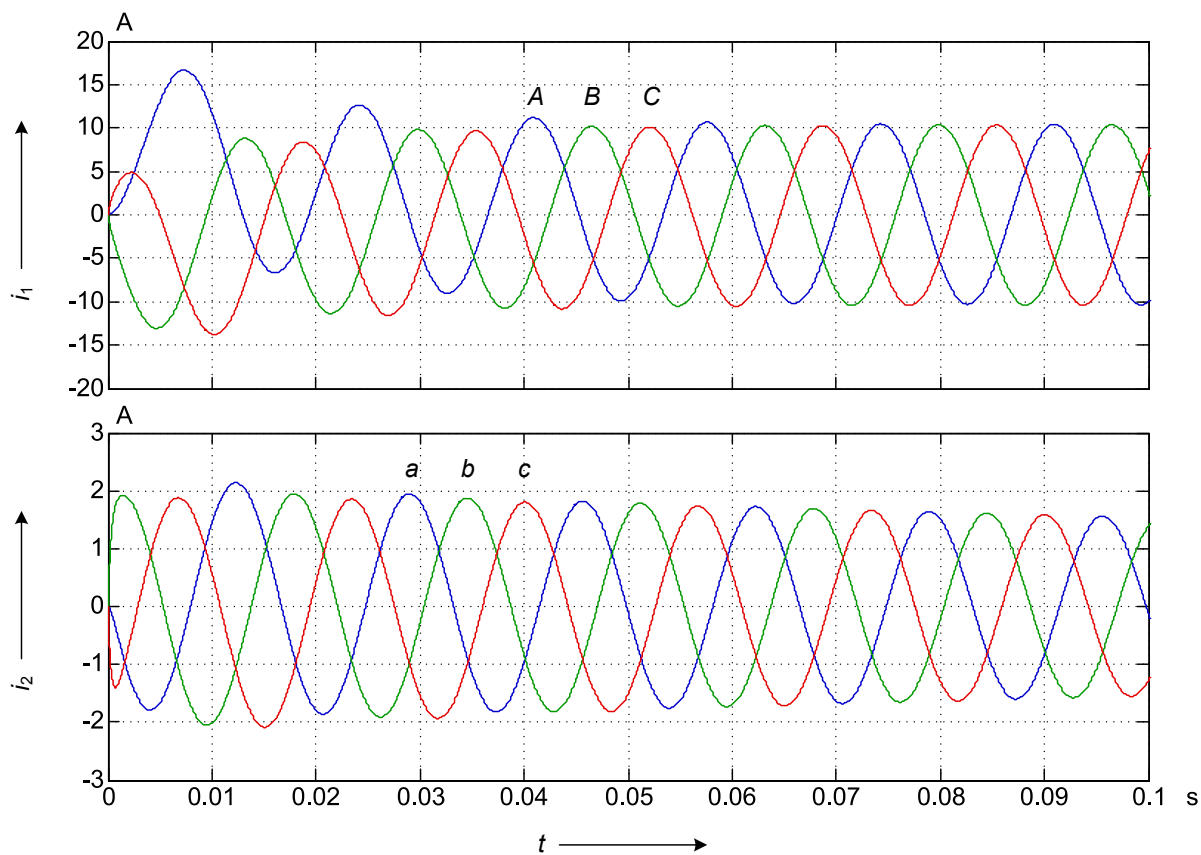
3.11 pav. Dažniu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai maitinimo įtampos dažnis yra 30 Hz



3.12 pav. Dažniu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai maitinimo įtampos dažnis yra 30 Hz. Imitavimo proceso pradžia



3.13 pav. Dažniu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai maitinimo įtampos dažnis yra 60 Hz



3.14 pav. Dažniu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai maitinimo įtampos dažnis yra 60 Hz. Imitavimo proceso pradžia

Iš srovių pereinamųjų procesų (3.6 pav., 3.7 pav., 3.11 pav., 3.12 pav., 3.13 pav., 3.14 pav.) matyti, kad keičiant maitinimo įtampos dažnį bendras induktoriaus ir antrinio elemento srovių pereinamojo proceso pobūdis išlieka tas pats: po švytavimų modeliavimo pradžioje induktoriaus srovių amplitudė nusistovi ties tam tikra verte, o antrinio elemento srovės eksponentiškai artėja prie nulio. Nuo dažnio tiesiogiai priklauso antrinio elemento srovių pereinamojo proceso laikas ir atvirkščiai priklauso induktoriaus nusistovėjusių srovių amplitudės. Taip pat galima pastebėti, kad kuo įtampos dažnis yra didesnis, tuo mažesni yra induktoriaus srovių švytavimai modeliavimo pradžioje bei tuo didesni yra antrinio elemento srovių švytavimai modeliavimo pradžioje.

3.2. Nesimetriniu būdu valdomos TAP dinaminių režimų imitacija

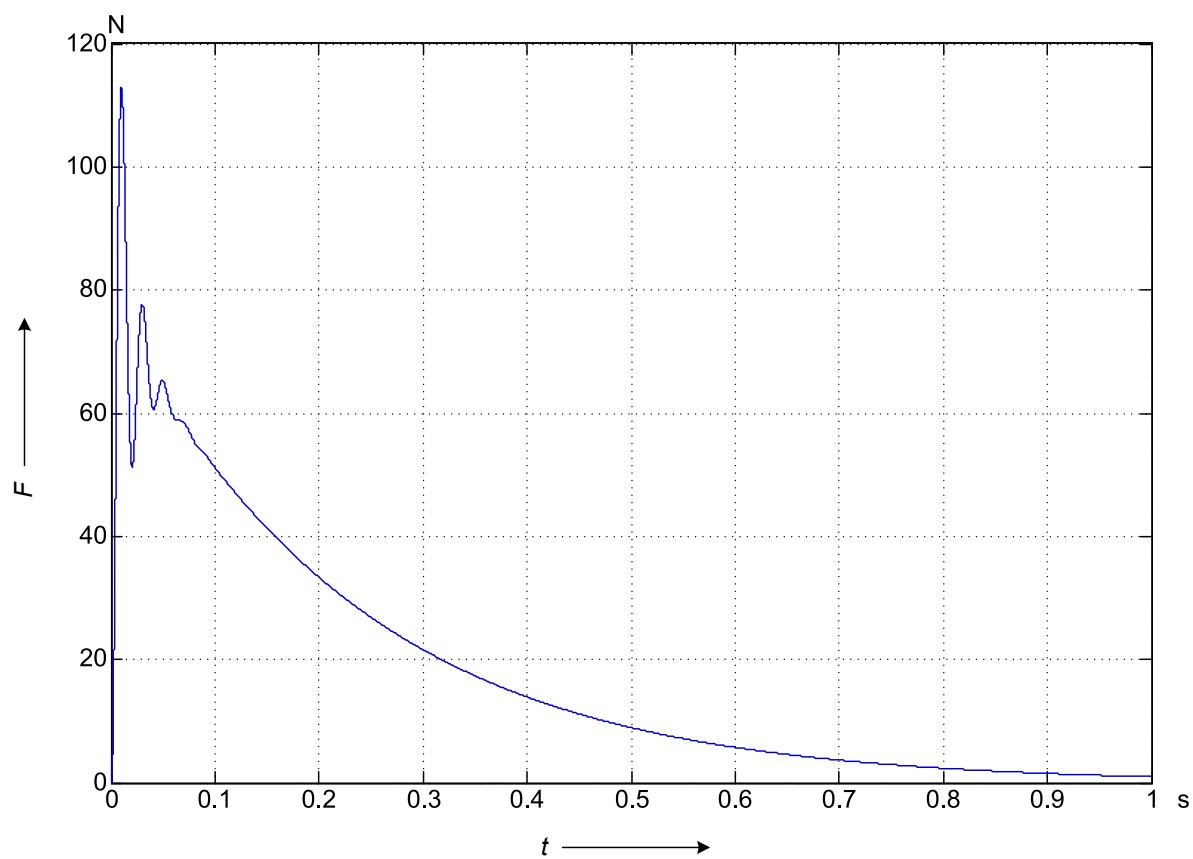
Čia visi imitavimai atliekami esant toms pačioms sąlygoms, kaip ir dažniu valdomos TAP atveju:

- modeliavimo laikas $t = 1$ s;
- modeliavimas atliekamas naudojant fiksuoto žingsnio režimą;
- žingsnio dydis yra 2×10^{-5} s;
- visos charakteristikos gaunamos neapkrautam varikliui;
- maitinimo įtampos dažnis $f = 50$ HZ.
- nominalioji maitinimo įtampa $U = 127$ V

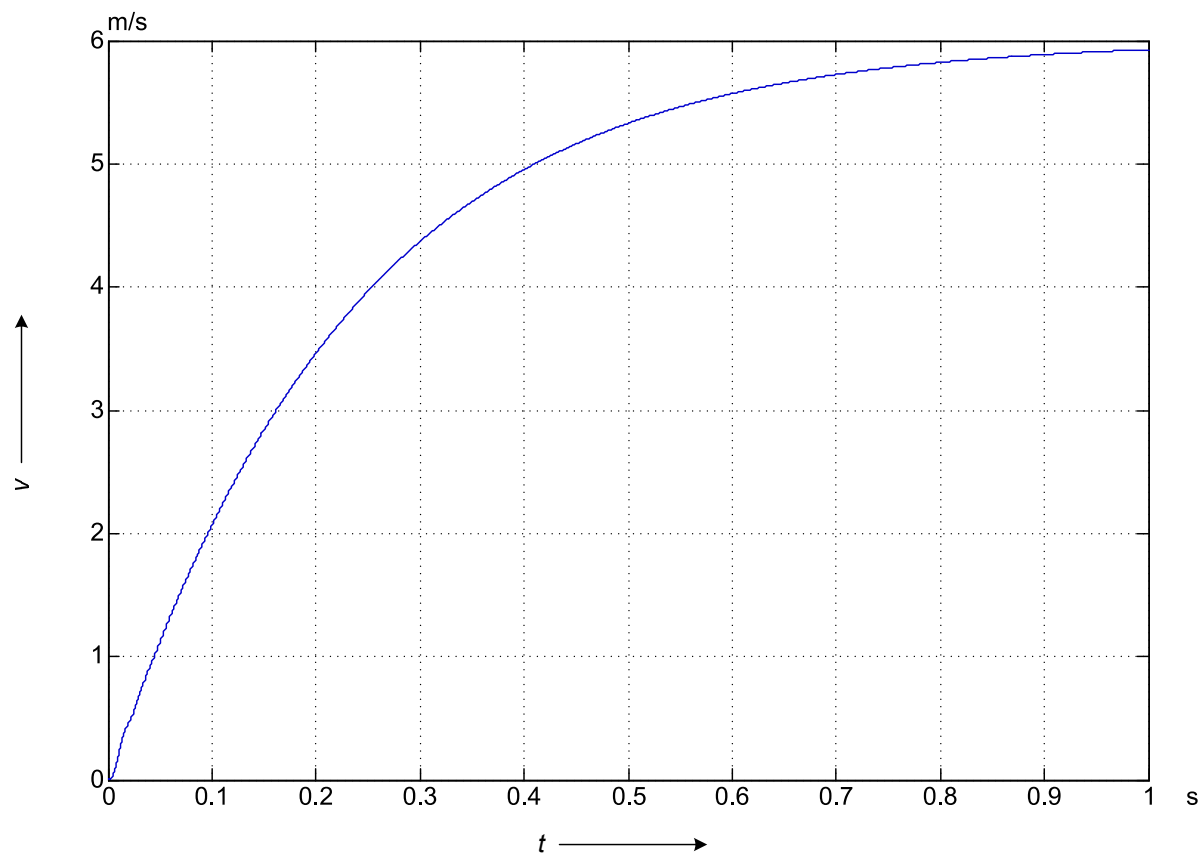
3.2.1. Simetrinės mašinos dinaminių režimų imitacija

Modelio trifazių maitinimo įtampų ir transformuotų dvifazių maitinimo įtampų grafikai čia nepateikiami, kadangi jie yra identiški grafikams, kurie buvo gauti dažniu valdomo TAV imitavimo metu (žr. 3.1 pav. ir 3.2 pav.).

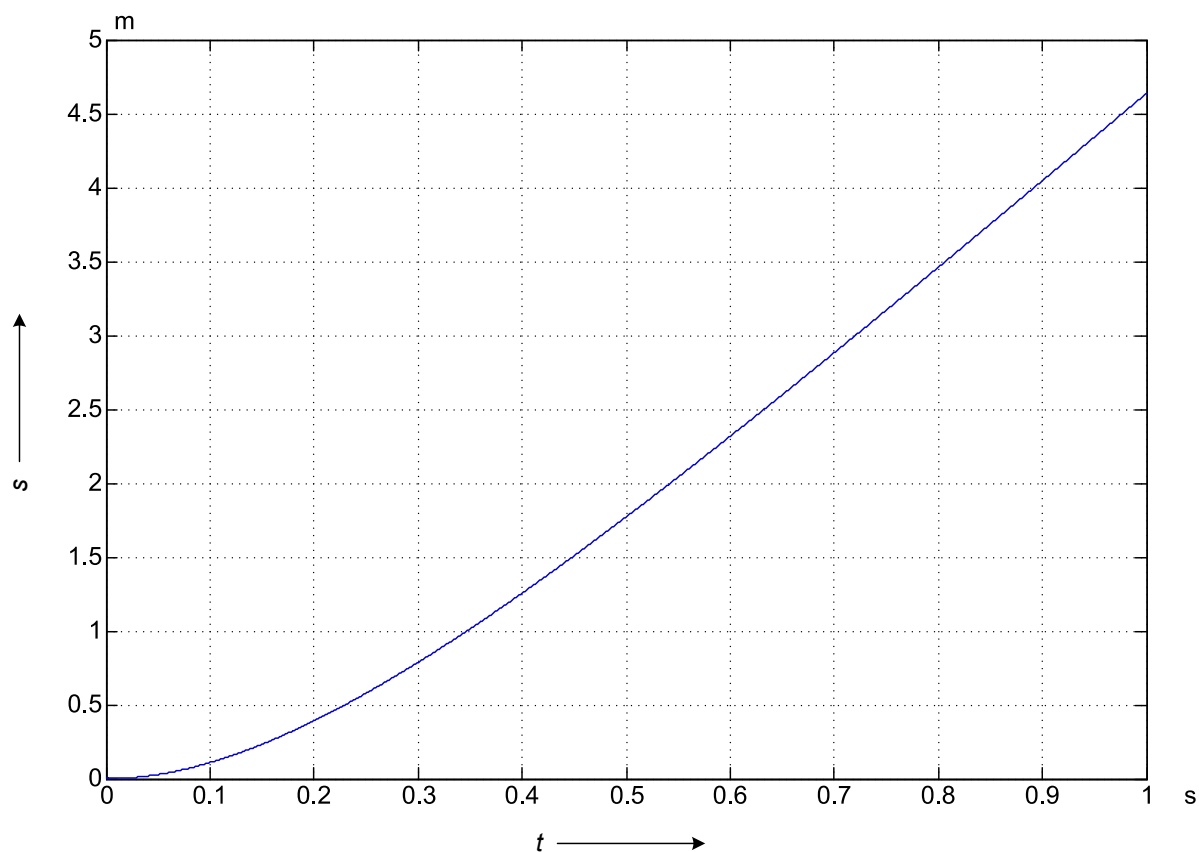
Simetrinės mašinos modelis pavaizduotas 2.23 pav., 2.24 pav. ir 2.25 pav. Kiekvienos variklio fazės parametrai yra vienodi ir lygūs tiems, kurie buvo apskaičiuoti 2.5 poskyryje. Taigi, šio TAV imitavimo rezultatai pateikiami žemiau.



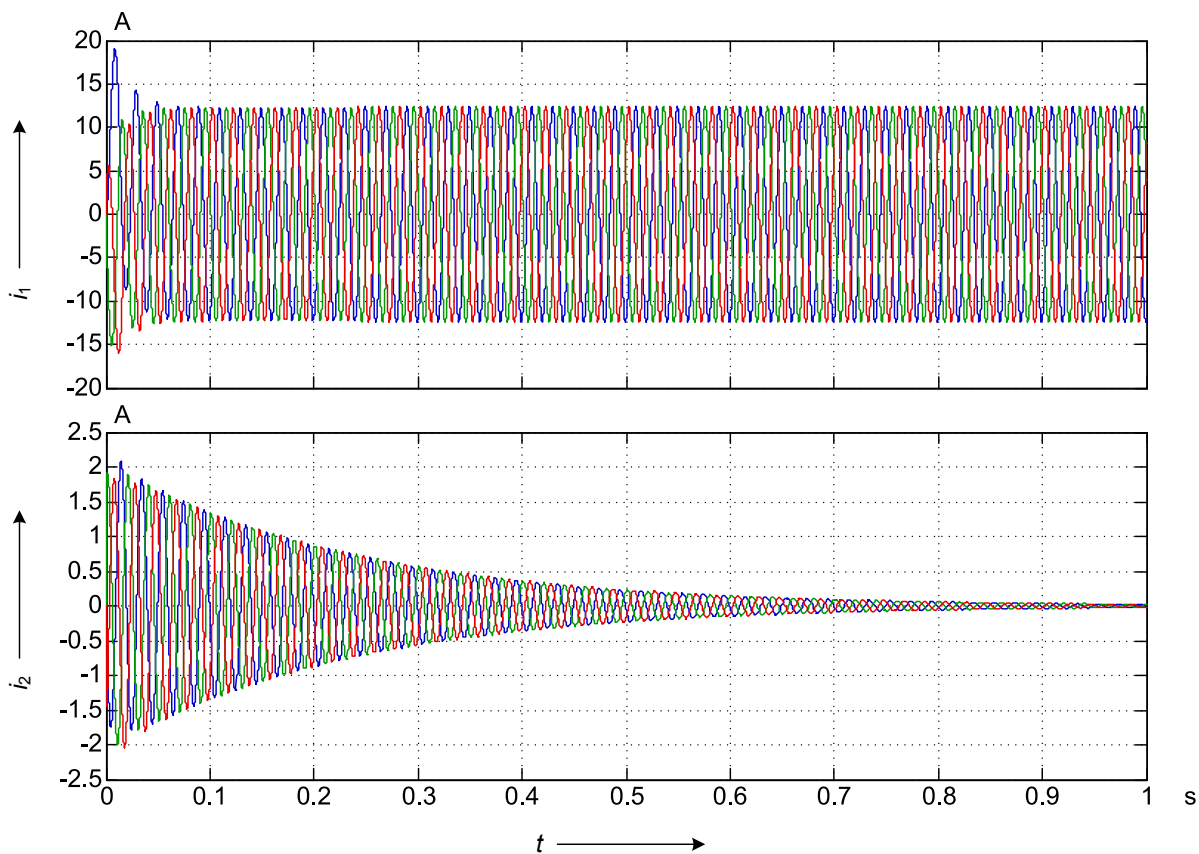
3.15 pav. Nesimetriiniu būdu valdomo TAV jėgos pereinamasis procesas, kai fazių parametrai yra vienodi



3.16 pav. Nesimetriiniu būdu valdomo TAV greičio pereinamasis procesas, kai fazių parametrai yra vienodi

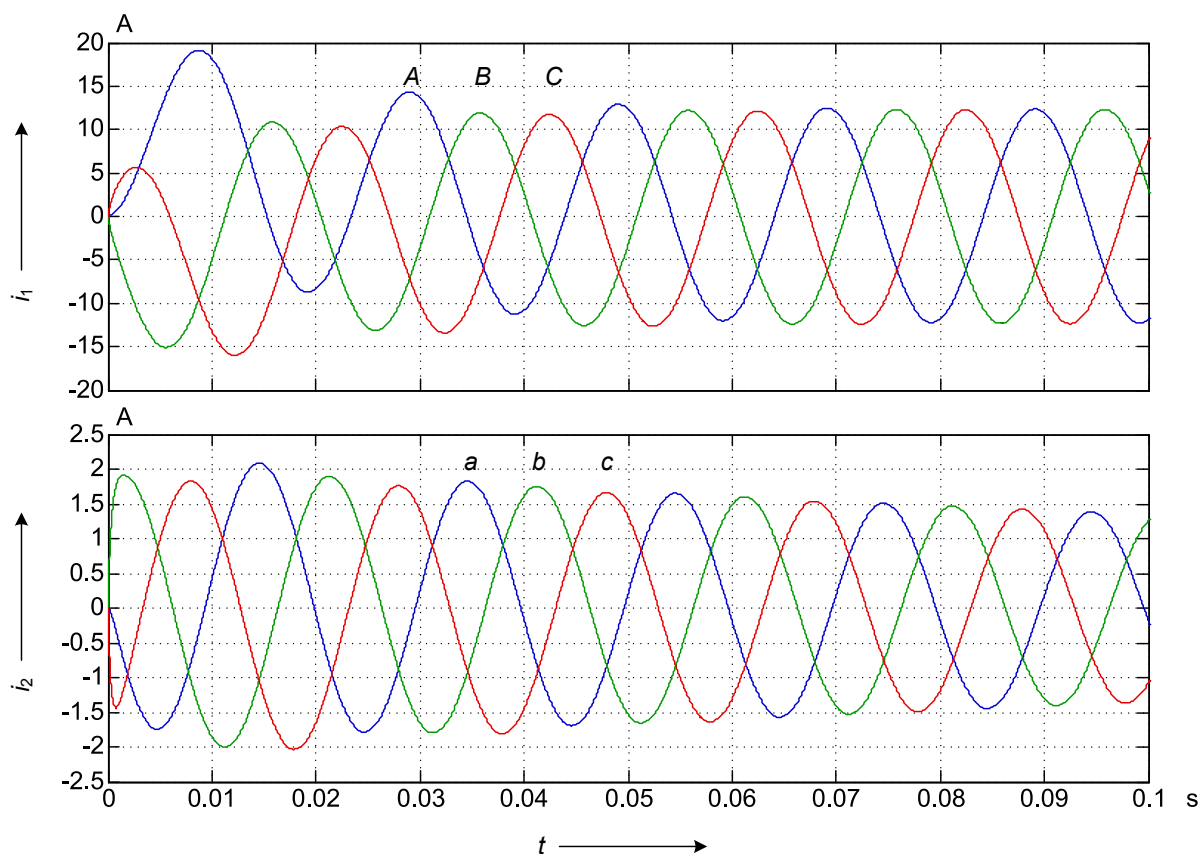


3.17 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV antrinio elemento nueito kelio priklausomybė nuo laiko, kai fazių parametrai yra vienodi



3.18 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės,

kai fazių parametrai yra vienodi



3.19 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai fazių parametrai yra vienodi. Imitavimo proceso pradžia

Palyginus grafikus, pateiktus 3.15 pav. – 3.19 pav., su atitinkamais grafikais, pateiktais 3.3 pav. – 3.7 pav., įsitikinama, kad jie yra visiškai identiški. Tai leidžia padaryti išvadą, kad pastarasis modelis, sudarytas pagal lygčių sistemą (2.25) ir kiekvienos variklio fazės jėgos skaičiavimo lygtyje įrašant koeficientą $1/2$, yra teisingas.

3.2.2. Nesimetrinės mašinos dinaminių režimų imitacija, kai yra padidintas vienos fazės sklaidos induktyvumas

Modeliuojant nesimetrinį TAV, A fazės sklaidos induktyvumas $L_{1\sigma}$ priimamas du kartus didesnis už kitų fazių. Tai atitinka tos fazės sklaidos induktyviosios varžos $X_{1\sigma}$ padidėjimą.

Naujų TAV parametrų skaičiavimas:

- A fazės sklaidos induktyvumas

$$L_{1\sigma, padid.} = 2L_{1\sigma} = 2 \cdot 0,0190 = 0,0380 \text{ H};$$

- pilnutinis ekvivalentinis A fazės induktyvumas

$$L_{1.padid.} = L_{1\sigma.padid.} + L_m = 0,0380 + 0,0262 = 0,0642 \text{ H};$$

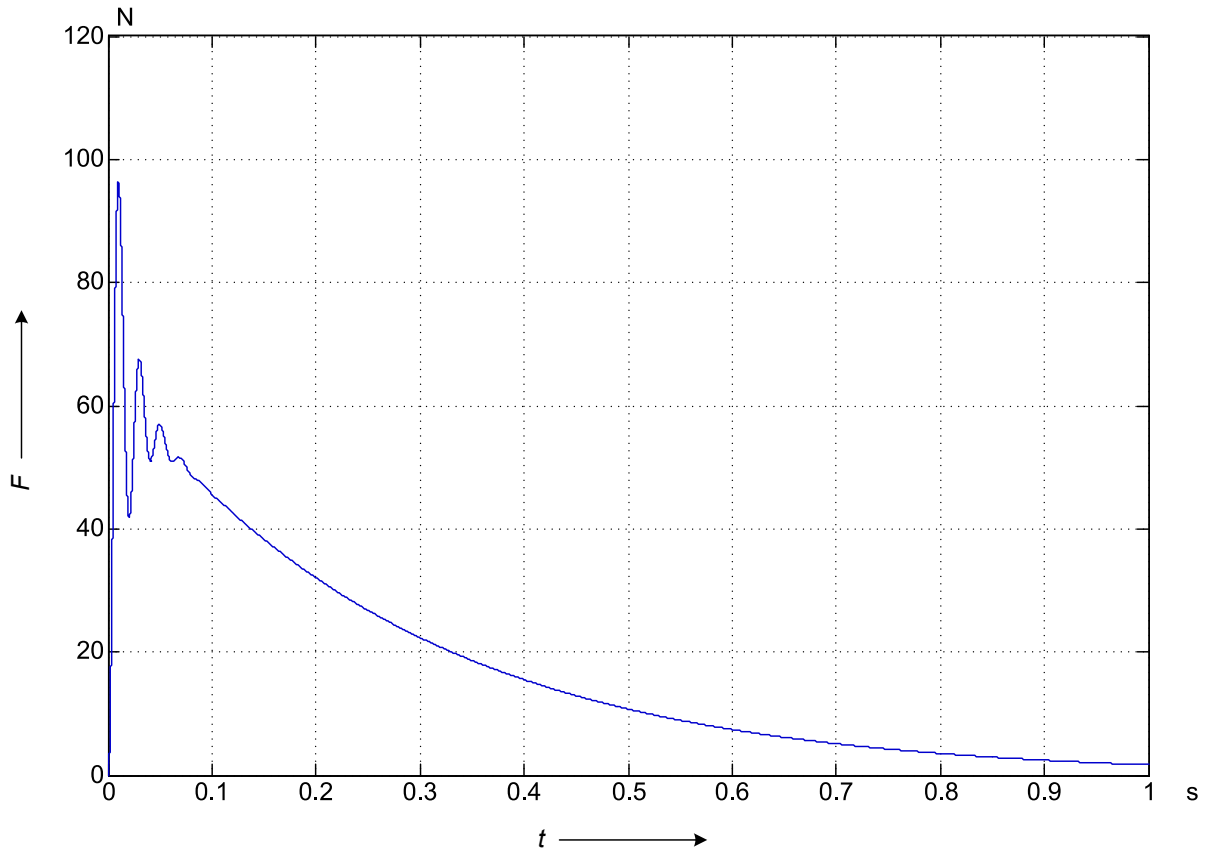
Lygčių sistemos (2.25) naujų koeficientų skaičiavimas:

$$\frac{L_{1.padid.}}{L_{1.padid.}L_2 - L_{12}^2} = \frac{0,0642}{0,0642 \cdot 0,0301 - 0,0262^2} = 51,5;$$

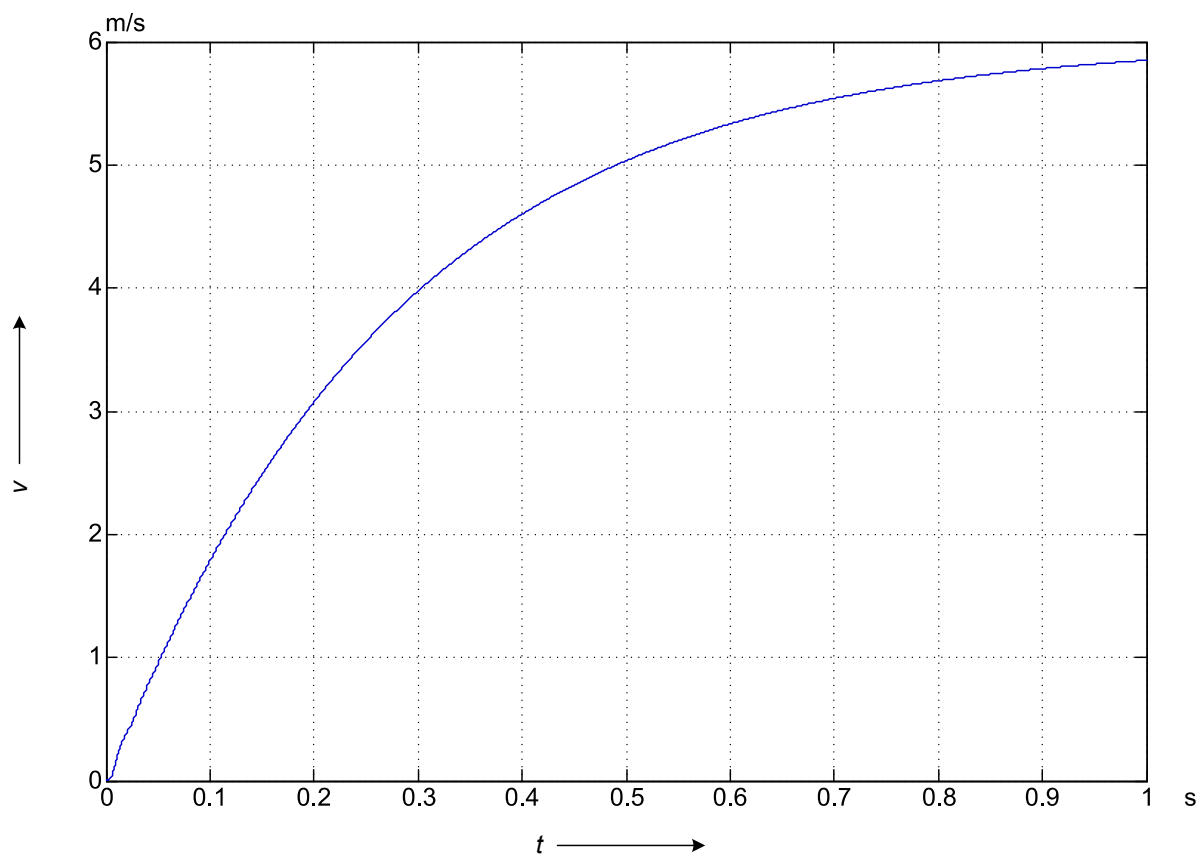
$$\frac{L_2}{L_{1.padid.}L_2 - L_{12}^2} = \frac{0,0301}{0,0642 \cdot 0,0301 - 0,0262^2} = 24,2;$$

$$\frac{L_{12}}{L_{1.padid.}L_2 - L_{12}^2} = \frac{0,0262}{0,0642 \cdot 0,0301 - 0,0262^2} = 21.$$

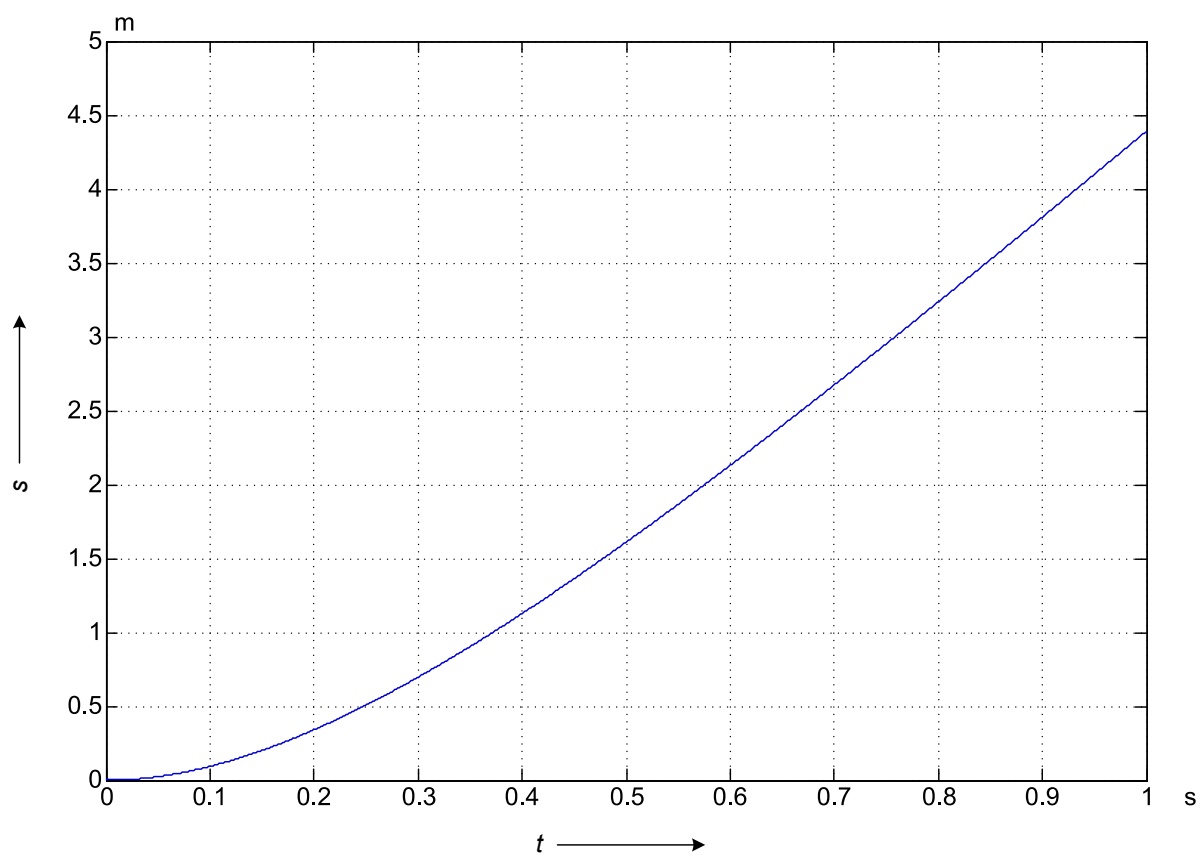
Įvedus šiuos koeficientus į atitinkamus A fazės blokus, gauti imitavimo rezultatai pateikiami žemiau.



3.20 pav. Nesimetrinio TAV jėgos pereinamasis procesas, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus



3.21 pav. Nesimetrinio TAV greičio pereinamasis procesas, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus

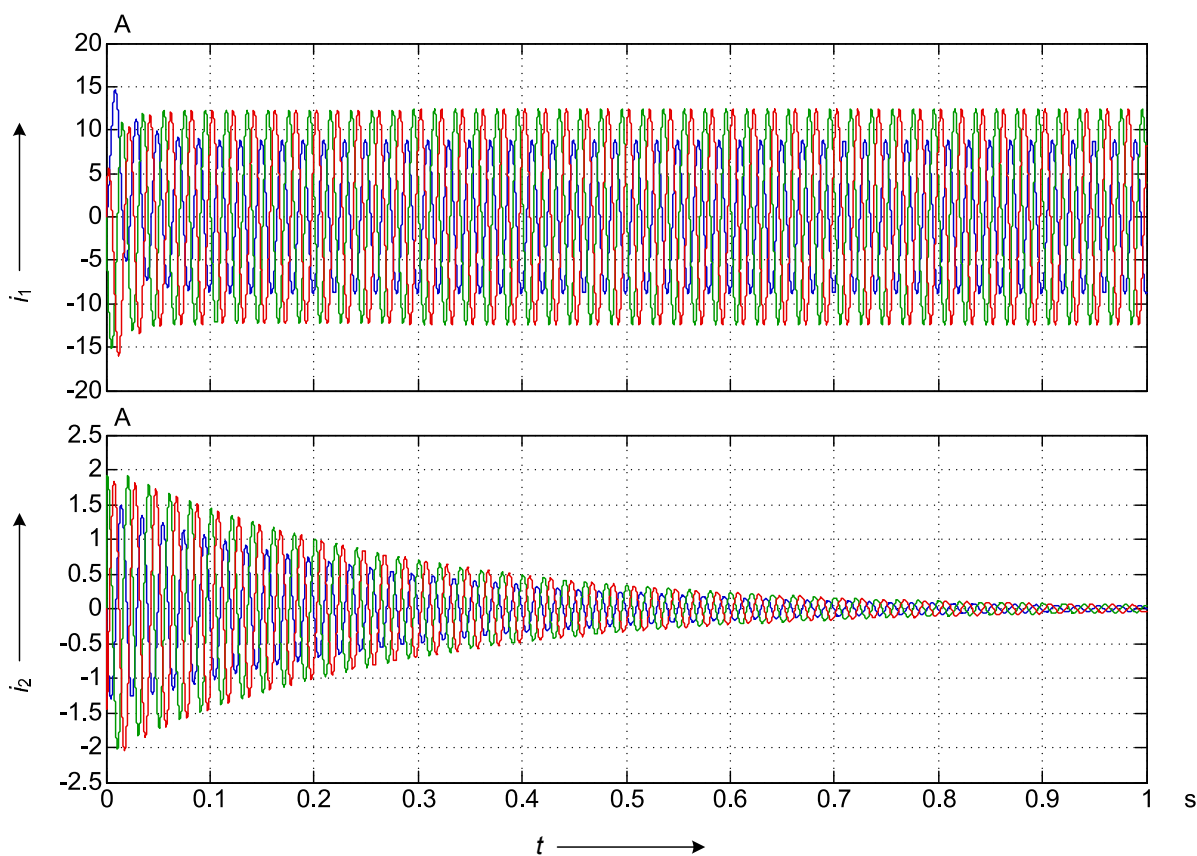


3.22 pav. Nesimetrinio TAV antrinio elemento nueito kelio priklausomybė nuo laiko, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus

Palyginus 3.20 pav. ir 3.15 pav. pateiktus jėgos pereinamųjų procesų grafikus, daroma išvada, kad padidintas vienos fazės sklaidos induktyvumas sumažina variklio kuriamą jėgą. Simetrinės mašinos atveju maksimali jėga yra 113 N, o padidinus vienos fazės sklaidos induktyvumą – 96,4 N. Taigi maksimali jėga sumažėjo 14,7 %.

Iš 3.21 pav. matyti, kad bendras greičio kitimo pobūdis liko, bet, palyginus šį grafiką su 3.16 pav. pateiktu grafiku, įsitikinama, kad greitis didėja greičiau kai mašina yra simetrinė.

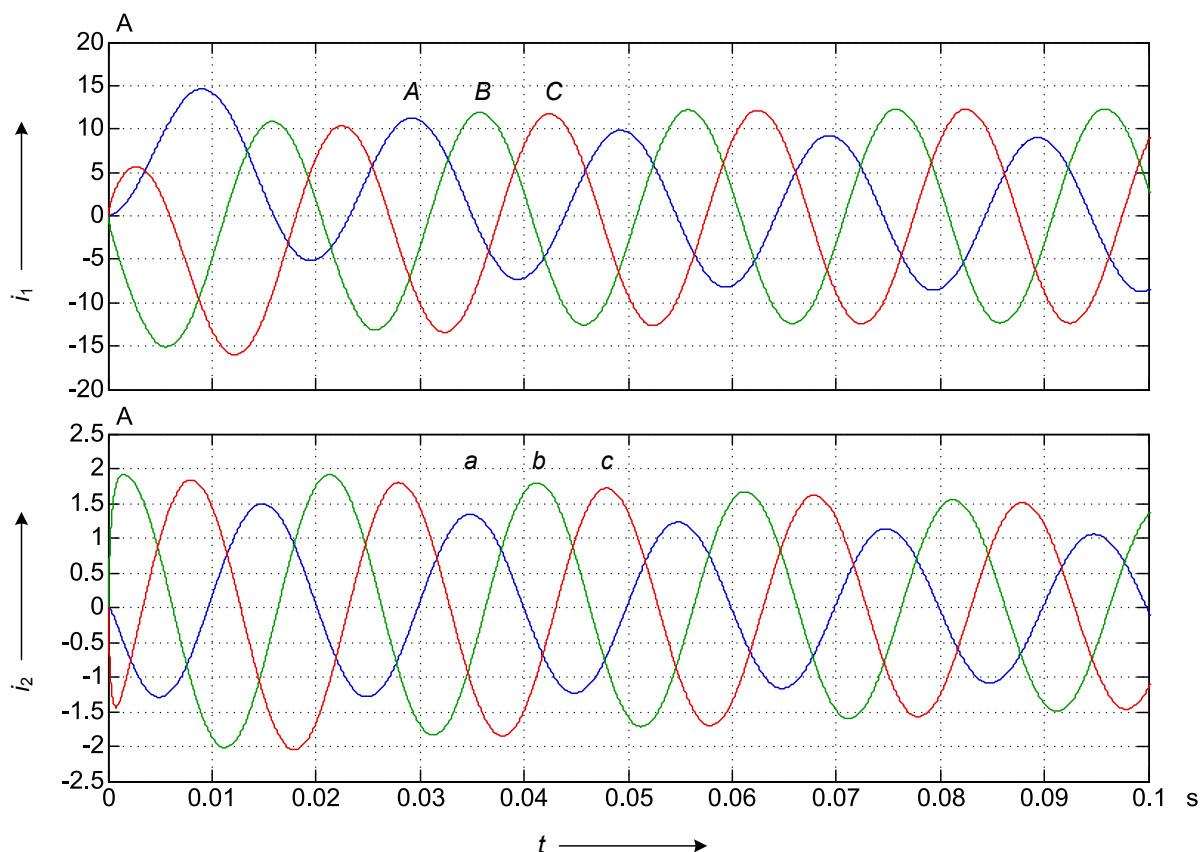
Antrinio elemento nueito kelio priklausomybės nuo laiko (3.22 pav.) pobūdis taip pat liko panašus į 3.17 pav. pateiktos charakteristikos pobūdį. Esant nesimetrinei mašinai, antrinis elementas per 1 s nuėjo 4,39 m, simetrinės mašinos atveju – 4,63 m, t. y., padidinus TAV induktoriaus vienos fazės sklaidos induktyvumą du kartus, jo antrinio elemento nueitas kelias per 1 s sumažėja 5,18 %.



3.23 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus

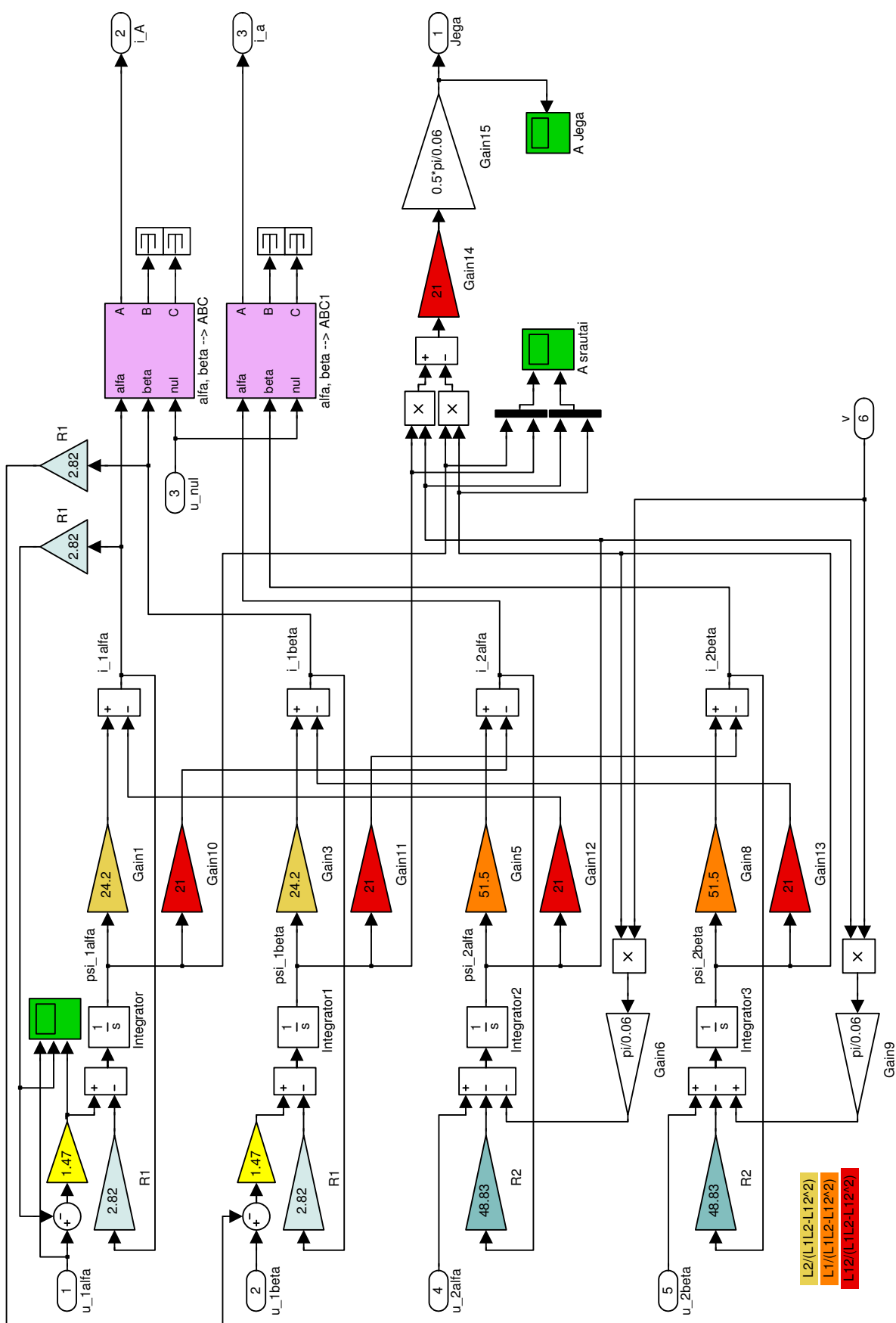
3.23 pav. ir 3.24 pav. pateikiami srovių pereinamųjų procesų grafikai. Srovių kitimo pobūdis liko toks pat kaip ir simetrinės mašinos atveju. Induktoriaus B ir C fazių nusistovėjusios srovės amplitudės liko nepakitusios (12,4 A), o A fazės srovės amplitudė sumažėjo iki 9 A, t. y.

27,4 %. Induktoriaus srovės pirmo piko amplitudė irgi sumažėjo 24 %. Taip pat sumažėjo antrinio elemento A fazės srovės amplitudė.

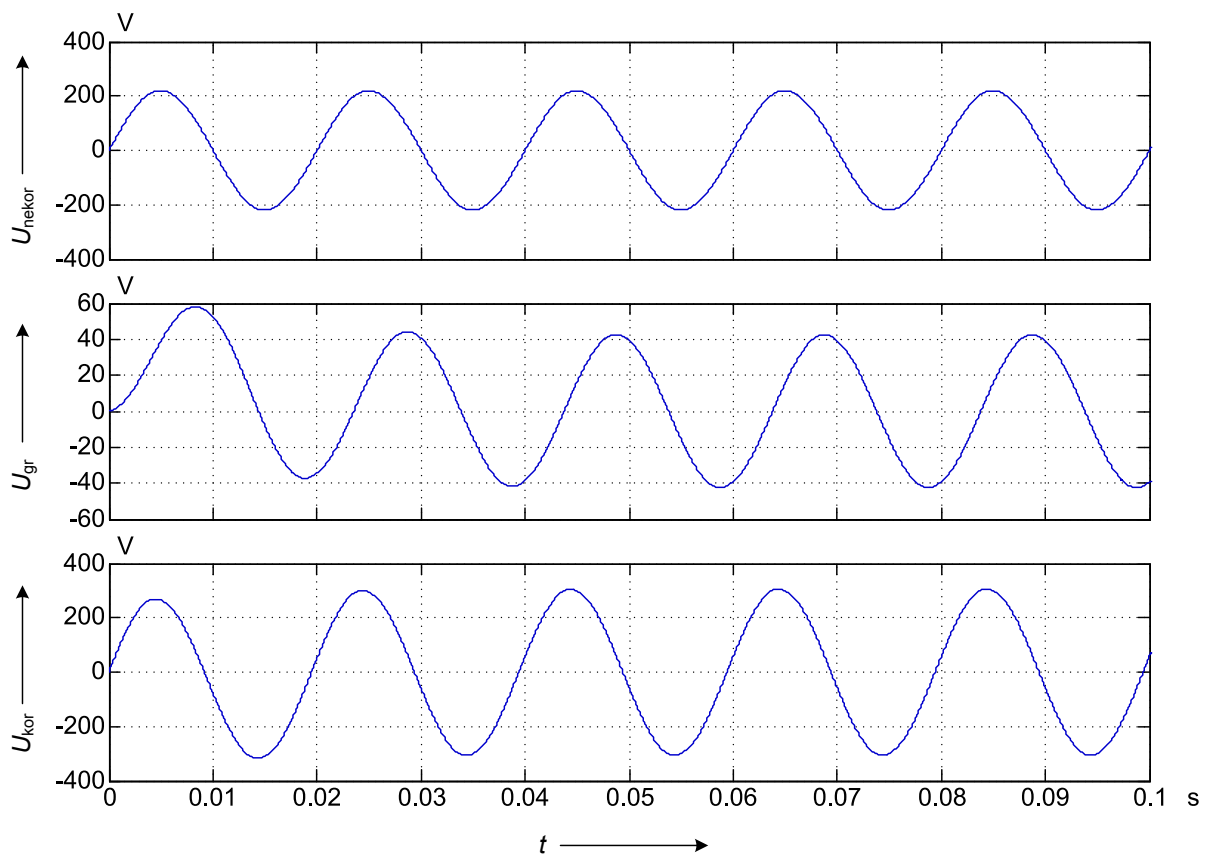


3.24 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV indukoriaus ir antrinio elemento srovės, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus. Imitavimo proceso pradžia

Norint sumažinti TAV indukoriaus ir antrinio elemento srovių asimetriją, A fazėje sudaromi grįžtamieji ryšiai pagal indukoriaus srovę (3.25 pav.). Imamos α, β koordinačių sistemos srovės, padauginamos iš indukoriaus apvijos aktyviosios varžos ir atimamos iš atitinkamų maitinimo įtampų dedamųjų. Gautas įtampų skirtumas dauginamas iš eksperimentiniu būdu gauto stiprinimo koeficiento 1,47 (geltoni blokai apvijos modelyje, 3.25 pav.). Nekoreguotos, grįžtamojo ryšio bei koreguotos maitinimo įtampos α dedamosios šiam atvejui parodytos 3.26 pav. Iš grafikų matyti, kad grįžtamojo ryšio nusistovėjusios įtampos amplitudė yra apie 43 V, o koreguotos maitinimo įtampos amplitudė siekia 308 V, t. y. A fazės maitinimo įtampos amplitudė α, β koordinačių sistemoje padidėjo 28,6 %.



3.25 pav. Trifazio nesimetrinio būdu valdomo TAV A fazės su induktooriaus srovių grįžtamaisiais ryšiais modelis, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus



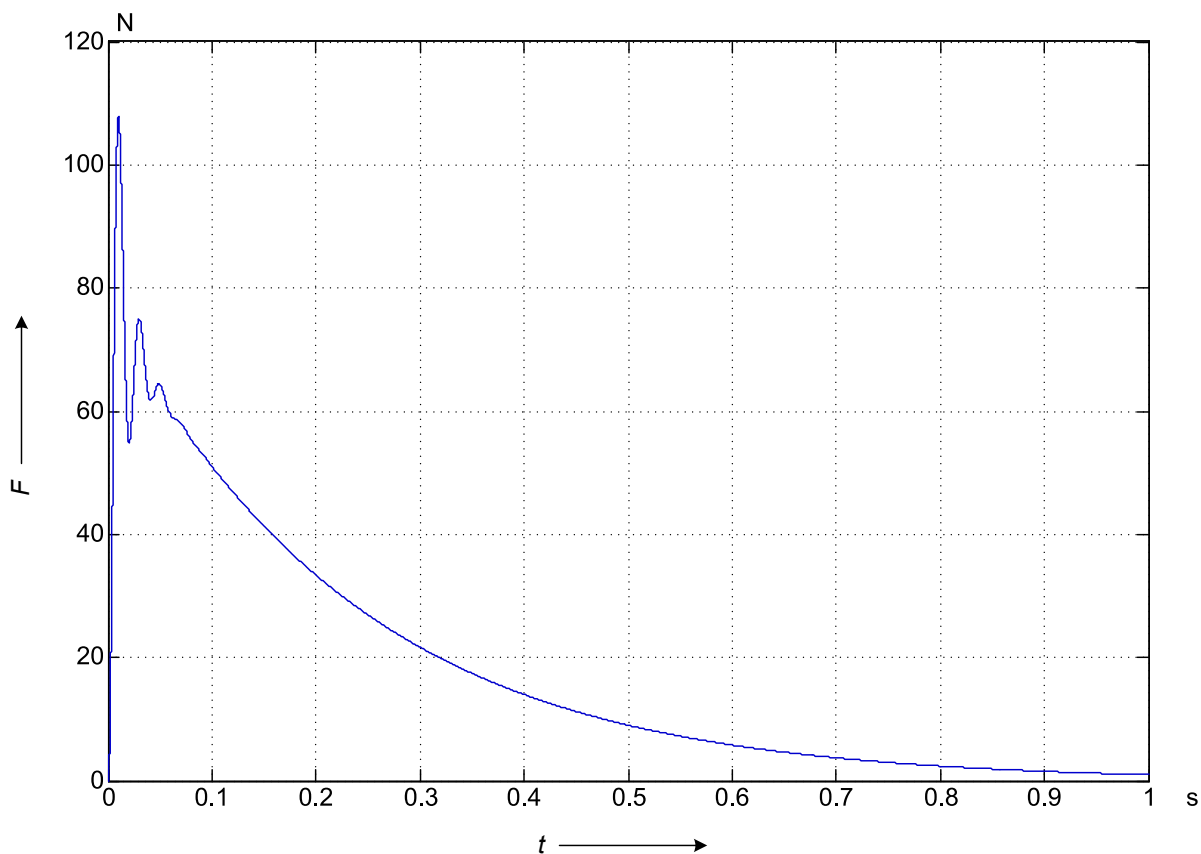
3.26 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV induktoriaus maitinimo įtampas U_α dedamosios, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus

Nesimetrinio TAV su induktoriaus srovių grįžtamaisiais ryšiais, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus, charakteristikos pateikiamos žemiau.

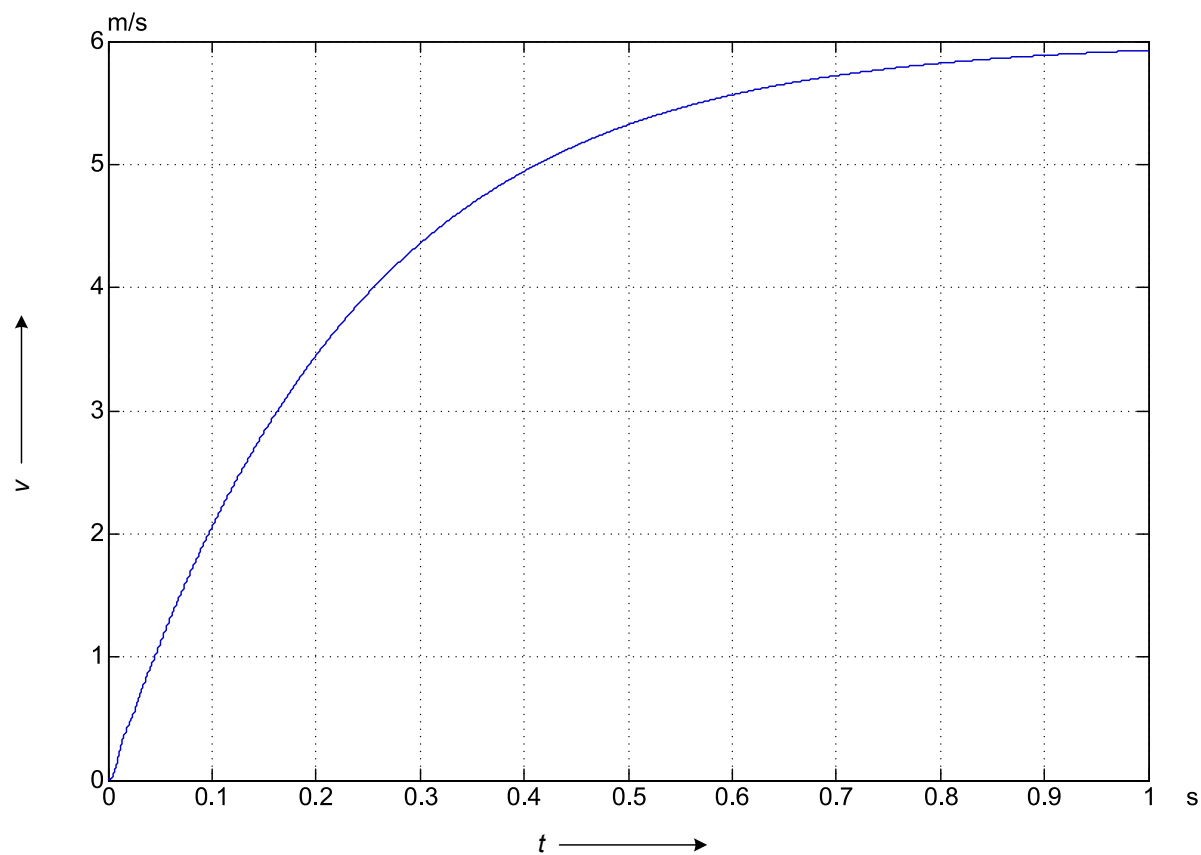
3.27 pav. pavaizduotas jėgos pereinamasis procesas. Palyginus šį grafiką su simetrinės mašinos atitinkamu grafiku (3.15 pav.), matyti, kad, padidinus nesimetrinio TAV A fazės maitinimo įtampą, jo kuriamoji jėga atsistatė. Skirtumas yra tas, kad dabar jėgos maksimumas yra ne 113 N, kaip simetrinės mašinos atveju, o 108 N.

Greičio pereinamasis procesas ir antrinio elemento nueito kelio priklausomybės nuo laiko grafikas pateikiami 3.28 pav. ir 3.29 pav. atitinkamai. Juos palyginus su simetrinės mašinos (3.16 pav. ir 3.17 pav.) ir nesimetrinės mašinos be grįžtamųjų ryšių grafikais (3.21 pav. ir 3.22 pav.), matyti, kad variklio antrinio elemento greitis ir per 1 s nueitas kelias atsistatė.

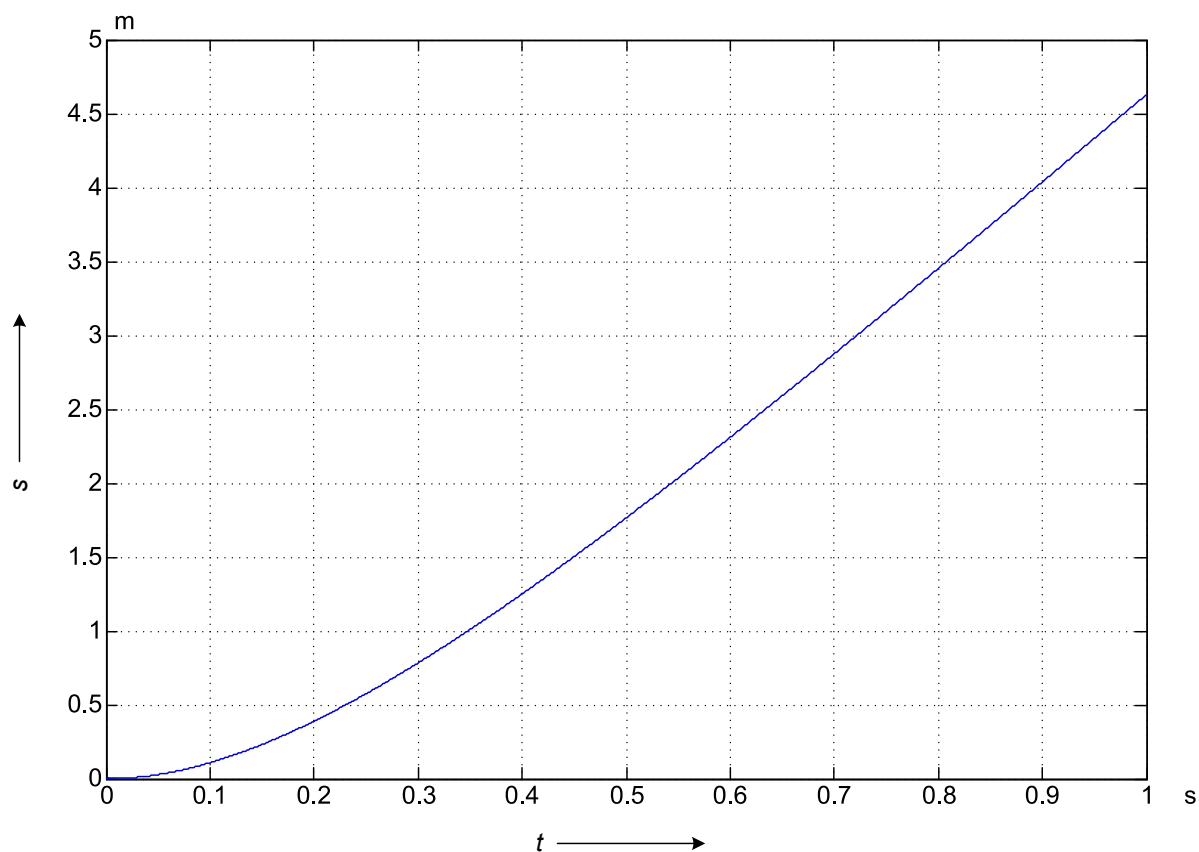
Iš 3.30 pav. matyti, panaudojus grįžtamąjį ryšį, induktoriaus ir antrinio elemento srovės taip pat įgavo anksčiau buvusias vertes.



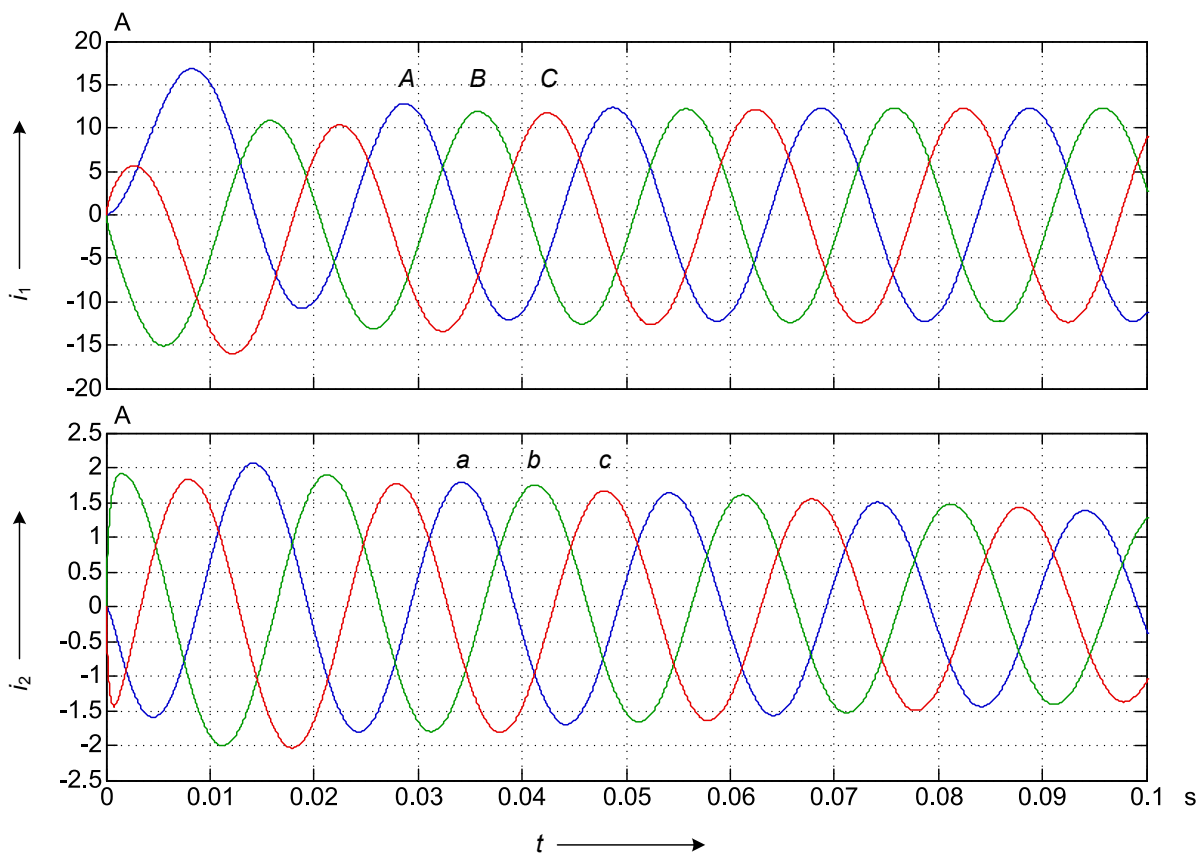
3.27 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV su induktoriaus srovės grįžtamaisiais ryšiais jėgos pereinamasis procesas, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus



3.28 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV su induktoriaus srovės grįžtamaisiais ryšiais greičio pereinamasis procesas, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus



3.29 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV su indukatoriaus srovės grįžtamaisiais ryšiais antrinio elemento nueito kelio priklausomybė nuo laiko, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus

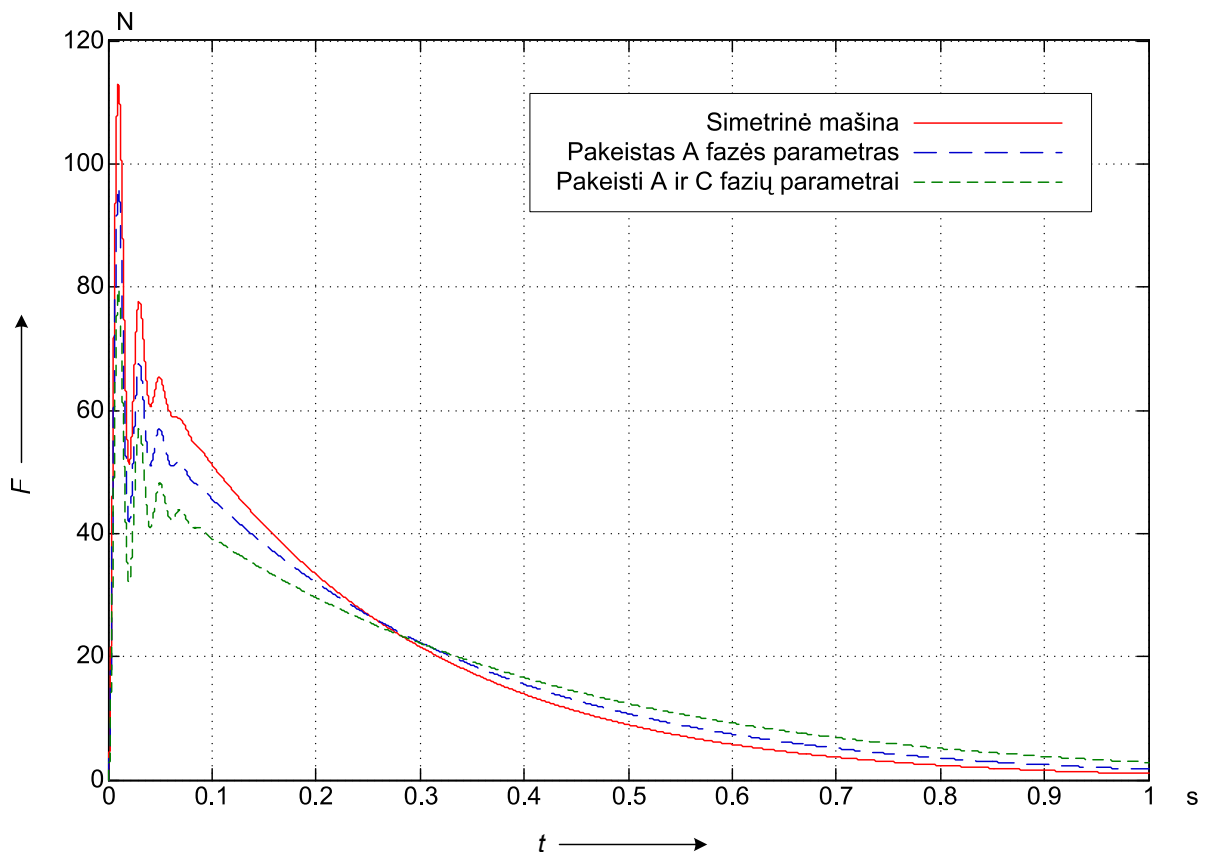


3.30 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV su indukatoriaus srovės grįžtamaisiais ryšiais indukatoriaus ir antrinio elemento srovės, kai A fazės sklaidos induktyvumas padidintas du kartus. Imitavimo proceso pradžia

3.2.3. Nesimetrinės mašinos dinaminių režimų imitacija, kai yra padidintas dviejų fazių sklaidos induktyvumas

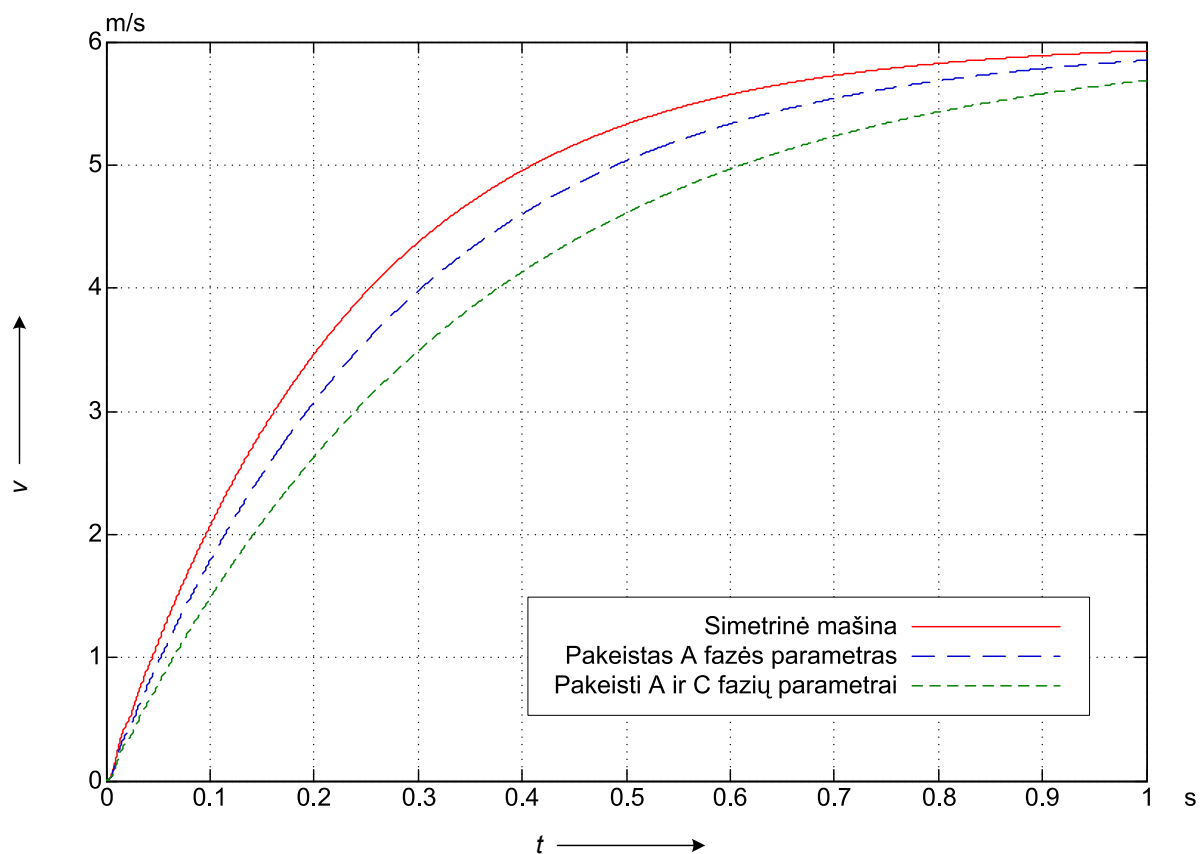
Papildomai du kartus padidinamas dar vienos fazės (C fazės) sklaidos induktyvumas $L_{1\sigma}$. Šios fazės modelio parametrai pakeičiami analogiškai A fazės parametrams. Maitinimo įtampos ir transformuotos α, β koordinačių sistemai maitinimo įtampos lieka tos pačios kaip simetrinės mašinos atveju (3.1 pav. ir 3.2 pav.).

Nesimetrinio TAV, kai A ir C fazių sklaidos induktyvumas yra padidinti du kartus, jėgos pereinamasis procesas parodomas 3.31 pav. Kaip matyti, jėgos maksimumas šiuo atveju yra dar mažesnis ir apytiksliai lygus 80 N. Tai yra 29,2 % mažiau esant simetrinei mašinai ir 17 % mažiau esant nesimetrinei mašinai su padidintu A fazės sklaidos induktyvumu. Be to matyti, kad jėga, esant padidėjusiam dviejų apvijų sklaidos induktyvumui, nusistovi lėčiau, negu kitais atvejais gautos jėgų kreivės.

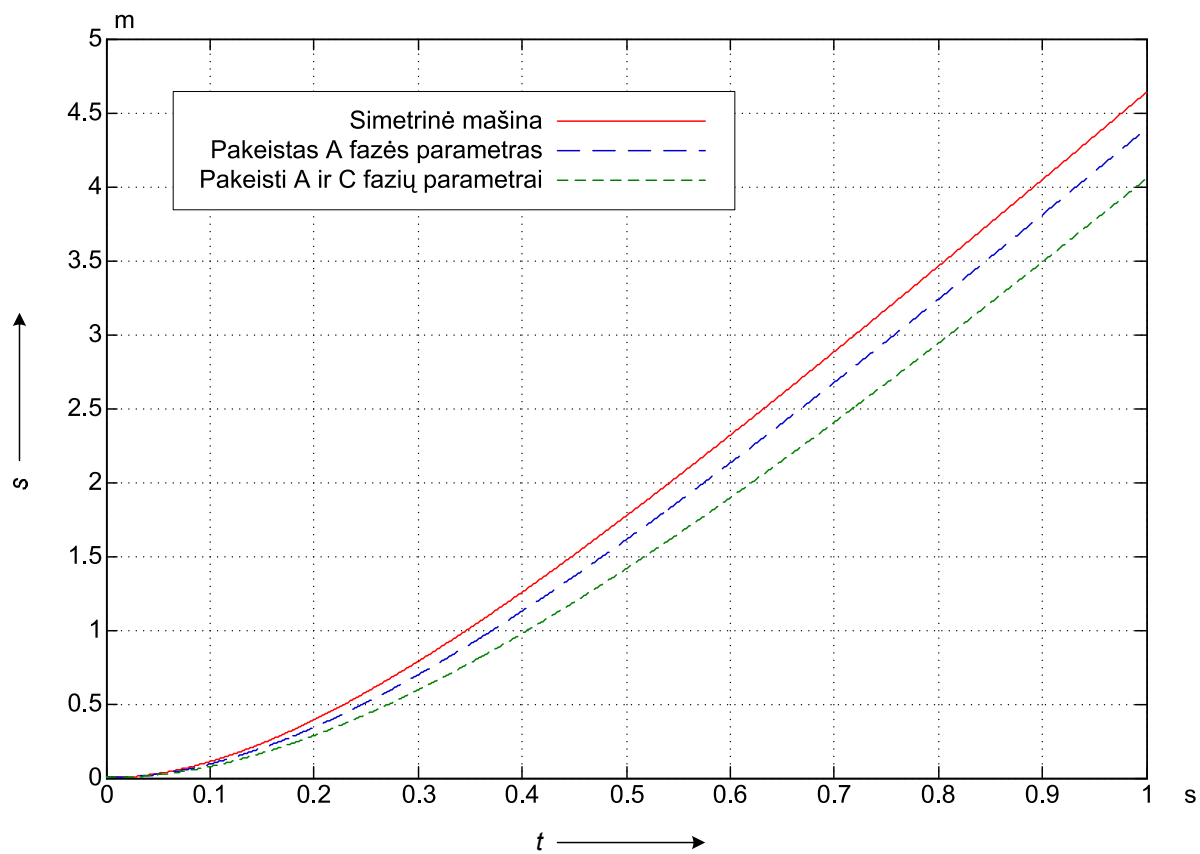


3.31 pav. Simetrinio ir nesimetrinio TAV jėgų pereinamieji procesai

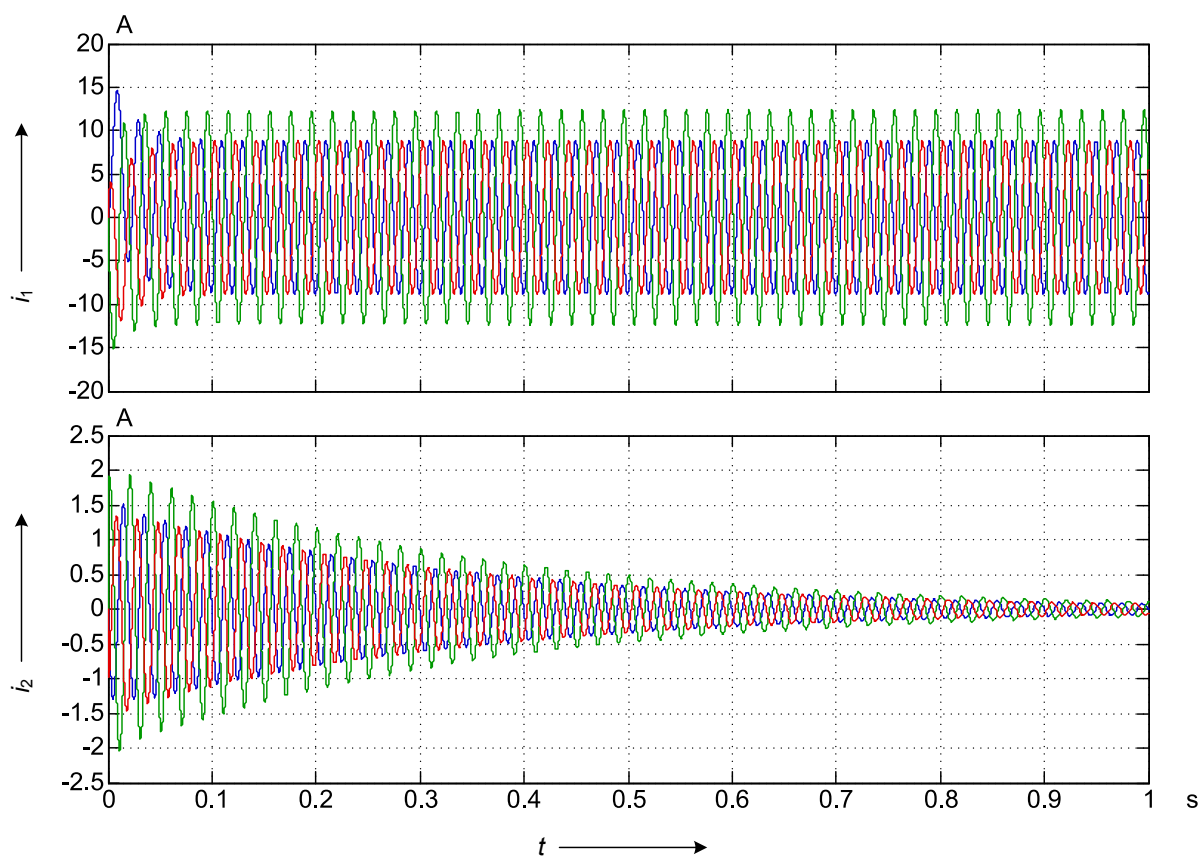
Kadangi nagrinėjamo TAV sukuriama jėga yra mažiausia, todėl jo antrinio elemento greitis auga lėčiau (žalia punktyrinė linija 3.32 pav.). Visais atvejais greičio kitimo pobūdis yra vienodas: greitis auga eksponentiškai ir, laikui bėgant, artėja prie sinchroninio.



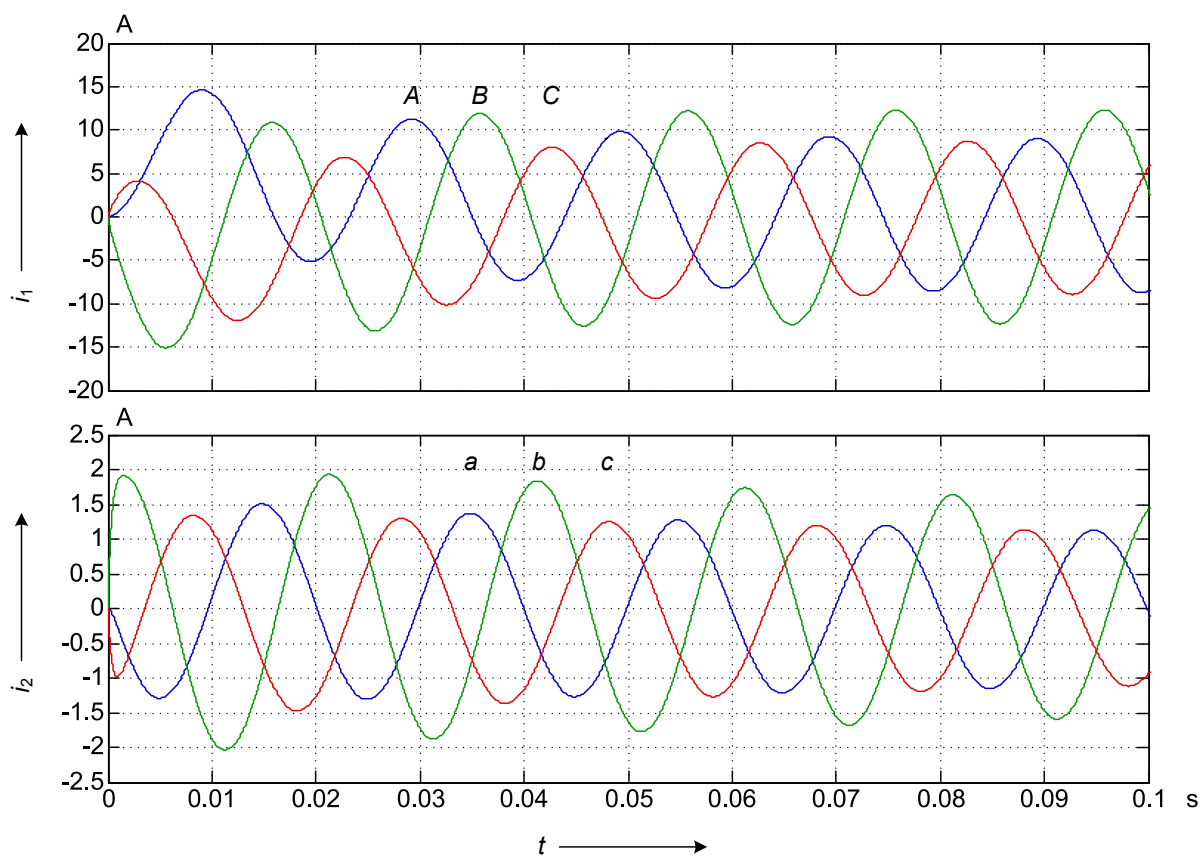
3.32 pav. Simetrinio ir nesimetrinio TAV greičių pereinamieji procesai



3.33 pav. Simetrinio ir nesimetrinio TAV nueito kelio priklausomybės nuo laiko



3.34 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai A ir C fazių sklaidos induktyvumas padidintas du kartus.



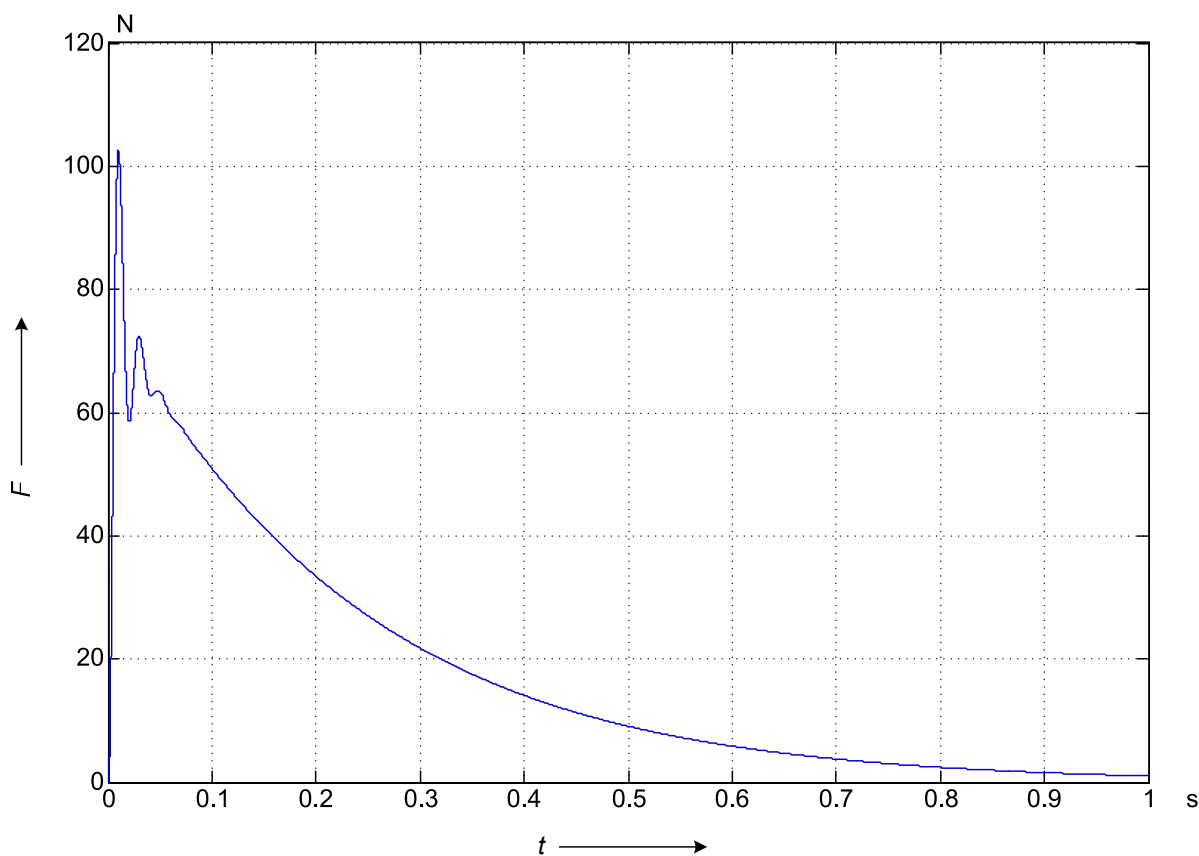
3.35 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai A ir C fazių sklaidos induktyvumas padidintas du kartus. Imitavimo proceso pradžia

Lėčiausias greičio didėjimas (palyginus su kitomis kreivėmis) nulemia mažiausią antrinio elemento nueitą kelią per tą patį laiką (žr. 3.33 pav.), esant dviejų fazių padidintam sklaidos induktyvumui. Šiuo atveju kelio priklausomybė nuo laiko ilgiau kinta pagal parabolės dėsnį, nes greitis nusistovi ilgiau.

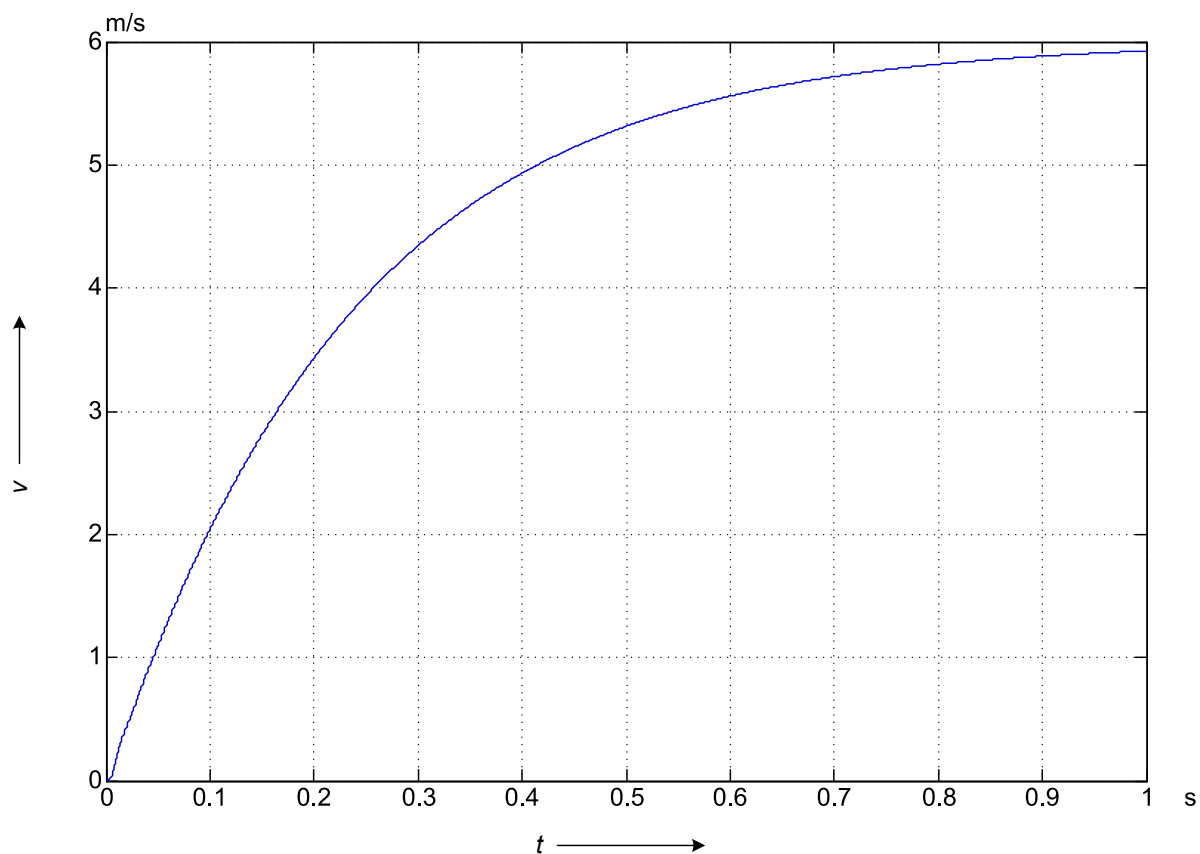
Srovių pereinamųjų procesų pobūdis išlieka (3.34 pav. ir 3.35 pav.), bet A ir C fazių amplitudės yra sumažėjusios.

TAV induktoriaus srovių asimetrijai eliminuoti naudojami induktoriaus srovių grįžtamieji ryšiai, kurių sudarymo principas aprašytas 3.2.2 poskyryje. Taigi, toliau pateikiamos nesimetriniu būdu valdomos pavaros su nesimetriniu TAV su srovių grįžtamaisiais ryšiais, kai A ir C fazių sklaidos induktyvumas yra padidintas du kartus, charakteristikos.

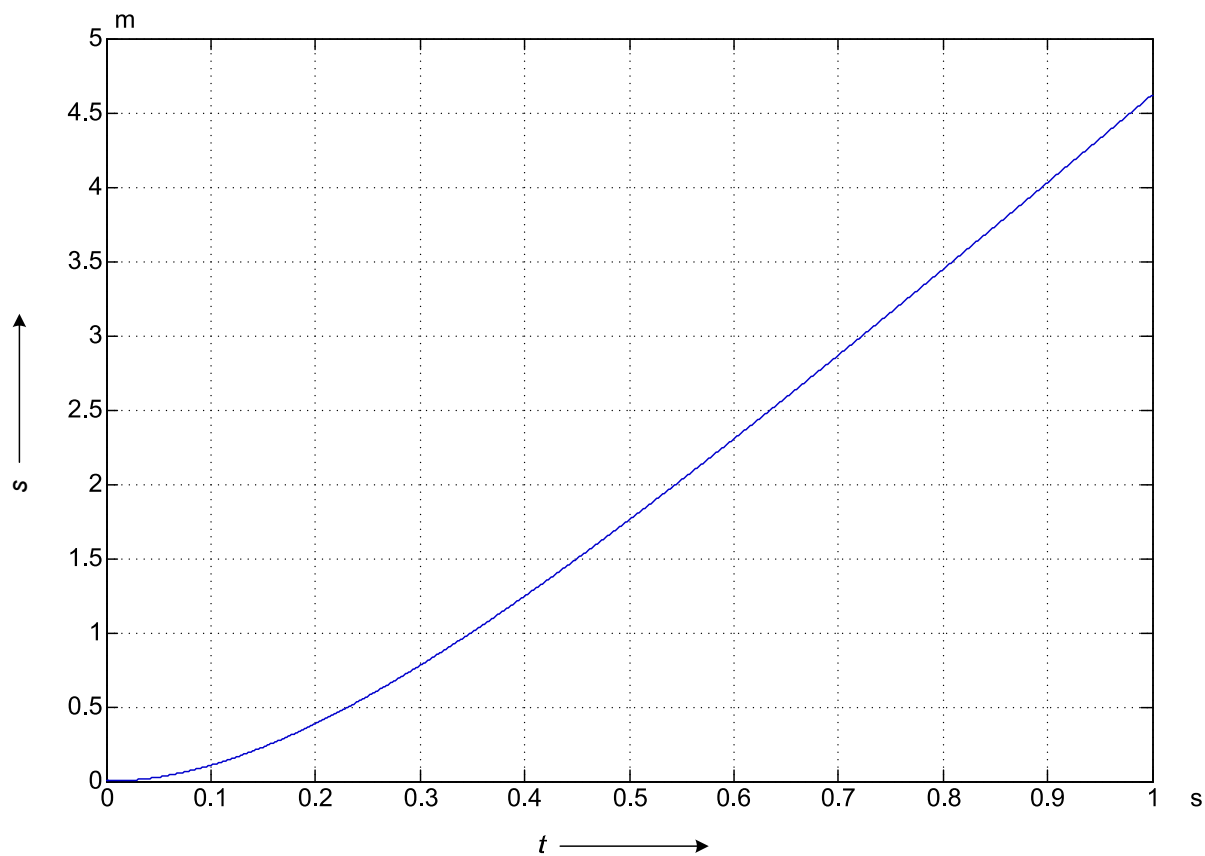
3.36 pav., 3.37 pav., 3.38 pav., 3.39 pav. pateikiami jėgos pereinamojo proceso, greičio pereinamojo proceso, kelio priklausomybės nuo laiko ir srovių pereinamųjų procesų grafikai. Juos palyginus su simetrinio TAV atitinkamais grafikai (3.15 pav., 3.16 pav., 3.17 pav. ir 3.19 pav.), daroma išvada, kad grįžtamųjų ryšių įvedimas leidžia simetrizuoti nesimetrinės mašinos induktoriaus atskirų fazių sroves.



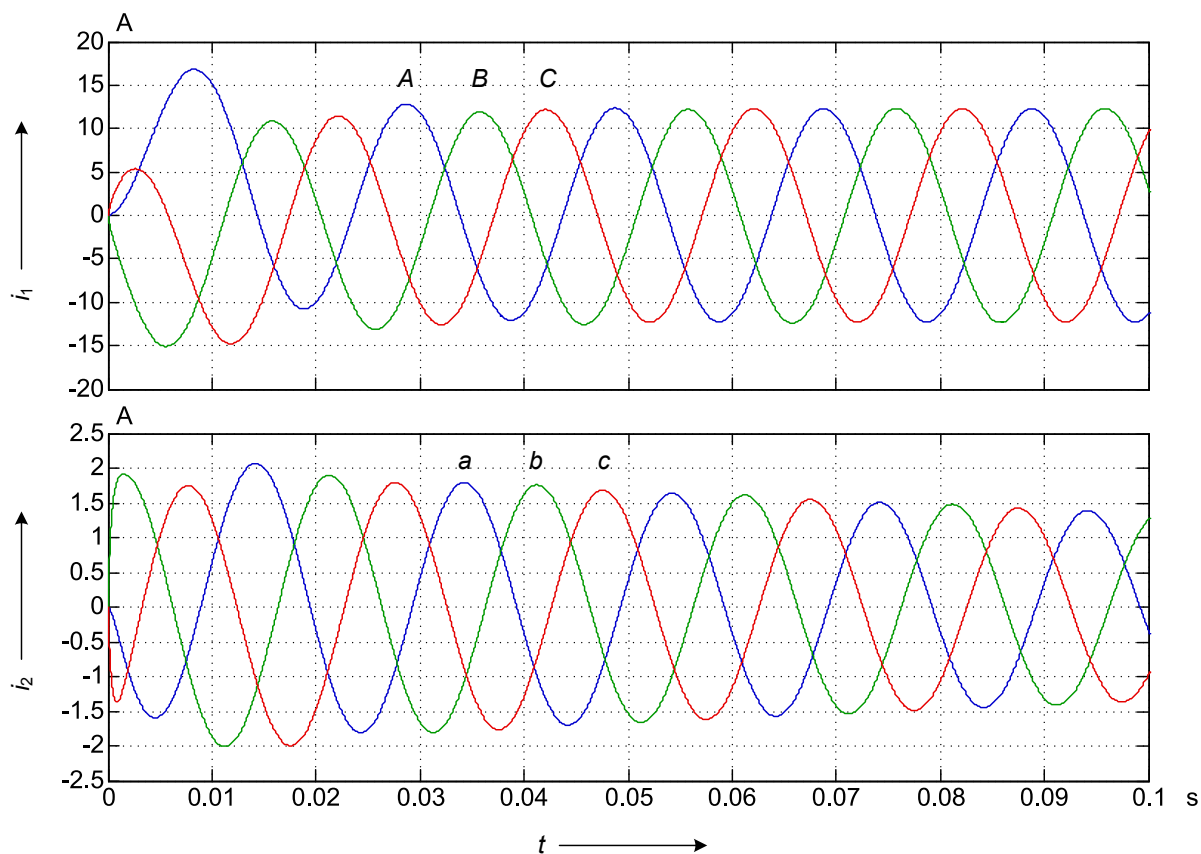
3.36 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV su induktoriaus srovių grįžtamaisiais ryšiais jėgos pereinamasis procesas, kai A ir C fazių sklaidos induktyvumas padidintas du kartus



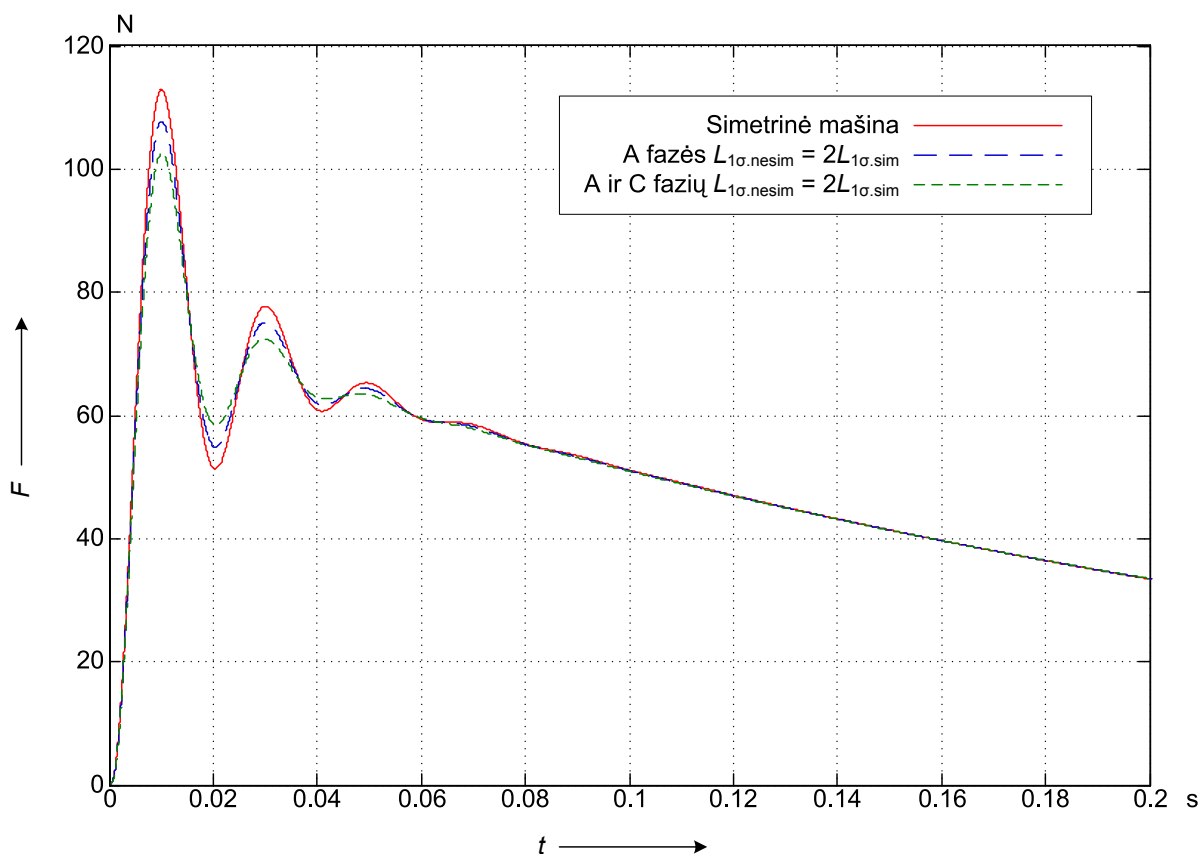
3.37 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV su induktoriaus srovių grįžtamaisiais ryšiais greičio pereinamasis procesas, kai A ir C fazių sklaidos induktyvumas padidintas du kartus



3.38 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV su induktoriaus srovių grįžtamaisiais ryšiais antrinio elemento kelio priklausomybė nuo laiko, kai A ir C fazių sklaidos induktyvumas padidintas du kartus



3.39 pav. Nesimetriniu būdu valdomo TAV su induktoriaus srovių grįžtamaisiais ryšiais induktoriaus ir antrinio elemento srovės, kai A ir C fazių sklaidos induktyvumas padidintas du kartus. Imitavimo proceso pradžia



3.40 pav. Simetrinio ir nesimetrinio TAV su induktoriaus srovių grįžtamaisiais ryšiais jėgų pereinamieji procesai

3.40 pav. pateikiamas simetrinio ir nesimetrinio TAV su grįžtamaisiais ryšiais kuriamųjų jėgų palyginimo grafikas. Iš jo matyti, kad, įvedant grįžtamuosius ryšius, sumažinamos jėgos švytavimų amplitudės. To priežastis – sumažėjusi koreguotos maitinimo įtampos amplitudė (žr. 3.26 pav.). Kitų tipų, ne tik proporcinio, reguliatorių panaudojimas padėtų formuoti norimos srovės (o reiškia ir grįžtamojo ryšio srovės) pereinamuosius procesus ir padidinti sistemos greitaveiką. Iš kitos pusės, grįžtamojo ryšio įvedimas stabilizuoja sistemą, todėl pagerėja jos pereinamųjų procesų kokybė.

4. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Sudarytas trifazio tiesiaeigio asinchroninio variklio kompiuterinis modelis, kuris leidžia imituoti nesimetrinės mašinos darbo režimus. Taikant naująjį modelį simetriniam varikliui, jo imitacijos rezultatai sutampa su žinomų ir naudojamų tiesiaeigių variklių modelių imitacijos rezultatais.
2. Keičiant simetrinio TAV maitinimo įtampos dažnį, bet palaikant pastoviąją jos amplitudę, sukuriama jėgos maksimali reikšmė ir pereinamojo proceso trukmė didėja atvirkščiai proporcingai dažniui. Neapkrauto variklio greitis tiesiogiai priklauso nuo maitinimo įtampos dažnio.
3. Sudaryti nesimetrinio TAV su skirtingu vienos fazės sklaidos induktyvumu ir skirtingais dviejų fazių sklaidos induktyvumas kompiuteriniai modeliai. Pirmuoju atveju A fazės nusistovėjusi srovė skyriasi 27,4 % nuo kitų dviejų fazių srovių, o antruoju atveju dvi fazinės srovės tiek pat skyriasi nuo trečiosios. Imitacijos rezultatai rodo, kad pirmuoju atveju jėgos maksimumas sumažėja 14,7 %, o antruoju atveju variklio maksimali jėga paleidimo metu sumažėja 29,2 %.
4. Pasiūlytas būdas simetrizuoti TAV sroves ir sudarytas TAV srovių simetrizavimo modelis su grįžtamaisiais ryšiais pagal induktoriaus sroves.
5. Simetrizuojant TAV fazines sroves, jo kuriamos jėgos maksimumas pirmuoju atveju yra mažesnis 4,42 % negu simetrinio variklio, o antruoju atveju – 8,85 %. Forsuojančių reguliatorių panaudojimas srovių grįžtamuosiuose ryšiuose padėtų formuoti norimus jėgos pereinamuosius procesus.

5. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Geleževičius V., Kriščiūnas K., Kubilius V. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius: Mokslas, 1990. 360 p.
2. Poška A., Rinkevičienė R. Tiesiaiegių elektros pavarų skaičiavimo ir valdymo algoritmai. Vilnius: Technika, 1997. 232 p.
3. Poška A. Tipinių technologinių procesų ir įrenginių automatizavimas: Vadovėlis Lietuvos aukšt. m-klų elektrotechn. spec. studentams. Vilnius: Mokslas, 1992. 248 p. ISBN 5-420-01019-4.
4. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos. Vilnius: Technika, 2005. 344 p. ISBN 9986-05-846-5.
5. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов. Москва: Высшая школа, 1987. 248 с.
6. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд. перераб. Ленинград: Энергия, 1978. 832 с.
7. Poška A., Teišerskis Č. Automatinės sistemos su tiesiaieigėmis pavaromis. Vilnius: Technika, 1993. 176 p.
8. Вольдек А. И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Ленинград: Энергия, 1970. 272 с.
9. Солёный С. В. Подача полосы немагнитного металла в зону штамповки. [interaktyvūs]. [žiūrėta 2006-01-24]. Prieiga per internetą: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2005/eltf/soleniy/library/article9.htm>.
10. Rinkevičienė R., Lisauskas S. Tiesiaiegių mechatroninių sistemų modeliai // Elektronika ir elektrotechnika. Kaunas: Technologija, 2003. Nr. 4(46), p. 69-73. ISSN 1392-1215.
11. Архангельский Г. Г. Современные тенденции совершенствования конструкции лифтового оборудования. [interaktyvūs]. [žiūrėta 2006-01-24]. Prieiga per internetą: <http://ptm.com.ua/articles/article.php?id=12>.
12. Измеров О. Неизвестный отечественный монорельс. [interaktyvūs]. [žiūrėta 2006-01-24]. Prieiga per internetą: <http://www.bryanskobl.ru/~press/Personal/monor/index.html>.
13. Maglev Linear Induction Propulsion Motors. [interaktyvūs]. [žiūrėta 2006-05-21]. Prieiga per internetą: <http://www.powersuper.com/lipm.html>.
14. H2W Technologies, Inc. - Innovation in Linear Motion. [interaktyvūs]. [žiūrėta 2006-05-21]. Prieiga per internetą: <http://www.h2wtech.com/linindmotor.htm>.
15. LMAC - AC Linear Induction Motor: Baldor. [interaktyvūs]. [žiūrėta 2006-05-21]. Prieiga per internetą: <http://www.baldor.co.uk/products/linearproducts/lmac.asp>.

16. Brushless Linear Servo Motors - Linear Motors, Robots, Actuators, Tables, Stages. [interaktyvūs]. [žiūrėta 2006-05-21]. Prieiga per internetą: http://www.aerotech.com/products/motors/linear_motors.html.
17. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. Москва: Энергопромиздат, 1986. 360 с.
18. Poška A. J. Specialiosios automatinės sistemos. Habilitacinis darbas. Vilnius: Technika, 1995. 203 p.
19. Ключев В. И. Теория электропривода: Учебник для вузов. Москва: Энергопромиздат, 1985. 560 с.
20. Rinkevičienė R., Poška A. J., Darulienė O. Nesimetrinių tiesiųjų dažniųjų elektros pavarų charakteristikos // Elektronika ir elektrotechnika. Kaunas: Technologija, 2003. Nr. 3(45), p. 81-83. ISSN 1392-1215.
21. Poška A. J. Lanksčiosios gamybos sistemų automatizavimas. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2004. 96 p.
22. Черных И. В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. [interaktyvūs]. [žiūrėta 2007-02-13]. Prieiga per internetą: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/>.
23. Лазарев Ю. Ф. Начала программирования в среде MatLAB: Учебное пособие. Киев: НТУУ КПИ, 2003. 424 с.
24. Matematinio paketo „Matlab“ pagalba. MATLAB Help.
25. Elektrotechnikos terminų žodynas: 11 530 terminų: lietuvių k., vokiečių k., anglų k., prancūzų k., rusų k. / moksl. red. A. Smilgevičius, S. Žebrauskas ir kt. Kaunas: Technologija, 1999. 871 p.
26. Barzdžiukienė L. D., Celešienė V., Kaulakienė A. Baigiamasis studijų darbas. Kalbininkų patarimai: teorija ir tvarkyta. 2-asis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: Technika, 2005, 148 p. ISBN 9986-05-706-X.