



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Artūras Trukšinas

**KOMUTACINIŲ VIRŠĮTAMPIŲ TYRIMAS AUKŠTOS
ĮTAMPOS ELEKTROS PERDAVIMO SISTEMOJE**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Vytautas Šiožinys

KAUNAS, 2015

Trukšinas, A. Komutacinių viršįtampių tyrimas aukštos įtampos elektros perdavimo sistemoje. *Magistrinis baigiamasis projektas* / vadovas doc. dr. Vytautas Šiožinsys; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 55 psl.

SANTRAUKA

Elektros energetikos sistemos veikimo patikimumas yra svarbus veiksnys ir glaudžiai susijęs su sistemos elektros įrenginių darbu. Skirtingose elektros tinklo vietose eksploatuojami įrenginiai yra veikiami skirtingų parametrų veiksnių. Žinoma, kad įvairiuose elektros tinklo vietose viršįtampių parametrai, dėl tinklo konfigūracijos, techninių charakteristikų, vykstančių fizikinių reiškinių pasiskirstę netolygiai.

Tiriamajame darbe ištyriau aukštos įtampos elektros perdavimo sistemoje atsirandančius komutaciniams viršįtampius. Pagal realius tinklo parametrus sudarytas skaičiuojamas modelis. Naudojantis MATLAB Simulink sumuliacine programa ištirti pagrindiniai aukštos įtampos tinkle sutinkami darbo režimai.

Pagal sumodeliuotus procesus ir gautus rezultatus galima matyti, kad skiriasi ne tik komutacinių viršįtampių amplitudė, bet ir proceso pobūdis bei trukmė.

Trukšinas Artūras. Research on Switching Surges of High Voltage Electricity Transmission System. *Final project of Master degree* / supervisor doc. dr. Vytautas Šiožinys; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems

Kaunas, 2015. 55 psl.

SUMMARY

Power system operational reliability is an important factor and closely linked with the electrical device. In different place of the power system operated device are exposed to the different parameters of factors. In various power systems locations mains overvoltage settings on the network configuration, technical characteristics, physical phenomena occurring unevenly distributed.

In research project inquire the high-voltage electricity transmission system resulting from switching surges. According to the actual network parameters consisting counted pattern. Using MATLAB Simulink simulation program to explore the main high voltage network work mode.

Under the simulated processes and the results it can be seen that there are differences not only commutation surge amplitude, but also the nature and duration of the process.

TURINYS

ĮVADAS	5
1. VIRŠŪTAMPIAI	6
2. PEREINAMIEJI PROCESAI	8
2.1 Pereinamojo proceso reiškinyse elektros grandinėse	9
2.2 Diferencinės lygtys charakterizuojančios elektros grandinę	10
2.3 Pereinamieji procesai naudojant būsenos kintamųjų metodą	11
3. ORO LINIJOS PRINCIPINIS MODELIS	12
3.1 Π modelis	12
3.1.1 Π modelio srovių ir įtampų išraiškos	13
3.1.2 Π modelio diferencinės lygtys	14
3.1.3 Būsenos kintamųjų metodas diferencinėmis lygtims spęsti.	15
3.1.4 Efektinių reikšmių skaičiavimas	16
Suminės varžos skaičiavimas	16
3.2 2Π modelis	18
3.2.1 Srovių ir įtampų išraiškos 2Π modeliu.	19
3.2.2 Diferencinės lygtys 2Π modeliui.	19
3.2.3 Būsenos lygčių metodas diferencinėmis lygtims spęsti 2Π modeliui.	21
3.2.4 Efektinių reikšmių skaičiavimas 2Π modeliui	22
3.3 Rezultatų palyginimas	26
4. ORO LINIJOS SKAIČIAVIMAI	26
4.1 Geometrinų parametrų matricos skaičiavimas	27
4.2 Linijos savųjų ir abipusių induktyvumų bei talpų skaičiavimas	28
4.3 Simetrinių dedamųjų metodas sekų varžoms skaičiuoti	29
5. MODELIAVIMAS	31
5.1 Modeliuojami režimai	31
5.1.1 Linijos įjungimas be apkrovos	32
5.1.2 Apkrauto galios transformatoriaus išjungimas	36
5.1.3 Linijos išjungimas po trumpo jungimo	39
5.2 Komutaciniai viršūtamčiai dėl išilginės nesimetrijos	41
5.2.1 Jungtuvo įjungimas į apkrovą	41
5.2.2 Jungtuvo išjungimas po apkrova	43
5.3 Laikinoji atkūrimo įtampa	46
5.3.1 Eksponentinė laikinoji atkūrimo įtampa	47
5.3.2 Generatorinė laikinoji atkūrimo įtampa	48
5.3.3 Trikampė bangos forma	49
5.3.4 Linijos parametrų skaičiavimas	50
5.4 Jungtuvo parinkimas	53
IŠVADOS	54
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	55

IVADAS

Baigiamojo magistro darbo tema yra „Komutacinių viršįtampių tyrimas aukštos įtampos elektros perdavimo sistemoje“.

Tyrimo tikslas – ištirti aukštos įtampos perdavimo tinkle atsirandančius komutacinius viršįtampius. Žinant jų atsiradimo priežastis pasiūlyti galimus sprendimo būdus juos eliminuoti. Siekiant kuo tiksliau teisingai atlikti tyrimą visų pirma reikia atlikti pagrindinių tinklo elementų analizę. Kadangi modeliavime naudosime orinę elektros perdavimo liniją didelis dėmesys skiriamas pereinamojo proceso atvaizdavimui. Būtent pereinamojo proceso metu, pereinant iš vienos nusistovėjusios būklės į kitą, sukuriama palankiausia sąlyga susiformuoti komutaciniams viršįtampiams.

Pirmame skyriuje apžvelgiama pagrindinės viršįtampių charakteristikos. Pateikiamos viršįtampių susidarymo priežastys, jų klasifikavimas.

Antrame skyriuje detaliau apžvelgiamas pereinamasis procesas kintamos srovės elektros grandinėje. Aprašomas pagrindinių elementų induktyvumo (L) ir talpos (C) poveikis pereinamojo proceso reiškiniui. Pateikiama skaičiavimo metodika diferencinėmis lygtimis charakterizuojančiomis elektros grandinę spręsti.

Trečiame skyriuje atliekami matematiniai skaičiavimai. Sudaromas oro linijos principinis modelis siekiant parodyti linijos įjungimo metu susidarantį pereinamuosius procesus. Būsenos kintamųjų metodu sprendžiamos diferencinės lygtys. Pagal metalinės atramos parametrus fazinėse koordinatėse skaičiuojamas linijos savieji ir abipusiai induktyvumai ir talpos. Būsenos kintamųjų metodu perskaičiuojame į modas (sekų dydžius).

Paskutiniajame skyriuje naudojant matematinę programą MATLAB Simulink sudaromas simuliacinis modelis. Juo remiantis modeliuojame įvairius režimus dažnai pasitaikančius elektros perdavimo sistemoje, kurie sukelia viršįtampius.

Tiriamajame magistro darbe išsikeliami uždaviniai ištirti komutacinius viršįtampius kai modeliuojami tokie režimai:

- Linijos įjungimas be apkrovos
- Apkrauto galios transformatoriaus išjungimas
- Linijos išjungimas po trumpo jungimo
- Linijos įjungimas/išjungimas su skirtingų jungtuvo polių suveikimo laiku

Tai pat apskaičiuoti jungtuve susidarantį laikinąjį atkūrimo įtampa komutacinio viršįtampo metu.

1. VIRŠŲTAMPIAI

Viršųtampis – *bet kokia įtampa tarp fazės laidininko ir žemės arba tarp laidinikų turinti didesnė vertę nei leidžiama elektros įrenginiuose.*

Bet koks įtampos padidėjimas virš aukščiausios leistinos tinklo įtampos yra vadinamas viršųtampiu. Viršųtampių tyrimai elektros energetikos sistemose yra svarbus ir gana sudėtingas uždavinys. Viršųtampių perinamieji procesai gali turėti įtakos daugeliui elektros energetikos sistemos sudėtinių dalių.

Viršųtampiai susiformavę elektros tinkle gali iki kelių kartų viršyti leistiną įtampą. Viršųtampių poveikio trukmė elektros įrenginiams priklauso nuo viršųtampius sukėlusių trikdžių pobūdžio. Vidiniai viršųtampiai gali trukti nuo kelių milisekundžių iki kelių sekundžių (rezonansiniai), o izoliuotos neutralės tinkle, esant įžemėjimui, linijinė įtampa gali veikti kur kas ilgiau [1].

Viršųtampių klasifikavimas:

- ilgalaikė leistinoji didžiausia pramoninio dažnio įtampa;
- laikinieji viršųtampiai (rezonansiniai);
- pereinamieji viršųtampiai (trumpos trukmės viršųtampiai, t_f – impulso fronto trukmė, t_2 – viršųtampių impulso trukmė):
 - o nuožulnaus fronto viršųtampis, $20 \mu s \leq t_f \leq 5000 \mu s$, $t_2 \leq 2 \text{ ms}$.
 - o stataus fronto viršųtampis, $0,1 \mu s \leq t_f \leq 20 \mu s$, $t_2 \leq 300 \mu s$.
 - o labai stataus fronto viršųtampis, pikinis laikas $\leq 0,1 \mu s$, suminis laikas $< 3 \text{ ms}$, dažnis $30\text{kHz} < f < 100 \text{ MHz}$.

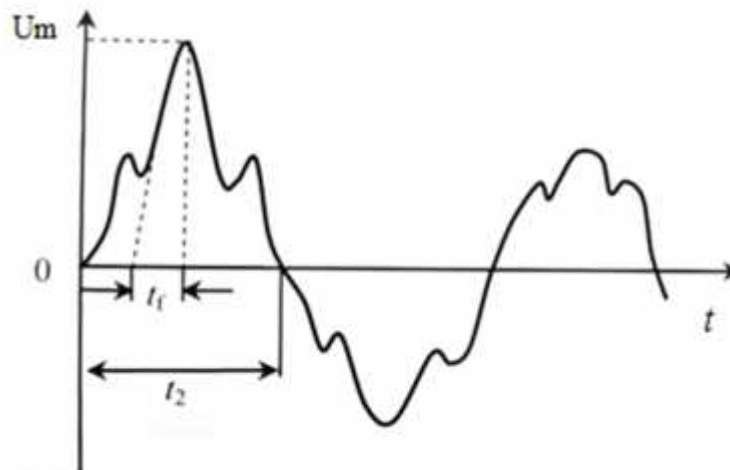
Pagal susiformavimo priežastis viršųtampius galima suskirstyti į vidinius ir į išorinius.

Vidiniai viršųtampiai skiriasi vieni nuo kitų savo lygiu, forma, pasikartojimo dažniu ir poveikio izoliacijai trukme. Viršųtampius apibūdinantys dydžiai yra priklausomi nuo įvairių atsitiktinių veiksnių: tinklo schemos, darbo režimo, parametrų, nuo apsauginių įrenginių ir jų darbo efektyvumo ir kt. Savo ruožtu vidiniai viršųtampiai skirstomi į dvi grupes: perjungimo ir režiminius viršųtampius. Viršųtampių lygis priklauso nuo juos sukeliančių priežasčių. Viršųtampių lygis vertinamas santykiniais vienetais (1 s.v. yra leistinoji elektros tinklo nominalioji įtampa) įvairiuose elektros tinklo parametrų pokyčio situacijose gali būti tokie:

- o **1,0 – 1,5 s.v.** *Linijos arba kabelio aktyviosios galios ir reaktyviosios apkrovos atjungimas.* Šių svyravimų viršųtampių dažnis yra atimtas tinklo dažniui. Kondensatorių baterijos atjungimas.

- o **1,5 – 2,0 s.v. Trumpojo jungimo atjungimas.** Šių viršįtampių dydis priklauso nuo vietos elektros sistemoje, t.y. trumpasis jungimas gali būt linijoje arba generatoriuje, ir taip pat nuo nulinės ir tiesioginės varžų santykio (Z_0/Z_1). *Linijos ir kabelio prijungimas per induktyvumą.* Analogiškos, bet sudėtingesnės formos bangos gaunamos, kai prijungiama linija arba kabelis su transformatoriumi žemosios įtampos pusėje. *Rezonansiniai viršįtampiai* energetikos sistemoje gali atsirasti pasikeitus sistemos fizikinių parametrų santykiui. Tokia situacija energetinėje sistemoje gali susidaryti, atjungiant trumpąjį jungimą. Linija trumpa lieka prijungta viena arba dviem fazėmis ir vadinamas nepilnafazis režimas. Tokie rezonansiniai reiškiniai gali atsirasti linijose ilgesnėse kaip 400 km. *Talpos efekto viršįtampiai.* Rezonansinis įtampos padidėjimas virš maksimalios darbinės įtampos gali atsirasti dėl talpos efekto. Jis pasireiškia linijose, kurių ilgis artimas ketvirčiui bangos ilgio, maitinamose iš vienos pusės (ketvirčio bangos rezonansas) ir pusės bangos ilgio dvipusio maitinimo linijose (pusės bangos rezonansas).
- o **2,0 – 2,05 s.v. Linijos atjungimas.** Viršįtampio dydis nutolusiame atvirame gale priklauso nuo jungtuvų visų trijų polių susijungimo viena laikiškumo.
- o **2,5 – 3,0 s.v. reaktoriaus arba transformatoriaus tuščiosios veikos srovės atjungimas.** Viršįtampių dydis priklauso nuo jungtuvu nutrauktos srovės dydžio, kai lankas jungtuve gesinamas anksčiau negu tuščiosios veikos srovė keičia ženklą. Viršįtampiai susidaro dėl liekamosios srovės induktyviojoje grandinėje. *Ijungimas linijos su transformatoriumi gale.* Jei nutolusios linijos gale yra transformatorius, tai prie jo atvirų antrinės grandinės gnybtų bus dvigubai aukštesnė įtampa, kai bangos sklidimo linija trukmė lygi transformatoriaus švytavimų periodui, galima susidaryti ir daug aukštesnė įtampa.
- o **3,0 s.v. ir daugiau.** Kartotinis linijos arba kabelio įjungimas. Įtampa nutolusiame atvirame gale išauga dėl krūvio, išlikusio po veikiančios linijos atjungimo. Grandinė su reaktyviosios galios kompensavimo įrenginiais po atjungimo švytuoja kelias dešimtąsias sekundės su amplitude, lygia pilnai apkrovai, ir dažniu artimu pramoniniam. Jeigu linijos liekamojo krūvio ir šaltinio įtampų fazių skirtumas didžiausias (iki 2,0 s.v.) kartotinio įjungimo momentu likęs krūvis gali sukelti papildomai įtampos padidėjimą 1,0 s.v.

Vidinių viršįtampių proceso kreivė parodyta 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Vidinių viršįtampių tipinė forma aukštosios įtampos įrenginiuose [2]

Elektros įrenginiams yra nustatytos aukščiausios leidžiamos elektros tinklo įtampos ribos .

1.1 lentelė. Leidžiamosios įtampos

Nominali įtampa, kV	6	10	35	110	150	220	330
Didžiausia leidžiamoji įtampa, s.v.	1,2	1,2	1,15	1,15	1,15	1,15	1,10

Viršįtampių pereinamųjų procesų atsiradimas lemia įtampos padidėjimą virš U_{maks} . Įtampos padidėjimas virš U_{maks} – vadinamas viršįtampiu. Viršįtampiai pagal poveikio vietą skirstomi į fazinius, tarp fazinius, tarpvijinius ir tarp kontaktinius. Tiriant viršįtampius elektros sistemose yra sudaromos skaičiuojamosios schemos matematinis modelis bei parenkami lygčių sprendimo metodai.

2. PEREINAMIEJI PROCESAI

Elektros grandinių pereinamųjų procesų analizė tokia pat svarbi kaip ir nusistovėjusio režimo analizė. Kaip pereinamasis procesas įvyksta, kai kurių grandinės elementų įtampos ir srovės gali daug kartų viršyti normalios būsenos vertes ir taip gali pažeisti ar sunaikinti grandinės elementus. Galima išskirti iš elektros grandinės nusistovėjusio režimo pereinamųjų procesų funkcionavimą, tuo kad pereinamųjų procesų dydžiai, tokie kaip srovė, įtampa, galia ir energija kinta laike, tuo tarpu nusistovėjęs režimas lieka pastovus ir nekintamas.

Pereinamųjų procesų atsiradimo priežastis yra bet kokių grandinės parametrų arba grandinės konfigūracijos pasikeitimas, kuriuos dažniausiai iššaukia jungtuvo komutacija, trumpieji jungimai, maitinimo šaltinio pasikeitimai ir t.t. Įtampos ar srovės bei kitų dydžių pasikeitimai pereinamųjų procesų metu nėra momentiniai ir reikalauja šiek tiek laiko, nors jie yra labai greiti ir trunkantys milisekundes ar net mikrosekundes. Tačiau šie labai greiti pokyčiai

negali būti staigūs kadangi pereinamieji procesai vyksta dėl energijos mainų, kuri yra sukaupta induktyvumo magnetiniame lauke arba/ir kondensatoriaus elektriniame lauke [2].

Bet kokie energijos pokyčiai negali būti staigūs, Kaganai sukeltą begalinę galią (galia yra energijos išvestinė $p = d/dt$), kas yra priešinga fizinės realybės. Visi pereinamųjų procesų pasikeitimai, kurie taip pat vadinami pereinamoji reakcija, dingsta kai nauji nusistovėję procesai susiformuoja. Šiuo atžvilgiu galima sakyti, kad procesų būseną grandinėje apibūdinama dviem režimais: senuoju, kuris buvo prieš pokyčius ir naujuoju atsirado po pasikeitimų.

2.1 Pereinamojo proceso reiškinys elektros grandinėse

Analizuodami elektros sistemą turime išskirti du pagrindinius režimus: stacionarų režimą (pusiausvyrą) ir pereinamąjį procesą (dinaminį režimą).

Elektros sistema pusiausvyros būsenoje yra tada, kai kintamieji (įtampa, srovė ir kt.) apibūdinantys savo būseną arba yra pastovūs su laiku (nuolatinės srovės grandinė) arba yra periodinė laiko funkcija (kintamos srovės grandinė). Elektros sistema pereinamųjų procesų būsenoj tada, kai kintamieji kinta neperiodiškai t.y. kai sistema ne nusistovėjusiame režime. Pereinamoji būseną dingsta, kai pasirodo nusistovėjusi būseną. Vadinasi pereinamasis procesas yra perdavimo būseną, kai nusistovėjusi būseną kinta į kitą [4].

Parametrai induktyvumas (L) ir talpa (C) charakterizuojami gebėjimu kaupti energiją: magnetinė energija $w_L = \frac{1}{2}\psi = \frac{1}{2}LI$ (kur $\psi = LI$) magnetiniame lauke ir elektrinė energija $w_C = \frac{1}{2}q = \frac{1}{2}CU^2$ (kur $q = CU$) elektriniame grandinės lauke. Energija grandinėje tiekama per elementus, kurie yra įtampos ir srovės šaltiniai. Taigi galima sakyti, kad elektros grandinė, kaip fizikinė sistema, charakterizuojama tam tikros energijos nusistovėjusia būseną. Pagal nusistovėjusią būseną energija sukaupia skirtinguose induktyvumuose ir talpose kai šaltinis nuolatinė srovė, yra nekintami, o kai šaltinis kintamos srovės grandinės energija keičiasi periodiškai.

Kai bet koks pasikeitimas įvyksta grandinėje, ten dažniausiai persiskirsto energija tarp induktyvumo ir talpos elementų ir tuo būdu pasikeičia energijos šaltinio pobūdis. Energijos persiskirstymas negali būti momentinis, bet per tam tikrą laiką, kuriuo metu sukelia pereinamąjį procesą.

Pagrindinė sąlyga norint akimirksniu pakeisti energiją reikalauja turėti begalinę galią, kuri surišta su kondensatoriais ir induktoriais. Kaip minėjome anksčiau energija yra galios išvestinė ir bet kokie staigūs pasikeitimai reikalauja begalinės galios. Kadangi begalinė galia nėra realizuojama fizikinei sistemoje, energija negali kisti staiga, tik priklausomai nuo laiko kur

pasirodo pereinamoji būseną. Vadinasi žiūrint iš fizikinės sistemos pusės galima sakyti, kad pereinamieji procesai egzistuoja kai energijos būseną iš vienos nusistovėjusios būsenos į kitą.

Kita išvada apie įtampą ir srovę. Vykti magnetinės energijos pasikeitimui reikia srovės pasikeitimo induktyvume. Dėl to srovės indukcinėse grandinėse, ar indukcinėse grandinių šakose negali keistis staiga. Iš kitos pusės srovės pasikeitimą induktoriuje sukelia įtampos dydžio pokytis $L (d i / dt)$. Momentiniam srovės pokyčiui taipogi reikia begalinės įtampos, kuri vėlgi nerealizuojama praktikoje. Kadangi sukelta įtampa taip pat žinoma kaip $d \psi / dt$, kur ψ yra magnetinis srautas, o srovės magnetinis srautas staiga pasikeisti negali.

Panašiai galima spręsti ir apie elektrinės energijos pasikeitimą, kuri priklauso nuo įtampos pasikeitimo kondensatoriuje, nes $v = q/C$, kur q yra krūvis. Taipogi nei įtampa skersai kondensatoriaus, nei jo krūvis gali kisti staiga. Be to įtampos greičio kitimas yra $d v / dt = (1/C) \cdot d q / dt = i/C$, ir momentinis įtampos pasikeitimas sukelia begalinę srovę, kuri taipogi nerealizuojama praktiškai. Taigi galime apibendrinti, kad bet koks pasikeitimas elektros grandinėje, kuris sukelia energijos persiskirstymus sukelia pereinamuosius procesus [4].

Kitais tariant bet kokia komutacija, trukdžiai, trumpieji jungimai ar kokie staigūs elektros grandinės pasikeitimai iššaukia pereinamuosius procesus. Bendrai kalbant, bet koks pasikeitimas nuo nusistovėjusios būsenos veda prie laikinų nuokrypių nuo vienos normalios nusistovėjusios grandinės būsenos prie kitos. Energijos persiskirstymas sukeltas pasikeitimų teoriškai nesibaigia niekada. Tačiau realybėje pereinamasis procesas elektros grandinėje funkcionuoja palyginti trumpa laiko tarpą, po kurio įtampos ir srovės vertės nusistovi naujoje pastovioje būsenoje.

2.2 Diferencinės lygtys charakterizuojančios elektros grandinę

Grandinių analizę, kaip fizikinę sistemą pilnai galima apibūdinti diferencialinėmis lygtimis parašytos įtampai arba srovėms, kurios charakterizuoja grandinės funkcionavimą. Linijinėms diferencinėms lygtys sudaromos linijinėms grandinėms, kurių koeficientai nekinta, t.y. kiekvienas trukmei yra pirmojo laipsnio priklausomų kintamojo arba vienas iš jo darinių. Paveiksle 2.1 pateikiame pavyzdį elektros grandinės, kurią sudaro nuosekliai sujungti trys pagrindiniai elementai varža (R), induktyvumas (L), talpa (C) ir įtampos šaltinis $v(t)$. Taikome Kichhoff'o antrąjį dėsnį kontūro įtampai:

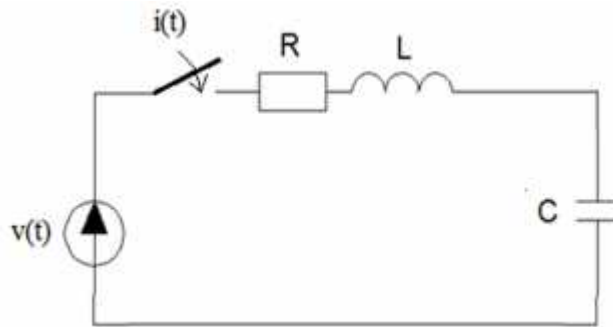
$$v_R + v_L + v_C = v(t) \quad (2.1)$$

kur grandinės elementus išreiškiame:

$$v_R = R i ;$$

$$v_L = L \frac{di}{dt};$$

$$v_C = \int i dt.$$



2.1 pav. Nuosekli RLC grandinė

ir tada mes turime

$$L \frac{di}{dt} + R i + \frac{1}{C} \int i dt = v(t). \quad (2.2)$$

Po abiejų pusių (2.2) lygties diferencijavimo laiko atžvilgiu, rezultatai yra antro laipsnio diferencinė lygtis

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{dv(t)}{dt}. \quad (2.3)$$

Tokie patys rezultatai gali būti gaunami rašant dviem vienalaikiams pirmo laipsnio diferencines lygtis dviem nežinomiesiems, i ir v_C :

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C} i; \quad (2.4a)$$

$$R i + L \frac{di}{dt} + v_C = v(t). \quad (2.4b)$$

Po diferencinių lygčių 2.4b ir pakeičiant dv_C/dt lygtyje 2.4a, mes gauname tą pačią (kaip 1.2 lygtis) antro laipsnio vienaskaitinę lygtį. Diferencinių lygčių sprendimas gali būti baigtas tik jei pirminės sąlygos apibrėžtos. Akivaizdu, kad toje pačioje grandinėje vykstant tam pačiai komutacijai, bet skirtingomis pradinėmis sąlygomis pereinamųjų procesų reakcija bus kitokia.

2.3 Pereinamieji procesai naudojant būsenos kintamųjų metodą

Kai svarstomas grandinės dinaminis funkcionavimas, lygtys pristatančios grandinę naudojant mazgo ar tinklo analizę, yra intergrodiferencialinės. Jos gali būti transformuojamos į diferencinę skaliarinę lygtį, antro ar aukštesnio laipsnio. Tačiau grandinės diferencinės lygtis gali būti prašomos ir pirmo laipsnio diferencinėmis lygtimis arba išreikštos matricinėje formoje. Taip gaunamos pirmo laipsnio vektorinės diferencialinės lygtis

$$\dot{x} = f(x, w, t)$$

x - nežinomų kintamųjų vektorius, kitaip dar vadinamas būsenos kintamųjų;

w - įeinantys dydžiai;

t - proceso trukmė.

Būsenos lygtis kintamos srovės grandinėse, kai kintamieji priklausomi nuo proceso trukmės ir priklausomi vieni nuo kitų galima išreikšti ir tokiomis matricinėmis lygtimis:

$$\dot{x} = A \cdot x + b \quad (2.5)$$

$$y = c \cdot x + d \quad (2.6)$$

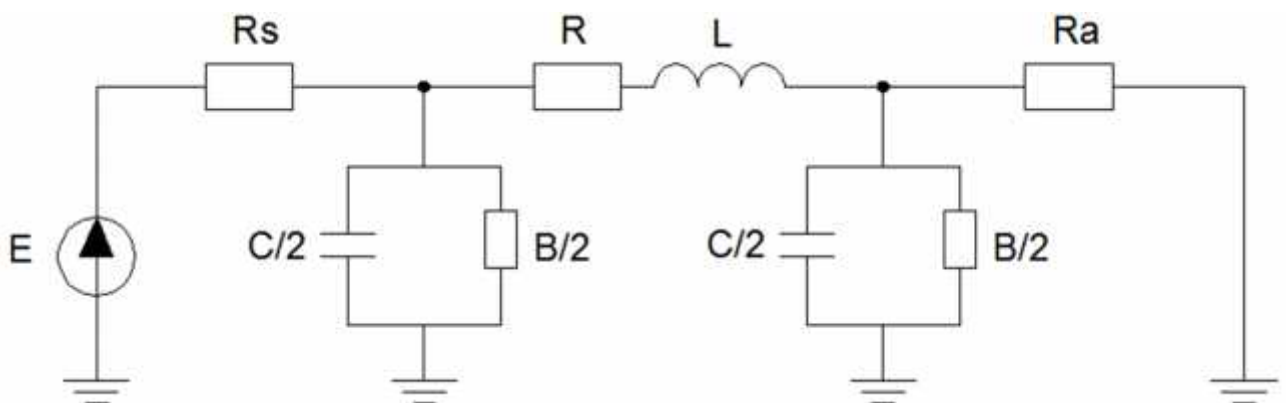
y – išėjimo dydžių vektorius;

A , b , c ir d matricos priklausančios nuo grandinėje esančių elementų.

3. ORO LINIJOS PRINCIPINIS MODELIS

Skaičiuosime pereinamąjį procesą imituodami supaprastintą oro linijos Π modelį. Taip pat skaičiuosime ir 2Π siekdami tiksliau atvaizduoti linijos pereinamąjį procesą įjungimo metu. Pradiniu laiko momentu laikome, kad perdavimo linija yra išjungta. Įjungimo metu atsiranda komutaciniai viršitampiai. Grandinės elementų vertės parenkamos laisvai. Proceso trukmė 0,02 s arba vienas periodas 50 Hz dažnio tinkle.

3.1 Π modelis



3.1 pav. Oro linijos Π modelis

E – grandinės šaltinis, V;

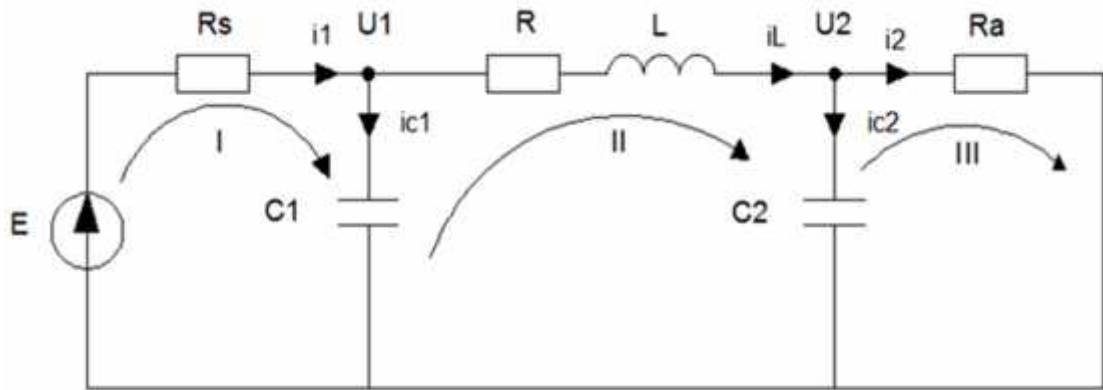
R_s – sistemos varža, Ω ;

R – linijos aktyvioji varža Ω ,

L – linijos induktyvioji varža, H;

C – linijos talpinė varža, F.

Atliekant sekančius skaičiavimus reaktyviojo laidžio B nevertinsime. Perbraižome modelį į skaičiuojamąją schemą.



3.2 pav. Skaičiuojamoji schema

3.1.1 II modelio srovių ir įtampų išraiškos

Pagal Kirchhoff'o dėsnius išreiškiame tolimesniuose skaičiavimuose naudojamas sroves ir įtampas. Linijos talpa perskaičiuojame $C_1 = C_2 = C/2$. Laisvai pasirenkame kontūrų kryptis.

Srovė mazge U1:

$$i_1 = i_{C1} + i_L ; \quad (3.1)$$

Srovė mazge U2:

$$i_L = i_{C2} + i_2 ; \quad (3.2)$$

Įtampa I kontūre:

$$E - U_1 = i_1 \cdot R_S ; \quad (3.3)$$

Įtampa II kontūre:

$$U_1 - U_2 = u_L + i_L \cdot R ; \quad (3.4)$$

Įtampa III kontūre:

$$U_2 = i_2 \cdot R_a ; \quad (3.5)$$

Srovės kondensatoriuje priklauso nuo įtampos kitimo laike, todėl srovė išreiškiama diferencine forma.

$$i_{C1} = i_{C2} = \frac{C}{2} \frac{dU_t}{dt} . \quad (3.6)$$

Įtampa induktyvume priklauso nuo srovės induktyvumo laidininke, todėl įtampa galime išreikšti diferencine forma:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} ; \quad (3.7)$$

3.1.2 II modelio diferencinės lygtys

Pagal 3.3 formulę išreiškiame srovę:

$$i_1 = \frac{E - U_1}{R_S}.$$

Naudodamiesi 3.1 ir 3.6 formulėmis skaičiuojame i_L :

$$i_L = \frac{E - U_1}{R_S} - C_1 \frac{dU_1}{dt}.$$

Abi puses padauginę iš $\frac{1}{C_1}$ gauname diferencinę lygtį:

$$\frac{dU_1}{dt} = \frac{E - U_1}{R_S \cdot C_1} - \frac{i_L}{C_1}.$$

Naudodamiesi 3.4 ir 3.7 formulėmis skaičiuojame įtampa U_1 :

$$U_1 = L \frac{di_L}{dt} + i_L \cdot R + U_2.$$

Abi puses padauginę iš $\frac{1}{L}$ gauname diferencinę lygtį:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_1}{L} - \frac{i_L \cdot R}{L} - \frac{U_2}{L}.$$

Pagal 3.5 formulę skaičiuojame srovę:

$$i_2 = \frac{U_2}{R_a}.$$

Naudodamiesi 3.2 ir 3.6 formulėmis skaičiuojame srovę i_L :

$$i_L = C_2 \frac{dU_2}{dt} + \frac{U_2}{R_a}.$$

Abi puses padauginę iš $\frac{1}{C_2}$ gauname diferencinę lygtį:

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{i_L}{C_2} - \frac{U_2}{R_a \cdot C_2}.$$

3.1.3 Būsenos kintamųjų metodas diferencinėmis lygtimis spęsti.

Žinodami diferencinių lygčių kintamuosius ir įėjimo dydžius galime sudaryti matricas diferencinėms lygtimis spręsti. Naudojame (3.8) formulę:

$$[\dot{\bar{X}}] = [A] \cdot [\bar{X}] + [B] \cdot [\bar{V}]; \quad (3.8)$$

Įsistatome žinomus dydžius į formulę:

$$\begin{bmatrix} \frac{dU_1}{dt} \\ \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dU_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_s \cdot C_1} & -\frac{1}{C_1} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2 \cdot R_u} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_L \\ U_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s \cdot C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (E_m \sin(\omega t));$$

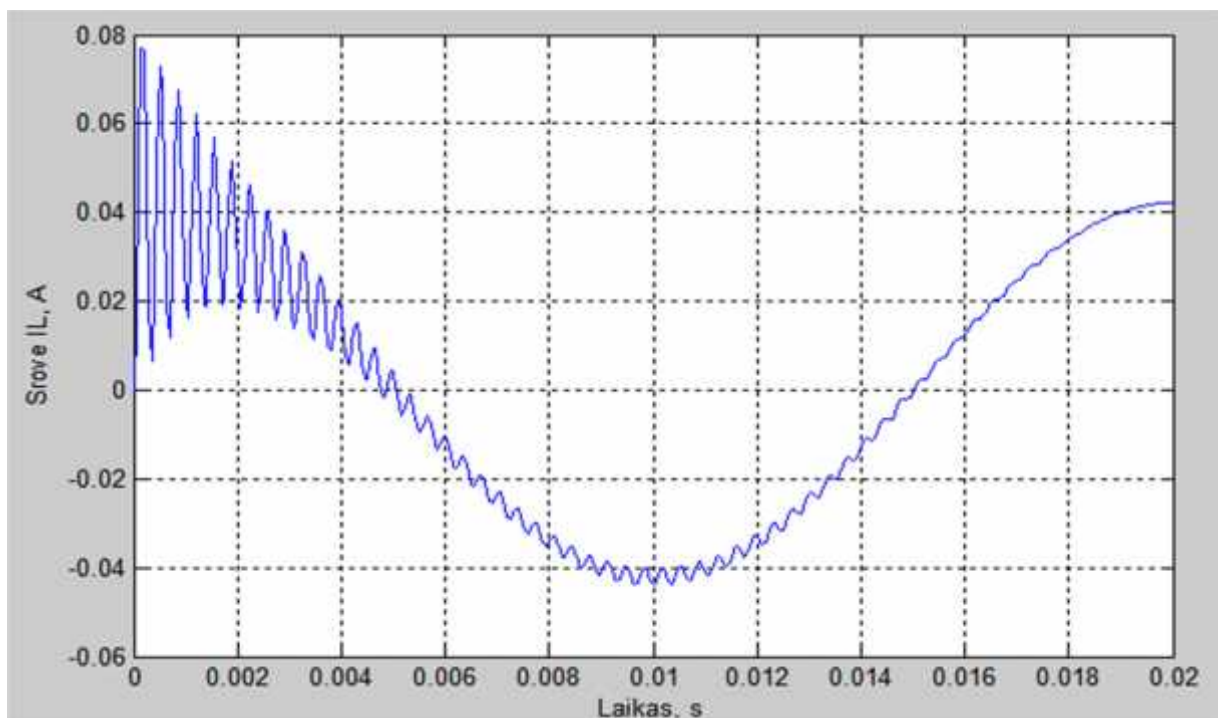
$\omega = 2\pi f$ – kampinis dažnis, [rad];

f – sistemos dažnis, 50 Hz;

E_m – įtampos vertė pradinio laiko momentu, [kV];

t – modeliavimo trukmė, [s].

Gautas pereinamojo proceso rezultatas pateikiame grafiniu pavidalu.

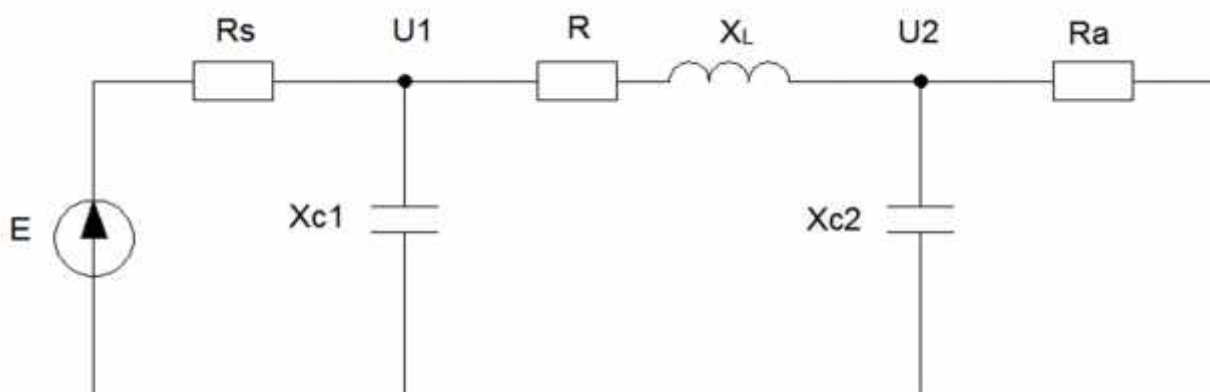


3.3 pav. Pereinamojo proceso srovės I_L matavimas.

3.1.4 Efektinių reikšmių skaičiavimas

3.1 lentelė. II modelio parametrai

Talpa C, μF	Induktyvumas L, mF	Apkrovos varža Ra, Ω	Sistemos varža Rs, Ω	Linijos varža R, Ω	Sistemos įtampa Em, V	Dažnis f, Hz
4	1,5	$1 \cdot 10^6$	1	0,5	67	50



3.4 pav. Ekvivalentinė schema

Suminės varžos skaičiavimas

Talpioji varža skaičiuojama pagal formulę:

$$X_{C1} = X_{C2} = \frac{1}{j \cdot \frac{1}{2}} = \frac{1}{j \cdot 3 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{2}} = j1591,5 \, \Omega; \quad (3.9)$$

Induktyvioji varža skaičiuojama pagal formulę:

$$X_L = j\omega L = j \cdot 314 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = j0,4712 \, \Omega; \quad (3.10)$$

Žinodami linijos parametrus toliau skaičiuojame varžą, jungiame lygiagrečiai R_a ir X_{C2} :

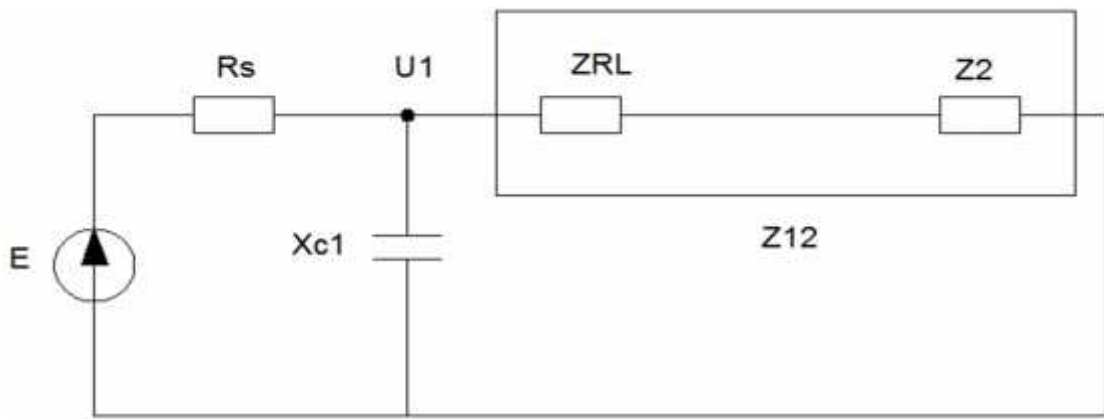
$$Z_2 = \frac{R_a \cdot (-X_{C2})}{R_a + (-X_{C2})} = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot (-j1591,5)}{1 \cdot 10^6 + (-j1591,5)} = 2,533 - j1591,5 \, \Omega;$$

prastiname schemą toliau, nuosekliai jungiame R ir X_L :

$$Z_R = R + X_L = 0,5 + j0,4712 \, \Omega;$$

nuosekliai jungiame Z_R ir Z_2 :

$$Z_1 = Z_2 + Z_R = (2,533 - j1591,5) + (0,5 + j0,4712) = 3,033 - j1591,1 \, \Omega.$$



3.5 pav. Ekvivalentinė schema

Toliau prastiname schemą, lygiagrečiai jungiame Z_1 ir X_{C1} :

$$Z_1 = \frac{Z_1 \cdot (-X_{C1})}{Z_1 + (-X_{C1})} = \frac{(3,033 - j1591,1) \cdot (-j1591,5)}{(3,033 - j1591,1) + (-j1591,5)} = 0,7585 - j795,66 \, \Omega.$$

Suminę varžą gauname nuosekliai sujungdami Z_1 ir R_s :

$$Z_2 = Z_1 + R_s = (0,7585 - j795,66) + 1 = 1,7585 - j795,66 \, \Omega.$$

Įtampų ir srovių skaičiavimas

Skaičiuojame srovę I_1 pagal formulę:

$$I_1 = \frac{E}{Z_2} = \frac{67 + j0}{1,7585 - j795,66} = 0,0002 + j0,0842 \, A.$$

skaičiuojame įtampą U_1 pagal formulę:

$$U_1 = E - (I_1 \cdot R_s) = (67 + j0) - ((0,0002 + j0,0842) \cdot (1 \cdot 10^6 + j0));$$

$$U_1 = 66,9998 - j0,0842 \, V.$$

skaičiuojame srovę I_{C1} pagal formulę:

$$I_{C1} = \frac{U_1}{-X_{C1}} = \frac{66,9998 - j0,0842}{-j1591,5} = 0,0001 + j0,0421 \, A;$$

skaičiuojame srovę I_L pagal formulę:

$$I_L = I_1 - I_{C1} = (0,0002 + j0,0842) - (0,0001 + j0,0421) = 0,0001 + 0,0421 \, A;$$

skaičiuojame įtampą U_2 pagal formulę:

$$U_2 = U_1 - (I_L \cdot Z_R);$$

$$U_2 = (66,9998 - j0,0842) - ((0,0001 + 0,0421) \cdot (0,5 + j0,472))$$

$$U_2 = 67,0196 - j0,1053 \text{ V};$$

skaičiuojame srovę I_{C2} pagal formulę:

$$I_{C2} = \frac{U_2}{-X_{C2}} = \frac{67,0196 - j0,1053}{-j1591,5} = 0,0001 + j0,0421 \text{ A};$$

skaičiuojame srovę I_2 pagal formulę:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_a} = \frac{67,0196 - j0,1053}{1 \cdot 10^6 + j0} = 0,000067 - j0,0000001 \text{ A};$$

Absoliutinės vertės

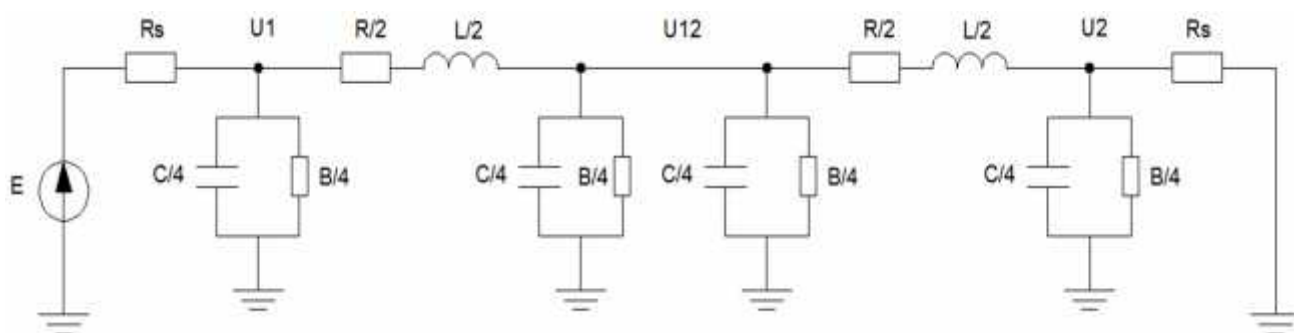
Absoliutinės vertės skaičiuojamos mazgams U_1 ir U_2 bei srovei I_L :

$$U_1 = \sqrt{66,9998^2 + (-j0,0842)^2} = 66,999 \text{ V};$$

$$I_L = \sqrt{0,0001^2 + 0,0421^2} = 0,0421 \text{ A};$$

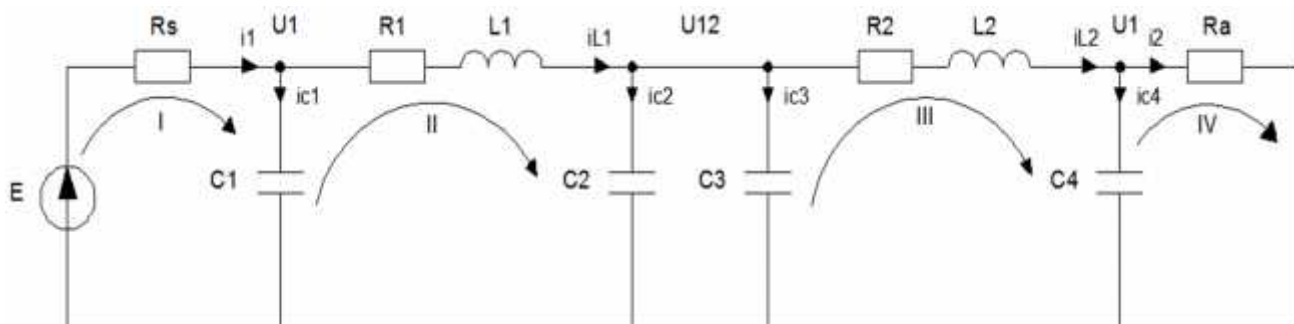
$$U_2 = \sqrt{67,0196^2 + (-0,1053^2)} = 67,0197 \text{ V}.$$

3.2 2Π modelis



3.6 pav. Oro linijos 2Π modelis

Kaip ir prieš tai skaičiuotame modelyje reaktyviojo laidžio B nevertinsime. Perbraižome modelį į skaičiuojamąją schemą.



3.7 pav. Skaičiuojamoji schema

3.2.1 Srovių ir įtampų išraiškos 2Π modeliui.

Pagal Kirchhoff'o dėsnius randame sroves ir įtampas.

Srovė mazge U1:

$$i_1 = i_{C1} + i_{L1} .$$

Srovė mazge U12:

$$i_{L1} = i_{C2} + i_{C3} + i_{L2} . \quad (3.11)$$

Srovė mazge U2:

$$i_{L2} = i_{C4} + i_2 . \quad (3.12)$$

Įtampa I kontūre:

$$E - U_1 = i_1 \cdot R_S .$$

Įtampa II kontūre:

$$U_1 - U_1 = u_{L1} + i_{L1} \cdot R_1 \quad (3.13)$$

Įtampa III kontūre:

$$U_1 - U_2 = u_{L2} + i_{L2} \cdot R_2 \quad (3.14)$$

Įtampa VI kontūre:

$$U_2 = i_2 \cdot R_a .$$

Srovės kondensatoriuje priklauso nuo įtampos kitiko laike, todėl srovė išreiškiama diferencine forma:

$$i_{C1} = i_{C2} = i_{C3} = i_{C4} = \frac{C}{4} \frac{dU_t}{dt} . \quad (3.15)$$

Įtampa induktyvume priklauso nuo srovės induktyvumo laidininke, todėl įtampa išreiškiama diferencine forma:

$$u_{L1} = u_{L2} = \frac{L}{2} \frac{di_L}{dt} . \quad (3.16)$$

3.2.2 Diferencinės lygtys 2Π modeliui.

Pagal 3 formulę išreiškiame srovę:

$$i_1 = \frac{E - U_1}{R_S} .$$

Naudodamiesi 1 ir 6 formulėmis skaičiuojame i_{L1} :

$$i_{L1} = \frac{E - U_1}{R_S} - C_1 \frac{dU_1}{d} ;$$

abi puses padauginę iš $\frac{1}{C_1}$ gauname diferencinę lygtį:

$$\frac{dU_1}{d} = \frac{E - U_1}{R_S \cdot C_1} - \frac{i_L}{C_1} .$$

Naudodamiesi 3.13 ir 3.16 formulėmis skaičiuojame įtampa U_1 :

$$U_1 = L_1 \frac{di_{L1}}{d} + i_{L1} \cdot R_1 + U_1 ;$$

abi puses padauginę iš $\frac{1}{L_1}$ gauname diferencinę lygtį:

$$\frac{di_{L1}}{d} = \frac{U_1}{L} - \frac{i_L \cdot R}{L} - \frac{U_2}{L} .$$

Pagal 3.11 ir 3.15 formules skaičiuojame srovę:

$$i_{L1} = i_{L2} + C_2 \frac{dU_1}{d} + C_3 \frac{dU_1}{d} ;$$

abi puses padauginę iš $\frac{1}{C_2 + C_3}$ gauname diferencinę lygtį:

$$\frac{dU_1}{d} = \frac{i_{L1}}{C_2 + C_3} - \frac{i_{L2}}{C_2 + C_3} .$$

Naudodamiesi 3.14 ir 3.16 formulėmis skaičiuojame įtampa U_1 :

$$U_1 - U_2 = L_2 \frac{di_{L2}}{d} + i_{L2} \cdot R_2 ;$$

abi puses padauginę iš $\frac{1}{L_2}$ gauname diferencinę lygtį:

$$\frac{di_{L2}}{d} = \frac{U_1}{L_2} - \frac{i_{L2} \cdot R_2}{L_2} - \frac{U_2}{L_2}$$

Naudodamiesi 3.12 ir 3.15 formulėmis skaičiuojam srovę i_{L2} :

$$i_{L2} = C_4 \frac{dU_2}{d} + \frac{U_2}{R_u} ;$$

abi puses padauginę iš $\frac{1}{C_4}$ gauname diferencinę lygtį:

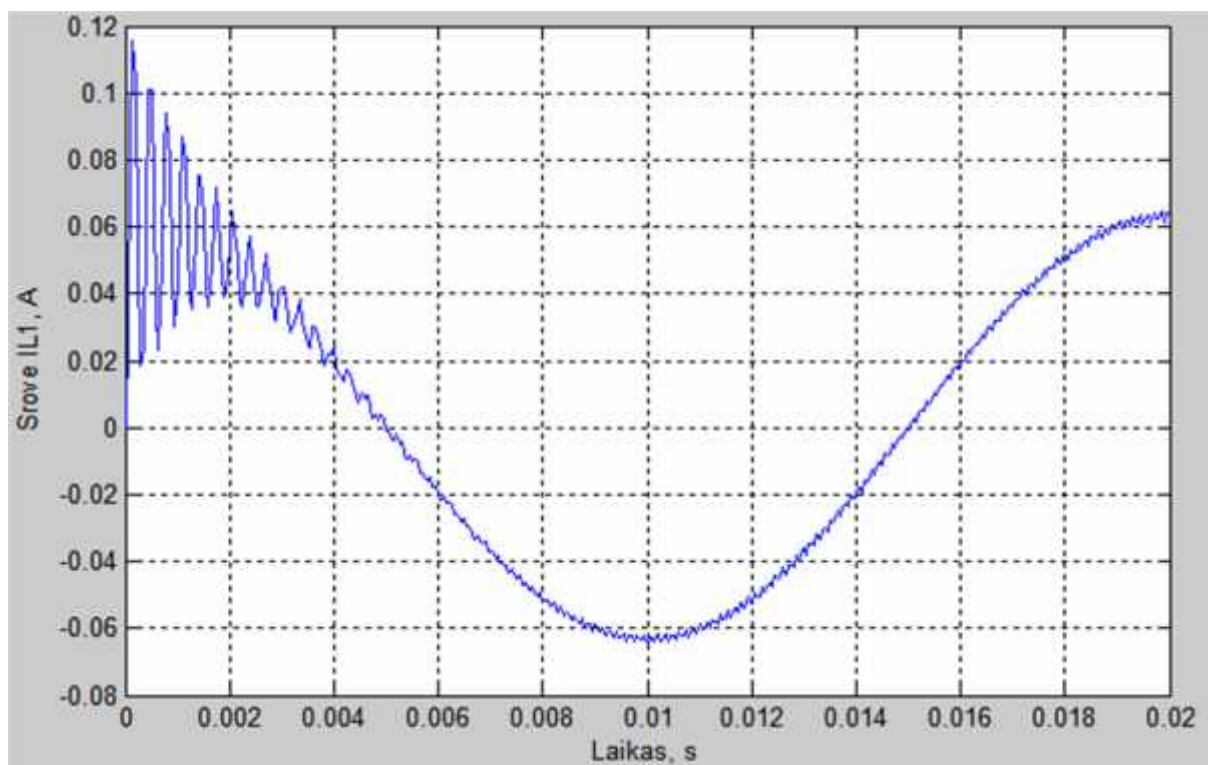
$$\frac{dU_2}{d} = \frac{i_{L2}}{C_4} - \frac{U_2}{R_u \cdot C_4} .$$

3.2.3 Būsenos lygčių metodas diferencinėmis lygtimis spęsti 2Π modeliui.

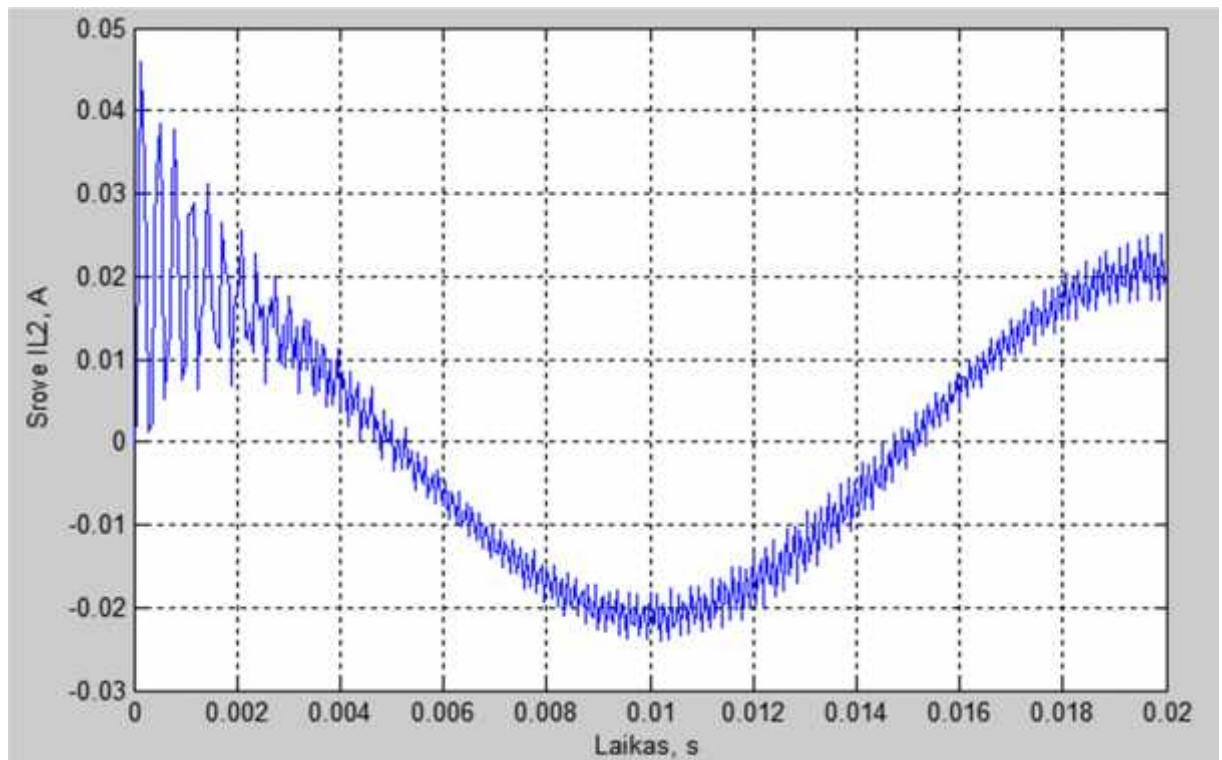
Pagal žinomus linijos parametrus pagal 8 formulę sudarome matricas:

$$\begin{bmatrix} \frac{dU_1}{dt} \\ \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dU_1}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dU_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_s \cdot C_1} & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_1} & -\frac{R_1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2 + C_3} & 0 & -\frac{1}{C_2 + C_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{R_2}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_4} & -\frac{1}{C_4 \cdot R_a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ I_{L1} \\ U_1 \\ I_{L2} \\ U_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s \cdot C_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot E_m s_i \quad (w)$$

Gautus pereinamojo proceso rezultatus pateikiame grafiniu pavidalu.



3.8 pav. Pereinamojo proceso srovė i_{L1} matavimas



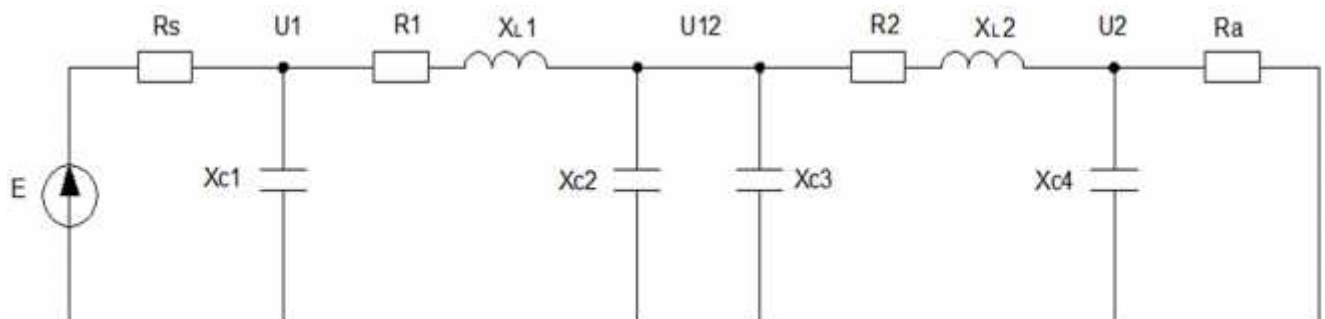
3.9 pav. Pereinamojo proceso srovė i_{L2} matavimas

3.2.4 Efektinių reikšmių skaičiavimas 2Π modeliui.

3.2 lentelė. 2Π modelio parametrai.

Talpa C, μF	Induktyvumas L, mF	Apkrovos varža R_a , Ω	Sistemos varža R_s , Ω	Linijos varža R, Ω	Sistemos įtampa E, V	Dažnis f, Hz
4	1,5	$1 \cdot 10^6$	1	0,5	67	50

Įvedame žymėjimus $R_1 = R_2 = R/2$.



3.10 pav. Ekvivalentinė schema

Suminės varžos skaičiavimas 2Π modeliui

Talpioji varža skaičiuojama pagal formulę:

$$X_{L1} = X_{L2} = X_{L3} = X_{L4} = \frac{1}{j \frac{1}{4}} = \frac{1}{j \cdot 314 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{4}} = j3183,1 \Omega;$$

Induktyvioji varža skaičiuojama pagal formulę:

$$X_{L1} = X_{L2} = j \frac{1}{2} = j \cdot 314 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} / 2 = j0,2356 \Omega;$$

Žinodami linijos parametrus toliau skaičiuojame varžą, jungiame lygiagrečiai R_u ir X_{C4} :

$$Z_{U2} = \frac{R_u \cdot (-X_{C4})}{R_u + (-X_{C4})} = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot (-j3183,1)}{1 \cdot 10^6 + (-j3183,1)} = 10,0132 - j3183,1 \Omega;$$

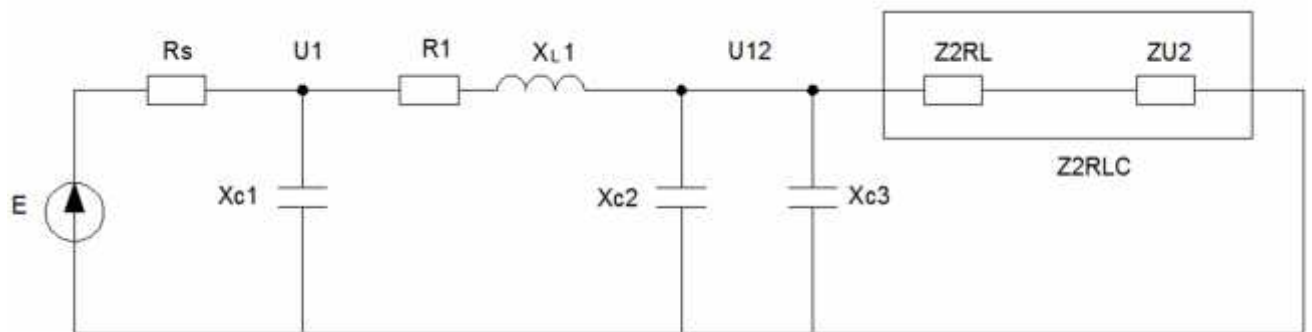
prastiname schemą toliau, nuosekliai jungiame R_2 ir X_{L2} :

$$Z_{2R} = R_2 + X_{L2} = 0,25 + j0,2356 \Omega;$$

nuosekliai jungiame Z_{2R} ir Z_{U2} :

$$Z_{2R} = Z_{U2} + Z_{2R} = (10,0132 - j3183,1) + (0,25 + j0,2356);$$

$$Z_{2R} = 10,382 - j3182,8 \Omega.$$



3.11 pav. Ekvivalentinė schema

Toliau prastiname schemą, lygiagrečiai jungiame X_{C2} ir X_{C3} :

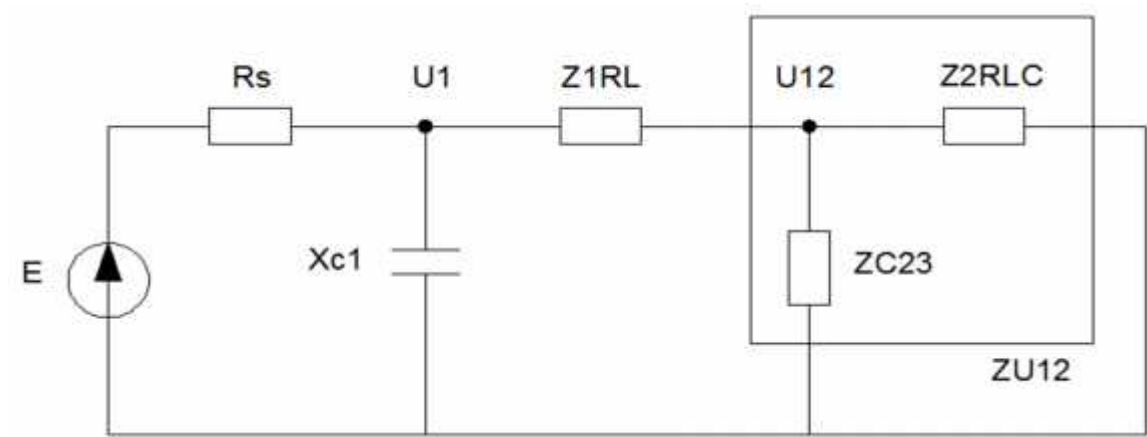
$$Z_{C2} = \frac{(-X_{C2}) \cdot (-X_{C3})}{(-X_{C2}) + (-X_{C3})} = \frac{(-j3183,1) \cdot (-j3183,1)}{(-j3183,1) + (-j3183,1)} = 0 + j0,0016 \Omega;$$

prastiname schemą toliau, lygiagrečiai jungiame Z_{C2} ir Z_{2R} :

$$Z_{U1} = \frac{Z_{2R} \cdot Z_{C2}}{Z_{2R} + Z_{C2}} = \frac{(10,382 - j3182,8) \cdot (j0,0016)}{(10,382 - j3182,8) + (j0,0016)} = 1,1537 - j1061 \Omega;$$

nuosekliai jungiame R_1 ir X_{L1} :

$$Z_{1R} = R_1 + X_{L1} = 0,25 + j0,2356 \Omega.$$



3.12 pav. Ekvivalentinė schema

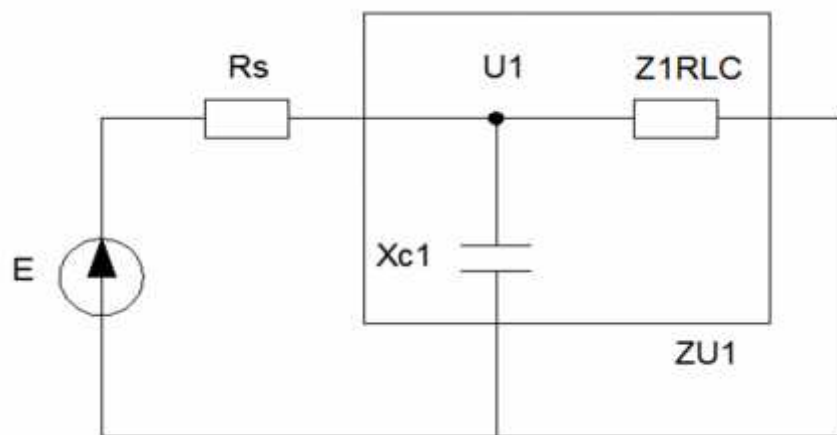
Toliau prastiname schemą, nuosekliai jungiame Z_{U1} ir Z_{1R} :

$$Z_{1R} = Z_{1R} + Z_{U1} = (0,25 + j0,2356) + (1,1537 - j1061) ;$$

$$Z_{1R} = 1,4037 - j1060,8 \Omega ;$$

lygiagrečiai jungiame Z_{1R} ir X_{C1} :

$$Z_{U1} = \frac{Z_{1R} \cdot (-X_{C1})}{Z_{1R} + (-X_{C1})} = \frac{(1,4037 - j1060,8) \cdot (-j3183,1)}{(1,4037 - j106,8) + (-j3183,1)} = 0,7897 - j795,63 \Omega .$$



3.13 pav. Ekvivalentinė schema

Suminę varžą gauname nuosekliai sujungdami Z_{U1} ir R_s :

$$Z_{\Sigma} = Z_{U1} + R_s = (0,7897 - j795,63) + 1 = 1,7897 - j795,63 \Omega .$$

Įtampų ir srovių skaičiavimas 2Π modeliui

Skaičiuojame srovę I_1 pagal formulę:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{\Sigma}} = \frac{67 + j0}{1,7897 - j795,63} = 0,0002 + j0,0842 \text{ A} ;$$

skaičiuojame įtampą U_1 pagal formulę:

$$U_1 = E - (I_1 \cdot R_u)$$

$$U_1 = (67 + j0) - ((0,0002 + j0,0842 \text{ A}) \cdot (1 \cdot 10^6 + j0)) = 66,9998 - j0,0842 \text{ V};$$

skaičiuojame srovę I_{C1} pagal formulę:

$$I_{C1} = \frac{U_1}{-X_{C1}} = \frac{66,9998 - j0,0842}{-j3183,1} = j0,0210 \text{ A};$$

skaičiuojame srovę I_L pagal formulę:

$$I_{L1} = I_1 - I_{C1} = (0,0002 + j0,0842) - j0,0210 = 0,0002 + j0,0623 \text{ A};$$

skaičiuojame įtampą U_1 pagal formulę:

$$U_1 = U_1 - (I_{L1} \cdot Z_{1R});$$

$$U_1 = (66,9998 - j0,0842) - ((0,0002 + j0,0623) \cdot (0,25 + j0,2356));$$

$$U_1 = 67,0147 - j0,1 \text{ V};$$

skaičiuojame sroves I_{C2} ir I_{C3} :

$$I_{C2} = \frac{U_1}{-X_{C2}} = \frac{67,0147 - j0,1}{-j3183,1} = j0,0211 \text{ A};$$

$$I_{C3} = \frac{U_1}{-X_{C3}} = \frac{67,0147 - j0,1}{-j3183,1} = j0,0211 \text{ A};$$

skaičiuojame srovę I_{L2} pagal formulę:

$$I_{L2} = I_{L1} - I_{C2} - I_{C3};$$

$$I_{L2} = (0,0002 + j0,0623) - j0,0211 - j0,0211 = 0,0001 + j0,0211 \text{ A};$$

skaičiuojame įtampą U_2 pagal formulę:

$$U_2 = U_1 - (I_{L2} \cdot Z_{2R});$$

$$U_2 = (67,0147 - j0,1) - ((0,0001 + j0,0211) \cdot (0,25 + j0,2356)) = 67,0196 + j0,1 \text{ V};$$

skaičiuojame srovę I_2 :

$$I_2 = \frac{U_2}{R_u} = \frac{67,0196 + j0,1}{1 \cdot 10^6 + j0} = 0,0000067 - j0,00000007 \text{ A};$$

Absoliutinės vertės

Absoliutinės vertės skaičiuojamos mazgams U_1 ir U_2 bei srovei I_{L1} ir I_{L2} :

$$U_1 = \sqrt{66,9998^2 + (-0,0842^2)} = 66,9999 \text{ V};$$

$$I_{L1} = \sqrt{0,0002^2 + 0,0632^2} = 0,0632 \text{ A};$$

$$I_{L2} = \sqrt{0,0001^2 + 0,0211^2} = 0,0211 \text{ A};$$

$$U_2 = \sqrt{67,0196^2 + (-0,1053^2)} = 67,0197 \text{ V};$$

3.3 Rezultatų palyginimas

3.3 lentelė. Skaičiavimo rezultatai II modelio

Skaičiuojamas dydis	Kompleksinis dydis	Absoliutinis dydis
U_1	66,9998 – j0,0842 V	66,9999 V
U_2	67,0196 – j0,1053 V	67,0197 V
I_L	0,0001 + j0,0421 A	0,0421 A

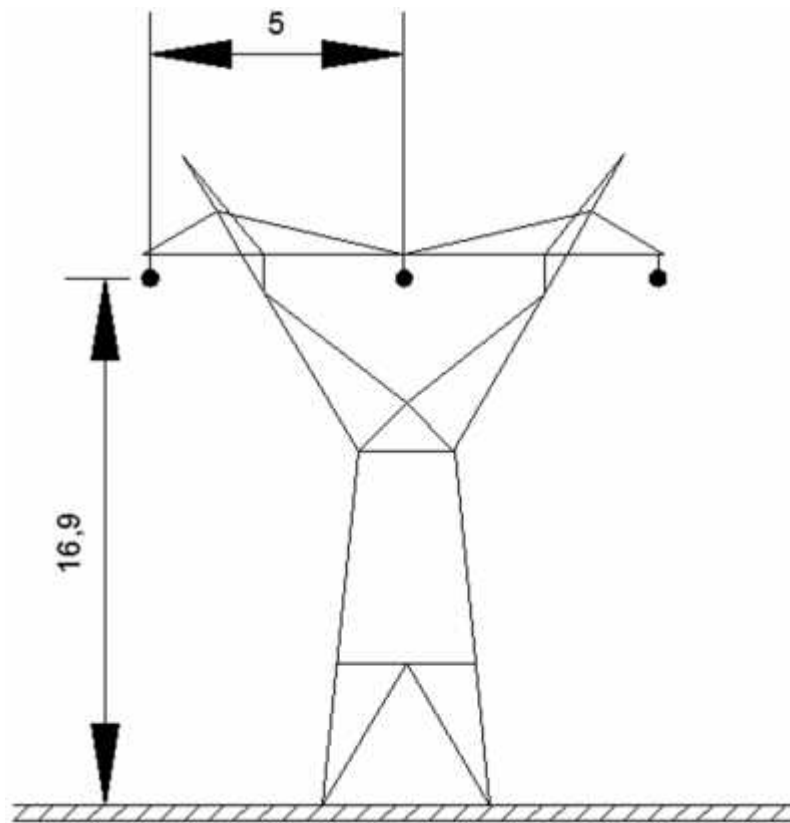
3.4 lentelė. Skaičiavimo rezultatai 2II modelio

Skaičiuojamas dydis	Kompleksinis dydis	Absoliutinis dydis
U_1	66,9998 – j0,0842 V	66,9999 V
U_2	67,0196 – j0,1053 V	67,0197 V
I_{L1}	0,0002 + j0,0632 A	0,0632 A
I_{L2}	0,0001 + j0,0211 A	0,0211 A

Rezultatai parodo, kad linijos įjungimo metu susidaręs pereinamasis procesas sukelia nežymius viršįtampius. Matome, kad 2II schemos atvaizdavimas yra tikslesnis. Srovės vertės tiksliau paskaičiuotos, todėl užkraunant linijos talpines varžas aiškiau pastebimas pereinamasis reiškiny. Galima teigti jog skaidant liniją į daugiau dalių rezultatai bus dar tikslesni.

4. ORO LINIJOS SKAIČIAVIMAI

Matematiniams skaičiavimams pasirenku 330 kV metalinę atramą PB-5,6 su aliuminiu AC-300/39 laidininku, kurio skersmuo d=24mm.



4.1 pav. 330 kV orinės elektros perdavimo linijos atrama

4.1 Geometrinių parametrų matricos skaičiavimas

Laidininkų aukštis (atstumas nuo žemės iki laidininko):

$$h_1 = h_2 = h_3 = 16,9 \text{ m.}$$

Laidininku tarpusavio vertikalūs atstumai:

$$h_1 = h_2 = 5 \text{ m,} \quad h_1 = 10 \text{ m.}$$

Naudosime atspindžio metodą, todėl pradžioje turime susidaryti geometrinių parametrų matricą N , kurią sudarys fazių ryšiai su žeme ir tarpusavio ryšiai, kurie priklausys nuo atstumų tarp laidų (d_{xy} , kur x ir y yra laidų numeriai) ir atstumų tarp laidų ir jų atspindžių (D_{xy} , kur x ir y yra laidų numeriai).

$$d_1 = 5 \text{ m;}$$

$$D_1 = \sqrt{h_1^2 + h_1^2} = \sqrt{16,9^2 + 5^2} = 17,624 \text{ m.} \quad (4.1)$$

Tokiu pačiu principu surandame visus atstumus tarp laidų. Reikia pastebėti, kad dalis atstumų bus vienodi.

Toliau seka ryšių su žeme ir tarpusavio ryšių įvertinimas atitinkamai 4.2 ir 4.3 formulėse:

$$N_1 = \ln\left(\frac{2R_1}{r_1}\right) = \ln\left(\frac{2 \cdot 1,9}{0,0}\right) = 7,943; \quad (4.2)$$

$$N_1 = \ln\frac{D_1}{d_1} = \ln\frac{1,6}{5} = 1,259; \quad (4.3)$$

Visus ryšius apskaičiuojame pagal parodytas formules ir sudarome geometrinių parametrų matricą N:

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & N_1 & N_1 \\ N_2 & N_2 & N_2 \\ N_3 & N_3 & N_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,9433 & 1,2598 & 0,6748 \\ 1,2598 & 7,9433 & 1,2598 \\ 0,6748 & 1,2598 & 7,9433 \end{bmatrix};$$

4.2 Linijos savųjų ir abipusių induktyvumų bei talpų skaičiavimas

Turėdami geometrinių parametrų matricą galime skaičiuoti linijos savuosius ir abipusius induktyvumus bei talpumus

Tarpusavio induktyvumus L skaičiuojame pagal formulę 4.3:

$$L = \frac{\mu}{2} \cdot N; \quad (4.3)$$

$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ - santykinė magnetinė skvarba [A/m].

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \begin{bmatrix} 7,9433 & 1,2598 & 0,6748 \\ 1,2598 & 7,9433 & 1,2598 \\ 0,6748 & 1,2598 & 7,9433 \end{bmatrix} \text{ H/m};$$

$$L = 1 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} 0,1589 & 0,0252 & 0,0135 \\ 0,0252 & 0,1589 & 0,0252 \\ 0,0135 & 0,0252 & 0,1589 \end{bmatrix} \text{ H/m}.$$

Tarpusavio talpius C skaičiuosime pagal formulę 4.4:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot N^{-1} \text{ F/m}; \quad (4.4)$$

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – elektrinė konstanta [F/m].

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \begin{bmatrix} 7,9433 & 1,2598 & 0,6748 \\ 1,2598 & 7,9433 & 1,2598 \\ 0,6748 & 1,2598 & 7,9433 \end{bmatrix}^{-1} \text{ F/m};$$

$$C = 1 \cdot 10^{-11} \begin{bmatrix} 0,7208 & -0,1073 & -0,0442 \\ -0,1073 & 0,7341 & -0,1073 \\ -0,0442 & -0,1073 & 0,7208 \end{bmatrix} \text{ F/m}.$$

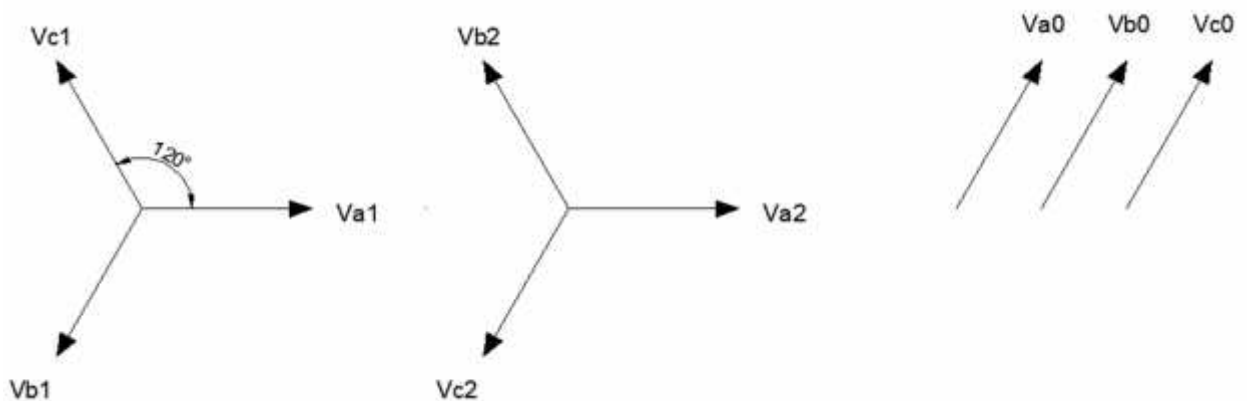
Laidininko AC-300/39 aktyvioji varža $r=0,098 \text{ } \Omega/\text{km}$. Kadangi visus kitus parametrus skaičiuojame metrais tai ir aktyviąją varžą perskaičiuosime į metrus.

$$R_f = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{bmatrix} = 1 \cdot 10^{-3} \begin{bmatrix} 0,098 & 0 & 0 \\ 0 & 0,098 & 0 \\ 0 & 0 & 0,098 \end{bmatrix} \Omega/m;$$

R_f - laidininko varža fazinėje koordinatų sistemoje.

4.3 Simetrinių dedamųjų metodas sekų varžoms skaičiuoti

Simetrinių dedamųjų metodas naudojamas transformuoti fazinius dydžius į simetrines dedamąsias. Faziniai dydžiai pakeičiami tiesioginės, atvirkštinės ir nulinės sekos dydžiais. Paveiksle 4.2 pavaizduoti vektorinės sekų koordinatės.



4.2 pav. Simetrinių dedamųjų vektoriai

Fazinės įtamos gali būti išreikšti sekų vektoriais:

$$V_A = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{A,0} \\ V_{B,0} \\ V_{C,0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{A,1} \\ V_{B,1} \\ V_{C,1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{A,2} \\ V_{B,2} \\ V_{C,2} \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Kampas tarp fazių:

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j120^\circ}$$

Taip pat žinant sekų vektorius galima išreikšti faziniais vektoriais su fazės kampo pasukimu:

$$V_0 = V_{A,0} = V_{B,0} = V_{C,0}$$

$$V_1 = V_{A,1} = \alpha V_{B,1} = \alpha^2 V_{C,1}$$

$$V_2 = V_{A,2} = \alpha^2 V_{B,2} = \alpha V_{C,2}$$

Žinant kampą tarp vektorių ir prieš tai išreikštas lygtis galima sudaryti vektorines matricas simetrinėms dedamosios rasti.

$$V_A = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_0 \\ V_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ \alpha^2 V_1 \\ \alpha V_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_2 \\ \alpha V_2 \\ \alpha^2 V_2 \end{bmatrix}; \quad (4.6)$$

$$V_A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = T \cdot V_0. \quad (4.7)$$

T – operacinė matrica.

Turint sekų dydžius galima surasti fazinius:

$$V_0 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot V_A = T^{-1} \cdot V_A. \quad (4.8)$$

Toliau skaičiuojame linijos savųjų ir abipusių induktyvumų bei talpų varžas sekose. Šioje dalyje naudosime tas pačias impedansų ir laidumų matricas, tik norėdami panaikinti tarpusavio ryšius apskaičiuosime tikrinių verčių matricas ir iš fazinių koordinačių pereisime į sekas. Šis perėjimas yra pavaizduotas 4.9 formulėje.

$$R_s = T \cdot R_f \cdot T^{-1}; \quad (4.9)$$

R_f – aktyvioji varža fazėse.

Tuo pačiu principu skaičiuojame induktyvumus ir talpas.

Aktyvioji varža sekose:

$$R_s = T \cdot R_f \cdot T^{-1} = 1 \cdot 10^{-3} \begin{bmatrix} 0,098 & 0 & 0 \\ 0 & 0,098 & 0 \\ 0 & 0 & 0,098 \end{bmatrix} \Omega/m;$$

Talpa sekose:

$$C_s = T \cdot C \cdot T^{-1};$$

$$C_s = 1 \cdot 10^{-1} \begin{bmatrix} 0,5527 + j0,0000 & 0,0083 + j0,0144 & 0,0083 - j0,0144 \\ 0,0083 - j0,0144 & 0,8115 - j0,0000 & -0,0232 - j0,0403 \\ 0,0083 + j0,0144 & -0,0232 + j0,0403 & 0,8115 - j0,0000 \end{bmatrix} F/m.$$

Induktyvumas sekose:

$$L_s = T \cdot L \cdot T^{-1};$$

$$L_s = 1 \cdot 10^{-5} \begin{bmatrix} 0,2015 + j0,0000 & -0,0020 - j0,0034 & -0,0020 + j0,0034 \\ -0,0020 + j0,0034 & 0,1376 - j0,0000 & 0,0039 + j0,0068 \\ -0,0020 - j0,0034 & 0,0039 - j0,0068 & 0,1376 - j0,0000 \end{bmatrix} H/m.$$

5. MODELIAVIMAS

Šiame skyriuje naudosime matematiniuose skaičiavimuose gautus rezultatus. Modeliavimo principas grįstas MATLAB Simulink programinio pakete esančiais blokais. Kiekvienas tiriamos sistemos elementas turi savo paskirtį ir atlieka savo funkciją.

Tiriamos sistemos pagrindiniai parametrai pateikiami lentelėje.

5.1 lentelė. Modelio parametrai

Sistemos (Generatoriaus) parametrai	
Linijinė tinklo įtampa, U_L	330 kV
Tinklo režimas	Ižeminta neutralė
Dažnis, f	50 Hz
Induktyvumas, L	0,01658 H
Varža, R	0,8929 Ω
Linijos parametrai	
Linijos ilgis, l	100 km
Tiesioginės sekos aktyvioji varža, R_1	0,098 Ω/km
Nulinės sekos aktyvioji varža, R_0	0,098 Ω/km
Tiesioginės sekos induktyvumas L_1	$1,376 \cdot 10^{-3}$ H/km
Nulinės sekos induktyvumas, L_0	$2,015 \cdot 10^{-3}$ H/km
Tiesioginės sekos talpa, C_1	$8,115 \cdot 10^{-9}$ F/km
Nulinės sekos talpa, C_0	$5,527 \cdot 10^{-9}$ F/km

5.1 Modeliuojami režimai

Modeliuosime dažniausiai pasitaikančius komutacinius viršįtampius elektros energetikos sistemoje. Juos galima išskirti į dvi grupes: paprastieji komutaciniai viršįtampiai ir komutaciniai viršįtampiai dėl išilginės nesimetrijos.

Paprastieji komutaciniai viršįtampiai, tai tokie viršįtampiai, kurie praktiškai neišvengiami ir pasitaiko visose elektros sistemose. Galima sakyti, kad tai natūrali elektros sistema būseną, kurią galima suvaldyti taikant efektyvias apsaugos priemones, mažinančias neigiamą poveikį elektros sistemos įrenginiams ir siekiant stabilumo. Mano modeliuojami režimai bus tokie:

- Linijos įjungimas be apkrovos;
- Apkrauto galios transformatoriaus išjungimas.
- Linijos išjungimas po trumpo jungimo;

Komutaciniai viršįtampiai, dėl išilginės nesimetrijos. Tai tokie viršįtampiai, kurie atsiranda dėl jungtuvų polių komutavimo skirtingu laiku. Atidarant ar uždariant jungtuvus tarp jų komutavimo laikų gali atsirasti laiko skirtumas, kuris iššaukia išilginę nesimetriją. Dalis perduodamos galios tenka kitoms fazėms ir to pasekoje atsiranda nesimetrija tinkle. Bus modeliuoji tokie režimai:

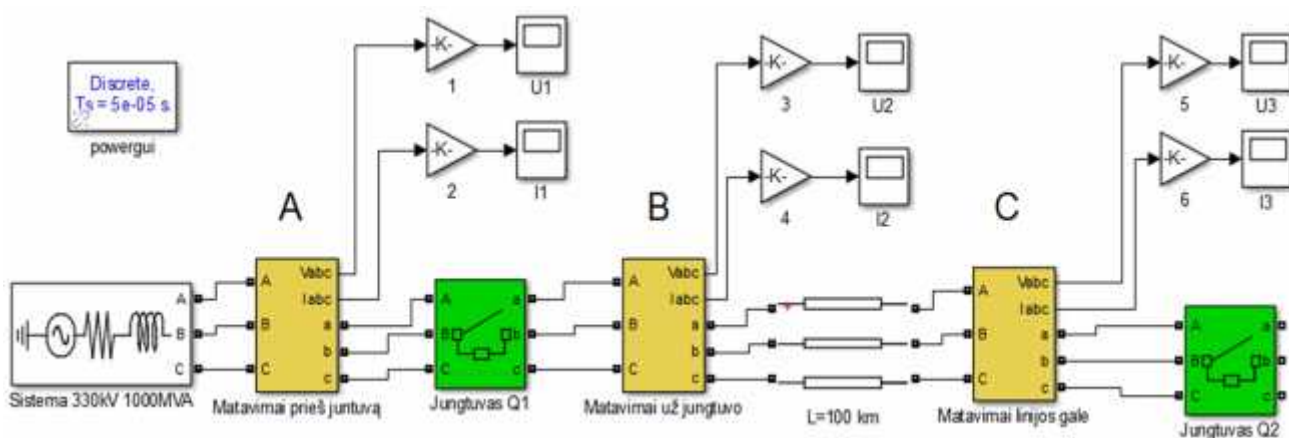
- Įjungiamas jungtuvas į apkrovą;
- Išjungiamas jungtuvas po apkrova.

5.1.1 Linijos įjungimas be apkrovos

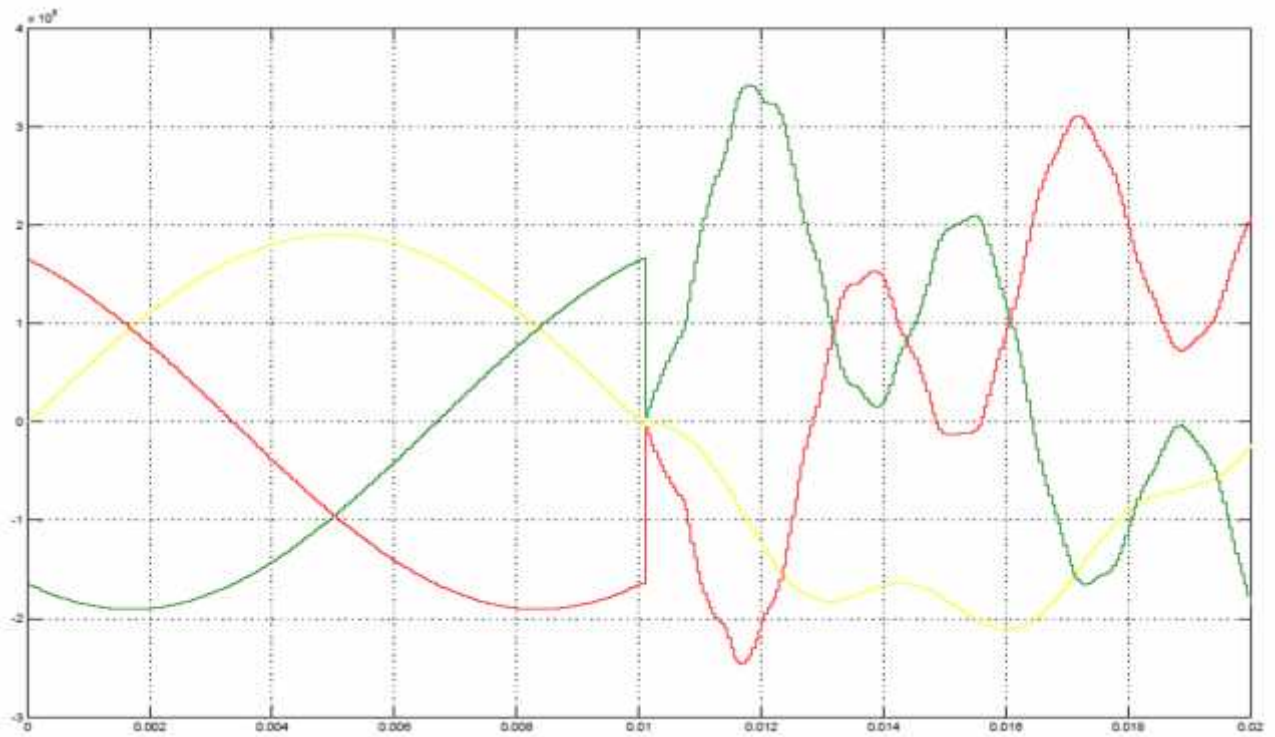
Modeliuojame elektros linijos įjungimą be apkrovos. Naudojame MATLAB Simulink bibliotekoje esančiais blokais. Komutuojuame linijos pradžioje esančiais jungtuvais Q1 (A, B ir C fazės). Jungtuvai uždaromi praėjus 10 ms po modeliavimo pradžios. Modeliavimo trukmė 1 periodas 50 Hz sistemoje.

5.2 lentelė.

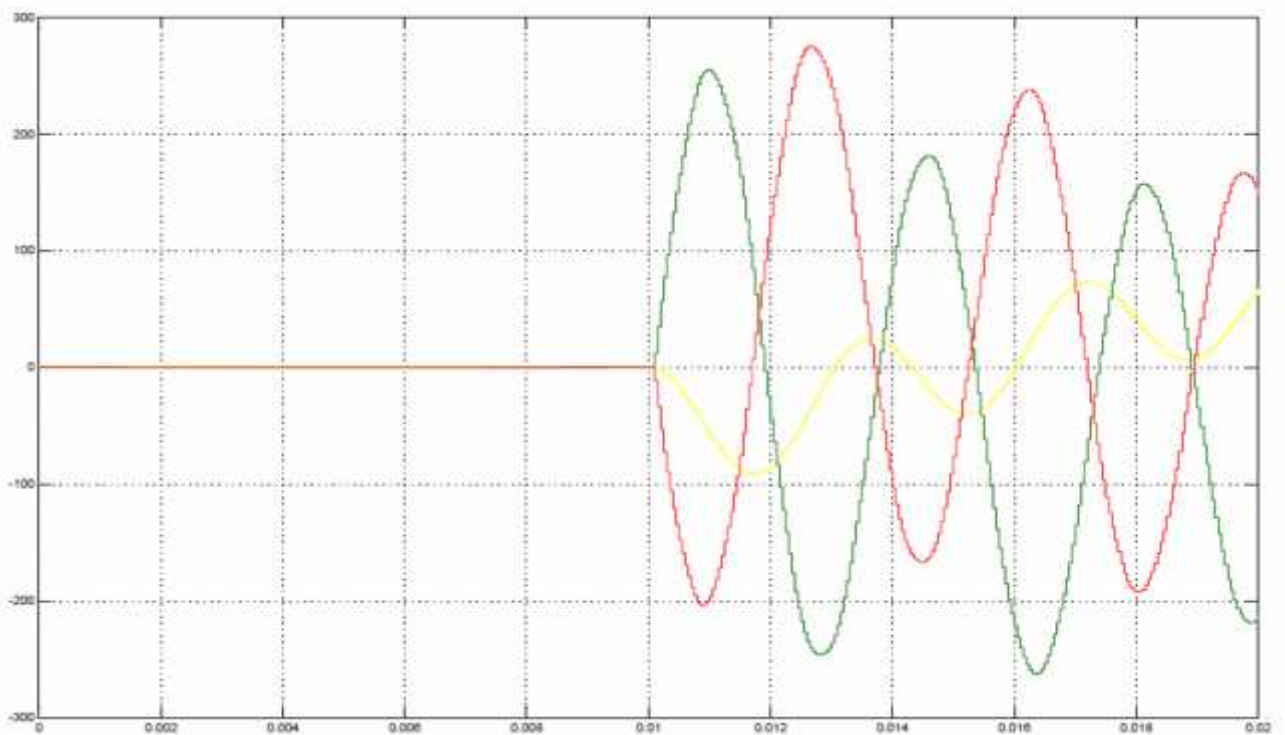
Modeliavimo žingsnis, μs	Modeliavimo trukmė, ms	Komutuojami jungtuvai	Komutavimo laikas, ms
50	20	Q1	10



5.1 pav. Modeliuojama schema, kai įjungiama orinė elektros perdavimo linija be apkrovos jungtuvu Q1



5.2 pav. Įtampos matavimas taške A, kai jungtuvai Q1 komutuojami linijos pradžioje.

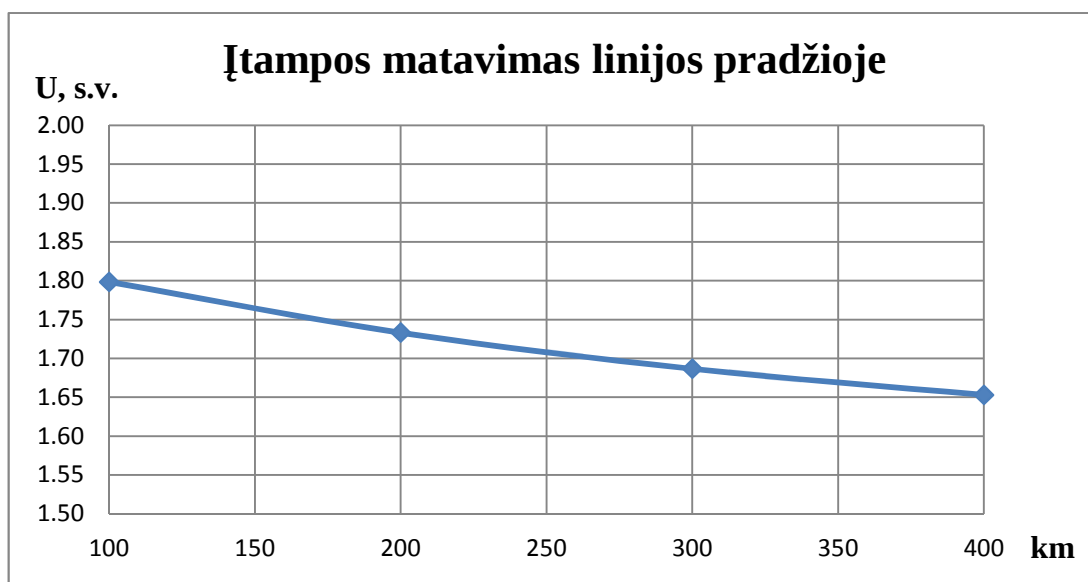


5.3 pav. Srovės matavimas taške A, kai jungtuvai Q1 komutuojami linijos pradžioje.

Atlikus matavimus matome, kad prijungus ilgą liniją be apkrovos matomos ryškus įtampos dėl linijoje atsiradusių atspindžių. Srovė linijos pradžioje taip pat sukiyla, nes įjungiant jungtuvą užkraunamos linijoje esančios talpinės varžos. Įtampių ir srovių matavimo rezultatai pateikiami lentelėse.

5.3 lentelė. Įtampos matavimai linijos pradžioje

Linijos ilgis, km	Viršįtampis, s.v.	Nusistovėjusi įtampa s.v
100	1,798	1,029
200	1,733	1,060
300	1,692	1,098
400	1,653	1,134

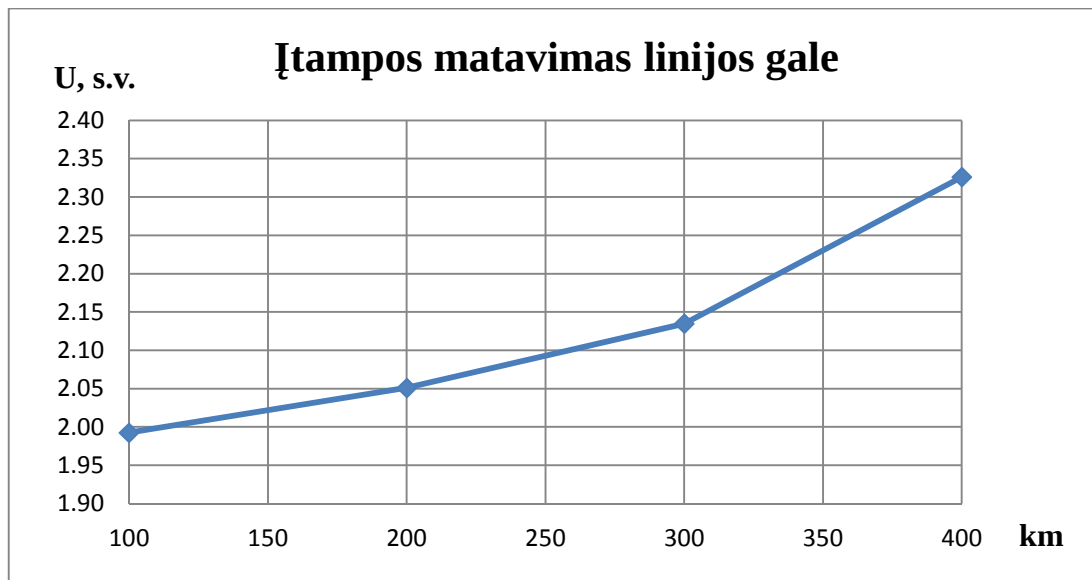


5.4 pav. Viršįtampio dydžio priklausomybė nuo linijos ilgio

Įtampos matavimo rezultatai linijos gale pateikiami lentelėje nr. 5.3.

5.4 lentelė. Įtampos matavimai linijos gale

Linijos ilgis, km	Viršįtampis, s.v.	Nusistovėjusi įtampa s.v
100	1,798	1,029
200	1,733	1,060
300	1,692	1,098
400	1,653	1,134

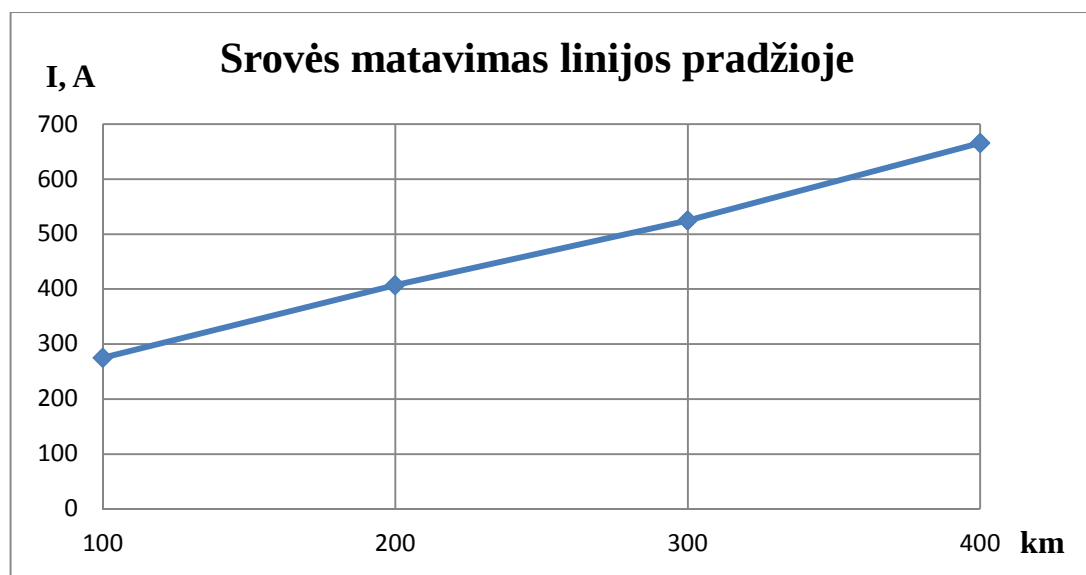


5.5 pav. Viršįtampio dydžio priklausomybė nuo linijos ilgio

Srovės matavimo rezultatai linijos pradžioje po linijos įjungimo.

5.5 lentelė. Srovės matavimai linijos pradžioje.

Linijos ilgis, km	Maksimali srovė	Talpuminė srovė
100	275,02	50,15
200	406,90	104,47
300	524,53	164,92
400	665,64	233,98



5.6 pav. Maksimali srovės kitimas nuo linijos ilgio

5.1.2 Apkrauto galios transformatoriaus išjungimas

Modeliuojame elektros linijos išjungimą kai gale linijos apkrautas galios transformatorius. Transformatoriaus varžių parametrai paliekami pagal nutylėjimą. Parenkama antrinės grandinės įtampa 110 kV, dažnis 50 Hz, jungimo grupė Yg – Yg, galia 300 MVA.

Modeliavimu atjungiat apkrautą transformatorių siekiama parodyti kokie atsiranda viršįtampiai sistemai netekus apkrovos srovės. Atliekami 4 matavimai prie skirtingų apkrovų verčių. Modeliavimo trukmė 40 ms. Jungtuvai Q2 bus atidaromi 10 ms nuo modeliavimo pradžios, modeliavimo žingsnis 50 μ s.

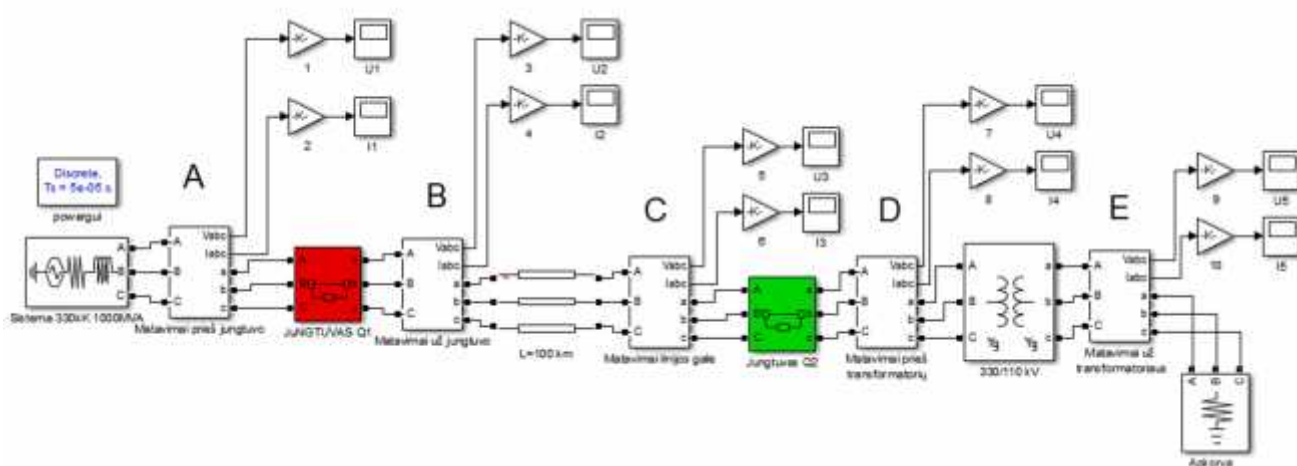
5.6 lentelė. Modeliavimo duomenys

Modeliavimo žingsnis, μ s	Modeliavimo trukmė, ms	Komutuojami jungtuvai	Komutavimo laikas, ms
50	40	Q2	10

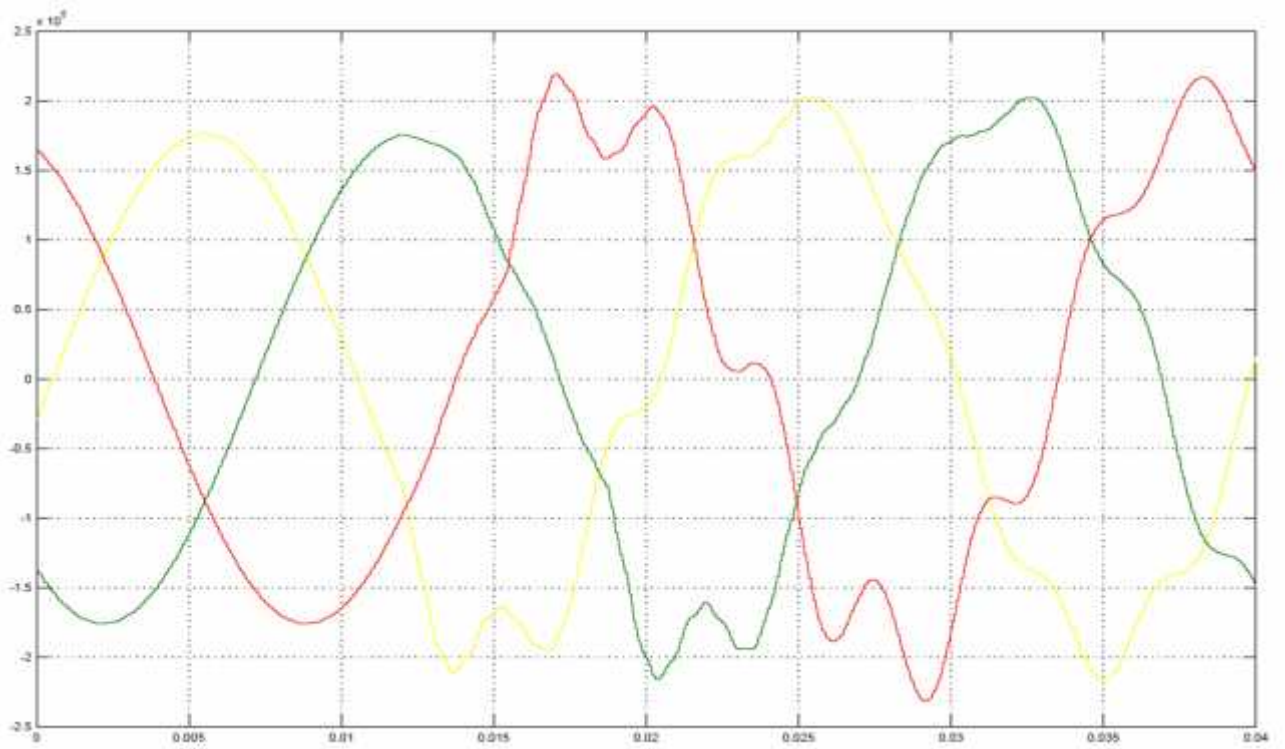
Pirmoji apkrova bus tik aktyvinė pobūdžio. Apkrovos duomenys pateikiami lentelėje.

5.7 lentelė. Apkrovos duomenys

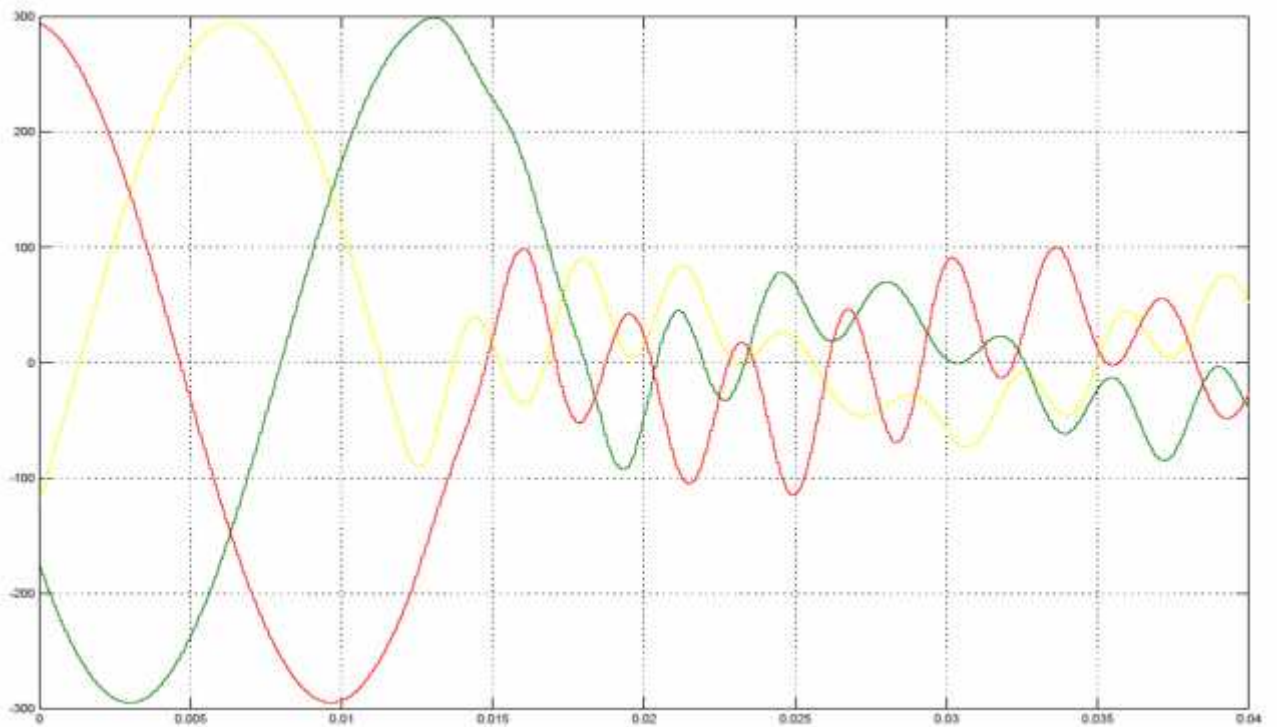
P , MW	Q_L , Mvar	S, MVA
49	10	50
98	20	100
147	30	150
196	40	200



5.7 pav. Modeliuojama schema kai atjungiamas apkrautas galios transformatorius linijos gale Q2 jungtuvu



5.8 pav. Įtampos matavimas linijos pradžioje taške A, kai linijos gale jungtuvas Q2 atjungiamas galios transformatorius su 200 MVA apkrova

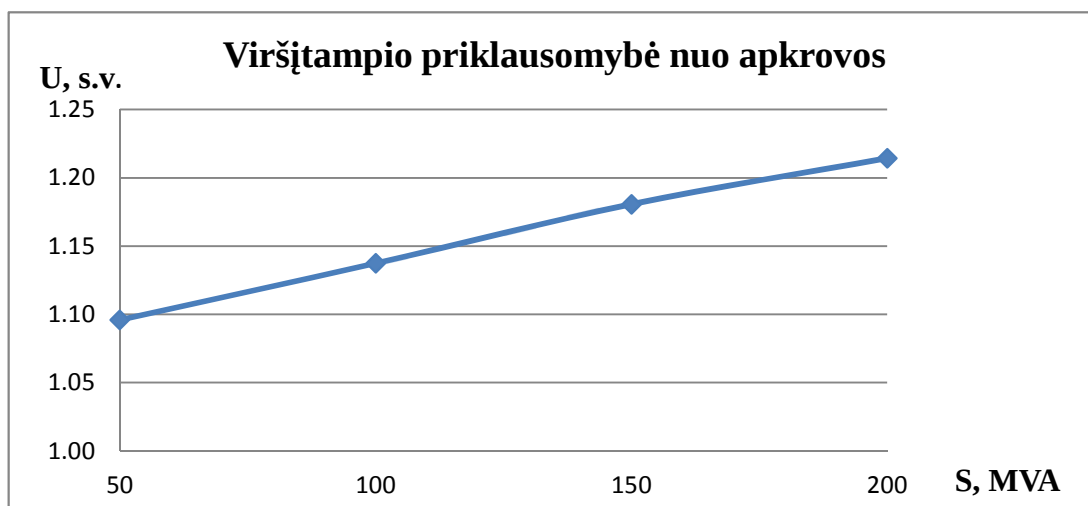


5.9 pav. Srovės matavimas linijos pradžioje taške A, kai linijos gale jungtuvas Q2 atjungiamas galios transformatorius su 200 MVA apkrova

Įtampos ir srovės matavimo linijos pradžioje, taške A, atjungus apkrautą galios transformatorių pateikiami lentelėje 5.7.

5.8 lentelė. Įtamos ir srovės matavimai linijos pradžioje

Apkrova, MVA	Apkrovos srovė, A	Maksimali įtampa po komutacijos, S.V.
50	91,28	1,096
100	164,84	1,137
150	232,90	1,181
200	294,56	1,214



5.10 pav. Viršįtampio kitimas nuo apkrovos srovės

Įtamos ir srovės matavimo linijos gale, taške C, atjungus apkrautą galios transformatorių pateikiami lentelėje nr. 5.8.

5.9 lentelė. Įtamos ir srovės matavimai linijos gale

Apkrova, MVA	Apkrovos srovė, A	Maksimali įtampa, s.v.
50	90,02	1,104
100	170,88	1,190
150	243,20	1,224
200	307,03	1,268

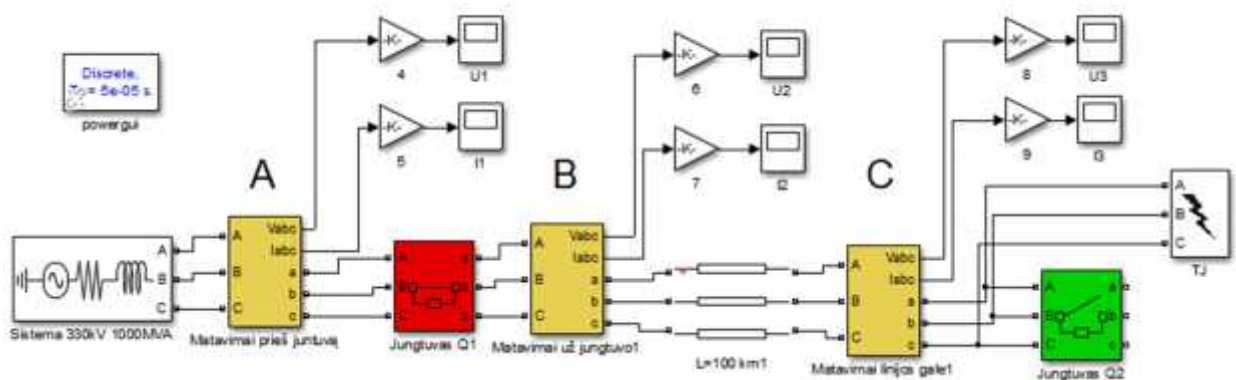
Iš matavimo rezultatų matome, kad viršįtampio dydis tiesiogiai priklauso nuo apkrovos, o jei tiksliau nuo apkrovos srovės. Kuo didesne srove buvo apkrautas galios transformatorius, tuo didesnis viršįtampis susidarė komutacijos metu.

5.1.3 Linijos išjungimas po trumpo jungimo

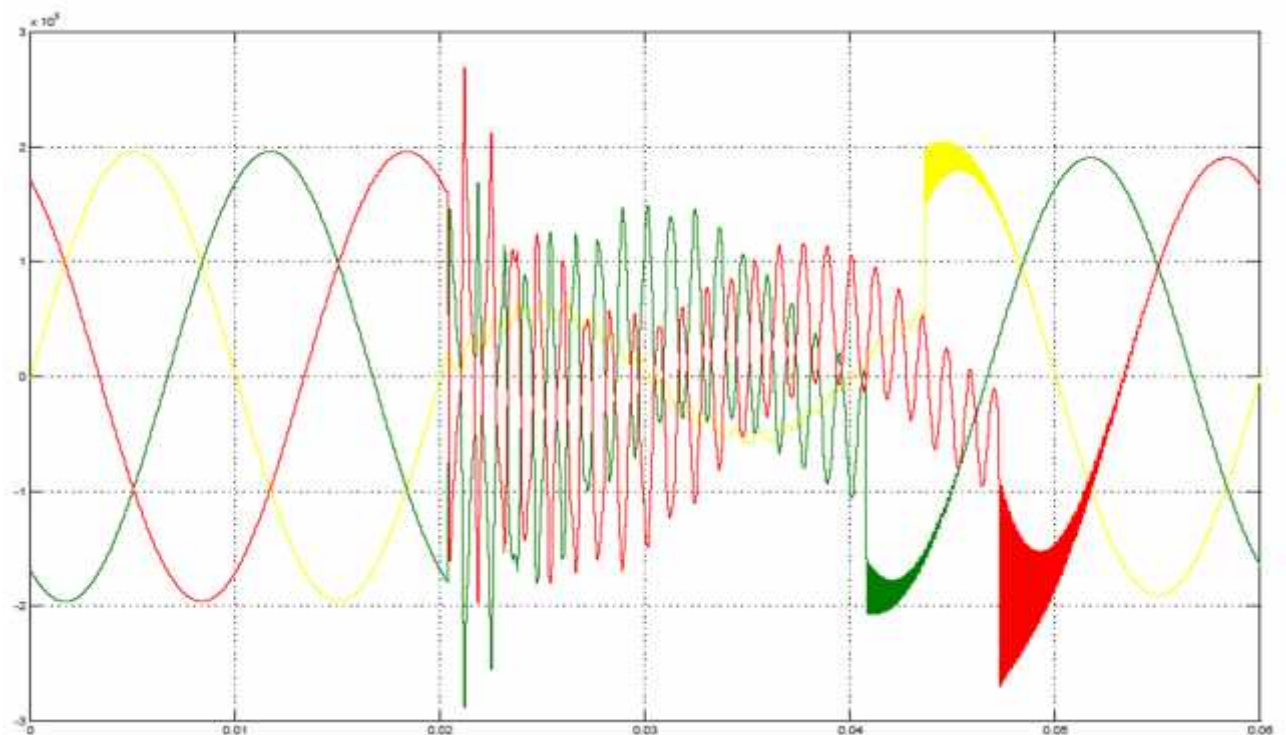
Modeliuojamas trifazis trumpas jungimas linijos gale kai nėra apkrovos. Modeliavimas atliekamas tokia seka: linijos gale 20 ms imituojamas trifazis trumpas jungimas, 40 ms linijos pradžioje esančiu jungtuvu Q1 išjungiama linija. Modeliavimo trukmė 60 ms, modeliavimo žingsnis 50 μ s.

5.10 lentelė. Modeliavimo duomenys

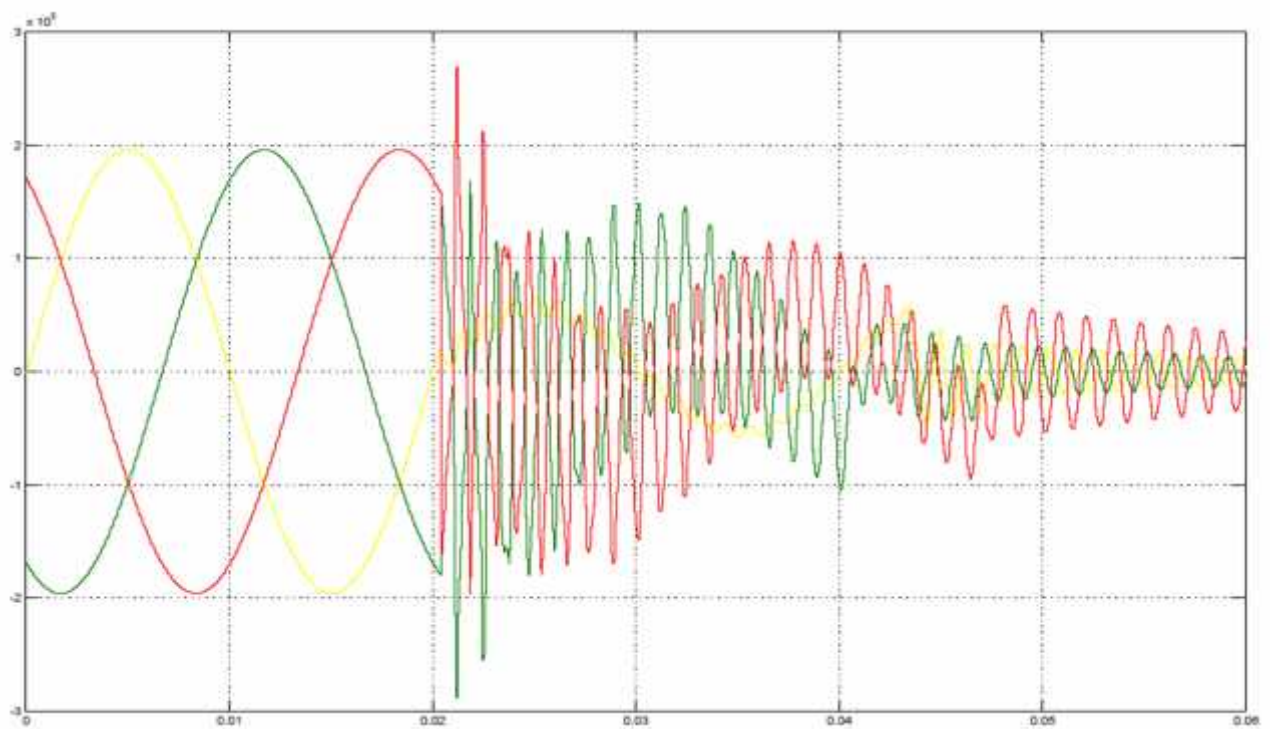
Modeliavimo žingsnis, μ s	Modeliavimo trukmė, ms	Trumpo jungimo laikas, ms	Komutuojami jungtuvai	Komutavimo laikas, ms
50	60	20	Q1	40



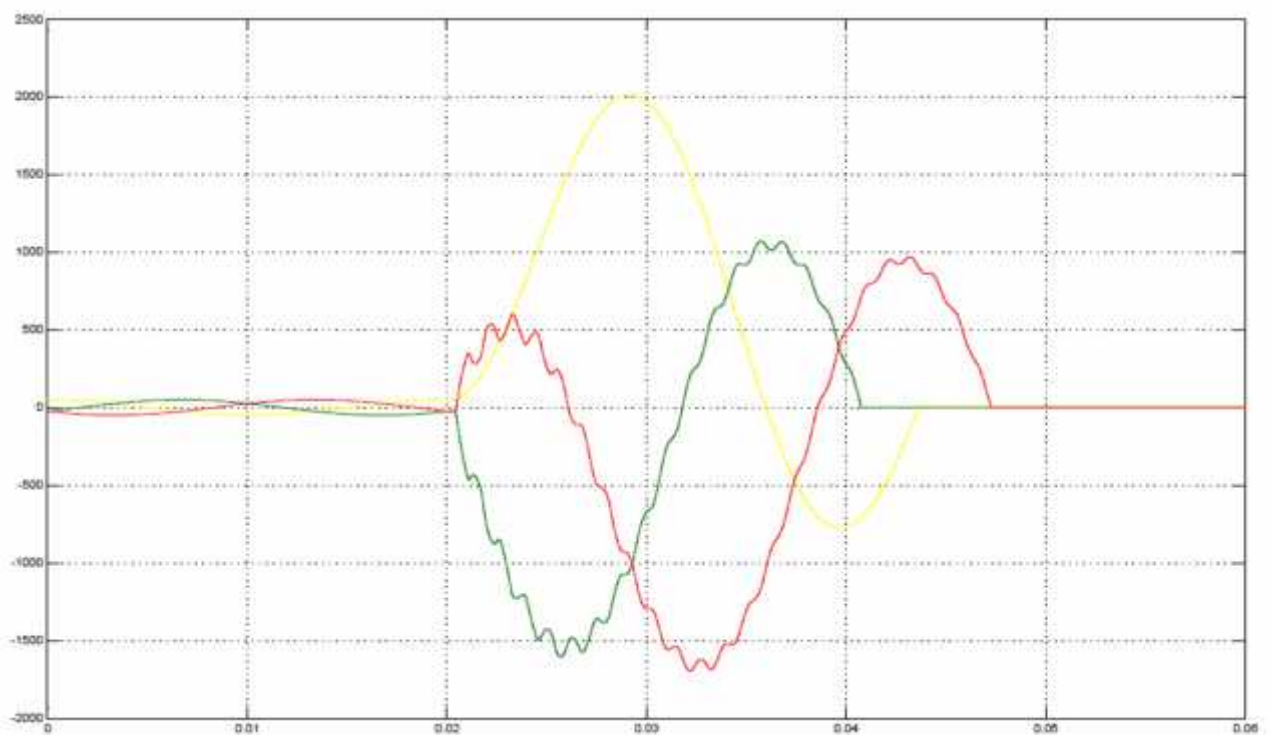
5.11 pav. Modeliuojama schema kai trumpas jungimas linijos gale



5.12 pav. Įtampos matavimas linijos pradžioje taške A, kai trumpas jungimas linijos gale.



5.13 pav. Įtampos matavimas linijos pradžioje taške B, kai trumpas jungimas linijos gale.



5.14 pav. Srovės matavimas linijos pradžioje taške A, kai trumpas jungimas linijos gale.

Lentelėje nr. 4.15 pateikiame ir kitų tipų trumpųjų jungimo srovių ir viršįtampių vertes.

5.11 lentelė. Trumpųjų jungimų viršįtampių ir srovių matavimai

Trumpo jungimo tipas	Srovė, kA	Įtampa, s.v.
K^3	3,45	1,52
K^2	3,41	1,14
K^1	3,31	1,51
$K^{1.1}$	2,86	1,12

K^3 – trifazis trumpas jungimas;

K^2 – dvifazis trumpas jungimas;

$K^{1.1}$ – dvifazis trumpas jungimas su žeme;

K^1 – vienfazis trumpas jungimas.

5.2 Komutaciniai viršįtampiai dėl išilginės nesimetrijos

Modeliuojame elektros linijos įjungimą ir išjungimą kai sistema turi apkrovą. Parinkdami skirtingus komutavimo laikus atskiroms fazės imituosime nesimetrinę elektros sistemos darbo režimą. Komutuojuame linijos pradžioje esančiais jungtuvais. Naudojame MATLAB Simulink bibliotekoje esančiais blokais.

5.2.1 Jungtuvo įjungimas į apkrovą

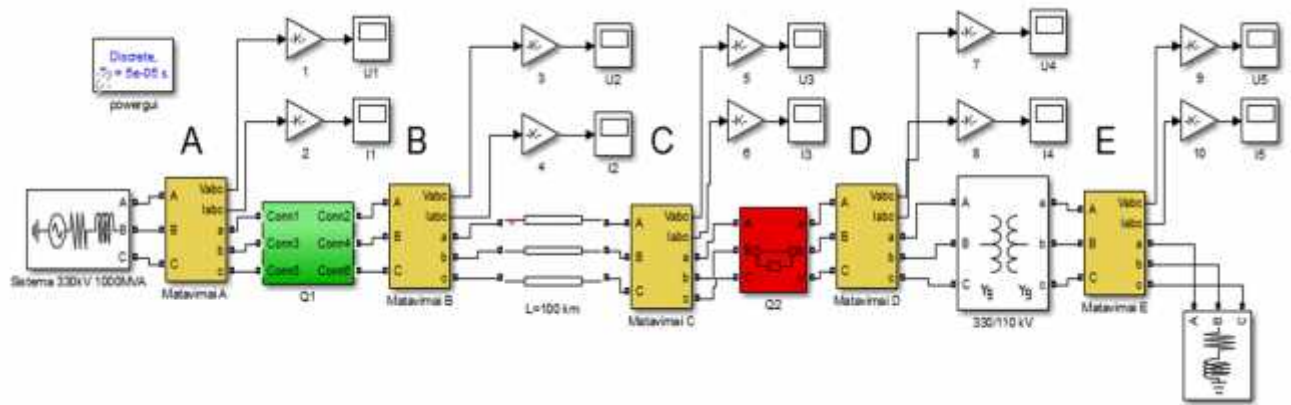
Modeliuojame jungtuvų įjungimą į apkrovą, kai jų suveikimo laikai nevienodi. Komutuojuame linijos pradžioje esančiais jungtuvais Q1. A ir B fazės jungtuvo poliai uždaromi 40 ms, C fazės – 50 ms. Modeliavimo laikas 80 ms, žingsnis – 50 μ s. Apkrovos parametrus pasirenkame laisvai.

5.12 lentelė. Apkrovos duomenys

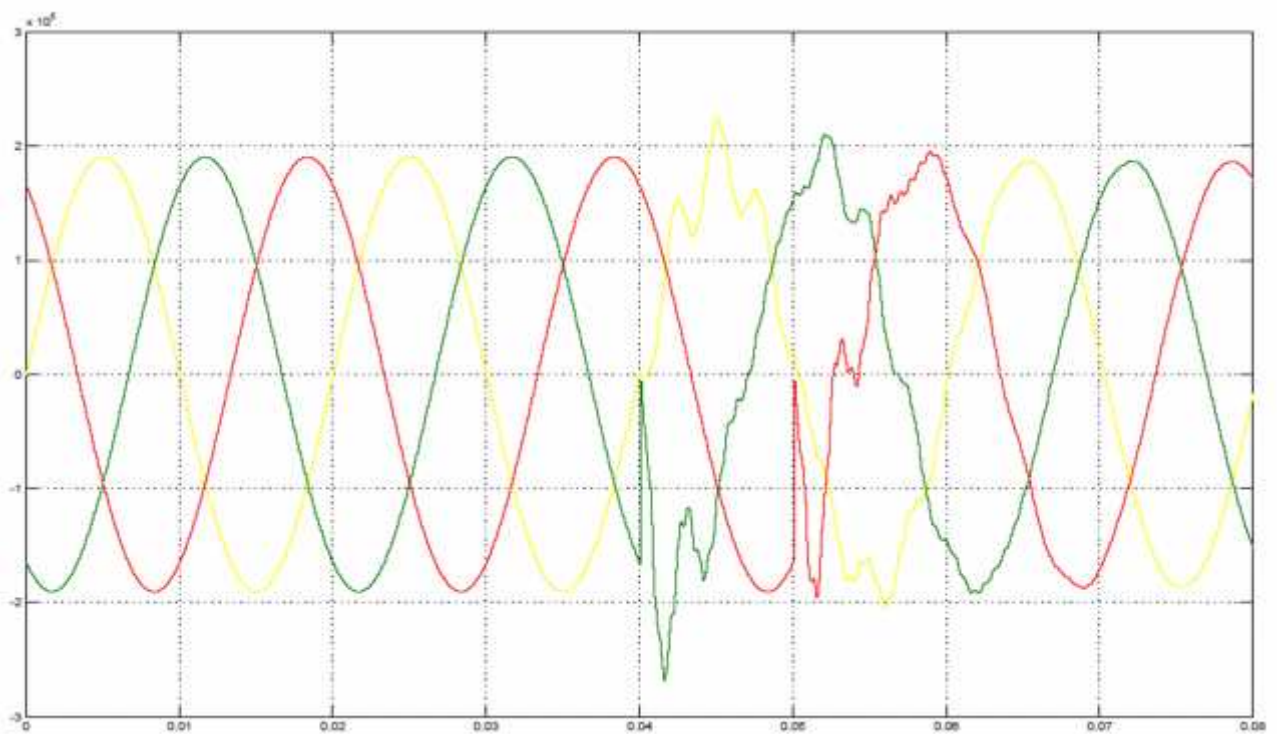
P , MW	Q_L , Mvar	Q_C , Mvar
100	20	0

5.13 lentelė. Modeliavimo duomenys

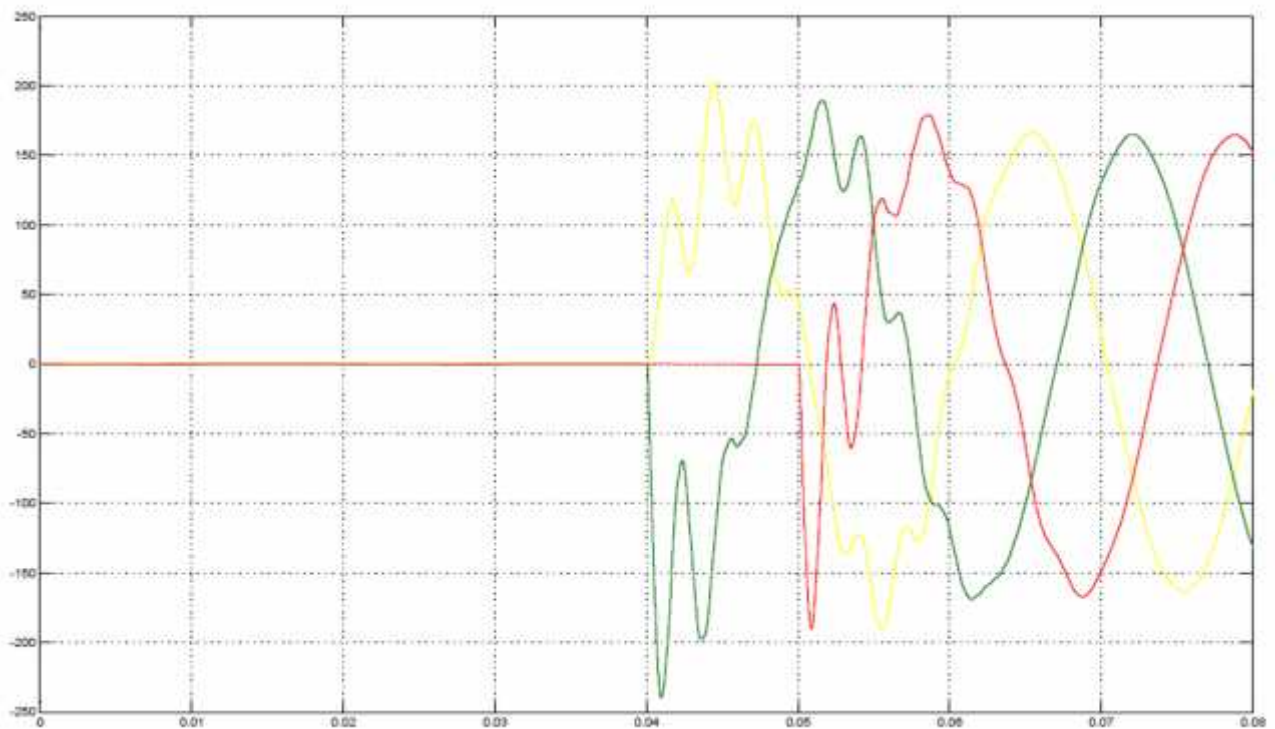
Modeliavimo žingsnis, μ s	Modeliavimo trukmė, ms	Komutuojami jungtuvas	Komutavimo laikas, ms
50	80	Q1	A, B – 40 ms C – 50 ms



5.15 pav. Modeliuojama schema kai jungtuvo Q1 poliai įjungiami su laiko skirtumais



5.16 pav. Įtampų matavimas linijos pradžioje taške A, kai jungtuvo poliai įjungiami su laiko skirtumais



5.17 pav. Srovės matavimas linijos pradžioje taške A, kai jungtuvo poliai įjungiami su laiko skirtumais

Kaip matome iš pavaizduotų srovės ir įtampos oscilogramų, jungtuvo polių laiko skirtumas įjungimo metu turi įtakos gautiems rezultatams. Tiek srovės tiek įtampos vertės pradiniu laiko momentu po komutacijos ženkliai padidėja lyginant su vardiniais parametrais.

Matavimo rezultatai po jungtuvo Q1 įjungimo pateikiami lentelėje nr. 5.14.

5.14 lentelė. Įtampių ir srovių matavimai linijos pradžioje.

Matavimo vieta	Srovė, A	Įtampa, s.v.
A	239,59	1,405
B	239,60	1,405
C	186,24	1,367
D	186,24	1,367
E	552,93	1,239

5.2.2 Jungtuvo išjungimas po apkrova

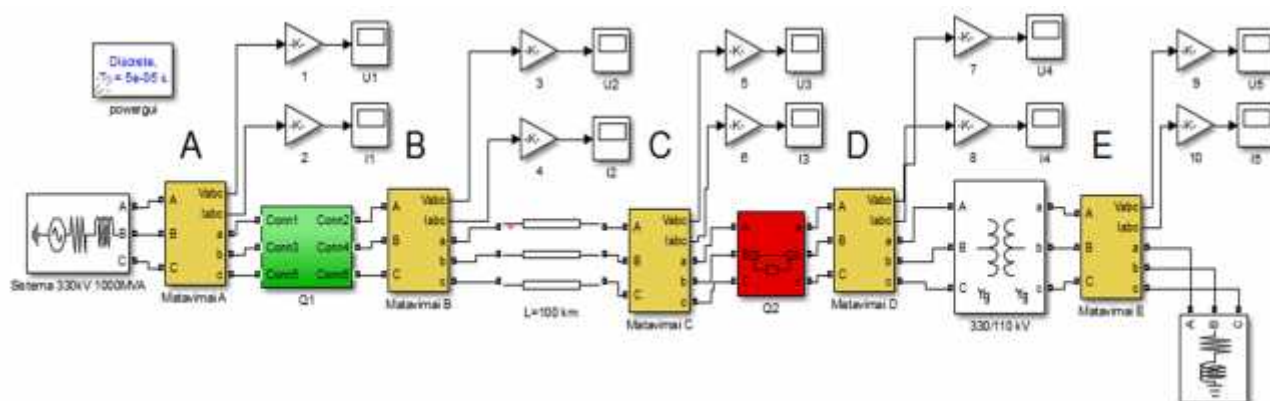
Modeliuojame jungtuvų išjungimą po apkrova, kai jų suveikimo laikai nevienodi. Komutuojuame linijos gale esančiu jungtuvu Q2. A ir B fazės jungtuvo poliai atidaromi 30 ms, C fazės – 40 ms. Modeliavimo laikas 60 ms, žingsnis – 50 μ s. Apkrovos parametrus pasirenkame laisvai.

5.15 lentelė. Apkrovos parametrai

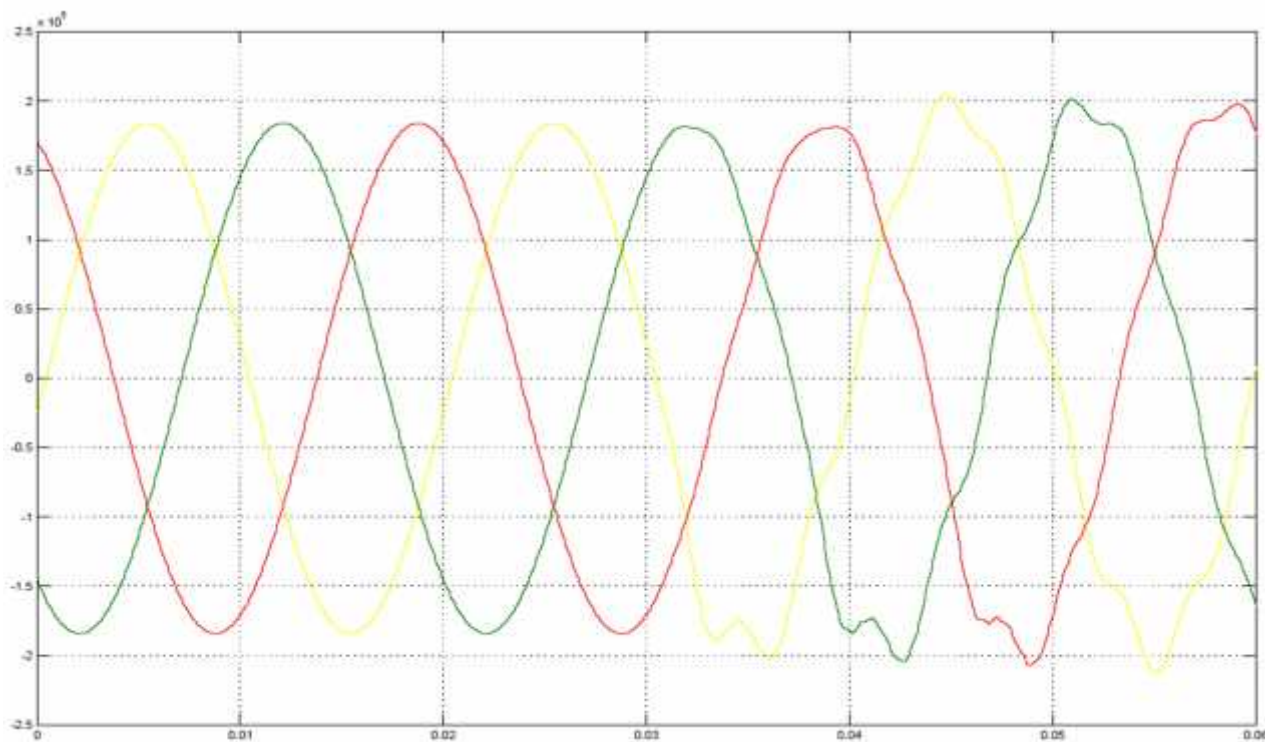
P , MW	Q_L , Mvar	Q_C , Mvar
100	20	0

5.16 lentelė. Modeliavimo duomenys

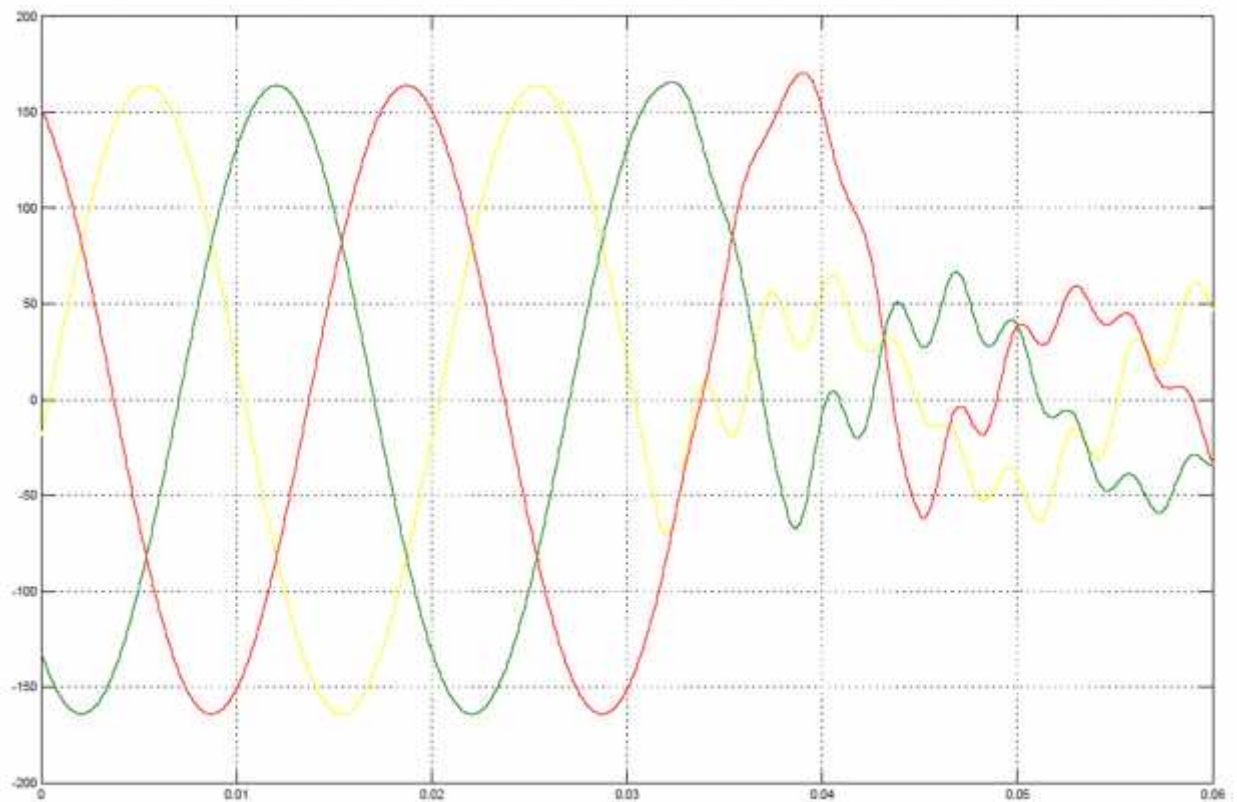
Modeliavimo žingsnis, μ s	Modeliavimo trukmė, ms	Komutuojami jungtuvai	Komutavimo laikas, ms
50	60	Q2	A, B – 30 ms C – 40 ms



5.18 pav. Modeliuoja schema kai jungtuvo poliai atsijungia nevienodu laiku.



5.19 pav. Įtampos matavimas linijos pradžioje taške B, kai jungtuvo poliai įjungiami su laiko skirtumais



5.20 pav. Srovės matavimas linijos pradžioje taške B, kai jungtuvo poliai įjungiami su laiko skirtumais

Kaip matome iš gautų rezultatų matavimo taške B įtampos svyravimai po komutacijos nedideli, įtampa greit nusistovi.

5.17 lentelė. Įtampų ir srovių matavimo rezultatai prieš jungtuvo išjungimą.

Matavimo vieta	Apkrovos srovė, A	Įtampa, s.v.
A	164,07	186,77
C	170,87	184,16
D	170,88	184,15

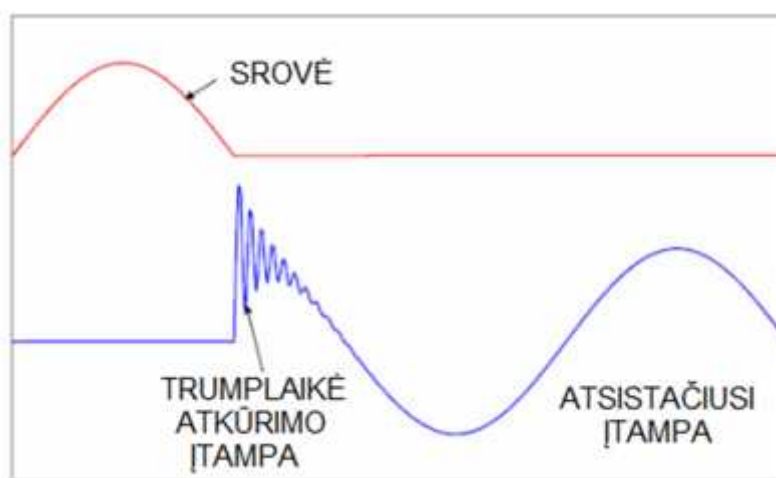
5.18 lentelė. Įtampų ir srovių matavimo rezultatai po jungtuvo išjungimo.

Matavimo vieta	Srovė, A	Įtampa, s.v.
A	66,99	1,091
C	0	1,114
D	0	0,288

5.3 Laikinoji atkūrimo įtampa

Pereinamieji procesai atsiranda kai vyksta pasikeitimai nusistovėjusios būklės grandinėje. Tokie pat procesai vyksta ir jungtuve, toks reiškiny vadinamas pereinamoji atkūrimo įtampa. Trumpalaikis įtampos atsistatymas priklauso nuo tiriamos grandinės būsenos ir grandinės parametrų [6].

Nustatyta, kad laikinoji atkūrimo įtampa besikeičiančios grandinės būsenos rezultatas. Taigi pereinamoji atkūrimo įtampa gali būti charakterizuojama kaip įtampos atsiradimas skersai jungtuvo po jo komutacijos. Kaip ir visiems pereinamiems procesams, laikiniai atkūrimo įtampai būdinga aukšta amplitudė ir dažnis. Paveiksle žemiau pateikiame laikinosios atkūrimo įtampos pavyzdį.



5.21 pav. Laikinoji atkūrimo įtampa [5]

Laikino atkūrimo įtampa galima apibūdinti kaip skirtuminę, taškas po taško, atsirandančią įtampa tarp jungtuvo įeinančios ir išeinančios pusių. Išjungiant jungtuvą momentinė srovės reikšmė priartėja prie nulio ir elektros lankas greitai netenka savitojo laidumo. Per keletą milisekundžių kai srovė pasiekia nulį srovė nustoja tekėti elektros grandine. Elektros sistema reaguodama į srovės nutraukimą generuoja (išsaulkia) laikinąją atkūrimo įtampą. Skirtumas tarp galios sistemos reagavimo įtampos jungtuve tarp šaltinio pusės ir apkrovos vadinamas laikinoji atkūrimo įtampa. Jungtuvo nutraukimas laikomas sėkmingu tada, kai jungtuvas pajėgus atlaikyti laikinąją atkūrimo įtampą ir galios dažnio atsistatymo įtampą.[6]

Įvairūs sistemos parametrai gali paveikti laikinąją atkūrimo įtampą. Pateikiame keletą jų žemiau:

- Sistemos induktyvumas ir talpumas;
- Jungtuvo, įtampos transformatoriaus ir kitų įrenginių įvorės talpa;
- Trumpo jungimo srovė;

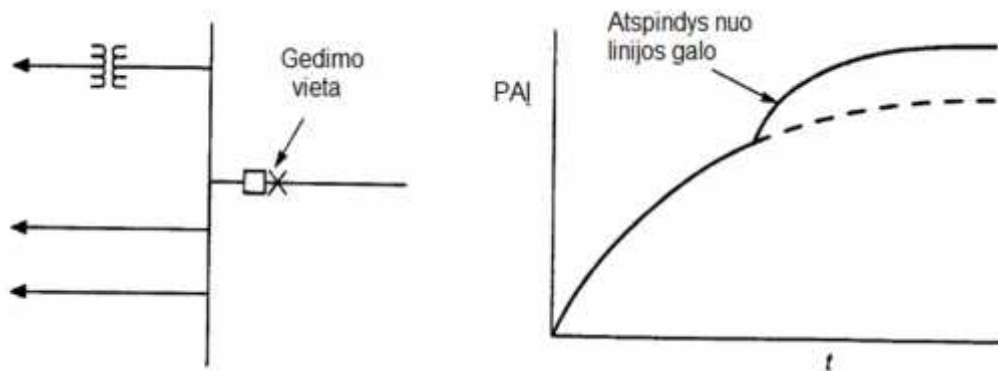
- Perdavimo linijų skaičius prijungtų prie šynų ir jų varžinės charakteristikos;
- Vidiniai jungtuvo veiksniai, tokie kaip pirmo poliaus atjungimas;
- Sistemos tinklo režimas.

Laikinoji atkūrimo įtampa skersai jungtuvo turi charakteringas bangos formas ir yra atvaizduojamos ir skirstomos į:

- Eksponentinė laikinoji atkūrimo įtampa;
- Generatorinė laikinoji atkūrimo įtampa;
- Trumpos linijos arba trikampio bangos forma.

5.3.1 Eksponentinė laikinoji atkūrimo įtampa

Eksponentinės bangos formos laikinoji atkūrimo įtampa tipiškai būna sutinkama jungtuvo šaltinio arba generavimo pusėje. Taip pat dažniausiai būna bent keletas lygiagrečių perdavimo linijų prijungtų prie šynų. Trumpo jungimo vieta už jungtuvo, nuo šynų pusės, kaip parodyta 5.19 pav.



5.22 pav. Eksponentinė bangos forma [5]

Pagrindinė sąlyga atsirasti eksponentinės bangos formos pereinamajai atkūrimo įtampai yra:

$$Z_e < 0,5 \sqrt{\frac{L_e}{C_e}} ;$$

L_e – ekvivalentinis induktyvumas [H];

C_e – ekvivalentinė talpa [F];

Z_e – ekvivalentinis viršįtampio impedansas, kuris priklauso nuo lygiagrečiai prijungtų linijų skaičiaus ir kitų sistemoje esančių elementų.

$$Z_e = \frac{3}{n} \cdot \frac{Z_0 Z_1}{Z_1 + 2Z_0} ; \quad (5.1)$$

Z_1 – linijos tiesioginės sekos viršįtampio impedansas;

Z_0 – linijos nulinės sekos sekos viršįtampio impedansas;

n – linijų skaičius;

Skersai jungtuvo atsirandanti įtampa randama:

$$V_C = E_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right); \quad (5.2)$$

kur

$$E_1 = \sqrt{2} I_1 L_e; \quad (5.3)$$

I – srovė tekanti į gedimo vietą, A;

f – sistemos dažnis Hz;

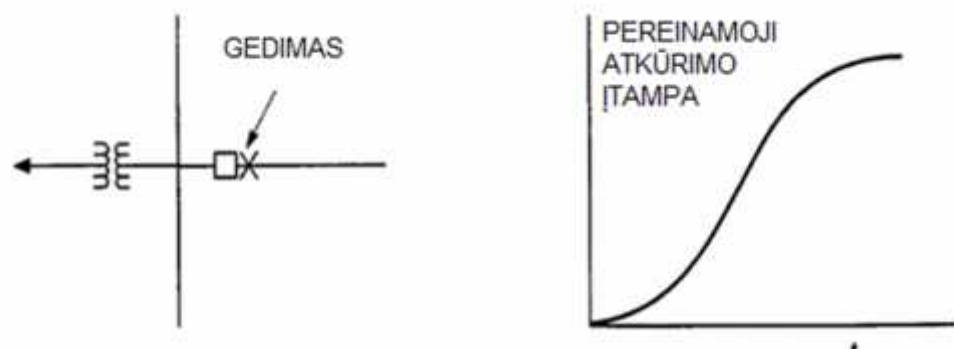
$\omega = 2\pi$ – kampinis dažnis, rad;

$\tau = \frac{L_e}{Z_e}$, s.

Eksponentinėje bangos formoje 2 pav. matome, kad priklausomai nuo kiekvienos prijungtos linijos prisideda beliaujanti banga, kuri pasireiškia kaip atspindys linijos, kurios galas atviras. Kuo didesnė trumpo jungimo srovės, kurios didėja priklausomai nuo linijų skaičiaus, tuo mažesnis transformatorių natūralus dažnio poveikis pereinamajai atkūrimo įtampai. Įtampos atkūrimo greičio rodiklis turi tendenciją mažėti, didėjant trumpos grandinės srovėms [5].

5.3.2 Generatorinė laikinoji atkūrimo įtampa

Tokia bangos forma gaunama kai generatorius ar reaktorius maitina avarijos vietą. Taip pat gali tokia įtaką daryti ir transformatorius arba šynos, kuriose yra mažai prijungtų linijų.



5.23 pav. Generatorinės laikinosios atkūrimo įtampos bangos forma [6]

Įtampa skersai jungtuvo:

$$V_C = E_1 \left(1 - e^{-\alpha \left(\frac{t}{\sqrt{L_e C_e}} + \frac{a}{b} \frac{t}{\sqrt{L_e C_e}} \right)} \right); \quad (5.4)$$

Jeigu prie šynų nėra daugiau prijungtų linijų ir nevertiname aktyviųjų varžų:

$$V_C = E_1 \left(1 - e^{-\alpha \left(\frac{t}{\sqrt{L_e C_e}} \right)} \right); \quad (5.5)$$

kur,

$$\alpha = -\frac{1}{2Z_e C_e}; \quad (5.6)$$

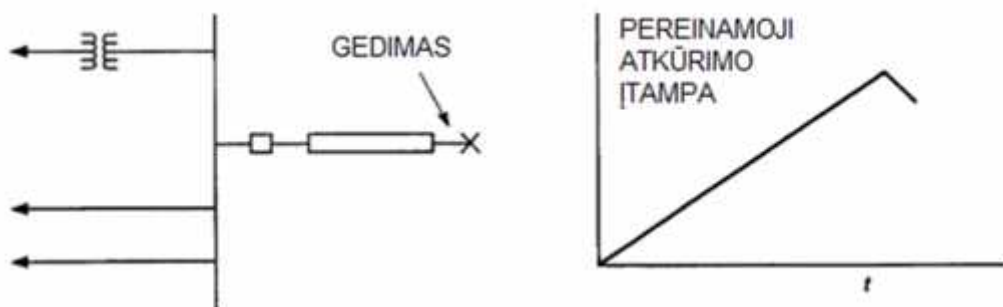
$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{L_e C_e}}. \quad (5.7)$$

Sąlyga, kad būtų generatorinė bangos forma:

$$Z_e \geq 0,5 \sqrt{\frac{L_e}{C_e}}.$$

5.3.3 Trikampė bangos forma

Tokia bangos forma gaunama kai trumpas jungimas elektros perdavimo linijoje netoli jungtuvo. Trikampio formos banga susiformuoja linijos pusėje. Pjūklo formos pereinamoji atkūrimo įtampa susidaro dėl didelės spartaus įtampos atkūrimo greičio rodiklio. Tyrimas remiasi kliaujančios bangos metodu elektros linijoje [8].



5.24 pav. Trikampio bangos forma [7]

Pereinamoji atkūrimo įtampa skersai jungtuvo gaunama:

$$V_C = V_L + V_S; \quad (5.8)$$

V_L – linijos įtampa (apkrovos); V_S – šaltinio įtampa.

$$V_L = d(1 - M) \sqrt{\frac{2}{3}} E_m; \quad (5.9)$$

$$V_S = 2M(T_L - t_d). \quad (5.10)$$

t_d – pereinamosios atkūrimo įtampos laiko delta šaltinio pusėje, s;

$T_L = \frac{V_L}{R_L}$ – laikas iki pirmos smailės, s;

$R_L = \sqrt{2} I_L \omega Z_e$ – kilimo greitis;

I_L – avarijos srovė, kA;

M – santykis avarijos srovės ir trumpojo jungimo srovės;

E_m – maksimali įtampa, kV.

5.3.4 Linijos parametrų skaičiavimas

Naudosimės 5.1 lentelės duomenimis.

Linijos aktyvioji varža linijos ilgiui:

$$R = R_1 = 0,098 \, \Omega$$

Tiesioginės ir nulinės sekos induktyvumai:

$$L_1 = 1,376 \cdot 10^{-3} \, \text{H/km};$$

$$L_0 = 2,015 \cdot 10^{-3} \, \text{H/km}.$$

Ekvivalentinis induktyvumas:

$$L_e = \frac{3L_1 L_0}{L_1 + 2L_0} = \frac{3 \cdot 1,376 \cdot 10^{-3} \cdot 2,015 \cdot 10^{-3}}{1,376 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,015 \cdot 10^{-3}} = 0,001539 \, \text{H/km}.$$

Skaičiuojant tinkle su įžeminta neutrale trifazis trumpas jungimas su žeme:

$$L_e = \frac{9 \cdot L_1}{7} = \frac{9 \cdot 1,376 \cdot 10^{-3}}{7} = 0,001769 \, \text{H}.$$

Tiesioginės ir nulinės sekos talpumai:

$$C_1 = 8,115 \cdot 10^{-9} \, \text{F/km};$$

$$C_0 = 5,527 \cdot 10^{-9} \, \text{F/km}.$$

Ekvivalentinis talpumas vienam kilometrui:

$$C_e = C_0 + 2 \cdot \left(\frac{C_1 - C_0}{3} \right);$$

$$C_e = 5,527 \cdot 10^{-9} + 2 \left(\frac{8,115 \cdot 10^{-9} - 5,527 \cdot 10^{-9}}{3} \right) = 7,2523 \cdot 10^{-9} \, \text{F/km};$$

Linijos reaktansas nuo jungtuvo iki gedimo vietos [H/km]:

$$X_L = \frac{2X_1 + X_0}{3};$$

kur $X_1 = L_{1\omega}$, $X_0 = L_{0\omega}$;

$$L_{1\omega} = L_1 \cdot \omega = 1,376 \cdot 10^{-3} \cdot 314 = 0,4323 \, \Omega/\text{km};$$

$$L_{0\omega} = L_0 \cdot \omega = 2,015 \cdot 10^{-3} \cdot 314 = 0,6630 \, \Omega/\text{km};$$

$$X_L = \frac{2 \cdot 0,4323 + 0,6630}{3} = 0,4992 \, \Omega/\text{km}.$$

Banginė varžos sekose:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \sqrt{\frac{1,376 \cdot 10^{-3}}{8,115 \cdot 10^{-9}}} = 411,779 \, \Omega;$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{2,015 \cdot 10^{-3}}{5,527 \cdot 10^{-9}}} = 603,799 \, \Omega.$$

Bangos greitis :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{1,376 \cdot 10^{-3} \cdot 8,115 \cdot 10^{-9}}} = 299260 \, \text{km/s}.$$

Efektinė banginė varža:

$$Z_e = \frac{(2 \cdot Z_1 + Z_0)}{3} = \frac{(2 \cdot 411,7797 + 603,7996)}{3} = 475,786 \, \Omega$$

Smailės faktorius randamas:

$$d = 2\omega \frac{Z_e}{X_L \cdot V} = 2 \cdot 314 \cdot \frac{475,786}{0,4992 \cdot 3 \cdot 10^5} = 2,001$$

V - šviesos greitis, 300 000 km/s.

Trumpo jungimo srovė

Generatoriaus reaktansas kai skaičiuojama trumpo jungimo srovė iškart už generatoriaus apskaičiuojamas.

$$X_g = 2\pi L_g = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,01658 = 5,208 \, \Omega.$$

Suminė generatoriaus varža apskaičiuojama:

$$Z_g = \sqrt{X_g^2 + R_g^2} = \sqrt{5,208^2 + 0,8929^2} = 5,209 \, \Omega.$$

Trumpo jungimo srovė randama:

$$I_S = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot Z_g} = \frac{330 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5,209} = 36577,64 \text{ A.}$$

Trumpojo j. srovės kai gedimas linijos gale:

$$Z_L = \sqrt{49,92^2 + 9,8^2} = 50,83 \Omega.$$

$$I_L = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot (Z_g + Z_L)} = \frac{330 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (5,209 + 50,83)} = 3456,01 \text{ A.}$$

Laikas iki pirmos smailės:

$$t_L = 2 \cdot \frac{l}{V} = 2 \cdot \frac{100}{300000} = 6,66 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Santykis tarp avarijos srovės ir maksimalios trumpo jungimo srovės:

$$M = \frac{3456}{36577} = 0,0945$$

Linijos pusės įtampa:

$$e = d(1 - M)\sqrt{2/3} \cdot U_L$$

$$e = 2,001 \cdot (1 - 0,0945) \cdot \sqrt{2/3} \cdot 330 \cdot 10^3 = 488,24 \cdot 10^3 \text{ kV;}$$

Šaltinio pusės įtampa ($t_d = 0$):

$$e_S = 2 \cdot M(T_L - t_d) = 2 \cdot 0,0942 \cdot (63,145 - 0) = 11,55 \text{ kV ;}$$

kur

$$R_L = \sqrt{2} \cdot \omega \cdot I_S \cdot Z_e \cdot 10^{-6};$$

$$R_L = \sqrt{2} \cdot 314 \cdot 36,577 \cdot 475,786 \cdot 10^{-6} = 7,761 \text{ kV/}\mu\text{s.}$$

Laikas iki pirmos smailės:

$$T_L = \frac{e}{R_L} = \frac{488,24}{7,761} = 63,145 \mu\text{s}$$

Pirmoji smailė pereinamosios atkūrimo įtampos:

$$e_T = e + e_S = 488,24 + 11,55 = 499,79 \text{ kV ;}$$

Atkuriamos įtampos kilimo greitis:

$$R = \frac{e_T}{T_L} = \frac{499,79}{63,145} = 7,915 \text{ kV/}\mu\text{s.}$$

Santykis laikinosios atkūrimo įtampos ir nusistovėjusio būsenos maksimalios įtampos jungtuve prieš avariją:

$$\frac{e_T}{0,9 \cdot \sqrt{2/3} \cdot U_L} = \frac{499,79}{0.9055 \cdot \sqrt{2/3} \cdot 330 \cdot 10^3} = 2,05 \text{ p. u.}$$

5.19 lentelė. Skaičiavimo rezultatai.

Maksimali trumpo jungimo srovė	36,578 kA
Trumpo jungimo srovė avarijos vietoje	3,445 kA
Laikas iki pirmosios smailės	63,145 μs
Linijos pusės įtampa	488,24 kV
Šaltinio pusės įtampa	11,55 kV
Laikinoji atkūrimo įtampa	499,79 kV
Atkuriamos įtampos kilimo greitis	7,915 kV /μs

5.4 Jungtuvo parinkimas

Žinodami laikinosios atkūrimo įtampos dydį, maksimalią trumpo jungimo srovę ir kitus reikalingus parametrus galime pasirinkti tinkamą jungtuvą.

5.20 lentelė. Jungtuvų parametrai

	ABB PMI-B	SIEMENS 3AP2	ALSTOM GL315
Nominali įtampa, kV	330	330	330
Maksimali įtampa, kV	380	362	362
Nutraukimo vienetai poliui	-	2	2
Dažnis, Hz	50/60	50/60	50/60
Galios dažnio atlaikymas kV/min	555	520	520
Žaibo impulse atlaikymas, kV	1300	1175	1175
Komutacinių viršįtampių atlaikymas, kV	825	950	950
Nominali srovė, A	5000	5000	5000
Nominali trumpo jungimo srovė, kA	63	50	50
Nominali pikinė srovė, kA	170	170	170
Išjungimo laikas, s	2 periodai	2 periodai	2 periodai
Darbinė temperatūra °C	-50 ... +50	-40 ... +50	-

Remiantis gamintojų deklaruotais duomenimis galima pasirinkti bet kurį iš pateiktų jungtuvų, nes visi jie tinka pagal gautus skaičiavimo rezultatus.

IŠVADOS

1. Diferencinėmis lygtimis aprašytas ir būsenos kintamųjų metodu išspręsti elektros perdavimo linijos Π ir 2Π modeliai. Linijos įjungimo metu gauti pereinamojo proceso rezultatai parodė kaip atrodo tų pačių parametrų oro linijos modelis kai elektros grandinė skaičiuojama dviem modeliais. Pateikti pereinamųjų procesų grafikai, proceso trukmė 0,02 s arba 1 periodas 50 Hz sistemoje.

2. Pagal realius 330 kV orinės elektros perdavimo linijos atramą ir laidininko AC 300/39 parametrus suskaičiuoti induktyviniai ir talpiniai tarpusavio ryšiai. Simetrinių dedamųjų metodu perskaičiuoti faziniai dydžiai į sekų dydžius, kuriuos naudosime modeliuojamame tinkle.

3. Matematinė programa MATLAB sumodeliuoti dažniausiai pasitaikantys komutaciniai viršįtampiai. Orinės 100 km elektros perdavimo linijos be apkrovos įjungimo metu užfiksuota maksimali viršįtampio vertė linijos pradžioje 1,8 s.v., linijos gale - 2,0 s.v. Toks viršįtampis dydis susidaro dėl linijoje susidarančių atspindžių. Taip pat komutacijos metu matoma srovė atsirandanti užkraunant linijos talpinio pobūdžio varžas. Galimas sprendimo būdas jungti liniją su apkrova arba jeigu yra galimybė trumpinti liniją jungiant trumpesnėmis distancijomis.

4. Atjungiant apkrautą galios transformatorių pasikeičia modeliuojamos sistemos struktūra. Matomas pereinamasis procesas, kuris atsiranda jungtuvo nutraukimo metu sukuriama elektros lanko. Viršįtampio lygis priklauso tiesiogiai nuo apkrovos srovės dydžio, didėjant apkrovos srovei didėja ir viršįtampis. Atjungiant galios transformatorių rekomenduojama sumažinti apkrovą.

5. Jungtuvo polių susijungimo laiko nesutapimas sukelia išilginę nesimetriją tiriamoje sistemoje. Dėl to atsiranda komutaciniai viršįtampiai, kurių vertė įjungimo metu siekia 1,4 s.v.

6. Sumodeliuotas trifazis trumpasis jungimas. Trumpo jungimo srovė perdavimo linijos gale 3,45 kA. Paskaičiuotas laikinosios atkūrimo įtampos dydis 499,8 kV.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Juozas Baublys, Pranas Jankauskas, Linas Andronis Markevičius, Alfonsas Morkvėnas. *Izoliacija ir viršįtampiai*. Kaunas: Technologija, 2008. 307 p. ISBN 978-9955-25-472-0.
2. Alfonsas Morkvėnas. *Viršįtampių poveikis elektros įrenginių izoliacijos senėjimo procesams*. Kaunas: Technologija 2008.
3. Arie L. Shenkman. *Transient Analysis of Electric Circuit Handbook*. Dordrecht: Springer, 2005. 4 p., 265 p., 405 p., ISBN-13 978-0-387-28797-3 (HB).
4. Angelo Baggini. *Handbook of Power Quality*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 267p. ISBN 978-0-470-06561-7.
5. D.Dufournet, R.W.Alexander. *Transient Recovery Voltage (TRV) for high-voltage circuit breakers*.
6. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty. *Electrical Power Systems Quality*. Second edition, 2004.
7. Bruce Mork. *Effects of Transient Recovery Voltages on Circuit Breaker Ratings*. EE5220 – Power Systems Transients, 2008.
8. IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers. IEEE Std C37.011 -2005.
9. Neville Watson, Jos Arrilaga. *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*. 2003. 449 p. ISBN 978-0-85296-106-3