



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Art ūras Trukšinas**

**KOMUTACINI VIRŠ TAMPI TYRIMAS AUKŠTOS  
TAMPOS ELEKTROS PERDAVIMO SISTEMOJE**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Vytautas Šiožinys

**KAUNAS, 2015**

Trukšinas, A. Komutacini virš tampi tyrimas aukštos tampos elektros perdavimo sistemoje. *Magistrinis baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vytautas Šiožinys*; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistem katedra.

Kaunas, 2015. 55 psl.

## SANTRAUKA

Elektros energetikos sistemos veikimo patikimumas yra svarbus veiksnys ir glaudžiai susijęs su sistemos elektros renginio darbu. Skirtingose elektros tinklo vietose eksploatuojami renginiai yra veikiami skirtingų parametrų veiksniais. Žinoma, kad vairiuose elektros tinklo vietose virš tampi parametrai, dėl tinklo konfigūracijos, techninių charakteristikų, vykstančių fizikinių reiškinių pasiskirstę netolygiai.

Tiriamajame darbe ištyriau aukštos tampos elektros perdavimo sistemoje atsirandančius komutacinius virš tampus. Pagal realius tinklo parametrus sudarytas skaitinuoju modelis. Naudojantis MATLAB Simulink sumuliacine programa iširti pagrindiniai aukštos tampos tinkle sutinkami darbuo žymai.

Pagal sumodeliuotus procesus ir gautus rezultatus galima matyti, kad skiriasi ne tik komutacini virš tampi amplitudės, bet ir proceso pobūdis bei trukmė.

Trukšinas Art ras. 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 palce of 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

VADAS .....	5
1. VIRŠ TAMPIAI .....	6
2. PEREINAMIEJI PROCESAI .....	8
2.1 Pereinamojo proceso reiškiny s elektros grandin se .....	9
2.2 Diferencin s lygtys charakterizuoja ios elektros grandin .....	10
2.3 Pereinamieji procesai naudojant b senos kintam j metod .....	11
3. ORO LINIJOS PRINCIPINIS MODELIS .....	12
3.1 modelis .....	12
3.1.1 modelio srovi ir tamp išraiškos .....	13
3.1.2 modelio diferencin s lygtys .....	14
3.1.3 B senos kintam j metodas diferencin mis lygtims sp sti. ....	15
3.1.4 Efektini reikšmi skai iavimas .....	16
Sumin s varžos skai iavimas .....	16
3.2 2 modelis .....	18
3.2.1 Srovi ir tamp išraiškos 2 modeliui .....	19
3.2.2 Diferencin s lygtys 2 modeliui .....	19
3.2.3 B senos lyg i metodas diferencin mis lygtims sp sti 2 modeliui. ....	21
3.2.4 Efektini reikšmi skai iavimas 2 modeliui .....	22
3.3 Rezultat palyginimas .....	26
4. ORO LINIJOS SKAI IAVIMAI .....	26
4.1 Geometrini parametr matricos skai iavimas .....	27
4.2 Linijos sav j ir abipusi induktyvum bei talp skai iavimas .....	28
4.3 Simetrini dedam j metodas sek varžoms skai iuoti .....	29
5. MODELIAVIMAS .....	31
5.1 Modeliuojami r žimai .....	31
5.1.1 Linijos jungimas be apkrovos .....	32
5.1.2 Apkrauto galios transformatoriaus išjungimas .....	36
5.1.3 Linijos išjungimas po trumpo jungimo .....	39
5.2 Komutaciniai virš tampiai d l išilgin s nesimetrijos .....	41
5.2.1 Jungtuvo jungimas apkrov .....	41
5.2.2 Jungtuvo išjungimas po apkrova .....	43
5.3 Laikinoji atk rimo tampa .....	46
5.3.1 Eksponentin laikinoji atk rimo tampa .....	47
5.3.2 Generatorin laikinoji atk rimo tampa .....	48
5.3.3 Trikamp bangos forma .....	49
5.3.4 Linijos parametr skai iavimas .....	50
5.4 Jungtuvo parinkimas .....	53
IŠVADOS .....	54
INFORMACIJOS ŠALTINI S RAŠAS .....	55

## VADAS

Baigiamojo magistro darbo tema yra „Komutacinis virštampi tyrimas aukštos tamos elektros perdavimo sistemoje“.

Tyrimo tikslas – ištirti aukštos tamos perdavimo tinkle atsirandančius komutacinius virštampius. Žinant jų atsiradimo priežastis pasiūlyti galimus sprendimus, kad juos eliminuotų. Siekiant kuo tiksliau teisingai atlikti tyrimą visų pirma reikia atlikti pagrindinį tinklo elementų analizę. Kadangi modeliavime naudosisime 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 virštampiems.

Pirmame skyriuje apžvelgiama pagrindinis virštampių charakteristikos. Pateikiamos virštampių susidarymo priežastys, jų klasifikavimas.

Antrame skyriuje detaliau apžvelgiamas pereinamasis procesas kintamos srovės elektros grandinėje. Aprašomas pagrindinis elementų induktyvumo (L) ir talpos (C) poveikis pereinamojo proceso reiškiniai. Pateikiama skaičiavimo metodika diferenciniais lygtimis charakterizuojančiomis elektros grandinėms.

Trečiame skyriuje atliekami matematiniai skaičiavimai. Sudaromas oro linijos principinis modelis siekiant parodyti linijos jungimo 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 perskačiuojame modus (sekundinius).

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

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

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

Tai pat apskaičiuoti jungtuve susidarantį laikinį atkūrimo tampa komutacinio virštampo metu.

# 1. VIRŠ TAMPIAI

Virš tampus – bet kokia tampa tarp fazų laidininko ir žemės arba tarp laidininkų turinti didesnė vertė nei leidžiama elektros renginiuose.

Bet koks tamos padidėjimas virš aukštesnės leistinos tinklo tamos yra vadinamas virš tampa. Virš tampa tyrimai elektros energetikos sistemose yra svarbus ir gana sudėtingas uždavinys. Virš tampa perinamieji procesai gali turėti tokios daugeliui elektros energetikos sistemos sudėtinę dalį.

Virš tampa susiformavę elektros tinkle gali iki kelių kartų viršyti leistiną tampą. Virš tampa poveikio trukmė elektros renginiams priklauso nuo virš tampus sukūlusio trikdžio pobūdžio. Vidiniai virš tampa gali trukti nuo kelių milisekundžių iki kelių sekundžių (rezonansiniai), o izoliuotos neutralios tinkle, esant žemei jimi, linijinė tampa gali veikti kur kas ilgiau [1].

Virš tampa klasifikavimas:

- ilgalaikiai leistinoji didžiausia pramoninio dažnio tampa;
- laikinieji virš tampa (rezonansiniai);
- pereinamieji virš tampa (trumpo trukmės virš tampa,  $t_f$  – impulso fronto trukmė,  $t_2$  – virš tampa impulso trukmė):
  - nuožulnaus fronto virš tampa,  $20 \mu s \leq t_f \leq 5000 \mu s$ ,  $t_2 \leq 2 \text{ ms}$ .
  - stačaus fronto virš tampa,  $0,1 \mu s \leq t_f \leq 20 \mu s$ ,  $t_2 \leq 300 \mu s$ .
  - labai stačaus fronto virš tampa, pikinis laikas  $\leq 0,1 \mu s$ , suminis laikas  $< 3 \text{ ms}$ , dažnis  $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$ .

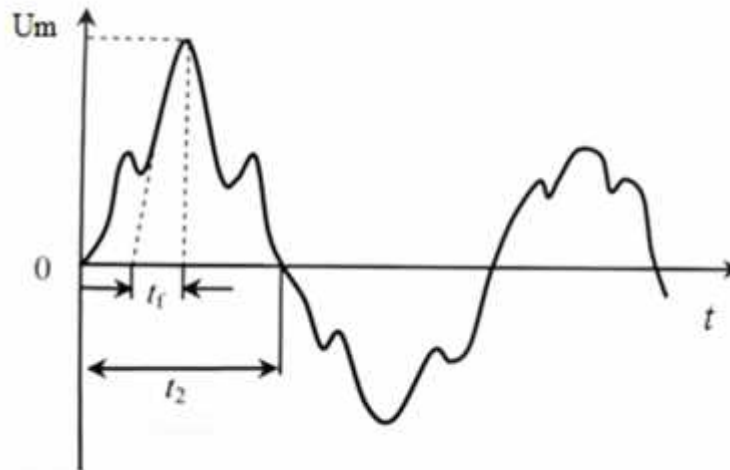
Pagal susiformavimo priežastis virš tampus galima suskirstyti vidinius ir išorinius.

Vidiniai virš tampa skiriasi vieni nuo kitų savo lygiu, forma, pasikartojimo dažniu ir poveikio izoliacijai trukme. Virš tampus apibūdinantys dydžiai yra priklausomi nuo vairių atsitiktinių veiksnių: tinklo schemas, darbo režimo, parametrų, nuo apsauginių renginių ir jų darbo efektyvumo ir kt. Savo ruožtu vidiniai virš tampa skirstomi dvi grupės: perjungimo ir režiminių virš tampus. Virš tampa lygis priklauso nuo juos sukėlusios priežasties. Virš tampa lygis vertinamas santykiniais vienetais (1 s.v. yra leistinoji elektros tinklo nominalioji tampa) vairiuose elektros tinklo parametrų pokyčio situacijose gali būti tokie:

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

- **1,5 – 2,0 s.v. Trumpojo jungimo atjungimas.** Ši virš tampi dydis priklauso nuo vietos elektros sistemoje, t.y. trumpasis jungimas gali būti linijoje arba generatoriuje, ir taip pat nuo nulinis ir tiesioginis varž santykio ( $Z_0/Z_1$ ). *Linijos ir kabelio prijungimas per induktyvumą*. Analogiškos, bet sudingesnės formos bangos gaunamos, kai prijungiama linija arba kabelis su transformatoriumi žemosios tampos pusėje. *Rezonansiniai virš tampaiai* energetikos sistemoje gali atsirasti pasikeitus sistemos fizikiniai parametrai santykiui. Tokia situacija energetinėje sistemoje gali susidaryti, atjungiant trumpąjį jungimą. Linija trumpa lieka prijungta viena arba dviem fazėmis ir vadinamas nepilnafazis r žimas. Tokie rezonansiniai reiškiniai gali atsirasti linijose ilgesnės kaip 400 km. *Talpos efekto virš tampaiai*. Rezonansinis tampos padidėjimas virš maksimalios darbinės tampos gali atsirasti dėl talpos efekto. Jis pasireiškia linijose, kurių ilgis artimas ketvirių bangos ilgiui, maitinamose iš vienos pusės (ketvirio bangos rezonansas) ir pusės bangos ilgio dvipusio maitinimo linijose (pusės bangos rezonansas).
- **2,0 – 2,05 s.v. Linijos atjungimas.** Virš tampo dydis nutolusiame atvirame gale priklauso nuo jungtuvų visų trijų polių susijungimo viena laikiškumo.
- **2,5 – 3,0 s.v. reaktoriaus arba transformatoriaus tušiosios veikos srovės atjungimas.** Virš tampo dydis priklauso nuo jungtuvu nutrauktos srovės dydžio, kai lankas jungtuve gesinamas anksčiau negu tušiosios veikos srovė keičia ženklą. Virš tampaiai susidaro dėl liekamosios srovės induktyviojoje grandinėje. *Jungimas linijos su transformatoriumi gale*. Jei nutolusios linijos gale yra transformatorius, tai prie jo atvirą antriną grandinę gnybt bus dvigubai aukštesnė tampa, kai bangos sklidimo linija trukmė lygi transformatoriaus švytavimo periodui, galima susidaryti ir daug aukštesnė tampa.
- **3,0 s.v. ir daugiau.** Kartotinis linijos arba kabelio jungimas. tampa nutolusiame atvirame gale išauga dėl krivio, išlikusio po veikiančios linijos atjungimo. Grandinė su reaktyviosios galios kompensavimo renginiais po atjungimo švytuoja kelias dešimtis sekundų su amplitude, lygia pilnai apkrovai, ir dažniu artimu pramoniniam. Jeigu linijos liekamojo krivio ir šaltinio tampo fazės skirtumas didžiausias (iki 2,0 s.v.) kartotinio jungimo momentu likęs krivis gali sukelti papildomai tampos padidėjimą 1,0 s.v.

Vidiniai virš tampo proceso kreivės parodyta 1.1 paveiksle.



**1.1 pav.** Vidini virš tampi tipin forma aukštosios tampos renginiuose [2]

Elektros renginiams yra nustatytos aukš iausios leidžiamos elektros tinklo tampos ribos .

**1.1 lentel** . Leidžiamosios tampos

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

Virš tampi pereinam j proces atsiradimas lemia tampos padid jima virš  $U_{maks}$ . tampos padid jimas virš  $U_{maks}$  – vadinamas virš tampusiu. Virš tampaiai pagal poveikio viet skirstomi fazinius, tarp fazinius, tarpvijinius ir tarp kontaktinius. Tiriant virš tampus elektros sistemose yra sudaromos skai uojamosios schemas matematinis modelis bei parenkami lyg i sprendimo metodai.

## 2. PEREINAMIEJI PROCESAI

Elektros grandini pereinam j proces analiz tokia pat svarbi kaip ir nusistov jusio r žimo analiz . Kaip pereinamasis procesas vyksta, kai kuri grandin s element tampos ir srov s gali daug kart viršyt normalios b senos vertes ir taip gali pažeisti ar sunaikinti grandin s elementus. Galima išskirti iš elektros grandin s nusistov jusio r žimo pereinam j proces funkcionavim , tuo kad pereinam j proces dydžiai, tokie kaip srov , tampa, galia ir energija kinta laike, tuo tarpu nusistov j s r žimas lieka pastovus ir nekintamas.

Pereinam j proces atsiradimo priežastis yra bet koki grandin s parametr arba grandin s konfig racijos pasikeitimas, kuriuos dažniausiai iššaukia jungtuvo komutacija, trumpieji jungimai, maitinimo šaltinio pasikeitimai ir t.t. tampos ar srov s bei kit dydži pasikeitimai pereinam j proces metu n ra momentiniai ir reikalauja šiek tiek laiko, nors jie yra labai greiti ir trunkantys milisekundes ar net mikrosekundes. Ta iau šie labai greiti poky iai



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

Bet kokios energijos pokyčiai negali būti staigūs, Kaganai sukelti begaliniai gali (galia yra energijos išvestinė  $p = d/dt$ ), kas yra priešinga fiziniams realybėms. Visi pereinamieji procesai pasikeitimai, kurie taip pat vadinami pereinamoji reakcija, dingsta kai nauji nusistovėję procesai susiformuoja. Šiuo atžvilgiu galima sakyti, kad procesas b sena grandinėje apibūdina dviem r žimais: senuoju, kuris buvo prieš pokyčius ir naujuoju atsirado po pasikeitimo.

## 2.1 Pereinamojo proceso reiškinys elektros grandinėse

Analizuodami elektros sistemų turime išskirti du pagrindinius r žimus: stacionarų r žim (pusiausvyrą) ir pereinamąjį procesą (dinaminį r žim).

Elektros sistema pusiausvyros būsenoje yra tada, kai kintamieji (tampa, srovė ir kt.) apibūdintys savo būseną arba yra pastovūs su laiku (nuolatinės srovės grandinė) arba yra periodinė laiko funkcija (kintamos srovės grandinė). Elektros sistema pereinamąjį procesą b senoj tada, kai kintamieji kinta neperiodiškai t.y. kai sistema ne nusistovėjusiame r žime. Pereinamoji b sena dingsta, kai pasirodo nusistovėjusi b sena. Vadinasi pereinamasis procesas yra perdavimo b sena, kai nusistovėjusi b sena kinta kit [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  $w_C = \frac{1}{2}q = \frac{1}{2}CV^2$  (kur  $q = CV$ ) elektriniame grandinės lauke. Energija grandinėje tiekama per elementus, kurie yra tamos ir srovės šaltiniai. Taigi galima sakyti, kad elektros grandinė, kaip fizikinė sistema, charakterizuojama tam tikros energijos nusistovėjusia b sena. Pagal nusistovėjusią b seną energija sukaupia skirtinguose induktyvumuose ir talpose kai šaltinis nuolatinės srovės, yra nekintami, o kai šaltinis kintamos srovės grandinės energija keičiasi periodiškai.

Kai bet koks pasikeitimas vyksta 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.

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

pasirodo pereinamoji b sena. Vadinasi ži rint iš fizikin s sistemos pus s galima sakyti, kad pereinamieji procesai egzistuoja kai energijos b sena iš vienos nusistov jusios b senos kit .

Kita išvada apie tamp ir srov . Vykti magnetin s energijos pasikeitimui reikia srov s pasikeitimo induktyvume. D l to srov s indukcini se grandin se, ar indukcini se grandini šakose negali keistis staiga. Iš kitos pus s srov s pasikeitim induktoriuje sukelia tampos dydžio pokytis  $L (d / d )$ . Momentiniam srov s poky iui taipogi reikia begalin s tampos, kuri v lgi nerealizuojama praktikoje. Kadangi sukelta tampa taip pat žinoma kaip  $d / d$  , kur  $\psi$  yra magnetinis srautas, o srov s magnetinis srautas staiga pasikeisti negali.

Panašiai galima spr sti ir apie elektrin s energijos pasikeitim , kuri priklauso nuo tampos pasikeitimo kondensatoriuje, nes  $v = q/C$ , kur  $q$  yra kr vis. Taipogi nei tampa skersai kondensatoriaus, nei jo kr vis gali kisti staiga. Be to tampos grei io kitimas yra  $d / d = (1/C) \cdot d / d = i/C$ , ir momentinis tampos pasikeitimas sukelia begalin srov , kuri taipogi nerealizuojama praktiškai. Taigi galime apibendrinti, kad bet koks pasikeitimas elektros grandin je, kuris sukelia energijos persiskirstymus sukelia pereinamuosius procesus [4].

Kitais tariant bet kokia komutacija, trukdžiai, trumpieji jungimai ar kokie staig s elektros grandin s pasikeitimai iššaukia pereinamuosius procesus. Bendrai kalbant, bet koks pasikeitimas nuo nusistov jusios b sena veda prie laikin nuokrypi nuo vienos normalios nusistov jusios grandin s b senos prie kitos. Energijos persiskirstymas sukeltas pasikeitim teoriškai nesibaigia niekada. Ta iau realyb je pereinamasis procesas elektros grandin je funkcionuoja palyginti trumpa laiko tarp , po kurio tampos ir srov s vert s nusistovi naujoje pastovioje b senoje.

## 2.2 Diferencin s lygtys charakterizuoja ios elektros grandin

Grandini analiz , kaip fizikin sistem pilnai galima apib dinti diferencialin mis lygtimis parašytos tampa arba srov ms, kurios charakterizuoja grandin s funkcionavim . Linijin ms diferencin s lygtys sudaromos linijin ms grandin ms, kuri koeficientai nekinta, t.y. kiekvienas trukmei yra pirmojo laipsnio priklausom kintamojo arba vienas iš jo darini . Paveiksle 2.1 pateikiame pavyzd elektros grandin s, kuri sudaro nuosekliai sujungti trys pagrindiniai elementai varža ( $R$ ), induktyvumas ( $L$ ), talpa ( $C$ ) ir tampos šaltinis  $v(t)$ . Taikome Kichhoff'o antraj d sn kont ro tampa:

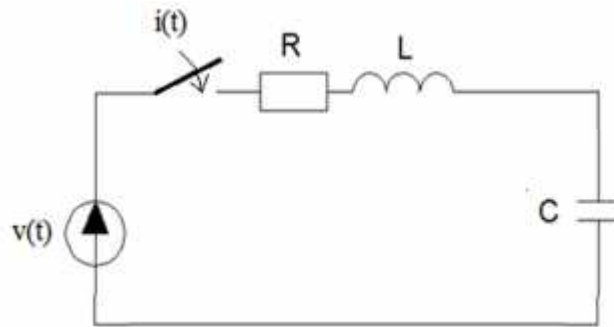
$$v_R + v_L + v_C = v(t) \quad (2.1)$$

kur grandin s elementus išreiškiame:

$$v_R = R ;$$

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

$$v_C = \int i dt .$$



**2.1 pav.** Nuosekli RLC grandin

ir tada mes turime

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

Po abiej 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 diferencinėms lygtims 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 diferencinė lygtis 2.4b ir pakeičiant  $dv_C/dt$  lygtyje 2.4a, mes gauname tą pačią (kaip 1.2 lygtis) antro laipsnio vienaskaitinę lygtį. Diferencinė lygtis sprendimas gali būti baigtas tik jei pirminės lygties apibrėžtos. Akivaizdu, kad toje pačioje grandinėje vykstant tam pačiam komutacijai, bet skirtingomis pradinėmis sąlygomis pereinamasis procesas reakcija bus kitokia.

### 2.3 Pereinamieji procesai naudojant būsenos kintamųjų metodą

Kai svarstomas grandinės dinaminis funkcionavimas, lygtys pristatamos grandinę naudojant mazgų ar tinklo analizę, yra integrodiferencialinės. Jos gali būti transformuojamos diferencinė skaliarinė lygtis, antro ar aukštesnio laipsnio. Tačiau grandinės diferencinės lygtis gali būti prašomos ir pirmo laipsnio diferencinėmis lygtimis arba išreikštos matricine forma. Taip gaunamos pirmo laipsnio vektorinės diferencialinės lygtis

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

$x$  - nežinomas kintamųjų vektorius, kitaip dar vadinamas būsenos kintamųjų;

$w$  - einantys dydžiai;

$t$  - proceso trukmė.

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

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

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

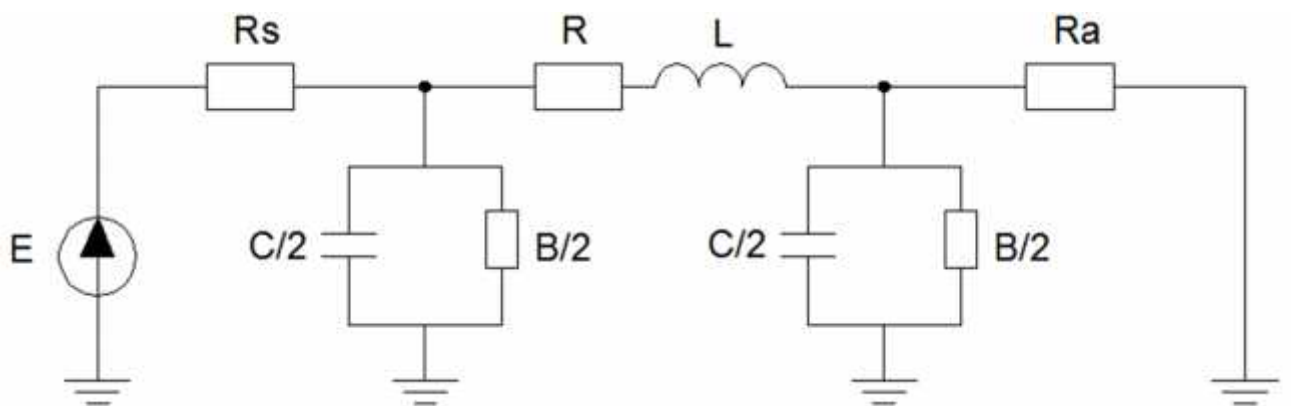
$y$  – išėjimo dydžių vektorius;

$A$ ,  $b$ ,  $c$  ir  $d$  matricos priklauso nuo grandinės elementų.

### 3. ORO LINIJOS PRINCIPINIS MODELIS

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

#### 3.1 modelis



3.1 pav. Oro linijos modelis

$E$  – grandinės šaltinis, V;

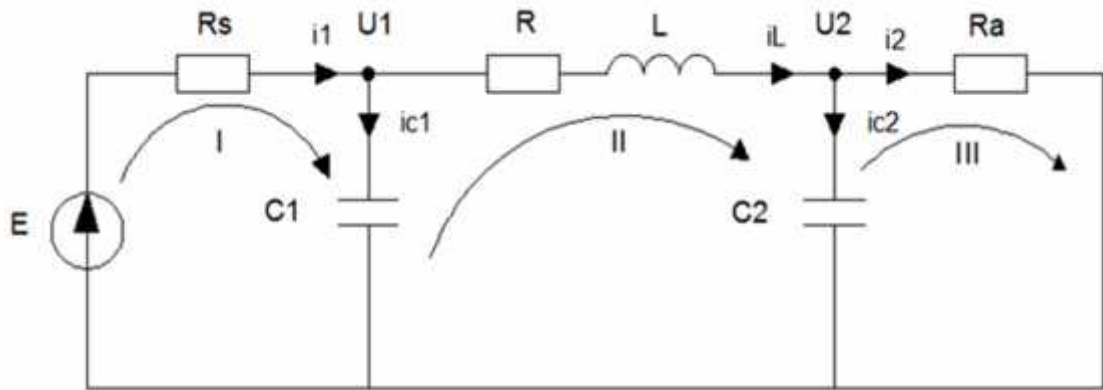
$R_s$  – sistemos varža,  $\Omega$ ;

$R$  – linijos aktyvioji varža,  $\Omega$ ,

L – linijos induktyvioji varža, H;

C – linijos talpin varža, F.

Atliekant sekantį skaičiavimą reikėtų nevertinti. Perbraižome modelį skaičiuojamajai schemai.



3.2 pav. Skaičiuojamoji schema

### 3.1.1 modelio srovės ir tampų išraiškos

Pagal Kirchhoff'o d'nius išreiškiame tolimesniuose skaičiavimuose naudojamas sroves ir tampus. Linijos talpa perskaičiuojame  $C_1 = C_2 = C/2$ . Laisvai pasirenkame kontrolinius kryptis.

Srovė mazge U1:

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

Srovė mazge U2:

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

tampa I kontrolinė:

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

tampa II kontrolinė:

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

tampa III kontrolinė:

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

Srovės kondensatoriuje priklauso nuo tampo kitimo laiko, todėl srovė išreiškiama diferencialine forma.

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

tampa induktyvume priklauso nuo srov  $s$  induktyvumo laidininke, tod 1 tampa galime išreikšti diferencine forma:

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

### 3.1.2 modelio diferencin s lygtys

Pagal 3.3 formul išreiškiame srov :

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

Naudodamiesi 3.1 ir 3.6 formul mis skai iuojame  $i_L$  :

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

Abi puses padaugin iš  $\frac{1}{C_1}$  gauname diferencin lygt :

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

Naudodamiesi 3.4 ir 3.7 formul mis skai iuojame tampa  $U_1$  :

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

Abi puses padaugin iš  $\frac{1}{L}$  gauname diferencin lygt :

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

Pagal 3.5 formul skai iuojame srov :

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

Naudodamiesi 3.2 ir 3.6 formul mis skai iuojame srov  $i_L$  :

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

Abi puses padaugin iš  $\frac{1}{C_2}$  gauname diferencin lygt :

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

### 3.1.3 B senos kintam j metodas diferencin mis lygtims spr sti.

Žinodami diferencini lyg i kintamuosius ir jimo dydžius galime sudaryti matricas diferencin ms lygtims spr sti. Naudojame (3.8) formul :

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

sistatome žinomus dydžius formule:

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

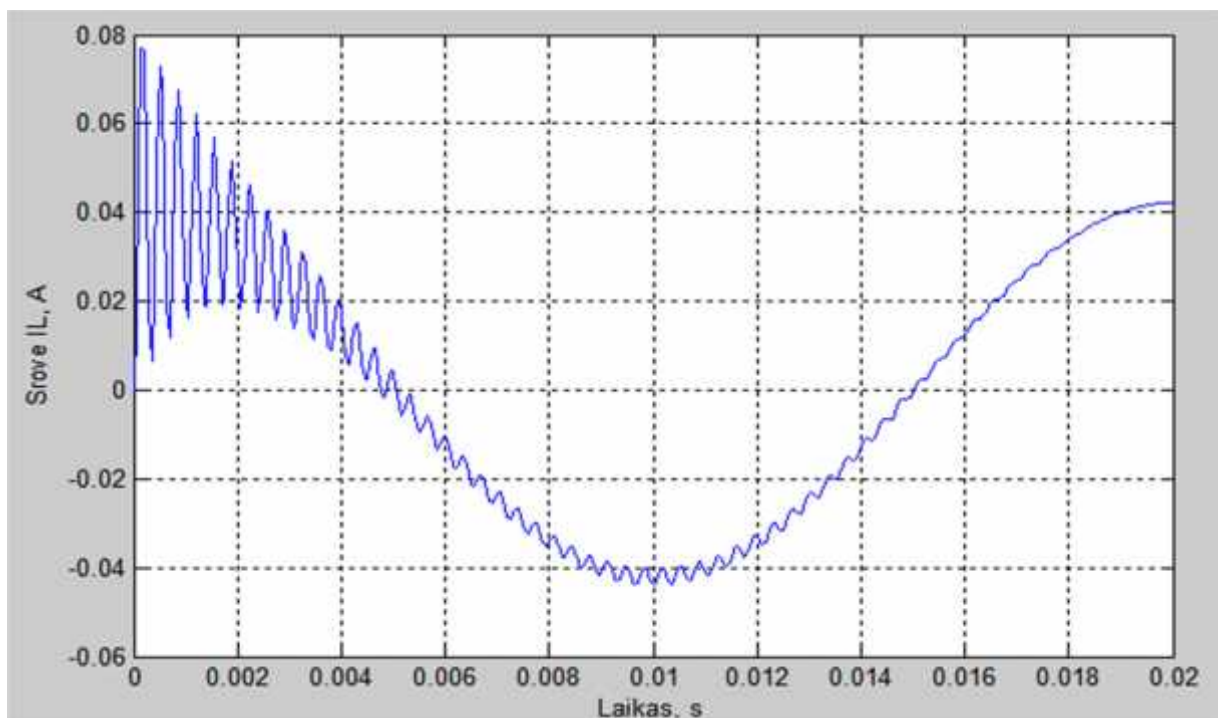
$\omega = 2\pi f$  – kampinis dažnis, [rad];

$f$  - sistemos dažnis, 50 Hz;

$E_m$  – tampos vert pradiniu laiko momentu, [kV];

$t$  – modeliavimo trukm , [s].

Gautas pereinamojo proceso rezultatas pateikiame grafiniu pavidalu.

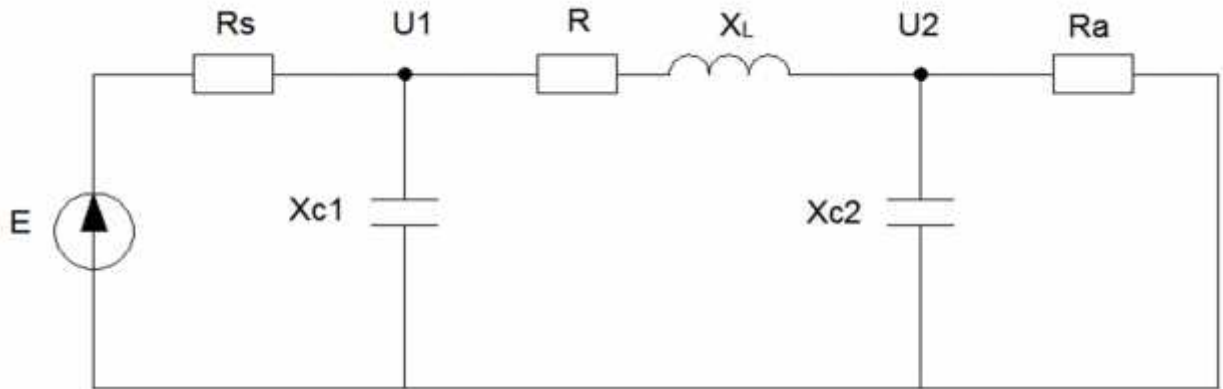


3.3 pav. Pereinamojo proceso srov s  $I_L$  matavimas.

### 3.1.4 Efektini reikšmi skai iavimas

3.1 lentel . modelio parametrai

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



3.4 pav. Ekvivalentin schema

#### Sumin s varžos skai iavimas

Talpioji varža skai iuojama pagal formul :

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

Induktyvioji varža skai iuojama pagal formul :

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

Žinodami linijos parametrus toliau skai iuojame varž , jungiame lygiagre tiai  $R_a$  ir  $X_{C2}$ :

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

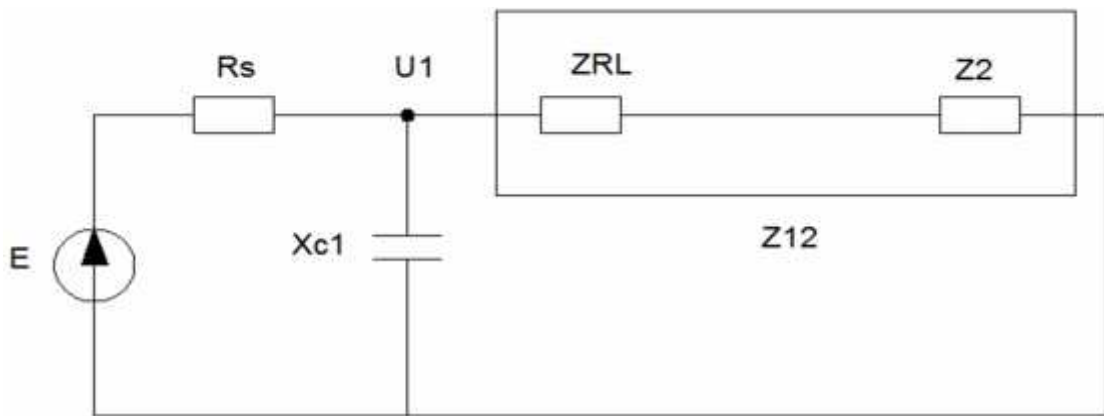
prastiname schem toliau, nuosekliai jungiame R ir  $X_L$ :

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

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. Ekvivalentin schema

Toliau prastiname schem , lygiagre iai jungiame  $Z_1$  ir  $X_{C1}$ :

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

Sumin varž gauname nuosekliai sujungdami  $Z_1$  ir  $R_s$ :

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

#### tamp ir srovi skai iavimas

Skai iuojame srov  $I_1$  pagal formul :

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

skai iuojame tamp  $U_1$  pagal formul :

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

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

skai iuojame srov  $I_{C1}$  pagal formul :

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

skai iuojame srov  $I_L$  pagal formul :

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

skai iuojame tamp  $U_2$  pagal formul :

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

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

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

skai iuojame srov  $I_{C2}$  pagal formul :

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

skai iuojame srov  $I_2$  pagal formul :

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

### Absoliutin s vert s

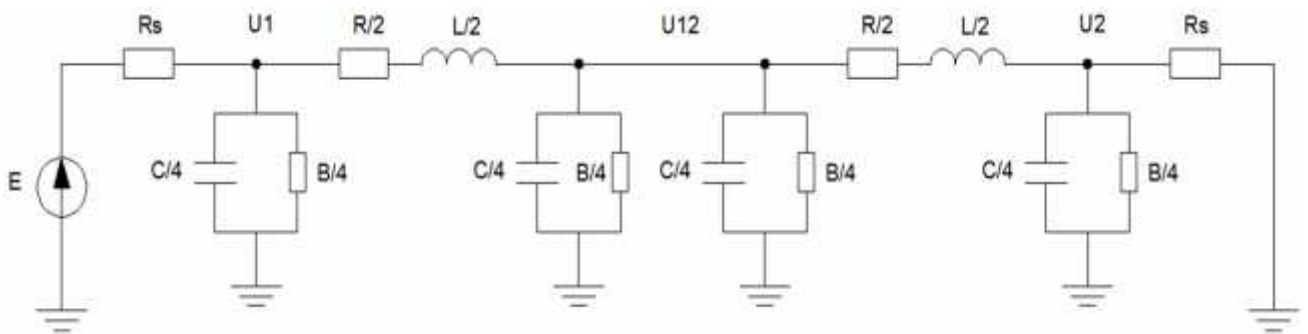
Absoliutin s vert s skai iuojamos mazgams  $U_1$  ir  $U_2$  bei srovei  $I_L$  :

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

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

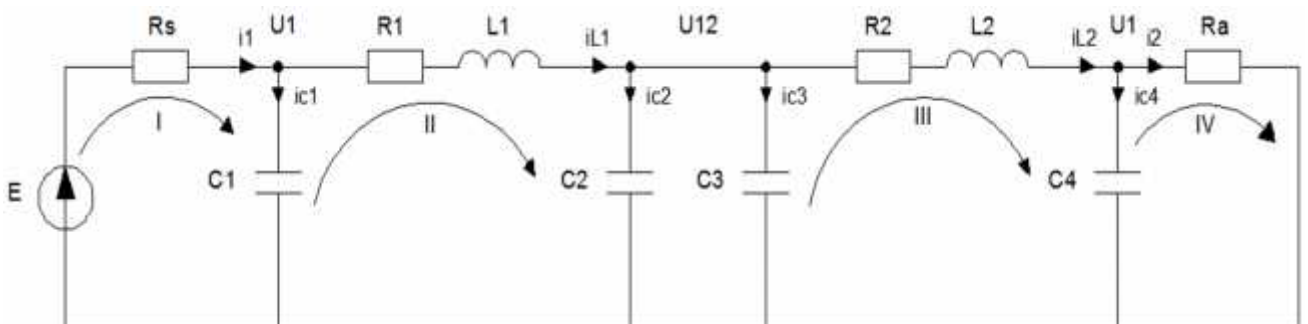
$$U_2 = \sqrt{67,0196^2 + (-0,1053^2)} = 67,0197 \text{ V}.$$

### 3.2 2 modelis



3.6 pav. Oro linijos 2 modelis

Kaip ir prieš tai skai iuotame modelyje reaktyviojo laidžio B nevertinsime. Perbraižome model skai iuojam j schem .



3.7 pav. Skai iuojamoji schema

### 3.2.1 Srov ir tampa išraiškos 2 modeliui.

Pagal Kirchhoff'o d. snius randame sroves ir tampus.

Srov mazge U1:

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

Srov mazge U12:

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

Srov mazge U2:

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

tampa I kont. re:

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

tampa II kont. re:

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

tampa III kont. re:

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

tampa VI kont. re:

$$U_2 = i_2 \cdot R_a .$$

Srov s kondensatoriuje priklauso nuo tampos kitiko laike, tod 1 srov išreiškiama diferencine forma:

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

tampa induktyvume priklauso nuo srov s induktyvumo laidininke, tod 1 tampa išreiškiama diferencine forma:

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

### 3.2.2 Diferencin s lygtys 2 modeliui.

Pagal 3 formul išreiškiame srov :

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

Naudodamiesi 1 ir 6 formul mis skai iuojame  $i_{L1}$  :

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

abi puses padaugin iš  $\frac{1}{C_1}$  gauname diferencin lygt :

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

Naudodamiesi 3.13 ir 3.16 formul mis skai iuojame tampa  $U_1$  :

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

abi puses padaugin iš  $\frac{1}{L_1}$  gauname diferencin lygt :

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

Pagal 3.11 ir 3.15 formules skai iuojame srov :

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

abi puses padaugin iš  $\frac{1}{C_2 + C_3}$  gauname diferencin lygt :

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

Naudodamiesi 3.14 ir 3.16 formul mis skai iuojame tampa  $U_1$  :

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

abi puses padaugin iš  $\frac{1}{L_2}$  gauname diferencin lygt :

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

Naudodamiesi 3.12 ir 3.15 formul mis skai iuojam srov  $i_{L2}$  :

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

abi puses padaugin iš  $\frac{1}{C_4}$  gauname diferencin lygt :

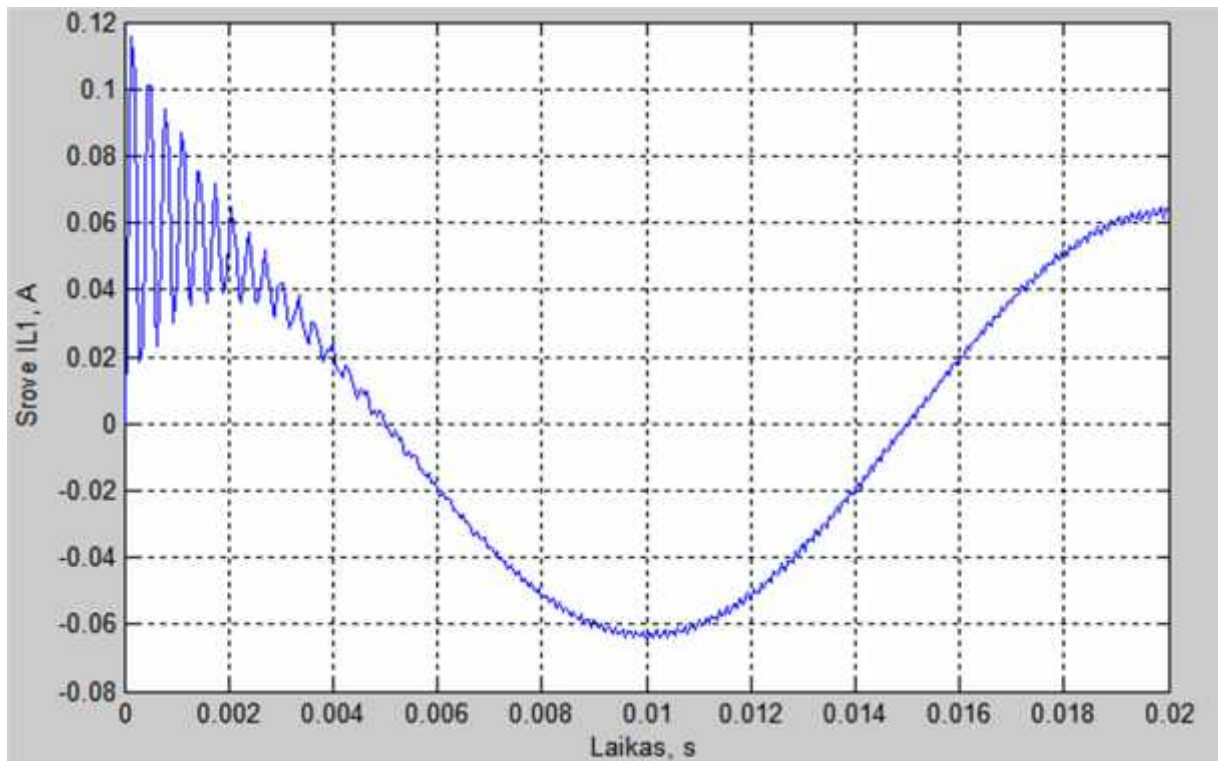
$$\frac{dU_2}{d} = \frac{i_{L2}}{C_4} - \frac{U_2}{R_u \cdot C_4}.$$

### 3.2.3 B senos lyg i metodas diferencin mis lygtims sp sti 2 modeliui.

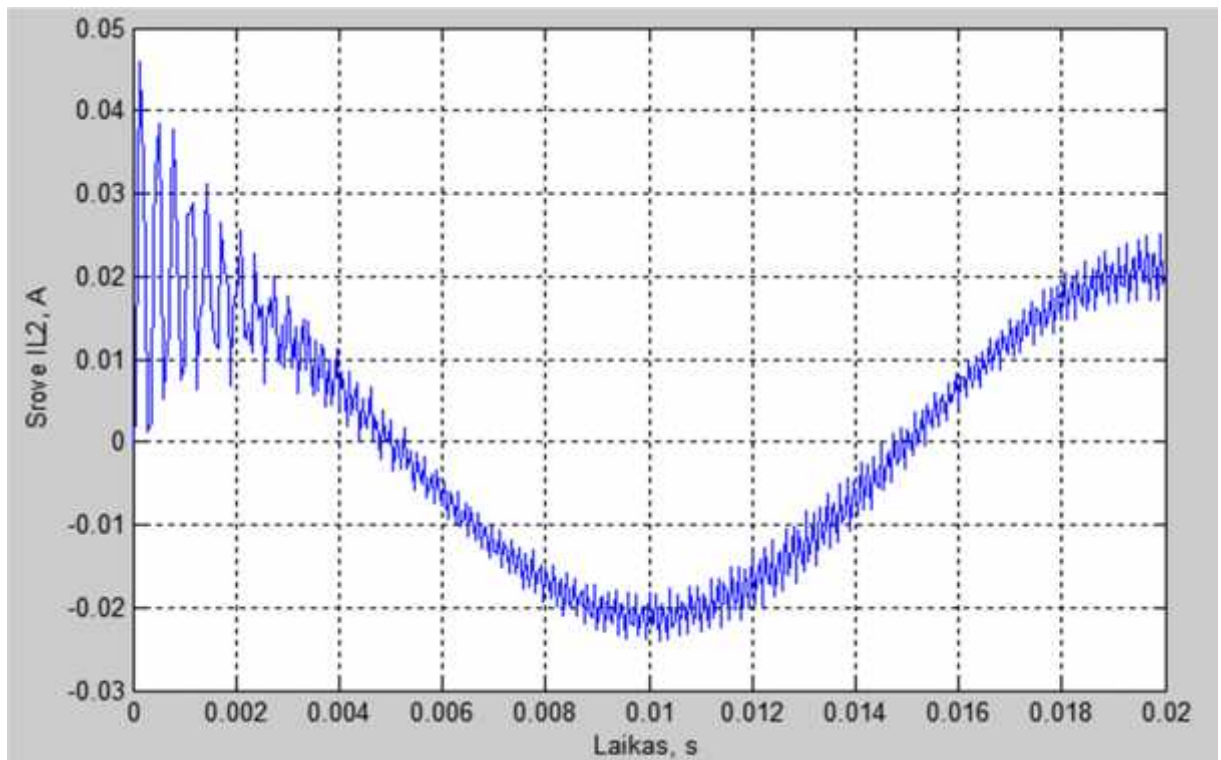
Pagal žinomus linijos parametrus pagal 8 formul sudarome matricas:

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

Gautus pereinamojo proceso rezultatus pateikiame grafiniu pavidalu.



3.8 pav. Pereinamojo proceso srov  $i_{L1}$  matavimas



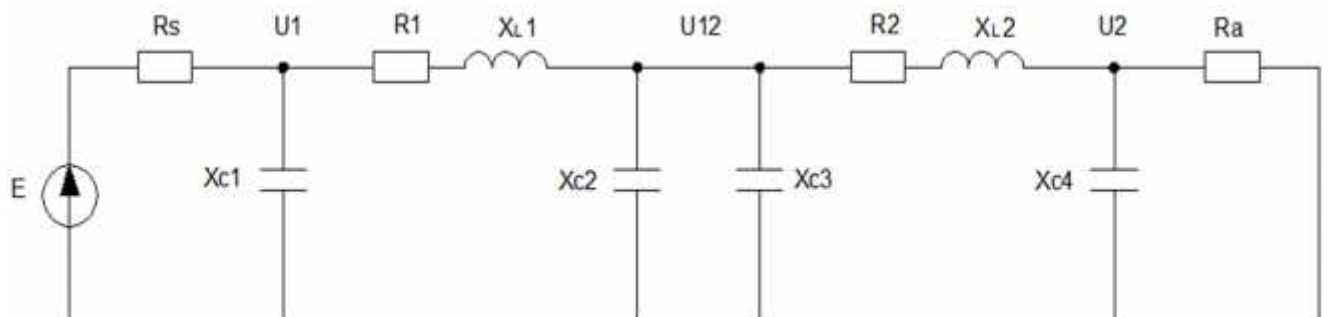
3.9 pav. Pereinamojo proceso srov  $i_{L2}$  matavimas

### 3.2.4 Efektini reikšmi skai iavimas 2 modeliui.

3.2 lentel . 2 modelio parametrai.

Talpa C, $\mu\text{F}$	Induktyvumas L, mF	Apkrovos varža $R_a$ ,	Sistemos varža $R_s$ ,	Linijos varža R,	Sistemos tampa E, V	Dažnis f, Hz
4	1,5	$1 \cdot 10^6$	1	0,5	67	50

vedame žym jimus  $R_1 = R_2 = R/2$  .



3.10 pav. Ekvivalentin schema

### Sumin s varžos skai iavimas 2 modeliui

Talpioji varža skai iuojama pagal formul :

$$X_{L1} = X_{C2} = X_{C3} = X_{C4} = \frac{1}{j \cdot 1/4} = \frac{1}{j \cdot 314 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{4}} = j3183,1 \Omega;$$

Induktyvioji varža skaičiuojama pagal formulę:

$$X_{L1} = X_{L2} = j \cdot 1/2 = j \cdot 314 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} / 2 = 0,2356 \Omega;$$

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

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

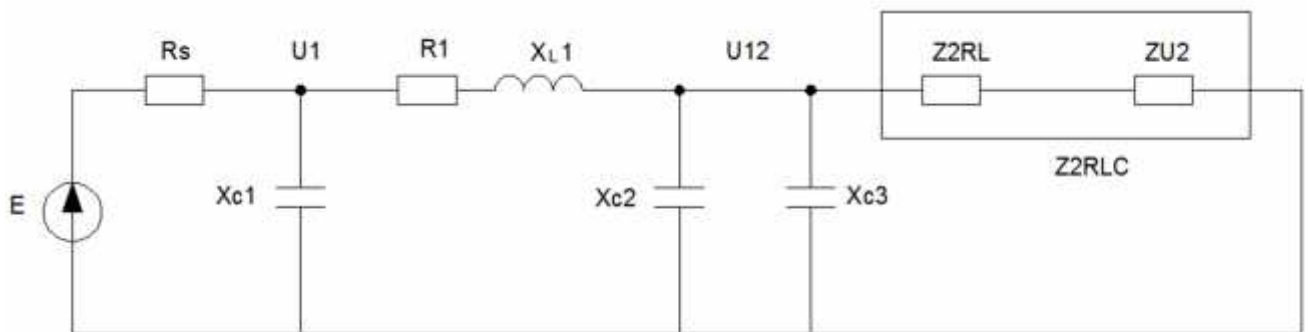
prastiname schemą toliau, nuosekliai jungiame  $R_2$  ir  $X_{L2}$ :

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

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  $X_{C3}$ :

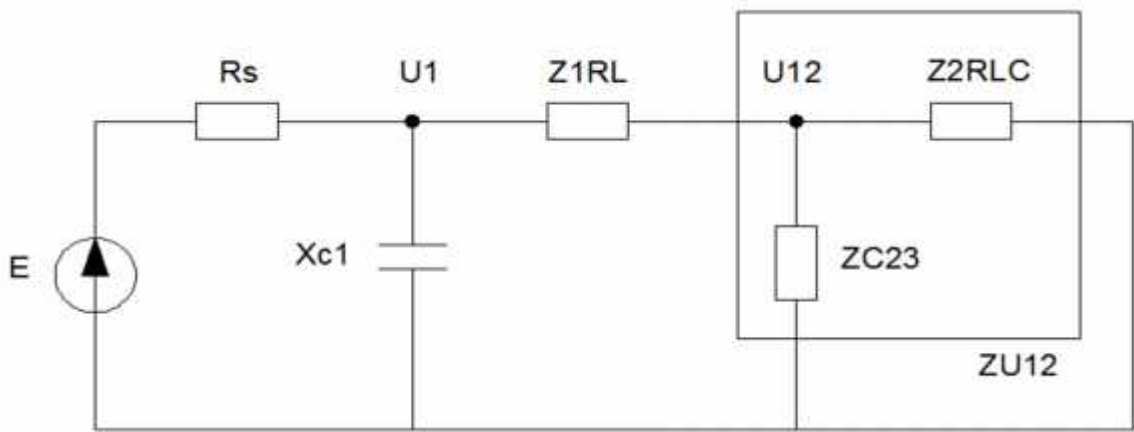
$$Z_{C2} = \frac{(-X_{C2}) \cdot (-X_{C3})}{(-X_{C2}) + (-X_{C3})} = \frac{(-j3183,1) \cdot (-j3183,1)}{(-j3183,1) + (-j3183,1)} = 0 + j0,0016 \Omega;$$

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. Ekvivalentin schema

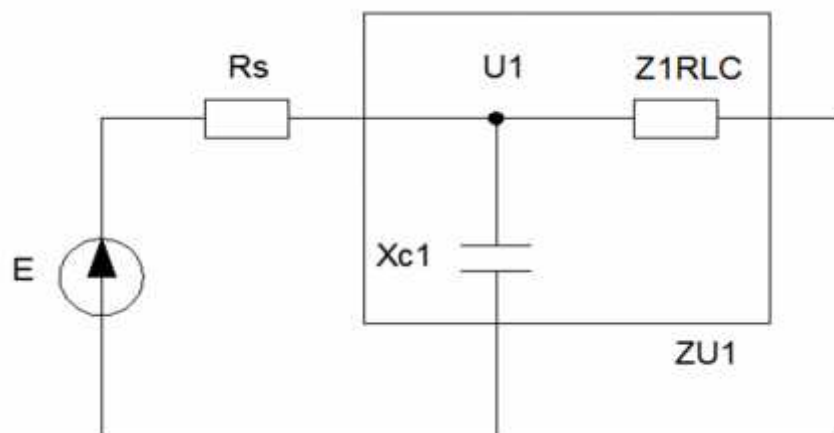
Toliau prastiname schem , nuosekliai jungiame  $Z_{U1}$  ir  $Z_{1R}$  :

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

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

lygiagre iai 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. Ekvivalentin schema

Sumin varž gauname nuosekliai sujungdami  $Z_{U1}$  ir  $R_s$  :

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

**tamp ir srovi skai iavimas 2 modeliui**

Skai iuojame srov  $I_1$  pagal formul :

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



skai iuojame tamp  $U_1$  pagal formul :

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

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

skai iuojame srov  $I_{C1}$  pagal formul :

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

skai iuojame srov  $I_L$  pagal formul :

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

skai iuojame tamp  $U_1$  pagal formul :

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

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

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

skai iuojame sroves  $I_{C2}$  ir  $I_{C3}$  :

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

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

skai iuojame srov  $I_{L2}$  pagal formul :

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

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

skai iuojame tamp  $U_2$  pagal formul :

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

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

skai iuojame srov  $I_2$ :

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

### Absoliutin s vert s

Absoliutin s vert s skai iuojamos 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 Rezultat palyginimas

3.3 lentel . Skai iavimo rezultatai modelio

Skai iuojamas 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

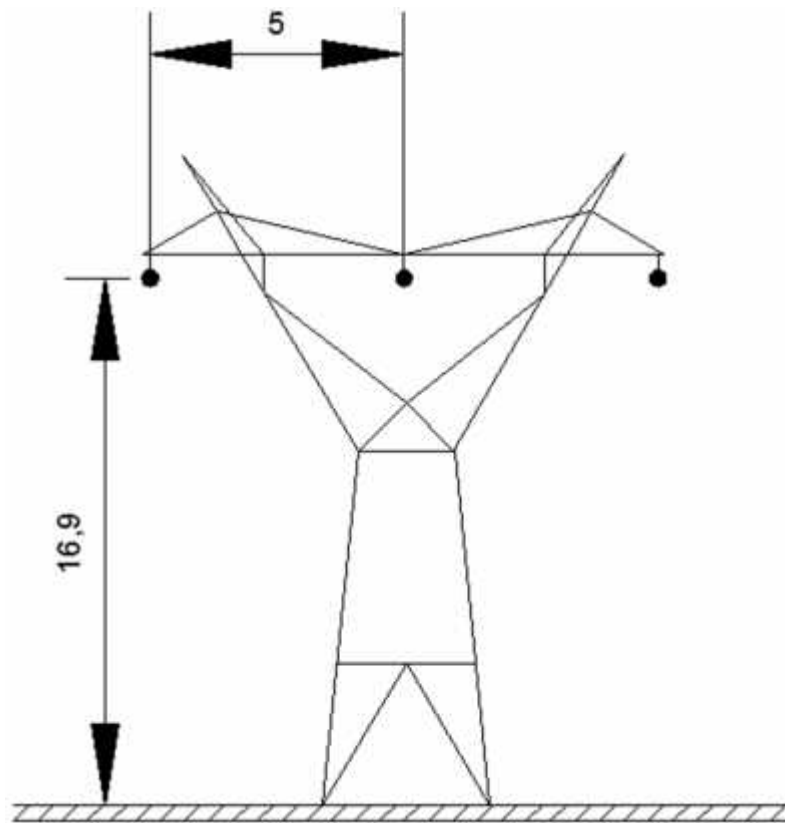
3.4 lentel . Skai iavimo rezultatai 2 modelio

Skai iuojamas 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 jungimo metu susidar s pereinamasis procesas sukelia nežymius virš tampius. Matome, kad 2 schemos atvaizdavimas yra tikslesnis. Srov s vert s tiksliau paskai iuotos, tod l užkraunant linijos talpines varžas aiškiau pastebimas pereinamasis reiškiny s. Galima teigti jog skaidant linij daugiau dali rezultatai bus dar tikslesni.

## 4. ORO LINIJOS SKAI IAVIMAI

Matematiniams skai iavimams pasirenku 330 kV metalin atram PB-5,6 su aliuminiu AC-300/39 laidininku, kurio skersmuo d=24mm.



4.1 pav. 330 kV orin s elektros perdavimo linijos atrama

#### 4.1 Geometrini parametr matricos skai iavimas

Laidinink aukštis (atstumas nuo žemės iki laidininko):

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

Laidininku tarpusavio vertikalus atstumai:

$$h_{12} = h_{23} = 5 \text{ m, } h_{13} = 10 \text{ m.}$$

Naudosime atspindžio metod , tod l pradžioje turime susidaryti geometrini parametr matric N, kuri sudarys fazi ryšiai su žeme ir tarpusavio ryšiai, kurie priklausys nuo atstum tarp laid (d<sub>xy</sub>, kur x ir y yra laid numeriai) ir atstum tarp laid ir j atspindži (D<sub>xy</sub>, kur x ir y yra laid numeriai).

$$d_{11} = 5 \text{ m;}$$

$$D_{11} = \sqrt{h_1^2 + h_1^2} = \sqrt{16,9^2 + 5^2} = 17,624 \text{ m.} \quad (4.1)$$

Tokiu pa iu principu surandame visus atstumus tarp laid . Reikia pasteb ti, kad dalis atstum bus vienodi.

Toliau seka ryši su žeme ir tarpusavio ryši vertinimas atitinkamai 4.2 ir 4.3 formul se:

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

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

Visus ryšius apskaičiuojame pagal parodytas formules ir sudarome geometrinį 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 savitasis ir abipusis induktyvumas bei talpa skaičiavimas

Turėdami geometrinį 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].

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

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

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].

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

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

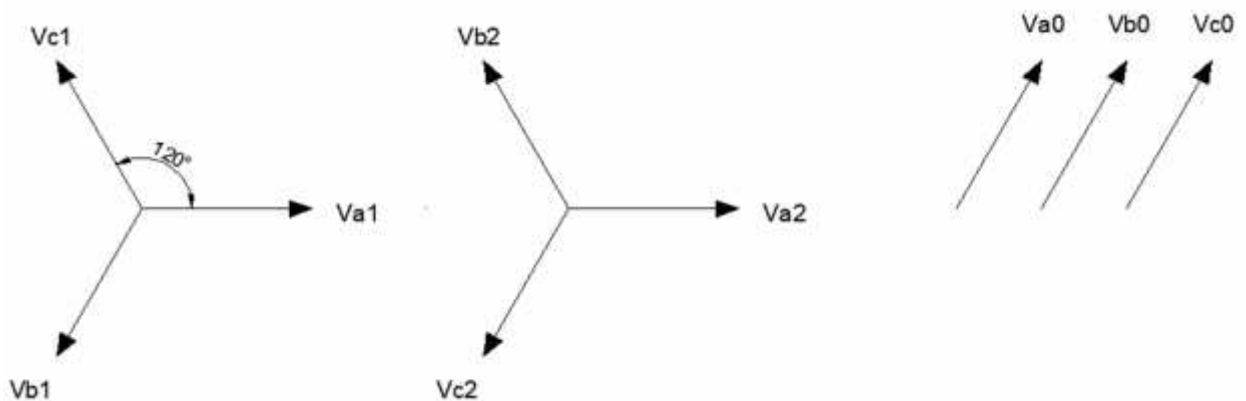
Laidininko AC-300/39 aktyvioji varža  $r=0,098$  /km. Kadangi visus kitus parametrus skaičiuojame metrais tai ir aktyvioji varžė perskaičiuosime metrus.

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

$R_f$  - laidininko varža fazin je koordinata i sistemoje.

### 4.3 Simetrini dedam j metodas sek varžoms skai iuoti

Simetrini dedam j metodas naudojamas transformuoti fazinius dydžius simetrines dedam sias. Faziniai dydžiai pakei iami tiesiogin s, atvirkštin s ir nulin s sekos dydžiais. Paveiksle 4.2 pavaizduoti vektorin s sek koordinat s.



4.2 pav. Simetrini dedam j vektoriai

Fazin s tampos gali b ti išreikšti sek 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 fazi :

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

Taip pat žinant sek vektorius galima išreikšti faziniais vektoriais su faz s 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 kamp tarp vektori ir prieš tai išreikštas lygtis galima sudaryti vektorines matricas simetrin ms 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 – operacin matrica.

Turint sek 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 skai iuojame linijos sav j ir abipusi induktyvum bei talp varžas sekose. Šioje dalyje naudosime tas pa ias impedans ir laidum matricas, tik nor dami panaikinti tarpusavio ryšius apskai iuosime tikrini ver i matricas ir iš fazini koordina i pereisime sekas. Šis per jimas yra pavaizduotas 4.9 formul je.

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

$R_f$  – aktyvioji varža faz se.

Tuo pa iu principu skai iuojame 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

<b>Sistemos (Generatoriaus) parametrai</b>	
Linijinio tinklo tampa, $U_L$	330 kV
Tinklo rėžimas	žeminta neutral
Dažnis, $f$	50 Hz
Induktyvumas, $L$	0,01658 H
Varža, $R$	0,8929
<b>Linijos parametrai</b>	
Linijos ilgis, $l$	100 km
Tiesioginio sekos aktyvioji varža, $R_1$	0,098 $\Omega$ /km
Nulinio sekos aktyvioji varža, $R_0$	0,098 $\Omega$ /km
Tiesioginio sekos induktyvumas $L_1$	$1,376 \cdot 10^{-3}$ H/km
Nulinio sekos induktyvumas, $L_0$	$2,015 \cdot 10^{-3}$ H/km
Tiesioginio sekos talpa, $C_1$	$8,115 \cdot 10^{-9}$ F/km
Nulinio sekos talpa, $C_0$	$5,527 \cdot 10^{-9}$ F/km

### 5.1 Modeliuojami rėžimai

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

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

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

Komutaciniai virš tampiai, dėl išilginės nesimetrijos. Tai tokie virš tampiai, kurie atsiranda dėl jungtuvų polių komutavimo skirtingu laiku. Atidarant ar uždarant jungtuvus tarp jų komutavimo laiką gali atsirasti laiko skirtumas, kuris iššaukia išilginę nesimetriją. Dalis perduodamos galios tenka kitoms fazoms ir to pasąkoje atsiranda nesimetrija tinkle. Bus modeliuojami tokie reiškiniai:

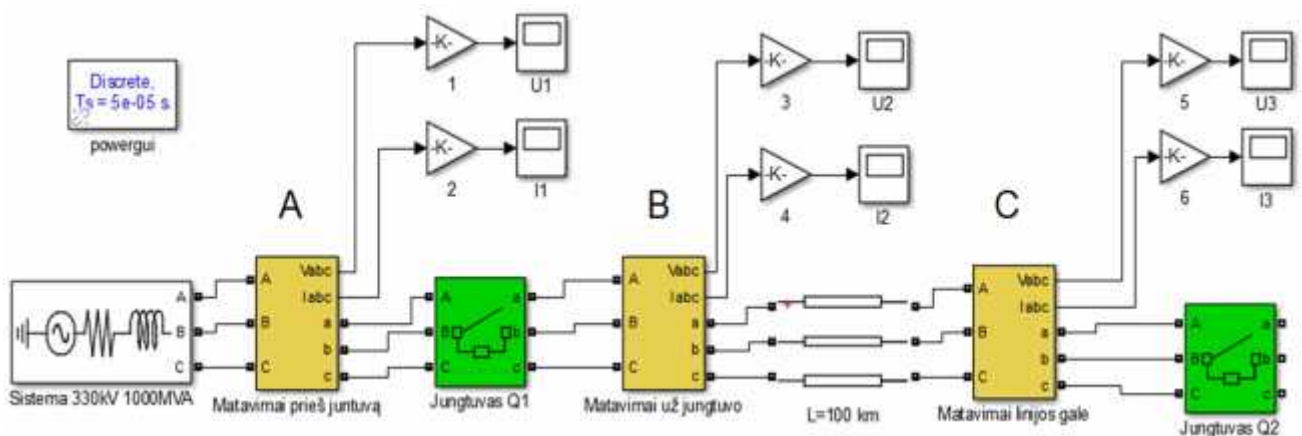
- jungiamas jungtuvas apkrovai;
- Išjungiamas jungtuvas po apkrova.

### 5.1.1 Linijos jungimas be apkrovos

Modeliuojame elektros linijos jungimą be apkrovos. Naudojame MATLAB Simulink bibliotekoje esančius blokus. Komutuojuame linijos pradžioje esančius jungtuvus Q1 (A, B ir C fazes). Jungtuvai uždaromi praėjus 10 ms po modeliavimo pradžios. Modeliavimo trukmė – 1 periodas 50 Hz sistemoje.

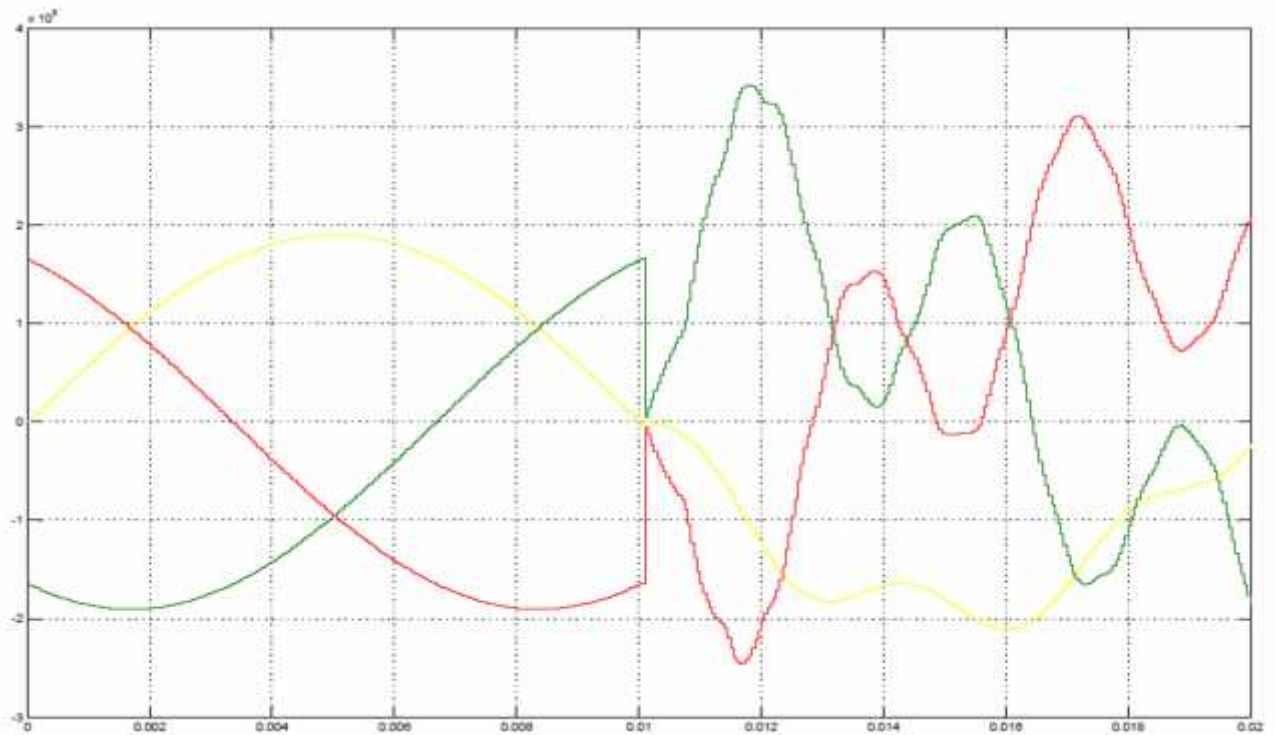
5.2 lentelė.

Modeliavimo žingsnis, $\mu$ s	Modeliavimo trukmė, ms	Komutuojami jungtuvai	Komutavimo laikas, ms
50	20	Q1	10

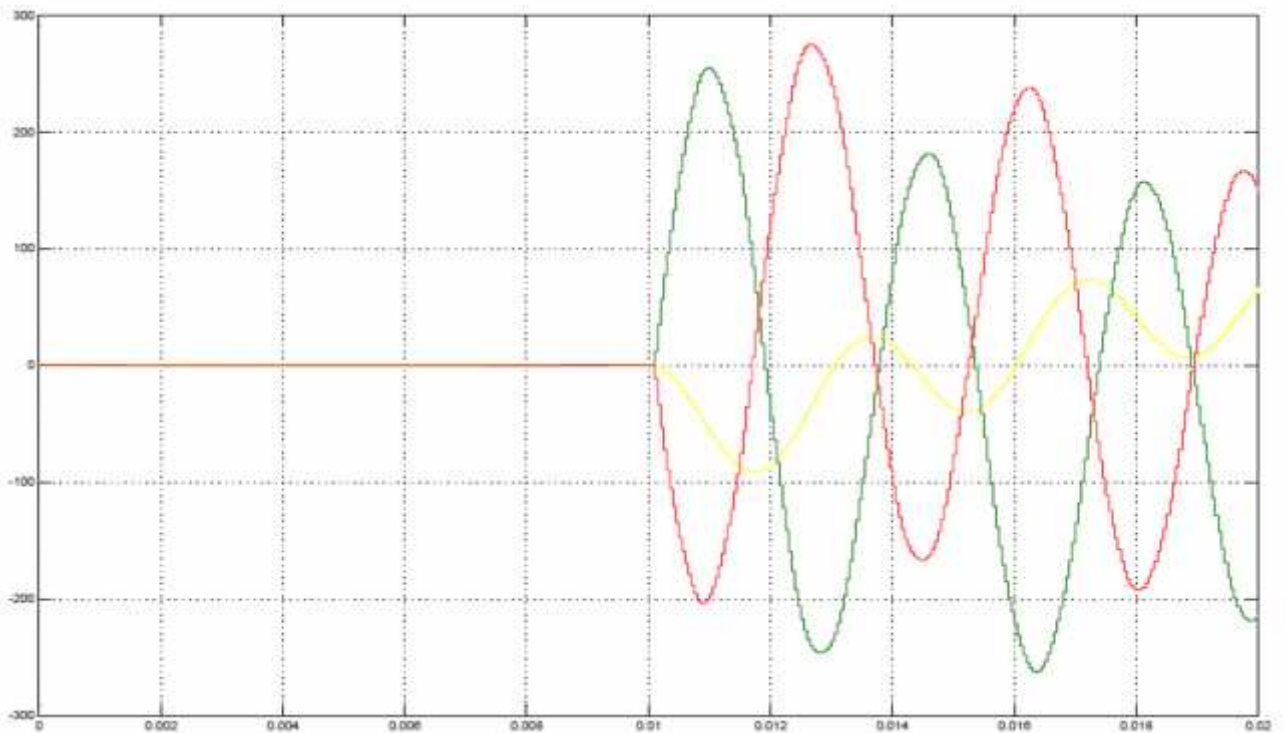


5.1 pav. Modeliuojama schema, kai jungiama orinė elektros perdavimo linija be apkrovos jungtuvu Q1





**5.2 pav.** tampos matavimas taške A, kai jungtuvai Q1 komutuoja linijos pradžioje.

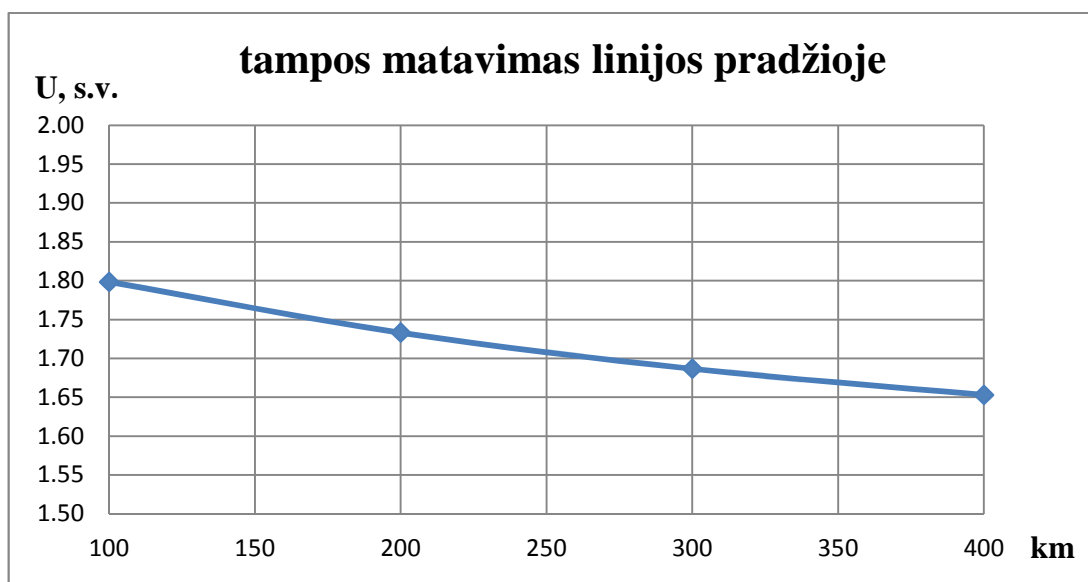


**5.3 pav.** Srovės matavimas taške A, kai jungtuvai Q1 komutuoja linijos pradžioje.

Atlikus matavimus matome, kad prijungus ilgą liniją be apkrovos matomos ryškūs tampos d l linijoje atsiradusi atspindžiai. Srovės linijos pradžioje taip pat sukyla, nes jungiant jungtuv užkraunamos linijoje esančios talpinės varžos. Tępi ir srovės matavimo rezultatai pateikiami lentelės.

**5.3 lentel .** tampos matavimai linijos pradžioje

Linijos ilgis, km	Virš tampus, s.v.	Nusistov jusi tampa s.v
100	1,798	1,029
200	1,733	1,060
300	1,692	1,098
400	1,653	1,134

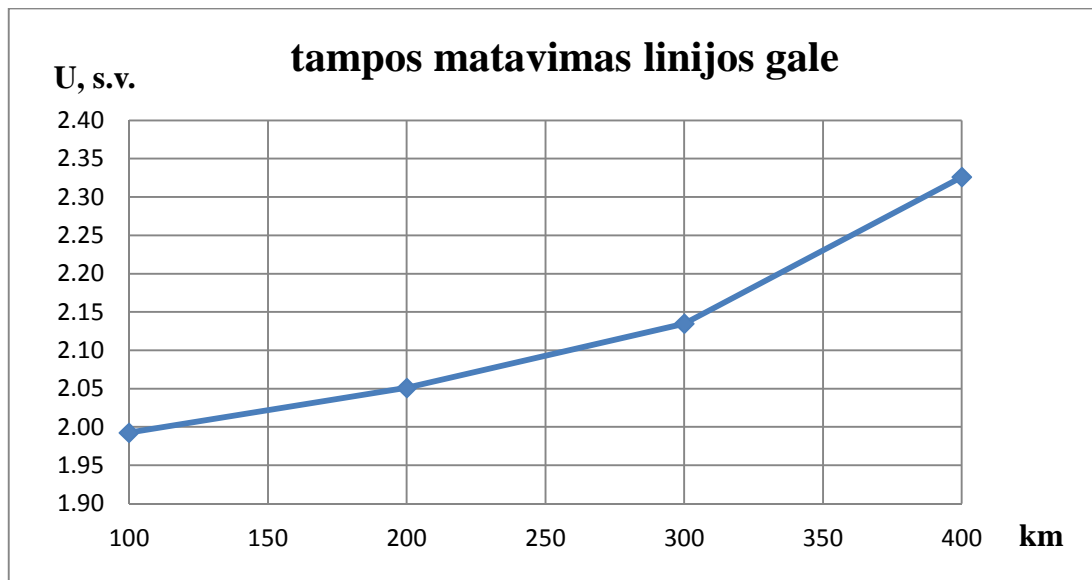


**5.4 pav.** Virš tampo dydžio priklausomyb nuo linijos ilgio

tampus matavimo rezultatai linijos gale pateikiami lentel je nr. 5.3.

**5.4 lentel .** tampos matavimai linijos gale

Linijos ilgis, km	Virš tampus, s.v.	Nusistov jusi tampa s.v
100	1,798	1,029
200	1,733	1,060
300	1,692	1,098
400	1,653	1,134

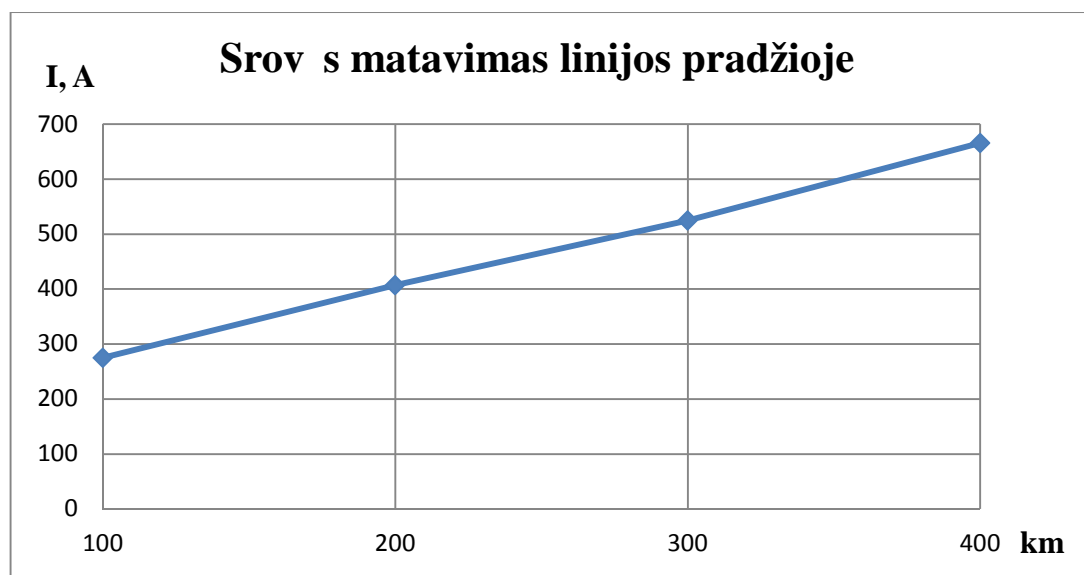


**5.5 pav.** Virš tampo dydžio priklausomybė nuo linijos ilgio

Srovės matavimo rezultatai linijos pradžioje po linijos jungimo.

**5.5 lentelė.** Srovės matavimai linijos pradžioje.

Linijos ilgis, km	Maksimali srovė	Talpuminis 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 varžai parametrai paliekami pagal nutylėjimą. Parenkama antrinis grandinės tampa 110 kV, dažnis 50 Hz, jungimo grupė Yg – Yg, galia 300 MVA.

Modeliavimu atjungiant apkrautą transformatorių siekiama parodyti kokie atsiranda virštampiai sistemai netekus apkrovos srovės. Atliekami 4 matavimai prieš skirtingą apkrovą. Modeliavimo trukmė 40 ms. Jungtuvai Q2 bus atidaromi 10 ms nuo modeliavimo pradžios, modeliavimo žingsnis 50 μs.

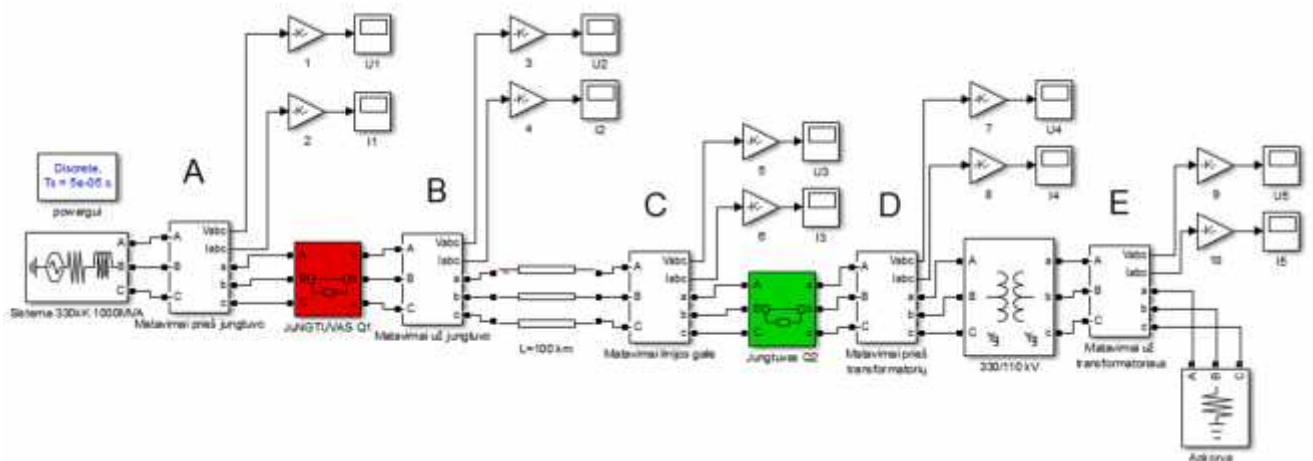
5.6 lentelė. Modeliavimo duomenys

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

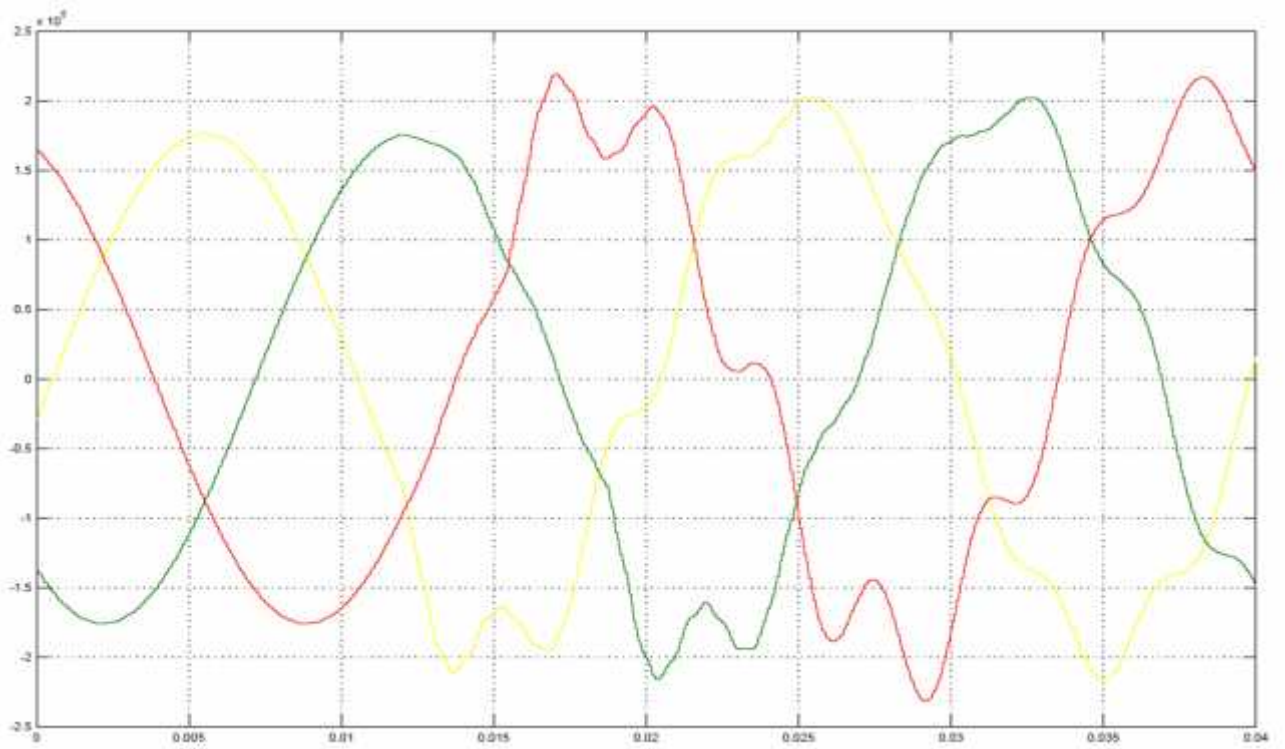
Pirmoji apkrova bus tik aktyvinė pobūdžio. Apkrovos duomenys pateikiami lentelėje.

5.7 lentelė. Apkrovos duomenys

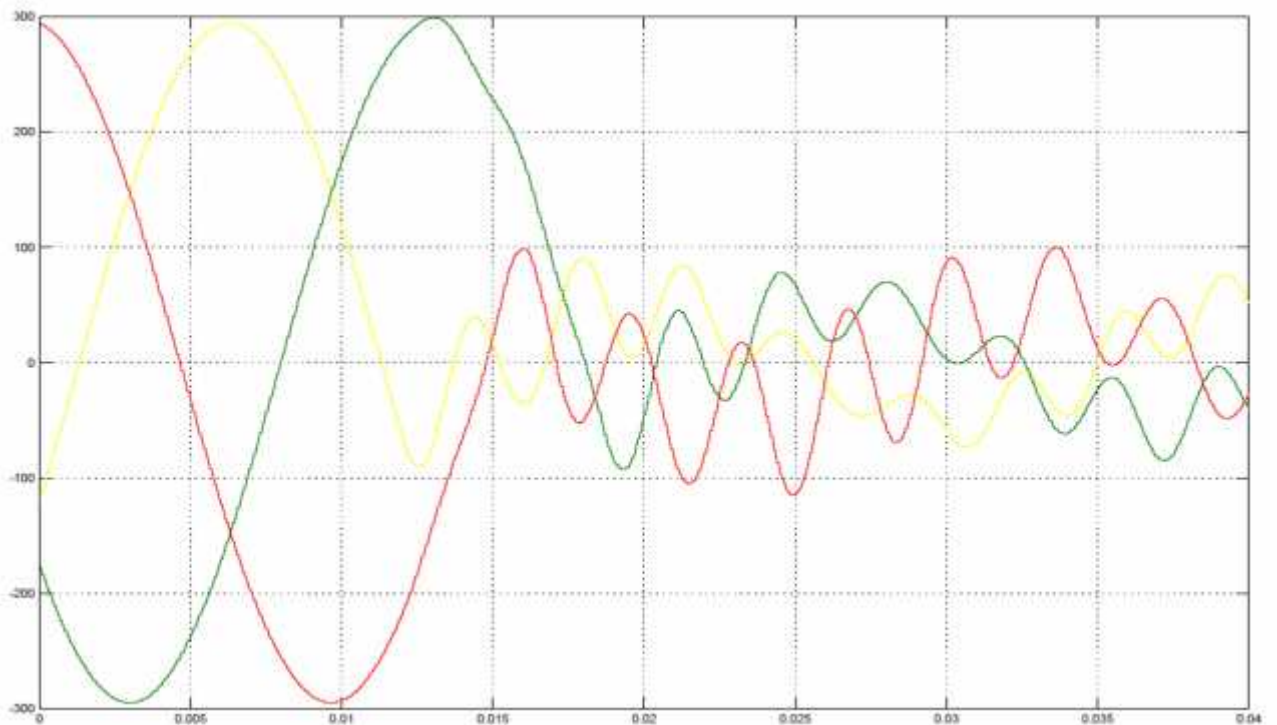
P, MW	Q <sub>L</sub> , Mvar	S, MVA
49	10	50
98	20	100
147	30	150
196	40	200



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



**5.8 pav.** tampos 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

tampos ir srovės matavimo linijos pradžioje, taške A, atjungus apkrautą galios transformatori pateikiami lentelėje 5.7.

**5.8 lentelė .** tampos ir srovės matavimai linijos pradžioje

Apkrova, MVA	Apkrovos srovė, A	Maksimali tampa 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.** Virš tampo kitimas nuo apkrovos srovės

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

**5.9 lentelė .** tampos ir srovės matavimai linijos gale

Apkrova, MVA	Apkrovos srovė, A	Maksimali tampa, 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 virš tampo dydis tiesiogiai priklauso nuo apkrovos, o jei tiksliau nuo apkrovos srovės. Kuo didesne srove buvo apkrautas galios transformatorius, tuo didesnis virš tampus susidarė komutacijos metu.

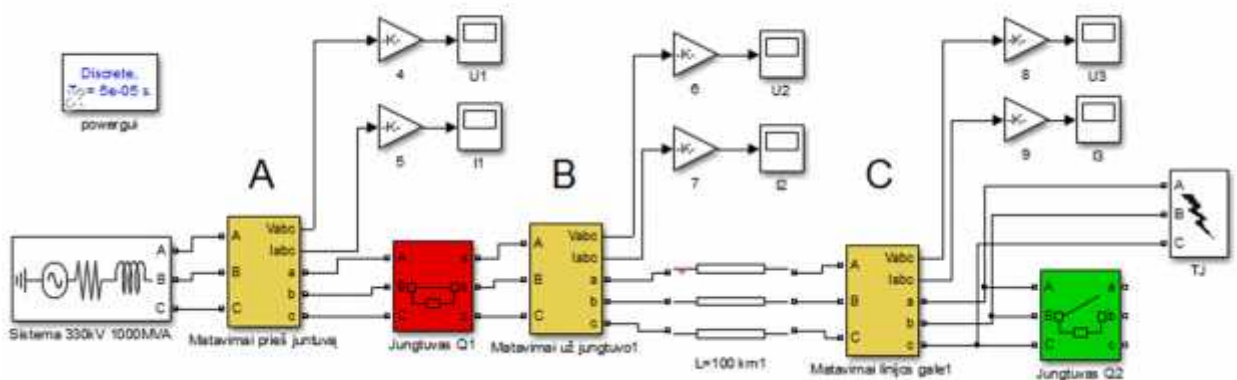


### 5.1.3 Linijos išjungimas po trumpo jungimo

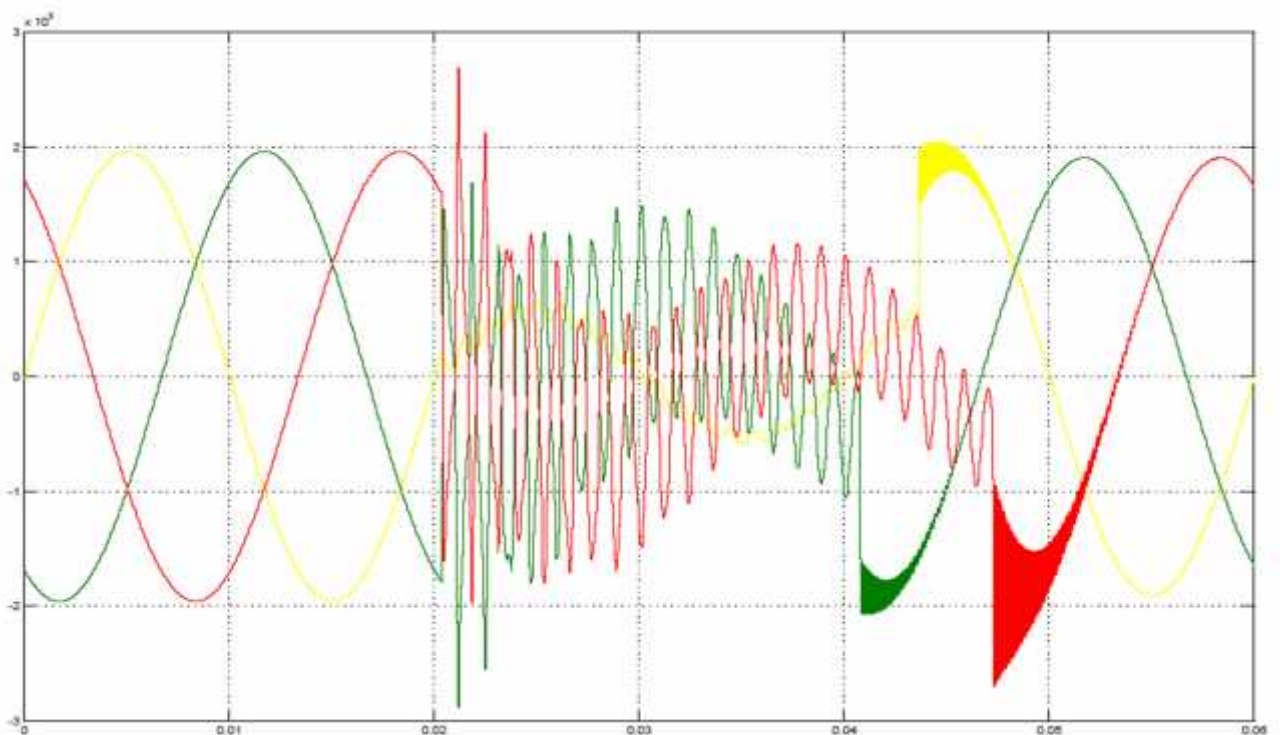
Modeliuojamas trifazis trumpas jungimas linijos gale kai n ra apkrovos. Modeliavimas atliekamas tokia seka: linijos gale 20 ms imituojamas trifazis trumpas jungimas, 40 ms linijos pradžioje esan iu jungtuvu Q1 išjungiama linija. Modeliavimo trukm 60 ms, modeliavimo žingsnis 50  $\mu$ s.

5.10 lentel . Modeliavimo duomenys

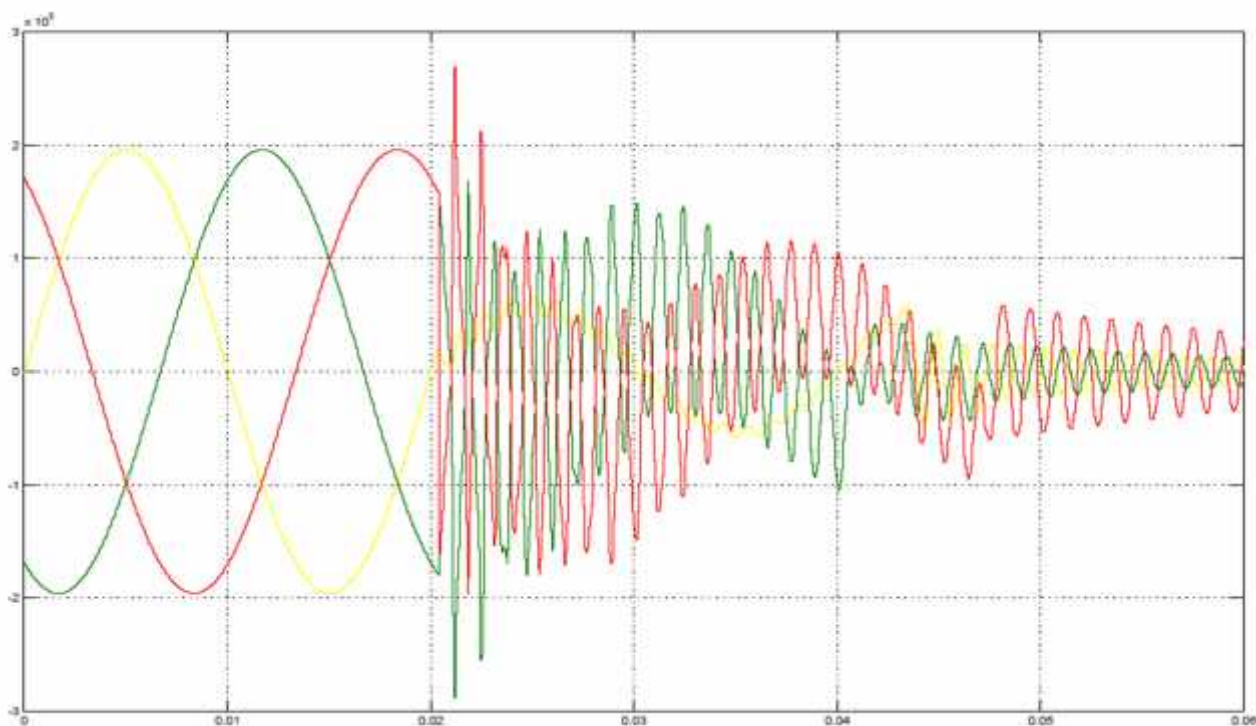
Modeliavimo žingsnis, $\mu$ s	Modeliavimo trukm , ms	Trumpo jungimo laikas, ms	Komutuojami jungtuvai	Komutavimo laikas, ms
50	60	20	Q1	40



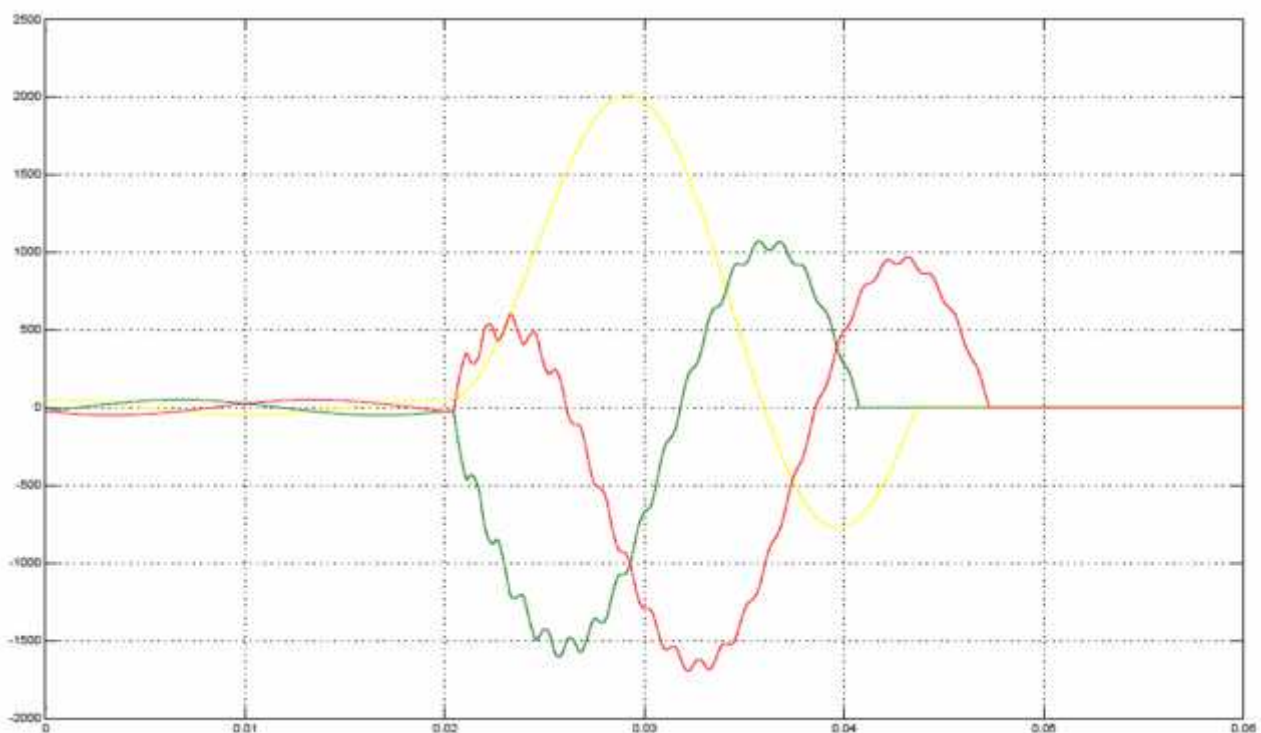
5.11 pav. Modeliuojama schema kai trumpas jungimas linijos gale



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



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



**5.14 pav.** Srov s matavimas linijos pradžioje taške A, kai trumpas jungimas linijos gale.

Lentel je nr. 4.15 pateikiame ir kit tip trump j jungimo srovi ir virš tampi vertes.



**5.11 lentelė** . Trumpųjų jungimų virštampai ir srovės matavimai

Trumpo jungimo tipas	Srovė, kA	tampa, 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 virštampai dėl išilginės nesimetrijos

Modeliuojame elektros linijos jungimą ir išjungimą, kai sistema turi apkrovą. Parinkdami skirtingus komutavimo laikus atskiroms fazėmis imituosime nesimetrinę elektros sistemos darbą. Komutuojame linijos pradžioje esančius jungtuvais. Naudojame MATLAB Simulink bibliotekoje esančius blokus.

### 5.2.1 Jungtuvo jungimas apkrovai

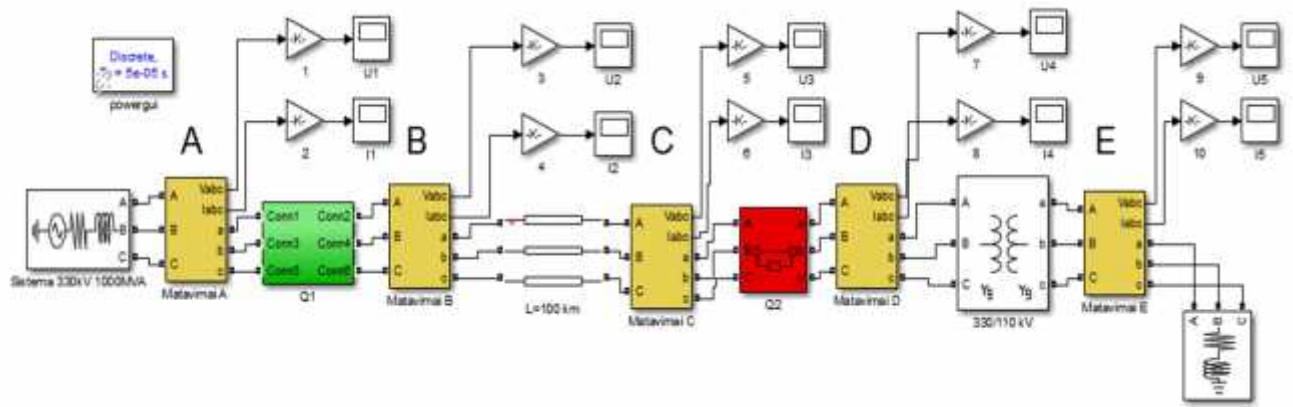
Modeliuojame jungtuvo jungimą apkrovai, kai įveikimo laikai nevienodi. Komutuojame linijos pradžioje esančius jungtuvais Q1. A ir B fazės jungtuvo polių uždaromi 40 ms, C fazės – 50 ms. Modeliavimo laikas 80 ms, žingsnis – 50 μs. Apkrovos parametrus pasirenkame laisvai.

**5.12 lentelė** . Apkrovos duomenys

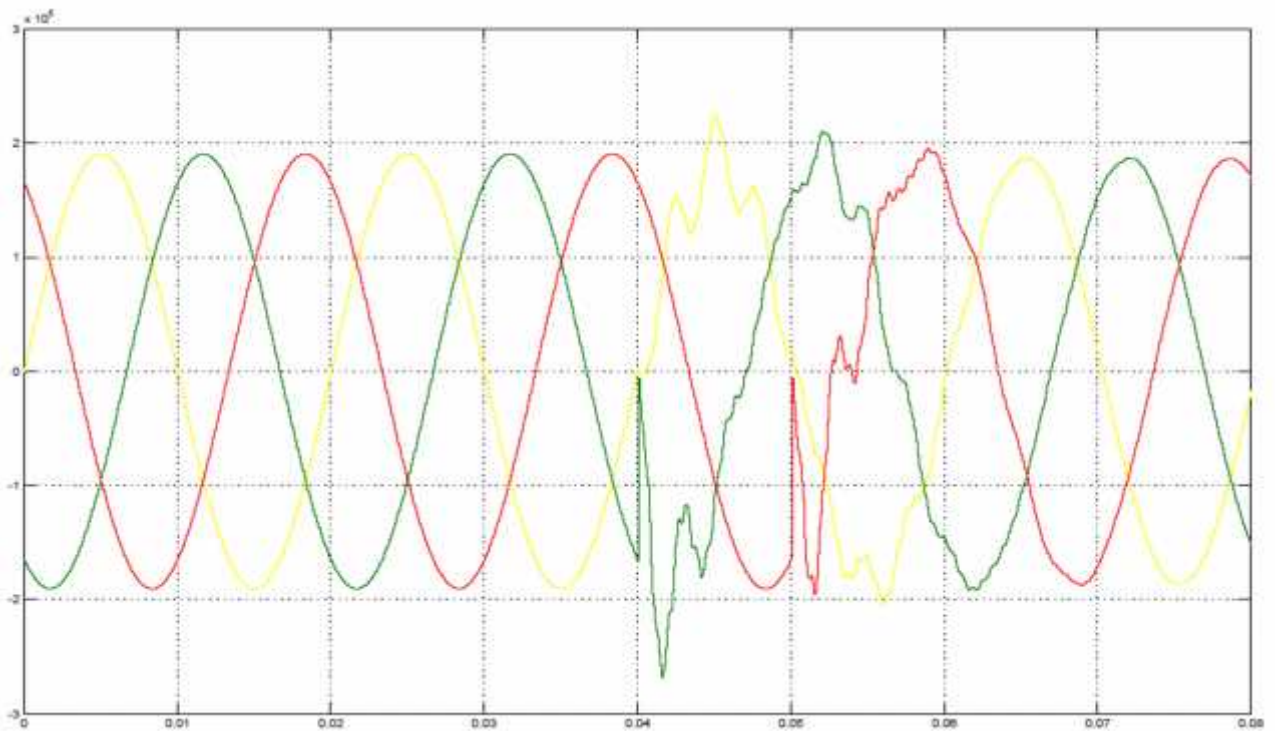
$P$ , MW	$Q_L$ , Mvar	$Q_C$ , Mvar
100	20	0

**5.13 lentelė** . Modeliavimo duomenys

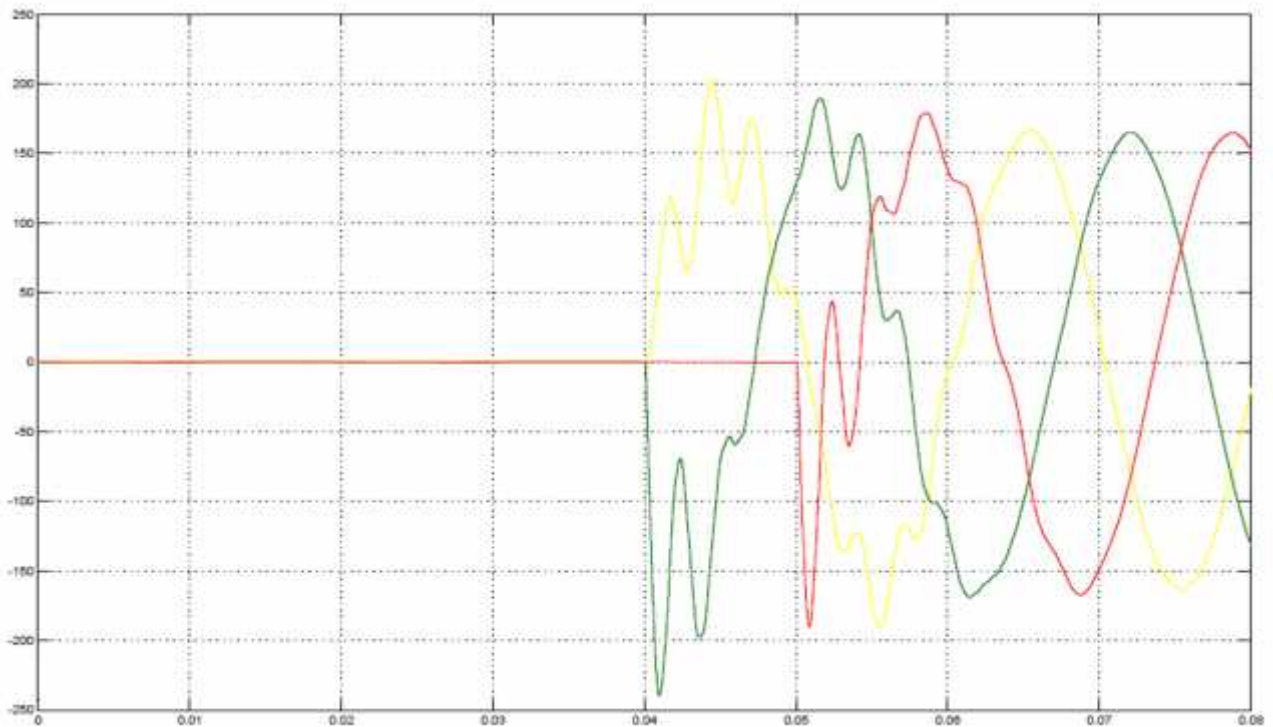
Modeliavimo žingsnis, μs	Modeliavimo trukmė, ms	Komutuojami jungtuvai	Komutavimo laikas, ms
50	80	Q1	A, B – 40 ms C – 50 ms



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



5.16 pav. tampos matavimas linijos pradžioje taške A, kai jungtuvo poliai jungiami su laiko skirtumais



**5.17 pav.** Srov s matavimas linijos pradžioje taške A, kai jungtuvo poliai jungiami su laiko skirtumais

Kaip matome iš pavaizduot srov s ir tampos oscilogram , jungtuvo poli laiko skirtumas jungimo metu turi takos gautiems rezultatams. Tiek srov s tiek tampos vert s pradiniu laiko momentu po komutacijos ženkliai padid ja lyginant su vardiniais parametrais.

Matavimo rezultatai po jungtuvo Q1 jungimo pateikiami lentel je nr. 5.14.

**5.14 lentel .** tampi ir srovi matavimai linijos pradžioje.

Matavimo vieta	Srov , A	tampa, 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

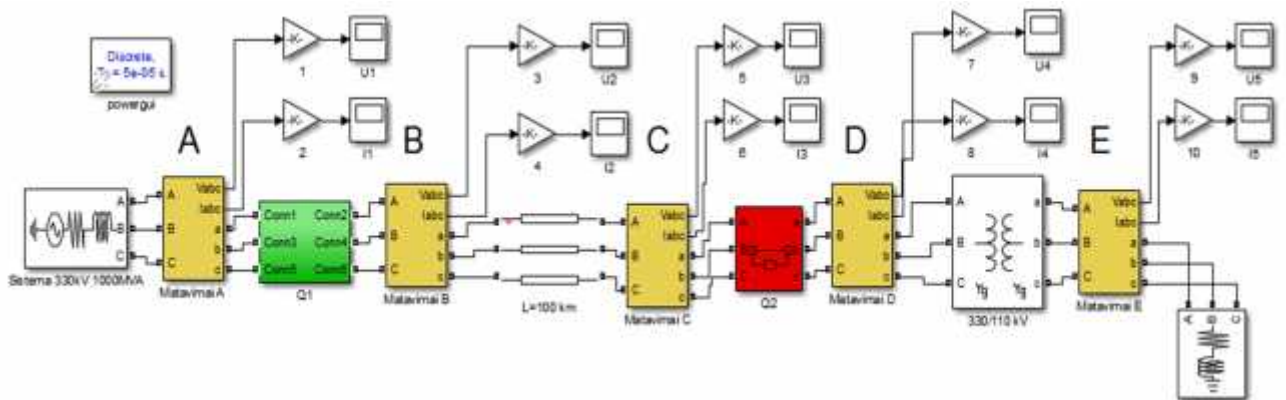
Modeliuojame jungtuv išjungim po apkrova, kai j suveikimo laikai nevienodi. Komutuojuame linijos gale esan iu jungtuvu Q2. A ir B faz s jungtuvo poliai atidaromi 30 ms, C faz s – 40 ms. Modeliavimo laikas 60 ms, žingsnis – 50  $\mu$ s. Apkrovos parametrus pasirenkame laisvai.

**5.15 lentel .** Apkrovos parametrai

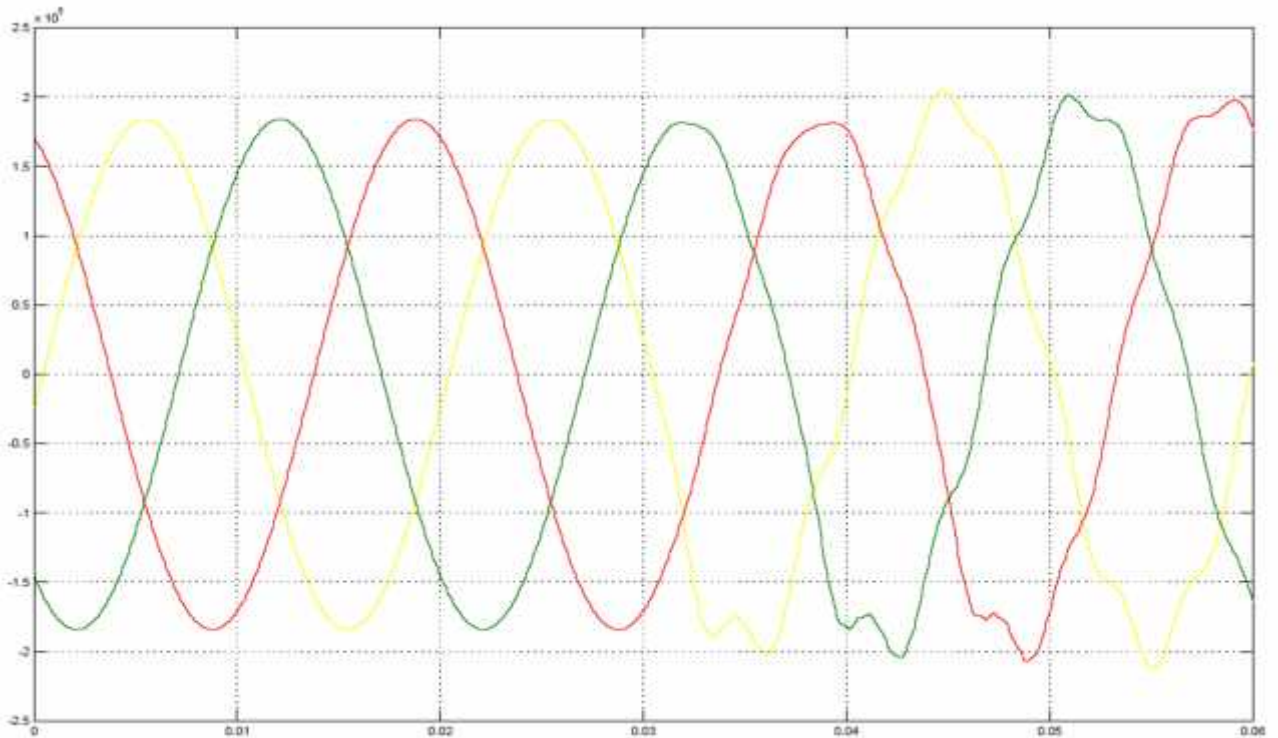
$P, \text{ MW}$	$Q_L, \text{ Mvar}$	$Q_C, \text{ Mvar}$
100	20	0

**5.16 lentel .** Modeliavimo duomenys

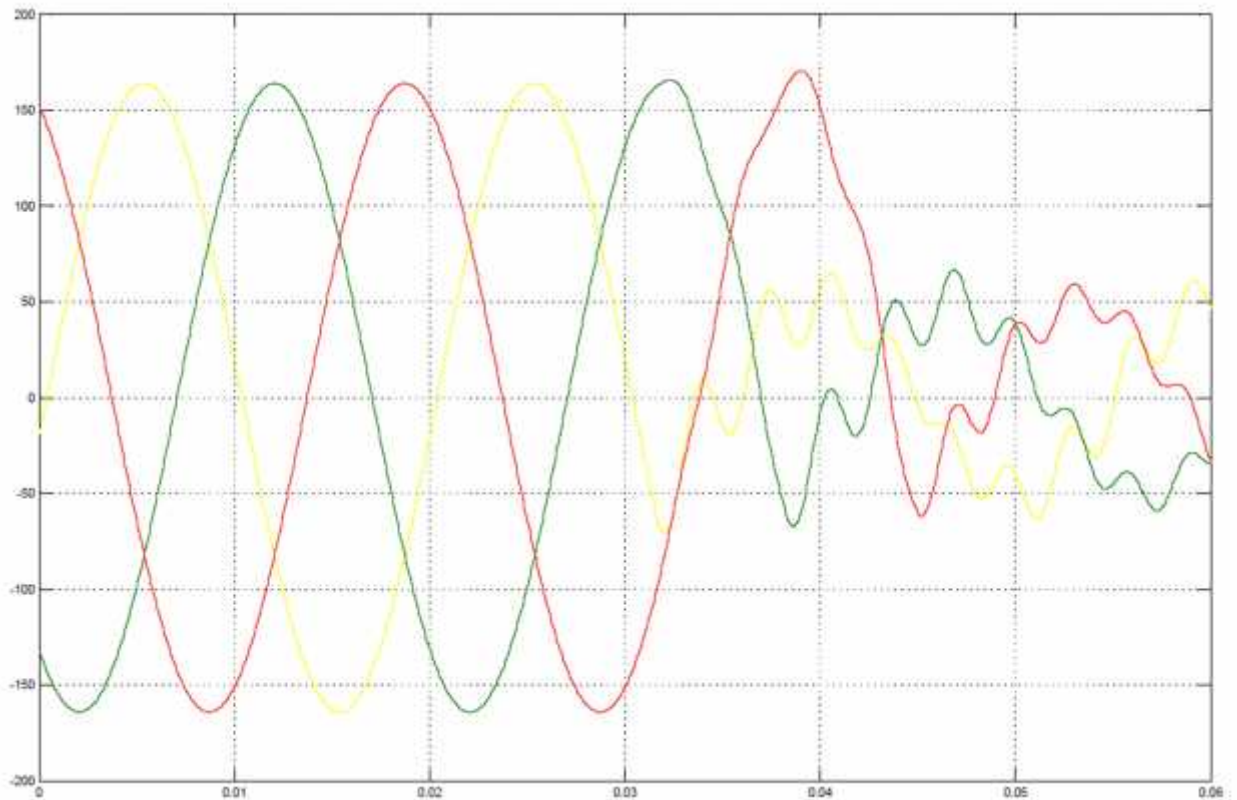
Modeliavimo žingsnis, $\mu\text{s}$	Modeliavimo trukmė, ms	Komutuojami jungtuvai	Komutavimo laikas, ms
50	60	Q2	A, B – 30 ms C – 40 ms



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



**5.19 pav.** tampos matavimas linijos pradžioje taške B, kai jungtuvo poliai jungiami su laiko skirtumais



**5.20 pav.** Srov s matavimas linijos pradžioje taške B, kai jungtuvo poliai jungiami su laiko skirtumais

Kaip matome iš gaut rezultat matavimo taške B tampos svyravimai po komutacijos nedideli, tampa greit nusistovi.

**5.17 lentel .** tampa ir srovi matavimo rezultatai prieš jungtuvo išjungim .

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

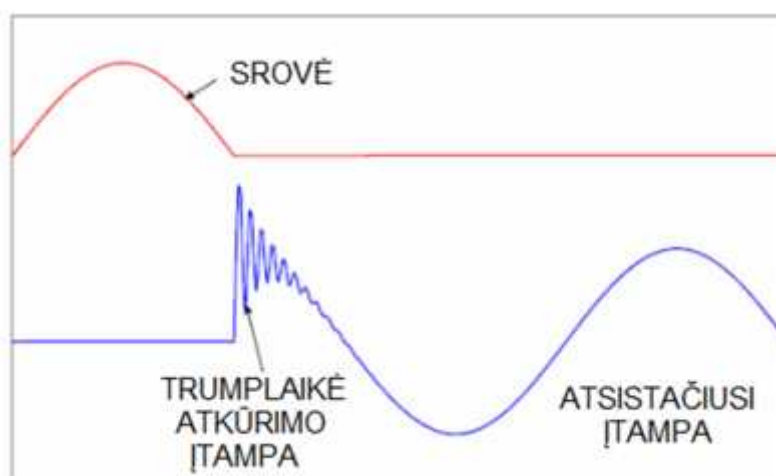
**5.18 lentel .** tampa ir srovi matavimo rezultatai po jungtuvo išjungimo.

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

### 5.3 Laikinoji atk rimo tampa

Pereinamieji procesai atsiranda kai vyksta pasikeitimai nusistovėjusios grandinės. Tokie pat procesai vyksta ir jungtuve, toks reiškinys vadinamas pereinamoji atk rimo tampa. Trumpalaikis tampos atsiradimas priklauso nuo tiriamos grandinės senos ir grandinės parametrų [6].

Nustatyta, kad laikinoji atk rimo tampa besikeičiančios grandinės rezultatas. Taigi pereinamoji atk rimo tampa gali būti charakterizuojama kaip tampos atsiradimas skersai jungtuvo po jo komutacijos. Kaip ir visiems pereinamiems procesams, laikiniai atk rimo tampa būdinga aukšta amplitudė ir dažnis. Paveiksle žemiau pateikiame laikinosios atk rimo tampos pavyzdį.



5.21 pav. Laikinoji atk rimo tampa [5]

Laikinoji atk rimo tampa galima apibūdinti kaip skirtuminis, taškas po taško, atsirandantis tampa tarp jungtuvo einančios ir išeinančios pusės. Išjungiant jungtuvą momentinis 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 srovės nutraukimui generuoja (išsaulkia) laikinį atk rimo tampa. Skirtumas tarp galios sistemos reagavimo tampos jungtuve tarp šaltinio pusės ir apkrovos vadinamas laikinoji atk rimo tampa. Jungtuvo nutraukimas laikomas skirtingu tada, kai jungtuvą pajūgus atlaikyti laikinį atk rimo tampa ir galios dažnio atsistatymo tampa. [6]

Sistemos parametrai gali paveikti laikinį atk rimo tampa. Pateikiame keletą žemiau:

- Sistemos induktyvumas ir talpumas;
- Jungtuvo, tampos transformatoriaus ir kitų reikšmės talpa;
- Trumpo jungimo srovė;



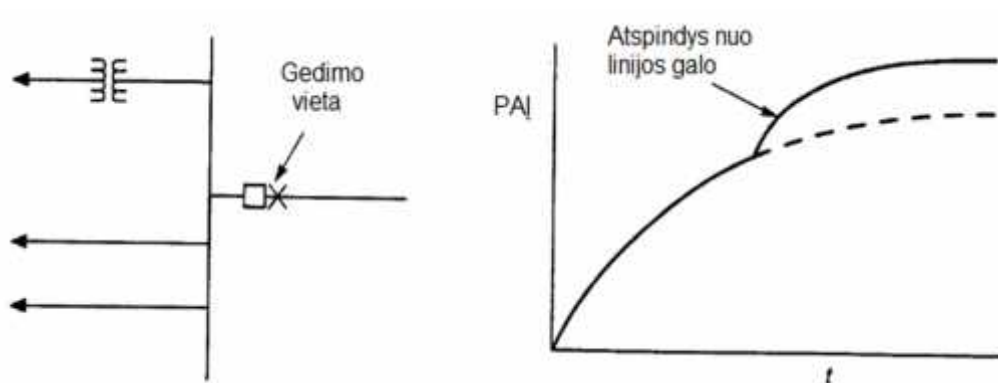
- Perdavimo linij skai ius prijungt prie šyn ir j varžin s charakteristikos;
- Vidiniai jungtuvo veiksniai, tokie kaip pirmo poliaus atjungimas;
- Sistemos tinklo r žimas.

Laikinoji atk rimio tampa skersai jungtuvo turi charakteringas bangos formas ir yra atvaizduojamos ir skirstomos :

- Eksponentin laikinoji atk rimio tampa;
- Generatorin laikinoji atk rimio tampa;
- Trumpos linijos arba trikampio bangos forma.

### 5.3.1 Eksponentin laikinoji atk rimio tampa

Eksponentin s bangos formas laikinoji atk rimio tampa tipiškai b na sutinkama jungtuvo šaltinio arba generavimo pus je. Taip pat dažniausiai b na bent keletas lygiagre i perdavimo linij prijungt prie šyn . Trumpo jungimo vieta už jungtuvo, nuo šyn pus s, kaip parodyta 5.19 pav.



5.22 pav. Eksponentin bangos forma [5]

Pagrindin s lyga atsirasti eksponentin s bangos formas pereinamajai atk rimio tampa yra:

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

$L_e$  – ekvivalentinis induktyvumas [H];

$C_e$  – ekvivalentin talpa [F];

$Z_e$  – ekvivalentinis virš tampio impedansas, kuris priklauso nuo lygiagre iai prijungt linij skai iaus ir kit sistemoje esan i element .

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

$Z_1$  – linijos tiesioginis sekos virš tampo impedansas;

$Z_C$  – linijos nulinis sekos sekos virš tampo impedansas;

$n$  – linijų skaičius;

Skersai jungtuvo atsirandanti tampa 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 gedimo vietoje, A;

$f$  – sistemos dažnis Hz;

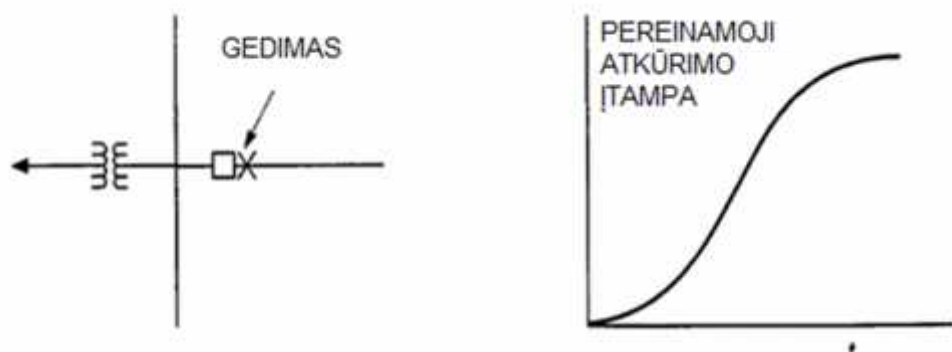
$\omega = 2\pi f$  – kampinis dažnis, rad/s;

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

Eksponentinė bangos forma 2 pav. matome, kad priklausomai nuo kiekvienos prijungtos linijos prisideda beliaujanti banga, kuri pasireiškia kaip atspindys linijos, kurios galas atviras. Kuo didesnė trumpo jungimo srovė, kurios didėjimą priklauso nuo linijų skaičiaus, tuo mažesnis transformatoriaus natūralus dažnio poveikis pereinamajai atkūrimo tampai. Tampas atkūrimo greičio rodiklis turi tendenciją mažėti, didėjant trumpos grandinės srovėms [5].

### 5.3.2 Generatorin laikinoji atkūrimo tampa

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



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

tampa skersai jungtuvo:



$$V_C = E_1 \left( 1 - e^{-\alpha \left( c \cdot h\beta + \frac{a}{b} s \cdot h\beta \right)} \right); \quad (5.4)$$

Jeigu prie šyn n ra daugiau prijungt linij ir nevertiname aktyvi j varž :

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

kur,

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

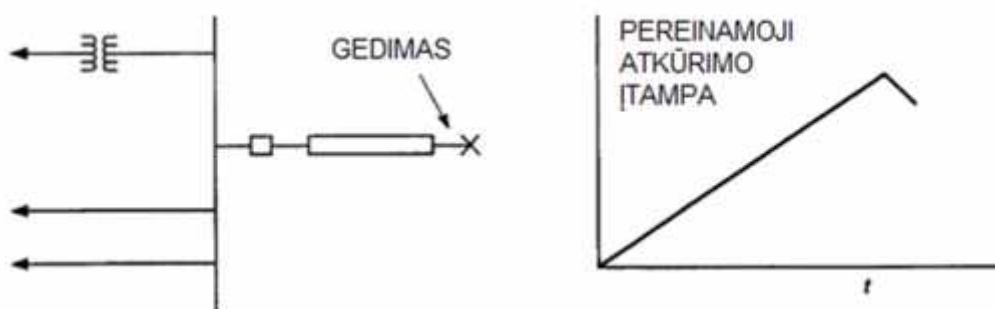
$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{L_e C_e}}. \quad (5.7)$$

S lyga, kad b t generatorin bangos forma:

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

### 5.3.3 Trikamp bangos forma

Tokia bangos forma gaunama kai trumpas jungimas elektros perdavimo linijoje netoli jungtuvo. Trikampio formos banga susiformuoja linijos pus je. Pj klo formos pereinamoji atk rimo tampa susidaro d l didel s spartaus tampos atk rimo grei io rodiklio. Tyrimas remiasi kliaujan ios bangos metodu elektros linijoje [8].



5.24 pav. Trikampio bangos forma [7]

Pereinamoji atk rimo tampa skersai jungtuvo gaunama:

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

$V_L$  – linijos tampa (apkrovos);  $V_S$  – šaltinio tampa.

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

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

$t_d$  – pereinamosios atk rimo tamos laiko delsa šaltinio pus je, s;

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

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

$I_L$  – avarijos srov , kA;

$M$  – santykis avarijos srov s ir trumpojo jungimo srov s;

$E_m$  – maksimali tampa, kV.

### 5.3.4 Linijos parametr skai iavimas

Naudosim s 5.1 lentel s duomenimis.

Linijos aktyvioji varža linijos ilgiui:

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

Tiesiogin s ir nulin s sekos induktyvumai:

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

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

Ekvivalentinis induktyvumas:

$$L_e = \frac{3L_0L_1}{L_1 + 2L_0} = \frac{3 \cdot 1,376 \cdot 10^{-3} \cdot 1,376 \cdot 10^{-3}}{1,376 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,015 \cdot 10^{-3}} = 0,001539 \text{ H/km}.$$

Skai iuojant tinkle su žeminta neutrale trifazis trumpas jungimas su žeme:

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

Tiesiogin s ir nulin s 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  $X_1 = L_{1\omega}$ ,  $X_0 = L_{0\omega}$ ;

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

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

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

Bangin varžos sekose:

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

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

Bangos greitis :

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

Efektin bangin varža:

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

Smail s 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 srov

Generatoriaus reaktansas kai skai iuojama trumpo jungimo srov iškart už generatoriaus apskai iuojamas.

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

Sumin generatoriaus varža apskai iuojama:

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

Trumpo jungimo srov 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. srov s 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 smail s:

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

Santykis tarp avarijos srov s ir maksimalios trumpo jungimo srov s:

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

Linijos pus s tampa:

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

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

Šaltinio pus s tampa ( $t_d = 0$ ):

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

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 smail s:

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

Pirmoji smail pereinamosios atk rimo tampos:

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

Atkuriamos tampos kilimo greitis:

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

Santykis laikinosios atk rimo tampos ir nusistov jusio b senos maksimalios tampos jungtuve prieš avarij :

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

**5.19 lentel .** Skai iavimo rezultatai.

Maksimali trumpo jungimo srov	36,578 kA
Trumpo jungimo srov avarijos vietoje	3,445 kA
Laikas iki pirmosios smail s	63,145 $\mu$ s
Linijos pus s tampa	488,24 kV
Šaltinio pus s tampa	11,55 kV
Laikinoji atk rimo tampa	499,79 kV
Atkuriamos tampos kilimo greitis	7,915 kV / $\mu$ s

## 5.4 Jungtuvo parinkimas

Žinodami laikinosios atk rimo tampos dyd , maksimali trumpo jungimo srov ir kitus reikalingus parametrus galime pasirinkti tinkam jungtuv .

**5.20 lentel .** Jungtuv parametrai

	ABB PMI-B	SIEMENS 3AP2	ALSTOM GL315
Nominali tampa, kV	330	330	330
Maksimali tampa, 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
Komutacini virš tampi atlaikymas, kV	825	950	950
Nominali srov , A	5000	5000	5000
Nominali trumpo jungimo srov , kA	63	50	50
Nominali pikin srov , kA	170	170	170
Išjungimo laikas, s	2 periodai	2 periodai	2 periodai
Darbin temperat ra °C	-50 ... +50	-40 ... +50	-

Remiantis gamintoj deklaruotais duomenimis galima pasirinkti bet kur iš pateikt jungtuv , nes visi jie tinka pagal gautus skai iavimo rezultatus.

## IŠVADOS

1. Diferenciniais lygtimis aprašytas ir b senos kintam j metodu išspręsti elektros perdavimo linijos  $P_1$  ir  $2 P_1$  modeliai. Linijos jungimo metu gauti pereinamojo proceso rezultatai parodė kaip atrodo t pa i parametr ų linijos modelis kai elektros grandin skaičiuojama dviem modeliais. Pateikti pereinam j proces ų grafikai, proceso trukmė 0,02 s arba 1 periodas 50 Hz sistemoje.

2. Pagal realius 330 kV orin s elektros perdavimo linijos atram ų ir laidininko AC 300/39 parametrus suskaičiuoti induktyviniai ir talpiniai tarpusavio ryšiai. Simetrini ų dedam j metodu perskaičiuoti faziniai dydžiai sek dydžius, kuriuos naudosime modeliuojamame tinkle.

3. Matematinė programa MATLAB sumodeliuoti dažniausiai pasitaikantys komutaciniai virš tampiai. Orin s 100 km elektros perdavimo linijos be apkrovos jungimo metu užfiksuota maksimali virš tampo vertė linijos pradžioje 1,8 s.v., linijos gale - 2.0 s.v. Toks virš tampo dydis susidaro d l linijoje susidaran i atspindži . Taip pat komutacijos metu matoma srov atsirandanti užkraunant linijos talpinio pob džio varžas. Galimas sprendimo b das jungti linij su apkrova arba jeigu yra galimyb trumpinti linij jungiant trumpesn is distancijomis.

4. Atjungiant apkraut galios transformatori pasikei ia modeliuojamos sistemos strukt ūra. Matomas pereinamasis procesas, kuris atsiranda jungtuvo nutraukimo metu sukuriama elektros lanko. Virš tampo lygis priklauso tiesiogiai nuo apkrovos srov s dydžio, did jant apkrovos srovei did ja ir virš tampus. Atjungiant galios transformatori rekomenduojama sumažinti apkrov .

5. Jungtuvo poli susijungimo laiko nesutapimas sukelia išilgin nesimetrij tiriamoje sistemoje. D l to atsiranda komutaciniai virš tampiai, kuri vertė jungimo metu siekia 1,4 s.v.

6. Sumodeliuotas trifazis trumpasis jungimas. Trumpo jungimo srov perdavimo linijos gale 3,45 kA. Paskaičiuotas laikinosios atk rimo tampos dydis 499,8 kV.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ RAŠAS

1. Juozas Baublys, Pranas Jankauskas, Linas Andronis Markevičius, Alfonsas Morkvėnas. *Izoliacija ir virš tampių*. Kaunas: Technologija, 2008. 307 p. ISBN 978-9955-25-472-0.
2. Alfonsas Morkvėnas. *Virš tampių poveikis elektros renginių izoliacijos senjimo procesams*. Kaunas: Technologija 2008.
3. Arieh 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