



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Vytautas Šatinskis

**KOMUTACINIŲ VIRŠĮTAMPIŲ, ĮJUNGIANT SUDĖTINGOS
KONFIGURACIJOS AUKŠTOS ĮTAMPOS ELEKTROS
PERDAVIMO LINIJĄ, TYRIMAS**

Magistro projektas

Vadovas

prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**KOMUTACINIŲ VIRŠĮTAMPIŲ, ĮJUNGIANT SUDĖTINGOS
KONFIGURACIJOS AUKŠTOS ĮTAMPOS ELEKTROS
PERDAVIMO LINIJĄ, TYRIMAS**

Magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

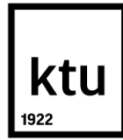
prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

Recenzentas

Projektą atliko

Vytautas Šatinskis

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Vytautas Šatinskis

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Komutacinių viršįtampių, įjungiant sudėtingos konfigūracijos aukštos įtampos elektros perdavimo liniją, tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 19 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Vytauto Šatinskio**, baigiamasis projektas tema „Komutacinių viršįtampių, įjungiant sudėtingos konfigūracijos aukštos įtampos elektros perdavimo liniją, tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad, išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Šatinskis, V. Komutacinių viršįtampių, įjungiant sudėtingos konfigūracijos aukštos įtampos elektros perdavimo liniją, tyrimas. Magistrinis baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Alfonsas Morkvėnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 54 psl.

SANTRAUKA

Komutacinių viršįtampių nustatymas elektros perdavimo linijoje yra svarbus parenkant sistemos izoliaciją. Remiantis elektromagnetinės bangos teorija ir Bergeron linijos modeliu buvo sukurtas rekurentinis matematinis modelis skaičiuojantis viršįtampius sudėtingos konfigūracijos aukštos įtampos elektros perdavimo linijos įjungimo metu. Naudojant sukurtą matematinį modelį buvo atliktas viršįtampių priklausomybės nuo įvairių parametrų tyrimas. Nustatyta, kad viršįtampiai linijos įjungimo metu priklauso nuo sistemos, prie kurios jungiama elektros perdavimo linija, įtampos fazinio kampo, ekvivalentinės varžos, įtampos dydžio. Taip pat nustatyta, kad perdavimo linijos įjungimo viršįtampiai turi kompleksinę priklausomybę nuo elektros perdavimo linijos atkarpų ilgio, atšakų skaičiaus, kabelinių intarpų skaičiaus, ilgio ir vietos elektros perdavimo linijoje. Iš tyrimo rezultatų taip pat daroma išvada, kad viršįtampiams linijos įjungimo metu banginės varžos pokytis turi nedidelę įtaką, kuri apytiksluose skaičiavimuose gali būti paneigiama.

Reikšminiai žodžiai: Bergeron linijos modelis, viršįtampis, sudėtinga konfigūracija, linijos įjungimas

Šatinskis, Vytautas. Analysis of Switching-on Overvoltages in Complex Configuration High Voltage Transmission Line. Final project of Masters degree / supervisor prof. Morkvėnas, Alfonsas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power Systems

Kaunas, 2016. 54 psl.

SUMMARY

Determination of switching-on overvoltages in power transmission line is important factor for designing system insulation. A recurrent mathematical model based on electromagnetic surge phenomena and Bergeron line model theory was designed for calculating switching-on overvoltages in complex configuration high voltage transmission line. A research of switching-on overvoltages dependence on various parameters using designed power transmission line model was carried out. It was determined, that switching-on overvoltages are influenced by system phase angle, impedance and voltage level. Furthermore, it was determined that transmission line switching-on overvoltages has a complex dependence on power transmission line sections length, number of branches, location, length and number of power cable insertions. What is more, it was determined that a variation of a wave impedance has a small influence on switching-on overvoltages which may be neglected in approximate calculations.

Keywords: Bergeron line model, overvoltage, complex configuration, line switching-on

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	6
LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
ĮVADAS	9
1 VIRŠĖTAMPIAI ELEKTROS PERDAVIMO LINIJOSE	10
1.1 Viršėtampiai linijos įjungimo metu	10
1.2 Atliktų tyrimų apžvalga	11
1.3 Viršėtampių tyrimai naudojant matematinius modelius	13
2 ELEKTROMAGNETINĖS BANGOS REIŠKINYS	15
2.1 Sklindančios elektromagnetinės bangos lygtys ir lygčių sprendinys	15
2.2 Banginė varža. Elektromagnetinės bangos sklidimo greitis	17
2.3 Sklindančios bangos lygčių fizikinė prasmė	18
3 BERGERON LINIJOS MODELIS	20
3.1 Bergeron linijos modelis trifazei elektros perdavimo linijai	21
4 MODELIO APRAŠYMAS	24
4.1 Matematinis modelis	24
4.1.1 Nekintančių laike parametrų skaičiavimas	25
4.1.2 Kintančių laike parametrų skaičiavimas	27
4.2 Elektrovaros keitimas iš fazinių koordinačių į simetrines dedamąsias	29
5 TYRIMO REZULTATAI	31
5.1 Minimalaus modeliavimo žingsnio parinkimas	31
5.2 Viršėtampių priklausomybė nuo sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinio kampo	32
5.3 Viršėtampių priklausomybė nuo sistemos įtampos vertės	34
5.4 Viršėtampių priklausomybė nuo linijos atkarpų ilgio	34
5.5 Viršėtampių priklausomybė nuo linijos atšakų skaičiaus	38
5.6 Viršėtampių priklausomybė nuo linijos banginės varžos	40
5.7 Viršėtampių priklausomybė nuo kabelinių intarpų skaičiaus	43
5.8 Viršėtampių priklausomybė nuo kabelinių intarpų ilgio ir vietos linijoje	45
5.9 Viršėtampių priklausomybė nuo sistemos ekvivalentinės varžos	48
IŠVADOS	51
LITERATŪROS SĄRAŠAS	53

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Viršįtampiai 420 kV įtampos linijos mazge linijos įjungimo metu	10
1.2 pav. Sutelktųjų parametrų (π schemos) linijos atstojamoji schema	13
2.1 pav. Paskirstytųjų parametrų elektros perdavimo linijos principinė schema	15
3.1 pav. Ekvivalentinė schema linijai be nuostolių, taikant dviejų mazgų metodą	21
3.2 pav. Ekvivalentinė schema linijai be nuostolių trijų fazių sistemoje, taikant dviejų mazgų metodą	22
4.1 pav. Modelio struktūrinė schema	24
4.2 pav. Elektrovara simetrinių ir fazinių dedamųjų koordinačių sistemose	30
5.1 pav. Oro linijos su atšaka principinė tyrimo schema	31
5.2 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinio kampo pokyčio	32
5.3 pav. Viršįtampiai 1 mazge ekvivalentinės elektrovaros faziniam kampui esant 150°	33
5.4 pav. Viršįtampiai 1 mazge ekvivalentinės elektrovaros faziniam kampui esant 0°	33
5.5 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo sistemos įtampos.....	34
5.6 pav. Principinė tiriamos elektros perdavimo linijos schema.....	35
5.7 pav. Viršįtampiai keičiant linijos atkarpos 1 - 2 ilgį	35
5.8 pav. Viršįtampiai keičiant linijos atkarpos 2 - 4 ilgį	36
5.9 pav. Viršįtampiai keičiant linijos atkarpos 2 - 3 ilgį	36
5.10 pav. Viršįtampiai mazguose keičiant elektros perdavimo linijų atkarpų ilgius	37
5.11 pav. Tiriamos oro linijos principinės schemos (50 km ilgio oro linijai su atšakomis): a) oro linija su viena atšaka, b) oro linija su dviem atšakomis, c) oro linija su trim atšakomis, d) oro linija su keturiomis atšakomis	38
5.12 pav. Tiriamos oro linijos principinės schemos (80 km ilgio oro linijai su atšakomis): a) oro linija su viena atšaka, b) oro linija su dviem atšakomis, c) oro linija su trim atšakomis, d) oro linija su keturiomis atšakomis	39
5.13 pav. Principinė tyrimo schema: a) linija su viena atšaka, b) linija su dviem atšakomis, c) linija su trim atšakomis.....	41
5.14 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo banginės varžos linijoje su viena atšaka.....	41
5.15 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo banginės varžos linijoje su dviem atšakomis	42
5.16 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo banginės varžos linijoje su trimis atšakomis	42
5.17 pav. Principinė viršįtampių priklausomybės nuo kabelinių intarpų skaičiaus tyrimo schema	43

5.18 pav. Principinė tyrimo schema viršįtampių priklausomybei nuo kabelinių intarpų ilgio ir vietos elektros perdavimo linijoje.....	45
5.19 pav. Tyrimo rezultatai 1 mazge prie skirtingų kabelinių intarpų ilgių.....	46
5.20 pav. Tyrimo rezultatai 2 mazge prie skirtingų kabelinių intarpų ilgių.....	46
5.21 pav. Tyrimo rezultatai 3 mazge prie skirtingų kabelinių intarpų ilgių.....	47
5.22 pav. Tyrimo rezultatai 4 mazge prie skirtingų kabelinių intarpų ilgių.....	47
5.23 pav. Viršįtampių priklausomybės nuo sistemos ekvivalentinės varžos tyrimo schema ..	48
5.24 pav. Viršįtampių mazguose priklausomybė nuo ekvivalentinės sistemos varžos.....	49
5.25 pav. Pereinamasi vyksmas 4 mazge, kai ekvivalentinė sistemos varža lygi 1Ω	50
5.26 pav. Pereinamasi vyksmas 4 mazge, kai ekvivalentinė sistemos varža lygi 100Ω	50

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Leistini viršįtampių lygiai	10
5.1 lentelė. Minimalaus laiko žingsnio parinkimas.....	32
5.2 lentelė. Viršįtampiai priklausomai nuo atšakų skaičiaus 50 km ilgio linijoje	39
5.3 lentelė. Viršįtampiai priklausomai nuo atšakų skaičiaus 80 km ilgio linijoje	40
5.4 lentelė. Tyrimo rezultatai kai bendras linijos ilgi 30 km	44
5.5 lentelė. Tyrimo rezultatai kai bendras linijos ilgi 70 km	44

IVADAS

Aukštos įtampos elektros perdavimo linijos įjungimo metu linijos prijungimo prie sistemos mazge, linijos atsišakojimo mazguose, oro linijos sujungimo su kabelių linijomis mazguose bei linijos prijungimo prie apkrovos mazguose atsiranda viršįtampiai, kurie sukelia izoliacijos senėjimą ir sistemos komponentų pažeidimus. Dėl šios priežasties svarbu suprasti kokią įtaką viršįtampių atsiradimui linijos įjungimo metu turi įvairūs linijos ir sistemos, prie kurios jungiama linija, parametrai.

Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra nustatyti komutacinių viršįtampių, įjungiant sudėtingos konfigūracijos aukštos įtampos elektros perdavimo liniją, priklausomybę nuo įvairių parametru. Tyrimo pagrindiniam tikslui įgyvendinti išskelti šie uždaviniai:

1. sukurti sudėtingos konfigūracijos elektros perdavimo linijos modelį skirtą modeliuoti pereinamuosius vyksmus linijos įjungimo metu;
2. nustatyti viršįtampių priklausomybę nuo sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinio kampo, įtampos vertės ir ekvivalentinės varžos;
3. nustatyti viršįtampių priklausomybę nuo linijos atkarpų ilgio;
4. nustatyti viršįtampių priklausomybę nuo linijos atšakų skaičiaus;
5. nustatyti viršįtampių priklausomybę nuo linijos banginės varžos;
6. nustatyti viršįtampių priklausomybę nuo kabelinių intarpų skaičiaus;
7. nustatyti viršįtampių priklausomybę nuo kabelinių intarpų ilgio ir vietos linijoje.

Atliktas magistro darbas yra pirmojo ir antrojo tyrimųjų projektų rezultatas. Pirmojo tiriamojo projekto metu buvo atliekama teorijos analizė, o antrojo projekto metu buvo parinktas linijos modelio tipas ir išnagrinėti pagrindiniai modelio principai.

1 VIRŠĖTAMPIAI ELEKTROS PERDAVIMO LINIJOSE

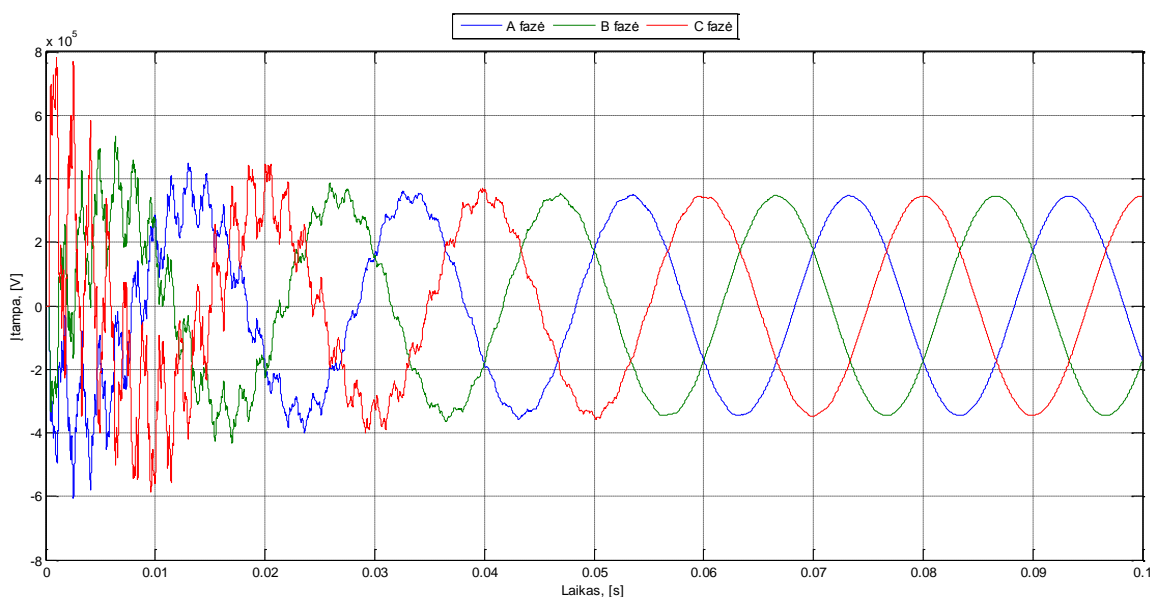
1.1 Viršėtampiai linijos įjungimo metu

Linijos įjungimo metu atsiranda pereinamasis vyksmas, kurio metu susiformuoja aukštos amplitudės įtampos impulsai vadinami viršėtampiais. Izoliacijos lygis reikalingas atlaikyti viršėtampius žvelgiant kompleksiskai turi didelę įtaką elektros perdavimo sistemos kainai ir patikimumui. Leidžiami viršėtampių lygiai, kuriems izoliacija gali būti atspari per keletą pereinamojo vyksmo periodų, įvairių įtampų tinkluose pateikiami 1.1 lentelėje [1].

1.1 lentelė. Leistini viršėtampių lygiai

Nominalioji įtampa, kV	Kiek kartų viršėtampis gali būti didesnis nei nominalioji įtampa
10	4
35	3,5
110	3
220	3
330	2,7
500	2,5
750	2,1

Viršėtampiai atsiranda linijos įjungimo ir išjungimo metu, kondensatorių ir reaktorių perjungimo metu ir avarių metu. Kuo aukštesnė įtampa linijos įjungimo metu, tuo viršėtampis yra didesnis [2]. Viršėtampiai 420 kV įtampos linijos įjungimo metu pavaizduoti 1.1 pav.



1.1 pav. Viršėtampiai 420 kV įtampos linijos mazge linijos įjungimo metu

Perdavimo tinkle eksploatacijos metu įvyksta avarijos dėl kurių atsijungia pavieniai perdavimo tinklo įrenginiai arba didesnės perdavimo tinklo dalys. Atstatant normalias sistemos sąlygas, vykdomas elektros perdavimo linijų įjungimas. Pavyzdžiui, Lietuvos elektros perdavimo tinkle 2013 - 2014 metų laikotarpiu elektros perdavimo linijos buvo neplanuotai atsijungusios 329 kartus. Įvertinus ir planinius linijų atjungimus daroma išvada, kad elektros perdavimo tinkle linijų įjungimai ir išjungimai yra dažnas reiškinys.

1.2 Atliktų tyrimų apžvalga

Viršįtampių atsiradimas elektros perdavimo tinkle sukelia sistemos elementų atsijungimus arba gedimus. Paprastai viršįtampių atsiradimo elektros perdavimo linijose reiškinį lemia žaibo išlydžiai arba trumpieji jungimai, tačiau viršįtampiai atsiranda ir dėl įprastų linijos eksploataavimo operacijų, t.y. linijos komutavimo. Su šia problema dažnai susiduriama projektuojant linijas, o nesuprojektavus tinkamai problema atsiranda eksploatacijos metu. Dėl šios priežasties, minėta tema atlikta nemažai tiriamo ir taikomojo pobūdžio darbų.

Siekiant išsiaiškinti viršįtampių, atsirandančių linijos įjungimo metu, priklausomybę nuo įvairių parametrų yra atlikta daug įvairių tyrimų. Remiantis literatūra [3], linijos įjungimo pereinamajam vyksmui analizuoti išskirti esminiai parametrai darantys įtaką linijos įjungimo metu atsirandantiems viršįtampiams - linijos ilgis ir konfiguracija, įtampos lygis ir fazinis kampas, šunto reaktoriaus parametrai, vienalaikis jungtuvų užsidarymas ir kt. Viršįtampių modeliavimui sukurtos taisyklės, kuriomis remiantis pereinamieji vyksmai yra paprasčiau ir tiksliau modeliuojami pritaikant skirtingas modeliavimo programas kiekvienam atvejui: modeliavimo žingsnio parinkimas, linijos parametrų naudojimas (sutelktieji ar paskirstytieji parametrai), šunto reaktorių parametrų naudojimas, modeliavimo apimties parinkimas norint gauti optimalius rezultatus ir kt. Atsižvelgiant į minėto tyrimo detalumą, daroma išvada, kad viršįtampių, atsirandančių linijos įjungimo metu, reiškinys yra aktualus ir jo analizei skiriama daug dėmesio.

Elektros perdavimo linijų įjungimo viršįtampiai yra dažnas reiškinys, todėl atliekami įvairūs tyrimai siekiant sumažinti viršįtampių vertes. Literatūroje [4] apžvelgiami sprendimai viršįtampių mažinimui linijos įjungimo metu. Tradicinis būdas yra jungtuvo įjungimo metu įterpti papildoma varžą, kurios paskirtis sumažinti linijos įjungimo metu atsirandančių viršįtampius. Šiam būdui siūlomos alternatyvos įrengiant viršįtampių ribotuvus arba papildomas sistemas, kurios jungtuvo kontaktus sujungtų esant geriausiajam įtampos faziniam kampui. Minėto tyrimo metu atliekami matematiniai modeliavimai, kurių rezultatai įrodė, kad pasirinktai konkrečiai sistemai siūlomos alternatyvos viršįtampių mažinimui yra tinkamos. Vis dėlto, daroma išvada, kad gauti rezultatai priklauso nuo daugelio įvairių parametrų, todėl negali būti

pritaikomi visiems atvejams. Tyrimo autorius prabrėžia, kad analizuojant kiekvieną atvejį turi būti atliktas sistemos modeliavimas.

Remiantis literatūra [5], analizuojami būdai viršįtampių nustatymui pasitelkiant dirbtiniu neuroniniu tinklu paremtas programas. Remiantis autoriaus mintimis, tokia programa yra „apmokoma“ bandymais įvedant pradinis parametrus bei rezultata, tokiu būdu pirmą kartą įrašant ryšį tarp įvesties parametrų ir gautų rezultatų. Minėtas ryšys įsimenamas ir pasikartojus įvesties parametras yra pritaikomas gauti išvesties duomenis. Algoritmo „apmokymas“ vykdomas dviem schemomis. Pirmojoje scheme įvesties parametrai yra, jau minėti, sistemos fazinis kampas, linijos ilgis, sistemos įtampos vertė. Šiuo atveju, skirtingi dirbtiniai neuroniniai tinklai yra „apmokomi“ nevertinant reaktoriaus, kaip vieno iš kintamųjų, todėl esant skirtingoms reaktorių vertėms turi būti naudojami skirtingi neuroniniai tinklai. Pritaikant antrą schema, daroma prielaida, kad linijos gale esantis reaktorius yra komutuojamas ir daro įtaką viršįtampių vertei. Tokiu atveju egzistuoja vienas dirbtinis neuroninis tinklas, kuriame įvertinami visi aukščiau minėti esminiai parametrai darantys įtaką viršįtampių vertei. Abejose schemose rezultatas yra maksimalios įtampos vertės linijos gale, tačiau sistemos „apmokymams“ reikalingas ilgas laiko tarpas ir didelį kiekiai pradinių duomenų. Dėl šios priežasties programa tampa sudėtinga ir universaliam naudojimui netinkama.

Remiantis literatūra [6], atlikti tyrimai, kuriais buvo siekiama įrodyti viršįtampių vertės priklausomybę nuo kabelinių intarpų banginės varžos ir ilgio tais atvejais kai oro linijos prie transformatorių ar prie dujomis izoliuotų pastočių jungiamos per trumpus kabelinius interpus. Tyrimai parodė, kad dėl nedidelio kabelinio intarpo tarp linijos ir pastotės elementų, kabelinio intarpo gale gali atsirasti nepageidaujami viršįtampiai ar net išlydžiai. Dėl šios priežasties, kabelinio intarpo ir oro linijos sujungimo mazge reikalinga turėti apsaugą nuo viršįtampių (viršįtampių ribotuvus), kurie žymiai sumažina viršįtampių vertes linijos prijungimo prie transformatorių ar dujomis izoliuotų pastočių mazguose.

Lietuvoje atliekamų viršįtampių elektros perdavimo linijose tyrimų rezultatai pristatyti konferencijoje „Elektros ir valdymo technologijos ETC - 2007“. Pristatymo metu apžvelgta viršįtampių priklausomybė nuo kabelinių intarpų ilgio bei viršįtampių ribotuvų darbo sąlygos oro linijose su kabeliniais intarpais. Tyrime daug dėmesio buvo skirta viršįtampiams atsirandantiems dėl žaibo išlydžio bei jų priklausomybei nuo kabelinių intarpų skaičiaus ir ilgio. Pereinamųjų vyksmų modeliavimas atliekamas naudojant paskirstytųjų parametrų modelius, sudarytus iš varžos, induktyvumo, talpos ir laidumo elementų, o staigus įtampos pokytis nuo vieno linijos galo į kitą perduodamas elektromagnetine banga [7].

Tyrimo rezultatai parodė, kad oro linijos su kabeliniais intarpais eksploatacija be apsaugos priemonių negalima, dėl susidarančių aukštos amplitudės viršįtampių mazguose, kuriuose oro

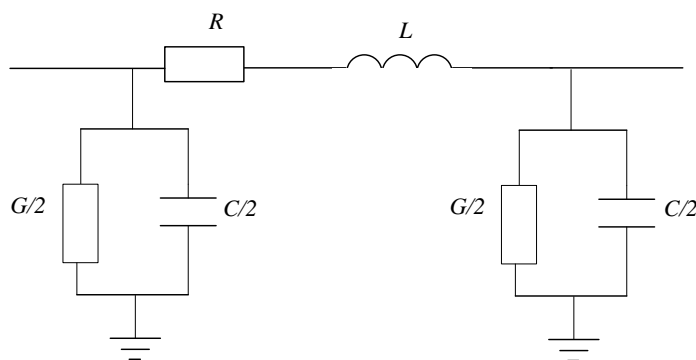
linija pereina į kabelinę liniją arba kabelinė linija pereina į oro liniją. Viena esminių priežasčių įvardinta banginių varžų tarp kabelinės ir oro linijos skirtumas ir dėlto to esantis didelis atspindžio koeficientas kabelinės linijos intarpo galuose.

Apibendrinant galima teigti, kad pasaulyje ir Lietuvoje atliekama daug tyrimų viršįtampių elektros perdavimo linijose tematika. Vis dėlto, atliktuose tyrimuose labiau detalizuojami konkretūs atvejai ir todėl projektuojant sirtingas linijas reikalingi detalūs linijų modeliavimai.

1.3 Viršįtampių tyrimai naudojant matematinis modelius

Dinaminės sistemos matematinis modeliavimas yra supaprastintas ir praktinis metodas nustatyti tiriamos sistemos pradinėms ir ribinėms sąlygoms [8]. Matematinis modeliavimas yra pirmas žingsnis įgyvendinant realius projektus. Literatūroje yra aprašomi keli modeliai, skirti elektromagnetiniams pereinamiesiems vyksmams elektros perdavimo linijose analizuoti. Kiekvienas iš modelių turi savo privalumus ir trūkumus priklausomai nuo to, kokius rezultatus siekiama gauti, todėl modelio pasirinkimas paprastai yra vienas sudėtingiausių etapų pradedant modelio kūrimą [9].

Remiantis literatūra [8], [10], elektros perdavimo linijų modeliai gali būti skirstomi į sutelktųjų parametrų ir paskirstytųjų parametrų modelius. Sutelktųjų parametrų modeliai yra aprašomi naudojant ekvivalentinius parametrus: aktyviają linijos laidininko varžą, linijos induktyvumą ir talpą, o modeliavimas atliekamas laiko atžvilgiu (linijos skersinis laidis dažniausiai yra paneigiamas dėl mažos įtakos skaičiavimams). Kadangi įvairių sistemos elementų charakteristikos laikui bėgant yra žinomos, šis metodas yra paprastas naudoti, tačiau nėra tikslus, kai norima įvertinti skirtingų dažnių daromą įtaką pereinamiesiems vyksmams. Tokiu atveju dažnio poveikis modeliuojamiems vyksmams gali būti įtrauktas į linijos modelį laiko atžvilgiu aprašant linija π schemomis (žr. 1.2 pav.) kiekvienai dažnio vertei, tačiau taip gaunamas daug skaičiavimo resursų reikalaujantis modelis.



1.2 pav. Sutelktųjų parametrų (π schemas) linijos atstojamoji schema

Remiantis literatūra [11], modeliuojant didelę sistemą trumpos elektros perdavimo linijos gali būti aprašytos ir sutelktųjų parametrų π schemomis. Trumpos linijos šiuo atveju yra tokios, kurių elektromagnetinės bangos sklidimo laikas nuo linijos pradžios iki galo yra mažas lyginant su pereinamųjų vyksmų modeliavimo programos, paremtos paskirstytųjų parametrų modeliavimu, minimaliu laiko žingsniu. Vis dėlto, modeliuojant ilgas elektros perdavimo linijas, reikalinga taikyti tikslesnius paskirstytųjų parametrų modelius.

Elektromagnetinius pereinamuosius vyksmus modeliuojant paskirstytųjų parametrų modeliui atskaita yra ne laikas, o dažnis [8], [10]. Tokiu atveju modeliuojama dažnio atskaitoje, o rezultatai pakeičiami į laiko atskaitą naudojant atvirkštines transformacijas. Vis dėlto, paskirstytųjų parametrų modeliai turi apribojimų į modeliavimo procesą įterpiančius parametrus, kintančius per tam tikrą laiką, todėl modeliavimas yra sudėtingesnis.

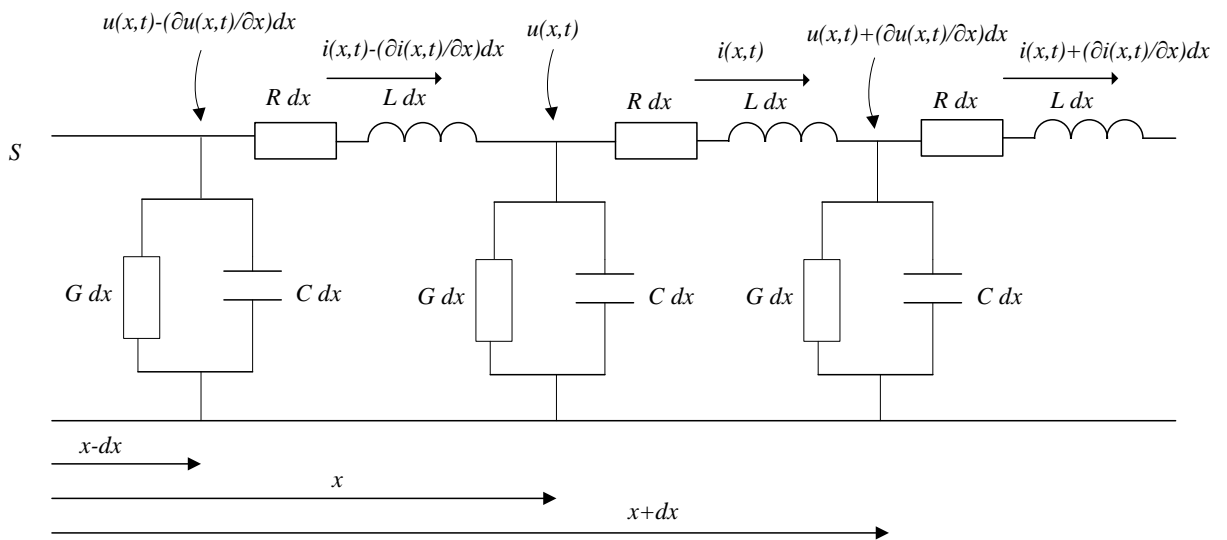
Siekiant supaprastinti modeliavimą, buvo sukurtas naujas elektros perdavimo linijos modelis, paremtas supaprastintais paskirstytais parametrais ir modeliuojamas laiko atskaitoje [12]. Minėtas modelis dar vadinamas Bergeron modeliu ir dėl savo paprastumo skaičiavimuose yra vienas populiariausių linijos modelių praktiniam naudojimui. Literatūroje yra aprašyti tyrimai, kai minėtas modelis buvo pritaikytas analizuoti Kuveito elektros energijos perdavimo tinkle susidarančiu viršįtampius, o gautos paklaidos buvo priimamos leistinose ribose [11]. Minėto tyrimo rezultatai įrodė, kad didžiausi viršįtampiai linijos įjungimo metu yra tada kai linijos gale nėra prijungti vartotojai.

Apibendrinant galima teigti, kad dėl savo paprastumo praktiniam panaudojimui Bergeron linijos modelis yra tinkamiausias lyginant su kitais minėtais modeliais. Bergeron linijos modelio esmė aiškinama tolimesniuose skyriuose pradedant nuo elektromagnetinės bangos reiškinio elektros perdavimo linijoje.

2 ELEKTROMAGNETINĖS BANGOS REIŠKINYS

2.1 Sklindančios elektromagnetinės bangos lygtys ir lygčių sprendinys

Dėl daugelio įvairių priežasčių, tokių kaip tiesioginis arba netiesioginis žaibo išlydis į perdavimo liniją, komutaciniai perjungimai ar perdavimo linijų avarijos yra sukeltamos aukštos amplitudės įtampos bangos dar vadinamos sklindančiomis bangomis. Sklindanti banga perdavimo linija keliauja greičiu, kuris yra apytiksliai lygus šviesios greičiui, todėl, pavyzdžiui, atlikus komutacinį perjungimą ir atsiradus įtampai viename linijos gale, kitame linijos gale įtampa atsiranda ne iš karto, bet su tam tikru vėlavimu (laikas, per kurį įtampos banga nukeliauja linija) [13]. Bangos reiškiniui analizuoti išvestos sklindančios bangos lygtys, o jų išvedimas pateikiamas žemiau.



2.1 pav. Paskirstytųjų parametrų elektros perdavimo linijos principinė schema

Tarkime, kad turime elektros perdavimo liniją, kurioje dėl tam tikrų priežasčių atsirado aukštos amplitudės įtampos banga. Bangos reiškiniui analizuoti elektros perdavimo linija aprašoma paskirstytųjų parametrų metodu [10], kuris grafiškai pavaizduotas 2.1 pav. Parametrai $u(x,t)$ ir $i(x,t)$ yra atitinkamai įtampa ir srovė taške x , nutolusiame nuo linijos pradžios s laiko momentu t . Minimaliai linijos atkarpai tarp taškų x ir $x+dx$ galime užrašyti lygtis [14], [15]:

$$\begin{cases} u(x,t) - \left(u(x,t) + \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} dx \right) = L dx \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + (R dx) i(x,t) \\ -i(x,t) + \left(i(x,t) - \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} dx \right) = (C dx) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + (G dx) u(x,t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Atlikus lygčių prastinimą gaunamos lygtys:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + Ri(x,t) \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = C \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + Gu(x,t) \end{cases} \quad (2.2)$$

Padauginus lygčių (2.2) abi puses iš $\partial/\partial x$ ir išreiškus lygtis taip, kad atitinkamai kiekvienoje iš lygčių liktų tik po vieną nežinomąjį u ir i , gaunamos lygtys:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + (LG + CR) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + RG \cdot u(x,t) \\ \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2} + (LG + CR) \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + RG \cdot i(x,t) \end{cases} \quad (2.3)$$

Gautos antro laipsnio diferencialinės lygtys vadinamos sklindančios bangos lygtimis. Remiantis literatūra [16], dėl praktiniu požiūriu santykinai mažos aktyviosios varžos lyginant su linijos induktyvumu ir nykstamai mažos reaktyviojo laidžio vertės, aktyvioji varža ir reaktyvusis laidis gali būti nevertinami. Paneigus nuostolius, perrašoma (2.3) lygčių sistema:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2} \end{cases} \quad (2.4)$$

Lygčių sistemos (2.4) bendro sprendinio išraiška, pritaikius D'Alamberto lygčių sprendimo būdą:

$$\begin{aligned} u(x,t) &= u_1(x-vt) + u_2(x+vt) \\ i(x,t) &= \frac{1}{W_e} [u_1(x-vt) - u_2(x+vt)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Čia: W_e - banginė varža, v - sklidimo greitis. Plačiau banginė varža ir sklidimo greitis yra aprašomi tolimesniuose skyriuose.

Analizuodami bendrąjį sprendinį (2.5) matome, kad dydis $(x-vt)$ išreiškia atstumą, nes x yra vietos koordinatė, t - laikas, o v - sklidimo greitis. Galime daryti išvadą, kad jei perdavimo linija keliautume greičiu v , per visa linijos ilgį dedamąją $u_1(x-vt)$ stebėtume nepakitusia [8], [14] (nedidelis pokytis pasireikštų tik tokiu atveju, jei linijoje būtų vertinami

nuostoliai, t.y. $R \neq 0$ ir $G \neq 0$). Remiantis prieš tai minėtu teiginiu, daroma išvada, kad $u_1(x-vt)$ keliauja linija atstumą x greičiu v , o $u_2(x+vt)$ keliauja linija atstumą $(-x)$, t.y. priešinga kryptimi, greičiu v . Bendrojo lygčių sistemos sprendinio dalis $u_1(x-vt)$ vadinama kritusia įtampos bangos charakteristika, o $u_2(x+vt)$ - atsispindėjusia įtampos bangos charakteristika. Analogiškai daroma išvada, kad sandauga $1/W_e \cdot u_1(x-vt)$ yra kritusi srovės bangos charakteristika, o $1/W_e \cdot u_2(x+vt)$ - atsispindėjusi srovės bangos charakteristika.

2.2 Banginė varža. Elektromagnetinės bangos sklidimo greitis

Elektros perdavimo linija keliaujanti srovės bangos charakteristika yra visada lydima įtampos bangos charakteristikos ir atvirkščiai. Srovės banga ir įtampos banga tarpusavyje yra susijusi per banginę varžą, kuri apskaičiuojama pagal formulę:

$$W_e = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.6)$$

Tarkime, kad elektros perdavimo linijos laidininko spindulys yra r , o atstumas tarp laidininkų yra vienodas d . Tokiu atveju linijos induktyvumas ilgio vienetui aprašomas formule [14]:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu_r}{4} + \log_e \frac{d}{r} \right]; \quad (2.7)$$

čia: μ_0 - magnetinė konstanta;

μ_r - santykinė magnetinė laidininko svarba.

Inžineriniam naudojimui formulė (2.7) yra supaprastinama, kadangi dėl mažos įtakos paneigiamas laidininko vidinis magnetinis srautas:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \log_e \frac{d}{r}. \quad (2.8)$$

Ilgio vieneto induktyvumas skaičiuojamas H/m. Ilgio vieneto linijos talpa aprašoma formule [14]:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\log_e \frac{d}{r}}; \quad (2.9)$$

čia: ε_0 - elektrinė konstanta;

ε_r - santykinė dielektrinė oro svarba.

Įvertinus formules (2.8) ir (2.9), gaunama banginės varžos formulė:

$$W_e = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \left(\frac{\log_e \frac{d}{r}}{2} \right)^2}. \quad (2.10)$$

Elektros oro perdavimo linijoms praktinė banginės varžos vertė yra tarp 300Ω ir 600Ω , o kabelinės linijos svyruoja nuo 50Ω iki 60Ω .

Remiantis lietarūta [14], elektromagnetinės bangos sklidimo greitis aprašomas formule:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.11)$$

Paneigiant nuostolius linijoje, kaip jau minėta anksčiau, sklidimo greitis v yra apytiksliai lygus šviesos greičiui. Jei nuostoliai yra įvertinami, elektromagnetinės bangos sklidimo greitis elektros perdavimo linijoje yra nuo 5 % iki 10 % mažesnis už šviesos sklidimo greitį.

2.3 Sklindančios bangos lygčių fizikinė prasmė

Remiantis literatūra [14], galima išskirti keletą esminių teiginių apie fizikinę sklindančios bangos lygčių prasmę. Pirmiausia, išvedant sklindančios bangos lygtis buvo daroma prielaida, kad įtampa ir srovė egzistuoja taške x laiko momentu t . Vis dėlto, analizuodami nekreipėme dėmesio, kodėl $u(x,t)$ ir $i(x,t)$ apskritai egzistuoja ar kurioje vietoje ir koks yra energijos šaltinis. Galime daryti išvadą, kad iš lygčių sistemos (2.1) išvestos lygtys yra charakteringos elektros perdavimo linijai ir nepriklauso nuo išorinių sąlygų. Antra svarbi išvada yra ta, kad iš tikrųjų egzistuojanti įtampa ir srovė, kurią fiziškai galima išmatuoti perdavimo linijoje yra $u(x,t)$ ir $i(x,t)$. Remiantis formulėmis (2.5) yra teigiama, kad minėti dydžiai (įtampa ir srovė) tik gali būti aiškinami atitinkamai kaip kritusių ir atsispindėjusių bangų charakteristikų sumos. Fizikine prasme, reikšmę turi tik suminis dydis, t.y. įtampa $u(x,t)$ arba srovė $i(x,t)$, o jų dedamosios yra koncepcija. Dėl šios priežasties nėra prasmės aiškintis kada ir iš kur atsiras kritusios ir atsispindėjusios bangos charakteristikos. Vis dėlto, šis reiškinys savo prasme nėra toks pat, kaip generuojančio šaltinio įjungimas ar žaibo išlydis į linijos bet kurią tašką nutolusį

nuo linijos pradžios arba linijos galo. Šiuo atveju įtampos ir srovės banga fizine prasme keliauja į abi linijos puses (tiesiogine ir atvirkštine kryptimis) ir tokia įtampa ir srovė gali būti išmatuota.

3 BERGERON LINIJOS MODELIS

L. Bergeron metodas buvo sukurtas spręsti hidraulinių sistemų uždavinius, tačiau laikui bėgant buvo pritaikytas elektros energetikoje sprendžiant elektromagnetinės bangos sklidimo linija uždavinius [17]. Pritaikius Bergeron metodą linijos modelis buvo aprašomas vertinant tik induktyvumą ir linijos talpą, o linijos varža ir skersinis laidis buvo nevertinami. Tobulinant modelį, H. W. Dommel pasiūlė linijos modelio papildymą, skaitmeniniam modeliavimui naudojant mazginį sprendimo būdą apjungiantį perdavimo linijos charakteristikas [18]. Dar vėliau į linijos modelį buvo įtraukti linijos nuostoliai juos koncentruojant į linijos pradžią ir linijos pabaigą. Remiantis šiais patobulinimais buvo suskurtas linijos modelis, kuris tapo vienu paprasčiausiai įgyvendinamu ir labiausiai praktikoje pritaikomų modelių skirtų modeliuoti elektromagnetinius pereinamuosius vyksmus elektros perdavimo linijose [19]. Šis modelis dėl skaičiavimo metodikos dažnai sutrumpintai vadinamas Bergeron modeliu.

Bergeron linijos modelio matematinė išraiška vienfazei elektros perdavimo linijai

Remiantis ankstesniame skyriuje aprašytu iš sklindančios bangos lygčių sistemos išvestu bendruoju sprendiniu, kurio dalys atitinkamai aprašo kritusių ir atsispindėjusių bangas bei pritaikant mazginį sprendinimo būdą, pasiūlytą H. W. Dommel [18], atliekami veiksmai pertvarkant bendrąjį sprendinį. Pirmiausia, lygčių sistemos (2.5) pirmoji lygtis aprašanti srovę padauginama iš banginės varžos W_e ir toliau atliekami lygčių sistemos prastinimo veiksmai. Gaunama lygčių sistema [18]:

$$\begin{aligned} u(x,t) + W_e \cdot i(x,t) &= 2W_e \cdot i_1(x-vt) \\ u(x,t) - W_e \cdot i(x,t) &= -2W_e \cdot i_2(x+vt) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Iš lygčių sistemos (3.1) matome, kad $u(x,t) + W_e \cdot i(x,t)$ yra pastovus dydis, kai $(x-vt)$ yra konstanta. Su sąlyga, kad bangai sklindant nuo vieno linijos galo (k) prie kito (m), dėmuo $u(x,t) + W_e \cdot i(x,t)$ bus konstanta, elektromagnetinės bangos sklidimo linija laikas apskaičiuojamas (3.2) formule (d - linijos ilgis):

$$\tau = d/v = d\sqrt{LC} \quad (3.2)$$

Atsižvelgiant aukščiau atliktus veiksmus, gaunama lygtis:

$$u_k(t-\tau) + W_e \cdot i_{kn}(t-\tau) = u_m(t) + W_e \cdot (-i_{mk}(t)) \quad (3.3)$$

Pertvarkant (3.3) lygtį, gaunama paprasta dviejų mazgų lygtis srovei tekančiai iš mazgo m į k (i_{mk}):

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{W_e} u_m(t) + I_m(t - \tau); \quad (3.4)$$

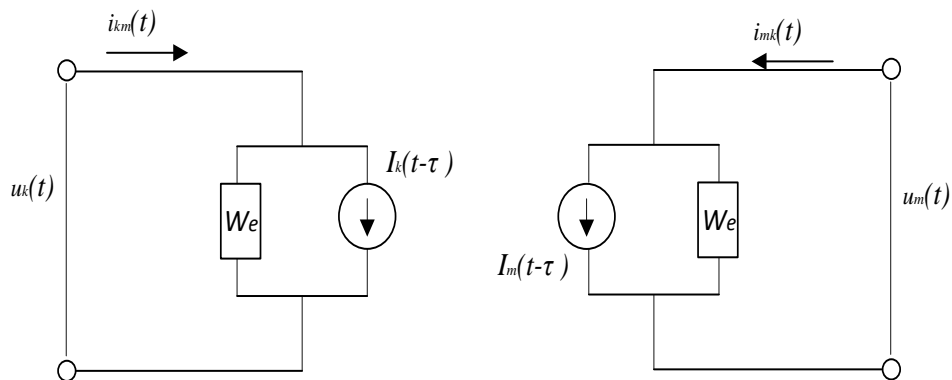
kur istorinis srovės šaltinis I_m :

$$I_m(t - \tau) = -\frac{1}{W_e} u_k(t - \tau) - i_{km}(t - \tau). \quad (3.5)$$

Analogiškos lygtys gaunamos srovei tekant iš mazgo m į mazgą k :

$$i_{km}(t) = \frac{1}{W_e} u_k(t) + I_k(t - \tau) \quad (3.6)$$

kai $I_k(t - \tau) = -1/W_e \cdot u_m(t - \tau) - i_{mk}(t - \tau)$. Ekvivalentinė schema linijai be nuostolių, taikant dviejų mazgų metodą pateikiama 3.1 pav.



3.1 pav. Ekvivalentinė schema linijai be nuostolių, taikant dviejų mazgų metodą

Paveiksle pavaizduotas dviejų mazgų linijos modelis neturi tiesioginio ryšio tarp linijos galų, o poveikis pasireiškia netiesiogiai su laiko užlaikymu (užlaikymas atsiranda dėl laiko, kurį banga keliauja linija). Laiko užlaikymas aprašomas paveiksle pavaizduotais srovės šaltiniais. Istorinės vertės saugomos „istoriniuose“ vektoriuose, kurie apibrėžiami pagal pasirinktą linijos diskretizavimo dažnį.

3.1 Bergeron linijos modelis trifazei elektros perdavimo linijai

Naudojant trifazės sistemos modelį, įtampą ir srovę patogiu aprašyti matricomis. Įtampa ir srovė trijų fazių sistemai aprašoma taip [20]:

$$u(x,t) = \begin{bmatrix} u_a(x,t) \\ u_b(x,t) \\ u_c(x,t) \end{bmatrix}; \quad i(x,t) = \begin{bmatrix} i_a(x,t) \\ i_b(x,t) \\ i_c(x,t) \end{bmatrix}; \quad (3.7)$$

čia: $u_a(x,t), u_b(x,t), u_c(x,t)$ - įtampa a, b ir c fazėse, laiko momentu t , taške x ;

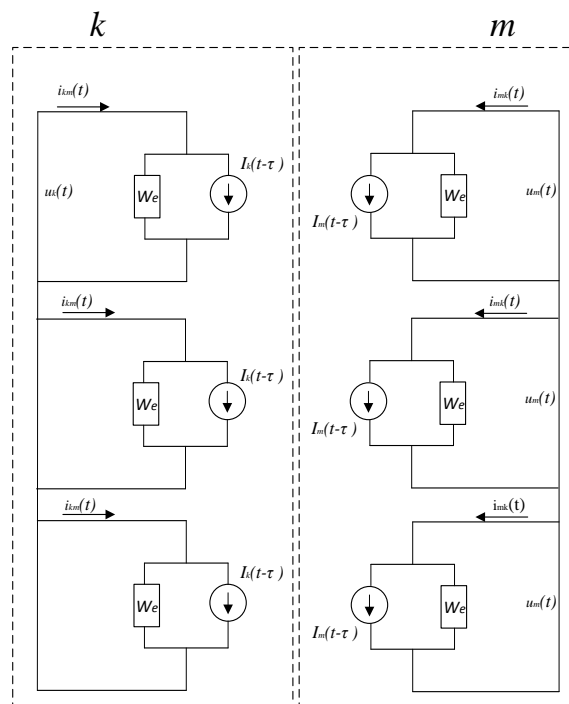
$i_a(x,t), i_b(x,t), i_c(x,t)$ - srovė a, b ir c fazėse, laiko momentu t , taške x .

Trifazėje elektros perdavimo linijoje pasireiškia elektromagnetinis ryštis tarp atskirų fazių. Norint tiksliai įvertinti induktyvumo ir talpos vertes elektros perdavimo linijoje sudaroma induktyvumų ir talpų matricos:

$$L = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

indeksai a, b ir c atitinkamai reiškia fazes a, b ir c .

Remiantis išraiškomis (3.7) ir (3.8) ir įstačius jas į jau išvestą sklindančios bangos lygčių sistemą (2.4) bei išvedus jos bendrąjį sprendinį, sudaroma galimybės Bergeron linijos modelyje naudoti trijų fazių sistemą. Ekvivalentinė schema linijai be nuostolių trijų fazių sistemoje, taikant dviejų mazgų metodą pateikiama 3.2 pav.



3.2 pav. Ekvivalentinė schema linijai be nuostolių trijų fazių sistemoje, taikant dviejų mazgų metodą

Atliekant skaičiavimus trifazei sistemai naudojama modalinė transformacija. Trifazės sistemos parametrai yra išskiriami į simetrines dedamąsias taip, kad būtų išlaikomas trifazėje sistemoje tarp fazių esantis ryšys, tačiau kiekviena iš gautų verčių būtų nepriklausoma viena nuo kitos [21]. Keitimui atlikti naudojama Clarke transformaciją [22]. Clarke transformacijai atlikti naudojamos matricos pateikiamos žemiau:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}; T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Transformacija iš trijų fazių sistemos į simetrines dedamąsias atliekama remiantis (3.10) formule:

$$A_{\alpha,\beta,o} = TA_{a,b,c} \quad (3.10)$$

Atvirkštinė transformacija iš simetrinių dedamųjų į trijų fazių sistemą atliekama remiantis (3.11) formule:

$$A_{a,b,c} = T^{-1}A_{\alpha,\beta,o} \quad (3.11)$$

Remiantis (3.10 - 3.11) formulėmis keičiamos įtampos ir srovės. Banginių varžų keitimui iš fazinių dedamųjų į simetrines naudojama (3.12) formulė:

$$A_{\alpha,\beta,o} = T \cdot A_{a,b,c} \cdot T^{-1} \quad (3.12)$$

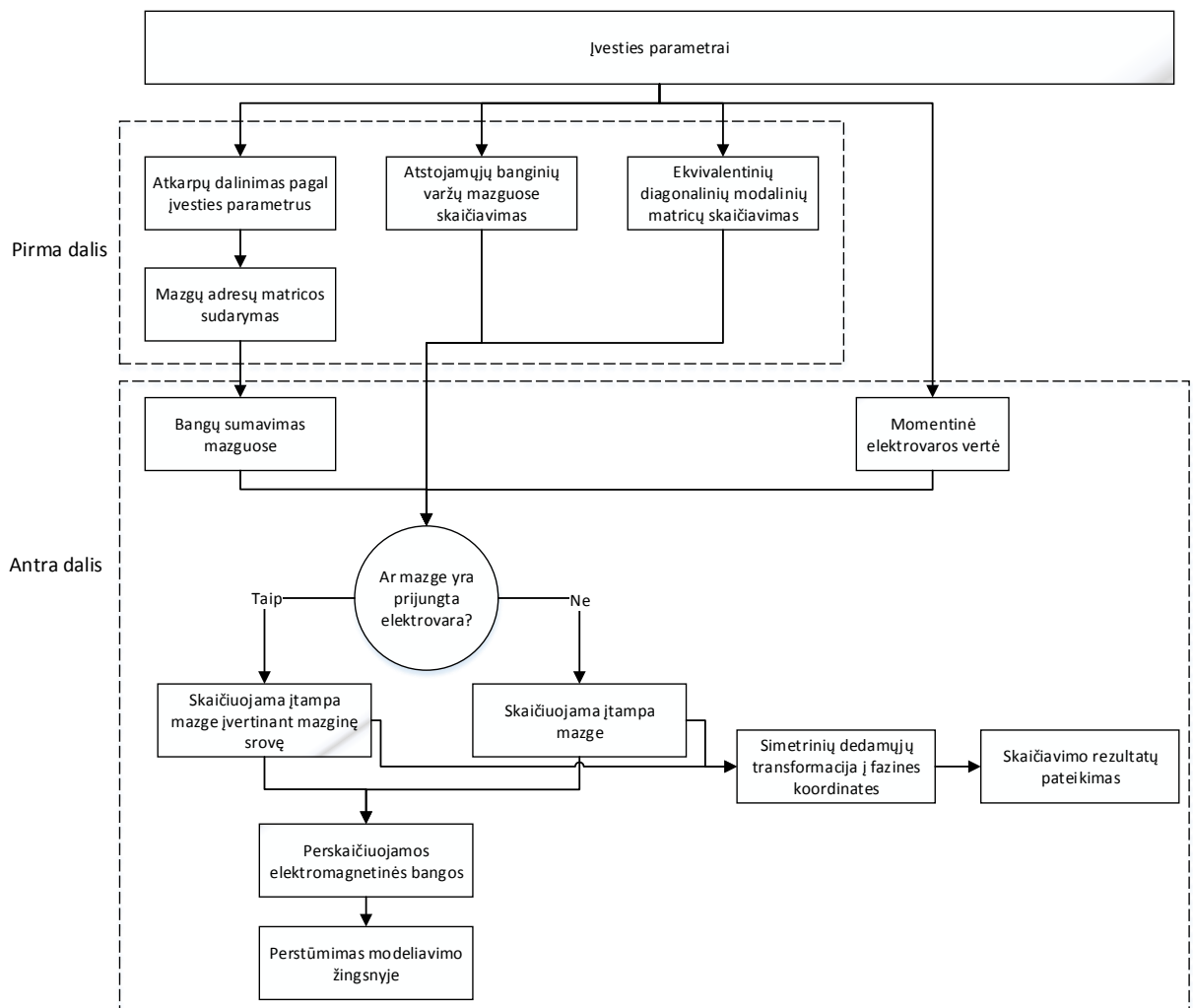
Modalinė transformacija ypač supaprastina skaičiavimus, kai trijų fazių (a, b ir c) sistema pakeičiama į simetrinių dedamų sistema α, β ir 0 .

4 MODELIO APRAŠYMAS

4.1 Matematinis modelis

Komutacinių viršįtampių, atsirandančių įjungiant sudėtingos konfigūracijos elektros perdavimo liniją, priklausomybės nuo įvairių parametru tyrimui buvo sukurtas sudėtingos elektros perdavimo linijos modelis. Modelio veikimas paremtas teorijoje aprašyta Bergeron linijos modelio samprata, o modelio esmė yra atlikti sudėtingos elektros perdavimo linijos skaičiavimus naudojant sklindančios bangos metodą ir linijos parametrus sutelkiant į linijos atkarpų pradžias ir pabaigas.

Modelis sudarytas iš dviejų dalių. Pirmoji dalis susideda iš nekintančių laike parametru skaičiavimo pagal užduotas pradines sąlygas. Antroji dalis susideda iš kintančių laike parametru skaičiavimo pagal užduotas pradines sąlygas bei suskaičiuotus parametrus pirmoje dalyje, gautu rezultatu keitimo iš simetrinių dedamųjų sistemos į fazinę koordinačių sistemą ir skaitinių bei grafinių rezultatu pateikimo. Kiekviena iš dalių plačiau aprašoma toliau pateiktame tekste. Modelio struktūrinė schema pateikiama 4.1 pav.



4.1 pav. Modelio struktūrinė schema

Visi įvedami ir skaičiuojami parametrai (aktyviosios ir banginės varžos, ekvivalentinė elektrovara, įtampos ir srovės) modelyje yra varijuojami išreikšti simetrinių dedamųjų forma (tiesioginės, atvirkštinės ir nulinės sekos dedamosiomis). Iš simetrinių dedamųjų į fazines koordinates keitimas atliekamas jau suskaičiavus įtampas mazguose. Rezultatai pateikiami grafiniu ir skaitiniu pavidalu.

Modelyje suskaičiuotos viršįtampių vertės yra maksimalios įmanomos vertės linijos įjungimo metu. Tobulinant ir tikslinant modelį papildomai reiktų patikslinti elektromagnetinės bangos deformaciją bei įvertinti vainikinį išlydį. Minėti patikslinimai sumažintu viršįtampių vertes, tačiau tyrime užsibrėžtiems tikslams spręsti sukurtas modelis yra tinkamas.

4.1.1 Nekintančių laike parametrų skaičiavimas

Pirmoje dalyje atliekamas laike nekintančių parametrų skaičiavimas. Pirmiausia atliekamas elektros perdavimo linijos vienos fazės laidininko dalinimas pagal pasirinktą minimalų modeliavimo laiką. Pagrindiniai naudojami parametrai yra linijos atkarpų ilgiai ir pasirinktas minimalus modeliavimo laiko žingsnis. Randamas minimalus linijos atkarpos ilgis, kurį nukeliauja elektromagnetinės bangos charakteristika sklisdama laidininku minimalų modeliavimo laiką tarpą. Remiantis minimaliu linijos atkarpos ilgiu, linijos atkarpos yra padalinamos į tam tikrą skaičių dalių (sudaroma padalintos linijos atkarpų matrica). Šiame etape įvertinamas elektromagnetinės bangos sklidimo oro linija ir kabelių liniją greičio skirtumas atsižvelgiant į tai, kad elektromagnetinės bangos charakteristika kabeline linija sklinda greičių lygiu pusei šviesios greičio.

Toliau aprašant elektros perdavimo linijos modelį reikalinga tiksliai apibrėžti sąvokas, ką įvardinsime elektros perdavimo linijos mazgu ir elektros perdavimo linijos atkarpa:

- elektros perdavimo linijos mazgu laikomas taškas, kuriame sujungiamos elektros perdavimo linijos su likusia elektros perdavimo sistema (pavyzdžiui transformatorių pastote) arba kur elektros perdavimo linijos išsišakoja, arba kur yra sujungiamos elektros perdavimo linijos turinčios skirtingas bangines varžas;
- linijos atkarpa laikoma elektros perdavimo linijos mazgų apribota elektros perdavimo linijos laidininko dalis.

Sudarius padalintos linijos matricą, sudaroma elektros perdavimo linijos mazgų adresų matrica, kurios pagrindinė paskirtis yra skaičiavimo eigoje nustatyti sąsajas tarp elektros perdavimo linijos mazgų ir „istoriniuose“ vektoriuose esančių verčių (plačiau „istoriniai“ vektoriai aprašomi toliau pateiktame tekste). Pagrindiniai parametrai sudarant adresų matricą parenkami iš padalintos linijos atkarpų matricos.

Pirmoje dalyje taip pat atliekamas atstojamųjų banginių varžų skaičiavimas elektros perdavimo linijos mazguose. Esminiai parametrai šiam skaičiavimui yra linijų banginės varžos, kurios įvedamos simetrinių dedamųjų forma. Ekvivalentinės banginės varžos mazguose skaičiuojamos taikant lygiagrečiai sujungtų varžų sudėties metodą, t.y. visų į mazgą sujungtų elektros perdavimo linijų atkarpų banginės varžos sumuojamos lygiagrečiai taip gaunant ekvivalentinę banginę mazgo varžą.

Atlikus banginių varžų skaičiavimą mazguose, skaičiuojamos ekvivalentinės diagonalinės modalinės matricos, kurių pagalba įvertinamas elektromagnetinių bangų sklidimas iš mazgo, kuriame prijungta elektros perdavimo linija prie elektros perdavimo sistemos (4.7 – 4.9 formulės). Randamos tiesioginės ir nulinės sekų sistemos ekvivalentinės varžos naudojant 4.1 ir 4.2 formules [23]:

$$X_1 = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot I^{(3)}}; \quad (4.1)$$

$$X_0 = \frac{3 \cdot E}{\sqrt{3} \cdot I^{(1)}} - 2 \cdot X_1; \quad (4.2)$$

čia: E – maksimali sistemos elektrovara;

$I^{(3)}$ - trifazio trumpojo jungimo srovė ekvivalentinei sistemai;

$I^{(1)}$ - vienfazio trumpojo jungimo srovė ekvivalentinei sistemai.

Skaičiuojant ekvivalentines varžas trumpojo jungimo srovė, atitekanti komutuojuama linija, nevertinama, nes šiuo konkrečiu atveju tiriamas linijos įjungimas, t.y. linija prieš komutaciją buvo išjungta. Ekvivalentinės sistemos elektrovaros vertė yra lygi sistemos linijinei efektinei įtampos vertei.

Likusių parametrų skaičiavimas atliekamas remiantis 4.3 – 4.6 formulėmis [24]:

$$\tau_v = \frac{X_v}{(W_{ek} + R_v)\omega}; \quad (4.3)$$

$$a_{0v} = e^{\frac{-h}{\tau_v}}; \quad (4.4)$$

$$a_{1v} = 1 - (1 - a_{0v}) \frac{\tau_v}{h}; \quad (4.5)$$

$$a_{2v} = 1 - a_{0v} - a_{1v}; \quad (4.6)$$

čia: W_{ek} - ekvivalentinė banginė varža mazge;

R_k - aktyvioji linijos laidininkų varža;

X_v - ekvivalentinės sistemos varža;

ω - kampinis dažnis;

h - modeliavimo žingsnis;

$v = 1, 2, 0$ - indeksas simbolizuojantis tiesioginę, atvirkštinę ir nulinę sekas.

Ekvivalentinės diagonalinės modalinės matricos skaičiuojamos remiantis 4.7 – 4.9 formulėmis, pagal jau aukščiau suskaičiuotus parametrus:

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_{01} & 0 & 0 \\ 0 & a_{02} & 0 \\ 0 & 0 & a_{00} \end{bmatrix}; \quad (4.7)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_{10} \end{bmatrix}; \quad (4.8)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{20} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Suskaičiavus visus aukščiau aprašytus parametrus pradedamas antras skaičiavimų etapas – kintančių laike parametrų skaičiavimas.

4.1.2 Kintančių laike parametrų skaičiavimas

Skaičiuojant laike kintančius parametrus atliekamas visų parametrų perskaičiavimas kiekvienam laiko žingsniui. Naudojamas rekurentinis skaičiavimo metodas, todėl į skaičiavimus įtraukiami „istoriniai“ vektoriai, kuriuose saugomi jau atliktų skaičiavimų rezultatai. Šioje dalyje yra:

- elektrovaros vertės išreikštos simetrinėmis dedamosiomis;
- elektromagnetinių bangų charakteristikų, atsklidusių į elektros perdavimo linijos mazgą, sumavimas;
- srovės ir įtampos apskaičiavimas visuose elektros perdavimo linijos mazguose;
- elektromagnetinių bangų charakteristikų perskaičiavimas ir skaičiavimo žingsnio perstūmimas;
- gautų rezultatų keitimas į fazines koordinates;

- skaitinių ir grafinių įtampos verčių atvaizdavimas.

Kiekvienu laiko žingsniu sumuojamos elektromagnetinės bangos charakteristikos, kurios ateina į atitinkamą mazgą. Susumuotos elektromagnetinės bangos charakteristikos mazguose daro įtaką įtampos kilimui mazguose, todėl atlikus bangų sumavimą perskaičiuojamos mazginės srovės ir įtampos. Įtampos ir srovės skaičiavimai mazge, kuriame vertinama ekvivalentinė elektrovara (t.y. mazgas kuriame elektros perdavimo linija prijungiama prie elektros perdavimo sistemos), atliekami remiantis formulėmis [24]:

$$S_{ev}(kh) = S_{ev}[(k-1)h] - \frac{E_m}{W_{ek}}; \quad (4.10)$$

$$i_v(kh) = A_0 \cdot i_v[(k-1)h] + A_1 \cdot S_{ev}(kh) + A_2 \cdot S_{ev}[(k-1)h]; \quad (4.11)$$

$$U_v = (S_{ij} - i_v(kh)) \cdot W_{ek}; \quad (4.12)$$

čia: $S_{ev}(kh), S_{ev}[(k-1)h]$ - elektromagnetinių bangų charakteristikų atsklidusių į mazgą sumos matrica su įvertinta tame mazge esančia elektrovara (modeliavimo žingsniuose k ir $(k-1)$);

$i_v(kh), i_v[(k-1)h]$ - mazgo srovių matrica induktyviniuose elementuose (modeliavimo žingsniuose k ir $(k-1)$);

E_m - elektrovaros momentinė vertė simetrinių dedamųjų koordinačių sistemoje;

S_{ij} - elektromagnetinių bangų charakteristikų atsklidusių į mazgą sumos matrica;

Įtampos skaičiavimai mazge, kuriame nėra elektrovaros, atliekami naudojant (4.13) formulę:

$$U_v = S_{ij} \cdot W_{ek}. \quad (4.13)$$

Įvertinus įtampos vertes mazguose laiko momentu t , atliekami krintančios ir atsispindėjusios bangų charakteristikų perskaičiavimai naudojant 4.14 formules [24]:

$$\begin{cases} S_{12}(t) = \left[\frac{2U_1(t)}{W} - S_{21}(t-\tau) \right] e^{-\frac{Rt}{2W}} \\ S_{21}(t) = \left[\frac{2U_2(t)}{W} - S_{12}(t-\tau) \right] e^{-\frac{Rt}{2W}} \end{cases} \quad (4.14)$$

čia: W - linijos banginė varža;
 τ - laikas per kurį elektromagnetinė banga sklinda nuo linijos pradžios iki linijos galo;

l - linijos atkarpos ilgis;

$U_1(t), U_2(t)$ - įtampa linijos atkarpos pradžioje ir gale;

$S_{12}(t), S_{21}(t - \tau)$ - elektromagnetinės bangos atsklidusios į linijos atkarpos pradžią ir atsispindėjusios nuo jos charakteristika („istoriniai“ bangos charakteristikos vektoriai);

$S_{21}(t), S_{12}(t - \tau)$ - elektromagnetinės bangos atsklidusios į linijos atkarpos galą ir atsispindėjusios nuo jos charakteristika („istoriniai“ bangos charakteristikos vektoriai).

Dedamoji $e^{\frac{-Rl}{2W}}$ įvertina elektromagnetinės bangos charakteristikos slopimą. Tokia išraiška naudojama tada, kai skaičiuojama tiesioginės ir atvirkštinės sekų elektromagnetinių bangų charakteristikos. Norint įvertinti nulinės sekos bangos charakteristikos slopimą, papildomai prie linijos aktyviosios varžos pridedama aktyvioji žemės varža. Atlikus elektromagnetinės bangos charakteristikos perskaičiavimą, bangos vertės sudedamos į „istorinius“ bangos charakteristikos vektorius ir vektorių nariai perstumiami per vieną poziciją, priklausomai nuo vektoriaus kryties. Perstūmus vektoriaus narius, ciklas kartojasi iš naujo (grįžtama į pirmą dalį). Kiekvieno ciklo metu atlikus skaičiavimus įtampa mazguose transformuojama iš simetrinių dedamųjų į fazines ir gauti rezultatai saugomi įtampos vektoriuose, kurie vėliau atvaizduojami grafiškai bei išrenkamos maksimalios momentinės įtampos vertės su laiko žymėmis.

4.2 Elektrovaros keitimas iš fazinių koordinačių į simetrines dedamąsias

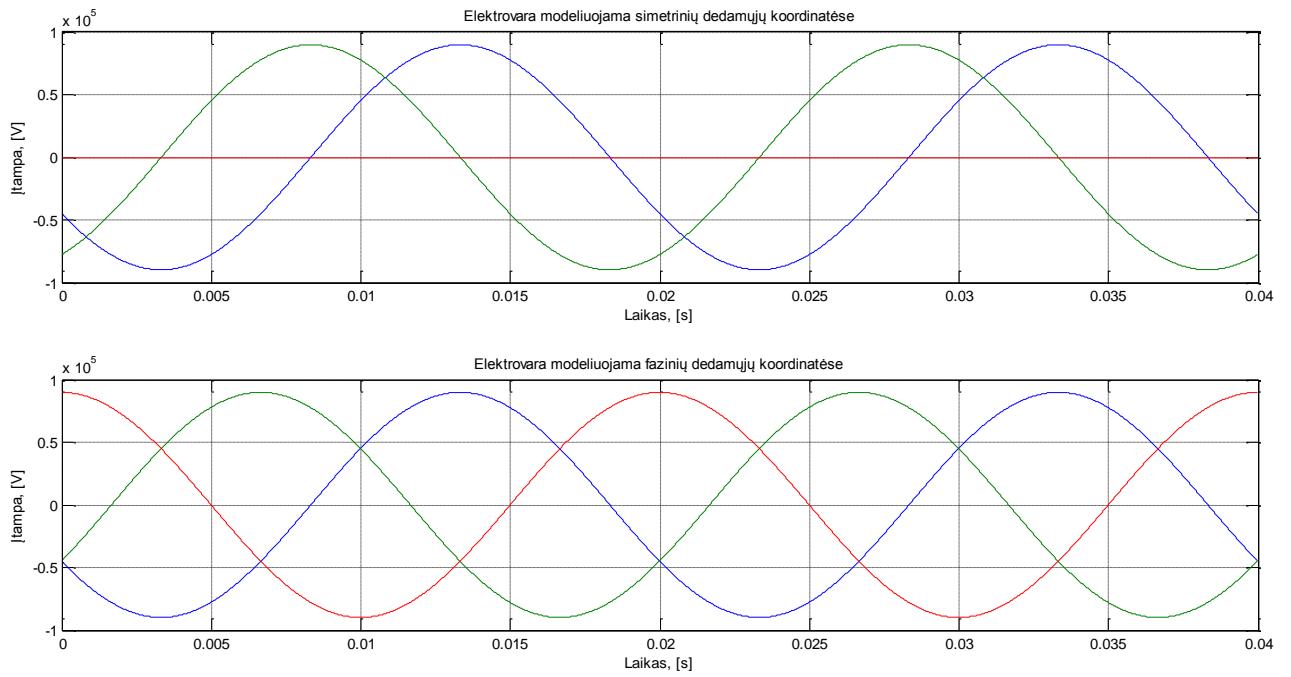
Elektros perdavimo linijos įjungimo metu ekvivalentinė elektrovara yra laikoma kaip vienas iš ekvivalentinių sistemos parametrų, kartu su ekvivalentine sistemos varža, charakterizuojantis sistemą prie kurios yra prijungiamas elektros perdavimo linija. Elektrovara modelyje aprašoma naudojant 4.15 lygčių sistemą:

$$\begin{cases} E_1 = U_A \sin(\omega t - \varphi) \\ E_2 = U_A \cos(\omega t - \varphi); \\ E_0 = 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

čia: U_A - elektrovaros amplitudė;

φ - elektrovaros fazinis kampas.

Elektrovara simetrinių dedamųjų ir fazinių koordinačių sistemoje atvaizduojama 4.2 pav.



4.2 pav. Elektrovara simetriųjų ir fazinių dedamųjų koordinatėse

Elektrovaros amplitudė laikoma momentinė maksimali vienos fazės įtampos amplitudė, kuri yra lygi 89,8 kV.

5 TYRIMO REZULTATAI

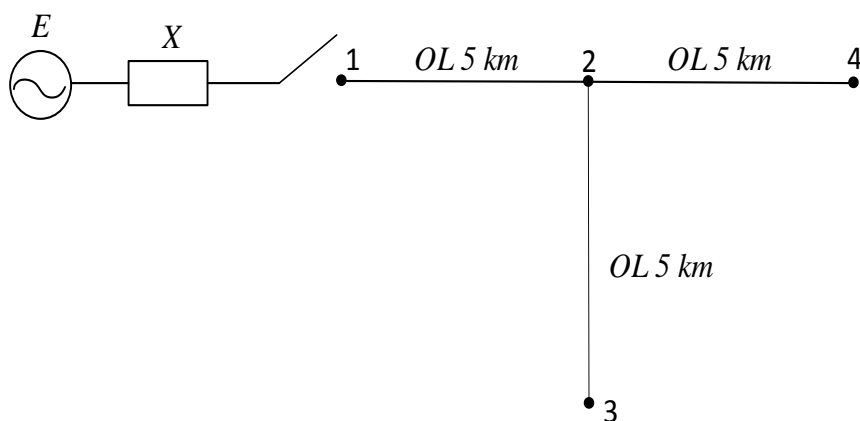
Atliekant virštampių linijos įjungimo metu tyrimą privaloma pasirinkti tinkamą minimalų modeliavimo žingsnį tam, kad modeliavimo rezultatai būtų kuo tikslesni. Dėl šios priežasties atliekamas minimalaus modeliavimo žingsnio parinkimo tyrimas, kuris aprašomas tolimesniame skyriuje.

5.1 Minimalaus modeliavimo žingsnio parinkimas

Atliekant minimalaus modeliavimo žingsnio parinkimą naudojamas oro linijos su atšaka pavyzdys (5.1 pav.). Atliekant modeliavimą priimama, kad:

- momentinė maksimali vienos fazės įtampos amplitudė lygi 89,8 kV;
- sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinis kampas lygus 0° ;
- ekvivalentinė sistemos varža lygi: tiesioginės sekos - 4Ω , atvirkštinės sekos - 4Ω ir nulinės sekos $3,6 \Omega$;
- elektros perdavimo linijos atkarpų banginės varžos yra lygios - po 400Ω ;

Nekeičiant aukščiau minėtų parametrų atliekamas minimalaus modeliavimo žingsnio keitimas skaičiuojant virštampių vertes elektros perdavimo linijos mazguose.



5.1 pav. Oro linijos su atšaka principinė tyrimo schema

Pereinamieji vyksmai įjungiant liniją modeliuojami skirtingais minimaliais laiko žingsniais: $10 \mu\text{s}$, $5 \mu\text{s}$, $1 \mu\text{s}$, $0,5 \mu\text{s}$ ir $0,1 \mu\text{s}$. Maksimalūs virštampiai kiekviename mazge pateikiami 5.1 lentelėje.

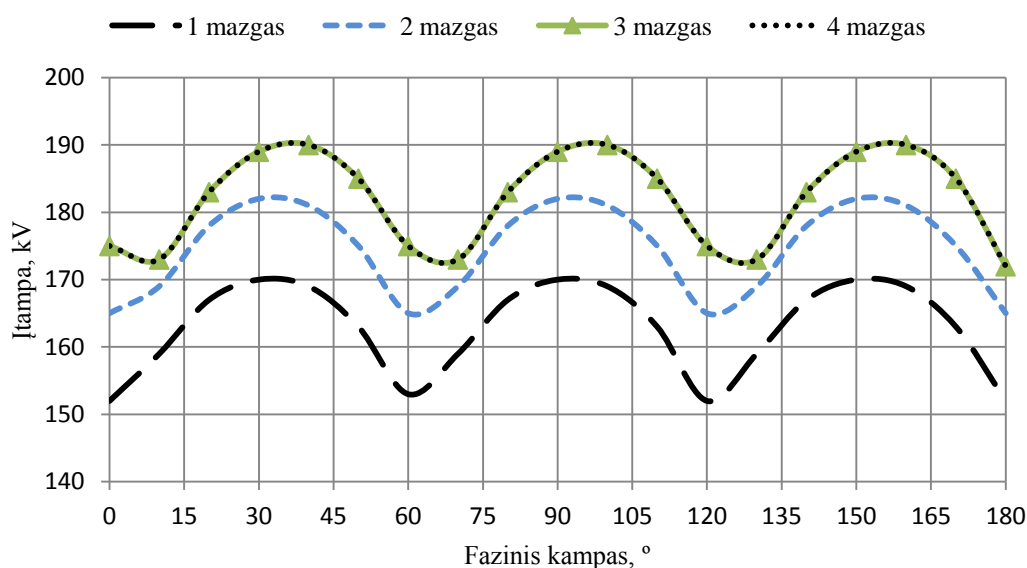
5.1 lentelė. Minimalaus laiko žingsnio parinkimas

Minimalus laiko žingsnis, μs	Maksimali įtampos vertė pereinamojo vyksmo metu linijos mazguose, kV			
	1	2	3	4
10	147	156	162	162
5	153	159	165	165
1	152	165	175	175
0,5	153	165	175	175
0,1	156	166	172	172

Remiantis 5.1 lentelės duomenimis, tiksliausi matavimai gaunami turint mažiausią minimalų modeliavimo žingsnį 0,1 μs . Vis dėlto, atliekant skaičiavimus esant mažesniai nei 1 μs laiko žingsniui skaičiavimai tam pačiam laiko tarpui užtrunka žymiai ilgiau, t.y. reikalinga atlikti daugiau skaičiavimo veiksmų. Žvelgiant iš praktinės pusės modeliavimo rezultatai prie 0,1 μs ir prie 1 μs laiko žingsnių maksimaliai skiriasi apie 2,5 %. Modeliuojant sistemą, kurioje pereinamasis vyksmas trunka ilgesnį laiko tarpą, modeliavimas prie 1 μs yra optimalus ir reikalaujantis mažiau skaičiavimo veiksmų. Dėl šios priežasties minimalus modeliavimo laiko žingsnis tolimesniam modeliavimui pasirenkamas 1 μs .

5.2 Viršįtampių priklausomybė nuo sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinio kampo

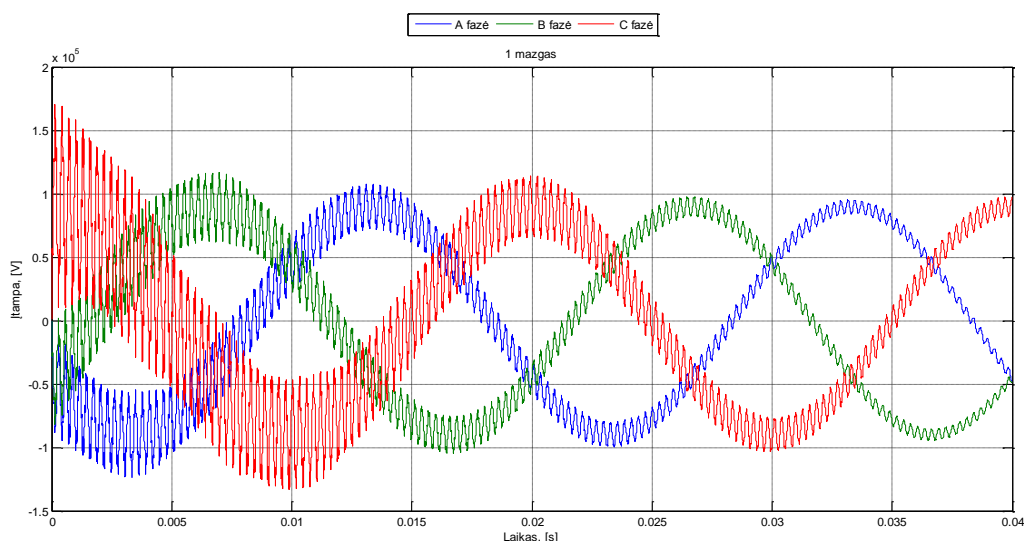
Atliekamas elektros perdavimo linijos įjungimo tyrimas keičiant elektrovaros fazinį kampą. Modeliavimo metu skaičiuojami viršįtampiai linijos įjungimo metu. Principinė elektros perdavimo linijos schema ir parametrai išlaikomi tokie pat, kaip ir nustatant minimalų modeliavimo žingsnį. Atlikus modeliavimą gauti rezultatai pateikiami grafiškai 5.2 pav.



5.2 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinio kampo pokyčio

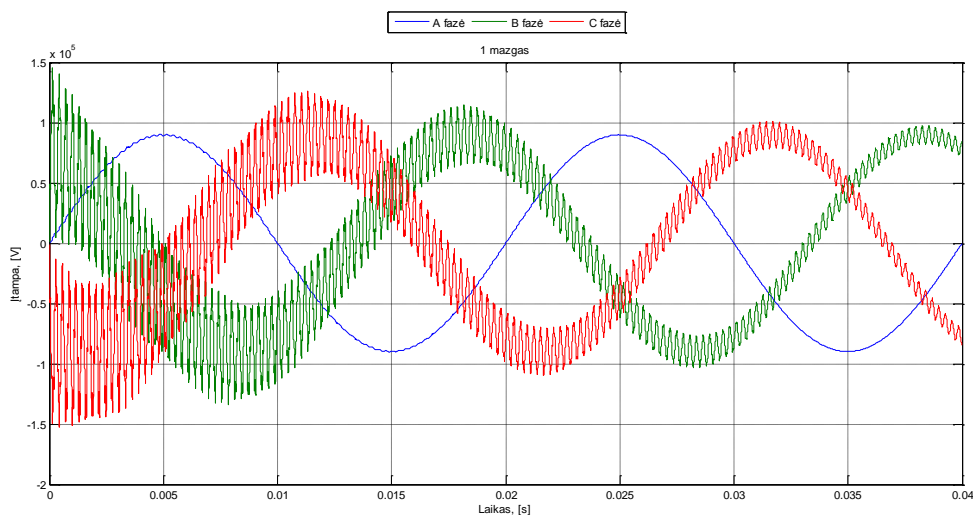
Kaip matome iš 5.2 pav., keičiant sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinį kampą linijos įjungimo metu keičiasi ir viršįtampių vertės elektros perdavimo linijos mazguose. Didžiausi viršįtampiai elektros perdavimo linijos mazguose fiksuojami ekvivalentiniam elektrovaros faziniam kampui esant 30° , 90° ir 150° . Taip pat daroma išvada, kad kiekviena iš fazinio kampo verčių charakteringa atskirai fazei. Ekvivalentinės elektrovaros faziniam kampui esant 30° arba 210° didžiausias viršįtampis pasireiškia B fazėje, 90° arba 270° - A fazėje, o 150° arba 330° - C fazėje (žr. 5.3 pav.). Mažiausi viršįtampiai elektros perdavimo linijos mazguose yra kai fazinis kampas linijos įjungimo metu lygus 0° , 60° , 120° , 180° , 240° arba 300° .

Viršįtampiai 1 mazge ekvivalentinės elektrovaros faziniam kampui esant 150° pateikiami 5.3 pav.



5.3 pav. Viršįtampiai 1 mazge ekvivalentinės elektrovaros faziniam kampui esant 150°

Viršįtampiai 1 mazge ekvivalentinės elektrovaros faziniam kampui esant 0° pateikiami 5.4 pav.

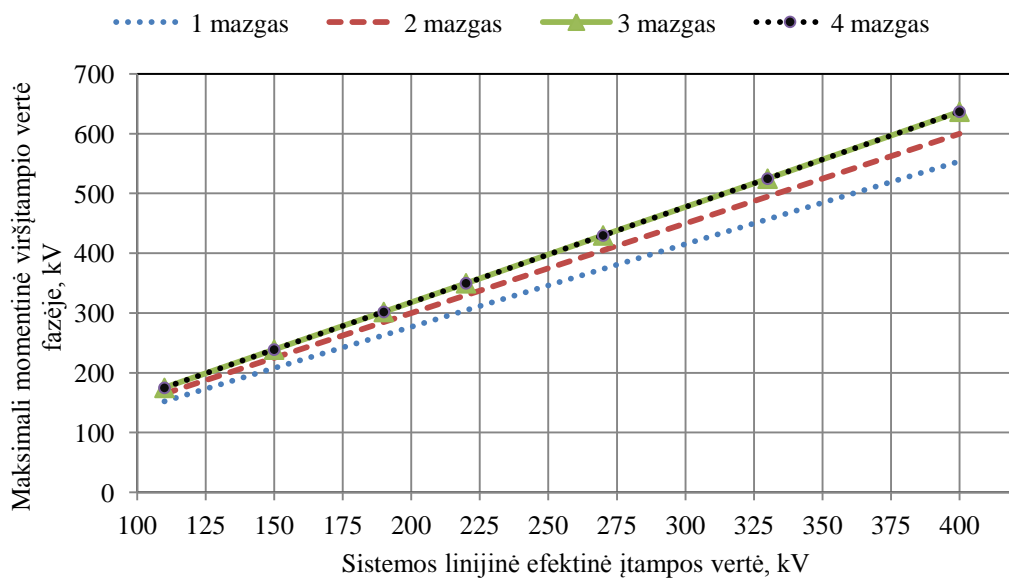


5.4 pav. Viršįtampiai 1 mazge ekvivalentinės elektrovaros faziniam kampui esant 0°

Remiantis gautais rezultatais galima daryti išvadą, kad žinant sistemos ekvivalentės elektrovaros (t.y. įtampos, linijos prijungimo prie sistemos mazge) fazinį kampą galima įvertinti kurioje fazėje bus didžiausias viršitampis.

5.3 Viršitampių priklausomybė nuo sistemos įtampos vertės

Atliekant viršitampių priklausomybės nuo sistemos ekvivalentinės elektrovaros tyrimą keičiama sistemos ekvivalentinės elektrovaros vertė ir skaičiuojami maksimalūs viršitampiai susidarantys elektros perdavimo linijos mazguose. Principinė elektros perdavimo linijos schema ir parametrai, nepriklausantys nuo sistemos ekvivalentinės elektrovaros išlaikomi tokie pat, kaip ir nustatant minimalų modeliavimo žingsnį. Tyrime pasirenkamos sistemos linijinės efektinės įtampos vertės yra: 110 kV, 150 kV, 190 kV, 220 kV, 270 kV, 330 kV ir 400 kV. Modeliavimo rezultatai grafiškai pateikiami 5.5 pav.



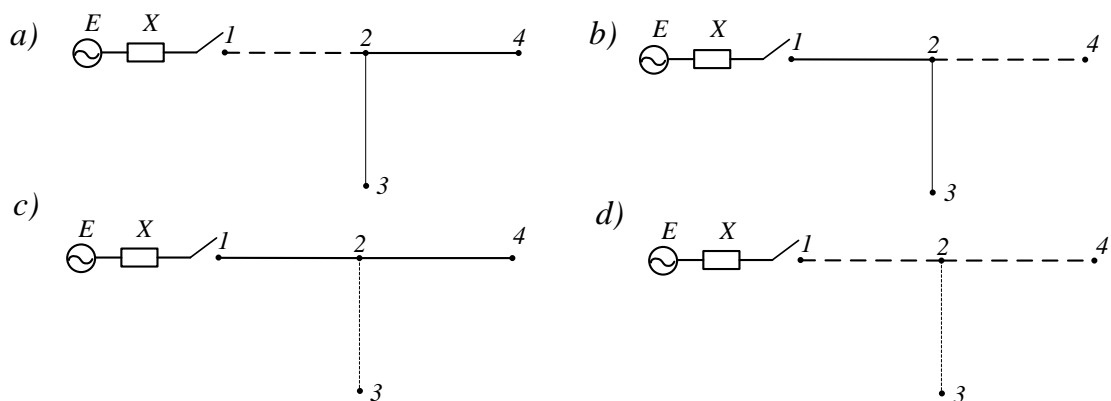
5.5 pav. Viršitampių priklausomybė nuo sistemos įtampos

Kaip matome iš 5.5 pav., viršitampiai atsirandantys elektros perdavimo linijos mazguose tiesiogiai priklauso nuo sistemos prie kurios jungiama linija įtampos. Didėjant sistemos įtampai didėja viršitampiai atsirandantys linijos mazguose linijos įjungimo metu.

5.4 Viršitampių priklausomybė nuo linijos atkarpų ilgio

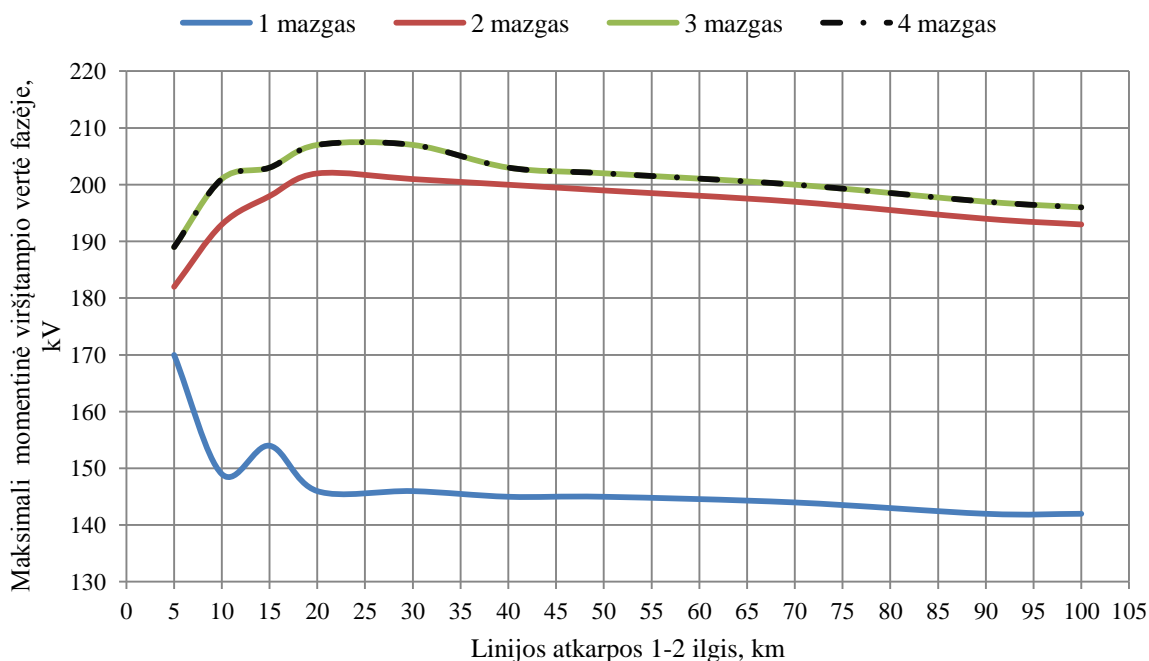
Atliekant viršitampių priklausomybės nuo elektros perdavimo linijos atkarpų ilgio tyrimą, pasirenkama elektros perdavimo linijos konfiguracija su viena atšaka (žr. 5.1 pav.). Linijos atkarpų banginės varžos priimamos po 500 Ω. Modeliavimo metu keičiamas vienos linijos

atkarpos atstumas išlaikant kitas dvi atkarpas nepakitusias (nekeičiamos atkarpos yra po 5 km ilgio) arba keičiamos visos linijos atkarpos vienodai vienu metu ir skaičiuojama, kokio dydžio viršįtampiai atsiranda linijos mazguose. Sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinis kampas 150° , todėl maksimalūs viršįtampiai visada atsiras C fazėje. Linijos principinė tyrimo schema pateikiama 5.6 pav.



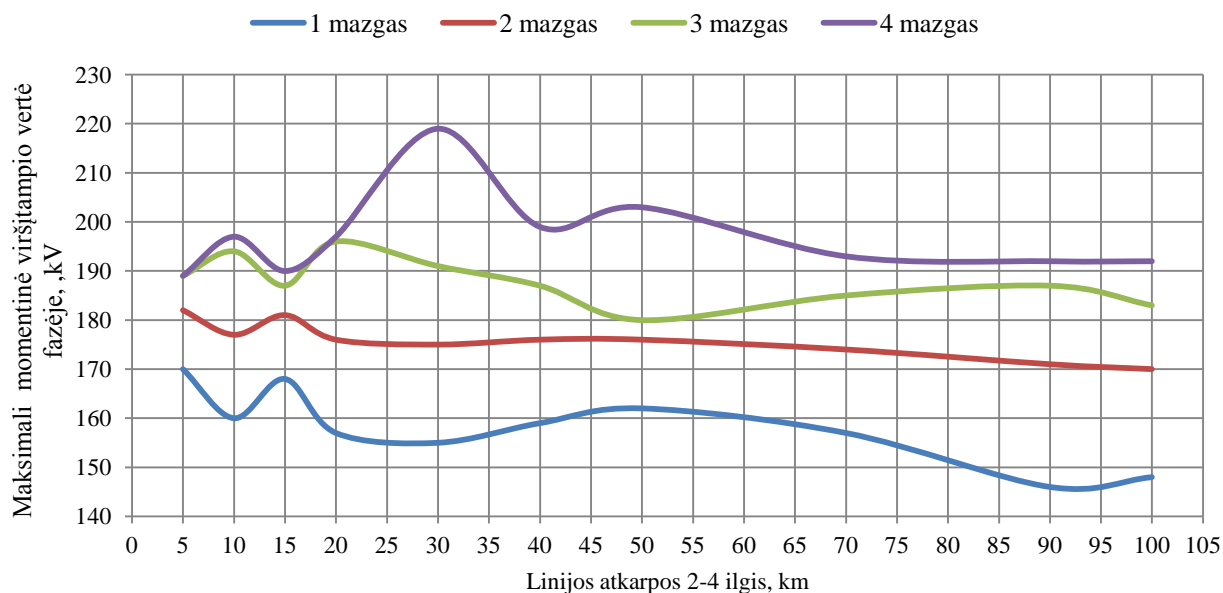
5.6 pav. Principinė tiriamos elektros perdavimo linijos schema

Tyrimo rezultatai pateikiami grafiškai. Elektros perdavimo linijos mazguose atsirandančių viršįtampių vertės keičiant elektros perdavimo linijos atkarpos 1 - 2 ilgį, o atkarpų 2 - 3 ir 2 - 4 ilgius išlaikant nekintančius po 5 km (žr. 5.6 pav. a) pateikiamas 5.7 pav.



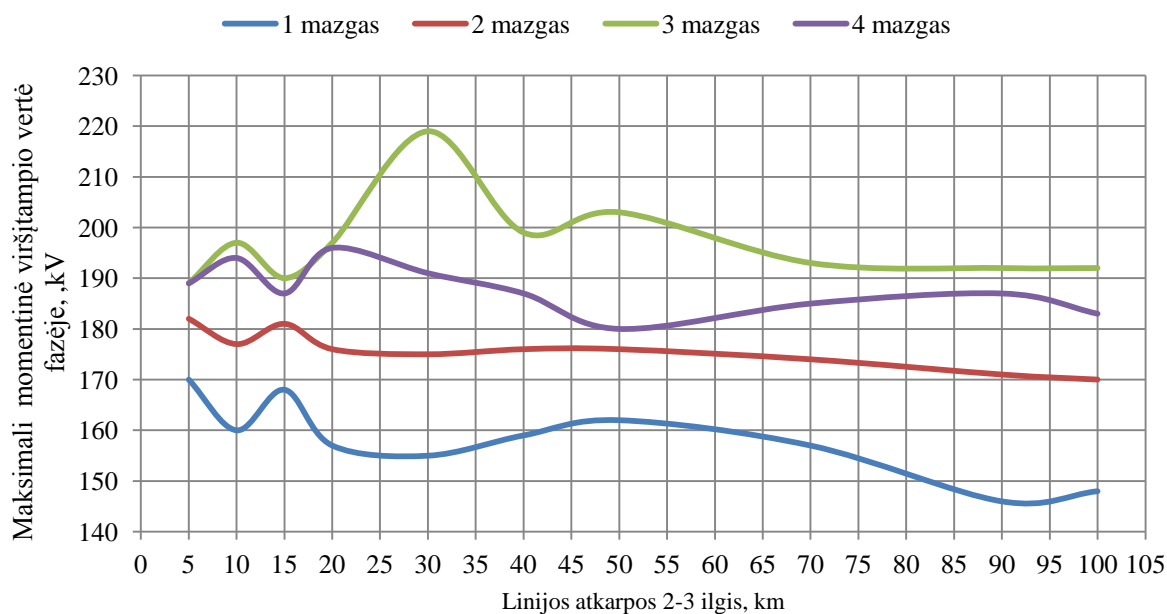
5.7 pav. Viršįtampiai keičiant linijos atkarpas 1 - 2 ilgį

Elektros perdavimo linijos mazguose atsirandančių viršįtampių vertės keičiant elektros perdavimo linijos atkarpos 2 - 4 ilgį, o atkarpų 1 - 2 ir 2 - 3 ilgius išlaikant nekintančius po 5 km (žr. 5.6 b) pateikiamas 5.8 pav.



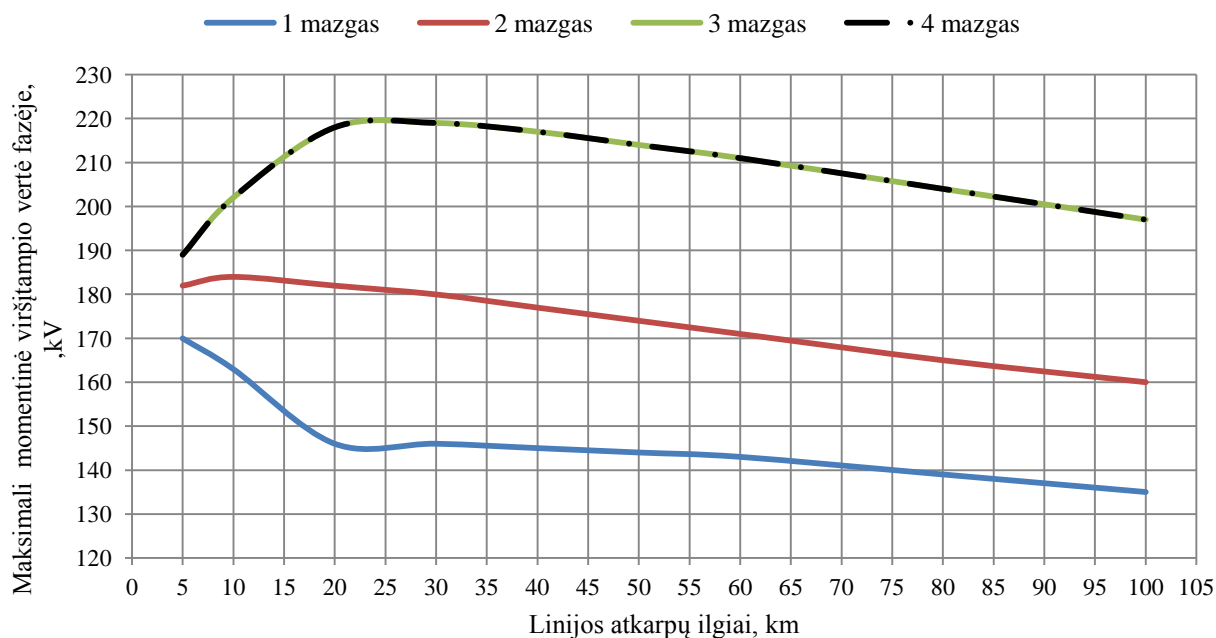
5.8 pav. Viršįtampiai keičiant linijos atkarpos 2 - 4 ilgį

Elektros perdavimo linijos mazguose atsirandančių viršįtampių vertės keičiant elektros perdavimo linijos atkarpos 2 - 3 ilgį, o atkarpų 1 - 2 ir 2 - 4 ilgius išlaikant nekintančius po 5 km (žr. 5.6 pav. c) pateikiamas 5.9 pav.



5.9 pav. Viršįtampiai keičiant linijos atkarpos 2 - 3 ilgį

Atliekamas viršįtampių tyrimas elektros perdavimo linijos mazguose, kai visos tiriamos elektros perdavimo linijos atkarpos yra ilginamos vienu metu nuo 5 km iki 100 km (žr. 5.6 pav. d). Tyrimo rezultatai grafiškai pateikiami 5.10 pav.



5.10 pav. Viršįtampiai mazguose keičiant elektros perdavimo linijų atkarpų ilgius

Remiantis tyrimo rezultatais, galime daryti išvadą, kad elektros perdavimo linijos atkarpų ilgiai turi įtaką viršįtampiams atsirandanties linijos mazguose. Iš gautų rezultatų galime daryti išvadas:

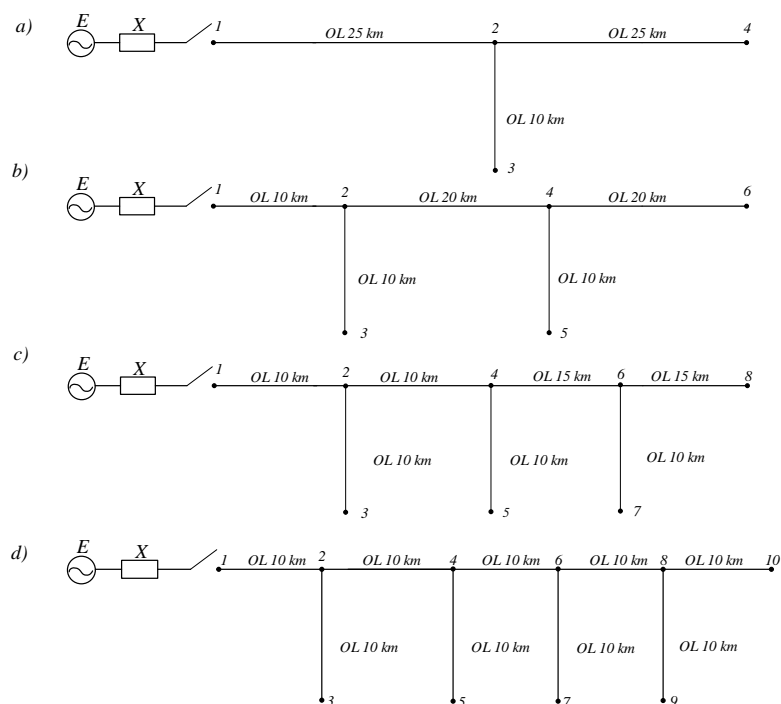
- Linijoje su viena atšaka kiekvienų iš modeliavimo atvejų mažiausi viršįtampiai skaičiuojami linijos prijungimo prie sistemos mazge;
- Visais atvejais keičiant vienos atkarpos ilgį ir išlaikant kitus du atkarpų ilgius nepakitusius, maksimalūs viršįtampiai linijoje su viena atšaka atsiranda, kai keičiamos linijos atkarpos ilgis yra nuo 5 iki 6 kartų didesnis nei tos, kurios ilgis nekeičiamas;
- Linijoje su viena atšaka maksimalūs viršįtampiai visada bus didžiausi linijos ir atšakos galuose (žr. 5.6 pav. atitinkamai 2 - 4 atkarpa ir 2 - 3 atkarpa). Kuriame iš minėtų mazgų viršįtampis bus didesnis priklausys nuo to, kuri atkarpa bus ilgesnė - ilgesnės atkarpos gale viršįtampis visada bus didesnis;
- Nepriklausomai nuo to ar didinama viena atkarpa linijoje, o kitos išlaikomos nepakitusios, ar didinamos visos atkarpos vienu metu maksimali viršįtampio vertė vertinant tarp visų linijos mazgų skiriasi apie 5%, todėl galima daryti išvadą, kad

nepriklausomai nuo linijos ilgio maksimalus viršįtampis linijoje kiekvienu atveju yra panašus, skiriasi tik konkrečiame mazge esančių viršįtampių vertės;

- Kai linijų ilgiai yra didesni nei 30 km ir linijos atkarpoms toliau ilgėjant vienodai viršįtampiai visuose linijų mazguose komutacinio įjungimo metu po truputį mažėja. Kai linijų atkarpų ilgiai yra vienodi ir mažesni nei 30 km didėjant linijos atkarpų ilgiams viršįtampiai linijos ir atkarpos galų mazguose taip pat didėja arba išlieka tokio pat dydžio;
- Maksimalūs viršįtampiai linijos mazguose yra vienodi linijos atkarpų ilgiams esant nuo 20 km iki 30 km diapazone.

5.5 Viršįtampių priklausomybė nuo linijos atšakų skaičiaus

Atliekamas tyrimas sudėtingesnei elektros perdavimo linijai. Tiriama elektros perdavimo linija su skirtingu skaičiumi atšakų. Linijos atkarpų banginės varžos priimamos po 400 Ω. Sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinis kampas 150°. Sistemos ekvivalentinė varža priimama tokia pat kaip ir atliekant minimalaus laiko žingsnio tyrimą. Atliekami du bandymai su skirtingais atkarpų ilgiais. Kiekvienu iš tyrimų oro linijų atkarpų ilgiai pateikiami principinėse schemose. Viršįtampių linijos mazguose priklausomybės nuo atšakų skaičiaus tyrimo principinė schema, kai linijos ilgis yra 50 km, pateikiama 5.11 pav.



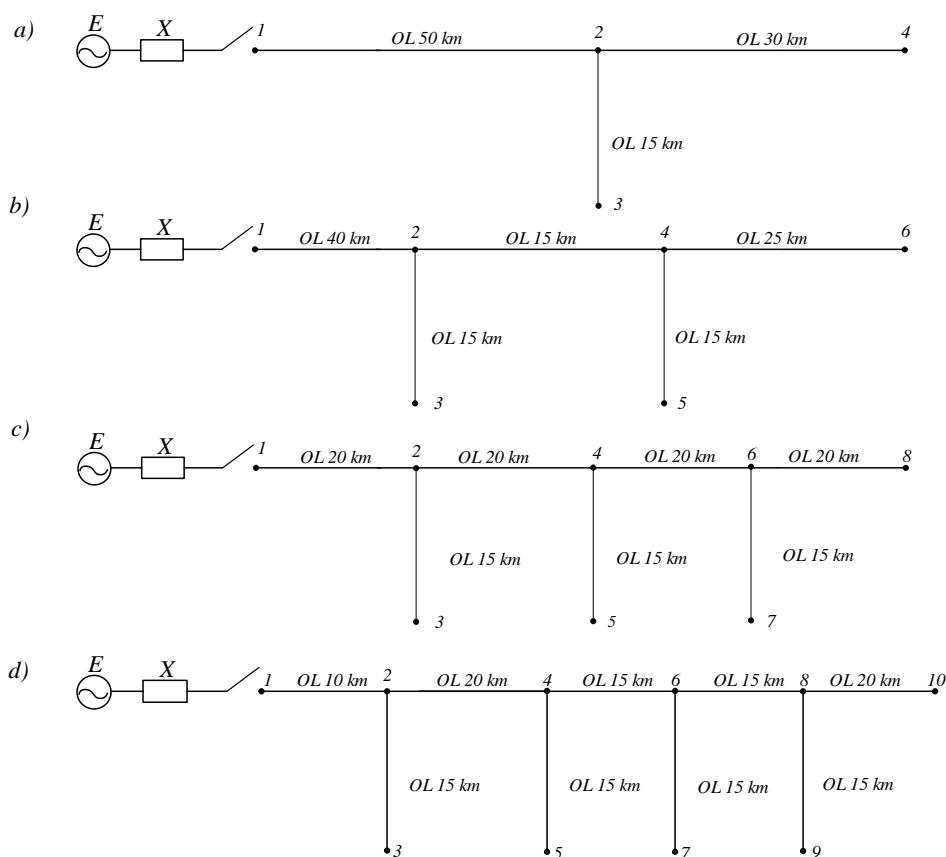
5.11 pav. Tiriamos oro linijos principinės schemos (50 km ilgio oro linijai su atšakomis): a) oro linija su viena atšaka, b) oro linija su dviem atšakomis, c) oro linija su trim atšakomis, d) oro linija su keturiomis atšakomis

Tyrimo rezultatai pateikiami 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. Viršįtampiai priklausomai nuo atšakų skaičiaus 50 km ilgio linijoje

Atšakų skaičius, vnt.	Viršįtampiai elektros perdavimo linijos mazguose, kV									
	1 mazgas	2 mazgas	3 mazgas	4 mazgas	5 mazgas	6 mazgas	7 mazgas	8 mazgas	9 mazgas	10 mazgas
1	147	189	211	221	-	-	-	-	-	-
2	151	177	196	187	199	197	-	-	-	-
3	156	182	193	180	183	184	188	189	-	-
4	145	179	195	185	187	181	204	183	184	184

Tyrimas kartojamas pakeitus linijos atkarpų ilgus. Principinė tyrimo schema pateikiama 5.12 pav.



5.12 pav. Tiriamos oro linijos principinės schemos (80 km ilgio oro linijai su atšakomis): a) oro linija su viena atšaka, b) oro linija su dviem atšakomis, c) oro linija su trim atšakomis, d) oro linija su keturiomis atšakomis

Tyrimo rezultatai pateikiami 5.3 lentelėje.

5.3 lentelė. Viršįtampiai priklausomai nuo atšakų skaičiaus 80 km ilgio linijoje

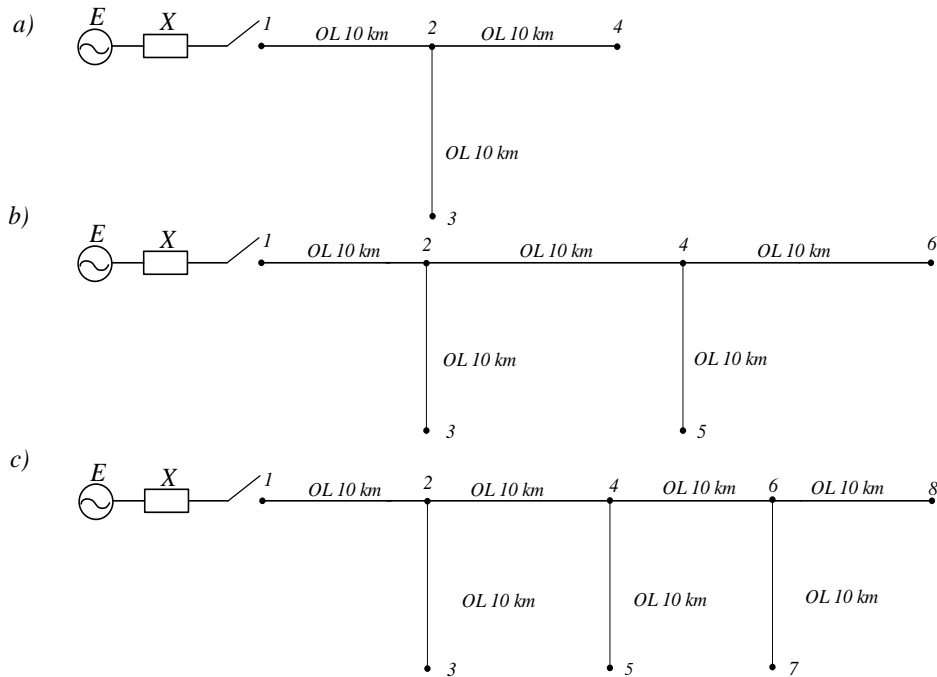
Atšakų skaičius, vnt.	Viršįtampiai elektros perdavimo linijos mazguose, kV									
	1 mazgas	2 mazgas	3 mazgas	4 mazgas	5 mazgas	6 mazgas	7 mazgas	8 mazgas	9 mazgas	10 mazgas
1	132	185	201	229	-	-	-	-	-	-
2	128	183	216	196	209	215	-	-	-	-
3	133	175	220	185	190	182	191	184	-	-
4	135	158	182	191	195	189	212	185	198	203

Iš tyrimo rezultatų matome, kad prie skirtingų linijos atkarpų ilgių gaunami rezultatai kai kuriuose mazguose skiriasi. Vis dėlto, galima išvelgti tam tikras viršįtampių kitimo tendencijas ir padaryti išvadas:

- Nepriklausomai nuo atšakų skaičiaus linijoje, mažiausia momentinė maksimali įtampos vertė pereinamojo vyksmo metu yra linijos prijungimo prie sistemos mazge;
- Linijoje esant vienai arba dviem atšakoms didžiausi viršįtampiai atsiranda linijos gale ir atšakos gale;
- Linijoje su trimis atšakomis, prie priimtų linijos parametrų, didžiausia viršįtampio vertė pasireiškia 3 mazge, o linijoje su keturiomis atšakomis - 7 mazge;
- Kai linijoje yra daugiau ne dvi atšakos skaičiavimas tampa kompleksinis, todėl viršįtampių reikšmės kartu priklauso ir nuo linijos atkarpų ilgio. Vis dėlto, iš tyrimo rezultatų matome, kad didėjant atšakų skaičiui linijoje, viršįtampių vertės linijos mazguose keičiame nedideliame diapazone ar net sumažėja (iki 17 %).

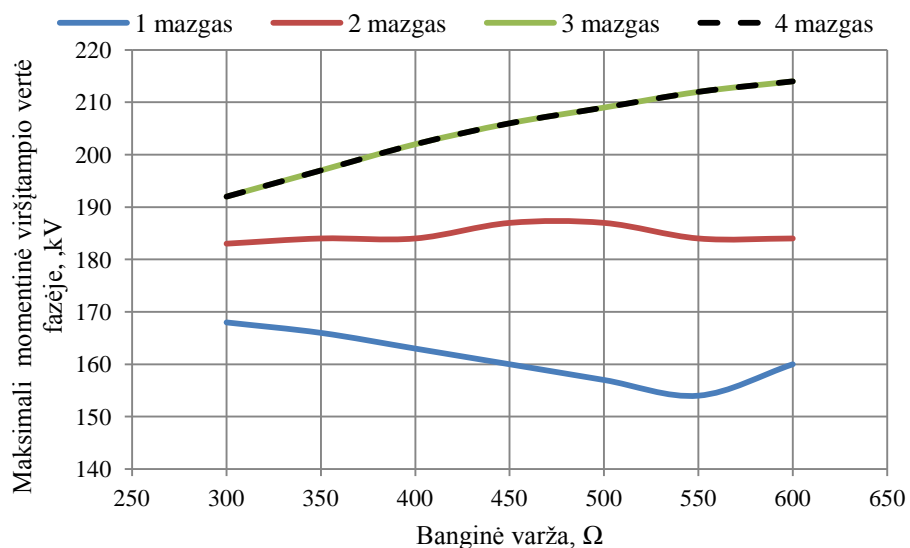
5.6 Viršįtampių priklausomybė nuo linijos banginės varžos

Keičiant elektros perdavimo linijos bangines varžas skaičiuojami viršįtampiai atsirandantys elektros perdavimo linijos mazguose. Banginės varžos keičiamos vienodai visose linijos atkarpose. Pereinamieji vyksmai modeliuojami trijose skirtingose konfigūracijos elektros perdavimo linijose (su viena, su dviem ir su trim atšakomis). Sistemos ekvivalentinė varža naudojama tokia pat kaip ir parenkant minimalų modeliavimo laiko žingsnį. Principinė tyrimo schema pateikiama 5.13 pav.



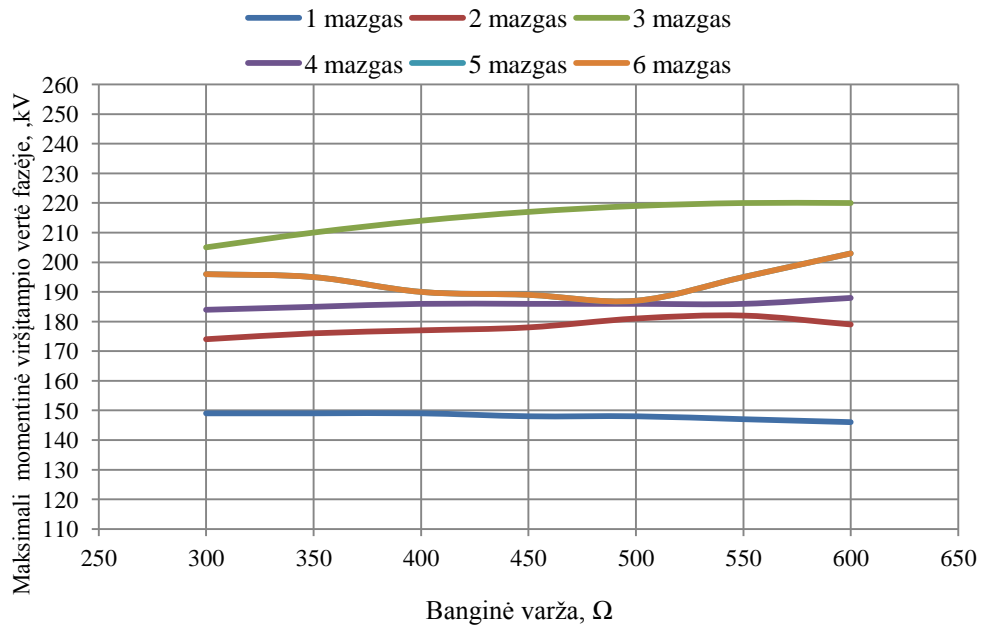
5.13 pav. Principinė tyrimo schema: a) linija su viena atšaka, b) linija su dviem atšakomis, c) linija su trim atšakomis

Modeliavimas atliekamas keičiant banginę varžą visose linijos atkarpose nuo 300Ω iki 600Ω po 50Ω . Modeliavimo rezultatai pateikiami grafiškai 5.14 - 5.16 pav. Tyrimo rezultatai linijoje su viena atšaka grafiškai pateikiami 5.14 pav.



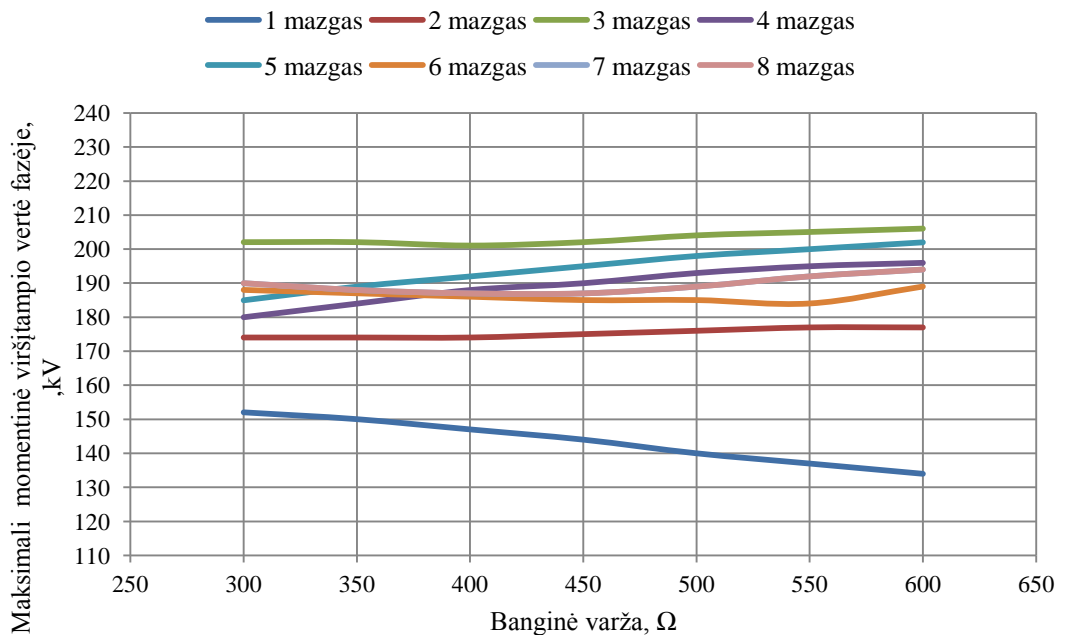
5.14 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo banginės varžos linijoje su viena atšaka

Tyrimo rezultatai linijoje su dviem atšakomis grafiškai pateikiami 5.15 pav.



5.15 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo banginės varžos linijoje su dviem atšakomis

Tyrimo rezultatai linijoje su trimis atšakomis grafiškai pateikiami 5.16 pav.



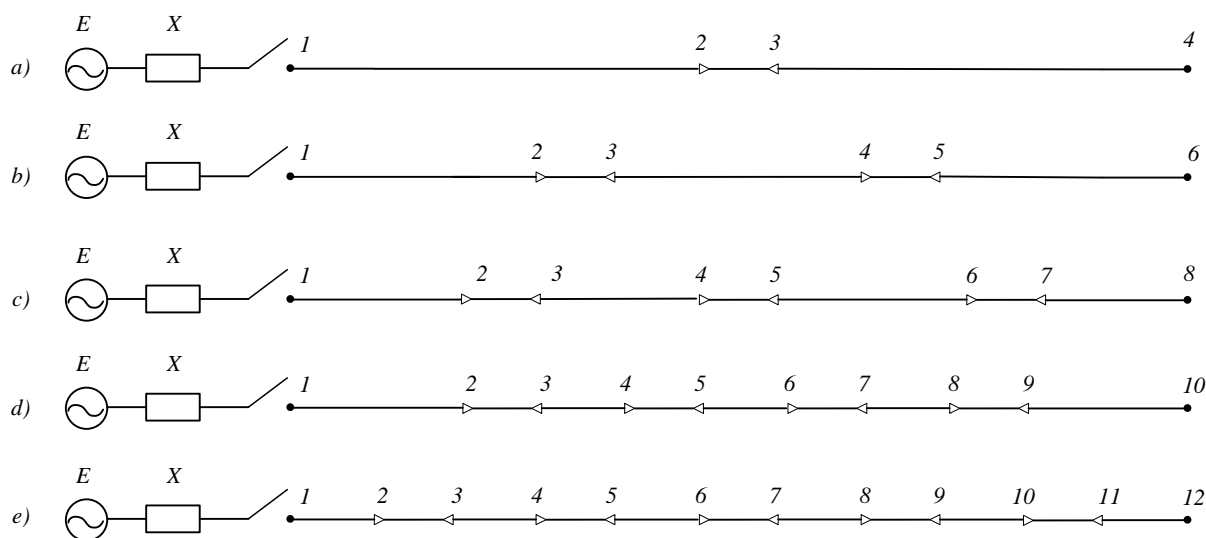
5.16 pav. Viršįtampių priklausomybė nuo banginės varžos linijoje su trimis atšakomis

Kaip matome iš tyrimų rezultatų, didžiausi skirtumai tarp viršįtampių verčių linijos mazguose keičiant banginę varžą visose linijos atkarpose vienu metu yra linijoje su viena atšaka. Šiuo atveju keičiant banginę varžą nuo 300 Ω iki 600 Ω viršįtampiai 3 ir 4 mazguose didėja, o 1 mazge mažėja. Kai linijoje yra daugiau atšakų, banginių varžų pokyčio įtaka viršįtampiams elektros perdavimo linijos mazguose yra nedidelė. Didžiausias pokytis yra pirmame mazge kai maksimali įtampos amplitudė pereinamojo vyksmo metu keičiant visų linijų bangines varžas nuo

300 Ω iki 600 Ω sumažėja apie 15 %, tačiau šiam procesui nemažai įtakos turi ir didėjantis mazgų skaičius elektros perdavimo linijoje. Apibendrinant galima teigti, kad banginių varžų įtaka viršįtampiams atsirandantiems elektros perdavimo linijos mazguose egzistuoja, tačiau ji nėra žymi.

5.7 Viršįtampių priklausomybė nuo kabelinių intarpų skaičiaus

Viršįtampių, atsirandančių elektros perdavimo linijoje, priklausomybė nuo kabelinių intarpų linijoje skaičiaus tyrimo principinė schema pavaizduota 5.17 pav.



5.17 pav. Principinė viršįtampių priklausomybės nuo kabelinių intarpų skaičiaus tyrimo schema

Tiriant viršįtampių priklausomybę nuo kabelinių intarpų skaičiaus fiksuoto ilgio elektros perdavimo linijoje keičiamas kabelinių intarpų skaičius nuo vieno iki penkių. Iš viso tiriami du atvejai: kai bendras elektros perdavimo linijos ilgis yra 30 km ir 70 km. Kiekvienu atveju linijos kabelinio intarpo ilgis yra 1 km. Oro linijos banginė varža 500 Ω , o kabelinių intarpų banginės varžos - 50 Ω . Efektinė linijinė įtampos vertė linijos prijungimo mazge ir sistemos ekvivalentinė varža priimamos tokios pat, kaip ir nustatant minimalų modeliavimo žingsnį. Sistemos ekvivalentinės elektrovaros fazinis kampas 150°. Tyrimo rezultatai kai bendras linijos ilgi 30 km pateikiami 5.3 lentelėje.

5.4 lentelė. Tyrimo rezultatai kai bendras linijos ilgi 30 km

Kabelinių intarpų skaičius, vnt.	Viršįtampiai elektros perdavimo linijos mazguose, kV											
	1 mazgas	2 mazgas	3 mazgas	4 mazgas	5 mazgas	6 mazgas	7 mazgas	8 mazgas	9 mazgas	10 mazgas	11 mazgas	12 mazgas
1	147	185	186	224	-	-	-	-	-	-	-	-
2	155	183	185	192	192	204	-	-	-	-	-	-
3	164	180	181	183	183	192	193	200	-	-	-	-
4	164	177	178	182	182	185	185	195	195	197	-	-
5	161	174	176	179	180	185	185	189	189	200	200	202

Tyrimo rezultatai kai bendras linijos ilgi 70 km pateikiami 5.4 lentelėje.

5.5 lentelė. Tyrimo rezultatai kai bendras linijos ilgi 70 km

Kabelinių intarpų skaičius, vnt.	Viršįtampiai elektros perdavimo linijos mazguose, kV											
	1 mazgas	2 mazgas	3 mazgas	4 mazgas	5 mazgas	6 mazgas	7 mazgas	8 mazgas	9 mazgas	10 mazgas	11 mazgas	12 mazgas
1	136	182	182	210	-	-	-	-	-	-	-	-
2	137	178	179	187	187	197	-	-	-	-	-	-
3	144	189	190	179	180	180	180	184	-	-	-	-
4	147	187	188	178	179	177	177	178	178	181	-	-
5	152	176	177	178	179	179	179	176	176	174	175	177

Elektros perdavimo linijos įjungimo metu perėjime iš kabelių į oro linijas ir iš oro į kabelių linijas susidaro viršįtampiai. Dėl skirtingų oro linijų atkarpų ilgių tarp kabelinių intarpų gaunami skirtingi rezultatai, tačiau galima daryti keletą išvadų, kurios charakterizuoja viršįtampių priklausomybę nuo kabelinių intarpų skaičiaus:

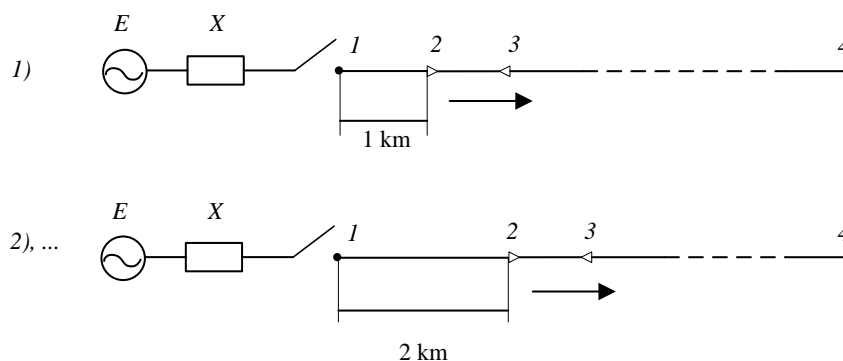
- Mažiausi viršįtampiai lyginant su kitais linijos mazgais ir nepaisant kabelinių intarpų skaičiaus yra linijos pradžioje (prijungimo prie sistemos mazge);

- Linijos įjungimo metu esant vienam kabeliniam intarpui linijos gale gaunami didžiausios amplitudės viršįtampiai. Linijoje su vienu kabeliniu intarpu ši vertė yra visada didžiausia palygus su linijomis, kuriose kabelinių intarpų yra du ar daugiau;
- Linijoje su vienu kabeliniu intarpu viršįtampių verčių skirtumas tarp pirmo ir paskutinio linijos mazgų įjungimo metu yra didžiausias (šiuo konkrečiu atveju siekia virš 1,5 karto);
- Linijoje didėjant kabelinių intarpų skaičiui maksimalios viršįtampių vertės tuose pačiuose linijos mazguose išlieka panašios arba mažėja. Išmtis yra prijungimo prie sistemos mazgas (žr. 5.17 pav. - 1 mazgas), kuriame viršįtampių vertė didinant kabelinių intarpų skaičių didėja.

Apibendrinant galima teigti, kad viršįtampiai linijos mazguose priklauso nuo kabelinių intarpų skaičiaus. Ypač išskirtinis atvejis yra, kai linija turi tik vieną kabelinį intarpą. Šiuo atveju yra suskaičiuotas didžiausias viršįtampis tiriant linijas su skirtingu intarpų skaičiumi. Esant dviem ar daugiau kabelinių intarpų, kiekviename mazge taip pat pasireiškia viršįtampiai, tačiau jie yra mažesni ir gaunamų verčių svyravimo diapazonas sąlyginai nėra didelis (apie 20 kV).

5.8 Viršįtampių priklausomybė nuo kabelinių intarpų ilgio ir vietos linijoje

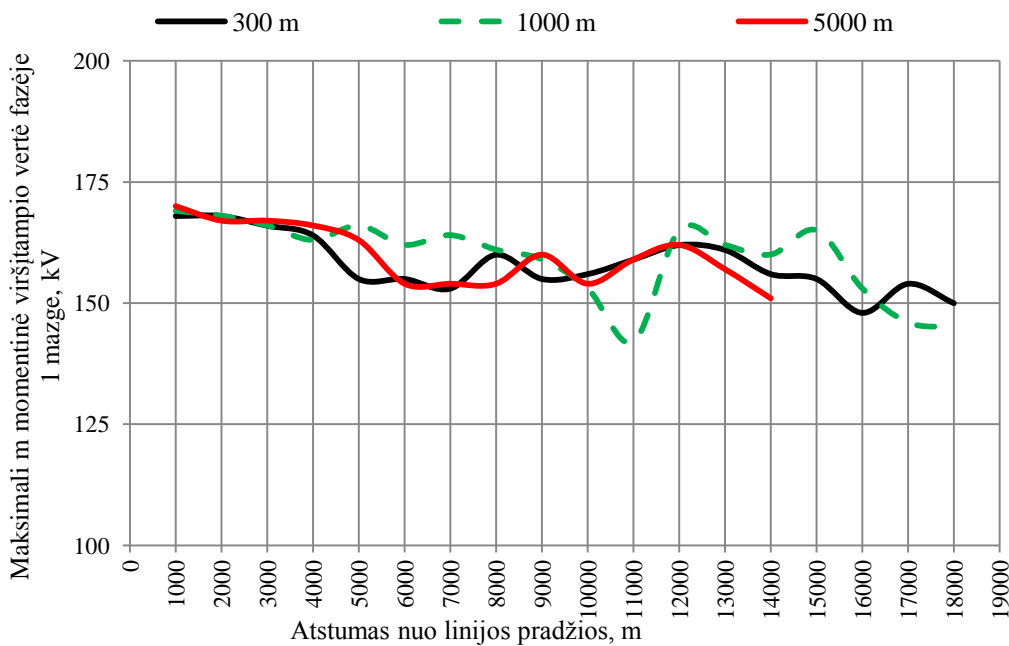
Atliekamas tyrimas, kurio metu kartu keičiamas kabelinio intarpo ilgis ir vieta linijoje. Principinė tyrimo schema pateikiama 5.18 pav.



5.18 pav. Principinė tyrimo schema viršįtampių priklausomybei nuo kabelinių intarpų ilgio ir vietos elektros perdavimo linijoje

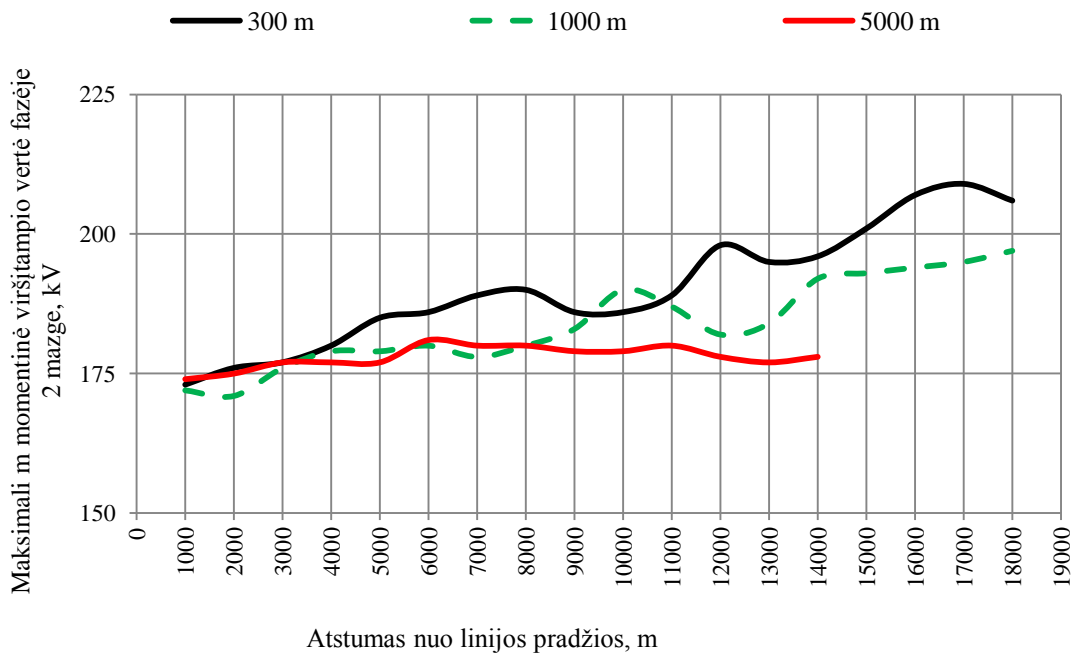
Tyrimo metu 0,3 km, 1 km ir 5 km ilgio kabeliniai intarpai kiekvieną modeliavimo etapą perstūmiami nuo linijos pradžios iki linijos galo fiksuotu ilgiu po 1 km. Kiekvienu etapu skaičiuojami viršįtampiai linijos mazguose. Visi kiti linijų parametrai pasirenkami tokie pat kaip tiriant viršįtampių priklausomybę nuo kabelinių intarpų skaičiaus. Tyrimo rezultatai kiekviename

mazge pateikiami grafiškai 5.19 - 5.22 pav. Viršūtiųjų tyrimo rezultatai 1 mazge pateikiami 5.19 pav.



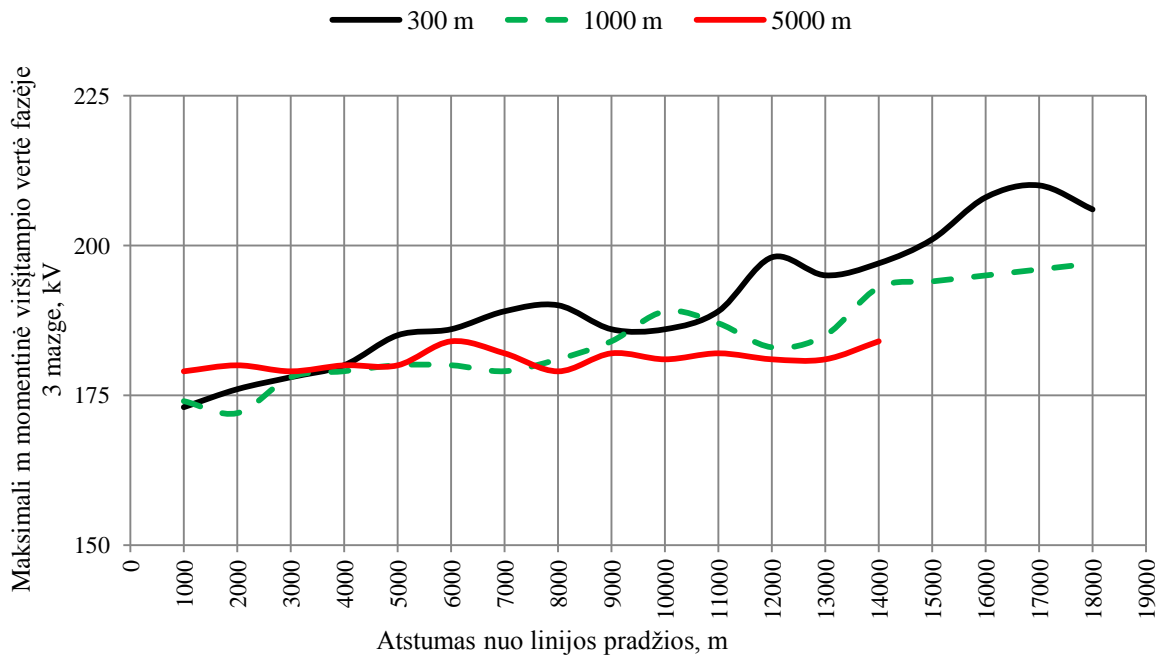
5.19 pav. Tyrimo rezultatai 1 mazge prie skirtingų kabelinių intarpų ilgių

Tyrimo rezultatai 2 mazge pateikiami 5.20 pav.



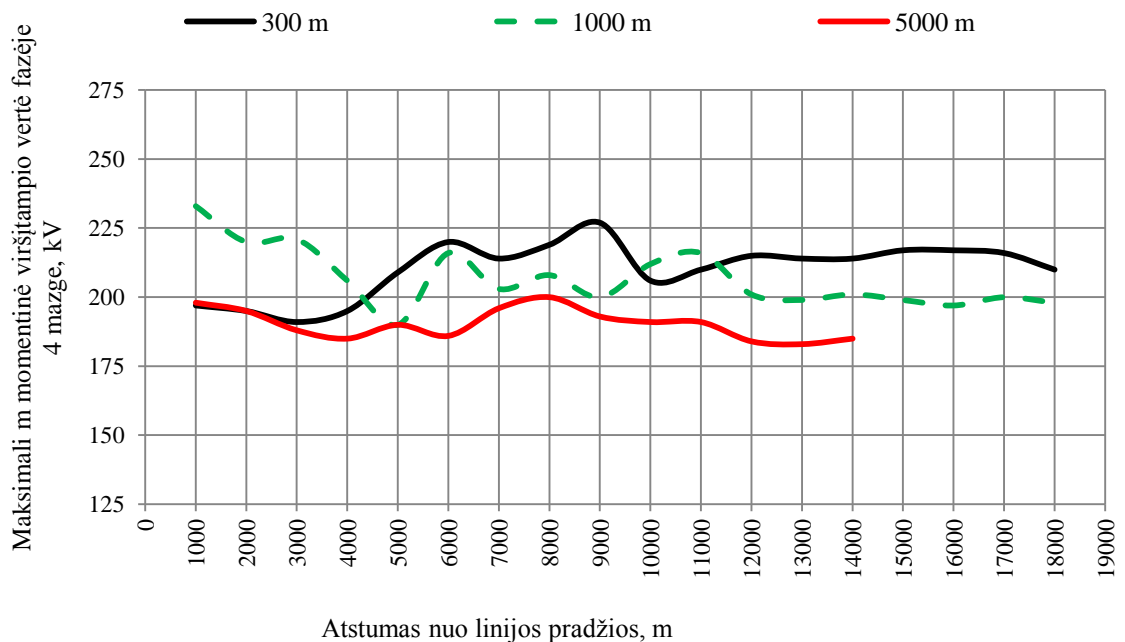
5.20 pav. Tyrimo rezultatai 2 mazge prie skirtingų kabelinių intarpų ilgių

Tyrimo rezultatai 3 mazge pateikiami 5.21 pav.



5.21 pav. Tyrimo rezultatai 3 mazge prie skirtingų kabelinių intarpų ilgių

Tyrimo rezultatai 4 mazge pateikiami 5.22 pav.



5.22 pav. Tyrimo rezultatai 4 mazge prie skirtingų kabelinių intarpų ilgių

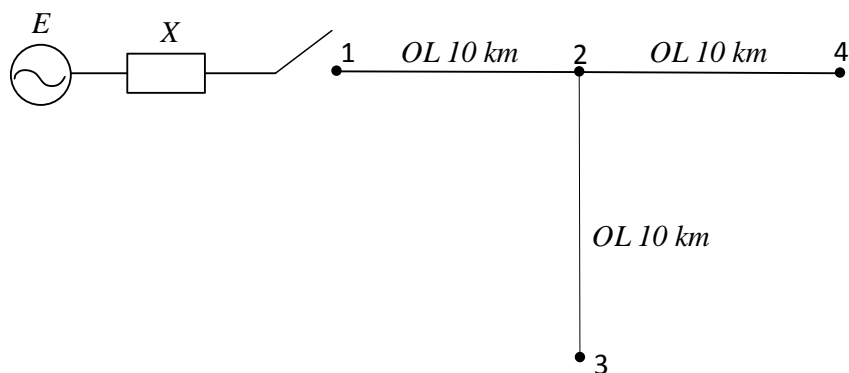
Viršįtampiai kabelinėse linijose priklauso nuo kabelinio intarpo vietos ir nuo kabelinio intarpo ilgio. Gaunama išvada, kad kabeliniam intarpui esant arčiau linijos pradžios, viršįtampiai atsirandantys kabelinio intarpo galų mazguose linijos įjungimo metu yra žemesni, o linijos prijungimo prie sistemos mazge - aukštesni nei tuo atveju, kai kabelinis intarpas yra arčiau

linijos galo. Iš tyrimo taip pat matome, kad esant trumpesniems kabeliniams intarpams, intarpų galuose viršįtampiai yra didesni nei esant ilgesniems kabeliniams intarpams. Ši tendencija pastebima, kai kabelinis intarpas yra arčiau linijos galo. Jei kabelinis intarpas yra arčiau linijos pradžios, galimas atvejis, kad viršįtampiai bus didesni kai kabelinės linijos intarpo ilgis yra didesnis.

Remiantis aukščiau paminėtomis išvadomis, galima teigti, kad viršįtampių verčių nustatymo uždavinys yra kompleksinis ir priklauso ir nuo kabelinių intarpų ilgio, ir nuo intarpo padėties linijoje, todėl norint gauti tikslius rezultatus privalo būti sprendžiamas kiekvienam individualiam atvejui.

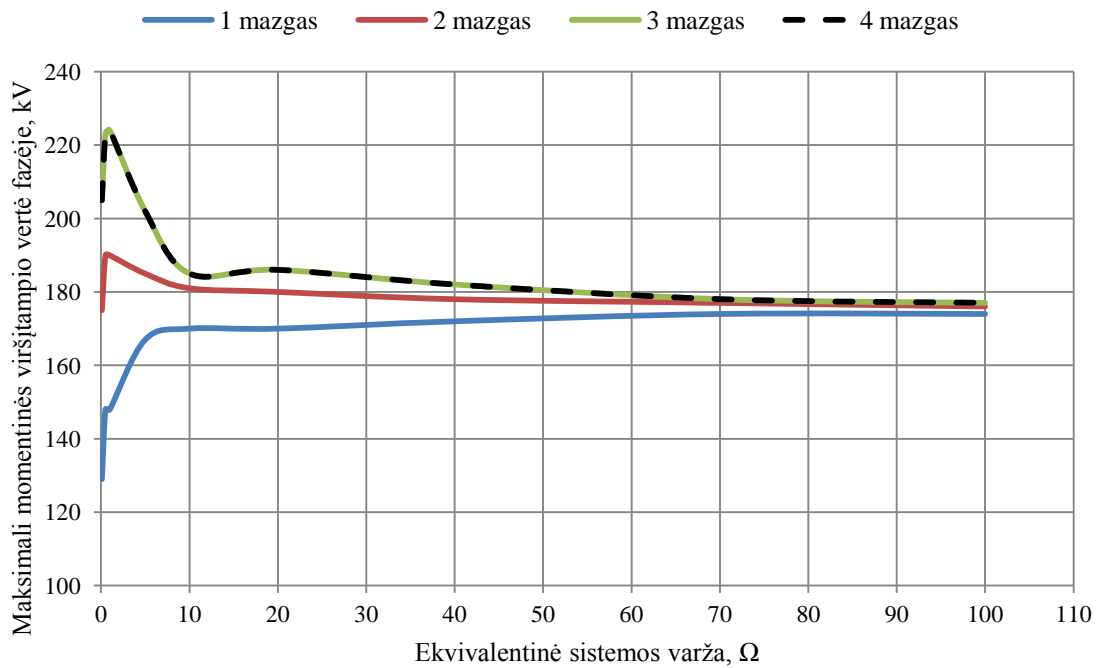
5.9 Viršįtampių priklausomybė nuo sistemos ekvivalentinės varžos

Atliekamas tyrimas, kuriame keičiama sistemos ekvivalentinė varža. Tyrimo metu analizuojama oro linija su viena atšaka. Principinė tyrimo schema pateikiama 5.23 pav.



5.23 pav. Viršįtampių priklausomybės nuo sistemos ekvivalentinės varžos tyrimo schema

Linijos atkarpų banginės varžos lygios po 500Ω . Sistemos elektrovaros fazinis kampas 150° . Efektinė linijinė įtampos vertė prijungimo prie elektros sistemos mazge lygi 110 kV . Sistemos ekvivalentinės varžos vertės (tiesioginės atvirškinės ir nulinės sekos) nuo $0,1 \Omega$ iki 100Ω . Viršįtampių mazguose priklausomybė nuo ekvivalentinės sistemos varžos pateikiama 5.25 pav.

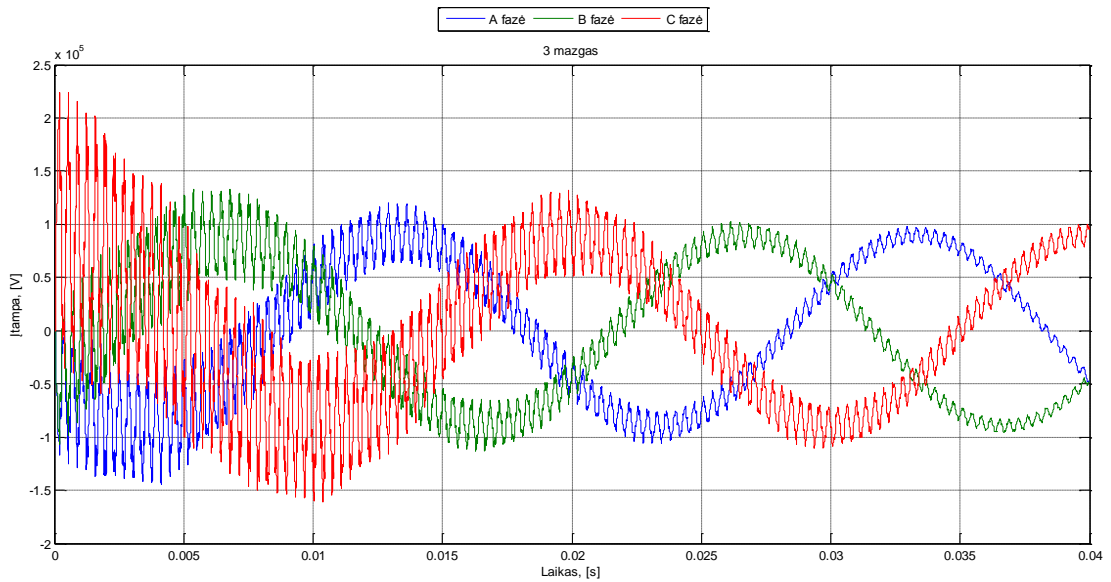


5.24 pav. Viršįtampių mazguose priklausomybė nuo ekvivalentinės sistemos varžos

Atsižvelgiant į 5.24 pav. daroma išvada, kad maksimalūs viršįtampiai pasireiškia linijos ir atšakos galuose (3 ir 4 mazguose). Iš gautų rezultatų galime daryti išvadas:

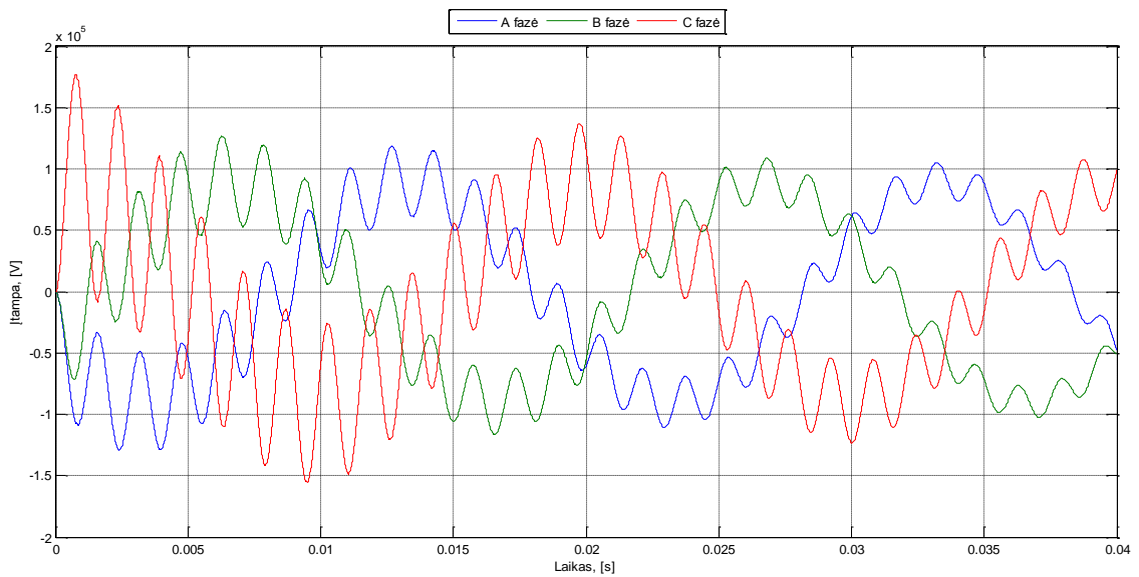
- Didėjant ekvivalentinei sistemos varžai viršįtampių vertės mazguose pasidaro vienodos;
- Egzistuoja tokia ekvivalentinės sistemos varža, kuriai esant viršįtampių vertės visuose mazguose, išskyrus linijos prijungimo prie sistemos mazgą, pasiekia maksimalią vertę ekvivalentinės varžos diapazone nuo 0,1 Ω iki 100 Ω. Tyrime ši ekvivalentinės sistemos varžos vertė lygi 1 Ω. Esant didesnei varžai viršįtampiai 2, 3 ir 4 mazguose pradeda mažėti;
- Viršįtampiai 1 mazge pasiekia maksimalią vertę, kai ekvivalentinė sistemos varža yra didžiausia;

Pereinamasi vyksmas kai ekvivalentinė sistemos varža lygi 1 Ω pateikiamas 5.25 pav.



5.25 pav. Pereinamasi vyksmas 4 mazge, kai ekvivalentinė sistemos varža lygi 1Ω

Pereinamasi vyksmas kai ekvivalentinė sistemos varža lygi 100Ω pateikiamas 5.26 pav.



5.26 pav. Pereinamasi vyksmas 4 mazge, kai ekvivalentinė sistemos varža lygi 100Ω

Iš 5.25 - 5.26 pav. matome, kad didėjant ekvivalentinės sistemos varžos vertei pereinamasis vyksmas linijos mazge linijos įjungimo metu keičiasi. Esant didesnei varžai atsiranda mažiau ir mažesnės vertės impulsų, tačiau jie trunka ilgiau.

IŠVADOS

1. Atlikus skirtingų linijos modelių teorinę analizę nustatyta, kad Bergeron linijos modelis yra pakankamai tikslus ir paprastai įgyvendinamas kompiuteriniuose skaičiavimuose. Dėl šios priežasties, remiantis Bergeron linijos modelio teorija sukurtas elektros perdavimo linijos modelis skirtas modeliuoti pereinamuosius vyksmus linijos įjungimo metu. Modelio algoritmas aprašytas naudojant MATLAB programą.

2. Nustatyta, kad didžiausi viršįtampiai atsiranda sistemos įtampos faziniams kampams esant 30° , 90° , 150° , 210° , 270° ir 330° , o mažiausi - 0° , 60° , 120° , 180° , 240° , 300° . Skirtumas tarp maksimalių ir minimalių viršįtampių verčių gali siekti iki 24 %. Sistemos įtampos vertė ir viršįtampių lygis turi tiesioginę priklausomybę. Didėjant sistemos įtampai didėja viršįtampiai atsirandantys linijos mazguose linijos įjungimo metu. Didėjant sistemos ekvivalentinės varžos vertei nuo $0,1 \Omega$ iki 100Ω pereinamasis vyksmas linijos mazguose linijos įjungimo metu keičiasi. Esant didesnei varžai atsiranda mažiau ir mažesnės vertės (iki 29 %) impulsų, tačiau jie trunka iki 15 kartų ilgiau.

3. Linijoje su viena atšaka viršįtampiai linijos gale ar atšakos gale priklauso nuo to, kuri prie atitinkamo mazgo esanti linijos atkarpa bus ilgesnė - ilgesnės atkarpos gale viršįtampis visada bus didesnis ir gali siekti iki 2,4 karto lyginant su maksimalia įtampa normaliu darbo režimu. Nepriklausomai nuo linijos atkarpų ilgių maksimalūs viršįtampiai linijoje kiekvienu atveju yra panašūs, skiriasi tik konkrečiame mazge esančių viršįtampių vertės.

4. Linijoje esant vienai arba dviem atšakoms didžiausi viršįtampiai atsiranda linijos gale ir atšakos gale (iki 2,4 karto lyginant su maksimalia įtampa normaliu darbo režimu). Kai linijoje yra daugiau nei dvi atšakos skaičiavimas tampa kompleksinis, todėl viršįtampių reikšmės kartu priklauso ir nuo linijos atkarpų ilgio. Vis dėlto, iš tyrimo rezultatų matome, kad didėjant atšakų skaičiui linijoje, viršįtampių vertės linijos mazguose keičiame nedideliame diapazone ar net sumažėja (iki 17 %).

5. Banginių varžų įtaka viršįtampiams atsirandantiems elektros perdavimo linijos mazguose egzistuoja, tačiau ji nėra žymi. Keičiant banginės varžos vertes nuo 300Ω iki 600Ω viršįtampių vertės keičiasi maksimaliai iki 12 %. Dėl šios priežasties, apytiksluose skaičiavimuose banginės varžos pokytis gali būti paneigiamas.

6. Viršįtampiai linijos mazguose priklauso nuo kabelinių intarpų skaičiaus. Ypač išskirtinis atvejis yra tada, kai linija turi tik vieną kabelinį intarpą. Šiuo atveju linijos gale atsiranda didžiausias viršįtampis iš visų kabelinių intarpų linijoje tyrimo atvejų, kuris siekia iki 2,5 karto lyginant su maksimalia įtampa normaliu darbo režimu. Linijoje didėjant kabelinių

intarpų skaičiui maksimalios viršįtampių vertės tuose pačiuose linijos mazguose išlieka panašios arba mažėja (maksimaliai sumažėja 16 %). Išimtis yra prijungimo prie sistemos mazgas, kuriame viršįtampių vertė didinant kabelinių intarpų skaičių didėja iki 12 %.

7. Kabeliniam intarpui esant arčiau linijos pradžios viršįtampiai, atsirandantys kabelinio intarpo galų mazguose linijos įjungimo metu, yra mažesni (iki 19 %), o linijos prijungimo prie sistemos mazge - didesni (iki 12 %) nei tuo atveju, kai kabelinis intarpas yra arčiau linijos galo. Esant trumpesniai kabeliniam intarpui, intarpo galuose viršįtampiai yra didesni (iki 10 %) nei esant ilgesniai kabeliniam intarpui, kai kabelinis intarpas yra arčiau linijos galo. Jei kabelinis intarpas yra arčiau linijos pradžios, galimas atvejis, kad viršįtampiai bus didesni kai kabelinės linijos intarpo ilgis yra didesnis.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. BAUBLYS, J.; JANKAUSKAS, P.; MARKEVIČIUS, L. A. ir MORKVĖNAS, A., Izoliacija ir viršįtampiai, Kaunas: KTU leidykla "Technologija", 2008, p. 311.
2. SOLOOT, A. H., et al. Investigation of Transmission Line Overvoltages and their Deduction Approach. *transformation*, 2009, 9: 10, p. 362-369.
3. IBRAHIM, A. I.; DOMMEL, H. W. A knowledge base for switching surge transients. In: *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) in Montreal, Canada on June*. 2005. p. 19-23.
4. MESTAS, P.; TAVARES, M. C. Comparative analysis of techniques for control of switching overvoltages during transmission lines energization. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80.1: p. 115-120.
5. THUKARAM, D.; KHINCHA, H. P.; KHANDELWAL, S. Estimation of switching transient peak overvoltages during transmission line energization using artificial neural network. *Electric Power Systems Research*, 2006, 76.4: p. 259-269.
6. OSBORNE, M. M., et al. Points to consider regarding the insulation coordination of GIS substations with cable connections to overhead lines. In: *Int. Conf. Power Systems Transients (IPST'07), Session*. 2007.
7. GUDŽIUS, S.; MARKEVIČIUS, L. A.; MORKVĖNAS, A.; NAVICKAS, A. ir STANIONIENĖ R., *Elektros valdymo technologijos ETC - 2007* [interaktyvus]. [Lietuva, Kaunas]: ECT-2007, Gegužė, 2007 [žiūrėta 2016 m. kovo 10 d.]. Prieiga per internetą: http://www.elektroklubas.lt/archyvas/pdf/ECT2007_Proceedings_LT.pdf.
8. CABALLERO, P. T.; COSTA, E. C. M.; KUROKAWA, S. Fitting the frequency-dependent parameters in the Bergeron line model. *Electric Power Systems Research*, 2014, 117: p. 14-20.
9. ANDERSSON, Göran. Modelling and analysis of electric power systems. *ETH Zurich*, september, 2008, p. 5 - 6.
10. MARTINEZ-VELASCO, J. A. (ed.). *Power system transients: parameter determination*. CRC press, 2009, p. 8 - 9.
11. AL-HASAWI, W.; ABBASY, N. H. Evaluation of transient switching over-voltages in Kuwait EHV network using EMTP. *Electric Power Systems Research*, 2000, 54.1: p. 1-10.
12. ANDRADE, L.; LEITE, H.; PONCE DE LEAO, M. T. Time-domain distributed parameters transmission line model for transient analysis. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2013, 53: p. 25-46.

13. GONEN, T. *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*. CRC Press, 2011, p. 343 - 368.
14. HASE, Y. *Handbook of power system engineering*. John Wiley & Sons, 2007, p. 339 - 347.
15. ORTA, R. Lecture Notes on Transmission Line Theory [interaktyvus]. [Italy, Torino]: November, 2012 [žiūrėta 2016 m. balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <http://personal.delen.polito.it/Renato.Orta/PassOpticalComp/TransmissionLinesLectureNotesNov2012.pdf>.
16. LUCAS, J. R. *High voltage engineering*, Colombo: Open University of Sri Lanka, 2001, p. 45-63.
17. WATSON, N.; ARRILLAGA, J. *Power systems electromagnetic transients simulation*. Iet, 2003, p. 124 - 126.
18. DOMMEL, H; Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks [interaktyvus]. April, 1969 [žiūrėta 2016 m. balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą: http://cira.ivec.org/dokuwiki/lib/exe/fetch.php/events/dommel_digitalcomputer_solution.pdf.
19. CABALLERO, P. T.; COSTA, E. C. M.; KUROKAWA, S.. Frequency-dependent multiconductor line model based on the Bergeron method. *Electric Power Systems Research*, 2015, 127: p. 314-322.
20. TLEIS, N. *Power systems modelling and fault analysis: theory and practice*. Newnes, 2007.
21. ELHAFFAR, A. M., Power transmission line fault location based current traveling waves. [interaktyvus]. [Finland, Helsinki]: Doctoral Dissertation, 2008 [žiūrėta 2016 m. balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3001/isbn9789512292455.pdf?sequence=1>.
22. DUESTERHOEFT, W. C. Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta, and Zero Components, *Browse Journals and Magazines*. July, 2009, vol. 70, No. 2, p 1248 - 1255.
23. ЩЕРБАЧЕВ, О. В. *Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике: Учеб. пособие для вузов*. Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980.
24. GUDŽIUS, S.; MARKEVIČIUS, L. A.; MORKVĖNAS, A.; Viršįtampių ribotųjų darbo sąlygų tyrimas izoliuotos neutralės tinkle. *Energetika*, 2001, nr. 1. p. 21-26.