



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Jonas Vaišnys

AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS KABELIO
DARBO REŽIMŲ ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Saulius Gudžius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS KABELIO
DARBO REŽIMŲ ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos 621H63005

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Saulius Gudžius
(data)

Recenzentas

(parašas)
(data)

Projektą atliko

(parašas) Jonas Vaišnys
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Jonas Vaišnys

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelio darbo režimų analizė“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Jono Vaišnio**, baigiamasis projektas tema „Aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelio darbo režimų analizė“ 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)

Vaišnys, J. Aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelio darbo režimų analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 84 psl.

SANTRAUKA

Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą nustatyta, kad elektros energijos perdavimui dideliais atstumais vis labiau populiarėja aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelio su polimerine izoliacija ir VSC tipo keitiklio sistemos. Taip pat nustatyta, kad tokios sistemos darbo režimai yra švelnesni nei pirmtako CSC, visgi erdvinio krūvio sankaupos izoliacijos sluoksnyje stipriai veikia elektrinio lauko stiprio vertę esant tolygiems ir nepastoviems režimams.

Siekiant išanalizuoti aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelių darbo režimų esminius ypatumus sudarytas matematinis modelis pagal NordBalt jūrinio kabelio ir keitiklio sistemos parametrus MATLAB aplinkoje, modeliuoti 12 pagrindinių literatūroje sutinkamų VSC keitiklio ir aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelio darbo režimų: kabelio įkrovimas perduodant energiją, poliarumo pakeitimas perduodant energiją, kabelio įkrovimas be energijos perdavimo, apkrovos paleidimas įkrautam kabeliui, kabelio įkrovimas perduodant energiją esant 100% padidintai srovei, kabelio įkrovimas perduodant energiją esant 50% padidintai įtampai, greitas įkrovimo režimas, kabelio įkrovimas perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms, teigiamo poliarumo viršįtampis kabelio įkrovimo perduodant energiją režimo metu, neigiamo poliarumo viršįtampis kabelio įkrovimo perduodant energiją režimo metu, neigiamo poliaus įkrovimas perduodant energiją, šilto kabelio įkrovimas perduodant energiją. Sumodeliavus darbo režimus gauti rezultatai parodė esminius faktorius (izoliacijos charakteristikas) nulemiančius kabelio izoliacijos senėjimą. Tyrimų metu nustatytos šių faktorių kitimo ribos, įvardintos tolesnių tyrimų kryptys.

Reikšminiai žodžiai: erdvinis krūvis, izoliacijos senėjimas, aukšta įtampa nuolatinė srovė, kabelis

Vaišnys, Jonas. Analysis of Operation Regimes of High Voltage Direct Current Cable. Final project of master qualification degree / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

Kaunas, 2016. 84 pp.

SUMMARY

After completing analysis on available literature sources it was found that for electrical energy transmission in long distances cables with polymeric extruded insulation and VSC type converters are becoming more and more popular. Also there was noticed that VSC type converters have better working principles regarding polymeric cables, but space charge trapping on insulation layer still deeply impacts values of electric field in insulation layer on steady or changing working regimes.

In order to analyze main aspects of high voltage direct current cables working modes there was created a high voltage direct cable and converter station system model in MATLAB environment using parameters from NordBalt link. 12 main working modes from literature sources were simulated. Working modes consisted of: cable energization with energy transmission, polarity reversal with energy transmission, cable energization without energy transmission, energy transmission turn-on after cable energization, cable energization with energy transmission with 100% greater current, cable energization with energy transmission with 50% higher voltage, fast cable energization with energy transmission, cable energization with energy transmission when cooling properties of cable are worsen, positive polarity overvoltage peak on cable energization with energy transmission working mode, negative polarity overvoltage peak on cable energization with energy transmission working mode, negative pole energization with energy transmission, warm cable energization with energy transmission. After completing simulations results showed the main aspects (characteristics of insulation) influencing cable insulation aging. During analysis there were found margins of these parameters oscillation and topics for further analysis were named.

Keywords: space charge, insulation aging, high voltage direct current, cable

Turinys

1	Apžvalginė dalis	17
1.1	Atlikti tyrimai	17
1.2	Kabelių struktūra.....	21
1.2.1	Pagrindiniai kabelių sluoksniai.....	21
1.2.2	Papildomi kabelių sluoksniai.....	27
1.3	Kabelinių linijų modeliai	28
1.3.1	Stacionarieji parametrai nuolatinės srovės grandinėse	28
1.3.2	Stacionarieji parametrai kintamosios srovės grandinėse	29
1.3.3	Pereinamųjų procesų modeliai kintamosios srovės grandinėms	32
1.3.4	Erdvinio krūvio įvertinimo modeliai nuolatinės srovės grandinėms.....	34
2	Metodinė dalis	39
2.1	Tyrimo objektas	39
2.2	MATLAB aplinkos modelis	41
2.3	Tiriami izoliacijos režimai	45
2.3.1	Kabelio įkrovimas perduodant energiją.....	50
2.3.2	Poliarumo keitimas perduodant galią	52
2.3.3	Kabelio įkrovimas be galios perdavimo	54
2.3.4	Apkrovos įjungimas įkrautam kabeliui (normalus darbo režimas)	56
2.3.5	Kabelio įrovimas perduodant padidintą srovę	58
2.3.6	Kabelio įkrovimas perduodant padidintą įtampą.....	60
2.3.7	Pagreitintas įkrovimas	62
2.3.8	Kabelio įkrovimas perduodant galią esant prastesnėms aušinimo sąlygoms	64
2.3.9	Teigiamo poliarumo viršįtampis kabelį kraunant, perduodant energiją	66
2.3.10	Neigiamo poliarumo viršįtampis kabelį kraunant, perduodant energiją.....	68
2.3.11	Neigiamo poliaus kabelio krovimas perduodant energiją	70
2.3.12	Kabelis pradamas krauti esant didesnei temperatūrai.....	72
2.3.13	Modeliavimų suvestinė.....	74
3	Rezultatai	76
4	Išvados.....	79
5	Literatūra	80
	Priedas 1	82
	Priedas 2	84

Trumpiniai

AĮNS – Aukšta įtampa nuolatinė srovė;

AĮKS – Aukšta įtampa kintama srovė;

HVDC – Angliškas terminas *high voltage direct current*. Lietuviškas atitikmuo AĮNS;

HVAC - Angliškas terminas *high voltage alternating current*. Lietuviškas atitikmuo AĮKS;

XLPE, PEX – angliškas terminas *cross linked polyethylene*. Lietuviškas terminas – vulkanizuotas polietilenas;

LDPE - Angliškas terminas *low density polyethylene*. Lietuviškas terminas mažo tankio polietilenas;

NS – Nuolatinė srovė;

KS – Kintama srovė;

KL – Kabelių linija;

OL – Oro linija;

TP – Transformatorių pastotė;

VSC – Angliškas terminas *voltage source converter*. Lietuviškas terminas – keitiklis, įtampos šaltinis;

R&D – Angliškas terminas *research and development*. Lietuviškas atitikmuo – tyrimai ir tobulinimas;

CLPS – Angliškas terminas *cable load prediction system*. Lietuviškas terminas – kabelio pralaidumo prognozavimo sistema;

DTS – Angliškas terminas *distributed temperature sensing*. Lietuviškas atitikmuo – išskaidytos temperatūros jutiklis;

CC – Angliškas terminas *cable constants*. Lietuviškas terminas – kabelio konstantos.

Iliustracijų sąrašas

Pav. 5.1. Energinet.dk galimos strategijos. [1].....	13
Pav. 5.2. „C“ plano strategijos žemėlapis. [1].....	13
Pav. 5.3. Entso-e Europos perdavimo tinklų žemėlapis. [4]	14
Pav. 5.4. Kabelių tipai. [1].....	15
Pav. 5.5. AC ir DC elektros perdavimo linijų investicijos. [7]	16
Pav. 1.1. Srovės harmonikos kabelyje, esant netolygiam režimui. [9]	17
Pav. 1.2. Srovės harmonikos kabelyje, esant tolygiam režimui. [9].....	17
Pav. 1.3. Netolygaus darbo režimo srovei didinant sistemos galią. [9].....	17
Pav. 1.4. Pereinamasis procesas kabelyje, netekus apkrovos nuolatinės srovės dalyje. [9].....	18
Pav. 1.5. Pereinamasis procesas kabelyje, netekus apkrovos nuolatinės srovės dalyje įrengus viršįtampių ribotuvus. [9]	18
Pav. 1.6. Pereinamasis procesas kabelyje, esant trifaziam trumpajam jungimui nuolatinės srovės dalyje. [9].....	18
Pav. 1.7. Erdvinių krūvių tipai. [8].....	20
Pav. 1.8. Vilniaus Vakarinio aplinkkelio trečio etapo 110 kV kabelis (Tele-Fonika Cables).....	21
Pav. 1.9. Laidininkų tipai. [2].....	22
Pav. 1.10. Laidininko susikimo Z tipas. [2]	23
Pav. 1.11. Vienas Milliken segmentas su išbrinkstančiais siūlais viduje. [2]	23
Pav. 1.12. Skirtingų izoliacijos išliejimų technologijų senėjimai. [3].....	24
Pav. 1.13. XLPE izoliacija su laidininko ir izoliacijos ekranu.	25
Pav. 1.14. Išbrinkstantys siūlai ir juosta.	26
Pav. 1.15. Kabelio ekranas.	26
Pav. 1.16. Išorinis apvalkalas ir aliuminio folija.	27
Pav. 1.17. Kabelio armavimas su paklotu, optinės skaidulos ir bitumas su polipropileno siūlais.	28
Pav. 1.18. Kabelio ekranai įžeminti abiejuose galuose su transpozicija. [14].....	31
Pav. 1.19. Kabelio ekranas įžemintas abiejuose galuose. [14].....	31
Pav. 2.1. NordBalt kabelio iliustracija iš duomenų lapo.	39
Pav. 2.2. Kabelio izoliacijos skaidymas segmentais.	41
Pav. 2.3. Signalų generatorius.	41
Pav. 2.4. Kabelio izoliacijos blokas.....	42
Pav. 2.5. Suskaidytas izoliacijos blokas.	42
Pav. 2.6. Šilumos išsiskyrimo gysloje modeliavimas.....	43
Pav. 2.7. Gyslos įtampos kritimo ir srovės skaičiavimai.	43
Pav. 2.8. Aplinkos temperatūros ir kabelio temperatūrinės masės elementai.	44
Pav. 2.9. Matlab modelio iliustracija.....	44
Pav. 2.10. Suskaidytos izoliacijos elementų blokų sujungimas bendrame bloke.....	44
Pav. 2.12. Įtampos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.	50
Pav. 2.13. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	50
Pav. 2.14. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	51
Pav. 2.15. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	51
Pav. 2.16. Įtampos ir srovės signalai. Poliarumo pakeitimo perduodant energiją darbo režimas.	52
Pav. 2.17. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Poliarumo pakeitimo perduodant energiją darbo režimas.....	52
Pav. 2.18. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Poliarumo pakeitimo perduodant energiją darbo režimas.....	53
Pav. 2.19. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Poliarumo pakeitimo perduodant energiją darbo režimas.....	53
Pav. 2.20. Įtampos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo darbo režimas.	54

Pav. 2.21. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo darbo režimas.....	54
Pav. 2.22. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo darbo režimas.....	55
Pav. 2.23. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo darbo režimas.....	55
Pav. 2.24. Įtampos ir srovės signalai. Apkrovos įjungimo įkrautam kabeliui darbo režimas.	56
Pav. 2.25. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Apkrovos įjungimo įkrautam kabeliui darbo režimas.....	56
Pav. 2.26. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Apkrovos įjungimo įkrautam kabeliui darbo režimas.....	57
Pav. 2.27. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Apkrovos įjungimo įkrautam kabeliui darbo režimas.....	57
Pav. 2.28. Įtampos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą srovę darbo režimas.	58
Pav. 2.29. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą srovę darbo režimas.	58
Pav. 2.30. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą srovę darbo režimas.	59
Pav. 2.31. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą srovę darbo režimas.	59
Pav. 2.32. Įtampos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą įtampą darbo režimas.....	60
Pav. 2.33. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą įtampą darbo režimas.....	60
Pav. 2.34. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą įtampą darbo režimas.....	61
Pav. 2.35. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą įtampą darbo režimas.....	61
Pav. 2.36. Įtampos ir srovės signalai. Pagreitinto įkrovimo darbo režimas.	62
Pav. 2.37. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Pagreitinto įkrovimo darbo režimas.....	62
Pav. 2.38. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Pagreitinto įkrovimo darbo režimas....	63
Pav. 2.39. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Pagreitinto įkrovimo darbo režimas.	63
Pav. 2.40. Įtampos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms darbo režimas.	64
Pav. 2.41. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms darbo režimas.	64
Pav. 2.42. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms darbo režimas.	65
Pav. 2.43. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms darbo režimas.	65
Pav. 2.44. Įtampos ir srovės signalai. Teigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.....	66
Pav. 2.45. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Teigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.	66
Pav. 2.46. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Teigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.	67
Pav. 2.47. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Teigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.	67
Pav. 2.48. Įtampos ir srovės signalai. Neigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.....	68

Pav. 2.49. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.....	68
Pav. 2.50. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.....	69
Pav. 2.51. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.....	69
Pav. 2.52. Įtampos ir srovės signalai. Neigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	70
Pav. 2.53. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	70
Pav. 2.54. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	71
Pav. 2.55. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	71
Pav. 2.56. Įtampos ir srovės signalai. Šilto kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	72
Pav. 2.57. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Šilto kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	72
Pav. 2.58. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Šilto kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	73
Pav. 2.59. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Šilto kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.....	73

Lentelių sąrašas

Lentelė 1. Europos jūriniai kabeliai. [5].....	14
Lentelė 2. Erdvinio krūvio matavimo pagrindiniai būdai.....	20
Lentelė 3. Modelių suvestinė.....	34
Lentelė 4. 1 modeliavimo parametrų suvestinė.....	51
Lentelė 5. 2 modeliavimo parametrų suvestinė.....	53
Lentelė 6. 3 modeliavimo parametrų suvestinė.....	55
Lentelė 7. 4 modeliavimo parametrų suvestinė.....	57
Lentelė 8. 5 modeliavimo parametrų suvestinė.....	59
Lentelė 9. 6 modeliavimo parametrų suvestinė.....	61
Lentelė 10. 7 modeliavimo parametrų suvestinė.....	63
Lentelė 11. 8 modeliavimo parametrų suvestinė.....	65
Lentelė 12. 9 modeliavimo parametrų suvestinė.....	67
Lentelė 13. 10 modeliavimo parametrų suvestinė.....	69
Lentelė 14. 11 modeliavimo parametrų suvestinė.....	71
Lentelė 15. 12 modeliavimo parametrų suvestinė.....	73
Lentelė 16. Bendra darbo režimų dydžių suvestinė lentelė.....	74

Užduotis

Darbo tikslas:

Atlikti aukštos įtampos nuolatinės srovės NordBalt kabelio darbo režimų analizę.

Uždaviniai:

1. Atlikti aukštos įtampos kabelinių linijų tendencijų apžvalgą;
2. Atlikti atliktų tyrimų apžvalgą;
3. Atlikti kabelius sudarančių sluoksnių apžvalgą;
4. Atlikti kintamosios ir nuolatinės srovės modelių apžvalgą.
5. Sudaryti aukštos įtampos nuolatinė srovės kabelio modelį Matlab aplinkoje;
6. Matlab aplinkoje atlikti pagrindinių darbo režimų modeliavimus;
7. Pateikti modeliavimo rezultatus ir išvadas.

Problema

Aukštos įtampos kabelinių linijų paklausa vis didėja. Ši tendencija stebima tiek kintamosios tiek nuolatinės srovės sistemoms. Gamybos technologijoms išstobulėjus kintamosios srovės sistemose naudojami daugiausia kabeliai su polimerine izoliacija. Tai technologija leidžianti kabeliui pasiekti didesnes temperatūrinės vertes, taip pat kabeliai su polimerine izoliacija nereikalauja priežiūros savo normalios eksploatacijos laikotarpyje, kitaip nei popieriaus alyvos, kabeliai. Elektros energijos perdavimas aukštos įtampos nuolatinės srovės jungtimis tapo prieinamesnis ir pigesnis, įsitvirtinus puslaidininkinei VSC keitiklių technologijai. Dėl šio techninio aspekto kabeliai turintys polimerinę izoliaciją tapo tinkami aukštos įtampos nuolatinės srovės energijos perdavimui dideliais atstumais. Nors ir VSC tipo keitikliai nenaudoja kabelių poliarumo pakeitimo darbo režimo susikaupusio erdvinio krūvio kiekis izoliacijoje stipriai nulemia elektrinio lauko stiprio dydį joje. Aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelių su popieriaus-alyvos izoliacija darbo režimai yra plačiai ištirti. Darbo režimų tyrimai polimerinės izoliacijos kabelių aukštos įtampos nuolatinės srovės sistemose yra stipriai, bet nepakankamai pažengę. Kabelių linijos reakciją į perduodamą linija įtampą ir srovę reikalinga nuodugniai ištirti siekiant užtikrinti sistemos patikimumą ir ilgaamžiškumą identifikuojant esminius darbo režimų taškus galinčius paveikti izoliacijos senėjimą.

Ivadas

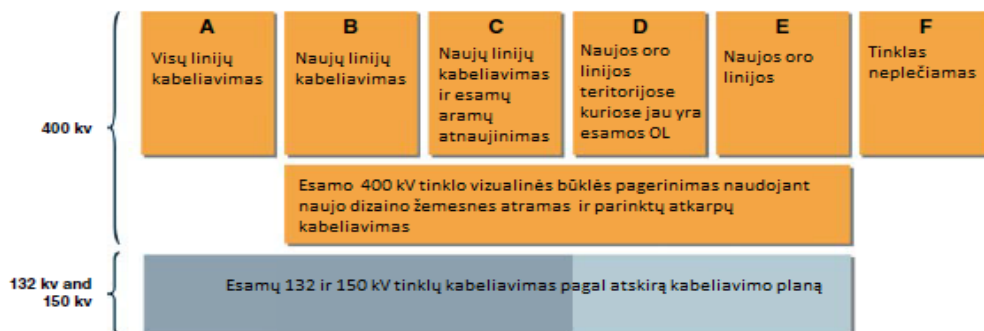
Pasaulio perdavimo tinklų operatoriai pastebi, kad kabelinių linijų projektų skaičius nuolat didėja. Toks reiškinys stebimas dėl tarp sisteminių elektros energijos perdavimo linijų atsiradimų, atsinaujinančiosios energijos plėtojimo, senųjų linijų nusidėvėjimo ir didėjančio vartojimo poreikio [1].

Seniau oro linijos buvo pagrindinė alternatyva elektros perdavimo linijų statyboje. AĮKS (aukštos įtampos kintamosios srovės, angl. HVAC – *high voltage alternating current*) kabelių naudojimas buvo ribotas, tokie kabeliai įrengiami tik labai tankiai apgyvendintose teritorijose. Per paskutiniuosius 10 metų AĮKS kabelių technologija stipriai pagerėjo, netgi ypatingai aukštos įtampos kintamosios srovės kabelių technologija tapo patenkinama. Kabelinių linijų įrengimai vis labiau naudojami kraštovaizdžio ir sveikatos saugojimui, taip pat šių linijų ilgiai padidėjo lyginat su galimais ilgiais prieš 10 metų. [1].

Popieriaus-alyvos izoliacijos kabelių rinkos dydį vis mažina plastmasinės izoliacijos kabeliai. Ankstyvuojų kabelių su plastmasine izoliacija naudojimo laikotarpiu jų reputacija tapo labai menka. Pirmieji vidutinės įtampos kabeliai su plastmasine izoliacija įrengti 20 amžiaus 7 dešimtmetyje. Kabelių gamintojai ir eksploatuotojai tikėjo, kad šių kabelių gyvavimo laikas sieks 20 ar net 30 metų. Laikas parodė, kad gyvavimo trukmė pirmųjų kabelių su plastmasine izoliacija buvo ženkliai trumpesnė. Tuo metu inžinieriai ir medžiagotyrininkai nežinojo apie drėgmės, elektrinio lauko izoliacijoje, netolygumų pasekmes, kurios ir lėmė 10 – 15 metų laikotarpį iki avarijos. Suskaičiavus šių veiksnių kainą paaiškėjo, kad kiekvienas doleris investuotas į kabelinę liniją reikalauja 10 dolerių investicijos linijos atnaujinimui [2]. Šie nuostoliai operatorių veiklos kainoje jaučiami ir šiomis dienomis. Mokslininkai ir inžinieriai išsiaiškino priežastis nulėmusias izoliacijos senėjimą. Neužpildytos ertmės, netolygumai ir priemaišos puslaidininkiniame sluoksnyje nulėmė elektrinio lauko sustiprėjimo zonas. Padidėjęs elektrinis laukas ir aplinkos drėgmė kabelyje sukėlė reiškinį, kuris šiandien žinomas, kaip vandens medis (angl. *water tree*). Šis reiškinys didėdavo, iki kol kabelis buvo pramušamas. Šiomis dienomis gamintojai naudoja medžiagas be priemaišų, izoliacija tapo tolygi, o vandens patekimas į kabelį taip pat sustabdytas [3]. Esminiai pokyčiai nulėmę kabelių su plastmasine izoliacija pagerėjimą yra:

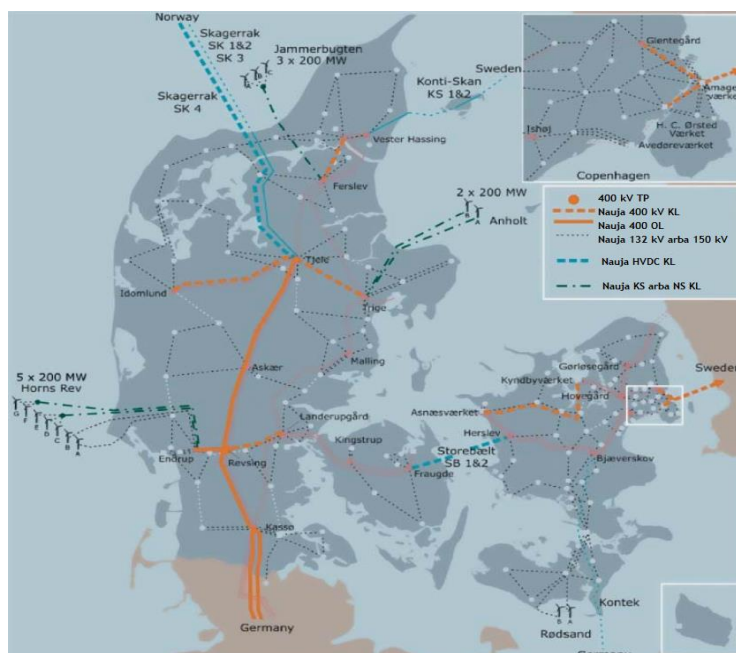
1. Trigubos ekstruzijos procesas;
2. Sausas vulkanizacijos procesas;
3. Vandens patekimą stabdančių medžiagų naudojimas;
4. Nano medžiagų stabdančių vandens medžių susidarymą vidutinės įtampos kabeliuose naudojimas.

Pasaulio šalys dėl supaprastėjusios kabelinių linijų eksploatacijos atsiradus kokybiškai plastmasinei izoliacijai vis dažniau renkasi kabelines linijas vietoje oro linijų. Danijoje po visuomeninio ir politinio spaudimo elektros perdavimo sistemos operatorius Energinet.dk 2008 m. balandžio 3 d. pavišino ateities tinklo ir kabelinių linijų plėtros alternatyvas vyriausybei išsirinkti. Savo ataskaitoje jie pateikė penkias alternatyvas (žr. pav. 1).



Pav. 5.1. Energinet.dk galimos strategijos. [1]

Gavusi šias alternatyvas vyriausybė išsirinko C variantą. Tai reiškia, kad visos naujos 400 kV linijos Danijoje bus kabelinės.



Pav. 5.2. „C“ plano strategijos žemėlapis. [1]

Naujomis technologijoms šiomis dienomis įgyvendinami projektai, kurie prieš 20 metų laikyti neįmanomais. Pasiiekti nauji technologiniai rekordai: įrengimo gylis, kabelio ilgis, perduodama galia yra gerinami kasmet. Prieš 10 metų jūriniai kabeliai buvo įdomūs tik galios kabelių inžinieriams ir laivų klojančių kabelius įgulai. Šiandien susidomėjimas jūriniais kabeliais didėja, jais vis labiau domisi perdavimo sistemų operatoriai dėl naujų elektros mainų rinkoje galimybių [2]. Šiuo metu pasaulyje statoma ir ruošiamasi statyti daug jūrinių vėjo elektrinių parkų, jie tampa vis dažnesni, ypač Europoje, kuriems prijungti naudojami povandeniniai, jūriniai,

kabeliai. Kabelinės linijos taip pat naudojamoms šalų elektros perdavimo tinklo sujungimui su žemyninės dalies tinklu.



Pav. 5.3. Entso-e Europos perdavimo tinklų žemėlapis. [4]

Anksčiau pateiktame paveikslėlyje parodytos Europos perdavimo tinklo jungtys įskaitant jūrines. Stambiausi jūriniai elektros energijos mainų kabelių projektai pateikiami toliau esančioje lentelėje.

Lentelė 1. Europos jūriniai kabeliai. [5]

Pavadinimas	Jungiamosios šalys		Trasos vieta	Įtampa, kV	Galia, MW	Technologija	Ilgis, km
BritNed	Olandija	Didžioji Britanija	Šiaurės jūra	450	1000	HVDC	260
East–West Interconnector 1	Airija	Didžioji Britanija	Airijos jūra	150	350	HVDC Light	135
East–West Interconnector 2	Airija	Didžioji Britanija	Airijos jūra	200	500	HVDC Light	261
HVDC Moyle	Škotija	Airija	Airijos jūra	250	500	HVDC	63,5
Estlink 1	Estija	Suomija	Suomijos įlanka	330	350	HVDC	105
Estlink 2	Estija	Suomija	Suomijos įlanka	450	650	HVDC	171
Baltic-Cable	Vokietija	Švedija	Baltijos jūra	450	600	HVDC	262
Fenno-Skan	Švedija	Suomija	Baltijos jūra	400	550	HVDC	233
Kontek	Vokietija	Danija	Baltijos jūra	400	600	HVDC	171
Konti-Skan 1	Švedija	Danija	Baltijos jūra	250	250	HVDC	149
Konti-Skan 2	Švedija	Danija	Baltijos jūra	300	300	HVDC	149
SwePol	Lenkija	Švedija	Baltijos jūra	450	600	HVDC	254
Skagerrak 1-4	Norvegija	Danija	Skagerakas	250/350	1632	HVDC	244
NorNed	Olandija	Norvegija	Šiaurės jūra	450	700	HVDC	580
NordBalt	Lietuva	Švedija	Baltijos jūra	300	700	HVDC Light	450

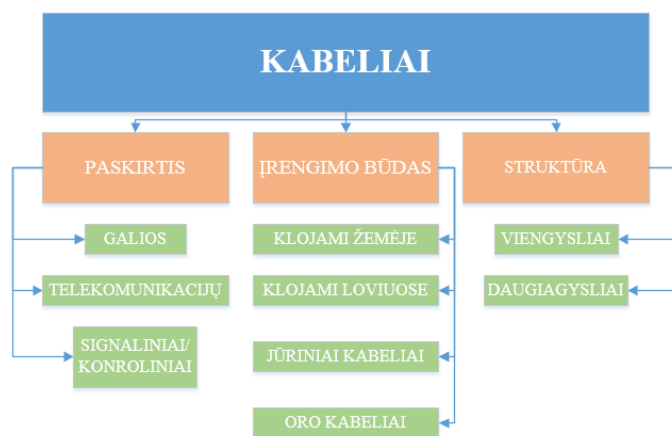
Pereinamieji procesai kabeliuose tapo svarbia tema, kurią reikia nagrinėti ypač ilgose ir sudėtingose kabelinėse linijose. Pagrindinis kabelių skirtumas lyginant su oro linijomis tai struktūra. Kabelį sudaro keli elektrai laidūs sluoksniai (gysla ir ekranas). Kitas esminis skirtumas, tai bangos sklidimo greitis. Kabelinių linijų bangos sklidimo greitis daug lėtesnis nei oro linijų,

(oro linijų bangos sklidimo greitis artimas šviesos greičiui) esant grįžtamajam ryšiui per žemę (*earth-return mode*). Bangos sklidimo greitis yra sąlygojamas dielektrinės skvarbos šis dydis svyruoja nuo 2 iki 4, o bangos sklidimo greitis apibrėžiamas, kaip bendraašis (koaksialinis) bangos sklidimo greitis išreiškiamas pagal formulę Nr. 1.

$$C_c = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_i}} \quad (1)$$

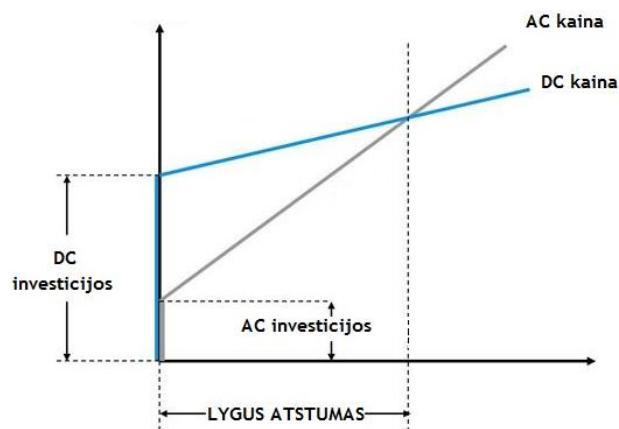
Šioje formulėje C_c – koaksialinis bangos sklidimo greitis, C_0 – šviesos greitis ($3 \cdot 10^8$ m/s), ϵ_i – dielektrinė skvarba.

Žemiau esančiame paveikslėlyje pateikiami kabelių tipai skirstant į skirtingas grupes.



Pav. 5.4. Kabelių tipai. [1]

Aukštos įtampos kintamosios srovės kabeliais perduoti energiją galima ribotu atstumu. Dėl kabelio talpumų linijų ilgis negali viršyti 60 km bendruoju atveju. Didesnių ilgių kintamosios srovės kabelinių linijų naudojimui reikalinga kompensuoti kabelio talpą įrengiant šunto reaktorius trasoje. Dėl didelių nuostolių kintamosios srovės kabelių linijas keičia nuolatinės srovės technologijos. Nuolatinės srovės technologijų augimo spartėjimas skaičiuojamas nuo gyvsidabrinų ventilių pakeitimo puslaidininkiniais tiristoriais dienu. Tranzistorinėms technologijoms tapus pritaikomomis aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimui šios sistemos dar labiau išpopuliarėjo dėl didesnių valdymo galimybių. Kaip pavaizduota pirmojoje lentelėje pasaulyje dideliais atstumais elektros energijos perdavimo pagrindu tapo HVDC sistemos. Šių sistemų įrengimui didžiausios investicijos reikalingos keitikliams. Yra skaičiuojama, kad prie tam tikrų atstumų šios investicijos susivienodina, o šis atstumas vadinamas „lygiu“ (angl. *break-even point*). [6]



Pav. 5.5. AC ir DC elektros perdavimo linijų investicijos. [7]

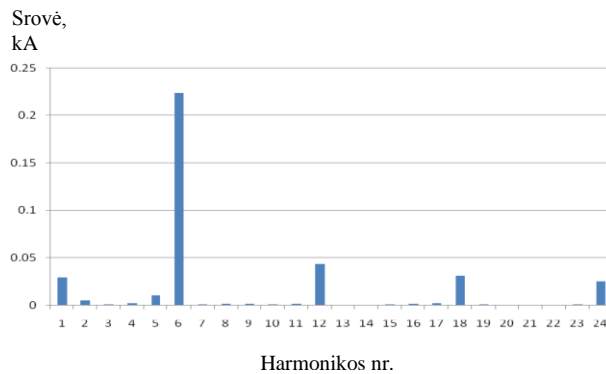
Kabelinių linijų lygus atstumas apytiksliais skaičiavimais yra apie 40 – 50 km. Oro linijoms šis dydis siekia 500 – 600 km. [8]

Ilgais atstumais elektros energijos perdavimas naudojant nuolatinės srovės technologiją yra stipriai pažengęs, o tokio tipo jungčių vis daugėja. AĪNS oro linijų patikimumas pakankamai didelis, nes jose elementai laisvai prieinami, gedimai gali būti identifikuoti vizualiai atlikus apžiūrą. Kabelinėse linijose, ypač jūrinėse gedimo vietos identifikavimas nėra labai paprastas ir reikalauja sudėtingos įrangos ir žinių. Net ir žinant gedimo vietą darbai yra labai sudėtingi ir brangiai kainuojantys. Dėl šių priežasčių siekiama užtikrinti kabelių ilgaamžiškumą ir režimą be avarių per visą eksploatacijos laikotarpį. Kaip minėta plastmasinių kabelių paklausai didėjant buvo išspręsta jų ilgaamžiškumo problema naudojant juos kintamosios srovės sistemose, nuolatinės srovės sistemose tikėta, kad rezultatai bus taip pat sėkmingi. Pirmosios nuolatinės srovės jungtys elektros įtampos keitimui naudojo tiristorius. Tiristorinė sistema sukuria CSC darbo režimą, keitiklis veikia kaip srovės šaltinis. CSC keitikliais pakitus perduodamos galios kryptis yra keičiamas kabelių poliarumas. Naudojant popieriaus alyvos izoliaciją jokių darbo režimų pakitimų ir ilgaamžiškumo sutrumpėjimų nepastebėta. Pradėjus naudoti plastmasinius kabelius pamatyta, kad jų darbo trukmė daug kartų trumpesnė nei skaičiuota, o pramušimai užfiksuoti kaip tik kabelių įtampos poliarumo pakeitimo metu. Tik vėliau išsiaiškinta, kad šiuos reiškinius sukėlė erdvinio krūvio sankaupos izoliacijoje, kurios įtampos poliarumo pakeitimo metu sukeldavo vietinius elektrinio lauko stiprio padidėjimus dėl to kabelis būdavo pramušamas. Nors ir reiškinių sukėlimo priežastys šiomis dienomis yra aiškios, erdvinis krūvis vis dar liko plačiai neištirtas dėl erdvinio krūvio formavimosi priklausomybių nuo daugelio faktorių ir sudėtingų metodų faktiniam šio krūvio kiekiui išmatuoti.

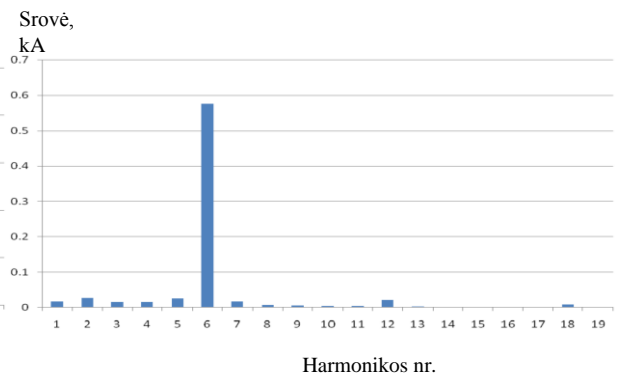
1 Apžvalginė dalis

1.1 Atlikti tyrimai

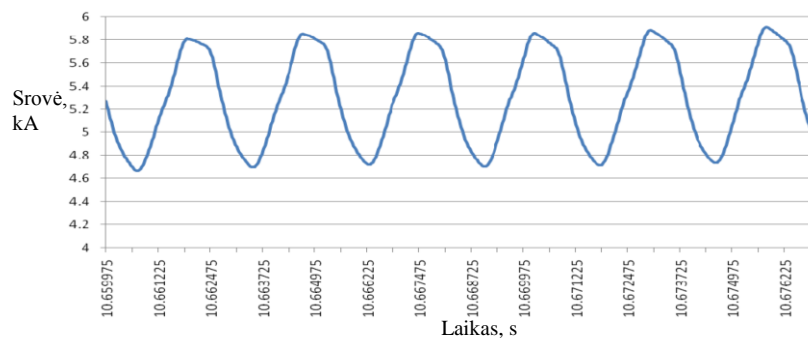
Electric power research institute atliktame tyime, kuriuo siekta išsiaiškinti nuolatinės srovės kabelio esančio superlaidžios būsenos ir VSC keitiklio darbo ypatumus veikiant daugiakanalei jungčiai buvo nustatyta, kad lyginės harmonikos kabelinėje linijoje turi didžiausias vertes. Nustatyta, kad didžiausia vertė yra šeštosios harmonikos kai į kabelį siunčiamas netolygus, svyruojantis signalas. Kai į kabelį siunčiamas tolygus signalas šeštosios harmonikos vertė išliko didžiausia ir taip pat išryškėjo 12, 18 ir 24 harmonikos.



Pav. 1.1. Srovės harmonikos kabelyje, esant netolygiam režimui. [9]



Pav. 1.2. Srovės harmonikos kabelyje, esant tolygiam režimui. [9]

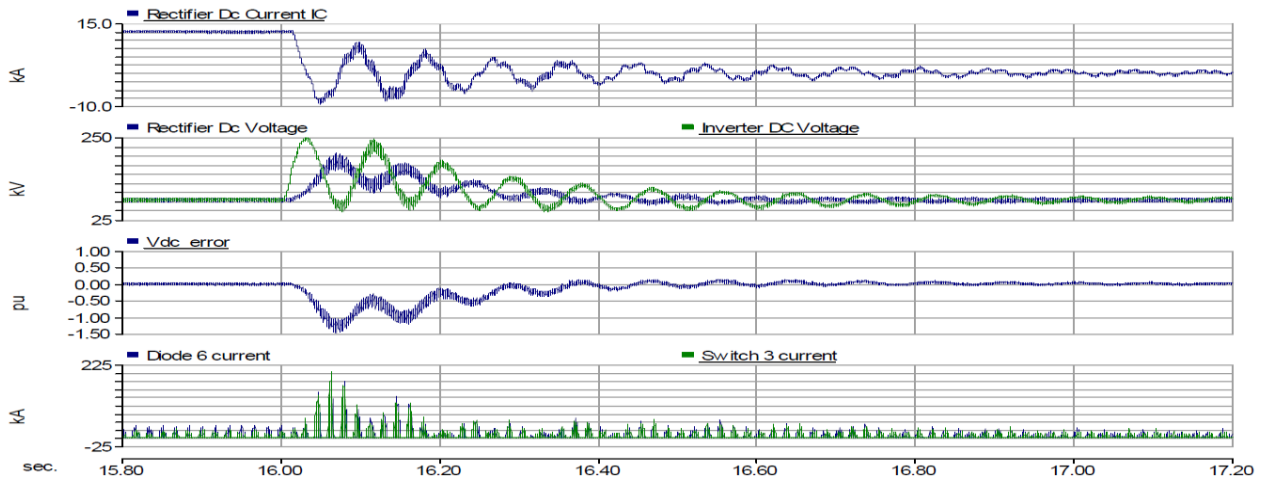


Pav. 1.3. Netolygaus darbo režimo srovei didinant sistemos galią. [9]

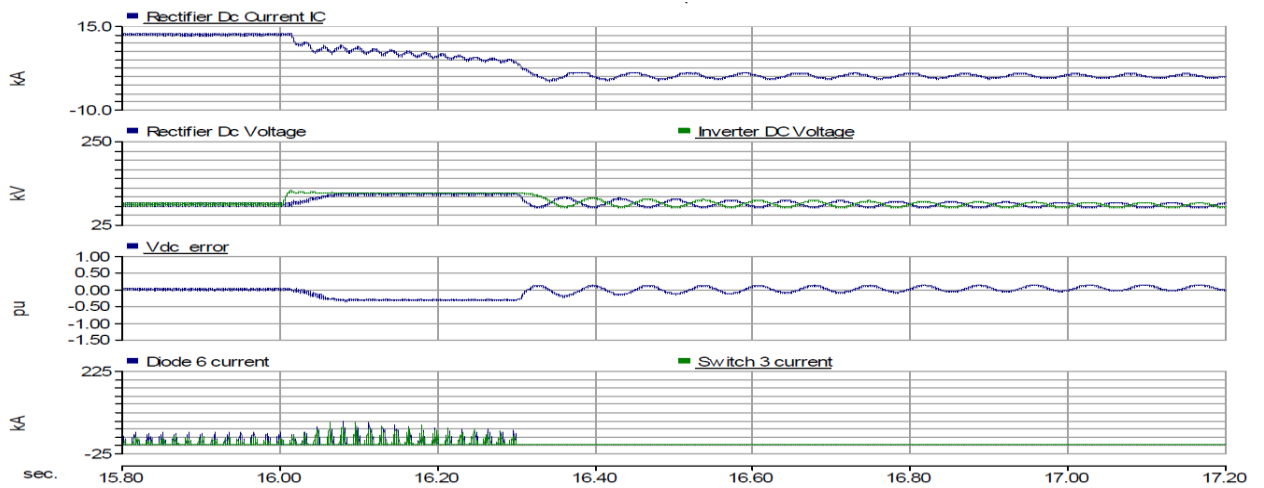
Šiame straipsnyje harmonikoms eliminuoti naudoti filtrai. Taip pat pastebėta, kad labai svarbus yra sistemos įkrovimo režimas prieš paleidimą. Neatlikus šio žingsnio sistemoje pastebėti didžiuliai viršįtampiai ir didelės srovės. Pereinamųjų procesų srovių ir įtampų vertėms mažinti naudojami rezistoriai, kurie atlieka pereinamosios varžos funkciją kabelio įkrovimo ir iškrovimo metu taip pat viršįtampių ribotuvai. Taip pat pereinamasis procesas turėtų visiškai sumažėti naudojant įkrautą, lygiagrečiai jungtą, kondensatorių įjungimo ar išjungimo metu. [9].

Avarijos režimo modeliavime pastebėta, kad kintamosios srovės dalyse išjungus jungtuvus didžiulės srovės teka keitiklio elementais taip pat esant įkrautam kabeliui nesustabdomas kabelio išsikrovimas per keitiklį. Avarijos atveju pastebėta prevencija nuo viršsrovių naudojant

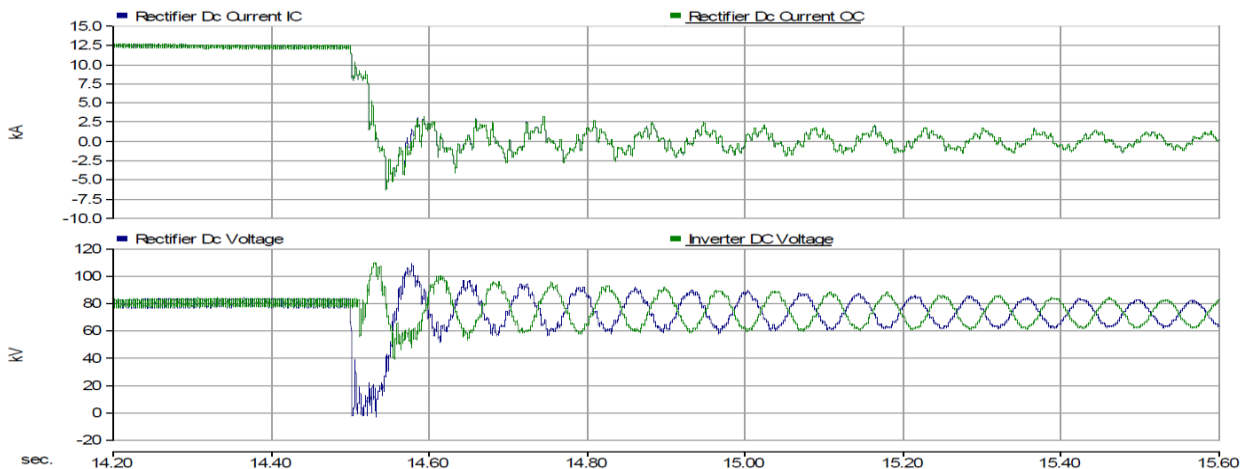
puslaidininkinius nuolatinės srovės jungtuvus, kuriais apsaugomas keitiklis esant kabelio avarijai ir atvirkščiai [9].



Pav. 1.4. Pereinamasis procesas kabelyje, netekus apkrovos nuolatinės srovės dalyje. [9]



Pav. 1.5. Pereinamasis procesas kabelyje, netekus apkrovos nuolatinės srovės dalyje įrengus viršįtampių ribotuvus. [9]



Pav. 1.6. Pereinamasis procesas kabelyje, esant trifaziam trumpajam jungimui nuolatinės srovės dalyje. [9]

Šių pereinamųjų procesų metu matomas ženklus darbinės įtampos viršijimas.

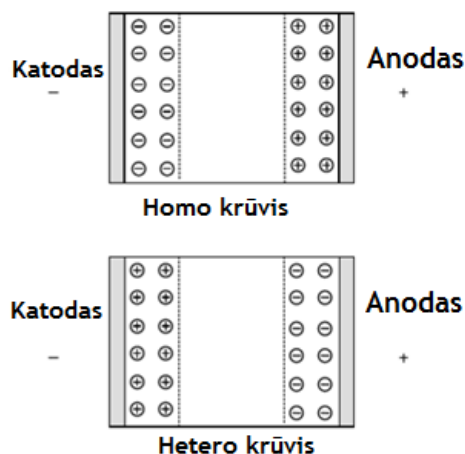
VSC keitikliai yra labiausiai jautrūs trumpiesiems jungimams nuolatinės srovės dalyje. Dėl šios priežasties būtina tirti avarinius darbo režimus [10]. Avarijos nuolatinės dalyje gali sukelti didžiulius viršįtampius, kurie gali pažeisti kabelį ir keitiklius net ir atjungus sistemą nuo tinklo. Kabelio izoliacijos elektrinės talpos iškrovimas gyslos įžeminimo ar avarijų metu sukeliamas procesas, kurio metu izoliacija silpnėja, nėra plačiai aprašytas literatūroje, taip pat neįtrauktas į kabelio specifikacijų sąrašą [11].

Popieriaus ir alyvos izoliacijos kabeliai seniau buvo pagrindiniai nuolatinės srovės perdavimo sistemose. Šiuo metu jų pralaidumai ir įtampos ženkliai padidėjo. Kita vertus plastmasinės izoliacijos kabelių kaina ir aplinkos tarša daug mažesni lyginant su popieriaus-alyvos izoliacija, bet jie daug jautresni įtampos poliarumo pateikimui [11]. Popieriaus-alyvos izoliacijos kabeliai įtampos poliarumo pakeitimo režimą gali atlikti be jokių išskylančių problemų kabeliui. Italijos elektros perdavimo tinko operatorius TERNA yra sukūręs išbandymo metodą, kuriuo galima patikrinti kabelių sistemą, keičiant įtampos poliarumą. Naujausiuose R&D projektuose aprašomos technologijos, kuriose kabeliai su plastmasine izoliacija yra tinkami naudoti su keitikliais-srovės šaltiniais, kai kabelių poliarumas yra keičiamas.

Keitikliai – įtampos šaltiniai (VSC) sparčiai plinta pasaulyje dėl gerų dinaminių savybių ir kontroliuojamo aktyviosios ir reaktyviosios galios reguliavimo. VSC technologija nenaudoja įtampos poliarumo pakeitimo linijoje kai pakinta galios srauto kryptis todėl ši technologija gerai tinka veikti kartu su kabeliais su plastmasine izoliacija. Nors įtampos poliarumas kabeliuose ir nepakinta, vis vien sistemoje išlieka daugybė režimų kurie sukelia pereinamuosius procesus kabelių sistemoje. Standartiniais testais pereinamųjų procesų įtaką patikrinti neįmanoma [11].

Pasaulyje stebimas didžiulis aukštos įtampos nuolatinės srovės jungčių gausėjimas dėl efektyvaus darbo režimo perduodant elektros energiją dideliais atstumais. Šioms jungtims naudojami ir vis labiau tobulinami polimeriniai kabeliai dėl savo stipriųjų ekonominių ir terminių savybių, lengvesnės eksploatacijos ir mažesnės izoliacijos užterštumo tikimybės. Nepaisant visų gerųjų polimerinių kabelių savybių, nuolatinės srovės darbo režimas jiems reikalingas tirti dėl erdvinio krūvio padidėjimo zonų, kurios blogina kabelio efektyvumą ir greitina senėjimą.

Naudojant sintetinę (XLPE) izoliaciją kabeliams susiduriama su erdvinio krūvio formavimosi problema. Erdvinio krūvio dydis polimerinėje izoliacijoje tiesiogiai priklauso nuo izoliacijos temperatūros ir elektrinio lauko stiprio. Suformuoto krūvio debesys iškraipo elektrinio lauko linijas sustiprindami arba susilpnindami jas priklausomai krūvių dydžių. Erdvinių krūvių poliarumas gali būti sutampantis su elektrodų (homo krūvis) arba jam priešingas (hetero krūvis). [12].



Pav. 1.7. Erdvinių krūvių tipai. [8]

Kai kabelis yra prijungtas prie nuolatinės srovės šaltinio laisvųjų krūvininkų susikaupimo vietose padidina vietinį elektrinį lauko stiprį. Erdvinis krūvis izoliacijoje stipriai padidina izoliacijos pramušimo tikimybę. Siekiant užtikrinti patikimą nuolatinės srovės kabelio veikimą (darbą) izoliacijos erdvinio krūvio tyrimai yra būtini. Erdvinio krūvio formavimasis kol kas nėra nuodugniai ištirtas. Erdvinio krūvio tyrimuose yra dvi pagrindinės problemos.

Pirmoji problema – erdvinio krūvio kiekio kitimas polimeruose priklauso nuo daugelio faktorių tokių kaip: medžiagos forma, laidumas, artumas iki kitų elektrinių ir magnetinių laukų, paviršiaus tolygumo, elektrodų medžiagos, elektrinio lauko ir temperatūros.

Antroji problema – erdvinio krūvio koncentracijos matavimai, teorinių formulių ir realios situacijos palyginimui, yra labai sudėtingi ir labai sunkiai išmatuojami. Pagrindiniai metodai erdvinio krūvio kiekiui pateikti lentelėje.

Lentelė 2. Erdvinio krūvio matavimo pagrindiniai būdai.

Metodas	Sukėlimas	Matavimas
Šiluminio impulso	Šviesos signalas	Įtampa tarp elektrodų
Šilumos kitimo žingsniais	Elektrodo patalpinimas tarp dviejų izoterminių šaltinių	Srovė tarp elektrodų
Lazerio šviesos intensyvumo	Lazerio šviesa	Srovė tarp elektrodų
Smūginės bangos sklidimo	Lazerio šviesa	Srovė arba įtampa tarp elektrodų
Lazerio sukulto smūginio impulso	Lazerio šviesa	Srovė tarp elektrodų
Pulsuojančio elektroakustinio bandymo	Elektrinis impulsas	Elektrinis, pjezoelektrinis signalas

Dažniausiai erdvinio krūvio kiekiui išmatuoti naudojamas elektroakustinis metodas. Pagal elektromagnetines teorijas [13] erdvinio krūvio buvimas priklauso nuo temperatūros ar laidumo gradiento buvimo izoliacijoje.

„*Journal of electrostatics*“ straipsnyje [13] atliktame erdvinių krūvių formavimosi tyrime pastebėjo, kad neigiamas elektrinis krūvis daugiausia formuojasi dielektrinės medžiagos paviršiuose dėl krūvininkų perdavimo tarp medžiagų. Didinant izoliacijos temperatūrą išlaisvinami laisvieji teigiami krūvininkai, kurie kompensuoja neigiamus esančius paviršiuose arba rekombinuoja su jais. Taip erdvinis krūvio dydis sumažinamas.

Dėl išlaisvintųjų krūvininkų nuolatinės srovės kabeliuose elektrinio lauko stipris izoliacijoje padidėja po kabelių poliarumo pakeitimo.

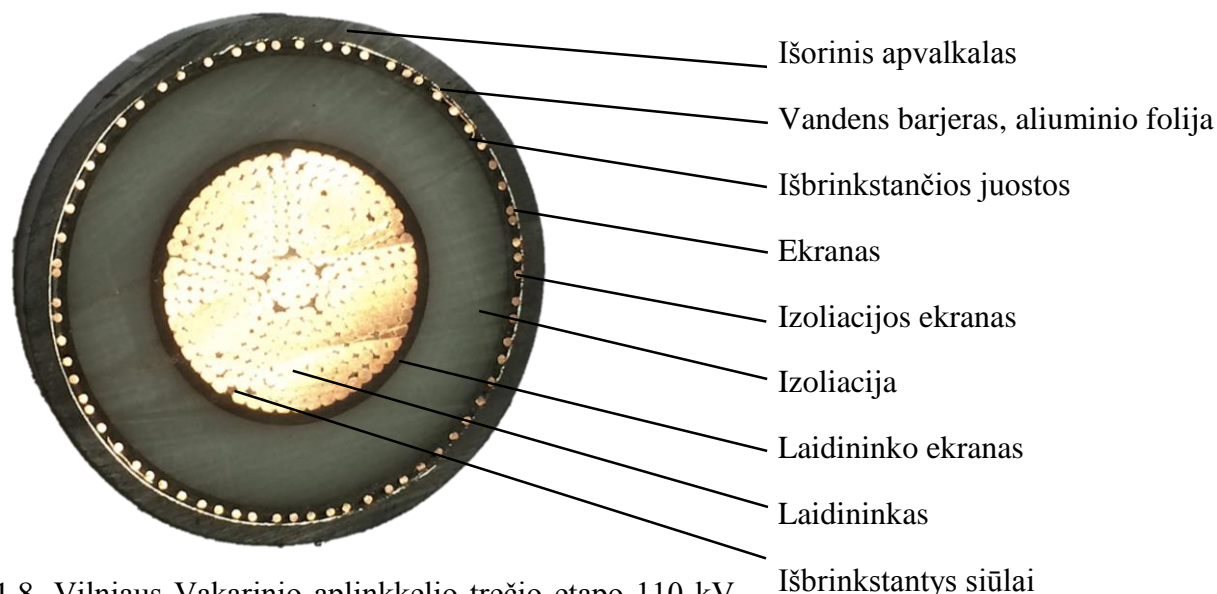
Poliarumo pakeitimo darbo režimas, kabelio įkrovimo ir iškrovimo režimai nuolatinės srovės kabeliuose yra sudėtingi ir sendina izoliaciją dėl susidariusio erdvinio krūvio sankaupų.

1.2 Kabelių struktūra

Kaip pateiktame 3 pav. kabeliai gali būti skirtingi tiek pagal struktūrą, tiek pagal paskirtį. Šiame darbe analizuojami aukštos įtampos galios kabeliai, ypatingas dėmesys skiriamas nuolatinės srovės kabelių struktūrai, telekomunikacijų ir signaliniai kabeliai neapžvelgiami.

1.2.1 Pagrindiniai kabelių sluoksniai

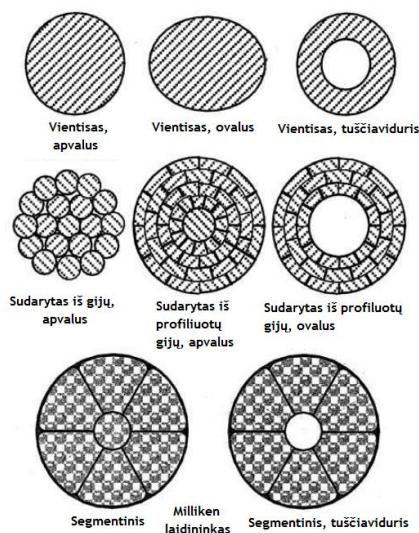
Dabartiniai kabelių gamintojai siūlo plačią paletę įvairių tipų ir formų kabelių. Daugelis šių tipų jau yra sukurta, pagaminta, išstobulinta, patikrinta ir įrengta. Šioje dalyje apžvelgiama kabelių sandara aprašomos labiausiai naudojamos kabelių sluoksnių medžiagos ir sandaros.



Pav. 1.8. Vilniaus Vakarinio aplinkkelio trečio etapo 110 kV kabelis (*Tele-Fonika Cables*).

1. Gysla (laidininkas).

Kabėlių laidininkai gali bŭti pagaminti iš aliuminio arba vario. Nors ir varinio kabelio 1 A pralaidumo kaina didesnė nei aliuminio, bet dauguma įrengtų kabėlių yra variniai. Kabėliuose su varine gysla laidininko skerspjūvio plotas ir kitų sluoksnių kiekis yra mažesni, nei kabėliuose su aliuminio gysla, tačiau kartais aliuminio gyslos kabėliai yra labiau tinkami įrengti. Atsakyti bendruoju atveju apie šių metalų parinkimą negalima, nes metalų rinkos kaina labai dažnai keičiasi ir yra sunkiai prognozuojama. Kai kuriuose šaltiniuose pabrėžiamas vario didesnis atsparumas drėgmės korozijai, tačiau vandeniui prasiskverbęs pro izoliacijos sluoksnį kabelis bet kuriuo atveju turės bŭti remontuojamas. Taupant investicinius kaštus įrengiant kabelines linijas vis labiau populiarėja sprendimas naudoti abejas medžiagas skirtingose trasos vietose. Žemiau pateikiamas paveikslėlis su dažniausiomis laidininkų formomis.



Pav. 1.9. Laidininkų tipai. [2]

Vientisas laidininkas naudojamas kabėliuose, kurių skerspjūvio plotas iki 400 mm². Šis laidininkas pasižymi gera išilgine vandens apsauga. Remonto, movų įrengimo metu išlieta izoliacija kartais lengvai nukrenta nuo gyslos todėl vientiso laidininko kabėlių gysloje kartais formuojamos briaunos izoliacijos sukibimui.

Laidininkai sudaryti iš vijų yra dažna konfigūracija. Sudarytas iš vijų laidininkas yra suformuojamas ir suspaudžiamas šaltojo valcavimo būdu, taip metalas gali užpildyti apie 92 % gyslos. Gijos gali bŭti susuktos dviem būdais: pagal dešiniąją ranką ir pagal kairiąją ranką. Šie susukimai kartais vadinami S susukimas arba Z susukimas. Žemiau pateiktas Z susukimo paveikslėlis. Laidininke sudarytame iš atskirų gijų paviršinės srovės reiškinys sumažinamas lyginant su vientisu laidininku.



Pav. 1.10. Laidininko susikimo Z tipas. [2]

Geresniam mechaniniam stabilumui atskiri sluoksniai sukami skirtingomis kryptimis. Tokio tipo laidininkai tinkami tiek NS tiek KS. Šių laidininkų parametrus aprašo tarptautinis IEC 60228 standartas.

Profiliuotų gijų laidininkai naudojami dažniausiai kabeliuose, kurių skerspjūvio plotas didelis arba NS kabeliuose. Šiuose laidininkuose metalas sudaro apie 96 % gyslos.

Tuščiaviduriai laidininkai naudojami alyviniuose kabeliuose. Tuščia ertmė tekédama alyva taip atlieka ir kabelio aušinimo funkciją.

Milliken (segmentinis) laidininkas tai 20 amžiaus 4 dešimtmetyje H. Milliken užpatentuotas sprendimas, kuris ženkliai sumažina paviršinės srovės dydį gysloje. Laidininke srovė teka gyslomis išilgai, o srovės tekėjimas peršokant gyslas sudėtingas. Šiam tipui sugalvoti keli patobulinimai, tai gijų atskyrimas alyva, popieriumi ar laku. Šio tipo laidininkai yra brangiausi ir naudojami kabeliuose, kurių skerspjūvio plotas didesnis, nei 1200 mm².



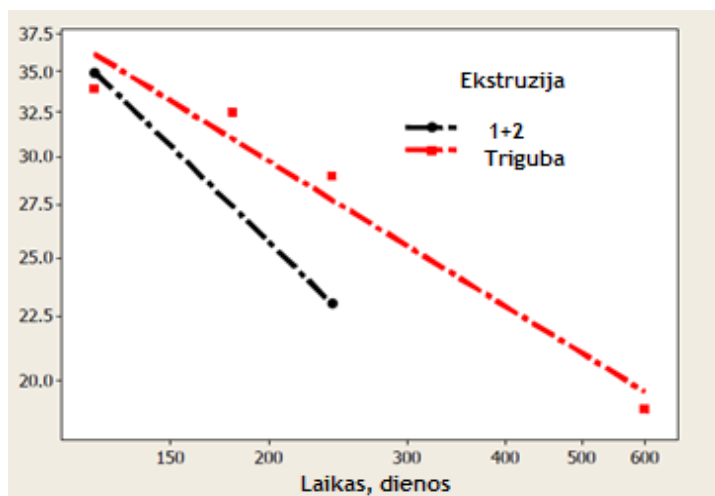
Pav. 1.11. Vienas Milliken segmentas su išbrinkstančiais siūlais viduje. [2]

Kabelio gysla taip pat turi būti hermetiška. Hermetiškumui užtikrinti naudojamos išbrinkstančios juostos, siūlai ar kompozitinė masė sudėtimi panaši į bitumą. Kompozitinės medžiagos paskirtis yra sustabdyti vandens patekimą į laidininko vidų ir neleisti jam laisvai tekėti. Išbrinkstančios juostos ir siūlai aprašomi kitoje dalyje. Milliken gyslos tipas DC kabeliuose nėra taikomas nes nuolatinė srovė nesukelia paviršinio srovės efekto (angl. *skin effect*).

2. Puslaidininkinis sluoksnis. Laidininko ir izoliacijos ekranas.

Laidininko ir izoliacijos ekranas. Šie sluoksniai tai pagalbinė medžiaga sutolyginanti elektrinio laiko stiprį izoliacijos vidinėje ir išorinėje dalyje. Jeigu ant laidininko izoliacija būtų užliejama tiesiogiai ženklius vietiniai elektrinio lauko sustiprėjimai sukeltų izoliacijos senėjimą ir kabelio gyvavimo laikas sutrumpėtų. Siekiant užtikrinti maksimalų izoliacijos gyvavimo

laikotarpį šie sluoksniai turi būti išliejami kartu su izoliacija kaip trigubos ekstruzijos produktas, kai laidininko ekranas, izoliacija ir izoliacijos ekranas išliejami betarpiškai. Seniau naudota izoliacijos ekrano ir izoliacijos-izoliacijos ekrano išliejimo technologija (1+2) parodė, kad jos gyvavimo laikas trumpesnis nei trigubos ekstruzijos.



Pav. 1.12. Skirtingų izoliacijos išliejimų technologijų senėjimai. [3]

Šio sluoksnio medžiaga yra puslaidininkinė sudaryta iš panašių polietileną polimerų ir naftos kilmės suodžių (angl. *carbon black*). Pagal tarptautinį standartą IEC puslaidininkinės medžiagos savitoji varža turi būti ne didesnė, kaip $250 \Omega \cdot m$, pagal CENELEC standartą ne didesnė kaip $500 \Omega \cdot m$. Daugumos kabelių gamintojų šio sluoksnio savitoji varža atitinka abu šiuos reikalavimus su didele atsarga. Puslaidininkinių ekranų gyvavimo laikas labiausiai priklauso nuo jį veikiamos temperatūros ir mechaninių įtempių. Dažniausiai šio sluoksnio storis $1 \div 2$ mm, ilgoje linijoje tai sudaro ne mažą investicijos dalį.

3. Izoliacija

Kaip minėta anksčiau, kabelių izoliacijos gali būti įvairių tipų. Šiame darbe akcentuojamasi į plastikinę izoliaciją. Šios izoliacijos medžiaga yra mažo tankio polietilenas LDPE (angl. *low density polyethylene*) kurio molekulinėje struktūroje papildomai sukuriama kryžminiai ryšiai. Galutinė medžiaga vadinama vulkanizuotu polietilenu arba polietilenu su kryžminiais ryšiais ir žymima XLPE arba PEX.

XLPE medžiaga kabelių gamyboje naudota nuo 19 amžiaus 8 dešimtmečio. Vulkanizavus polietileną įvykusi reakcija yra negrįžtamoji, ji neleidžia polietilenui ištirpti kylant temperatūrai. Paprastas polietilenas pasiekus $80-110^{\circ}C$ suskystėja ir išsilieja. XLPE medžiaga nekeičia savo kietumo daug aukštesnėse temperatūrose iki kol pasiekus $300^{\circ}C$ ji yra suardoma pirrolizės.



Pav. 1.13. XLPE izoliacija su laidininko ir izoliacijos ekranu.

Izoliacijos sluoksnis yra užliejamas kartu su laidininko ir izoliacijos ekranais, kaip, kad minėta anksčiau – vykdomas trigubos ekstruzijos procesas. Ekstruderio antgalyje palaikoma aukšta temperatūra ir slėgis. Pradedamas polietileno maišymas su atskiromis granulėmis – organiniais peroksidais tokiais, kaip dikumilio peroksidas vulkanizacijos procesui pradėti. Šio tipo vulkanizacija yra sausoji. Praktikoje egzistuoja ir drėgnojo tipo vulkanizacija, kai polietilenas su silano priemaišomis yra vulkanizuojamas vandens garais. Tokio tipo vulkanizacija paplitusi vidutinės įtampos kabeliuose ir beveik nenaudojama aukštoje įtampoje. Papildomai izoliacijos sluoksnyje kartais naudojamos medžiagos stabdančios vandens medžių arba Lichtenbergo figūrų susidarymą. Tai naudojama dažnai vidutinės įtampos kabeliams ir beveik nenaudojama aukštos įtampos kabeliams, nes aukštos įtampos kabeliai turi papildomą sluoksnį lyginant su vidutinės įtampos kabeliais - aliuminio foliją.

Aukšta temperatūra ir slėgis laikomi liejimo metu dėl burbulų nesusidarymo, nes vulkanizacijos metu išsiskiria didelis dujų kiekis, kuris gali suformuoti dujų ertmes. Vėliau kabelis lėtai aušinamas, pašalinės reakcijos dujos pasišalina. Natūralios degazacijos metu laikoma, kad vienam milimetrui izoliacijos reikalinga numatyti vieną parą degazacijai.

4. Išbrinkstanti juosta

Pažeidus jūrinius kabelius aplinkoje esantis vanduo gali prasiskverbti šimtus metrų nenaudojant apsaugos nuo drėgmės priemonių. Siekiant sumažinti kabelių remonto laiką ir kaštus, padidinti sistemos patikimumą ir sumažinti atkūrimo laiką naudojamos priemonės, kurios neleidžia drėgmei skliti tarp kabelio sluoksnių, o prasiskverbęs vanduo nenukeliauja daugiau nei kelis metrus.

Kabelio gysloje, aplink ją taip pat iš abiejų pusių ekrano naudojamos apsaugos nuo drėgmės priemonės. Šios priemonės dažniausiai yra polimerinės ir sugeria aplinkos drėgmę taip išsipūsdamos ir neleidamos vandeniui toliau skliti. Kitu atveju naudojamos hidrofobiškos medžiagos, kurios užpildo laisvus tarpus tarp kabelio sluoksnių ir laidininko gijų.



Pav 1. Išbrinkstanti juosta. Dešinėje aplieta vandeniu, kairėje sausa.

Kabelio gysloje naudojami išbrinkstantys siūlai užpildantys trapus. Aplink kiekvieną gijų sluoksnį vyniojama nelaidi išbrinkstanti juosta, o aplink suformuotą laidininką apvyniojama puslaidininkinė išbrinkstanti juosta, kuri atlieka ir izoliacijos ekrano pakloto funkciją.

Be juostų ir siūlų vandens apsaugai naudojami ir polimeriniai išbrinkstantys milteliai. Šiais milteliais kartais būna padengiami tiek siūlai tiek juostos.



Pav. 1.14. Išbrinkstantys siūlai ir juosta.

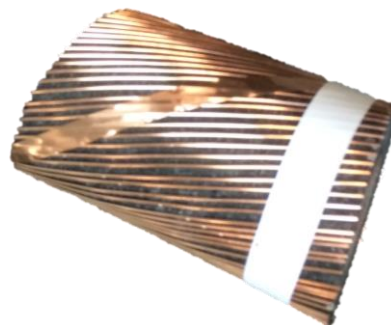
5. Ekranas

Kabelio ekranas tai Faradėjaus narvo principo pritaikymas kabeliui. Kabelio ekranas naudojamas indukuotai įtampai žeminti ir saugo kabelį nuo išorinių elektrinių ir magnetinių laukų. Kabelio sukelti elektriniai ir magnetiniai laukai yra izoliuojami ekrane taip aplinkiniams įrenginiams nėra daromas poveikis.

Kabelio ekranas dažniausiai susideda iš varinių ar aliuminio gijų apsupančių kabelio izoliacijos ekraną su išbrinkstančiomis juostomis. Visos gijos tarpusavyje yra sujungiamos metaline juoste aplink ekraną taip kiekviena gija turi elektrinį ryšį kiekviena gija.

Kabelio ekranas gali būti žemintas viena arba abiejuose kabelinės linijos galuose. Dažniau naudojamas sprendimas žeminti vieną kabelio ekrano galą, o kitame įrengti viršįtampių ribotuvus.

Įtampos ekrane sumažinimui naudojama ekranų transpozicija, kai skirtingų kabelių ekranai sukeičiami keliose vietose linijoje.



Pav. 1.15. Kabelio ekranas.

6. Aliuminio folija

Aliuminio folija tai vandens barjeras aplink kabelį. Šis sluoksnis naudojamas ir pirminiam kabelio pažeidimui identifikuoti. Šis testas daromas sujungiant aliuminio foliją ir išorinio apvalkalo išorinį sluoksnį laidų elektros srovei. Jei kabelio apvalkalas pažeidžiamas sukuriama elektrinis ryšys tarp aliuminio folijos ir išorinio apvalkalo. Pamatavus ominię varžą arba atlikus 10 kV apvalkalo bandymus defektas greitai parodomas. Tokio tipo bandymas pirmą kartą daromas suvyniojus kabelį ant būgno.

7. Išorinis apvalkalas

Tai dažniausiai polimerinė medžiaga sauganti kabelį nuo išorinių pažeidimų ir laikanti tvirtai visus kabelio sluoksnius. Polimerinės medžiagos gali būti aukšto tankio polietilenas (HDPE) arba polivinilchloridas (PVC). Kaip minėta anksčiau šio sluoksnio viršutinioji dalis yra laidu elektros srovei. Ši savybė sukurama padengus sluoksnio išorę grafitu arba užliejus polimerinį elektrai laidų sluoksnį



Pav. 1.16. Išorinis apvalkalas ir aliuminio folija.

1.2.2 Papildomi kabelių sluoksniai

1. Švino sluoksnis

Telegrafo kabeliams švino sluoksnis pradėtas naudoti 1845 m. Wheatstone & Cooke įmonės. Šio sluoksnio paskirtis yra barjero funkcija, apsauga nuo vandens ir drėgmės. Švino sluoksnio liejimas bandytas naudoti ir anksčiau, bet technologija tapo pramonine tik 1845 m. Šiuolaikinėmis technologijomis švino sluoksnio nepertraukiamas ilgis siekia šimtą ir daugiau kilometrų.

2. Armavimo paklotas

Armavimo paklotas tai medžiaga sauganti gilesnius sluoksnius nuo mechaninio plieno gijų poveikio. Tai dažniausiai aukšto tankio polietilenas (HDPE) arba polivinilchloridas (PVC).

3. Armavimas

Tai susuktos plieno gijos saugančios kabelį nuo mechaninio poveikio pvz. inkaro įsitrėžimo.

4. Optinės skaidulos

Optinės skaidulos kabelyje dedamos vietoje vienos ar kelių armavimo ar ekrano gijų. Perduodama informacija gali būti naudojama skirtingais tikslais, tokias kaip: kabelio trasos temperatūros matavimui, duomenų perdavimui, įtrūkimų ir vibracijų fiksavimui, gedimo vietos identifikavimui. Kabelio trasos temperatūros matavimas (angl. *DTS distributed temperature sensing*) naudojamas matuoti kabelinės linijos temperatūras jos ilgyje. Pagal matavimų rezultatus kabelio galimo apkrovimo sistema (angl. *CLPS cable load prediction system*) gali nustatyti, kaip galima apkrauti kabelį laiko momentu. Kai skaidulos naudojamos gedimo vietos identifikavimui įvykus įvykiui matoma signalo sklaidimo pabaiga ilgyje.

5. Bitumas

Naudojamas kaip rišančioji medžiaga polipropileno siūlams aplieti.

6. Polipropileno siūlai

Armavimo sluoksnis apliejamas bitumu, apvyniojamas siūlais, kartais tai daroma du kartus, taip sukuriama išorinis jūrinio kabelio sluoksnis. Bitumas su polipropileno siūlais saugo plieno gijas armavimo sluoksnyje nuo korozijos.



Pav. 1.17. Kabelio armavimas su paklotu, optinės skaidulos ir bitumas su polipropileno siūlais.

1.3 Kabelinių linijų modeliai

Kabelinių linijų modeliai skirstomi pagal kabeliu tekančios srovės tipą; kintamoji ir nuolatinė ir pagal nagrinėjamų procesų pobūdį: stacionarieji ir dinaminiai.

1.3.1 Stacionarieji parametrai nuolatinės srovės grandinėse

Stacionarieji modeliai nagrinėja parametrus kurie nekinta laike pvz.: varžų simetrinės dedamosios kintamosios srovės atveju (nulinės sekos varža, tiesioginės sekos varža, atvirkštinės sekos varža), kabelio talpumas ir induktyvumas, izoliacijos dielektrinė skvarba. Visi šie parametrai dažnai vadinami kabelio konstantomis pagal anglišką terminą *cable constants* ir žymini trumpiniu CC. Parametrai įvertinami nagrinėjant konkretaus kabelio naudojimo tinkamumą pasirinktomis

sąlygomis. Stacionariųjų parametrų ir režimų nagrinėjimas tai tik pradinė dalis tiriant kabelio įrengimą. Pagrindiniai stacionariųjų režimų parametrai pateikti žemiau esančiose formulėse.

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

R_{DC} - nuolatinės srovės varža, Ω ;

ρ – savitoji varža, $\Omega \cdot m$;

l – laidininko ilgis;

S – skerspjūvis, mm^2 .

$$R_{DC}(T) = R_{20^\circ}(1 + \alpha_T(T - 20)) \quad (3)$$

$R_{DC}(T)$ - nuolatinės srovės varža įvertinus temperatūrą;

α_T – temperatūrinis koeficientas;

T – temperatūra, $^\circ C$

R_{20° - laidininko varža, kai $T = 20^\circ C$

$$\rho = \rho_{sol} \cdot \frac{\pi \cdot R_1^2}{S} \quad (4)$$

R_1 – laidininko spindulys, m;

ρ_{sol} – vientiso laidininko savitoji varža, $\Omega \cdot m$.

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (5)$$

R_2 – izoliacijos spindulys su SC sluoksniu ir ST, m;

ε – izoliacijos medžiagos dielektrinė skvarba.

1.3.2 Stacionarieji parametrai kintamosios srovės grandinėse

Šioje dalyje apskaičiuojami stacionarieji kabelių parametrai kintamosios srovės grandinėms. Dėl reaktyviųjų elementų šių dydžių yra daugiau nei nuolatinės srovės grandinėse, be to jų apskaičiavimas sudėtingesnis.

$$R = R_{DC}(1 + y_s + y_p) \quad (6)$$

R – kintamosios srovės varža, Ω ;

y_s – paviršinės srovės koeficientas;

y_p – artumo koeficientas;

Kai kabelis klojamas metaliniame vamzdyje 6-oji formulė šiek tiek pakinta.

$$R = R_{DC}(1 + 1,5 \cdot (y_s + y_p)) \quad (7)$$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4} \quad (8)$$

$$x_s^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_1} \cdot 10^{-7} \cdot k_s \quad (9)$$

k_s - formulės konstanta, pagal lentelę

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} + 0,27} \right] \quad (10)$$

d_c – laidininko skersmuo;

s – atstumas tarp laidininkų centrų.

$$x_p^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_1} \cdot 10^{-7} \cdot k_p \quad (11)$$

k_p – formulės konstanta.

$$L = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{GMR}\right) \quad (12)$$

D_e – gylis žemėje;

μ – laidininko magnetinė skvarba

GMR – vidutinis geometrinis laidininko spindulys, m.

$$GMR = R_1 \cdot e^{-\frac{1}{4}} \quad (13)$$

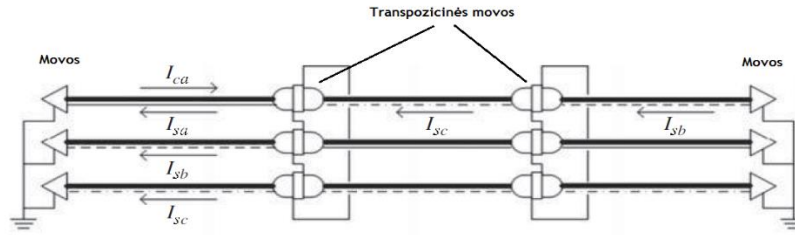
$$D_e = 659 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{earth}}{f}} \quad (14)$$

ρ_{earth} – grunto savitoji varža;

f – dažnis.

Tiesioginės sekos varža, kai kabelio ekranams atlikta transpozicija.

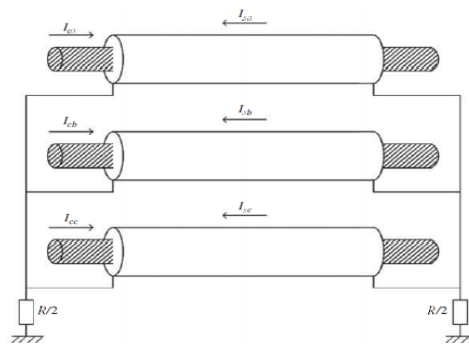
$$Z_{Cross}^+ = (Z_{self} \cdot Z_M) \quad (15)$$



Pav. 1.18. Kabelio ekranai įžeminti abiejuose galuose su transpozicija. [14]

Tiesioginės sekos varža, kai kabelio ekranas įžemintas abiejuose linijos galuose.

$$Z_{Both-ends}^+ = (Z_{self} + Z_M) - \frac{(Z_{M,S} - Z_M)^2}{Z_{self,S} - Z_M} \quad (16)$$



Pav. 1.19. Kabelio ekranas įžemintas abiejuose galuose. [14]

Nulinės sekos varža

$$Z^0 = Z_{self} + 2 \cdot Z_M - \frac{(Z_{M,S} + 2 \cdot Z_M)^2}{Z_{self,S} + 2 \cdot Z_M} \quad (17)$$

Laidininko varža.

$$Z_{self} = R_{50 Hz} + R_e + jX_L \quad (18)$$

Ekranu varža.

$$Z_{self,S} = R_S + R_e + jX_S \quad (19)$$

Varža tarp kabelių.

$$Z_M = R_e + j \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D_e}{s}\right) \quad (20)$$

s – atstumas tarp fazinių kabelių

Varža tarp laidininko ir ekranu.

$$Z_{M,S} = R_e + j \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D_e}{R_2}\right) \quad (21)$$

Visi šie parametrai tiek kintamosios srovės grandinėms tiek nuolatinės srovės grandinėms nenagrinėja pereinamųjų kabelio procesų kintant darbo režimams pvz. įjungiant/išjungiant kabelį,

įvykus trumpiesiems jungimams. Modeliai nagrinėjantys kintamosios srovės ir nuolatinės srovės kabelių pereinamuosius procesus yra skirtingi ir negali būti naudojami bendri.

1.3.3 Pereinamųjų procesų modeliai kintamosios srovės grandinėms

1. Dommel modelis

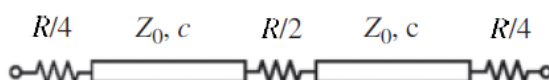
Šis modelis vadintas pagal leidinyje [15] išleistą pavadinimą Schnyder-Bergeron modeliu. Šiame modelyje skaičiuojama linija be nuostolių, kai žinoma jos varža Z_0 ir bangos sklidimo greitis c . Visi modelio parametrai apskaičiuojami esant pastoviam pereinamojo proceso dažniui f_t ir linijos ilgiui χ . Modelis daugiafazis.

Linijos gnybtai atviri - $f_t = 1/4\tau$

Linijoje trumpasis jungimas - $f_t = 1/2\tau$

Linija apkrauta - $f_t = 1/3\tau$

Šiose formulėse $\tau = \chi/c$, bangos sklidimo laikas.



Pav 2. Dommel modelio vaizdas. [1]

Kabelinės linijos formulės išraiška:

$$Z_0 = (60/\sqrt{\epsilon_r}) \ln(r_0/r_i) \quad (22)$$

ϵ_r – izoliacijos dielektrinė skvarba.

Šioje formulėje, r_i ir r_0 yra išorinis ir vidinis kabelio šerdies spinduliai.

$$R = (1/2\pi r_0) \cdot \sqrt{\omega\mu_0\rho_c/2} \quad (23)$$

ρ_c – gyslos savitoji varža, μ_0 – gyslos magnetinė skvarba.

c_0 – šviesos greitis, m/s.

$$c = c_0/\sqrt{\epsilon_r} \quad (24)$$

Pereinamojo proceso stiprinimo koeficientas α ir varža R turi ryšį aprašomą formule:

$$\alpha = R/2 \cdot Z_0 \quad (25)$$

2. Semlyen modelis

Tai daugiafazis modelis, kuris atsižvelgia į dažnio kitimą. Toliau aprašomos modelį sudarančios funkcijos. Pagal Laplaso transformaciją apskaičiuojamas pereinamojo proceso dažnio charakteristika.

$$\begin{aligned}
 f_t &= L^{-1}S(s) \cdot E(s) = L^{-1}[s \cdot \exp\{-\Gamma(s) \cdot \chi/s\} \cdot E(s)] \\
 &= \left(\frac{d}{dt}\right) \int_0^t s(\tau) \cdot e(t - \tau) \cdot dt \\
 &= s(0) \cdot e(nt_0) + \sum_{k=0}^{k-1} s'(\tau) \cdot e(nt_0 - k\tau_0) \cdot \tau_0 = s(t) * e(t)
 \end{aligned} \tag{26}$$

Šioje formulėje:

$$e(t) = L^{-1}E(s) \tag{27}$$

$$s(t) = L^{-1}S(s) \tag{28}$$

$$S(s) = \exp\{-\Gamma(s) \cdot \chi/s\} \tag{29}$$

* - realaus laiko funkcijų persiklojimas, L^{-1} – Laplaso transformacija, $K=\tau/\tau_0$, τ_0 - yra laiko žingsnis skaitiniam funkcijų persiklojimui.

$$s(t) = \frac{\beta\{1 - \exp(-at)\}}{\alpha} = m\{1 - \exp(-at)\} \tag{30}$$

Sujungus esamas lygtis gaunama:

$$\begin{aligned}
 f(t) &= \left(\frac{d}{dt}\right) \int_0^t \left(\frac{b}{a}\right) \cdot \{1 - \exp(-aZ)\} \cdot e(t - \tau) \cdot d\tau \\
 &= as(t - t_0) + be(t) + ce(t - t_0) + de(t + 2t_0)
 \end{aligned} \tag{31}$$

Šioje formulėje:

$$a = \exp(-at), m = \beta/\alpha \tag{32}$$

$$b = m \left\{ 1 - \frac{\alpha}{(\alpha t_0)^2} - (3 - \alpha)/(2\alpha t_0) + 1 \right\} \tag{33}$$

$$c = m \left\{ -\frac{2(1 - \alpha)}{(\alpha t_0)^2} + 2/(\alpha t_0 - \alpha) \right\} \tag{34}$$

$$d = m \left\{ 1 - \frac{\alpha}{(\alpha t_0)^2} - (1 + \alpha)/(2\alpha t_0) \right\} \tag{35}$$

t_0 – funkcijos laiko žingsnis

Tiesinis modelis $s(t)$ yra aprašoma tiesinėmis funkcijomis.

$$s(t) = a_i t + b_i \tag{36}$$

$$f(t) = s(0) \cdot e(t) + \sum_{i=0}^1 A_i G_i(t) \quad (37)$$

Šioje formulėje,

$$A_i = a_i \tau_0 \quad (38)$$

τ_0 – funkcijos reikšmės kitimo žingsnis.

$$G_i(t) = \left(\frac{1}{\tau_0}\right) \int_{t_{i-1}}^{t_i} e(t - \tau) = \sum_{m=m_{i-1}}^{i_m} e(t - m\tau_0) \quad (39)$$

3. Marti modelis

Dažnio reakcija įvertinama pagal formulę

$$S(s) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{a_i}{s} + b_i\right) \quad (40)$$

Laiko atsakas gali būti apskaičiuojamas atlikus S(s) Laplaso transformaciją.

$$s(t) = \sum a_i \exp(-b_i t) \quad (41)$$

4. Kabelinių linijų modelių kintamajai srovei suvestinė

Lentelė 3. Modelių suvestinė

Modelis	Fazių skaičius	Dažnio charakteristika	Priklausomybės	Savybės
Dommel	Daugiafazis	Fiksuota	Dydžių priklausomybės nuo laiko	Hidraulinio smūgio principas
PI grandinės	Daugiafazis	Nenagrinėjama	Dydžių priklausomybės nuo laiko	Supaprastintas, RMS
Semlyen	Daugiafazis	Nagrinėjama	Dydžių priklausomybės nuo dažnio	Laplaso transformacija
Marti	Daugiafazis	Nagrinėjama	Dydžių priklausomybės nuo dažnio	Laplaso transformacija
Noda	Daugiafazis	Nagrinėjama	Dydžių priklausomybės nuo fazinio kampo	Nagrinėjamos priklausomybės nuo fazinio kampo

1.3.4 Erdvinio krūvio įvertinimo modeliai nuolatinės srovės grandinėms

Pereinamieji procesai aukštos įtampos nuolatinės srovės kabeliuose įvyksta dėl erdvinio krūvio įtakos izoliacijai. Erdvinis krūvis formuojasi dėl didelio elektrinio lauko ir aukštos temperatūros, kai laisvieji elektronai yra išspinduliuojami nuo elektrodų termoelektroninės emisijos principu. Erdvinis krūvis gali būti vienodai arba priešingai įelektrintas lyginat su greta esančiais elektrodais.

Pagal Gauso dėsnį elektrinio lauko stipris lygus paviršinio krūvio ir vakuomo dielektrinės skvarbos santykiui.

$$E = \frac{\sigma_q}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \quad (42)$$

Šioje formulėje σ - krūvio koncentracija ploto vienetu, C/m^2 , ε_0 – vakuomo dielektrinė skvarba,

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \quad (43)$$

Paviršinis krūvis apskaičiuojamas pagal 45 formulę.

$$\sigma_q = \frac{Q}{A} \quad (44)$$

Cilindrinio kūno paviršiaus plotas apskaičiuojamas pagal 46 formulę.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \quad (45)$$

Toliau kondensatoriau talpa išreiškiama per jame esančio krūvio kiekį ir įtampą tarp elektrodų.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (46)$$

Penktąją formulę išreiškus kartu su 46 formule gaunama.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (47)$$

Sulyginus 47 ir 48 formulę gaunama:

$$\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \frac{Q}{U} \quad (48)$$

Iš 49 formulės išreiškus susikaupusio krūvio kiekį gaunama:

$$Q = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (49)$$

Sujungus 43 ir 45 formules elektrinio lauko stipris išreiškiamas:

$$E = \frac{Q}{A \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \quad (50)$$

I 51 –ąją formulę įstačius 50 gaunama elektrinio lauko stiprio kondensatoriuje apskaičiavimo formulė

$$E = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \quad (51)$$

Suprastinus narius gaunama:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (52)$$

Kaip žinoma nuolatinė srovė kondensatoriuje neteka nekintančiame režime, idealiu atveju. Pereinamojo proceso metu kondensatoriaus įtampa kinta, ko pasekoje juo pradeda tekėti srovė. Kondensatoriaus srovė kintant įtampai apskaičiuojama pagal formulę:

$$I_c(t) = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (53)$$

Kabelio plastmasinės izoliacijos savybės nėra visiškai dielektrinės. Kabelio izoliacijoje temperatūrinio poveikio ir didelio elektrinio lauko nuo elektrodų (gyslos ir ekrano) injektuojami elektronai susikaupia izoliacijoje ir suformuoja elektronų (erdvinio krūvio) debesis. Dėl erdvinio krūvio izoliacijoje tekanti srovė apskaičiuojama pagal formulę:

$$I_{\sigma_l} = U \cdot (\sigma_{l_0} \cdot e^{\alpha \cdot T} \cdot e^{\gamma \cdot T}) \cdot \frac{l}{A} \quad (54)$$

σ_{l_0} – medžiagos laidumas prie 0°C ir 0 kV/mm;

T - temperatūra, K;

α – temperatūrinis koeficientas;

γ – elektrinio lauko koeficientas;

l – izoliacijos elemento storis;

A - paviršiaus plotas.

Pagal formulę Nr. 55 įtampos kritimas izoliacijoje išreiškiamas taip:

$$U = \frac{I_{\sigma_l}}{(\sigma_{l_0} \cdot e^{\alpha \cdot T} \cdot e^{\gamma \cdot T}) \cdot \frac{l}{A}} \quad (55)$$

Iš 47 formulės išsireiškus sluoksnyje esantį krūvį gaunama:

$$Q = C \cdot U \quad (56)$$

Elektrinio krūvio kiekis tūrio vienetė t.y. erdvinis krūvis gaunamas sluoksnyje esančio krūvio kiekį padalinus iš jo tūrio.

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{(R_2^2 - R_1^2) \cdot \pi \cdot l} \quad (57)$$

Visa izoliacija tekanti srovė susidedanti iš kondensatorinės dedamosios ir laidumo, ji aprašoma formule:

$$I_{\Sigma} = I_c(t) + I_{\sigma l} \quad (58)$$

Izoliacijos temperatūra apskaičiuojama pagal šilumos kiekį atiduodamą nuo gyslos. Naudojant Furjė šilumos tankio išraišką apskaičiuojama atiduodama šiluminė energija. Diferencinė Furjė dėsnio forma:

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T \quad (59)$$

q vektorius – šilumos srauto tankis (W/m^2)

k – medžiagos šiluminis laidumas ($W/m/K$)

$-\nabla T$ – temperatūrinis gradientas žymintis, kad šiluminio srauto tankio ir temperatūros vektorių kryptys yra priešingos.

Šilumos srautas gaunamas šilumos srauto tankį padauginus iš paviršiaus ploto, kurį kerta šilumos srauto vektorius. Šilumos srautas išreiškiamas pagal 58 formulę:

$$Q_t = A \cdot k \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (60)$$

Šios formulės išraiška cilindriniam paviršiui pateikta 59 formulėje.

$$Q_t = 2 \cdot k \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{\Delta T}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (61)$$

Kasmetinės organizacijos CIGRE konferencijos metu [16] buvo išleistas leidinys, kuriame nurodyta formulė, kaip kinta izoliacijos senėjimas dėl erdvinio krūvio kiekio priklausomai nuo elektrinio lauko stiprio izoliacijoje, jos molekulinį savybių, izoliacijos temperatūros.

$$\tau = \frac{h}{2 \cdot k \cdot T} \cdot \exp\left(\frac{\Delta G_0}{k \cdot T}\right) \cdot \frac{2}{\exp\left(\frac{e \cdot \lambda \cdot F}{k \cdot T}\right) - \exp\left(-\frac{e \cdot \lambda \cdot F}{k \cdot T}\right)} \quad (62)$$

Šioje formulėje:

τ – izoliacijos gyvavimo laikas, s;

λ – vakuolių skersmuo (dažniausiai nuo 5 iki 25 nm). Vakuolė – erdvinis kūnas, kurio struktūra skiriasi nuo supančios izoliacijos. Tai gali būti nano oro burbulas.

ΔG_0 – energija reikalinga suardyti tarpmolekulinius ryšius (dažniausiai tarp 1,3 ir 1,6 eV);

k – Bolcmano konstanta, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K;

T – Temperatūra, K;

h – Planko konstanta, $6,62 \cdot 10^{-34}$ J·S;

e – elementarusis vieno elektrono krūvis, $1,602 \cdot 10^{-19}$ C;

F – elektrinio lauko stipris, V/m.

$$T_1 = \rho_T / (2 \cdot \pi) \cdot \ln(R_2/R_1) \quad (63)$$

Šioje formulėje ρ_T – izoliacijos šiluminė varža;

$$T_2 = \rho_T / (2 \cdot \pi) \cdot \ln\left(1 + 2 \cdot \frac{t_2}{D_s}\right) \quad (64)$$

t_2 – armavimo pakloto sluoksnio storis;

D_s – ekrano skersmuo.

$$T_3 = \rho_T / (2 \cdot \pi) \cdot \ln\left(1 + 2 \cdot \frac{t_3}{D'_a}\right) \quad (65)$$

t_3 – išorinio sluoksnio (nuo armavimo) storis;

D'_a - armavimo sluoksnio išorinis skersmuo;

$$T_4 = \rho_T / (2 \cdot \pi) \cdot \ln(2 \cdot u) \quad (66)$$

$$u = 2 \cdot L / D_e \quad (67)$$

L – kabelio paklojimo gylis nuo jūros dugno iki kabelio ašies;

D_e – išorinis kabelio skersmuo.

Pagal šias formules gaunama, kad varža nuo izoliacijos iki kabelio išorinio sluoksnio yra lygi:

$$T_{23} = T_2 + T_3 \quad (68)$$

2 Metodinė dalis

Šioje dalyje tiriama AĮNS kabelių izoliacijos darbo režimai įvertinat izoliacijos temperatūrą ir erdvinį krūvį. Erdvinis krūvis mažina izoliacijos resursą didindamas arba mažindamas elektrinio lauko stiprio vertę izoliacijoje. Modeliavimui naudojami konkretaus NordBalt jūrinio kabelio jungiančio Lietuvos ir Švedijos elektros perdavimo tinklus parametrai. Erdvinio krūvio įtakai ištirti tikrinti skirtingi darbo režimai kurių metu nustatyta elektrinio lauko stiprio vertė. Pagal CIGRE pateiktą formulę aprašytą teorinėje dalyje (formulė Nr. 62) su žinomomis parametru vertėmis nustatytas izoliacijos ilgaamžiškumo kitimas.

2.1 Tyrimo objektas

Modelio parametrai sudaryti pagal NordBalt jungties kabelio parametrus. Įvertinant tik izoliacinius sluoksnius tarp aliuminio gyslos ir švino sluoksnio. Nors šie sluoksniai yra skirtingi modeliavime priimta, kad šių sluoksnių savybės vienodos t.y. izoliacija homogeniška.



Pav. 2.1. NordBalt kabelio iliustracija iš duomenų lapo.

Pagal duomenų lapą vidinio puslaidininkinio izoliacijos sluoksnio storis – 1,5 mm, izoliacijos storis – 18 mm, išorinio izoliacijos puslaidininkinio sluoksnio storis – 1,4 mm. Kabelio gyslos skersmuo – 49,3. Pagal šiuos matmenis gauta kad vidinis viso izoliacinio sluoksnio spindulys – 24,65 mm, išorinio sluoksnio – 45,55 mm. Visas kabelio skersmuo – 123 mm. Kiti žinomi skaičiavimams reikalingi kabelio parametrai:

- Armavimo pakloto storis – 3 mm,
- Kabelio skersmuo vertinant sluoksnius iki armavimo pakloto – 96,5 mm.
- Armavimo sluoksnio skersmuo – 106,5 mm;
- Polipropileno siūlų storis – 4 mm;
- Kabelio paklojimo gylis – 1 m;
- Kabelio gyslos varža – 0,0172 W;

- Bendras šilumai laidžių sluoksnių storis nuo izoliacijos – 7 mm (išskyrus metalinius sluoksnius);
- Kabelio išorinio paviršiaus plotas – 0,38642 m²/m;
- Jūros dugno temperatūra – 8 °C.
- Pradinė kabelio temperatūra - 8 °C didesnė nei, jūros dugno temperatūra;
- Jūrinio kabelio izoliacijos masė (10 km) – 42866,32 kg.
- Kabelio izoliacijos skerspjūvio plotas – 0,004609282;
- Priimamas nemetalinių sluoksnių storis nuo izoliacijos iki paviršiaus – 1 cm.

Kiti kabelio parametrai pagal literatūros šaltinių [1] [2] [17] [18] lenteles:

- Izoliacijos santykinė dielektrinė skvarba – 2,5;
- Elektrinio lauko koeficientas γ – 0,0645 mm/kV;
- Temperatūrinis koeficientas α – 0,084 1/K;
- Izoliacijos laidumas prie 0°C ir 0 kV/mm σ_{10} – 1,65·10⁻¹⁷ 1/W/m;
- XLPE izoliacijos šiluminė varža – 3,5 K·m/W;
- Armavimo pakloto šiluminė varža - 3,5 K·m/W;
- Polipropileno siūlų šiluminė varža - 3,7 K·m/W;
- Jūros dugno šiluminė varža – 0,8 K·m/W;
- Šiluminis laidumas tarp izoliacijos ir grunto – 1,905 W/m/K;
- XLPE savitoji šiluma – 2100 J/kg·K;
- XLPE tankis – 930 kg/m³.

Bendra varža nuo kabelio izoliacijos iki išorinio sluoksnio pagal literatūros 64, 65, 68 formules lygi:

$$T_{23} = T_2 + T_3 = \frac{\rho_T}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(1 + 2 \cdot \frac{t_2}{D_s}\right) + \frac{\rho_T}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(1 + 2 \cdot \frac{t_3}{D'_a}\right) \quad (69)$$

$$= 0,07395 \text{ K} \cdot \frac{m}{W}$$

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(2 \cdot u) = \frac{\rho_T}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(4 \cdot L/D_e) = 0,451 \text{ K} \cdot \frac{m}{W} \quad (70)$$

2.2 MATLAB aplinkos modelis

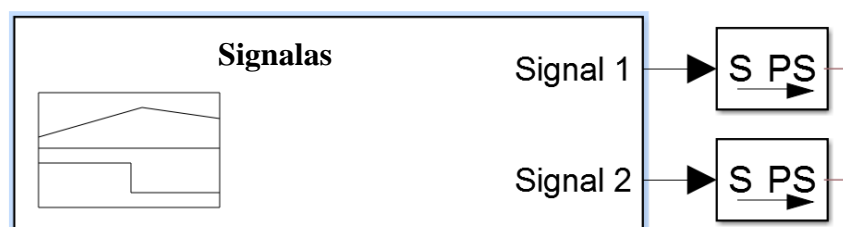
Matlab aplinkos modelio struktūra naudota iš Mathworks papildomos duomenų bazės. Šis modelis sudarytas Simulink aplinkoje naudojant Simscape elementus. Modelyje aprašytos formules pritaikytos plokščiajam kondensatoriui. Siekiant modelį padaryti tikslesniu šios formulės redaguotos ir pritaikytos kabelio parametrų skaičiavimui. Pagal teorijoje naudotas 43-59 formules Matlab modelis susideda iš dviejų pagrindinių dalių: elektrinės ir šiluminės. Daugelis teorinių formulų literatūroje dydžiams apskaičiuoti yra gradientinės tai reiškia, kad jos įvertiną pradinių sąlygų kitimą formulėse tokių kaip šilumos srauto tankio kitimą skverbiantis į gilesnius medžiagų sluoksnius. Modeliavime gradientiškumo įvertinimui izoliacijos blokas suskaidomas į 20 elementų taip modeliavimui galima naudoti tiesines priklausomybes, kurios visame izoliacijos bloke sudarys netiesinį vaizdą dėl elementų išskaidymo. Modelis sudarytas vienam kabelio segmentui, kurio ilgis 1 m.

Iš abiejų pusių izoliacijos bloko modelio prijungiamos šiluminės masės, kurios simbolizuoja šilumos perdavimą išilgai kabelio. Šiuose blokuose įvedamos savitosios šilumos, pradinės temperatūros, ir masės vertės.

Kaip minėta polimerinės XLPE izoliacijos skaičiavimai atlikti išskaidant visą izoliacijos sluoksnį į 20 sluoksnių, kurie veikia vienas kitą tarpusavyje perduodant šilumą ir elektros srovę kaip parodyta žemiau esančiame paveikslėlyje.

Pav. 2.2. Kabelio izoliacijos skaidymas segmentais.

Pirmasis modelio elementas – signalų generatorius, kuris atitinka AINS keitiklį. Signalų generatorius kuria tiek įtampos tiek srovės signalą taip lanksčiai atvaizduodamas visus galimus darbo režimus. Visais nagrinėjamais atvejais signalo trukmė – 10 valandų.

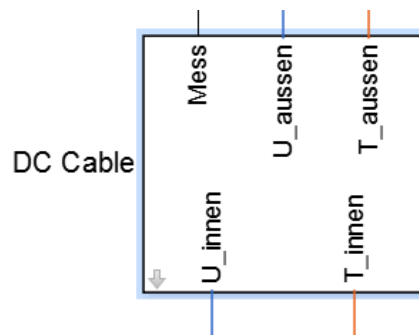


Pav. 2.3. Signalų generatorius.

Už signalų generatoriaus yra įtampos ir srovės šaltiniai signalų skaitmeninių signalų pavertimui fiziniams. Šioje vietoje kaip ir minėta modelis padalinamas į dvi dalis: elektrinę ir šiluminę.

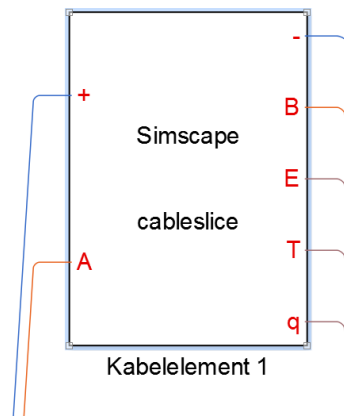
Elektrinė dalis.

Elektrinėje dalyje, kai signalas paverčiamas įtampa ši keliauja į kabelio izoliacijos bloką.



Pav. 2.4. Kabelio izoliacijos blokas.

Kabelio izoliacijos blokas susideda iš 20 elementų sujungtų nuosekliai turinčių įėjimo ir išėjimo kanalus.



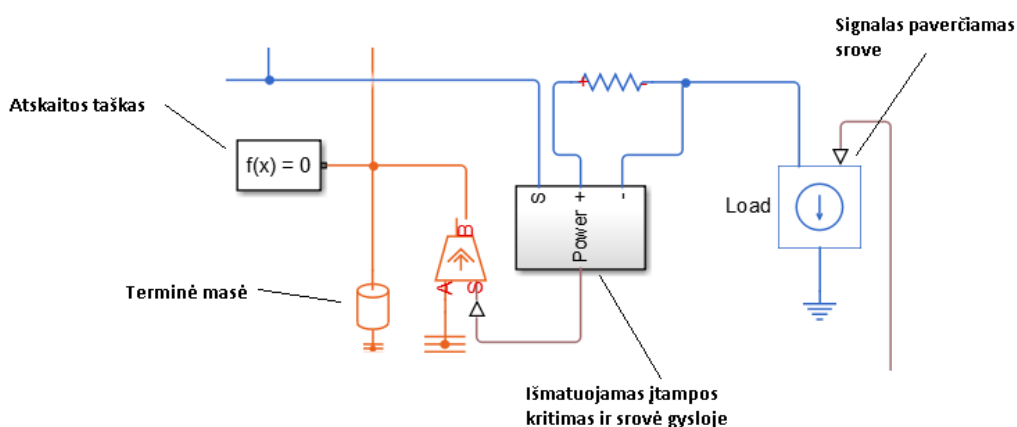
Pav. 2.5. Suskaidytas izoliacijos blokas.

Suskaidytame izoliacijos bloke aprašomos tiek elektrinės tiek šiluminės izoliacijos savybės. Kairėje pusėje yra izoliacijos bloko įėjimo signalai, dešinėje parametrai perduodami kitam sluoksniui arba signalų rinklei, kuri veda į peržiūros (scope) elementą. + reiškia įtampos įėjimą į izoliacijos sluoksnį, - reiškia įtampos išėjimą iš sluoksnio, tarp šių mazgų atsiranda įtampos kritimas. Šilumos srauto įėjimas žymimas A raide, o išėjimas B. Signalai E (elektrinio lauko stipris), T (temperatūra) ir q (erdvinis krūvis) keliauja ne į kitą izoliacijos bloką, o į signalų rinklę ir vėliau į peržiūros elementą (scope). Esminiai apskaičiuojami parametrai yra srovė tekanti per izoliaciją, įtampos skirtumas tarp išorinio ir vidinio izoliacijos sluoksnio, elektrinio lauko stipris, erdvinio krūvio kiekis. Modelio skaičiavimo algoritmas sudarytas mazgų-šakų principu, aprašoma kokie parametrai kerta modelį (nekinta jame, pvz. srovė) ir kokie parametrai modelį pereina (pasikeičia, pvz. įtampos kritimas). Šis blokas yra esminis modelyje, jo Matlab kodas pateiktas

priede. Elektrinio lauko stipris apskaičiuojamas taške nutolusiame vienodu atstumu nuo išskaidyto sluoksnio išorinio ir vidinio spindulių.

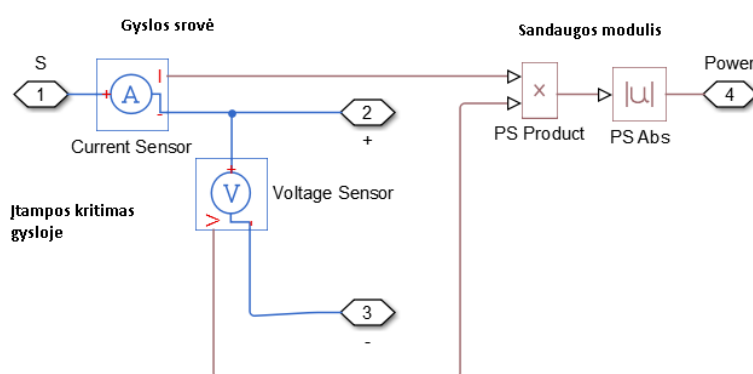
Šiluminė dalis.

Šiluminėje dalyje vertinama srovės daroma įtaka kabeliui t.y. kabelio gyslos šilimo priklausomybė nuo ja tekančios srovės (priklauso nuo perduodamos galios). Už srovės šaltinio srovės signalas keliauja į lygiagrečiai jungtą rezistorių, kuris simbolizuoja gyslos varžą. Gyslos varža parenkama pagal NordBalt kabelio duomenų lapą ir yra lygi: 0,0172 W/km



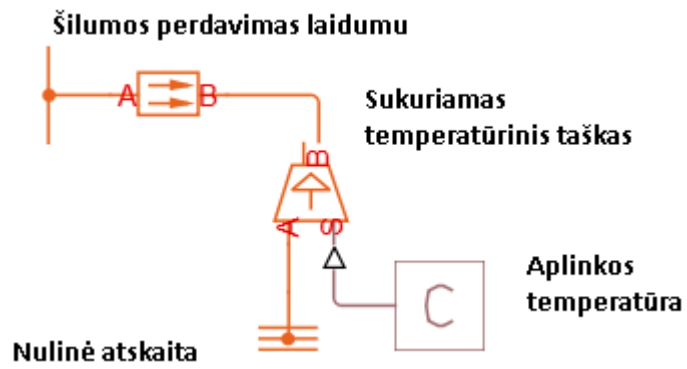
Pav. 2.6. Šilumos išsiskyrimo gysloje modeliavimas.

Šioje modelio dalyje yra išmatuojamas įtampos kritimas segmento gysloje ir gysla tekanti srovė. Šių dydžių sandauga atitinka šilumos išsiskyrimą gysloje, kuris nukreipiamas į kabelio izoliacijos bloką tolimesniems skaičiavimams.

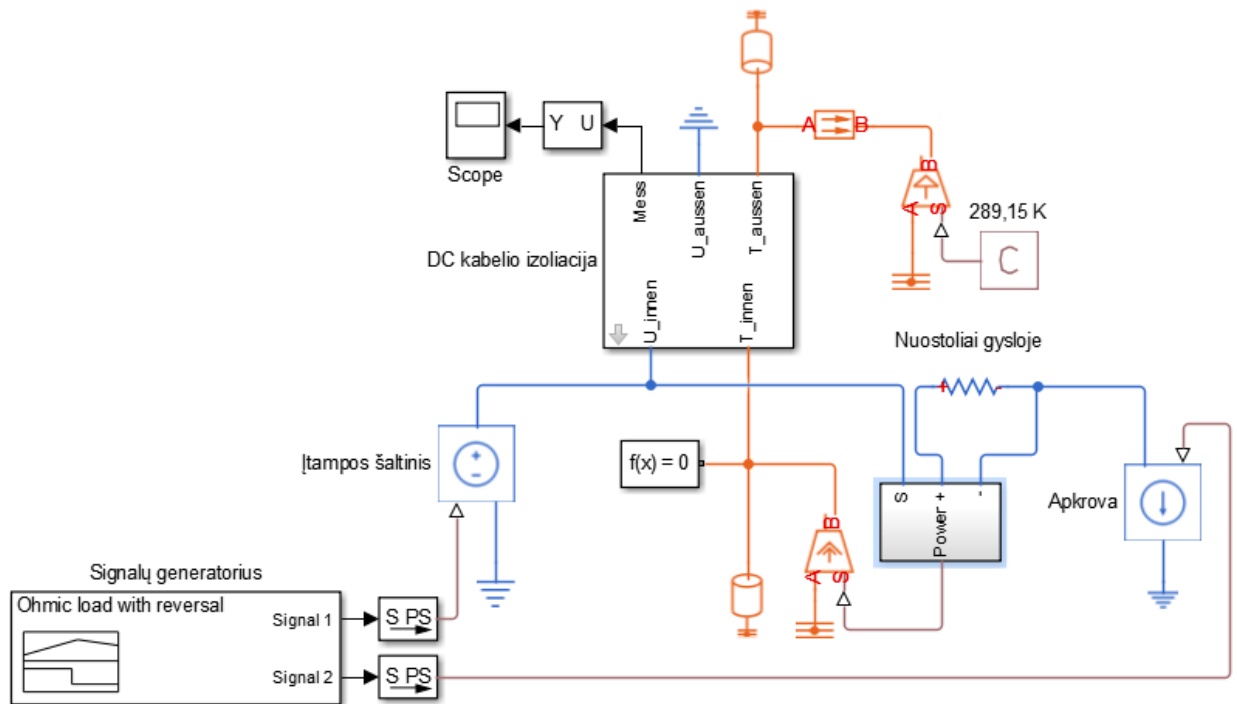


Pav. 2.7. Gyslos įtampos kritimo ir srovės skaičiavimai.

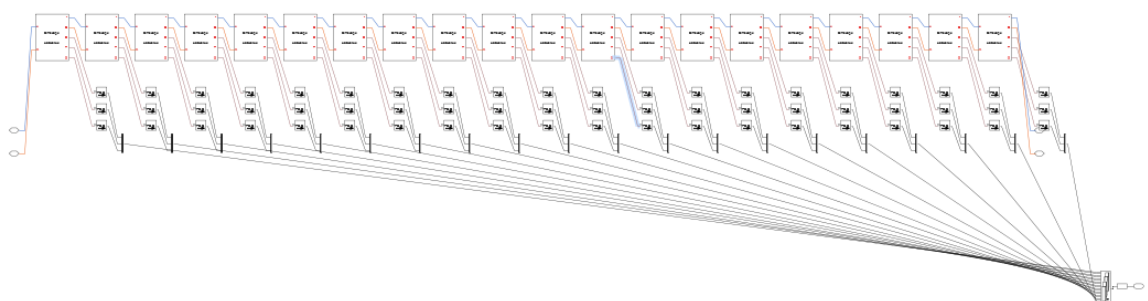
Be šilumos išsiskyrimo gysloje taip pat reikalinga įvertinti ir grunto temperatūrą ir terminę masę kabelio esančio už ir prieš nagrinėjamą segmentą. Pagal NordBalt kabelio DTS sistemą vidutinė grunto temperatūra Baltijos jūros dugne – 8°C.



Pav. 2.8. Aplinkos temperatūros ir kabelio temperatūrinės masės elementai.



Pav. 2.9. Matlab modelio iliustracija.



Pav. 2.10. Suskaidytos izoliacijos elementų blokų sujungimas bendrame bloke.

2.3 Tiriama izoliacijos režimai

Pagal literatūros apžvalgą matoma, kad kabelio izoliaciją labiausiai sendina kabelio įkrovimo režimas ir kabelių poliarumo pakeitimas. Šie režimai atkartojami modeliu vykdant greitus ir lėtus procesus. Taip pat kabelio įkrovimas modeliuojamas dvejopas: tik pakeliant kabelio įtampą ir pakeliant įtampą, perduodant galią (keliant kabelyje tekančią srovę).

Kiekvienam režimui sumodeliuojamos trys kreivės: elektrinio lauko stiprio kreivės izoliacijos sluoksniuose, temperatūrinės kreivės izoliacijos sluoksniuose. Po kiekviena kreive pateikiamas paveikslėlis, kuriame pavaizduotos pagrindinės kreivės vertės. Kreivės sudaromos skaičiuojant izoliacijos parametrus laike imant izoliacijos vidurinį tašką tarp jos vidinio ir išorinio spindulių. Pagal gamintojo pateiktas specifikacijas elektrinio lauko stipris taške esančiame prie gyslos yra 19,5 kV/mm, esant galios perdavimui šis dydis nukrenta iki 17,9 kV/mm, kai gysla teka 1250 A srovė. Vardinė kabelio įtampa 300 kV.

Tiriamų režimų sąrašas:

1. Kabelio įkrovimas perduodant energiją;

Šis darbo režimas naudojamas paleidžiant keitiklį kartu su kabeline linija. Keitiklis ir kabelis yra lėtai įkraunami kartu ir didinat perduodamos srovės dydį iki vardinių reikšmių. Darbo režimas susideda iš dviejų dalių: įkrovimo ir normalaus darbo. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti įkrovimo (keliant įtampą ir srovę režimo) dalį ir įkrovimo būdo įtaką nusistovėjusiems dydžiams.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- d. Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.

2. Poliarumo pakeitimas perduodant energiją;

Šis darbo režimas nėra naudojamas VSC tipo keitikliuose, darbo režime keičiantis perduodamos galios kryptį kabelių poliarumas ir srovės kryptis keitiklyje yra pakeičiami. Darbo režimas susideda iš keturių etapų: teigiamo poliarumo įkrovimo, teigiamo poliarumo normalaus darbo, iškrovimo, neigiamo poliarumo įkrovimo, normalaus neigiamo poliarumo darbo. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kabelio izoliacijos darbo režimą jeigu sistemoje būtų naudojamas poliarumo pakeitimo režimas.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę
- c. Teigiamo poliarumo normalaus darbo trukmė – 15200 s;
- d. Iškvovimo trukmė – 1000 s;
- e. Neigiamo poliarumo įkrovimo trukmė – 1000 s;
- f. Normalaus neigiamo poliarumo darbo trukmė – 17000 s.
- g. Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių

3. Kabelio įkrovimas be energijos perdavimo;

Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo režimas naudojamas, kai sistema yra įkrauta ir pasiruošusi darbui, laukiama srovės paleidimo. Taip perduodamo energijos srauto kėlimas gali būti greitesnis, nereikalinga lėtai įkrauti kabelį ir keitiklį. Šis režimas taip pat naudojamas įvairiems bandymams atlikti. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kabelio izoliacijos parametrus, kai sistema yra įkraunama, bet joje nevyksta energijos perdavimas.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą;
- c. Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- d. Įtampa keliami iki vardinės;
- e. Srovės vertė nekinta – 0 A.

4. Apkrovos paleidimas įkrautam kabeliui;

Šis darbo režimas savo funkcija atitinka pirmąjį – kabelio įkrovimo su energijos perdavimu režimą. Tai dažnai sutinkamas režimas. Atliekant šį režimą galima įsitikinti ar sistema įkrauta sėkmingai ir tik tada perduoti ja energiją. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kaip kinta parametrai izoliacijoje, kai kabelis yra įkrunamas ir tik tada pradedamas energijos perdavimas, taip pat kaip įkrovimo režimas nulemia nusistovėjusius dydžius.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo be apkrovos trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą;
- c. Apkrovos paleidimas – iškart po įkrovimo 1800 s nuo modeliavimo pradžios;
- d. Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- e. Įtampos ir srovės vertės keliamos iki vardinių.

5. Kabelio įkrovimo perduodant energiją režimas esant 100% padidintai srovei;

Tai primosio darbo režimo analogas, kuriame vardinis srovės dydis padidinamas 100%, gauti rezultatai lyginami su pirmuoju darbo režimu. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kaip padidinta srovė tekanti gysla nulemia parametrus izoliacijoje ir kaip tai daro įtaką nusistovėjusiems dydžiams.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė 10 val.;
- d. Įtampa keliami iki vardinės;
- e. Srovė keliami iki 100% didesnės nei vardinė.

6. Kabelio įkrovimo perduodant energiją režimas esant 50% padidintai įtampai;

Tai primosio darbo režimo analogas, kuriame vardinis įtampos dydis padidinamas 50%, gauti rezultatai lyginami su pirmuoju darbo režimu. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kaip padidinta kabelio įtampa nulemia parametrus izoliacijoje ir kaip tai daro įtaką nusistovėjusiems dydžiams.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė 10 val.;
- d. Srovė keliami iki vardinės;
- e. Įtampa keliami iki 50% didesnės nei vardinė.

7. Greitas įkrovimo režimas;

Šiame darbo režime lėtas kabelio įkrovimas trunkantis 30 min. atliekamas per 5 min. tokio režimo rezultatai lyginami su pirmuoju darbo režimu. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kaip greitas įkrovimo režimas nulemia parametrus izoliacijoje įkrovimo metu ir ar tai daro įtaką nusistovėjusiems dydžiams.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 300 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- d. Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.

8. Kabelio įkrovimas perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms;

Šiame darbo režime naudojama pirmojo darbo režimo bazė. Modeliuojant kabelio izoliacijos aušinimą izoliacijos masė, kurios funkcija yra perduoti šilumą iš nagrinėjamo segmento į kitą yra pakeičiama 10 kartų mažesne. Stebimas prastų aušinimo sąlygų rezultatas lyginamas su pirmuoju darbo režimu. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kaip aušinimo sąlygos nulemia parametrus izoliacijoje kabelio įkrovimo ir nusistovėjusio režimo metu.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- d. Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių;
- e. Kabelio izoliacijos masė – 10 kartų mažesnė nei pirmajame režime.

9. Teigiamas viršįtampis kabelio įkrovimo perduodant energiją režime;

Šis darbo režimas atitinka pirmąjį darbo režimą, kai kabelis yra įkraunamas keliant įtampą ir srovę. Nusistovėjusiame režime, kai $t = 3600$ s sistemoje sugeneruojamas teigiamo poliarumo 100 kV viršįtampis. Po viršįtampio sistemos darbas stebimas dar 1000 s. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kaip tos pačios įtampos poliarumo viršįtampis nulemia parametrus izoliacijoje ir kaip viršįtampis daro įtaką nusistovėjusiems dydžiams.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė – 37000 s;
- d. Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.
- e. Viršįtampio dydis – + 100 kV;
- f. Viršįtampio laikas – 36000 s nuo modeliavimo pradžios.

10. Neigiamas viršįtampis kabelio įkrovimo perduodant energiją režime;

Šis darbo režimas atitinka pirmąjį darbo režimą, kai kabelis yra įkraunamas keliant įtampą ir srovę. Nusistovėjusiame režime, kai $t = 3600$ s sistemoje sugeneruojamas neigiamo poliarumo 100 kV viršįtampis. Po viršįtampio sistemos darbas stebimas dar 1000 s. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kaip priešingos įtampos (neigiamo) poliarumo viršįtampis nulemia parametrus izoliacijoje ir kaip viršįtampis daro įtaką nusistovėjusiems dydžiams.

Pagrindiniai režimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė – 37000 s;
- d. Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.
- e. Viršįtampio dydis – – 100 kV;
- f. Viršįtampio laikas – 36000 s nuo modeliavimo pradžios.

11. Neigiamo poliaus įkrovimas perduodant energiją;

Šiame darbo režime modeliuojamas neigiamo poliaus įkrovimo ir darbo režimai. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti, ar parametrai teigiamame ir neigiamame poliuje skiriasi įkrovimo ir nusistovėjusiam režime.

Pagrindiniai modeliavimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- d. Įtampa keliami iki vardinės neigiamo poliarumo reikšmės – – 300 kV;
- e. Srovė keliami iki vardinės;

12. Šilto kabelio įkrovimas perduodant energiją.

Šis darbo režimas atitinka pirmąjį, kai kabelis kraunamas perduodant energiją, tik pradiniu modeliavimo metu kabelio temperatūra prilygsta ne jūros dugno temperatūrai, o yra lygi 30°C. Režimo analizavimo tikslas – įvertinti kaip esant didesnei pradinei temperatūrai paveikiami parametrai izoliacijoje įkrovimo ir nusistovėjusiam režime.

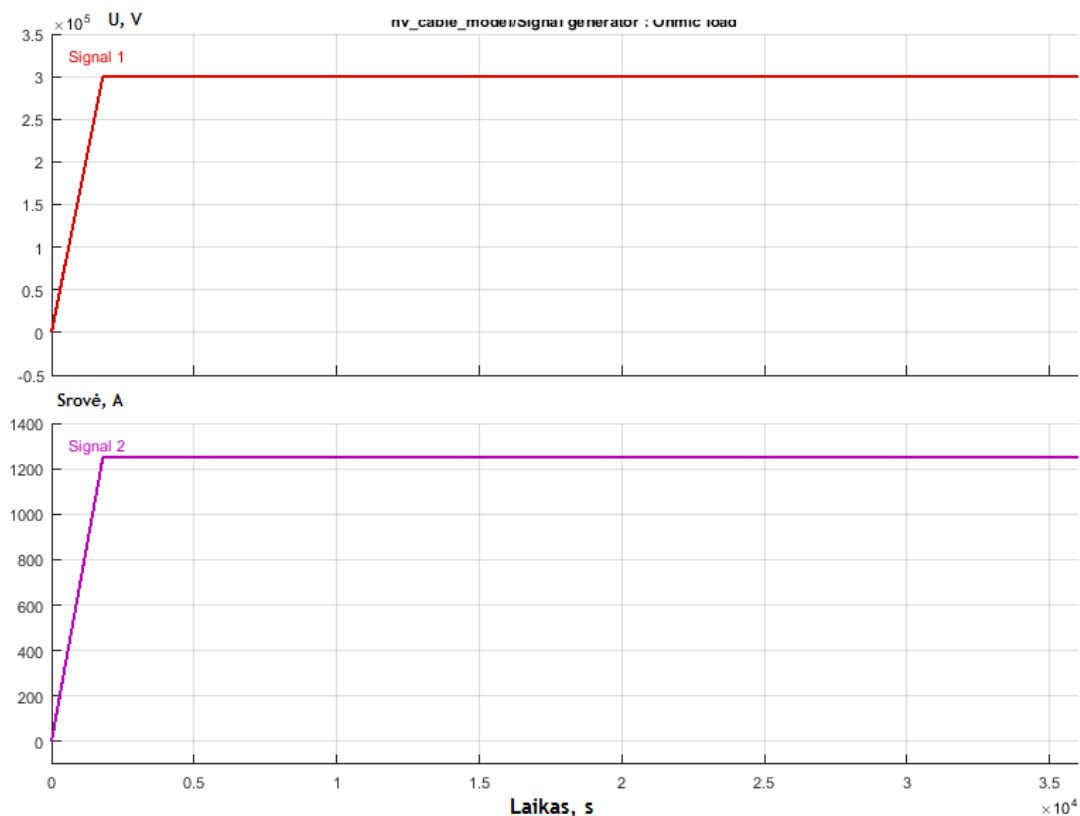
Pagrindiniai modeliavimo parametrai:

- a. Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- b. Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- c. Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- d. Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.
- e. Kabelio temperatūra pradiniu laiko momentu - + 30°C.

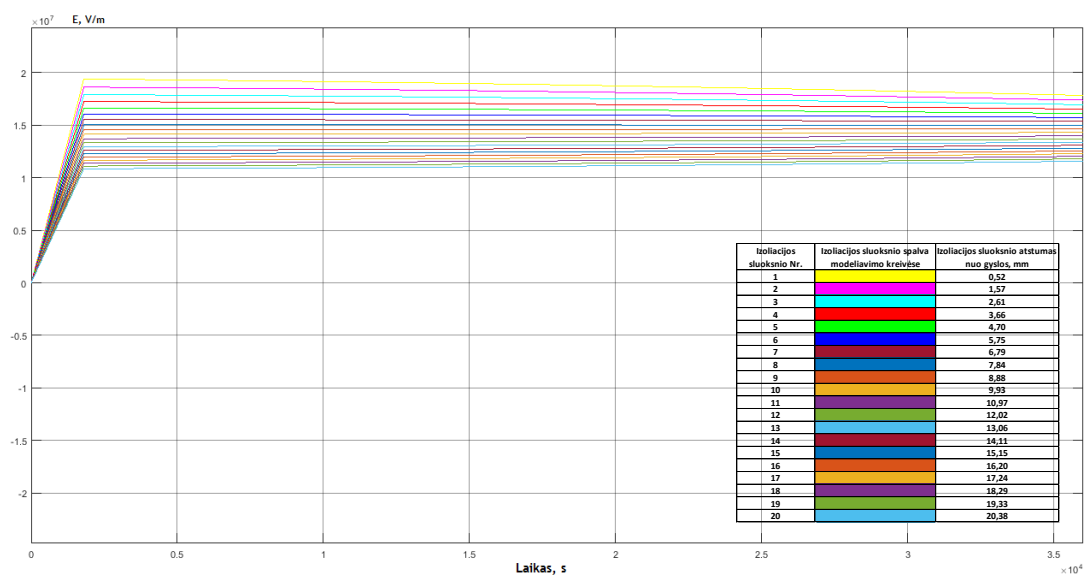
2.3.1 Kabelio įkrovimas perduodant energiją

Pagrindiniai režimo parametrai:

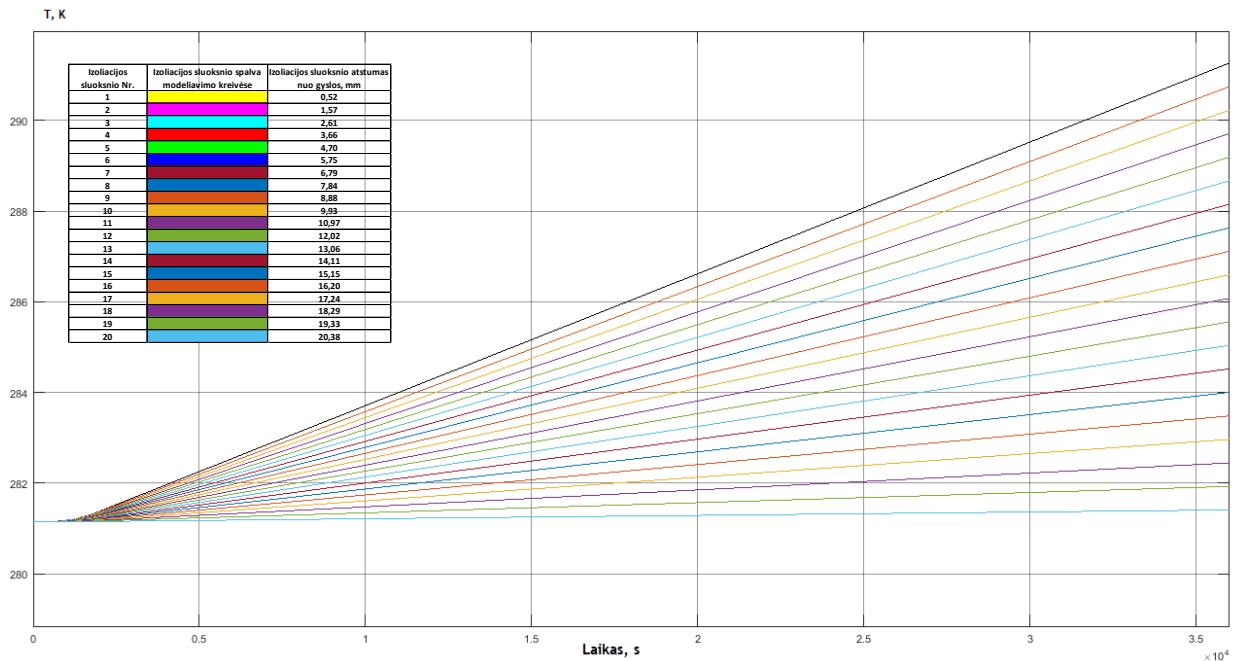
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.



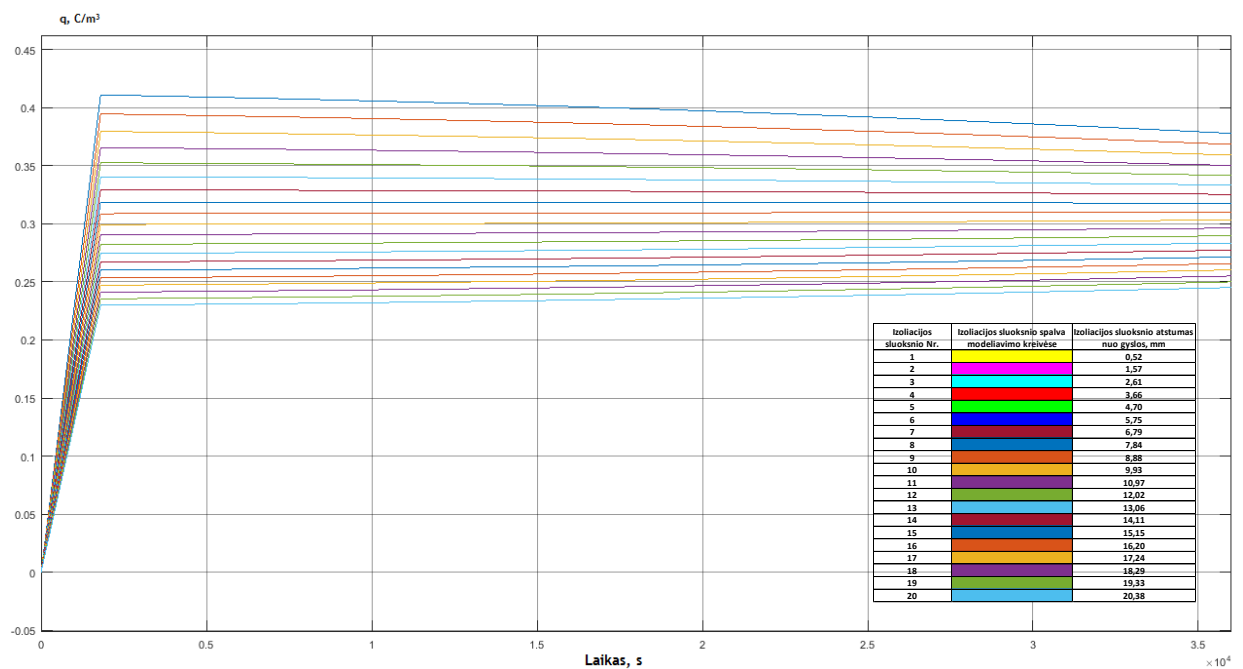
Pav. 2.11. Įtamos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.12. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.13. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.14. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.

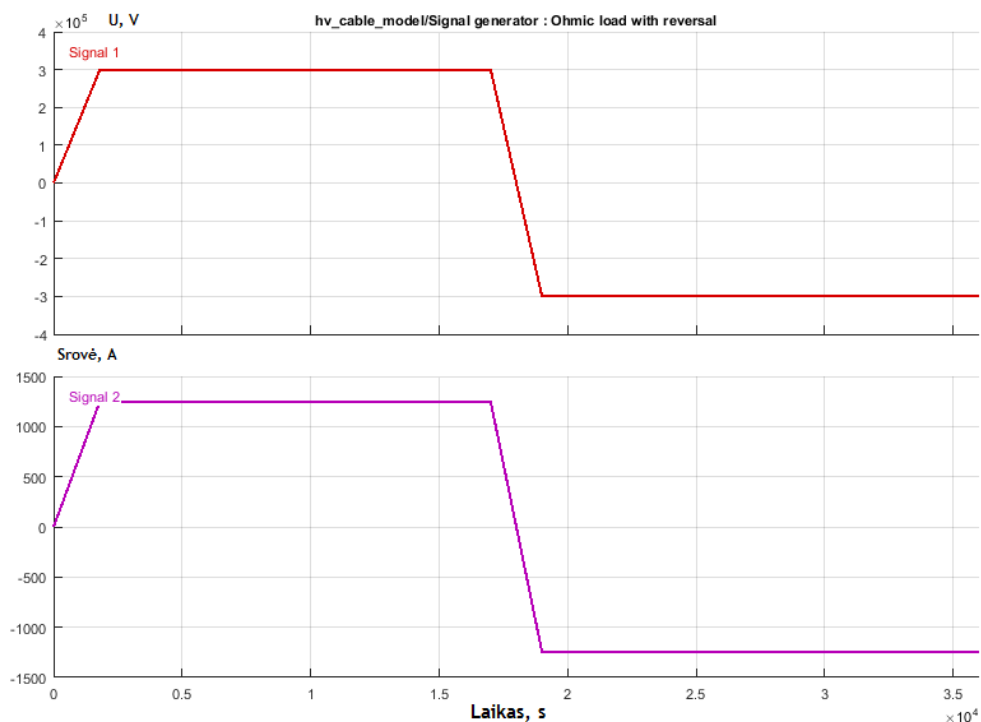
Lentelė 4. 1 modeliavimo parametru suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2297
	Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4104
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,57	281,4	0,2451
	Vidinis sluoksnis	17,83	291,3	0,3778

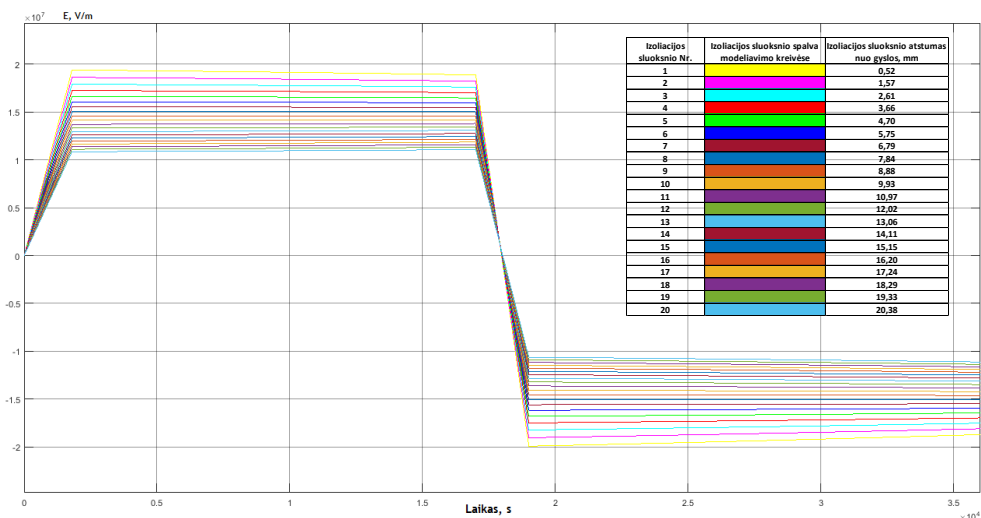
2.3.2 Poliarumo keitimas perduodant galią

Pagrindiniai režimo parametrai:

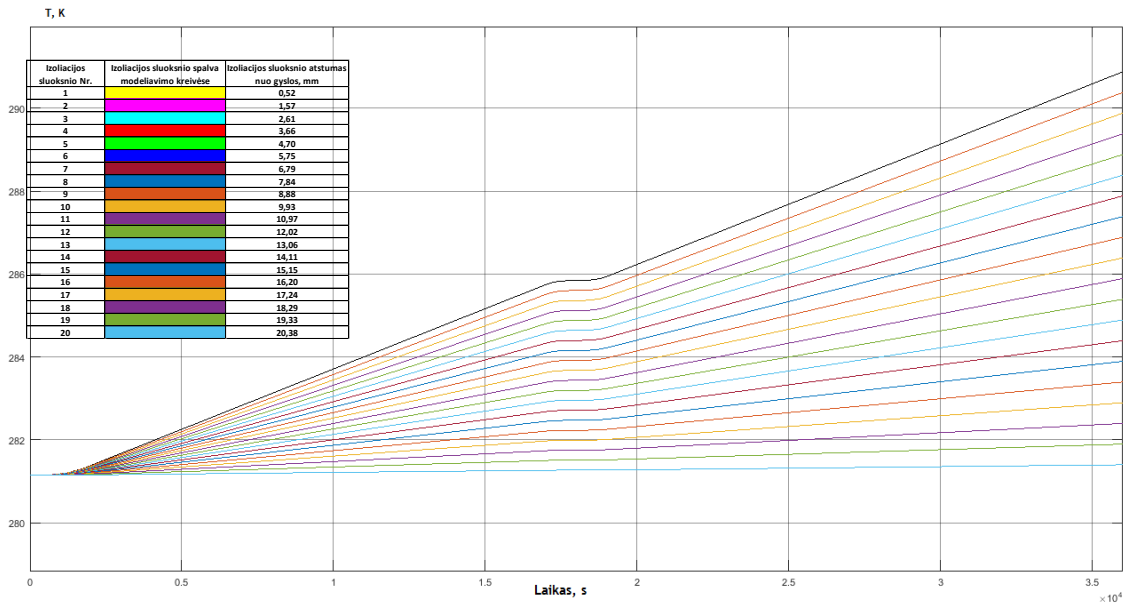
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę
- Teigiamo poliarumo normalaus darbo trukmė – 15200 s;
- Iškvovimo trukmė – 1000 s;
- Neigiamo poliarumo įkrovimo trukmė – 1000 s;
- Normalaus neigiamo poliarumo darbo trukmė – 17000 s.
- Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių



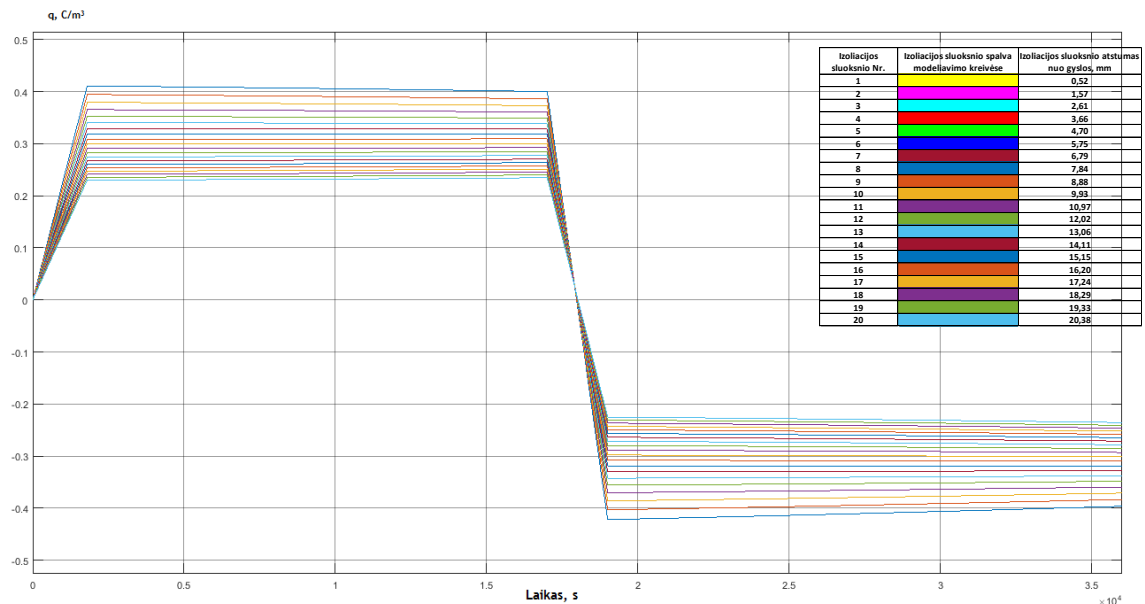
Pav. 2.15. Įtampos ir srovės signalai. Poliarumo pakeitimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.16. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Poliarumo pakeitimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.17. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Poliarumo pakeitimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.18. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Poliarumo pakeitimo perduodant energiją darbo režimas.

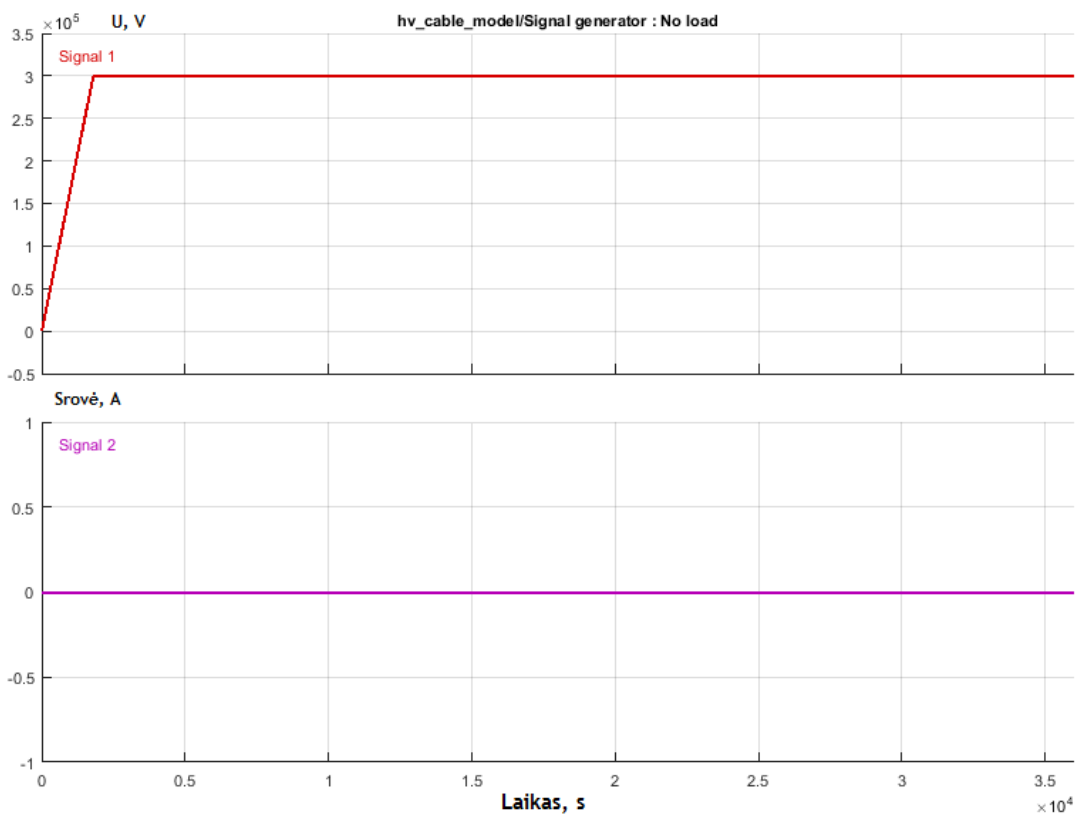
Lentelė 5. 2 modeliavimo parametrų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
	Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4109
Prieš poliarumo pakeitimą	Išorinis sluoksnis	11,08	281,3	0,2347
	Vidinis sluoksnis	18,89	285,7	0,4
Po poliarumo pakeitimo	Išorinis sluoksnis	-10,63	281,3	-0,2251
	Vidinis sluoksnis	-19,92	285,9	-0,422
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	-11,12	281,4	-0,2356
	Vidinis sluoksnis	-18,71	290,9	-0,3964

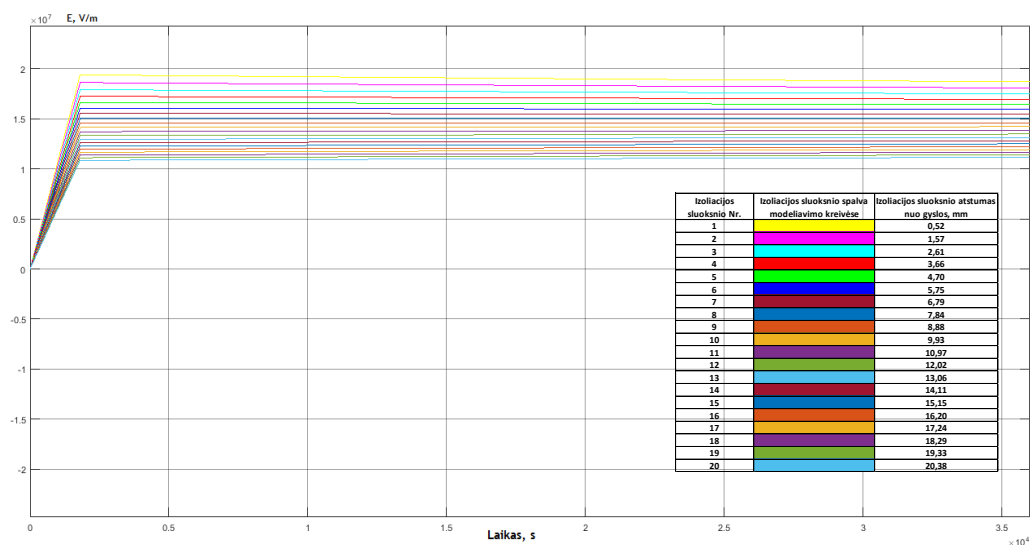
2.3.3 Kabelio įkrovimas be galios perdavimo

Pagrindiniai režimo parametrai:

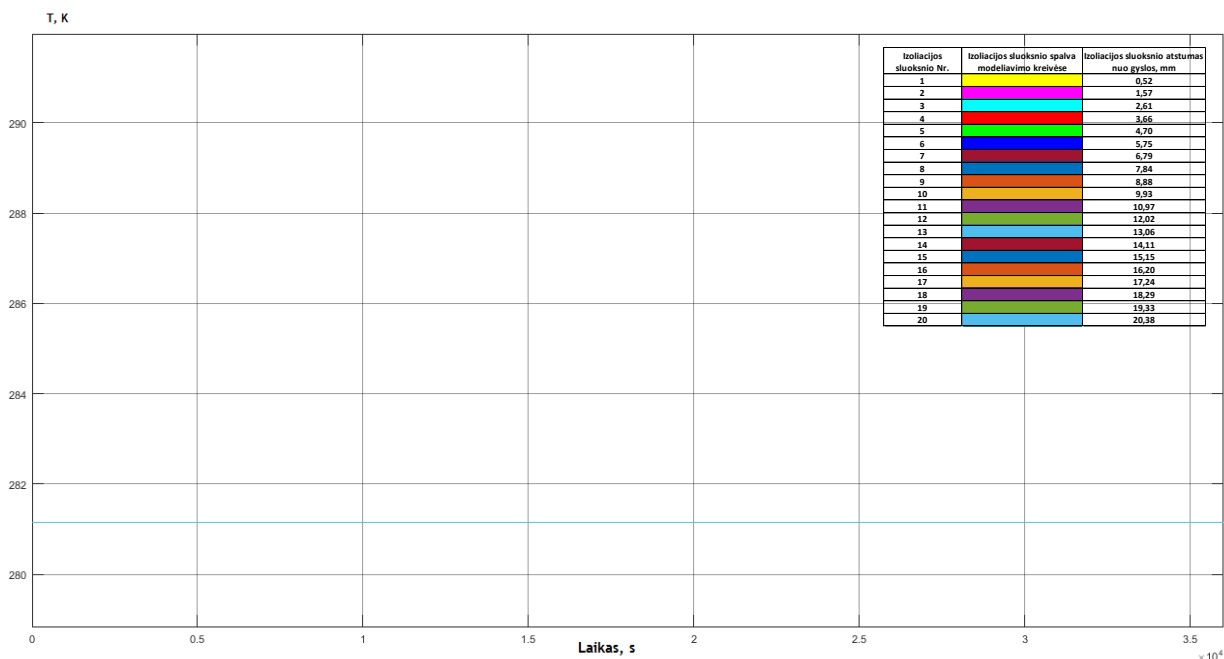
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą;
- Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- Įtampa keliama iki vardinės;
- Srovės vertė nekinta – 0 A.



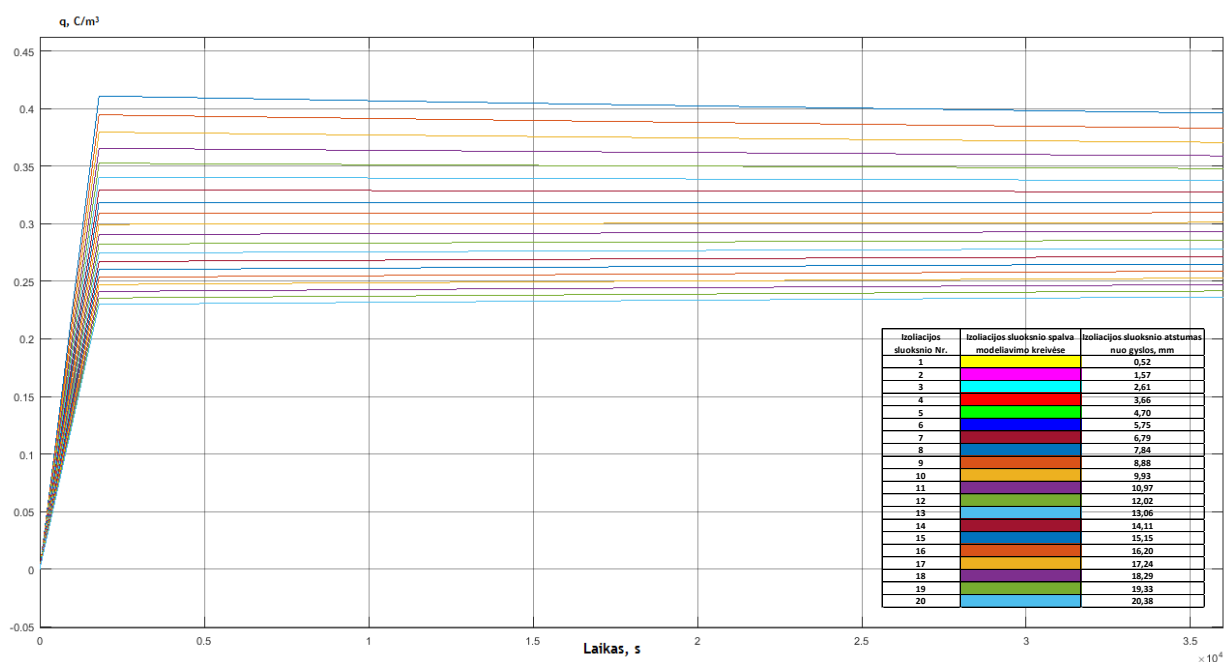
Pav. 2.19. Įtamos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo darbo režimas.



Pav. 2.20. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo darbo režimas.



Pav. 2.21. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo darbo režimas.



Pav. 2.22. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo be energijos perdavimo darbo režimas.

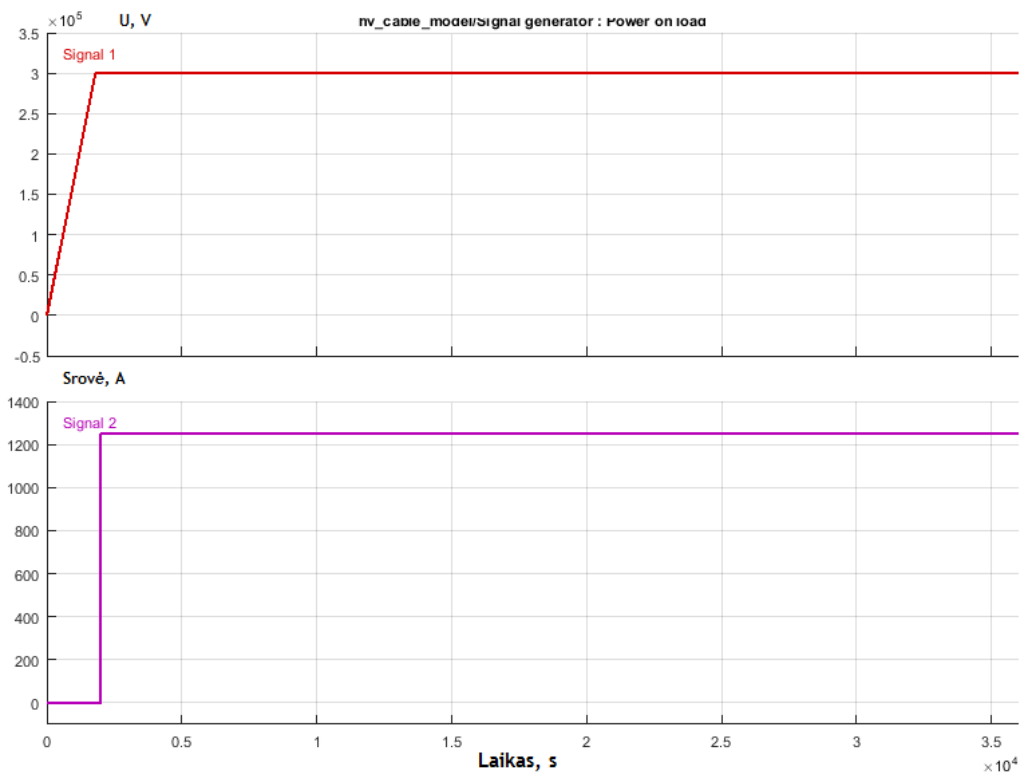
Lentelė 6. 3 modeliavimo parametų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m ³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,1	0,23
	Vidinis sluoksnis	19,4		0,4108
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,16		0,2364
	Vidinis sluoksnis	18,7		0,396

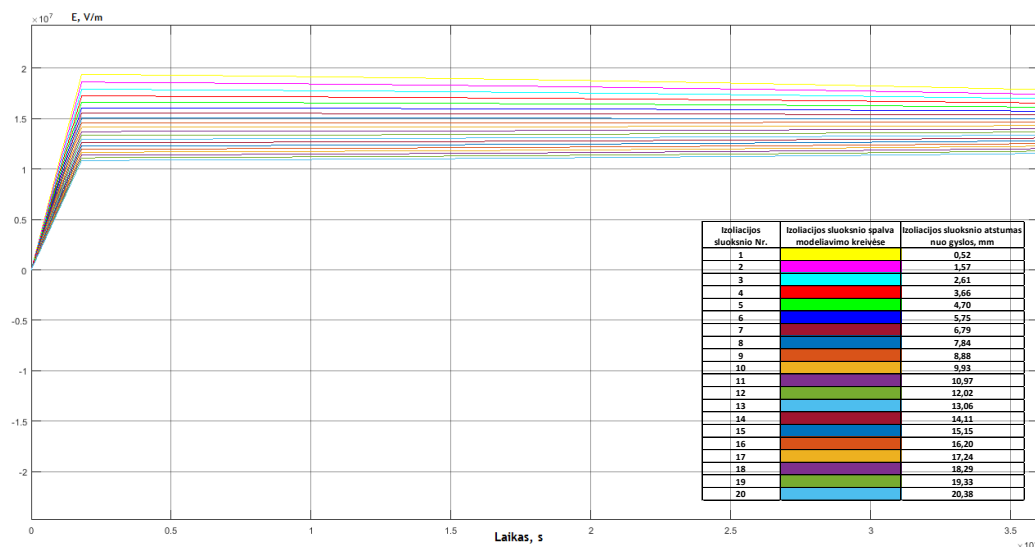
2.3.4 Apkrovos įjungimas įkrautam kabeliui (normalus darbo režimas)

Pagrindiniai režimo parametrai:

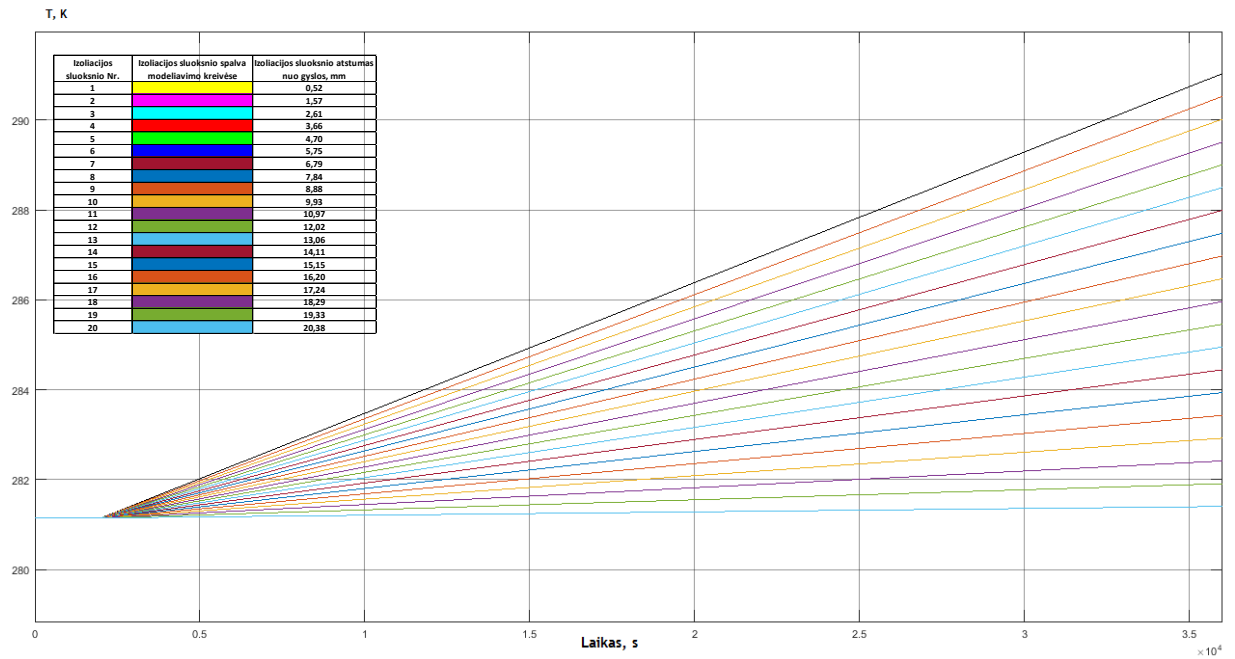
- Įkrovimo be apkrovos trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą;
- Apkrovos paleidimas – iškart po įkrovimo 1800 s nuo modeliavimo pradžios;
- Modeliavimo trukmė – 10 val.
- Įtampos ir srovės vertės keliamos iki vardinių.



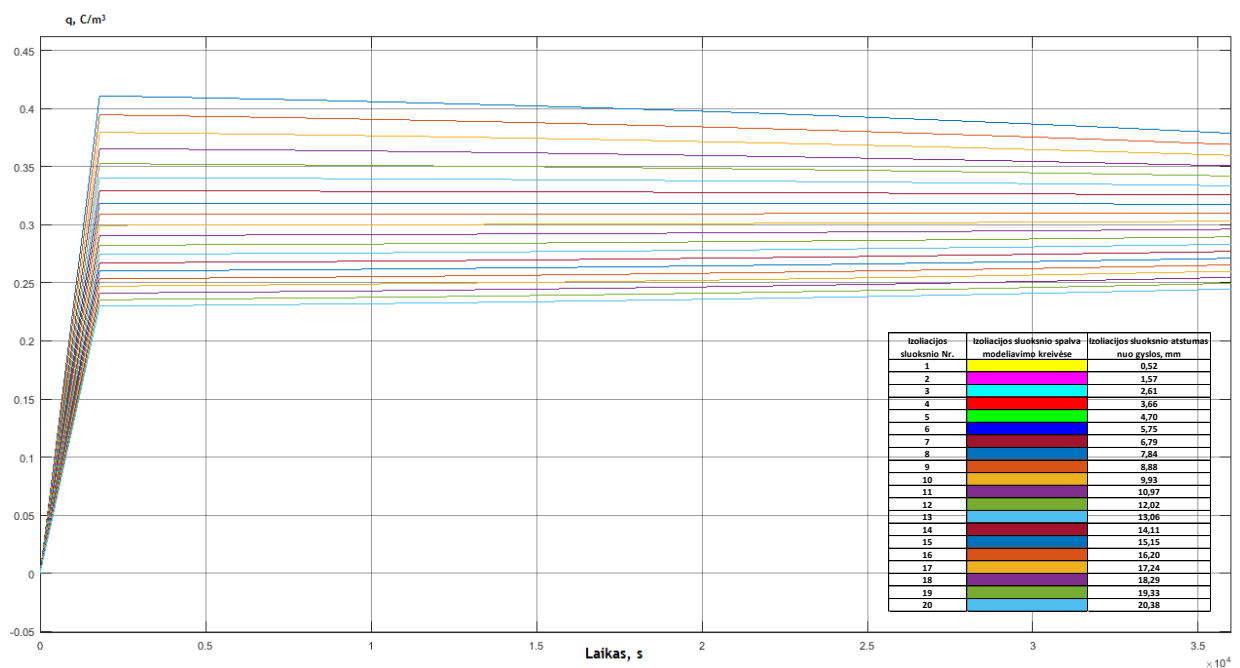
Pav. 2.23. Įtampos ir srovės signalai. Apkrovos įjungimo įkrautam kabeliui darbo režimas.



Pav. 2.24. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Apkrovos įjungimo įkrautam kabeliui darbo režimas.



Pav. 2.25. Temperatūros vērtēs izolācijas slūksņiuose. Apkrovas iĵungimo ģkraudam kabeliui darbo režimas.



Pav. 2.26. Erdvinio krūvio vērtēs izolācijas slūksņiuose. Apkrovas iĵungimo ģkraudam kabeliui darbo režimas.

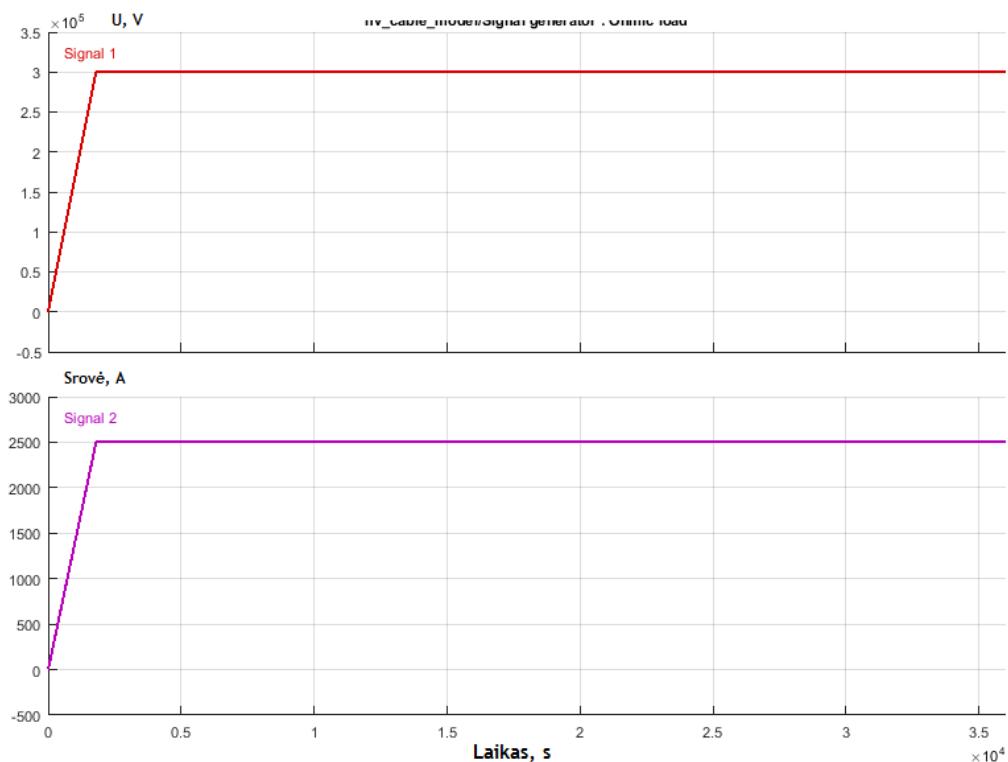
Lentelē 7. 4 modeliavimo parametru suvestinē.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m³
Po ģkrovimo	Išorinis slūksnis	10,86	281,1	0,23
	Vidinis slūksnis	19,4	281,1	0,4108
Nusistovēĵes	Išorinis slūksnis	11,55	281,4	0,2447
	Vidinis slūksnis	17,88	291	0,3786

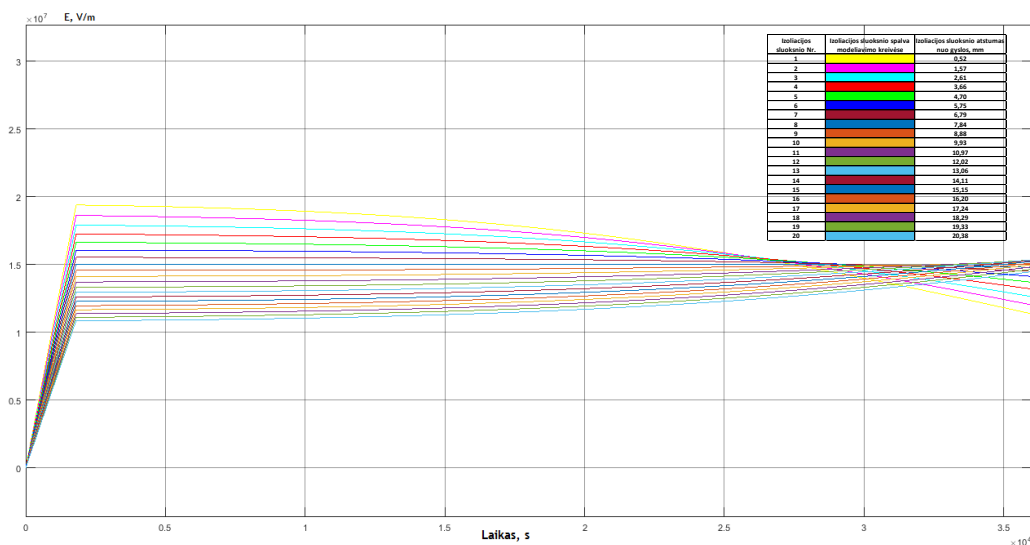
2.3.5 Kabelio įrovimas perduodant padidintą srovę

Pagrindiniai režimo parametrai:

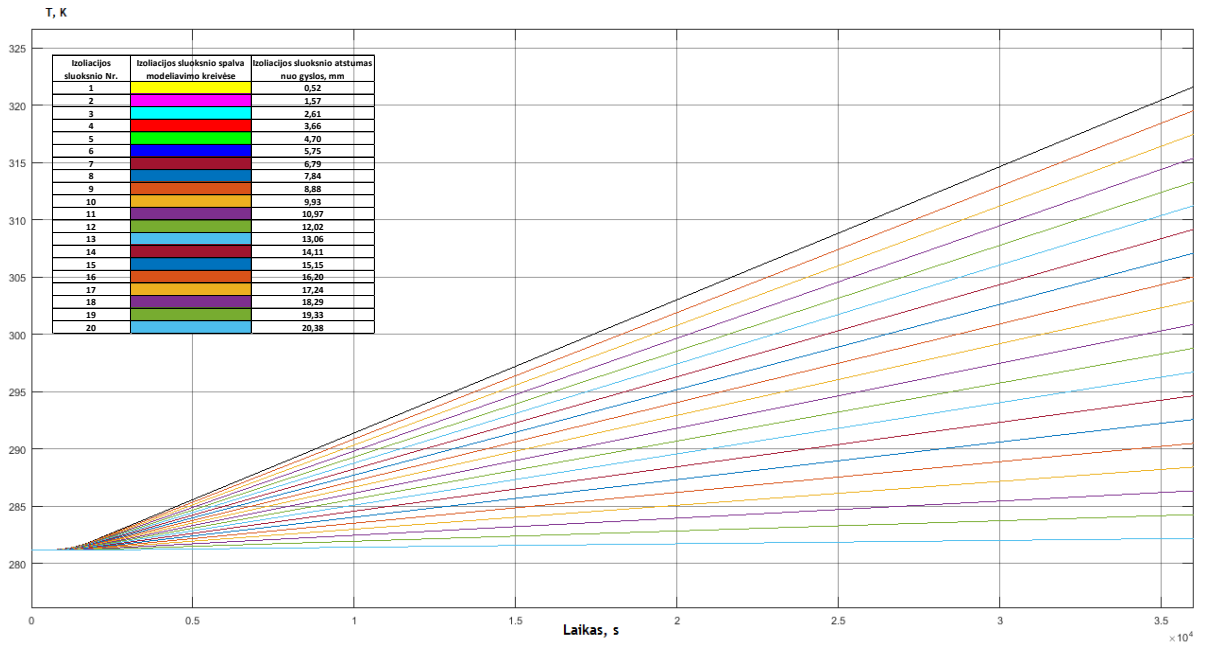
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė 10 val.;
- Įtampa keliami iki vardinės;
- Srovė keliami iki 100% didesnės nei vardinė.



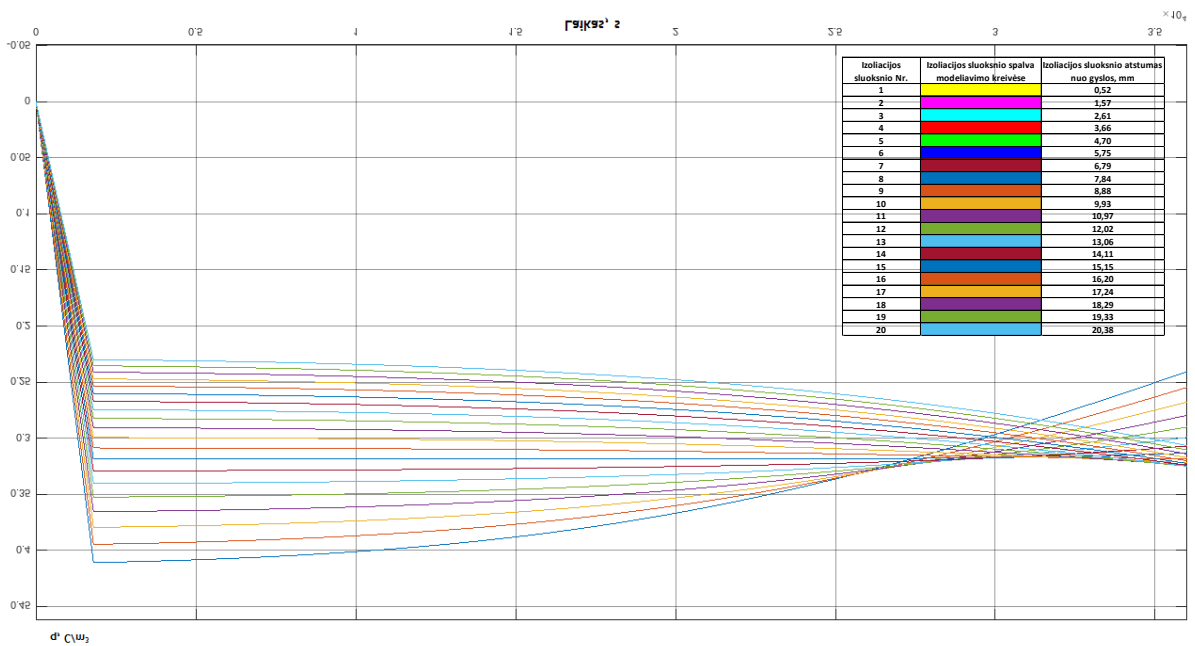
Pav. 2.27. Įtampos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą srovę darbo režimas.



Pav. 2.28. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą srovę darbo režimas.



Pav. 2.29. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą srovę darbo režimas.



Pav. 2.30. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą srovę darbo režimas.

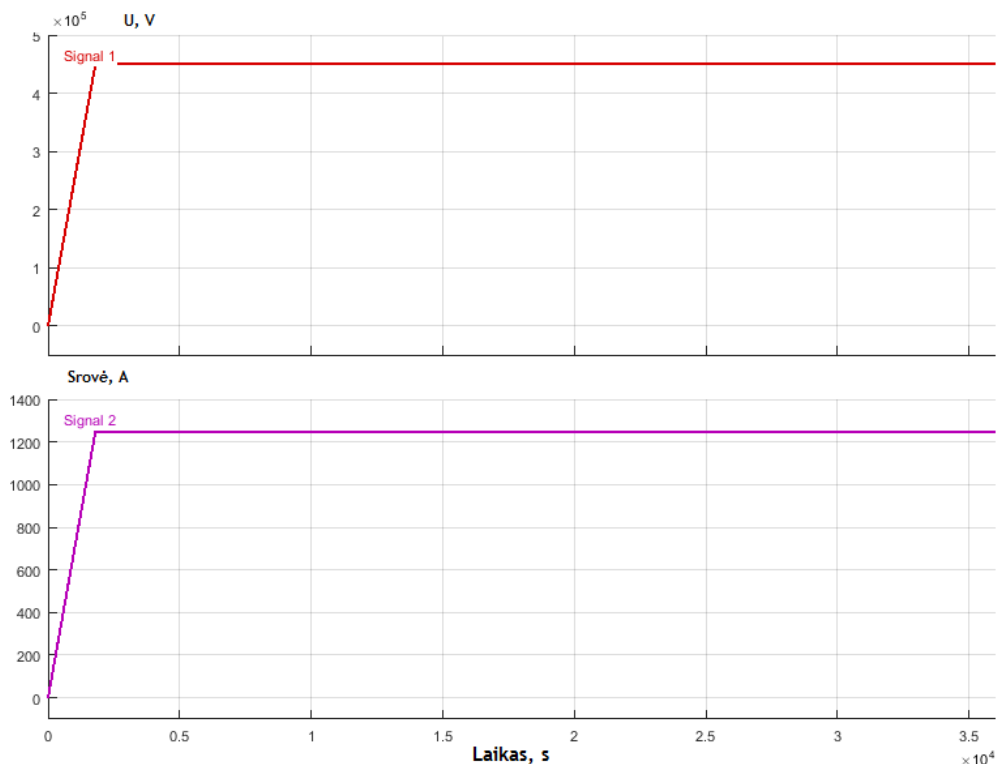
Lentelė 8. 5 modeliavimo parametrų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m ³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
	12 sluoksnis	13,33	281,5	0,2823
	Vidinis sluoksnis	19,4	281,9	0,4109
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	14,47	282,2	0,3066
	12 sluoksnis	15,34	298,8	0,3249
	Vidinis sluoksnis	11,36	321,6	0,2406

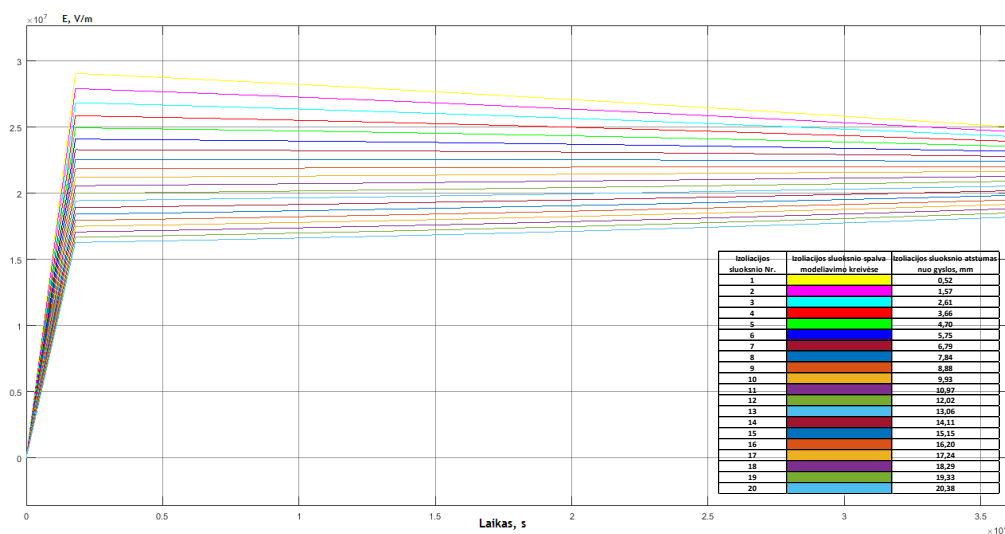
2.3.6 Kabelio įkrovimas perduodant padidintą įtampą

Pagrindiniai režimo parametrai:

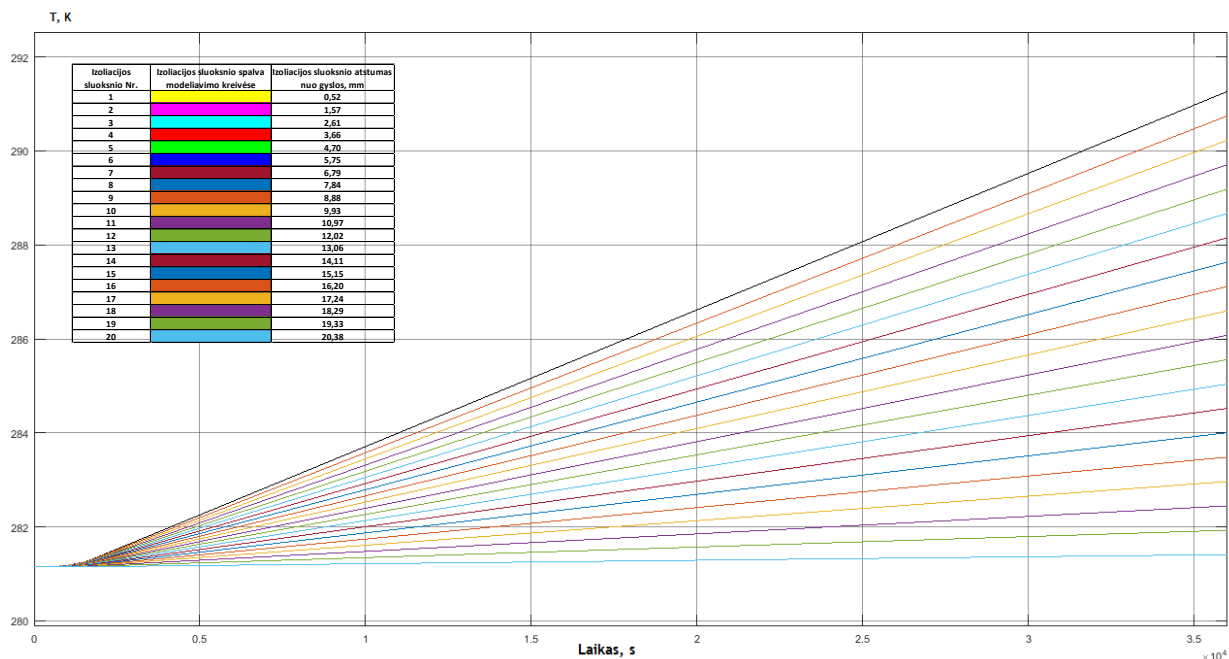
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė 10 val.;
- Srovė keliami iki vardinės;
- Įtampa keliami iki 50% didesnės nei vardinė.



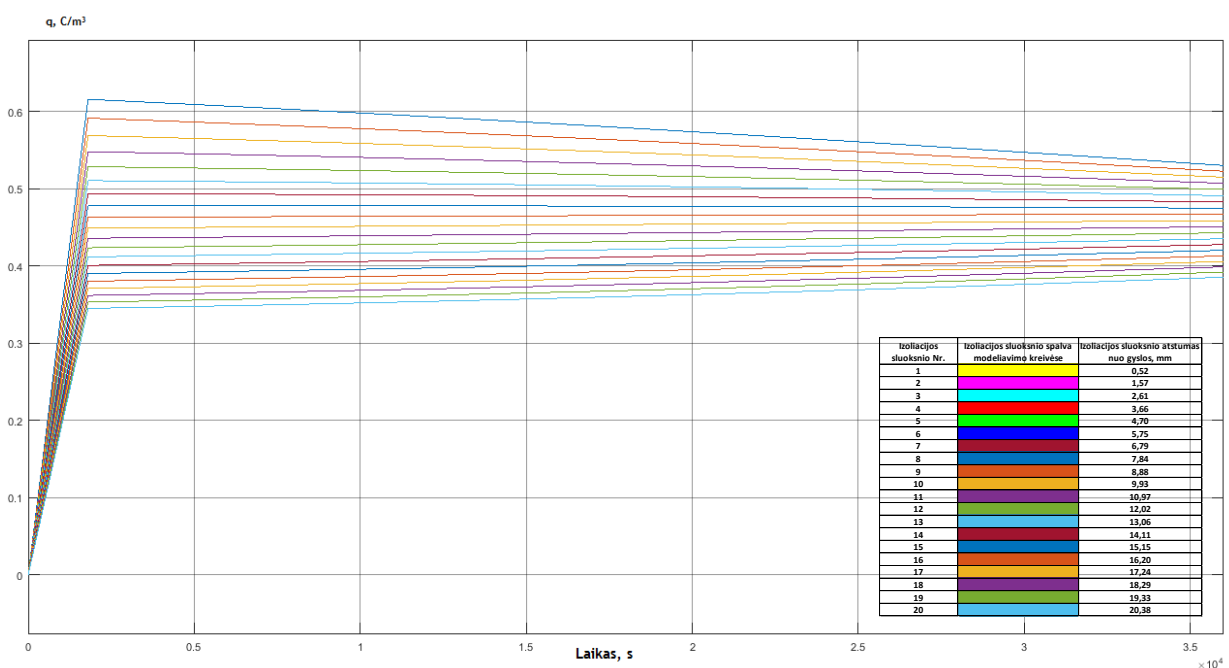
Pav. 2.31. Įtampos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą įtampą darbo režimas.



Pav. 2.32. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą įtampą darbo režimas.



Pav. 2.33. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą įtampą darbo režimas.



Pav. 2.34. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant padidintą įtampą darbo režimas.

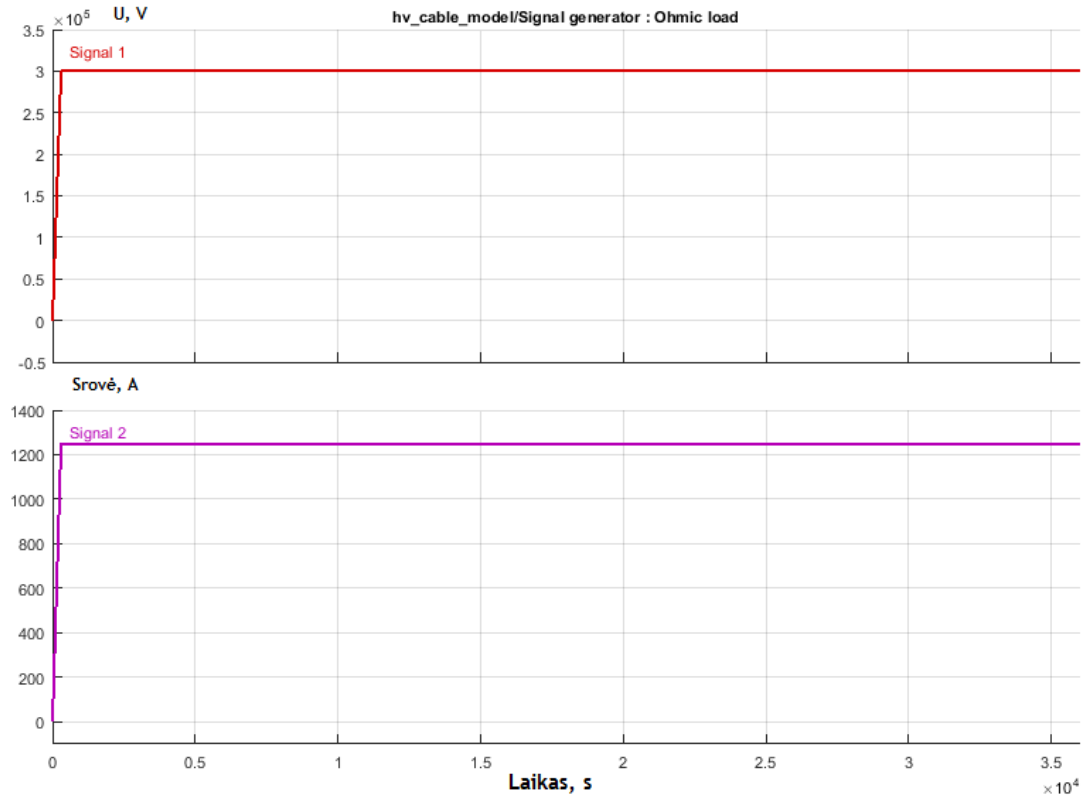
Lentelė 9. 6 modeliavimo parametrų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	16,29	281,2	0,3451
	Vidinis sluoksnis	29,07	281,3	0,6158
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	18,21	281,4	0,3855
	Vidinis sluoksnis	25,03	291,3	0,5302

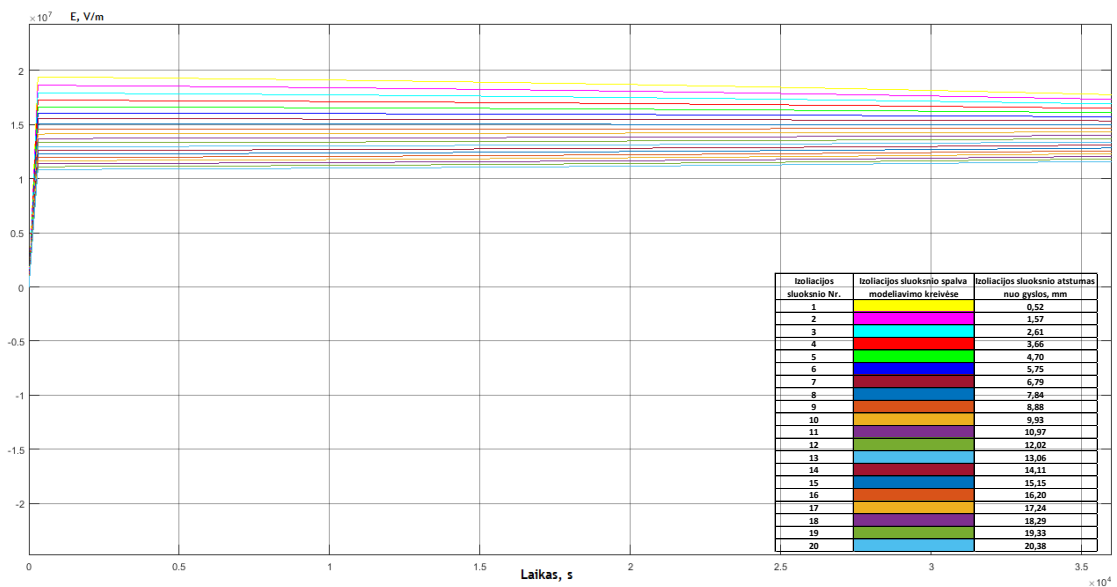
2.3.7 Pagreitintas įkrovimas

Pagrindiniai režimo parametrai:

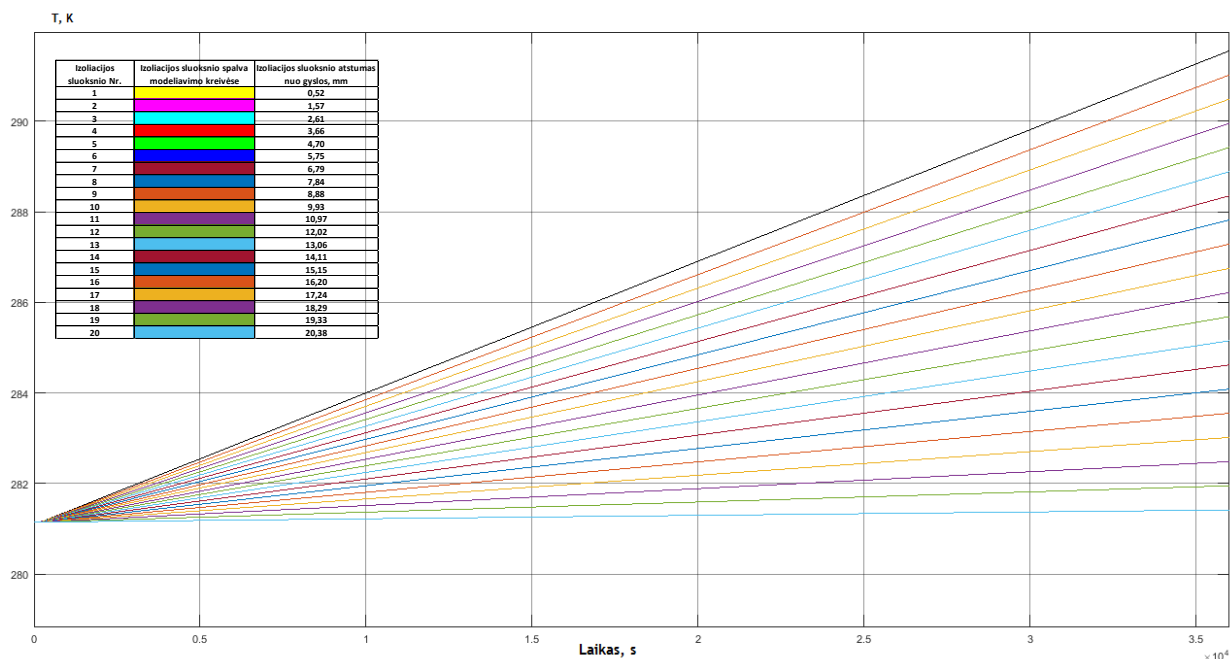
- Įkrovimo trukmė – 300 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.



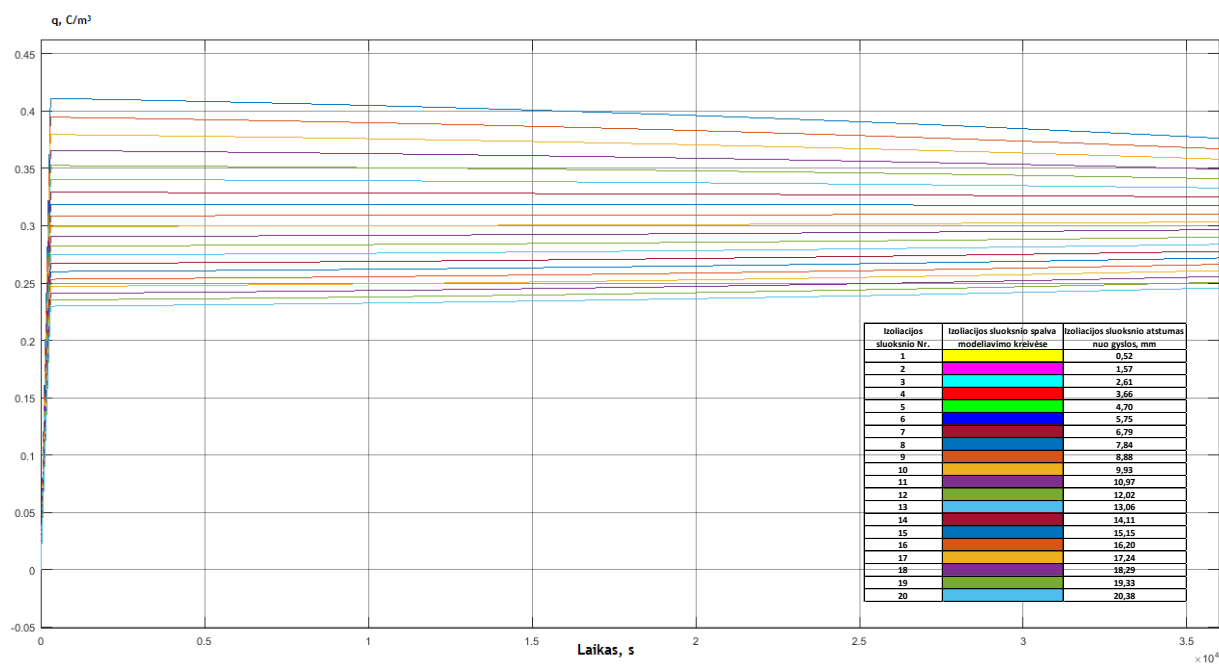
Pav. 2.35. Įtampos ir srovės signalai. Pagreitinto įkrovimo darbo režimas.



Pav. 2.36. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Pagreitinto įkrovimo darbo režimas.



Pav. 2.37. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Pagreitinto įkrovimo darbo režimas.



Pav. 2.38. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Pagreitinto įkrovimo darbo režimas.

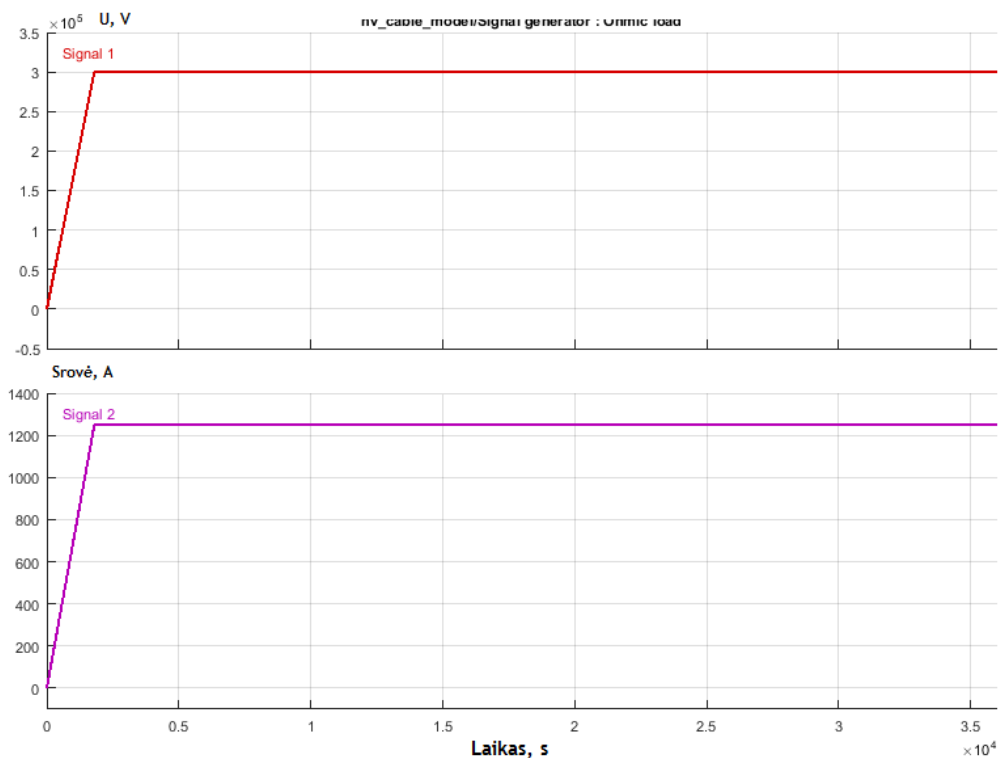
Lentelė 10. 7 modeliavimo parametrų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,85	281,2	0,2299
	Vidinis sluoksnis	19,41	281,2	0,4111
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,61	281,4	0,2458
	Vidinis sluoksnis	17,76	291,6	0,3763

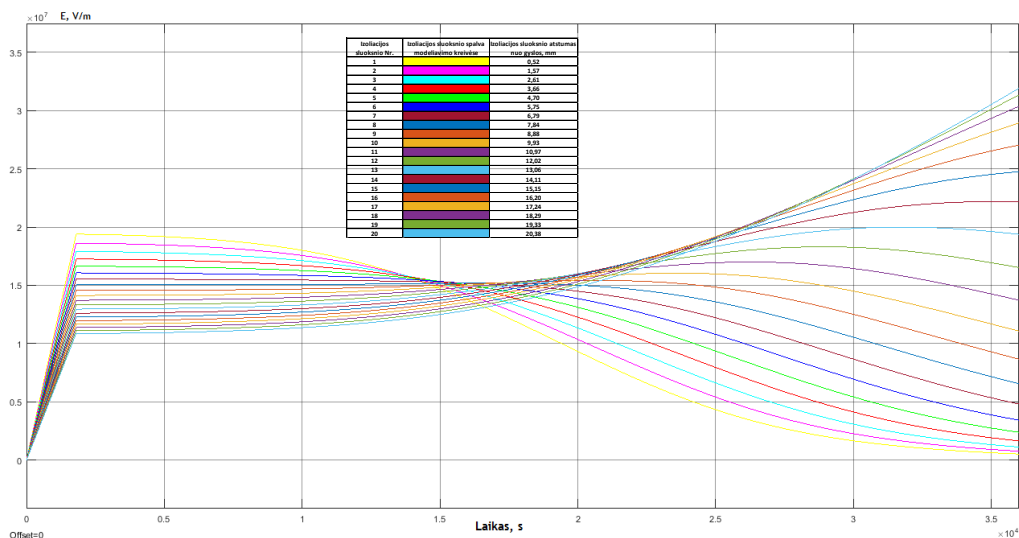
2.3.8 Kabelio įkrovimas perduodant galią esant prastesnėms aušinimo sąlygoms

Pagrindiniai režimo parametrai:

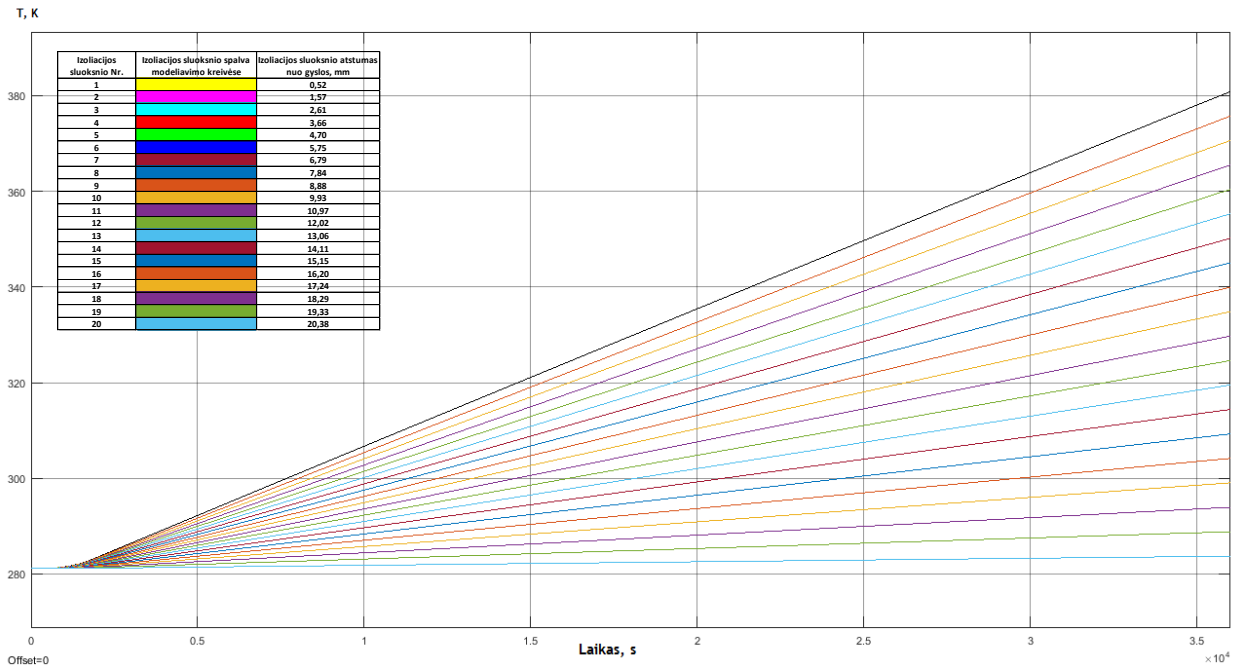
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių;
- Kabelio izoliacijos masė – 10 kartų mažesnė nei pirmajame režime.



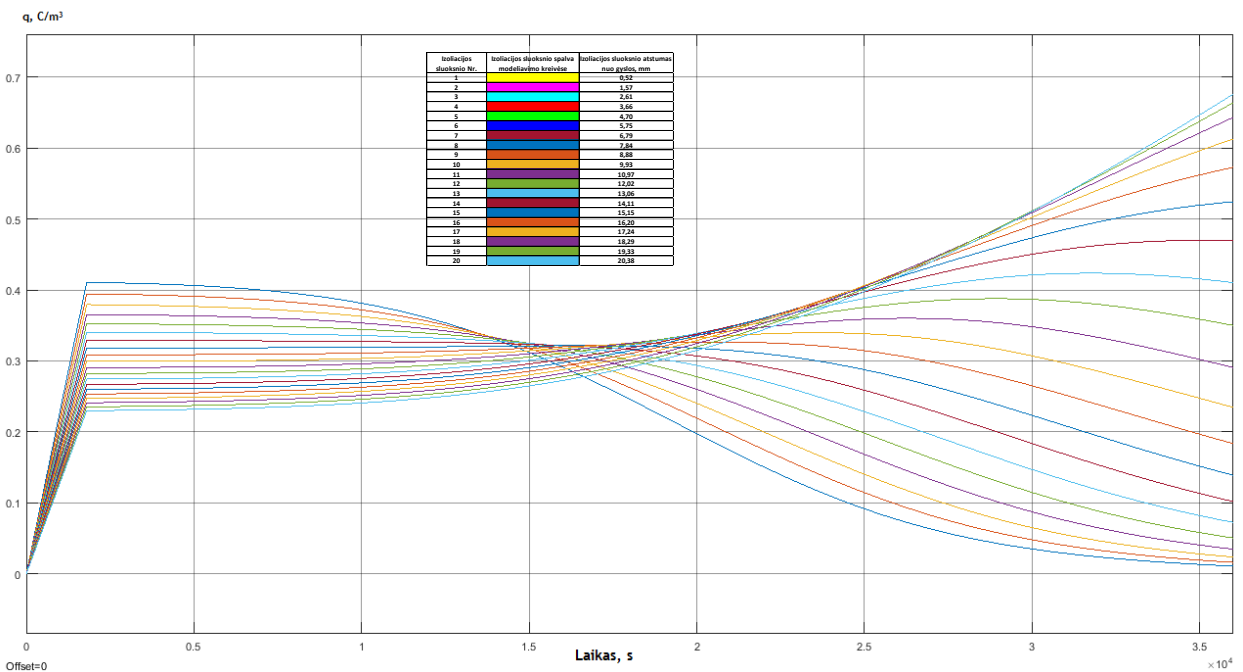
Pav. 2.39. Įtampos ir srovės signalai. Kabelio įkrovimo perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms darbo režimas.



Pav. 2.40. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms darbo režimas.



Pav. 2.41. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms darbo režimas.



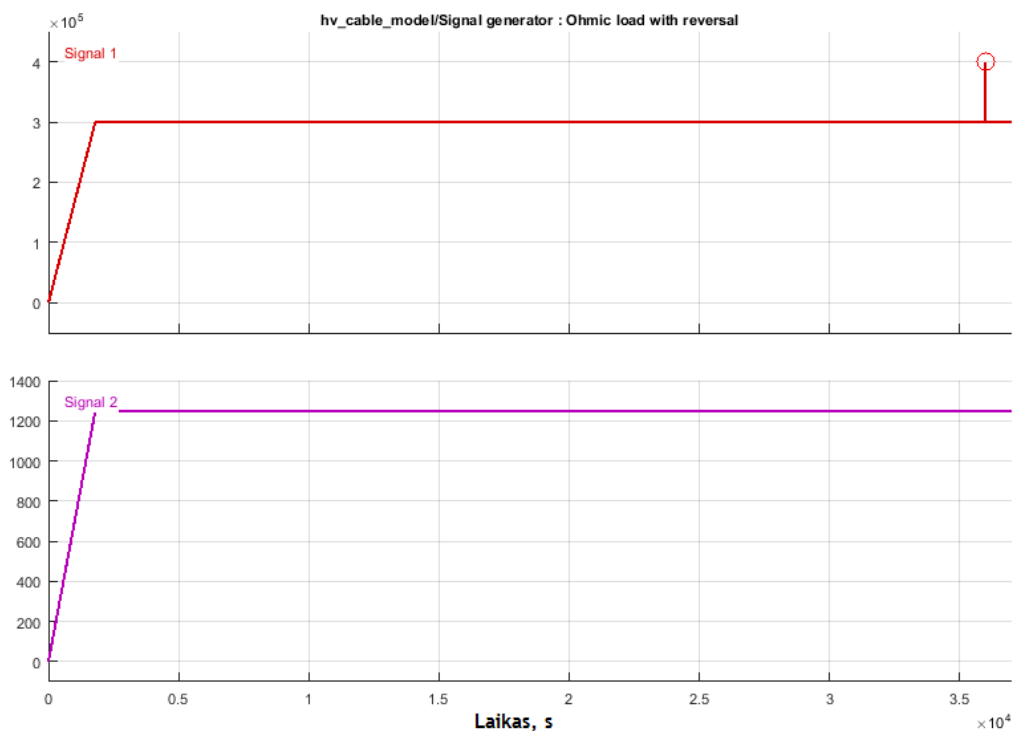
Pav. 2.42. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Kabelio įkrovimo perduodant energiją esant prastoms aušinimo sąlygoms darbo režimas.

Lentelė 11. 8 modeliavimo parametų suvestinė.

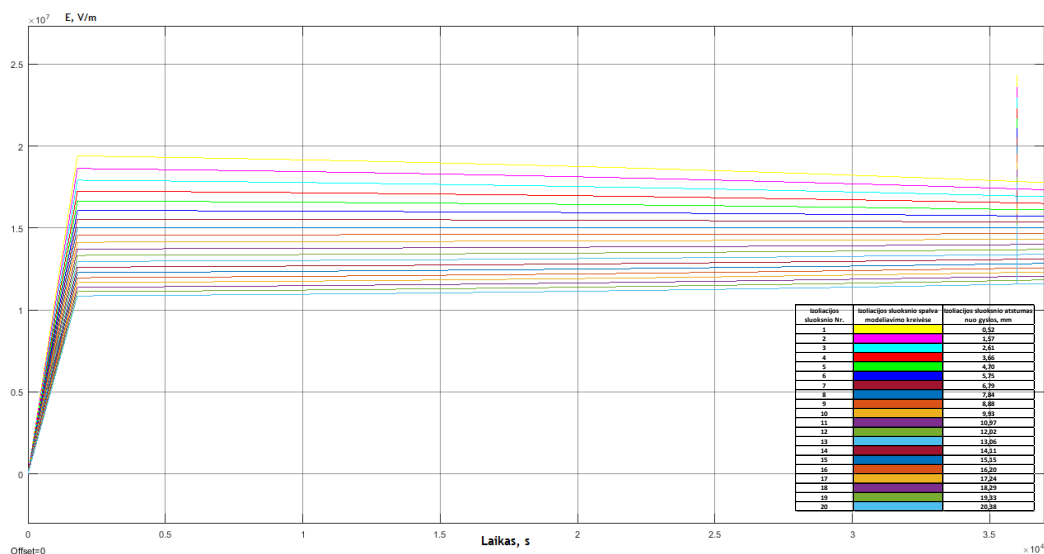
Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m ³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,23
	Vidinis sluoksnis	19,39	283	0,4108
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	31,91	283,7	0,6759
	Vidinis sluoksnis	5,189	380,9	0,1099

2.3.9 Teigiamo poliarumo viršįtampis kabelį kraunant, perduodant energiją

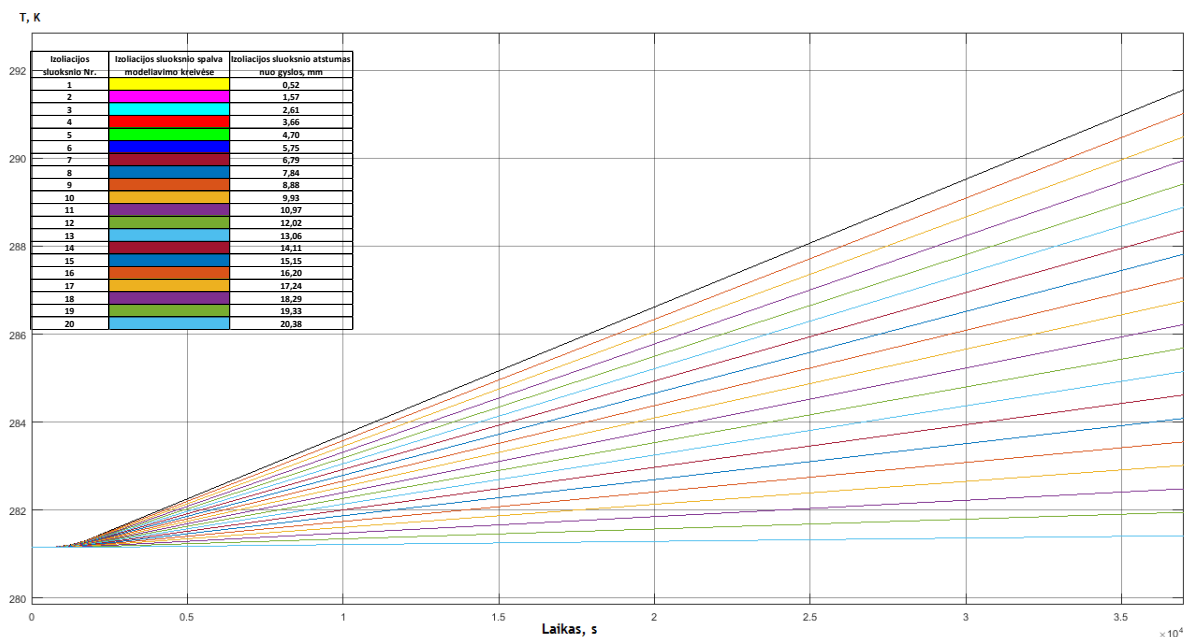
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė – 37000 s;
- Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.
- Viršįtampio dydis – + 100 kV;
- Viršįtampio laikas – 36000 s nuo modeliavimo pradžios.



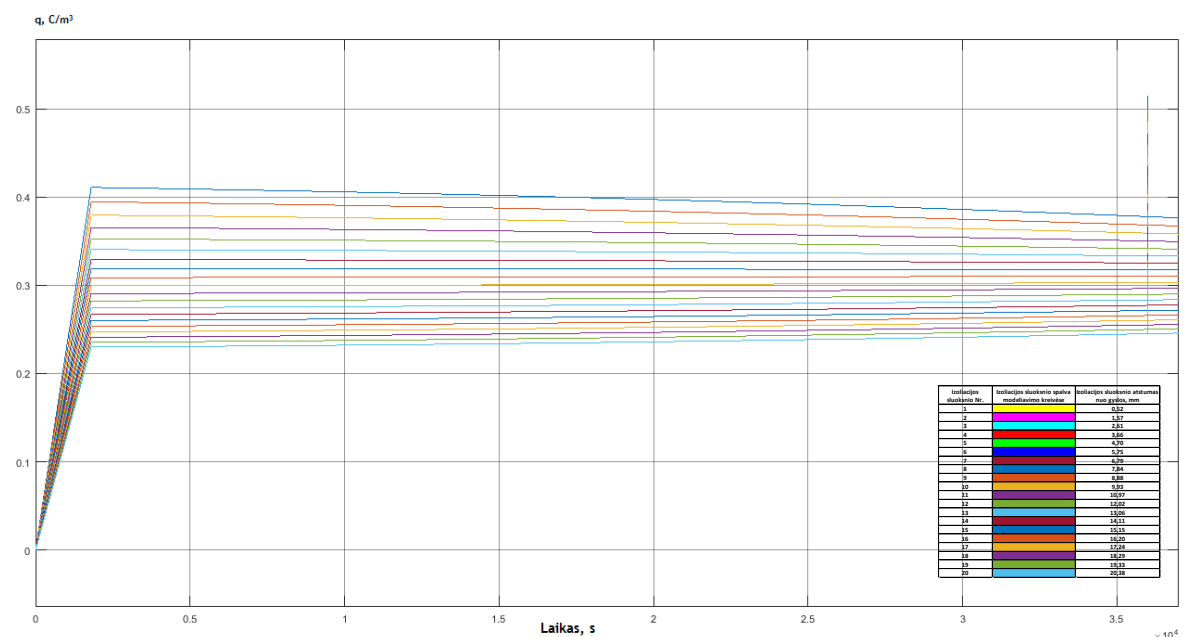
Pav. 2.43. Įtamos ir srovės signalai. Teigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.44. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Teigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.45. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Teigiamo poliarumo viršštampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.46. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Teigiamo poliarumo viršštampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.

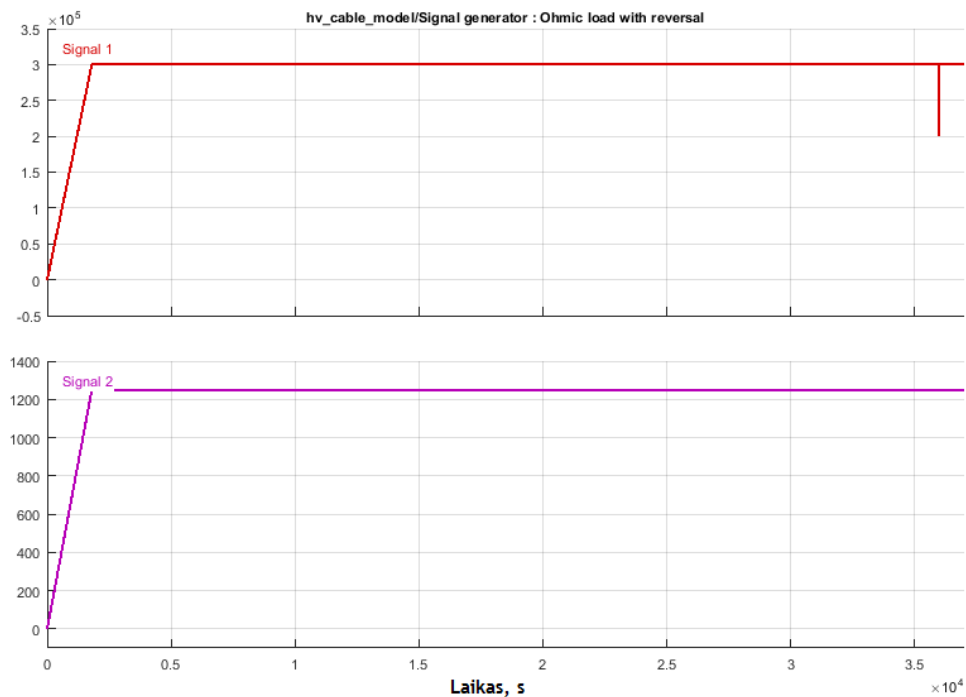
Lentelė 12. 9 modeliavimo parametų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m ³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
	Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4109
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,57	281,4	0,2451
	Vidinis sluoksnis	17,84	291,3	0,3778
Viršštampio metu	Išorinis sluoksnis	15,18	281,4	0,3216
	Vidinis sluoksnis	24,29	291,3	0,5145

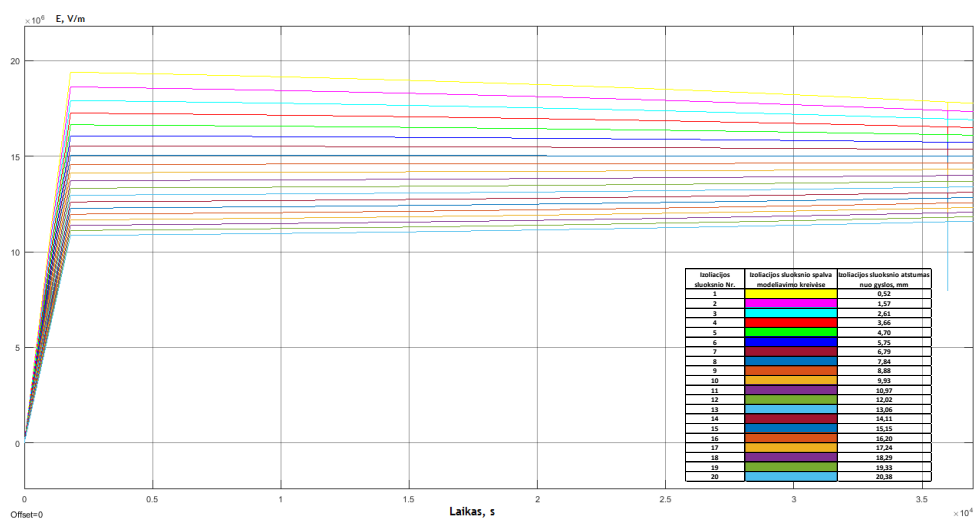
2.3.10 Neigiamo poliarumo viršįtampis kabelį kraunant, perduodant energiją

Pagrindiniai režimo parametrai:

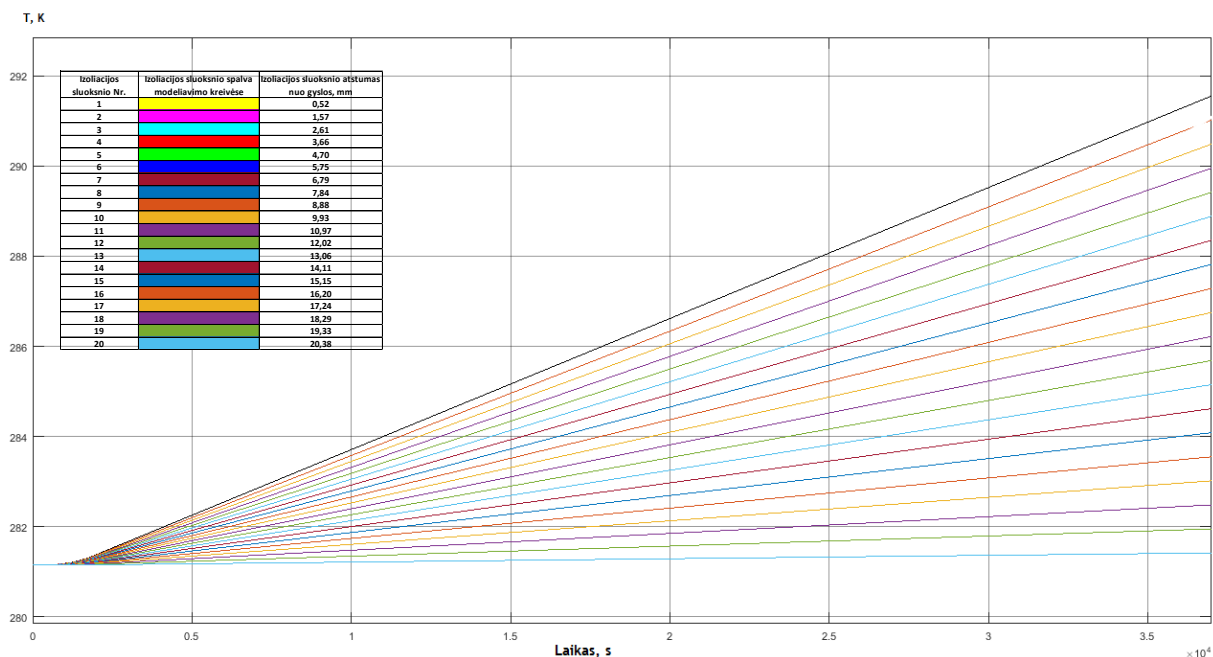
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė – 37000 s;
- Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.
- Viršįtampio dydis – – 100 kV;
- Viršįtampio laikas – 36000 s nuo modeliavimo pradžios.



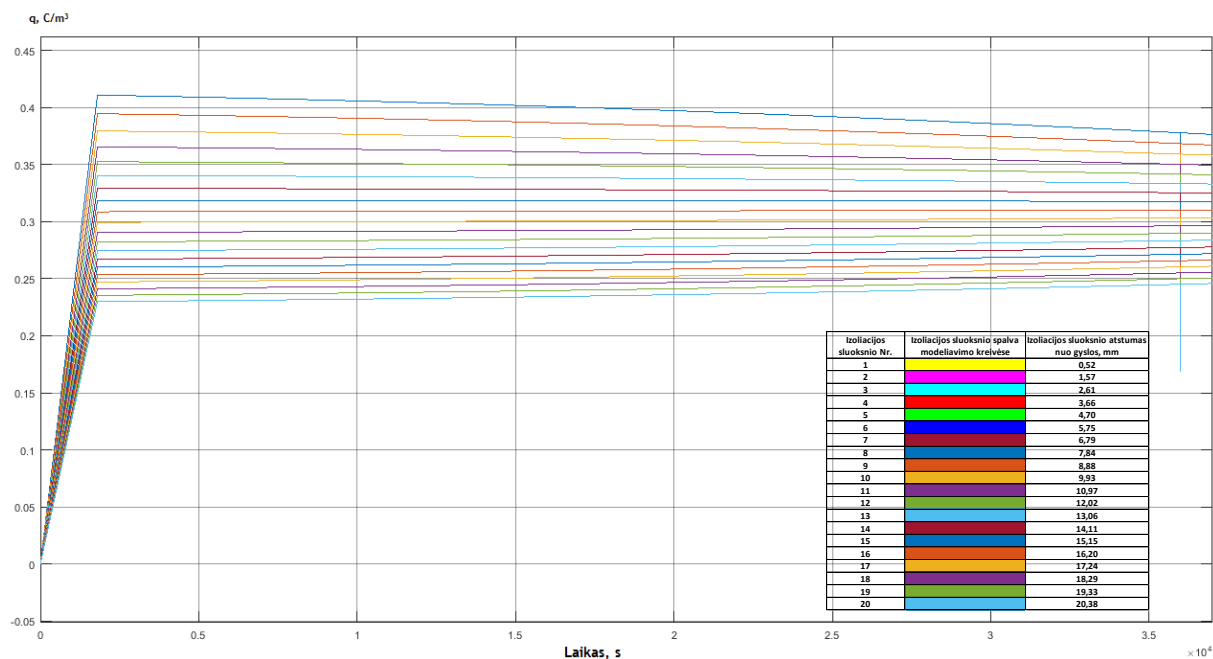
Pav. 2.47. Įtampos ir srovės signalai. Neigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.48. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.49. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.50. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliarumo viršįtampio įkraunant kabelį perduodant energiją darbo režimas.

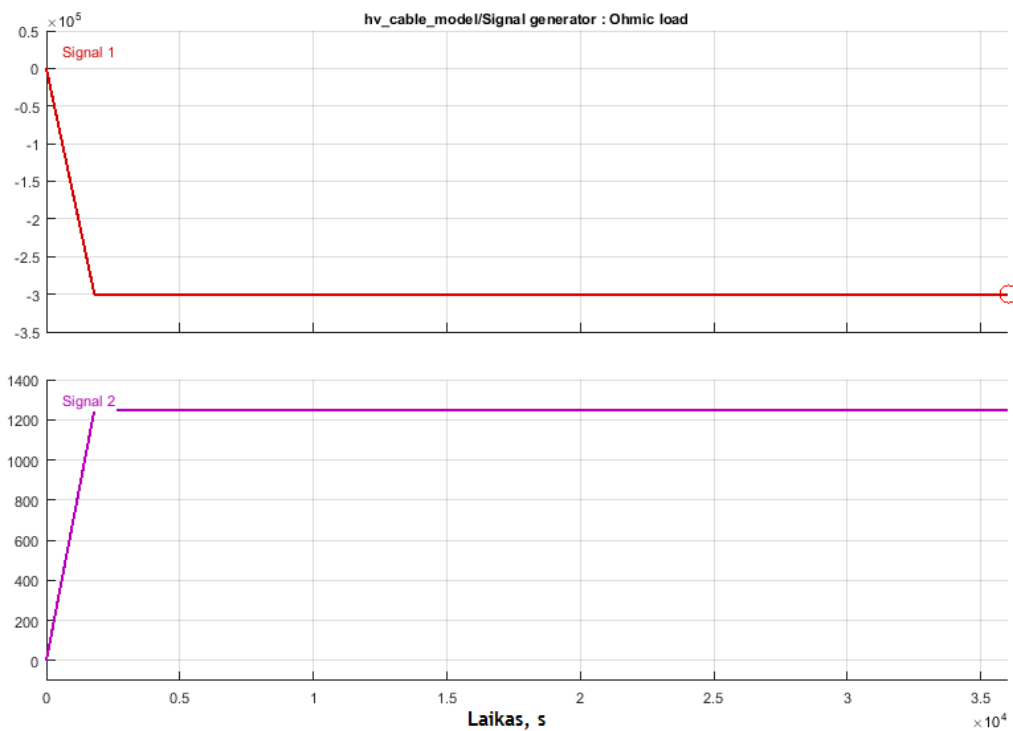
Lentelė 13. 10 modeliavimo parametų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m ³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
	Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4109
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,57	281,4	0,2451
	Vidinis sluoksnis	17,84	291,3	0,3778
Viršįtampio metu	Išorinis sluoksnis	7,962	281,4	0,1687
	Vidinis sluoksnis	11,38	291,3	0,241

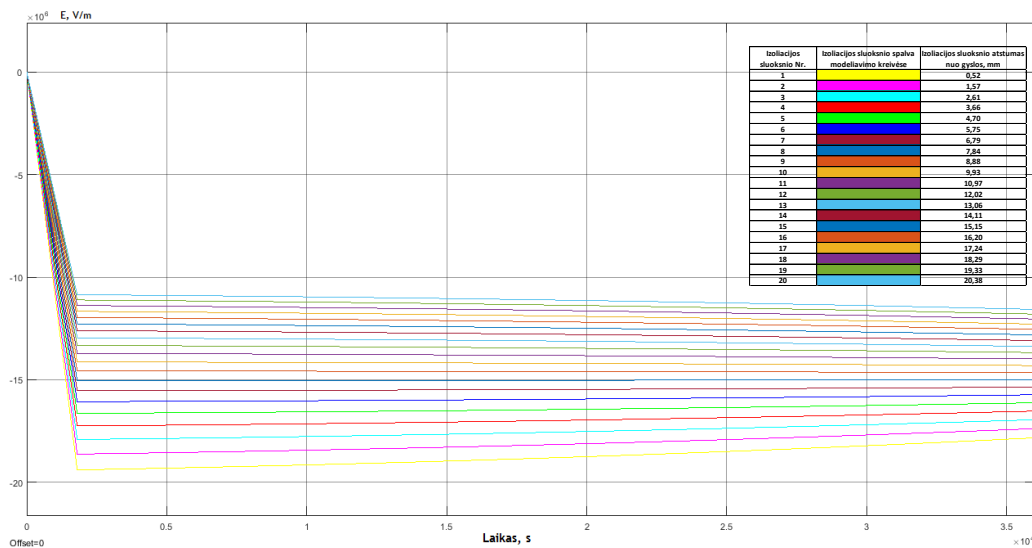
2.3.11 Neigiamo poliaus kabelio krovimas perduodant energiją

Pagrindiniai modeliavimo parametrai:

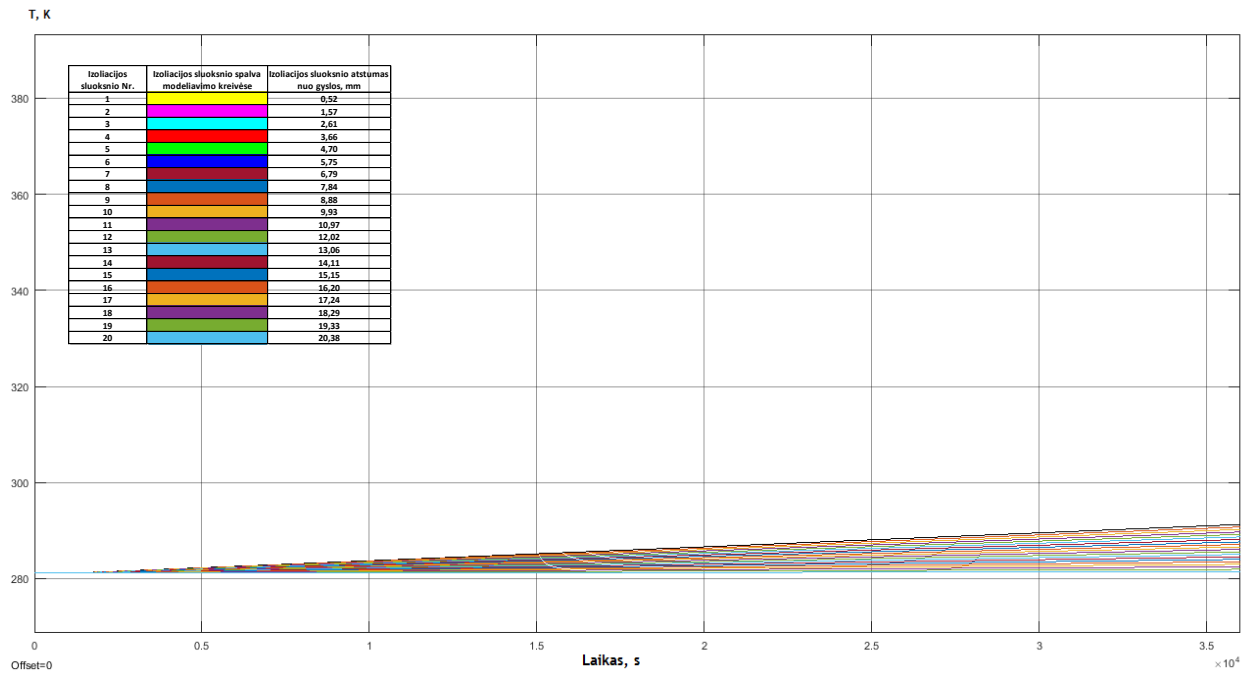
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- Įtampa keliami iki vardinės neigiamo poliarumo reikšmės – – 300 kV;
- Srovė keliami iki vardinės;



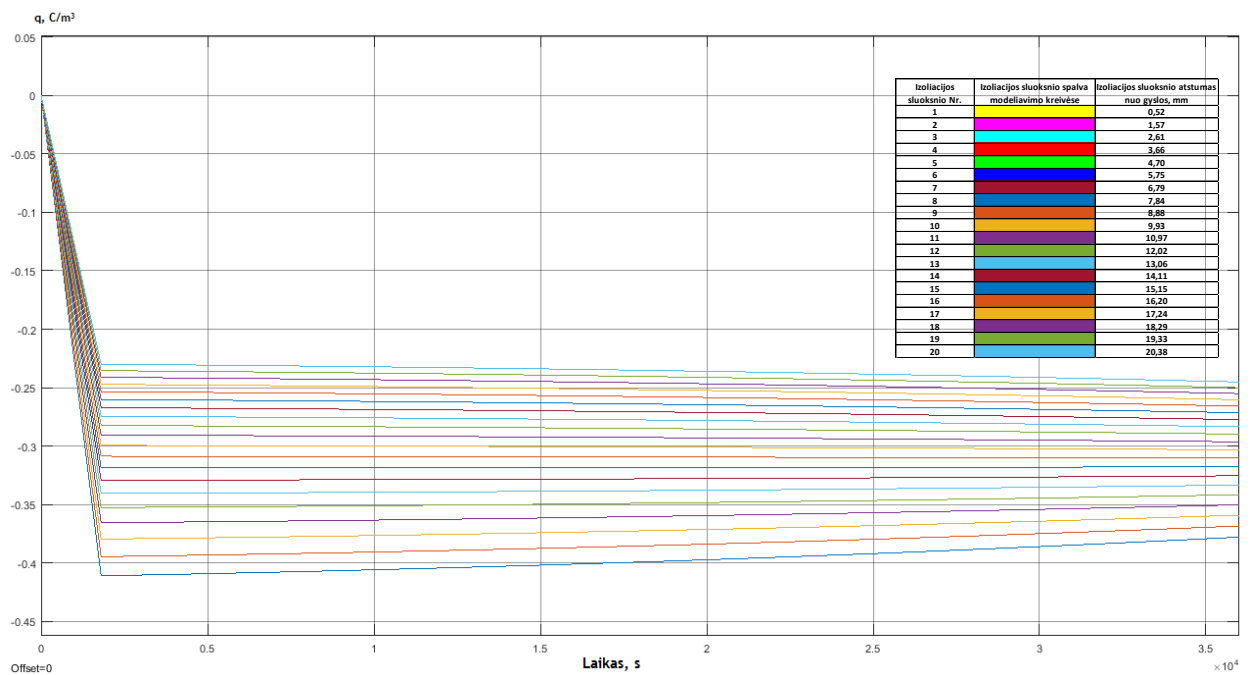
Pav. 2.51. Įtampos ir srovės signalai. Neigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.52. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.53. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.54. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Neigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.

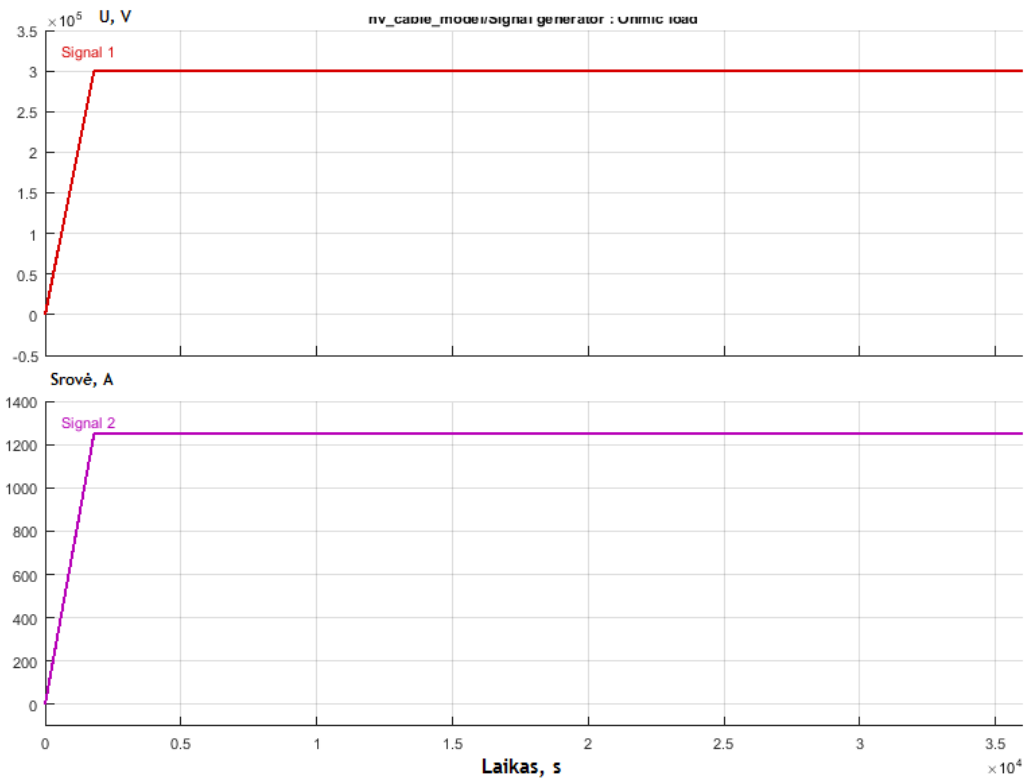
Lentelė 14. 11 modeliavimo parametų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m ³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
	Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4109
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,57	281,4	0,2451
	Vidinis sluoksnis	17,83	291,3	0,3778

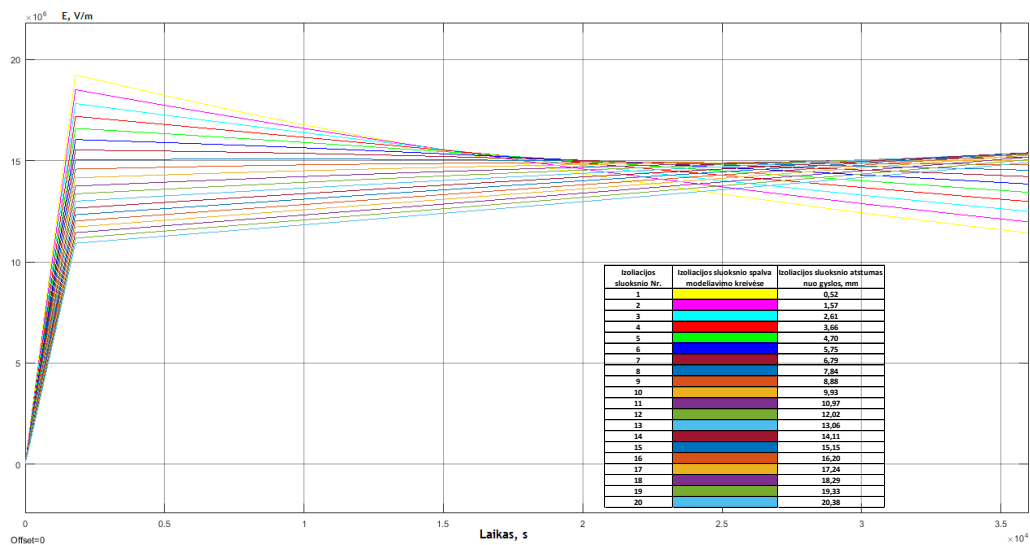
2.3.12 Kabelis pradamas krauti esant didesnei temperatūrai

Pagrindiniai modeliavimo parametrai:

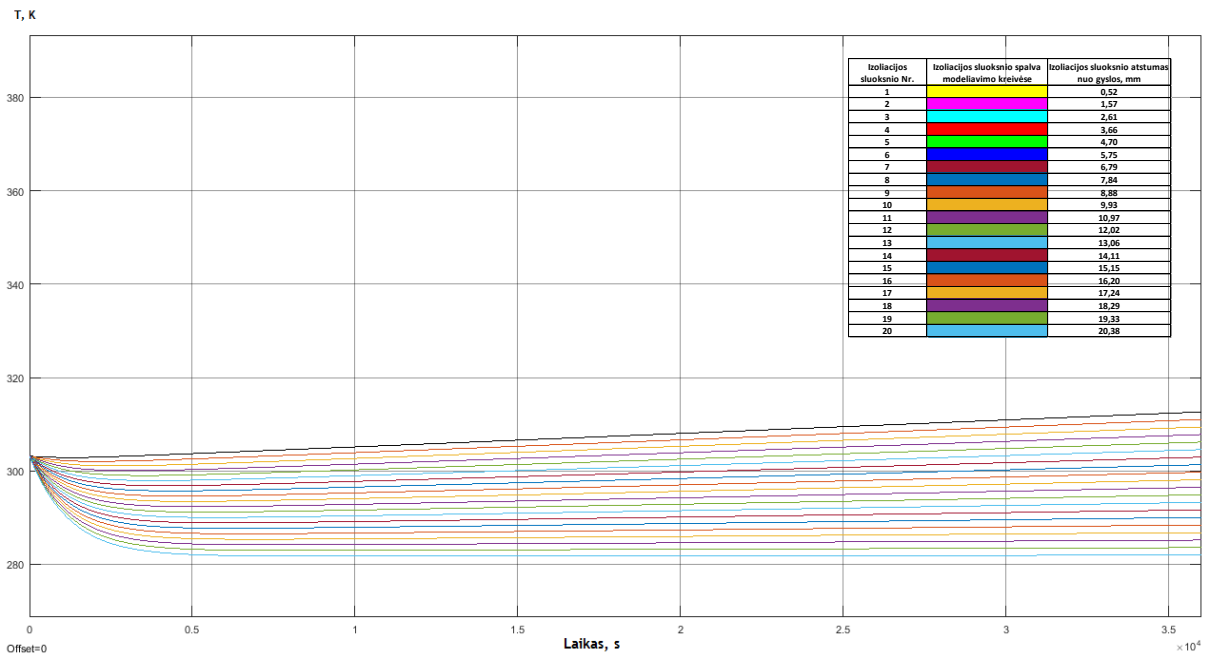
- Įkrovimo trukmė – 1800 s;
- Įkraunama keliant įtampą ir srovę;
- Modeliavimo trukmė – 10 val.;
- Įtampa ir srovė keliami iki vardinių dydžių.
- Kabelio temperatūra pradiniu laiko momentu - + 30°C.



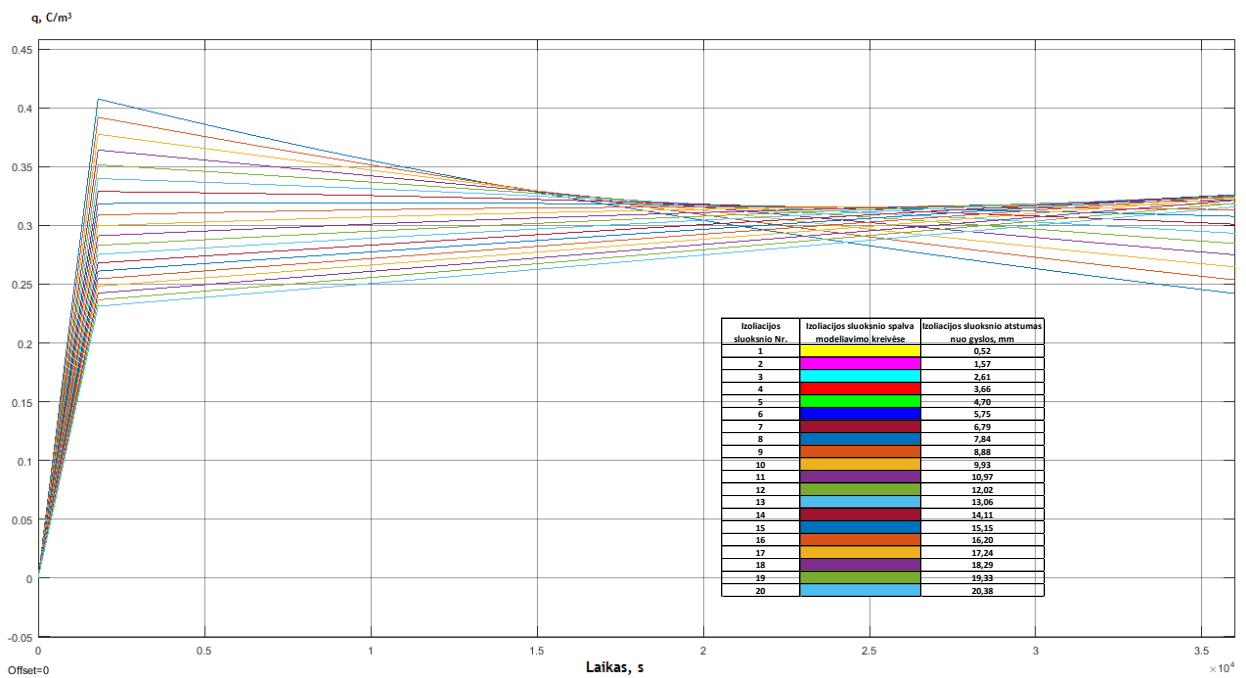
Pav. 2.55. Įtampos ir srovės signalai. Šilto kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.56. Elektrinio lauko stiprio vertės izoliacijos sluoksniuose. Šilto kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.57. Temperatūros vertės izoliacijos sluoksniuose. Šilto kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.



Pav. 2.58. Erdvinio krūvio vertės izoliacijos sluoksniuose. Šilto kabelio įkrovimo perduodant energiją darbo režimas.

Lentelė 15. 12 modeliavimo parametrų suvestinė.

Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m ³
Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,92	286,6	0,23
	Vidinis sluoksnis	19,24	302,9	0,4108
Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	14,91	282	0,6759
	Vidinis sluoksnis	11,43	31,26	0,1099

2.3.13 Modeliavimų suvestinė

Lentelė 16. Bendra darbo režimų dydžių suvestinė lentelė.

Modeliavimo Nr.	Tiriamas režimas	Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m ³
1	Įkrovimas	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2297
			Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4104
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,57	281,4	0,2451
			Vidinis sluoksnis	17,83	291,3	0,3778
2	Poliarumo pakeitimas	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
			Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4109
		Prieš poliarumo pakeitimą	Išorinis sluoksnis	11,08	281,3	0,2347
			Vidinis sluoksnis	18,89	285,7	0,4
		Po poliarumo pakeitimo	Išorinis sluoksnis	-10,63	281,3	-0,2251
			Vidinis sluoksnis	-19,92	285,9	-0,422
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	-11,12	281,4	-0,2356
			Vidinis sluoksnis	-18,71	290,9	-0,3964
3	Įkrovimas be apkrovos	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,1	0,23
			Vidinis sluoksnis	19,4		0,4108
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,16		0,2364
			Vidinis sluoksnis	18,7		0,396
4	Apkrovos paleidimas įkrautam kabeliui	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,1	0,23
			Vidinis sluoksnis	19,4	281,1	0,4108
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,55	281,4	0,2447
			Vidinis sluoksnis	17,88	291	0,3786
5	Įkrovimas 100% padidinta srove	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
			12 sluoksnis	13,33	281,5	0,2823
			Vidinis sluoksnis	19,4	281,9	0,4109
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	14,47	282,2	0,3066
			12 sluoksnis	15,34	298,8	0,3249
			Vidinis sluoksnis	11,36	321,6	0,2406
6	Įkrovimas 50% padidinta įtampa	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	16,29	281,2	0,3451
			Vidinis sluoksnis	29,07	281,3	0,6158
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	18,21	281,4	0,3855
			Vidinis sluoksnis	25,03	291,3	0,5302
7	Greitas įkrovimas	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,85	281,2	0,2299
			Vidinis sluoksnis	19,41	281,2	0,4111
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,61	281,4	0,2458
			Vidinis sluoksnis	17,76	291,6	0,3763
8	Prastas aušinimas	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,23
			Vidinis sluoksnis	19,39	283	0,4108
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	31,91	283,7	0,6759
			Vidinis sluoksnis	5,189	380,9	0,1099
9	Teigiamo poliarumo viršįtampis	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
			Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4109
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,57	281,4	0,2451
			Vidinis sluoksnis	17,84	291,3	0,3778

Modeliavimo Nr.	Tiriamas režimas	Matavimo laikas	Matavimo vieta	E, kV/mm	T, K	q, C/m³
9	Teigiamo poliarumo viršįtampis	Viršįtampio metu	Išorinis sluoksnis	15,18	281,4	0,3216
			Vidinis sluoksnis	24,29	291,3	0,5145
10	Neigiamo poliarumo viršįtampis	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
			Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4109
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,57	281,4	0,2451
			Vidinis sluoksnis	17,84	291,3	0,3778
		Viršįtampio metu	Išorinis sluoksnis	7,962	281,4	0,1687
			Vidinis sluoksnis	11,38	291,3	0,241
11	Neigiamo poliaus įkrovimas	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,86	281,2	0,2299
			Vidinis sluoksnis	19,4	281,3	0,4109
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	11,57	281,4	0,2451
			Vidinis sluoksnis	17,83	291,3	0,3778
12	Šilto kabelio krovimas	Po įkrovimo	Išorinis sluoksnis	10,92	286,6	0,23
			Vidinis sluoksnis	19,24	302,9	0,4108
		Nusistovėjęs	Išorinis sluoksnis	14,91	282	0,6759
			Vidinis sluoksnis	11,43	31,26	0,1099

3 Rezultatai

Atlikus darbo režimų modeliavimą gauti rezultatai aprašyti palyginimų būdu.

- Kabelio įkrovimo perduodant energiją režimo metu vidiniame izoliacijos sluoksnyje nusistovėjusi elektrinio lauko stiprio vertė sumažėjo **8%** (nuo 19,4 kV/mm iki 17,83 kV/mm), o išoriniame sluoksnyje elektrinio lauko stiprio vertė padidėjo **6,5%** (nuo 10,86 kV/mm iki 11,57 kV/mm);
- Po poliarumo pakeitimo elektrinio lauko stiprio modulis vidiniame izoliacijos sluoksnyje (19,92 kV/mm) buvo **5,5%** didesnis nei prieš poliarumo pakeitimą (18,89 kV/mm).
- Lyginat kabelio įkrovimo perduodant galią režimą ir poliarumo pakeitimo režimą matoma, kad modeliavimo pabaigoje nusistovėjo skirtingos vertės. Vidiniame izoliacijos sluoksnyje elektrinio lauko stiprio modulis poliarumo pakeitimo režime nusistovėjo **5%** didesnis (18,71 kV/mm), nei kabelio įkrovimo perduodant energiją (17,83 kV/mm) metu. Priešingi rezultatai pastebėti išoriniame sluoksnyje, poliarumo pakeitimo režime nusistovėjusi elektrinio lauko stiprio vertė (11,12 kV/mm) buvo **4%** mažesnė, nei kabelio įkrovimo perduodant energiją metu (11,57 kV/mm).
- Įkraunant kabelį be apkrovos elektrinio lauko stiprio vertės po įkrovimo sutapo (19,4 kV/mm) su modeliavimo vertėmis kai kabeliu perduodama energija, nusistovėjusios vertės buvo skirtingos, elektrinio lauko stipris kabelį įkraunant be apkrovos buvo didesnis (18,7 kV/mm) **5%** nei įkraunant kabelį perduodant galią (17,83 kV). Išoriniame sluoksnyje elektrinio lauko stiprio vertės taip pat nesutapo, kabelį kraunant perduodant energiją elektrinio lauko stiprio vertė nusistovėjusiam režime buvo didesnė (11,57 kV/mm) **3,7%**, nei kraunant jį be energijos perdavimo (11,16 kV/mm).
- Kaip apkrova įjungiamą įkrautam kabeliui parametrai beveik sutapo su darbo režimu, kai kabelis kraunamas perduodant galią. Kabelio krovimo parametrai buvo identiški. Nusistovėjusios vertės išoriniame ir vidiniame sluoksniuose nesutapo su pirmuoju darbo režimu. Apkrovos įjungimo po kabelio įkrovimo modeliavime nusistovėjusi elektrinio lauko stiprio vertė išoriniame sluoksnyje (11,55 kV/mm) buvo mažesnė **2%** nei nusistovėjusi vertė kabelį kraunant perduodant energiją. Taip pat nusistovėjusi elektrinio lauko stiprio vertė izoliacijos vidiniame sluoksnyje apkrovos įjungimo įkrautam kabeliu režime (17,88 kV/mm) buvo **0,4%** mažesnė (17,83 kV/mm).
- Modeliuojant kabelį **100%** padidinta srove krovimo metu parametrai sutapo su kitais vardinių reikšmių darbo režimais. Nusistovėję dydžiai ir jų kitimo tendencijos stipriai skyrėsi nuo įprasto režimo kabelį kraunant perduodant energiją. Nusistovėjusi elektrinio lauko stiprio vertė

izoliacijos išoriniame sluoksnyje (14,47 kV/mm) buvo **25%** didesnis nei kabelį kraunant ir perduodant vardinę galią (11,57 kV/mm). Izoliacijos vidinio sluoksnio nusistovėjusiame režime perduodant padidinto dydžio srovę modeliavime vertė (11,36 kV/mm) buvo **64%** mažesnė, nei įkauto kabelio (17,83 kV/mm).

- Padidintos 50% įtampos modeliavime pastebėta, kad elektrinio lauko stiprio vertė izoliacijos vidiniame sluoksnyje po kabelio įkrovimo (29,07 kV/mm) buvo **16%** didesnė nei nusistovėjus vertė tame pačiame sluoksnyje (25,03 kV/mm). Izoliacijos išoriniame sluoksnyje po kabelio įkrovimo elektrinio lauko stiprio vertė (16,29 kV/mm) buvo **10%** mažesnė nei nusistovėjusi tame pačiame sluoksnyje (18,2 kV/mm).

- Erdvinio krūvio formavimasis izoliacijos sluoksniuose dydis priklausė nuo temperatūros. Didėjant izoliacijos temperatūrai erdvinio krūvio kiekis joje taip pat didėjo taip padidindamas nusistovėjusio elektrinio lauko stiprio vertę izoliacijos išoriniame sluoksnyje ir sumažindamas ją vidiniame. Šis dėsningumas buvo matomas, padidintos srovės, prasto aušinimo ir šilto kabelio modeliavimuose.

- Modeliuojant teigiamą viršįtampį esant įkrautam kabeliui, perduodant energiją buvo matoma, kad **33%** įtampos padidėjimas sukėlė **36%** elektrinio lauko stiprio padidėjimą izoliacijos vidiniame sluoksnyje (nuo 17,84 kV/mm iki 24,29 kV/mm) ir **31%** elektrinio lauko stiprio padidėjimą izoliacijos išoriniame sluoksnyje (nuo 11,57 kV/mm iki 15,18kV/mm).

- Neigiamo viršįtampio metu staigus **33%** įtampos sumažėjimas sukėlė **36%** elektrinio lauko stiprio sumažėjimą izoliacijos vidiniame sluoksnyje (nuo 17,84 kV/mm iki 11,38 kV/mm) ir **31%** elektrinio lauko stiprio sumažėjimą izoliacijos išoriniame sluoksnyje (nuo 11,57 kV/mm iki 7,962 kV/mm).

- Neigiamo ir teigiamo poliaus įkrovimo perduodant energiją modeliavimų rezultatai visiškai sutapo.

- Modeliavimo rezultatai atitiko gamintojo pateiktas vertes.

- Temperatūros didėjimas izoliacijoje buvo pavojingiausias išoriniam izoliacijos sluoksniui. Pastebėta, kad normaliomis sąlygomis elektrinio lauko stiprio izoliacijoje vertė didžiausia vidiniame izoliacijos sluoksnyje. Izoliacijos temperatūrai pakilus erdvinio krūvio kiekis izoliacijoje išauga ir elektrinio lauko stiprio vertės pakinta taip: izoliacijos vidiniame sluoksnyje elektrinio lauko stipris ženkliai sumažėja, o išoriniame padidėja iki verčių, kurios potencialiai kelia elektrinio pramušimo pavojų.

Nors ir žinant visus kabelio geometrinius parametrus izoliacijos struktūros nusakyti paprastai negalima. Gamintojų pateikiamoje informacijoje apie gaminį tokių dydžių rasti taip pat nepavyks, nes tokios žinios yra pačios slapčiausios ir laikomos tikruoju gamintojo „know how“. Izoliacijos

molekulinės struktūros parametrams nustatyti reikalinga atlikti laboratorines analizes, kurių metu galima nustatyti vakuolių skersmenį ir molekulinį ryšių suardymo energiją.

Priimant, kad izoliacijos medžiagų savybės yra vidutinės pagal literatūros lentelėse pateikiamus dydžius, naudojant formulę Nr. 62 gaunama, kad erdvinio krūvio sumažintas elektrinio lauko stipris izoliacijoje kabelio įkrovimo perduodant energiją metu prailgina kabelio gyvavimo laiką 2,57 karto, o įtampos poliarumo pakeitimo darbo režimas sutrumpina kabelio izoliacijos gyvavimo laiką 1,52 karto neatsižvelgiant į elektrinio lauko stiprio padidėjimą (**5,5 %**) iškarto po poliarumo pakeitimo.

$$\Delta\tau = \frac{\tau(E = 17,83 \frac{kV}{mm})}{\tau(E = 19,4 \frac{kV}{mm})} = 2,57 \quad (71)$$

$$\Delta\tau = \frac{\tau(E = 18,71 \frac{kV}{mm})}{\tau(E = 17,83 \frac{kV}{mm})} = 1,52 \quad (72)$$

4 Išvados

1. Kabelių su polimerine izoliacija naudojimas aukštos įtampos nuolatinės srovės elektros energijos perdavimui tampa vis dažnesnis. Tirti tokios sistemos darbo režimus yra būtina siekiant užtikrinti energetinės sistemos patikimumą.
2. Dėl komutacinių ir avarinių viršįtampių kabelinės linijos apsaugai reikalinga naudoti viršįtampių ribotuvus ir puslaidininkinius jungtuvus, kurių parametrai nustatomi pagal sistemos darbo režimus.
3. Kintamosios srovės kabelinių linijų modelių struktūra skiriasi nuo nuolatinės srovės kabelinių linijų modelių struktūros, kuriuose didelis dėmesys skiriamas erdvinio krūvio pokyčio įvertinimui. Sudarytas Matlab aplinkos modelis pritaikytas nagrinėti nuolatinės srovės kabelių su polimerine izoliacija darbo režimams nuolatinės srovės sistemose su VCS ir CSC keitikliais.
4. Tyrimo metu nustatyta, kad erdvinio krūvio kiekis izoliacijoje priklauso nuo izoliacijos temperatūros ir elektrinio lauko stiprio vertės joje. Atliekant skaitmeninę analizę erdvinio krūvio įtaka elektrinio lauko stiprio vertėms padidintos įtampos režimu siekė 16%. Erdvinio krūvio įtaka privalo būti įvertinta kuriant kabelio struktūrą ir tiriant galimus gedimus.
5. Modeliuojant normalų darbo režimą erdvinis krūvis izoliacijos vidiniame sluoksnyje sumažino nusistovėjusią elektrinio lauko stiprio vertę 8%, tai prailgina izoliacijos gyvavimo laikotarpį 2,57 karto.
6. Ypač didelę įtaką sistemai turi poliarumo pakeitimo darbo režimas. Jeigu šis darbo režimas būtų naudojamas dažnai kabelio eksploatavimo laikas iki gedimo gali sutrumpėti 1,57 karto.
7. Tiksliam nuolatinės srovės kabelio gyvavimo laiko nustatymui reikalinga žinoti medžiagos savybes, kurios nustatomos atliekant laboratorinius bandymus. Tolimesniuose tyrimuose tai padėtų patikslinti modelį ir įvertinti kabelio eksploatavimo laiką iki gedimo.

5 Literatūra

- [1] A. Ametani, T. Ohno ir N. Nagaoka, *Cable System Transients Theory Modeling and Simulation*, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015.
- [2] T. Worzyk, *Submarine Power Cables Design, Installation, Repair, Enviromental Aspects*, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] H. Nigel, H. Rick, L. Hakan, O. Harry ir R. Ram, „Long-Life XLPE Insulated Power Cable,“ įtraukta *Jicable*, Paris, 2007.
- [4] entsoe.eu, „Entso-e transmission map,“ [Tinkle].
- [5] „Existing HVDC Projects,“ University of Idaho, 2013. [Tinkle].
- [6] V. H. Dirk, G.-B. Oriol ir L. Jun, *HVDC Grids: For Offshore and Supergrid of the Future*, John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [7] ABB, *HVDC Light catalogue*, 2015.
- [8] M. Giovanni and M. Massimo, *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [9] E. P. R. INSTITUTE, „Program on Technology Innovation:,“ 2009.
- [10] L. Stefano, P. Francesco ir C. Luigi, „Short Circuit and Induced Voltage Transient Study,“ *ReasearchGate*, p. 7, 2011.
- [11] D. Sébastien, S. Hani, N. Antoine ir H. Pierre, „Transients on DC cables connected to VSC converters,“ įtraukta *Jicable 9th International Conference On Insulated Power Cables*, Versailles, 2015.
- [12] V. Thi Thu Nga, T. Gilbert, V. Bertrand, S. John Yuddy ir L. Christian, „Transient space charge phenomena in HVDC model cables,“ įtraukta *Jicable 9th International Conference on Insulated Power Cables*, Versailles, 2015.
- [13] R. Fatiha, „Space charge behavior and its modified electric field in the cross-linked polyethylene under applied voltage DC and different temperatures,“ *Journal of Electrostatics*, p. 9, 16 10 2013.
- [14] d. S. Filipe Faria ir B. Claus Leth, *Electromagnetic Transients in Power Cables*, New York: Springer, 2013.
- [15] B. B. Louis Jean, *Water hammer in hydraulics and wave surges in electricity*, Michigan: John Wiley & Sons Inc., 1961.

- [16] G. Platbrood, G. Geerts, P. Couneson ir X. Delrée, „SPACE-CHARGE AGEING OF HIGH VOLTAGE XLPE CABLES,“ įtraukta *Cigre session 1998*, Paris, 1998.
- [17] J. Marc, *Charges and Discharges in HVDC Cables in particular in mass-impregnated HVDC cables*, Delft: Delft University Press, 1997.
- [18] B. Joan, Ò. Jordi, D. J. Ant., M. Miguel, F. Fabián ir A. Miguel, „ANNEALING EFFECT ON THE CONDUCTIVITY OF XLPE INSULATION IN POWER CABLE,“ įtraukta *Jicable 7th International Conference on Insulated Power Cables*, Versailles, 2007.
- [19] M. Massimo, M. Giovanni, V. Uberto ir J. Heiko, „On the way to compare the polarity reversal withstand capability of HVDC,“ įtraukta *Jicable 9th International Conference on Insulated Power Cables*, Versailles, 2015.
- [20] P. G, G. G, C. P ir D. X, „Space-charge aging on high voltage XLPE cables,“ įtraukta *CIGRE annual session*, Paris, 1998.
- [21] I. Electric Power Research Institute, „Program on Technology Innovation: Transient Response,“ Electric Power Research Institute, Inc., California, 2009.
- [22] N. T. Minh, X. Alain ir W. Quentin, „Modeling of DC cables for transient studies,“ įtraukta *Jicable 9th International Conference on Insulated Power Cables*, Versailles, 2015.
- [23] F. Christian, L. Marie-Helene ir K. Johan, „Transient thermal phenomenon in HVDC extruded cables under test and,“ įtraukta *Jicable 9th International Conference on Insulated Power Cables*, Versailles, 2015.

Priedas 1

Matlab izoliācijas bloko funkcijas

```
component cableslice
% HV cable slice component
nodes
    p = foundation.electrical.electrical; % +:left
    n = foundation.electrical.electrical; % -:right
    A = foundation.thermal.thermal; % A:left
    B = foundation.thermal.thermal; % B:right
end
outputs
    E = { 0.0, 'V/m' }; % E:right
    T_mean = { 0.0, 'K' }; % T:right
    q = { 0.0, 'A*s/m^3' }; % q:right
end
parameters
    eps_r = { 2.5, '1' }; % Relative Permittivity
    kappa0 = { 1.65e-17, '1/Ohm/m' }; % Basic conductance
    alpha = { 0.084, '1/K' }; % Thermal dependency factor for conductance
    beta = { 0.0645, 'mm/kV' }; % Electric field dependency factor for conductance
    r = { 1, 'm' }; % Radius
    l = { 1000, 'm' }; % Length of cable
    d = { 1, 'm' }; % Thickness of element (R2-R1)
    u0 = { 0, 'V' }; % Initial voltage
    R1 = { 1, 'm' }; % Inner radius for every kabelelement
    R2 = { 1, 'm' }; % Outer radius for every kabelelement
    eps0 = { 8.854e-12, 'A*s/V/m' }; % Permittivity of vacuum
    th_cond0 = { 0.17, 'J/s/K/m' }; % Thermal conductivity
end
variables
    T = { 281.15, 'K' }; % Temperature
    i = { 0, 'A' }; % Current
    v = { 0, 'V' }; % Voltage
    Q = { 0, 'J/s' }; % Heat flow rate
    Ar = { 0, 'm' }; %  $2\pi l / (\log(R2/R1))$ 
    C = { 0, 'A*s/V' }; % Capacitance
    th_cond = { 0, 'J/s/K/m' }; % Thermal conductivity
end
function setup
    v = u0;
end
branches
    i : p.i -> n.i;
    Q : A.Q -> B.Q;
```

```

end
equations
    th_cond == th_cond0/(2*pi)*(log(R2/R1));
    Ar == 2*pi*l/(log(R2/R1));
    C == (eps0*eps_r*2*pi*l)/(log(R2/R1));
    i == C*v.der++((kappa0*exp(alpha*(T_mean-{273.15,'K'}))*exp(beta*abs(E)))*v*Ar);
    Q == th_cond*T*Ar;
    T == A.T - B.T;
    E == v/(r*(log(R2/R1)));
    T_mean == (A.T+B.T)/2;
    q == C*v/(((R2^2*pi)-(R1^2*pi))*l);
    v == p.v - n.v;
end
end

```

Priedas 2

Matlab modelio funkcijos

```
for i=1:numElements
    add_block('components_lib/HV cable slice component',...
        [ thisblock 'Kabelelement ' num2str(i)]);
    cPos = get_param([ thisblock 'Kabelelement ' num2str(i)],...
        'Position');
    set_param([ thisblock 'Kabelelement ' num2str(i)],...
        'Position',cPos+[i*150 -40 i*150+40 40]);
    % set init voltage
    set_param([ thisblock 'Kabelelement ' num2str(i)],'u0',...
        '0');
    % set thickness
    set_param([ thisblock 'Kabelelement ' num2str(i)],'d',...
        num2str((r_2-r_1)/numElements));
    % set inner radius R1
    set_param([ thisblock 'Kabelelement ' num2str(i)],'R1',...
        num2str(r_1+((i-1)*(r_2-r_1)/numElements)));
    % set outer radius R2
    set_param([ thisblock 'Kabelelement ' num2str(i)],'R2',...
        num2str(r_1+(i*(r_2-r_1)/numElements)));
    % set radius
    set_param([ thisblock 'Kabelelement ' num2str(i)],'r',...
        num2str(r_1+(i-0.5)*(r_2-r_1)/numElements));
    % add converter PS -> Simulink
    add_block('nesl_utility/PS-Simulink Converter',...
        [ thisblock 'Simulink Converter E ' num2str(i)]);
    set_param([ thisblock 'Simulink Converter E ' num2str(i)],...
        'Position',cPos+[i*150+185 180 i*150+155 150]);
    % add converter Simulink -> PS
    add_block('nesl_utility/PS-Simulink Converter',...
        [ thisblock 'Simulink Converter T ' num2str(i)]);
    set_param([ thisblock 'Simulink Converter T ' num2str(i)],...
        'Position',cPos+[i*150+185 230 i*150+155 200]);
    add_block('nesl_utility/PS-Simulink Converter',...
        [ thisblock 'Simulink Converter q ' num2str(i)]);
    set_param([ thisblock 'Simulink Converter q ' num2str(i)],...
        'Position',cPos+[i*150+185 280 i*150+155 250]);
```