

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU _____
Katedros vedėja: prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė
2013

ELEKTROS INŽINERIJOS MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ PROGRAMOS „*LAIVŲ*
ELEKTROS ĮRANGA IR AUTOMATIKA“
(Studijų kodas 621H62003)
MAGISTRO TEZĖS

ELEKTROMAGNETINĖS TARŠOS PAJŪRIO
REGIONE TYRIMAS

Recenzentas: _____

2013

Vadovas: prof.,dr Eleonora Guseinoviėnė

2013

Recenzentas: _____

2013

Rengė: TMLE -11 Jelena Dikun

2013

Klaipėda, 2013

SANTRAUKA

Dikun J. Elektromagnetinės taršos pajūrio regione tyrimas. Laivų elektros įrangos ir automatikos magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovė prof. dr. E. Guseinovienė, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2013. – 67 p. *Raktažodžiai*: elektros tiekimo oro linija, elektromagnetinis laukas, dielektrinė skvarba.

Šis baigiamasis darbas pristato 110 kV aukštos įtampos, nutiestos virš vandens paviršiaus, elektros oro tiekimo linijos elektrinių ir magnetinių laukų pasiskirstymo modeliavimus, esant skirtingoms orų sąlygoms. Taip pat šiame darbe yra pateiktas tos pačios elektros tiekimo linijos ir tomis pačiomis oro sąlygomis elektromagnetinių laukų parametrų modeliavimas, atliktas padarius prielaidą, kad ši linija įrengta virš sausumos paviršiaus. Darbo pagrindiniai tikslai yra apibrėžiami elektromagnetinio lauko parametrų priklausomybės nuo orų sąlygų nustatymu, o taip pat elektromagnetinių laukų pasiskirstymo virš skirtingų paviršių palyginamąja analize. Remiantis iškeltais tikslais, buvo nustatytos elektrinių ir magnetinių laukų intensyvumų bei magnetinio srauto tankio normuotos vertės; išnagrinėti žalingi pramoninio dažnio laukų poveikiai aplinkai bei žmogaus sveikatai, o taip pat išanalizuoti šiuolaikiniai būdai ir priemonės, taikomi apsaugai nuo elektros tiekimo oro linijų elektromagnetinės spinduliuotės. Darbe apžvelgtos elektromagnetinių laukų skaičiavimo metodikos. Laukų modeliavimas, pagrįstas baigtinių elementų metodu, buvo atliktas FEMM programos terpėje. Linijos modelis buvo sudaromas, skaičiuojant elektros linijos parametrus ir nustatant fazinių laidų skerspjūvių koordinates, priklausančias nuo linijos konstruktyviųjų ypatumų. Atskiras dėmesys buvo skirtas oro, vandens, ledo, rūko bei dirvos dielektrinių ir magnetinių skvarbų skaičiavimams, įvertinant jų skaitinių reikšmių priklausomybes nuo oro sąlygų.

Modeliavimo rezultatais įrodyta, kad tyrinėjamos linijos laukų parametrai praktiškai nepriklauso nuo supančios aplinkos oro sąlygų. Taip pat buvo nustatytas elektrinio lauko stiprio padidėjimas, esant ledo dangai telkinio paviršiuje, bei tiršto rūko metu. Buvo pastebėta, kad elektrinio lauko stipris virš vandens paviršiaus yra vidutiniškai 516 V/m didesnis, negu šio lauko stipris virš žemės paviršiaus. Tuo tarpu magnetinio lauko stipris ir srauto tankis išlieka nepakitę, t.y. terpė, virš kurios yra ištiesta linija, neturi jokios įtakos magnetinio lauko parametrams. Lyginant gautuosius laukų modeliavimo rezultatus su normuotomis vertėmis, buvo nustatyta, kad jie viršija leistinas ribines vertes.

Dielektrinių ir magnetinių skvarbų priklausomybės nuo oro sąlygų, pateiktos šiame tyrime, įvertina elektromagnetinių bangų dažnį ir gali būti naudojami ne tik egzistuojančioms ir naujai

projektuojamoms elektros oro linijoms elektromagnetinės taršos tyrimuose, bet ir kitiems nepramoninio dažnio elektros įrenginiams ir energetinėms sistemoms.

SUMMARY

Dikun J. Electromagnetic pollution study in coastal region. Master's degree ship electrical equipment and automation studies thesis. Thesis supervisor doc.dr. E. Guseinoviene. Klaipeda University. Klaipeda, 2013. – 67 p. Key words: power transmission line, electromagnetic field, permittivity.

This thesis presents modeling of the electric and magnetic fields under different weather conditions of the 110 kV overhead high-voltage transmission lines which are set over the water surface. Furthermore, this study presents simulation of the electric and magnetic fields of the same transmission line under the same weather conditions, provides that the line is located above ground. The main goals of this thesis are to determine the electromagnetic field parameters depending on the weather conditions, as well as comparisons of the electromagnetic field distribution above various surfaces. According to objectives, normalized values of the electric and magnetic fields were defined as well as magnetic flux density. Also the harmful effects of power and frequency, which are connected with the fields, on the environment and human health were analyzed. Modern protection techniques and methods against the electromagnetic radiation caused by the overhead transmission lines were explained. Methods used in the calculation of electromagnetic fields have been studied in this research. Field simulations based on finite element method (FEM) were carried out by using FEMM package program. Power line model has been created taking into account the electrical parameters and coordinates of the phase conductors' cross-section, depending on the design features of the high-voltage lines. Special attention was paid to the calculation of the air, water, ice, fog, and the soil dielectric and magnetic permeability whose numerical calculations depend on the weather conditions.

The simulation results show that the field parameters of the transmission line are essentially independent from the weather and environment conditions. Also increase of electromagnetic field strength was determined during strong fog and when the surface of water was frozen. Also it was found that the electric field intensity above the water surface is higher than the field strength on the earth's surface by an average of 516 V / m. Meanwhile, it was determined that the strength of the magnetic field and the magnetic flux density remain unchanged. It means that the surroundings, above the power transmission line which is equipped, do not affect for the magnetic field parameters. Simulation results were compared with normalized values and hence, excess limit values were found.

The dependency of dielectric and magnetic permeability on the weather conditions was studied in this research. Also, taking into account the frequency of the electromagnetic waves, it showed that the

results of this study can be used not only for the existing and newly designed power lines, but also for other objects of power systems using non-industrial frequencies.

TURINYS

| | |
|---|----|
| ĮVADAS..... | 8 |
| I. NAUDOTŲ INFORMACIJOS ŠALTINIŲ TRUMPA APŽVALGA..... | 10 |
| II. PRAMONINIO DAŽNIO EML STEBĖJIMŲ SVARBA IR PAGRĮSTUMAS..... | 12 |
| 2.1 Pramoninio dažnio EML normavimas..... | 12 |
| 2.1.1 Tarptautiniai ir ES EOL elektromagnetinę spinduliuotę reglamentuojantys teisės aktai..... | 12 |
| 2.1.2 Lietuvoje EOL elektromagnetinę spinduliuotę reglamentuojantys teisės aktai..... | 12 |
| 2.2 EML nuo EOL ir jų poveikiai biologiniams objektams..... | 13 |
| 2.2.1 EOL elektromagnetinių laukų įtaka žmogaus sveikatai | 14 |
| 2.2.1.1 EOL elektros laukas..... | 14 |
| 2.2.1.2 EOL magnetinis laukas..... | 14 |
| 2.2.1.3 Susirgimų vėžiu statistika..... | 15 |
| 2.2.2 EOL poveikis gyvajai aplinkai..... | 15 |
| 2.2.2.1 Augalija..... | 15 |
| 2.2.2.2 Gyvūnija..... | 16 |
| 2.3 Apsauga nuo EOL EML spinduliuotės..... | 17 |
| 2.3.1 EML mažinimas keičiant EOL konstrukciją..... | 18 |
| 2.3.1.1 Atstumo tarp fazių kitimas..... | 18 |
| 2.3.1.2 Laidų pakabinimo aukščio didinimas..... | 18 |
| 2.3.1.3 Ekranuojantys lynai..... | 18 |
| 2.3.2 Kiti EML mažinimo būdai..... | 19 |
| III. ANALITINĖ DALIS..... | 21 |
| 3.1 EML skaičiavimo metodikų apžvalga..... | 21 |
| 3.1.1 Baigtinių elementų metodas..... | 22 |
| 3.1.2 ANFIS metodas..... | 22 |
| 3.1.3 Simetrijos (atvaizdų) komponentų metodas..... | 23 |
| 3.1.4 Biot - Savart dėsnio taikymas ML parametrms nustatyti..... | 23 |
| 3.2 FEM metodo esmė..... | 23 |
| 3.2.1 FEM metodo taikymo EOL EML skaičiavimuose matematinis aprašymas..... | 24 |
| 3.3 EML modeliavimo pasirinktosios oro sąlygoms aptarimas..... | 29 |
| 3.4 EML modeliavimo programos. FEMM programos pasirinkimo pagrindumas | 30 |
| 3.5 EL modeliavimo schemas sudarymas ir parametrų priskyrimo tvarka..... | 30 |
| 3.6 ML modeliavimo parametrų įvesties tvarkos aprašymas..... | 32 |
| IV. TIRIAMOJI DALIS..... | 34 |
| 4.1 Tiriamojo objekto aprašymas..... | 34 |
| 4.1.1 Tiriamosios linijos dabartinė padėtis..... | 34 |
| 4.1.2 Linijos rekonstrukcijos ateities planai..... | 35 |
| 4.2 Fazinių laidų padėtis erdvėje..... | 36 |
| 4.2.1 Grandininės linijos lygtis..... | 36 |
| 4.2.2 Laidų pjūvių koordinačių nustatymas..... | 37 |
| 4.3 Linijos elektros parametrai..... | 39 |
| 4.3.1 AĖEOL ekvivalentinės schemas parametrai..... | 40 |
| 4.3.2 Fazinės įtampos ir srovės..... | 42 |
| 4.4 Dielektrinė skvarba..... | 43 |
| 4.4.1 Oro dielektrinė skvarba..... | 44 |
| 4.4.2 Vandens dielektrinė skvarba..... | 46 |

| | |
|---|----|
| 4.4.3 Ledo dielektrinė skvarba..... | 48 |
| 4.4.4 Rūko dielektrinė skvarba..... | 49 |
| 4.4.5 Dirvožemio dielektrinė skvarba..... | 51 |
| 4.5 Būtinų ML modeliavimui terpių fizikinių dydžių nustatymas..... | 52 |
| 4.5.1 Terpių magnetinė skvarba..... | 52 |
| 4.5.2 Terpių savitųjų laidžių priklausomybės nuo temperatūros nustatymas..... | 54 |
| 4.5.3 Srovės tankio bei kitų ML modeliavimo parametrų nustatymas..... | 54 |
| 4.6 Modeliavimo rezultatų apžvalga..... | 55 |
| 4.6.1 Elektrinis laukas..... | 55 |
| 4.6.2 Magnetinis laukas..... | 60 |
| 4.6.2.1 Magnetinio lauko stipris..... | 61 |
| 4.6.2.2 Magnetinio srauto tankis..... | 64 |
| MAGISTRANTO PUBLIKUOTI STRAIPSNIAI..... | 66 |
| IŠVADOS..... | 67 |
| REKOMENDACIJOS, TOLIMESNI TYRIMAI..... | 68 |
| LITERATŪRA..... | 69 |
| PRIEDAI..... | 76 |

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

AJEOL – aukštos įtampos elektros oro linija;
ANFIS – Adaptive neuron fuzzy inference system; Neraiškių logikų realizacijos funkcija;
ASM-analitinis skaičiavimo metodas;
AZ – apsaugos zona;
DS – dielektrinė skvarba;
EC-European Council; ES taryba;
EL- elektrinis laukas;
ELI – elektrinio lauko intensyvumas;
ELS – elektrinio lauko stipris;
ELS_u – elektromagnetinis suderinamumas;
EMA – elektromagnetinis atsparumas;
EMB – elektromagnetinė banga;
EML – elektromagnetinis laukas;
EMT – elektromagnetinis trikdys;
EOL – elektros oro linijos;
ES – Europos Sąjunga;
ETL – elektros tiekimo linijos;
FEM-finite elements methods; baigtinių elementų metodas;
FEMM – Finite Elements Method Magnetic; programos pavadinimas;
GL – grandininė linija;
HN – higienos norma;
ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; Tarptautinės apsaugos nuo nejonizuojančiosios spinduliuotės komisija
JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos;
KDS – kompleksinė dielektrinė skvarba;
KEOL – kompaktinės elektros oro linijos;
L – žaibosaugos lyno žymėjimas schemose ir lentelėse;
L1 – apatinio linijos fazinio laido žymėjimas schemose ir lentelėse;
L2- vidutinio linijos fazinio laido žymėjimas schemose ir lentelėse;

L3 – viršutinio linijos fazinio laido žymėjimas schemose ir lentelėse;

ML- magnetinis laukas;

MLS – magnetinio lauko stipris;

MST – magnetinio stiprio tankis.

SAZ – sanitarinė apsaugos zona;

SDS – santykinė dielektrinė skvarba;

SKM – simetrijos komponentų (atvaizdu) metodas;

SL – savitasis laidis;

SMS – santykinė magnetinė skvarba;

SSM - skaitinis skaičiavimo metodas.

IVADAS

Pastaraisiais metais yra pastebimas žymus įvairių EML šaltinių, naudojamų kasdieniniame gyvenime, pramonėje bei komercijoje, skaičiaus padidėjimas. Prie tokių šaltinių yra priskiriami televizoriai, radijo imtuvai, kompiuteriai, mobilieji telefonai, mikrobanginės krosnelės, radarai, o taip pat pramonės bei medicinos įranga. Be abejo, visos šios technologijos palengvina mūsų gyvenimą, daro jį patogesnį, įgalina sutaupyti taip visiems mums brangų laiką. Tuo tarpu, šių technologijų naudojimas sukelia nerimą dėl aplinkos elektromagnetinės taršos padidėjimo, kuri gali būti gyvųjų organizmų subtilių biologinių struktūrų sutrikimų priežastimi, sukelti geofizinių anomalijų (pvz., dirvožemio sutankinimas), komplikuoti mechanizmų ir mašinų veikimą, o taip pat tiesiogiai įtakoti žmonių sveikatai. Tokie susirūpinimai buvo reiškiami ne tik dėl daugelio elektros prietaisų, tame tarpe ir mobiliųjų telefonų, naudojimo saugos, bet ir EOL.

Pagrindiniai elektros energetikos objektai, kuriuose eksploatuojant atsiranda pramoninio dažnio EML, yra įvairios konstrukcijos elektros tiekimo linijos ir aukštos įtampos pastotės. Elektros tiekimo linijų (ETL) sukuriama EML gali neigiamai veikti ne tik ETL priežiūros techninį personalą, bet kenkia ir šalia gyvenantiems žmonėms, gyvūnams bei augalams. AĖOL, būdami elektros energetinės sistemos sudedamosiomis dalimis, tiesiogiai kontaktuoja ir turi abipusę įtaką su jas supančia aplinka. Būdingiausiomis žalomis, kurių kilmė yra AĖOL, įprastai yra pripažįstamos aukštos įtampos EML žalingas poveikis biosferai, radijo ir televizijos trikdžių atsiradimas, akustiniai triukšmai, radijo ryšių prietaisų darbo pablogėjimas. Todėl, projektuojant ir eksploatuojant aukštos įtampos elektros įrenginius, vis didesnis dėmesys yra skiriamas šių įrenginių EML monitoringui.

EML monitoringas yra sistemingas (nuolatinis ar periodinis; sistemingai parinktose vietose) nejonizuojančios spinduliuotės stebėjimas, atliekant matavimus, reikalingus šių laukų poveikių įvertinimui, jų skaitinių verčių padidėjimo ar sumažėjimo priežasčių paieška ir aptikimas. Taip pat EML monitoringui galima priskirti galimų poveikių prognozavimą, kai yra projektuojama nauja EOL. Tam tikra prasme EML monitoringas yra bendros valstybinės sistemos, užtikrinančios šalies gyventojų sveikatą, saugos dalis, kuri apima EML stebėjimus (statistiniai duomenys), rezultatų sisteminimą ir analizę, įstatyminės bazės formavimą, teisės aktų bei kitų norminių dokumentų, reglamentuojančių EML, laikymosi kontrolės vykdymą. Tačiau EOL EML monitoringo veiksmų seka yra paremta pavieniais, priklausančiais nuo gyvenančių šalia EOL žmonių prašymų, elektrinių ir magnetinių laukų stiprių matavimais SAZ ribose. Tokiu būdu, natūriniai EML matavimai iš esmės yra atliekami atsitiktinai. Taip pat nėra jokių duomenų, nustatančių matuojamųjų laukų stiprių priklausomybę nuo oro sąlygų.

Dabartiniu metu antžeminių AĮEOL EL yra pakankamai gerai ištirti. Ypatingą įdomumą sukelia elektros oro linijų EML, ištiestų virš vandens telkinių. Mokslinėje ir tiriamojo pobūdžio literatūroje praktiškai nėra jokios informacijos, siejamos su EML tyrimais, nuo EOL, įrengtų virš vandens paviršiaus. Iš dalies toks informacijos trūkumas lengvai paaiškinamas tuo, kad elektros oro linijos daugeliu atveju įrengiamos virš sausumos paviršiaus ir tik labai maža EOL dalis, dėl atsiradusių neišvengiamų kliūčių linijos tiesimo kelyje, yra nutiesiama virš vandens paviršiaus.

Tiriamasis objektas: nutiesta virš Kuršių marių į Kiaulės Nugarą 110 kV AĮEOL.

Baigiamojo darbo tikslas: sumodeliuoti tiriamosios 110 kV AĮEOL EML virš įlankos paviršiaus ir virš žemės paviršiaus, esant įvairioms oro sąlygoms, o taip pat atlikti gautųjų nuo skirtingų paviršių EML verčių palyginamąją analizę.

Baigiamojo darbo uždaviniai:

1. Išanalizavus tarptautinius ir Lietuvoje galiojančius teisės aktus ir norminius dokumentus, reglamentuojančius elektromagnetinę spinduliuotę, nustatyti ribines vertes, kurios yra taikomos pramoninio dažnio šaltiniams bei elektros oro linijoms EML normuoti.
2. Remiantis naujausiais tyrinėjimais, pramoninio dažnio EML srityje išnagrinėti nuo EOL laukų žalingą poveikį žmogaus sveikatai, augalams bei gyvūnams, o taip pat esamus šiuolaikinius apsaugos būdus ir priemones, įgalinčius sumažinti šį poveikį.
3. Parinkti modeliavimui tinkamiausią kompiuterinę programą. Bandant gauti tikslesnius modeliavimo rezultatus, apžvelgti taikomas EML skaičiavimui metodikas ir pasirinkti tiksliausią skaičiavimo metodą.
4. EML modeliavimas kompiuterinės programos terpėje numato linijos fazinių laidų skerspjūvių brėžinio sudarymą ir įtampos reikšmių priskyrimą EL modeliavimo atveju arba srovės reikšmių priskyrimą, kai yra modeliuojamas ML. Todėl šiame darbe, atsižvelgiant į linijos konstruktyvius ypatumus, yra būtina apskaičiuoti fazinių laidų skerspjūvių koordinates, o taip pat, remiantis duomenimis, gautais iš LitGrid įmonės, apskaičiuoti linijos elektrinius parametrus.
5. Remiantis Lietuvos bei gretimų valstybių meteorologijos tarnybų archyvų duomenimis, išsiaiškinti, kurioje Klaipėdos sąsiaurio Kuršių marių dalyje buvo žemiausia ir aukščiausia oro temperatūra; parinkti tarpines oro temperatūros reikšmes tarp aptiktų ribinių ir nustatyti būdingas šioms temperatūroms oro sąlygas: rūkas, ledas ir panašiai.
6. Modeliuojant EML svarbu yra žinoti terpių dielektrines ir magnetines skvarbas. Todėl reikia išnagrinėti, nuo kokių linijos elektrinių parametrų arba supančios aplinkos sąlygų, priklauso skvarbų skaitinės reikšmės.

7. Nustačius visus būtinus modeliavimui fizikinius dydžius, sumodeliuoti EML, esant skirtingoms oro sąlygoms virš žemės ir vandens paviršiaus. Palyginti gautuosius rezultatus tarpusavyje bei su normuotomis vertėmis. Pateikti išvadą apie tiriamosios AĮEOL EML žalingo poveikio lygį.

I. NAUDOTŲ INFORMACIJOS ŠALTINIŲ TRUMPA APŽVALGA

Baigiamojo darbo rašymo metu teko apžvelgti ir išnagrinėti daugybę literatūros. Susidariusių informacijos šaltinių, kurių sąrašas yra pateiktas šio darbo gale, skaičius yra lygus 77. Todėl šioje trumpoje literatūros apžvalgoje autorė nenurodo straipsnių, knygų ir kitų šaltinių pavadinimų bei jų autorių, kas galėtų žymiai padidinti baigiamojo darbo apimtį, o nurodo panaudotų šaltinių, siejamų su darbo uždaviniais, seką, tinkančią konkrečiam uždaviniui išspręsti. Visi, parašyti šiame darbe, teiginiai, formulės, susieti su poskyrių tema, darbo tekste yra pažymėti konkrečios literatūros šaltinio (-ių) nuorodomis.

Didžiausią informacijos dalį sudarė moksliniai straipsniai, siejami su EML, atsirandančiais šalia AĮEOL, parametrų matavimais, skaičiavimais ir nustatymais, o taip pat natūrinių matavimų palyginimais su normuotomis EML vertėmis, galiojančiomis straipsnių autorių šalyse [2, 3, 4, 5, 6, 7, 22, 32, 38, 41, 45, 48, 64,].

Remiantis apibrėžtais tikslais, šio darbo pagrindą sudaro tiriamos AĮEOL EML parametrų modeliavimas virš skirtingų paviršių, esant skirtingoms oro sąlygoms, šių parametrų palyginamosios analizės atlikimas bei gautųjų modeliavimo rezultatų palyginimas su normuotomis EML vertėmis. Todėl apžvelgtos literatūros, rekomenduojamos naudojimui ir nustatančios pramoninio dažnio EML parametrų ribines bei leidžiamas vertės, dalį sudaro EML reglamentuojantys teisės dokumentai, galiojantys Lietuvoje, o taip pat ES parlamento bei kitų tarptautinių organizacijų direktyvos ir gairės [11, 15, 20, 24, 26, 27, 40, 46].

Buvo nustatyta, kad, skirtingai nei EL, EOL ML parametrų vertės nėra tiksliai apibrėžtos. Nors daugelio šalių mokslininkai įtikinamai ir atkakliai gina pramoninio dažnio ML parametrų normavimą ir, remiantis moksliniais tyrimais, konkretizuoja skaitines šių parametrų vertes. EML spinduliuotės reglamentavimo klausimai yra tiesiogiai susieti su šios spinduliuotės žalingu poveikiu žmogaus sveikatai ir aplinkai. Todėl teko išanalizuoti nemažai literatūros šaltinių, siejamų su dabartiniais tyrimais šiose srityse [17, 21, 25, 30, 54, 58, 63, 66, 71, 72, 73]. Deja, šiuose tyrimuose pateiktieji faktai kelia rimtą mokslininkų susirūpinimą dėl dabartinės padėties smarkiai urbanizuotuose rajonuose bei gamtos vietovėse, per kurias yra ištiestos EOL.

Tačiau EOL plėtra Lietuvoje prasidėjo praėjusio amžiaus 1913 m. ir buvo šiek tiek sustabdyta pokario metais. Kadangi egzistuoja EL reglamentuojančios normos, tai reiškia, kad EOL EL gali viršyti, neviršyti arba būti normos ribose. Kai EOL EL viršija nustatytas ribinės vertes, tenka imtis tam tikrų

priemonių, sugebančių sumažinti EL žalingos spinduliuotės poveikį. Todėl pasitelkus literatūros šaltinius [3, 7, 14, 18, 19, 32, 46, 47, 48, 72,73], buvo išanalizuoti EOL EL mažinimo būdai.

Ypatingas autorės dėmesys buvo skirtas įvairiems metodams ir būdams, taikomiems EML parametrų skaičiuoti, o taip pat gautųjų skaičiavimo metu EML verčių palyginimui su natūriniais matavimais. Analizuojant straipsnius [2,3,4,5,6,7,22,32,38,41,45,47,48,64], buvo sunku nustatyti, kuris iš taikomų metodų yra tiksliausias. Nes pateikiamos šiuose straipsniuose išvados daugumoje atvejų buvo nepakankamai konkretizuotos. Todėl buvo ieškoma ir analizuojama EML parametrų skaičiavimo metodikų išsamių aprašymų [1, 8, 52, 57, 59, 69, 70]. Taip pat buvo nustatyta, kad baigtinių elementų metodas yra tiksliausias iš visų taikomų EML skaičiavimuose.

Parinktos modeliavimo programos naudojimo tvarka yra išsamiai pateikta šiuose šaltiniuose [36,37, 52, 70]. EML parametrų modeliavimams atlikti reikėjo nustatyti tiriamosios AĖOL elektrinius parametrus. Todėl, atliekant šią darbo dalį, buvo naudojama literatūra, aprašanti EOL konstruktyviųjų bei elektrinių parametrų skaičiavimus [28, 42, 60, 61, 67, 76, 76, 77]. Fazinių laidų skerspjūvių centrų nustatymui tam tikroje erdvės plokštumoje buvo panaudoti šaltiniai [53, 62].

EML parametrų modeliavimas buvo atliekamas, įvertinat įvairias orų sąlygas, kurios buvo nustatytos, remiantis [34,39]. Oro temperatūros pasikeitimas tiriamosios linijos aplinkoje neišvengiamai siejamas su naujų terpių susiformavimu. Kokios terpės galėjo susiformuoti virš vandens paviršiaus priklausomai nuo EOL supančios oro temperatūros, kokia turėjo būti jos temperatūra bei koks šių terpių sluoksnių storis galėtų būti virš tyrinėjamų paviršių, padėjo nustatyti [10,33,49] šaltiniai. Tiksliai modeliavimo rezultatams gauti tiesiogiai įtakoja susiformavusių terpių tam tikrų fizikinių dydžių, o būtent dielektrinės skvarbos, magnetinės skvarbos ir elektros laidumo, priklausomybės nuo jų temperatūros bei išorinio EML dažnio. Ši informacija buvo aptikta šiuose šaltiniuose: orui [10,56,60], vandeniui [9, 23,31,35,75], ledui [51,75], rūkui [10,55,68], dirvai [43,44,50,65,74].

II. PRAMONINIO DAŽNIO EML STEBĖJIMŲ SVARBA IR PAGRĪSTUMAS

2.1 Pramoninio dažnio EML normavimas

2.1.1 Tarptautiniai ir ES EOL elektromagnetinę spinduliuotę reglamentuojantys teisės aktai

Visame pasaulyje kiekviena valstybė, kurdama įstatyminę bazę, reglamentuojančią EML valdymą, remiasi Tarptautinės apsaugos nuo nejonizuojančios spinduliuotės komisijos (ICNIRP) gairėmis [27,24] kurios yra pritaikomos prie konkrečios šalies elektros įrenginių kiekio bei intensyvumo naudojimo ir perkeliama į atitinkamus galiojančius teisės aktus ir kitus norminius dokumentus. 1 priede nurodytos magnetinio srauto tankio ribinės vertės statinio ML atveju, o 2-4 prieduose - leidžiamos EML poveikio ribinės vertės, o taip pat ribinių EL ir ML stiprių verčių nustatymas viešosioms ir darbo vietoms.

ES elektromagnetinės spinduliuotės nuo EOL poveikį sveikatai reglamentuoja Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2004/40/EB dėl būtiniausių saugos ir sveikatos reikalavimų, susijusių su fizikinių veiksnių keliama rizika darbuotojams [15] bei Europos Parlamento rekomendacija 1999/519/EC dėl žalingo EML poveikio mažinimo [46].

Elektromagnetinio suderinamumo problema atsirado praėjusio amžiaus trečiajame dešimtmetyje, kai, vystantis radijo technikai ir daugėjant radijo ryšio aparatų, jie pradėjo kelti trikdžius vienas kitam. EMS – tai elektros įrenginio arba elektros prietaisų (įrenginių) sistemos geba normaliai funkcionuoti savo elektromagnetinėje aplinkoje, nesukeliant neleistinų elektromagnetinių trikdžių kitiems, esantiems toje aplinkoje įrenginiams, bei dirbti be veikos blogėjimo, veikiant elektromagnetiniams trikdžiams. Todėl EMS yra svarbus bet kurio elektros įrenginio darbo kokybės kriterijus, o taip pat ir EOL. Pagal apibrėžimą EMS yra skirstomas į įrenginio spinduliuojamus elektromagnetinius trikdžius (EMT) ir įrenginio elektromagnetinį atsparumą (EMA). Elektromagnetinis trikdys yra bet kuris elektromagnetinis reiškinys, galintis pabloginti prietaiso, įrenginio arba sistemos darbingumą arba pakenkti gyvajai ar negyvajai materijai. ES įrenginių elektromagnetinį suderinamumą reglamentuoja elektromagnetinio suderinamumo direktyvos 2004/108/EC [13].

Visos šiame poskyryje apžvelgtos gairės ir direktyvos perkeltos į Lietuvos Respublikos teisę atitinkamais įstatymais.

2.1.2 Lietuvoje EOL elektromagnetinę spinduliuotę reglamentuojantys teisės aktai

Lietuvoje veikia keletas struktūrinių organizacijų, kurios vienu ar kitu aspektu atsakingos už nejonizuojančiosios spinduliuotės įrenginių ir jų skleidžiamos spinduliuotės darbo ir gyvenamojoje aplinkoje sklaidą: Lietuvos Respublikos Ryšių reguliavimo tarnyba, Valstybinė nemaisto produktų

inspekcija, Valstybinė darbo inspekcija, Socialinė apsaugos ir darbo ministerija, Sveikatos apsaugos ministerija, Nacionalinė visuomenės sveikatos priežiūros laboratorija ir visuomenės sveikatos centrai.

Rengiant darbą buvo perskaityta ir peržiūrėta daugybė teisės aktų, įstatymų bei kitų norminių dokumentų, reglamentuojančių EML monitoringą Lietuvoje. Tačiau elektromagnetinių bangų maksimalų leistiną spinduliavimą, kuris nėra kenksmingas žmonių sveikatai, Lietuvoje reglamentuoja higienos normos, patvirtintos Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro įsakymais: HN 104:2011 „Gyventojų sauga nuo elektros oro linijų sukuriamų elektrinių laukų“ [26], HN 110:2001 „Pramoninio dažnio (50 Hz) elektromagnetinis laukas darbo vietose“ [40].

HN 104:2011 nustato 110 kV ir aukštesnės įtampos elektros oro linijoms ir joms priklausantiems įrenginiams, veikiantiems pramoniniu 50 Hz dažniu, taikomas EML parametrų leidžiamas vertes ir EML bendruosius matavimo reikalavimus gyvenamosios ir visuomeninės paskirties pastatų patalpose bei gyvenamojoje aplinkoje. Išsami šios HN svarbi EML monitoringui informacija yra pateikta 4 priedo 1 lentelėje.

HN 110:2001 taikoma darbo vietoms, kurios yra pramoninio dažnio (50 Hz) EML įtakos zonoje. Norma reglamentuoja leidžiamas EML parametrų skaitines vertes darbo vietose, kuriose yra pramoninio dažnio (50 Hz) EML; nustato EML parametrų matavimo reikalavimus, įvertinimo tvarką bei nurodo poveikio mažinimo darbo aplinkoje organizacines priemones. 3 priede pateikiamose lentelėse nurodyti leidžiami EL bei ML stipriai ir buvimo trukmė šių laukų aplinkoje.

2.2 EML nuo EOL ir jų poveikiai biologiniams objektams

Eksplatuojant EOL erdvėje aplink srovei laidžiąsias dalis, atsiranda stiprus EML, tiesiogiai įtakojantis biologinius objektus [71,72]. EML poveikio efektas įvertinamas sugeriamos elektromagnetinės energijos kiekiu biologiniam objektui esant po tiesiogine EOL EML spinduliuote. Pramoninio dažnio EML galima interpretuoti susidedančią iš dviejų praktiškai nesusietų tarpusavyje laukų EL ir ML. EL atsiranda, esant įtampai elektros įrenginių srovei laidžiose dalyse, o ML – tekant srovei per šias dalis. Todėl yra tikslinga šių laukų poveikius biologiniams objektams nagrinėti atskirai vieną nuo kito. Nustatyta, kad žmogaus kūnas bet kuriame EOL lauko taške sugeria apytiksliai 50 mažiau ML energijos negu EL energijos. Pavyzdžiui, tam tikrame taške 750 kV EOL MLS siekia 20—25 A/m, tuo tarpu, kai pavojinga MLS ribinė vertė yra 150—200 A/m). Todėl buvo padaryta išvada, kad EML neigiamas poveikis yra pagrįstas tik EL buvimu ir EL stipris yra normuojamas kV/m. [26] Šalia EOL skirtinguose erdvės taškuose EL stipris turi skirtingas reikšmes ir priklauso nuo nominalios perdavimo linijos įtampos, nuo vertikalios ir horizontalios atstumų tarp laukų matuojamo taško ir laidžiosios linijos dalies.

Tačiau pastaruoju metu moksliniame pasaulyje atsirado vis daugiau tyrimų, įrodančių ML žalingą įtaką biologiniams objektams. Remiantis tyrimais buvo nustatyta, kad ML neigiama įtaka turi būti įvertinama ne MLS modulių, bet MLS vektoriaus padėtimi objekto, kūno atžvilgiu [5,71].

2.2.1 EOL elektromagnetinių laukų įtaka žmogaus sveikatai

2.2.1.1 EOL elektrinis laukas

Remiantis užsienio mokslinių tyrimų rezultatais bei išvadomis[17,21,25], teigtina, kad gyventojų, gyvenančių namuose ar gyvenvietėse netoli aukštos įtampos EOL, sergamumas didėja. EL biologinio poveikio tyrimai nustatė, kad, esant elektros lauko stipriui apie 1 kV/m, šis laukas neigiamai įtakoja žmogaus nervų sistemą, kas, savo ruožtu, sukelia endokrininės sistemos ir medžiagų (vario, cinko, geležies ir kobalto) apykaitos sutrikimus, pažeidžiamos tokios organizmo fiziologinės funkcijos, kaip širdies smūgių ritmas, kraujospūdžio lygis, smegenų aktyvumas, apykaitos procesų eiga ir imuninės sistemos aktyvumas. Daug jautresni EL spinduliuotės šiluminiam poveikiui yra akies audiniai, centrinė nervų sistema, vyriškos sėklidės, dėl ilgalaikio poveikio gali pakisti kraujas.[21,30] Stiprių EL poveikis žmogaus organizmui ribojamas, nustatant apsaugos zonas (AZ) [26,40].

EOL aptarnaujantis personalas daugiausiai nukenčia nuo EL spinduliuotės. Techninės EOL priežiūros darbuotojų patikrinimai aptiko regėjimo funkcijos sutrikimą, spalvų jutos kitimą, regimojo vaizdo susiaurėjimą esant žaliai, raudonai ir ypač mėlynai spalvoms, tinklainės kraujagyslių pakitimus. Buvo atlikti 542 profesionalų, dirbančių aštuonias valandas per darbo dieną šalia EOL, sveikatos tyrimai ir pas kai kuriuos iš jų buvo nustatytas lytinio potraukio sumažėjimas, tendencijos depresijoms ir irzlumui. Taip pat buvo aptiktas kraujo limfocitų kiekio sumažėjimas [20,24].

2.2.1.2 EOL magnetinis laukas

Projektuojant ir eksploatuojant AĖOL, pagrindinis dėmesys buvo skiriamas ELS verčių nustatymui sanitarinės zonos ribose. MLS vertės link AĖOL yra žymiai mažesnės už pramoniniui dažniui nustatytas ribines vertes. Todėl buvo manoma, kad ML stipris nesukelia jokio žalingo poveikio žmogaus sveikatai. Tačiau pastaruoju metu įvairioje mokslinėje literatūroje pasirodo pranešimai, kad ML, turintys stipri, mažesnę už normuotą, sukelia padidintą riziką onkologinių susirgimų atsiradimui. Pavyzdžiui, JAV buvo užregistruoti keli vėžiu susirgimo atvejai, kai šia liga susirgo beveik visi daugiabučio namo, esančio netoli AĖOL, gyventojai.[30,21] Buvo pastebėta, kad vėžiu susirgo ne tik žmonės, ilgą laiką gyvenantys šituose namuose, bet ir naujagimiai, kurių mamos nėštumo metu gyveno šiuose namuose. Skirtingai negu EL, kuri žmogus pajunta iš karto, mažo intensyvumo ML žmogus nejaučia, bet jų poveikis gali sukelti ne tik susirgimą, bet ir turėti pasekmes naujai žmonijos kartai.

Daugelis mokslininkų pripažįsta hormono melatonino [25] reprodukcijos sumažėjimą žalingiausiu ML poveikiu žmogaus sveikatai. Melatoninas, slopinantis vėžio ląstelių dauginimąsi, gaminasi žmogaus organizme nakties metu.

Dabartiniu metu pramoninio dažnio ML poveikis yra ribojamas MLS normuotų verčių moduliais, neįvertinant šio stiprio vektoriaus krypties. Tačiau MLS vektoriaus padėties kitimas žmogaus kūno atžvilgiu nulemia įvairaus dydžio indukuotų srovių žmogaus kūne atsiradimą, tiesiogiai lemiančių ML poveikio sunkumo lygį [5,11]. Tyrimai įrodė, kad pavojingiausia yra ML stiprio vektoriaus vertikaloji kryptis, netgi tuo atveju, kai žmogus yra pakankamai toli nuo AĮEOL [71]. Kai ML stiprio vektorius yra nukreiptas vertikaliai žmogaus kūno atžvilgiu, jis indukuoja pakankamai didelio tankio (apie 130,μA/m) sroves, tekančias išilgai žmogaus kūne. Jei dėl kokių nors priežasčių žmogus yra po AĮEOL, pavyzdžiui, dėl remonto darbų, esant vertikaliai ML stiprio vektoriui padėčiai, jo kūne išilgai tekančios srovės tankis padvigubėja.[72,30]

2.2.1.3 Susirgimo vėžiu statistika

Pasaulinė sveikatos saugos organizacija surinko daugelio šalių tyrimus, siejamus su vėžio susirgimo atsiradimo priežastimis [17]. Viena iš priežasčių yra gyvenimas arba ilgalaikis buvimas šalia EOL arba AĮEOL. Buvo išnagrinėtos 29 tūkstančių vaikų iki 15 metų, nuo pat gimimo gyvenančių šalia EOL, sveikatos stebėjimo kortelės. Pasirodo, kad rizika susirgti vėžiu yra 20%, kai atstumas nuo EOL sudaro 200 m – 600 m ir išauga iki 70%, kai atstumas nuo EOL sudaro mažiau negu 200 m. Tyrimais buvo įrodyta, kad apytiksliai vaikų susirgimas leukemija kas 5 iš 400 atveju yra siejamas su AĮEOL, kas sudaro apie 1% nuo bendro skaičiaus visų susirgusiųjų leukemija vaikų visame pasaulyje.[11,20]

Švedijos mokslininkai išanalizavo duomenis apie susirgimo vėžiu dažnumą tarp asmenų, gyvenančių mažiau negu 300 m atstumu nuo AĮEOL. Grupėje iš 400 tūkstančių žmonių buvo aptikti 142 vaikų, turinčių įvairių rūšių piktybinių auglių ir 548 suaugusiųjų su smegenų naviku arba leukemija. Taip pat buvo ištirta sveikatos būklė jaunimo iki 18 metų, gyvenančio 150 m atstumu nuo EOL. Pas juos du kart daugiau pasitaiko nervų sistemos sutrikimų ir leukemija.[17,21]

2.2.2 EOL poveikis gyvajai aplinkai

2.2.2.1 Augalija

Bandymai su augalais buvo atliekami talpinant į dirbtinius įvairaus stiprio (0-50 kV/m) EL įvairius augalus. Tyrimo metu buvo pastebėtas lapų audinių pažeidimas, esant EL stipriui (20-50 kV/m). Tuo tarpu augalai sukulentai visiškai nebuvo pažeidžiami, o kviečių daigai turėjo pačią mažiausią EL

atsparumo ribą - 20 kV/m[73]. Daroma išvada, kad labiausiai tikėtinas augalų audinių pažeidimo mechanizmas yra šiluminis.

Audinio pažeidimas vyksta tuomet, kai EL stipris tampa pakankamai didelis ir sukelia lapo kraštuose karūnos reiškinių, dėl kurio per lapo kraštelių teka didelio tankio karūnos srovė. Šiluma, išsiskirianti augalo audiniuose, sukelia siauro sluoksnio ląstelių žuvimą, jos labai greitai netenka vandens, džiūsta ir susitraukia [63]. Tačiau šis procesas turi tam tikras ribas ir išdžiūvusio augalo paviršiaus plotas nėra didelis [73].

Lapuočių bandinių, augančių po ir šalia 110 kV EOL, tyrimai įrodė, kad savitosios EML spinduliuotės poveikis pasireiškia medžio lapų formos pasikeitimu. Bandinių, esančių 15-30, 60-90, 120 ir 165-210 m atstumu nuo linijos, lapų ilgis didėja, tuo tarpu kai jų plotis buvo žymiai mažesnis už sveikojoje aplinkoje augančio lapuočio lapus ir nesikeičia tolstant nuo linijos. Taip pat pastebimai keičiasi karotinoidų ir chlorofilų kiekiai bandinių lapuose [66].

2.2.2.2 Gyvūnija

AĮEOL EML neigiamai veikia gyvus organizmus. Moksliniais tyrimais buvo nustatyta EL stiprio ribinė vertė 160 kV/m, kuriam esant eksperimentuojamo gyvūno reakcija staigiai keičiasi. Pastebėta, kad gyvūnų, kurie buvo didelio stiprio EL, elgesys pasižymi tam tikru nerimu ir susijaudinimu. Kai kuriems žinduoliams (avims, karvėms) EOL įtaka pasireiškia imuninio aktyvumo sumažėjimu. Genetinių pasikeitimų nebuvo aptikta. Žemesnio nei 160 kV/m EL stipris jokios įtakos gyvūnams nesukelia. Daugiau negu kiti gyvūnai EL jautresni yra kanopiniai. Šių gyvūnų kanopos yra geri izoliatoriai. Gyvųjų organizmų kūnai yra laidūs elektros srovei. Izoliuotas nuo žemės paviršiaus laidus elektros srovei kūnas įgauna elektrinį potencialą. Šis potencialas priklauso nuo kondensatorių talpų santykio, vienas iš kurių žemė-kūnas, o kitas – AĮEOL laidininkai. Kuo mažesnė yra kondensatoriaus žemė-kūnas talpa (kuo storesnė yra gyvūno kanopa), tuo didesnis yra potencialas. Žemės paviršiaus atžvilgiu jis gali siekti 10 kV[73].

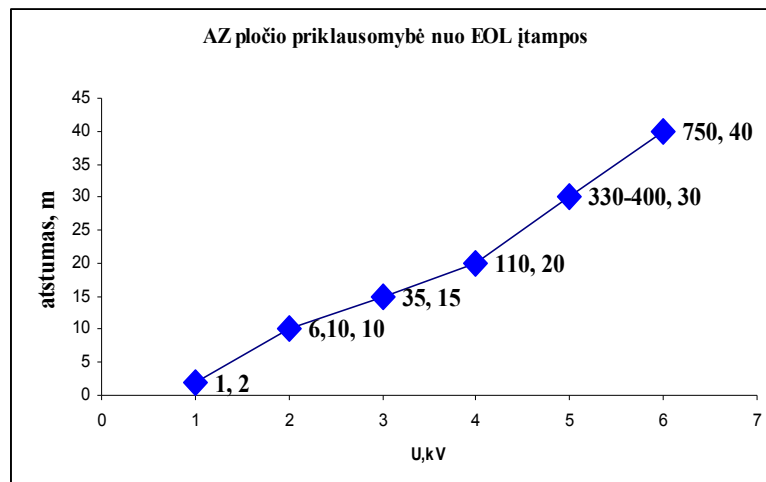
Tyrinėjant 500 kV EOL poveikį paukščiams, buvo nustatyta, kad nuo susidūrimų su laidais žūsta 1,5 būtybių 1 EOL km per metus [72].

EOL EL veikimo aplinkoje vabzdžių elgesys keičiasi. Stebint bites, buvo užfiksuotas padidintas agresyvumas, susijaudinimas, gebėjimo veikti ir našumo sumažėjimas, bičių motinėlių praradimo tendencija, anomalinis propoliso kaupimasis. Vabalų, uodų, drugelių ir kitų skraidančių vabzdžių elgsenos kitimas pasireiškia judėjimo krypties pasikeitimu mažesnio lauko lygio link. Labiausiai paplitusi vabzdžių reakcija artėjant prie EOL yra orientacijos erdvėje praradimas ir netgi kritimas [54].

Ypatingą įdomumą sukelia Rusijos mokslininkų tyrimai. Jų tyrimų tikslas buvo nustatyti dvigeldžių moliuskų populiacijos rūšies ir amžiaus struktūrinius pasikeitimus, vidutinį jų populiacijos skaičių ir dydį, esant skirtingiems atstumams nuo AĮEOL. Šiame moksliniame tyrime moliuskai buvo nagrinėjami, kaip aplinkos elektromagnetinės taršos biologiniai indikatoriai. Moliuskų populiacijos amžiaus struktūros analizė parodė, kad EML spinduliuojamame upės ruože daugumos stebimų gyvūnų amžius siekdavo 3–5 metus, tuo tarpu kai maksimali jų gyvenimo trukmė siekia 7 metus. Nežymus 1–2 metų gyvūnų skaičius buvo užregistruotas 0,5 m upės gelmėje. Esant upės gelmei 1m visuose EML spinduliuojamuose ruožuose buvo aptiktas nykstamai mažas jaunujų gyvūnų kiekis. Todėl teigtina, kad EOL spinduliuotė ypač veikia jaunus moliuskų populiacijos individus[58].

2.3 Apsauga nuo EOL EML spinduliuotės

Dirbančios EOL laidai sukuria supančioje laidus erdvėje pramoninio dažnio EML. Atstumai, kuriais šie laukai gali spinduliuoti, gali siekti kelis dešimt metrų. EOL apsaugos zonos (ši zona dar vadinama sanitarine) plotis (riba) priklauso nuo vardinės oro tiekimo linijos įtampos.[12,72,73] Kuo vardinė įtampa didesnė, tuo apsaugos zona yra platesnė. Lietuvoje tinklų sistemos dažnis yra 50 Hz ir naudojamos įtampos iki 330 kV. Netoli Ignalinos yra pastatyta 750 kV linija, bet ji dirba 330 kV įtampa. Kaip jau buvo paminėta šio darbo pradžioje, saugus EL lygis yra priimtas 1,0 kV/m[24,40]. Iki tokio lygio EL sumažėja esant atstumams, kuriuos nustato elektros tinklų apsaugos taisyklės [12]. SAZ nustatymo reikalavimai, priklausomai nuo EOL įtampos bei vietos, yra pateikti 6 priede. Grafiška interpretacija SAZ pločio priklausomybės nuo vardinės EOL įtampos yra parodyta 2.1 paveiksle.



2.1pav. EOL SAZ plotis

ML SAZ riba priklauso nuo tekančios srovės dydžio. Kadangi EOL apkrovos kitimas priklauso ne tik nuo paros meto, bet ir nuo sezoniškumo, saugos zonos plotis taip pat keičiasi ir todėl dabartiniu metu EOL ML nėra normuojamas [72,77].

2.3.1 EML mažinimas keičiant EOL konstrukciją

2.3.1.1 Atstumo tarp fazių kitimas

Normuojamas EL stipris yra tiesiogiai susietas su linijos parametrais: apkrautumu, linijos laidininkų atstumu nuo žemes paviršiaus viduriniame tarpatramio taške ir atstumu tarp fazių [12,72]. Vienas iš metodų, taikomų, siekiant sumažinti EL stiprį po EOL, yra atstumų tarp fazinių laidų mažinimas. EOL vienoje atramoje turintys skirtingos įtampos grandinės su sumažintais atstumais tarp fazinių laidininkų vadinami kompaktiniais. KEOL [76] gali būti viengrandininiai ir daugiagrandininiai. KEOL konstrukcijos pasirinkimas įgalina reguliuoti linijos elektros parametrus EML parametru tarp fazinių laidininkų, o taip pat linijos supančioje aplinkoje, kitimo dėka. Artimos fazių tarpusavio padėtys sustiprina EML linijos viduje, kurio dėka padidinama EOL praleidžiamumo geba ir pagerinami jos techniniai bei elektriniai parametrai. Tokiu būdu EML susilpnėjimas išorinėje fazinių laidininkų atžvilgiu aplinkoje gerina ekologinę būklę šalia EOL [2,6,32,76].

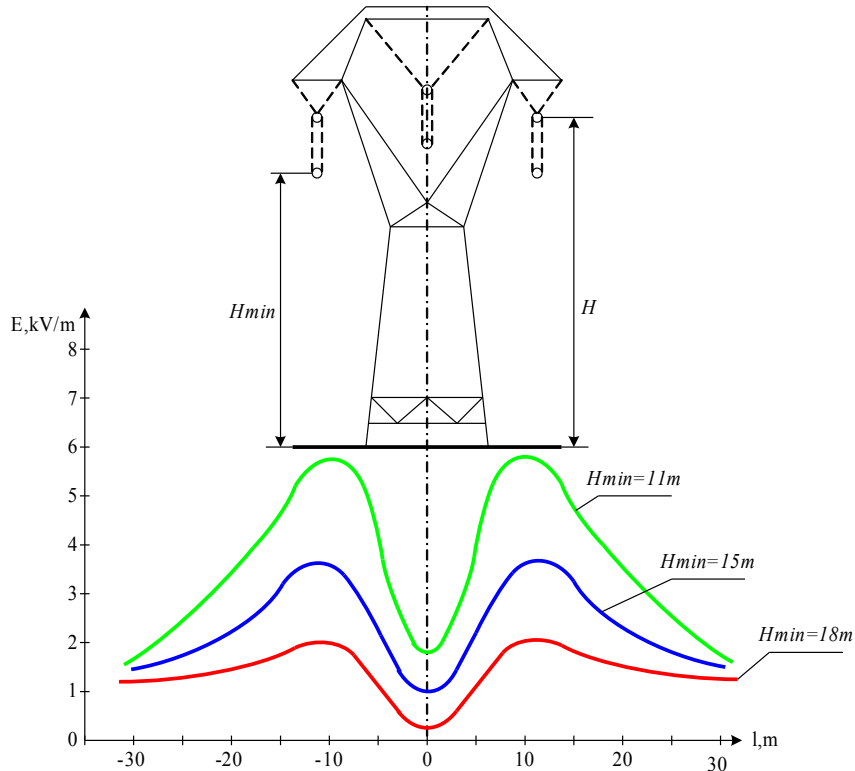
2.3.1.2 Laidų pakabinimo aukščio didinimas

KEOL rengimas leidžia padidinti laidininkų atstumą nuo žemės paviršiaus ir tokiu būdu sumažinti EL stiprį po linija, tačiau, pavyzdžiui, 500 kV - 750 kV AĖOL stiprio lygis išlieka pakankamai didelis, ypač kai linijos įrengtos gyvenamoje vietovėje. Fazinių laidininkų pakabinimo aukščio didinimas įgalina žymiai sumažinti EL stiprį, nes EL stiprio maksimumai (2.2 pav.) nutolsta nuo kraštinių fazių projekcijų į žemę. Skaičiavimais buvo įrodyta, kad, 300 kV ir 500 kV linijose, esant minimaliam laidininkų pakabinimo aukščiui, o 750 kV linijai bet kuriam pakabinimo aukščiui, EL stiprio absoliutieji maksimumai yra 1-3 m atstumu nuo kraštutinių fazių projekcijų į žemę. Tuo tarpu erdvėje tarp fazių EL stipris šiek tiek didėja (apytiksliai 0,05 kV/m kas vienam aukščio kitimo metrui) [2,32,72,73].

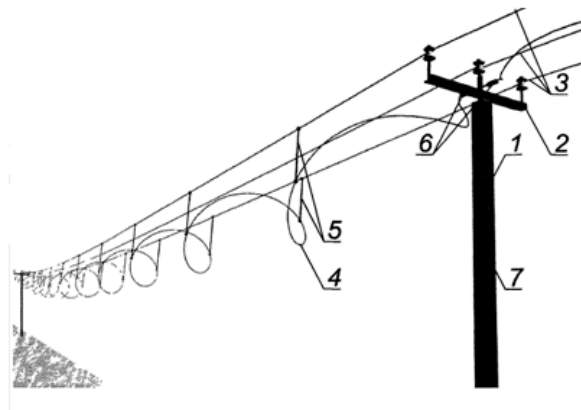
2.3.1.3 Ekranuojantys lynai

Vienų iš būdų sumažinti EL stiprį yra ekranuojančių lynų rengimas (2.2 pav.). Šie lynai yra įtempiami po EOL laidininkais intensyvaus transporto bei gyvūnų eismo, o taip pat žemės ūkio darbų

vietose. Įžemintuose lynuose sukaupti krūviai dalinai kompensuoja linijų laukus ir sumažina lauko stiprį nepriklausomai nuo lyno spindulio. Pavyzdžiui, norint sumažinti 750 kV AĖOL EL stiprį iki 0 kV/m, reikia pakabinti 11 tokių ekranuojančių lynų. Reikėtų pažymėti, kad ekranuojančių lynų naudojimas reikalauja laidų pakabinimo aukščio didinimo ir savo ruožtu atramų aukščio didinimo. Todėl tokios EL stiprio mažinimo prevencinės priemonės žymiai padidina EOL kainą. Todėl ekranuojantis lynai naudojami tik viešose, intensyvaus transporto bei gyvūnų eismo, o taip pat žemės ūkio darbų vietose. Ekranuojančių lynų naudojimas leidžia sumažinti EL stiprį dvigubai, o kartais ir trigubai [2,14,16,18,19].



2.2 pav. 380 kV AĖOL EL stiprio priklausomybė nuo linijos gabarito [73].



2.3 pav. EOL įrengtos su ekranuojamu lynu sudedamosios dalys:

1- gelžbetonio atrama; 2 – įžeminta traversa; 3 – faziniai laidai; 4 – ekranuojantis lynas; 5 – dielektrinė pakaba; 6 -srovę ribojantis elementas; 7 - šungito danga

2.3.2 Kiti EML mažinimo būdai

EL stiprio ribojimas po EOL gali būti pasiekiamas nekeičiant linijų konstrukcijos, bet naudojant dirbtinai pasodintą augaliją. Medžiai ir krūmynai turi analogišką metaliniams ekranams ekranuojantį efektą. Ši savybė yra sėkmingai naudojama EL stiprio mažinimui aukštyje, kuris atitinka vidutinio žmogaus ūgį. Apsauginio augalijos (dauguma atvejų tai yra krūmynai) efekto esmė yra pagrįsta savituoju krūmynų laidumu. Krūmynai pakelia žemės potencialą į didesnę negu žmogaus ūgis aukštį, ko dėka yra sudaromas ekranuojantis efektas.[14,18,72,73]

Amerikos mokslininkų tyrimais buvo įrodyta, kad efektyvus EML spinduliuotės nuo EOL slopinimas gali būti pasiektas panaudojant laidųjį kontūrą, maitinamą valdoma srove. Kontūras įrengiamas išilgai perdavimo linijos (2.4 pav.), arba šalia, saugomoje teritorijoje. Taikant skaičiavimus, nustatomi laidžiojo kontūro parametrai ir tiksliai šio kontūro įrengimo vieta. Kontūro srovė nustatoma automatine valdymo sistema. Prietaiso modelis buvo ištirtas ir patikrintas laboratorijos sąlygose ir šiandien yra sėkmingai naudojamas viešose vietose. Šis metodas yra pagrįstas priešingų EML pirmajam EML kūrimu. Tai pasiekama, analizuojant egzistuojančią nuo EOL EML ir sintezuojant laidžiojo kontūro pagalba EML analogišką pagal formą ir amplitudę pirmajam, bet turinčią priešingą fazę[7].



2.4 pav. Apsaugančiojo nuo EOL spinduliuotės laidžiojo kontūro modelis [7]

III. ANALITINĖ DALIS

3.1 EML skaičiavimo metodikos apžvalga

Remiantis duomenimis pateiktais pirmuosiuose šio darbo skirsniuose, EOL EML žalingas poveikis žmogui ir gyvosios aplinkos būtybėms yra neabejotinas. Todėl šiuos laukus reikia pastoviai stebėti (turima omenyje – matuoti) ir aptikus, kad EML lygiai viršija nustatytas ribines vertes, pirmiausia reikia nustatyti EML lygio padidėjimo priežastį, o po to EML monitoringo etape privaloma imtis saugos ir EML stiprių mažinančios priemonių. Taip pat naujai projektuojant EOL būtina iš anksto skaičiuoti būsimos linijos EL ir ML stiprius. Todėl, numatant EML spinduliuotės stiprius, yra itin svarbu parinkti tiksliausią EML skaičiavimo metodą.

EOL elektros ir magnetinių laukų stiprius galima skaičiuoti taikant vieną iš dviejų būdų: analitinį arba skaitinį [57,59]. ASM pagrindinis privalumas yra paprastumas. Skersinio pjūvio atžvilgiu EOL geometriniai matmenys yra nepalyginamai maži, lyginant juos su 50 Hz elektromagnetinės bangos ilgiu ($\lambda=6000\text{km}$), todėl banginiai procesai linijos skersiniame pjūvyje gali būti paneigiami. Sinuso dėsnio EOL kintančiam laidų potencialams daroma prielaida, kad jie palyginus su lauko parametrais kinta labai lėtai, ir tokiu būdu bet kurio laiko momento lauko parametrams su dideliu tikslumu skaičiuoti gali būti taikomi elektrostatikos dėsniai. Taip pat ASM privalumai yra siejami su galutinės formulės taikymu, kuri leidžia gauti skaitinį rezultatą bet kurioms kintamųjų reikšmėms. Be to, taikant galutinę formulę, galima išanalizuoti ryšį tarp bet kurio kintamojo ir rezultato. Visi SSM reikalauja daug darbo imlumo, kas yra šių metodų pagrindinis trūkumas. Taip pat ASM trūkumu yra pripažįstama magnetinės indukcijos arba ML stiprio priklausomybė nuo taško koordinatės. Kartais taikant ASM, analitinių išraiškų galutinį variantą pasiseka gauti arba tik nedideliame paprastųjų atvejų kiekiui, arba galutinės formulės yra gaunamos labai sudėtingos, ir rezultatai yra pateikiami parametrinių kreivių pavidalu. Manoma, kad dabartiniu metu ASM galimybės yra išsemtos ir ateitis priklauso SSM. Iš SSM galima išskirti tris plačiausiai naudojamus: baigtinių skirtumų, lygčių integravimo ir baigtinių elementų metodus. Pastaruoju metu labiausiai yra paplitęs

baigtinių elementų metodas (finite elements method – FEM). FEM taikymas EML skaičiavimuose duoda labai aukštą tikslumą.

Analizuojant informaciją [2, 3, 4, 5, 6, 22, 32, 38, 41, 45, 46, 47, 48], tiesiogiai siejamą su EML skaičiavimo metodais, buvo padarytos išvados, kad EOL EML skaičiavimai yra padaromi norint:

- palyginti tam tikrus du skaičiavimo metodus tarpusavyje [48,22,41];
- esamiems EOL EML spinduliuotės lygiui nustatyti, kai nėra galimybės atlikti natūrinius laukų matavimus [32,3,4];
- tam tikro skaičiavimo metodo tikslumui nustatyti, kai eksperimentiškai gauti EML matavimo rezultatai yra palyginami su apskaičiuotomis vertėmis [2, 45,46];
- modeliuoti konstrukcinius EML spinduliuotės mažinimo sprendimus, kai natūriniais matavimais buvo nustatyti neleistini šių spinduliuočių lygiai [32,38,47];

Dažniausiai EML skaičiavimams taikomi metodai yra pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė.EML skaičiavimo metodai

| Elektros laukas | Magnetinis laukas |
|--|---|
| Finite Element Method (FEM) – Baigtinių elementų metodas (SSM) | Finite Element Method (FEM) – Baigtinių elementų metodas (SSM) |
| | ANFIS metodika(SSM) Neraiškaus loginio išėjimo sistemos, pagrįstos adaptyvioju tinklu. |
| Simetrijos (atvaizdų) komponentų metodas (ASM) | Simetrijos (atvaizdų) komponentų metodas (ASM) |
| Biot-Savart dėsnis (ASM) | Biot-Savart dėsnis (ASM) |

3.1.1 Baigtinių elementų metodas

Baigtinių elementų metodas – skaitinis metodas, leidžiantis rasti apytikslius EML aprašančių diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis sprendinius, nes analitiškai šių lygčių tikslūs sprendiniai nėra paprasta rasti. Metodo esmė – sritis, kurioje ieškomas sprendinys, suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Po to daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomas kinta nesudėtingu dėsnio, ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama algebrinių lygčių sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas [47,41,4,6,38].

3.1.2 ANFIS metodas

Ši skaičiavimo metodika apjungia neraiškos logikos funkcijas ir neuronų tinklus [1]. ANFIS modelio įėjimai yra plokštumos taškų koordinatės (x, y), kuriuose norima apskaičiuoti EL ir ML

intensyvumus. Priskiriant modelio įėjimams tik koordinačių reikšmes, nustatomos ELS ir EMS vertės, priklausančios tik nuo linijos laidžių dalių atstumų. Galima įtraukti daugiau kintamųjų, tokių kaip, pavyzdžiui, žemės laidumą, fazinių laidininkų koordinatas bei matmenis ir kt. Kai EOL modelio įėjimo kintamųjų skaičius yra ribojamas iki dviejų, maksimali santykinė paklaida, lyginant su natūriniais EML matavimais, neviršija 4%. [48]

3.1.3 Simetrijos (atvaizdų) komponentų metodas

Skirtingai nuo kitų 3.1 lentelėje pateiktų metodų, šis metodas yra analitinis ir yra plačiai taikomas EL apskaičiavimams daug laidų turinčioms EOL. Metodo esmė yra pagrįsta laidžiojo paviršiaus (žemės) keitimu dielektriku, kurio dielektrinė skvarba priimama lygi vakuomo dielektrinei skvarbai ($\epsilon = \epsilon_0$), o žemės paviršinių krūvių keitimu atvaizduojami laidų krūviai su priešingu ženklu. Tokiu būdu laukų parametrų apskaičiavimas bet kuriame taške gali būti realizuotas superpozicijos metodu, t.y. sumuojant atitinkamus pačių laidų ašinius krūvius ir jų atvaizdų sudedamuosius [3,22,41,46,32,45].

3.1.4 Biot - Savart dėsnio taikymas ML parametrams nustatyti

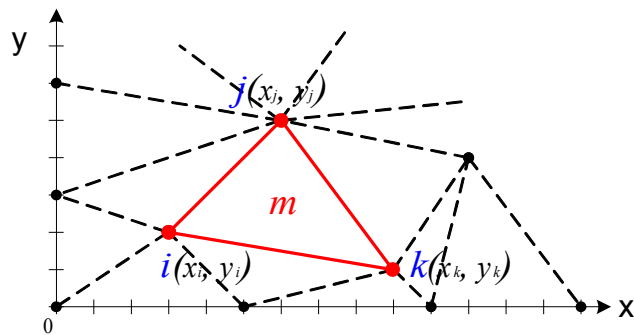
Šis ML ASS yra pagrįsta Biot-Savart dėsniu: maža laidininko atkarpa tekanti elektros srovė sukuria erdvės taške magnetinį lauką, kurio magnetinės indukcijos vektorius B yra tiesiai proporcingas srovei, atvirkščiai proporcingas atstumo nuo taško iki laidininko kvadratui ir yra statmenas srovės tekėjimo kryptčiai bei atstumo vektoriams. Metodo esmė: kiekvienas laidininkas yra padalijamas į atitinkamų skaičių atkarpų, ir kiekviena iš jos laikoma tiesiniu segmentu arba tiesiog tiese. Po to, esančiame šalia šios linijos segmento taške ML, sukuriama šio segmento, apskaičiuojamas remiantis žinomomis formulėmis. Šio ML skaičiavimo metodo rezultatai yra pakankamai tikslūs, ir todėl Biot-Savart dėsnis yra sėkmingai taikomas EOL ML skaičiuoti [5,32,38,22,45,3,42].

Pasak informacijos šaltinių [8, 70], geriausiu metodu, taikomu EML skaičiavimams, yra pripažintas FEM metodas.

3.2 FEM metodo esmė

Metodo esmė seka iš jo pavadinimo. Sritis, kurioje ieškomas diferencialinių lygčių sprendinys, yra išskaidoma į baigtinių sričių (elementų) kiekį (3.1 pav.). Kiekviename iš elementų yra laisvai pasirenkama aproksimuojanti funkcija. Paprasčiausiu atveju – tai yra pirmos eilės polinomas. Už savo elemento ribų aproksimuojanti funkcija yra lygi nuliui. Funkcijų reikšmės elementų ribose (mazguose) yra iš anksto nežinomas uždavinio sprendimas. Įprastai aproksimuojančių funkcijų koeficientai yra ieškomi remiantis

ribose tarp elementų (mazguose) kaimyninių funkcijų reikšmių lygybės sąlyga. Po to šie koeficientai yra išreiškiami funkcijų reikšmėmis elementų mazguose ir yra sudaroma algebrinių lygčių sistema. Tokios sistemos lygčių skaičius yra lygus mazgų, kuriuose yra ieškomas pradinės sistemos sprendinys, skaičiui – yra tiesiai proporcingas elementų skaičiui, ir ribojamas tik pasirenkamosios kompiuterinės programos galimybėmis. Kiekvienas iš elementų yra susietas su ribotu kaimyninių elementų kiekiu. Todėl linijinių algebrinių lygčių sistema turi išretintą pavidalą, kas žymiai supaprastina sistemos sprendinio radimą.



3.1 pav. Tiriamosios srities diskretizavimas trikampių elementais [8]

Taikant FEM metodą EML skaičiavimams, pagrindinė sudaromos lygčių sistemos forma gali būti gauta skirtingais būdais: tam tikro funkcionalo minimizavimo metodu [52,70]; svertinių paklaidų metodu, (pavyzdžiui, Galiorkino metodu [8,69]); mažiausių kvadratų metodu. Galiorkino metodas yra pagrįstas skaliarinio magnetinio (elektrinio) potencialo lygties tiesioginiu diferencijavimu, o funkcionalo minimizavimo metodas – dauguma atveju sukauptos lauke energijos minimumo principu [8]. Šiam tikslui turi būti išvesta integralinė lygtis, išreiškianti lauke sukauptą energiją, ir išdiferencijuota pagal mazgų potencialus. Žinant pradinis duomenis, papildytus kraštinėmis sąlygomis, ir energetines priklausomybes, sudaroma lygčių sistema, kuri įgalina apskaičiuoti visų baigtinių elementų ieškomus polinomų koeficientus. Nustačius potencialus, galima apskaičiuoti EL arba ML stiprius, magnetinę indukciją ir kitus laukų parametrus bet kuriame lauko mazge.

3.2.1 FEM metodo taikymo EOL EML skaičiavimuose matematinis aprašymas

EL, sukuriama aplink elektros energijos tiekimo oro linijas, stiprio (E) matematinis modelis paprastai išreiškiamas bangų lygtimi (Helmholtz's lygtimi):

$$\nabla^2 E + \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r E = -\rho_{ext} \quad (3.1)$$

Čia: ∇^2 - nablos (graiškos raidės pavadinimas – „nabla“) kvadratas; tai yra diferencijavimo vektorinis antros eilės operatorius, kurio konkreti užrašymo forma nustatoma priklausomai nuo koordinatinių sistemų, kurioje bus atliekami skaičiavimai;

μ - laidininkų savitasis laidumas, $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$;

κ - laidininkų absoliučioji magnetinė skvarba, H/m ;

ϵ - laidininkų supančios aplinkos (oro) absoliučioji dielektrinė skvarba, F/m ;

E - elektros lauko stipris, V/m ;

ML, sukuriama aplink oro elektros srovės tiekimo linijų, intensyvumo (H) matematinis modelis taip pat išreiškiamas bangų lygtimi, pasinaudojant išraiška:

$$\nabla^2 H + \kappa H = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla^2 H + \mu \epsilon \frac{dH}{dt} + \kappa \frac{d^2 H}{dt^2} = 0 \quad (3.3)$$

Nesunkiai galima pastebėti panašumus formulėse (3.1) ir (3.3). Tai yra dėl to, kad formulė (3.3) yra gaunama pakeičiant elektros lauko stiprį (E) formulėje (3.1) į magnetinio lauko stiprį (H). Šiame darbe yra nagrinėjamos kintamos srovės sistemos, kurių EL ir ML vektoriai kinta laike harmoniniu dėsniu. Todėl, pavyzdžiui, trimatėje erdvėje EL stiprio vektorius, užrašomas šitaip:

$$\vec{E}(t) = E_{mx} \cos(\omega t + \phi_x) \mathbf{1}_x + E_{my} \cos(\omega t + \phi_y) \mathbf{1}_y + E_{mz} \cos(\omega t + \phi_z) \mathbf{1}_z \quad (3.4)$$

Čia: E_{mx} , E_{my} , E_{mz} - ELS amplitudžių projekcijos į X, Y ir Z ašis, V/m ;

ω - elektromagnetinių virpesių dažnis, Hz ;

ϕ_x , ϕ_y , ϕ_z - pradinės fazės, rad ;

Remiantis Eulerio formule:

$$\cos x = \text{Re} \{ e^{jx} \} \quad (3.5)$$

(3.4) formulės, pavyzdžiui, pirmajam sumos nariui galima užrašyti:

$$\vec{E}(t) = E_{mx} \cos(\omega t + \phi_x) \mathbf{1}_x + E_{mx} \text{Re} \{ e^{j(\omega t + \phi_x)} \} \mathbf{1}_x + E_{mx} e^{j(\omega t + \phi_x)} \mathbf{1}_x \quad (3.6)$$

(3.6) lygties išraiška yra vadinama EL stiprio vektoriaus kompleksine forma ir gali būti perrašoma šitaip:

$$\vec{E}(t) = E_{mx} e^{j(\omega t + \phi_x)} \mathbf{1}_x + E_{mx} \star e^{j\omega t} \star e^{j\phi_x} \mathbf{1}_x \quad (3.7)$$

(3.7) lygtyje narys $E_{mx} \star e^{j\phi_x}$ yra vadinamas kompleksine amplitude ir žymimas:

$$E_{mx} \star e^{j\phi_x} = \overset{\text{ss}}{E} \quad (3.8)$$

Todėl lygtis (3.4) galime užrašyti šitaip:

$$\bar{E}(t) \dagger E_{mx} \star e^{j\omega t} \hat{G} E_{my} \star e^{j\omega t} \hat{G} E_{mz} \star e^{j\omega t} \dagger E \star e^{j\omega t} \quad (3.9)$$

Kompleksinių amplitudžių metode diferencijavimas pagal laiką t atitinka šiems veiksams:

$$\frac{d}{dt} \dagger \omega j \quad (3.10)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \dagger \hat{G}_j \omega^2 \dagger \hat{H} \omega^2 \quad (3.11)$$

Tada lygtį (3.1) galima užrašyti šitaip:

$$\mathbf{x}^2 E \hat{H} j \omega \dots \star E \hat{G} \omega^2 \star E \dagger 0 \quad (3.12)$$

Modeliuojamos EOL sistemos yra nagrinėjamos dvimatėje Dekarto sistemoje (x, y) , todėl, įvertinant, kad

$$\mathbf{x}^2 \dagger \frac{d^2}{dx^2} \hat{G} \frac{d^2}{dy^2} \quad , \quad (3.13)$$

lygtis (3.12) perrašoma šitaip:

$$\frac{d^2}{dx^2} \star E \hat{G} \frac{d^2}{dy^2} \star E \hat{H} \star E \star j \omega \dots \hat{H} \omega^2 \star E \dagger 0 \quad (3.14)$$

Padalijus iš \star abi lygties puses, lygtis (3.14) perrašoma:

$$\frac{d^2}{dx^2} \dagger \frac{1}{\star} \frac{dE}{dx} \dagger \hat{G} \dagger \frac{d^2}{dy^2} \dagger \frac{1}{\star} \frac{dE}{dy} \dagger \hat{H} E \star j \omega \dots \hat{H} \omega^2 \dagger 0 \quad (3.15)$$

Tačiau analitiškai šios lygties tikslų sprendimą rasti nėra paprasta. Todėl rasti apytikslius lygties (3.15) sprendimus buvo pasirinktas FEM metodas.

Remiantis FEM metodu, vektorinis EL potencialas ϕ kiekvieno trikampio (3.1 pav.) viduje m aprašomas lygtimi:

$$\phi(x, y) \dagger \phi_i N_i \hat{G} \phi_j N_j \hat{G} \phi_k N_k \quad (3.16)$$

Čia: ϕ_i, ϕ_j ir ϕ_k - EL potencialo reikšmės trikampio m viršūnėse i, j ir k atitinkamai;

N_i, N_j ir N_k yra trikampio m viršūnių i, j ir k tiesinės bazinės funkcijos, kurios išraiškos yra:

$$\begin{aligned} N_i &\dagger \frac{a_i \hat{G} b_i x \hat{G} c_i y}{2S_{\Delta m}} \\ N_j &\dagger \frac{a_j \hat{G} b_j x \hat{G} c_j y}{2S_{\Delta m}} \\ N_k &\dagger \frac{a_k \hat{G} b_k x \hat{G} c_k y}{2S_{\Delta m}} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Čia: $S_{\Delta m}$ – yra trikampio plotas;

$a_i, b_i, c_i ; a_j, b_j, c_j ; a_k, b_k, c_k$ - yra bazinių funkcijų koeficientai.

Bazinių funkcijų koeficientai apskaičiuojami remiantis formulėmis:

$$\begin{aligned} a_i & \dagger x_j y_k \text{ H } x_k y_j & b_i & \dagger y_j \text{ H } y_k & c_i & \dagger x_k \text{ H } x_j \\ a_j & \dagger x_k y_i \text{ H } x_i y_k & b_j & \dagger y_k \text{ H } y_i & c_j & \dagger x_i \text{ H } x_k \\ a_k & \dagger x_i y_j \text{ H } x_j y_i & b_k & \dagger y_i \text{ H } y_j & c_k & \dagger x_j \text{ H } x_i \end{aligned} \quad (3.18)$$

Čia: $\{x_i; y_i\}$ nagrinėjamojo trikampio viršūnės i koordinatės;

$\{x_j; y_j\}$ nagrinėjamojo trikampio viršūnės j koordinatės;

$\{x_k; y_k\}$ nagrinėjamojo trikampio viršūnės k koordinatės.

Bet kurio diskretizavimo srities trikampinio elemento plotas gali būti apskaičiuotas:

$$\begin{aligned} S_{\Delta m} & \dagger \frac{\{x_i b_i \text{ H } x_j b_j \text{ H } x_k b_k\}}{2} \\ S_{\Delta m} & \dagger \frac{\{y_i c_i \text{ H } y_j c_j \text{ H } y_k c_k\}}{2} \\ S_{\Delta m} & \dagger \frac{a_i \text{ H } a_j \text{ H } a_k}{2} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Įvertinus (3.17) ir (3.18), lygtis (3.16) gali būti perrašyta šitaip:

$$\{f_x, y\} \dagger \frac{\{f_i a_i \text{ H } b_i x \text{ H } c_i y\} \text{ H } \{f_j a_j \text{ H } b_j x \text{ H } c_j y\} \text{ H } \{f_k a_k \text{ H } b_k x \text{ H } c_k y\}}{2 * S_{\Delta m}} \quad (3.20)$$

Baigtinių elementų metodo skaičiavimo lygtys gaunamos minimizuojant funkcionalą dvimatėje srityje Ω , t.y. integruojant lygtį (3.15) ties srities Ω , kuri iš anksto yra padalijama į trikampius elementus. Trikampių elementų skaičius yra pasirenkamas laisvai. Šie elementai, turintys viename taške bendrą viršūnę, dengė visą EML skaičiavimo sritį ir nesikerta tarpusavyje.

$$\int_{\Omega} N_n \left\{ \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{d\phi}{dx} \right) \text{ H } \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{d\phi}{dy} \right) \right\} d\Omega \text{ H } \int_{\Omega} N_n \{ f_j \dots \text{ H } \int_{\Omega} \phi^2 d\Omega \} \dagger 0 \quad (3.21)$$

Įvedant keitinius:

$$\frac{1}{\kappa} \dagger \backslash \quad (3.22)$$

$$\{ f_j \dots \text{ H } \int_{\Omega} \phi^2 \} \dagger P$$

Lygtis (3.21) perrašoma šitaip:

$$\int_{\Omega} N_n \left\{ \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{d\phi}{dx} \right) \text{ H } \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{d\phi}{dy} \right) \right\} d\Omega \text{ H } \int_{\Omega} N_n * P * \phi d\Omega \dagger 0 \quad (3.23)$$

Norint gauti lygties 3.23 kompiaktinę matricos pavidalo formą, pirmiausiai skaičiuojamos lygties

Čia: $\varphi_i, \varphi_j, \varphi_k$

Suintegruojame antrąjį lygties (3.23) dalį:

$$\int_{\Omega} N_n^T P d\Omega = \int_{\Omega} \frac{P S_{\Omega m}}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Tada lygties 3.23 matricos pavidalo forma:

$$\begin{bmatrix} K & M \\ M^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\text{Čia: } K = \frac{1}{4S_{\Omega m}} \begin{bmatrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_j b_i + c_j c_i & b_j^2 + c_j^2 & b_j b_k + c_j c_k \\ b_k b_i + c_k c_i & b_k b_j + c_k c_j & b_k^2 + c_k^2 \end{bmatrix};$$

$$M = \int_{\Omega} \frac{P S_{\Omega m}}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} d\Omega$$

Vienam trikampiui, kuris turi tris mazgus, baigtinių elementų metodu aproksimacijos išraiška yra sudaroma iš 3×3 matricos. Jei sistema susideda iš n mazgų, tai jos aproksimuojančių funkcijų lygčių sistema bus sudaryta iš matricų turinčių $n \times n$ dydį.[8]

Išsprendus lygtį (3.34) ir atradus EL vektorinio potencialo reikšmes trikampo m viršūnėse, galima gauti šio EL stiprio sudedamąsias ašis X ir Y atžvilgiu bei jo modulį trikampyje[70]:

$$\begin{aligned} E_X &= \frac{d\varphi}{dy} = (c_i \varphi_i + c_j \varphi_j + c_k \varphi_k) / (2 S_{\Omega m}), \\ E_Y &= \frac{d\varphi}{dx} = (b_i \varphi_i + b_j \varphi_j + b_k \varphi_k) / (2 S_{\Omega m}), \\ |E| &= \sqrt{E_X^2 + E_Y^2}. \end{aligned} \quad (3.35)$$

MLS skaičiavimo eiga yra pagrįsta formulėmis (3.16-3.35). ML atveju, į minėtas formules vietoj EL potencialų φ_i, φ_j ir φ_k yra įrašomi ML potencialų A_i, A_j ir A_k reikšmės.

3.3 EML modeliavimo pasirinktųjų oro sąlygų aptarimas

Modeliavimu siekiama nustatyti EML parametrus esant skirtingoms orų sąlygoms t.y. įvertinant sezoniškumo įtaką EML pasiskirstymams virš tyrinėjamų paviršių: virš žemės ir virš vandens. Aišku, kad esant skirtingoms oro temperatūroms, Kuršių marių vandens paviršius taip pat turės skirtingas temperatūras bei agregatinę būseną (pavyzdžiui, vandens paviršius gali tapti ledu). Taip pat esant tam

tikroms oro sąlygoms virš vandens paviršiaus gali būti rūkas. Norimai modeliuoti EML pasirinkau oro temperatūros diapazoną: -33°C , -15°C , 0°C , 15°C ir 34°C . Kraštinės šio diapazono reikšmės buvo nustatytos iš [34] ir [39] šaltinių archyvinų duomenų bazės. Reikia atkreipti dėmesį, kad oro parametrai (temperatūra, slėgis, drėgmė, vėjo greitis ir t.t.) stebėjimo stotyse yra matuojami kelis kartus per dieną, kartais būna apie šešis kartus per parą su 4 valandų laiko intervalu tarp matavimų, kai matavimo procesas yra automatizuotas. Todėl tolimesniuose skaičiavimuose bus įvertinami būtinų dydžių vidutinės reikšmės. Taip pat buvo nustatyta [49],[33], kad esant oro temperatūrai -33°C , vandens paviršius yra padengimas 0,5m ledo sluoksniu, o esant oro temperatūrai -15°C 12 dienų laikotarpyje ledo dangos storis sudaro apie 0,3m. Kai oro temperatūra yra 15°C , pavyzdžiui, karštos vasaros ankstyvo rytmečio metu, vandens temperatūra gali būti žymiai didesnė už oro. Todėl virš vandens paviršiaus susidaro rūkas. Modeliuojant padaroma prielaida, kad rūko vandeningumas yra didžiausias iš galimų ir jo aukštis virš paviršiaus siekia 5 m. Kadangi siekiama palyginti tos pačios AŪEOL EML paskirstymą virš skirtingų paviršių, EML modeliai bus sudaryti tiek virš vandens paviršiaus, tiek ir virš žemės paviršiaus. Kuriant modelį bus atsižvelgiama į Kuršių marių dirbtiną gylį, kuris dabartiniu metu sudaro 12m [33], o modeliuojant virš žemės paviršiaus bus padaroma prielaida, kad po EOL yra 12m smėlinio tipo dirvožemio sluoksnis[49].

3.4 EML modeliavimo programos. FEMM programos pasirinkimo pagrindimas

Prie populiariųjų kompiuterinių programų, kurių pagalba skaitiniais metodais yra apskaičiuojami EML, galima priskirti ANSYS, FEMLAB ir COSMOS Works programos [70]. Vienu iš faktorių, trukdančių išvardytų programų plačiam naudojimui yra aukšta šių programų kaina.

Iš nekomercinių programų, skirtų EML dvimačių skaičiavimo uždavinių sprendimui, galima išskirti programinį paketą FEMM. Šios programos pagalba gali būti sprendžiami magnetiniai [37], elektros [36] bei šilumos statikos uždaviniai. Paketas susideda iš preprocesoriaus (savo įėjime duomenis priimančios ir išėjime pateikiančios apdorotus duomenis kompiuterinės programos), baigtinių elementų tinklo generatorių, sprendiklio ir postprocesoriaus. Tiriamosios srities geometrijos parengimas, terpių požymių skaičiuojamoms sritims priskyrimas ir kraštinių sąlygų nustatymas yra vykdomi preprocesoriuje. Programa turi įterptą modelio geometrinių matmenų redaktorių. Skaičiavimo srities suskaidymas baigtiniais elementais atliekamas įterptinės programos *triangle* pagalba. Skaičiavimo mazgų ir elementų kiekiai nėra ribojami. Tam tikras apribojamas gali būti siejamas su operatyviajais naudojamais personalinio kompiuterio atmintimi [52,36,37]. Laukų skaičiavimo uždavinio sprendimas atliekamas išorine sprendiklio programa. Postprocesorius apdoroja uždavinio sprendimo rezultatus ir atlieka jų vizualizaciją. Visos prieš tai paminėtos FEMM programos funkcijos paremtos projektuojamo arba tiriamojo objekto lauko matematinio modeliu, leidžia atlikti optimizuotus EML skaičiavimus, ir dėl to žymiai padidinti

skaičiavimų tikslumą. Ši skaičiavimo programa yra pastoviai vystoma ir atnaujinama. Dabartiniu metu programos FEMM nauja versija 4.2 yra papildyta šiluminių laukų skaičiavimo galimybėmis ir yra laisvai prieinama rengėjų saite [36].

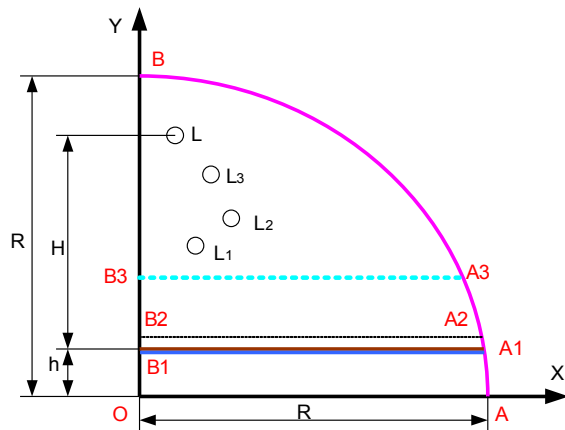
3.5 EL modeliavimo schemos sudarymas ir parametrų priskyrimo tvarka

EL ir ML modeliavimas FEMM programos terpėje susideda iš tam tikrų veiksmų tvarkos, kurią trumpai galima išvardyti šitaip. Pirmiausiai yra apibrėžiamas norimo uždavinio tipas: elektrostatikos arba magnetostatikos uždavinys. Toliau yra nurodomi pagrindiniai uždavinio parametrai: modelio išdėstymas erdvėje, ilgio matavimo vienetai, EL arba ML šaltinio ilgis, sprendimo tikslumas. Po to nustatomos koordinačių sistemos tipas ir tinkelio mastelis. Naujai atsivėrusiame darbiname lape sudaromas tiriamojo modelio brėžinys, kurį patartina pasidaryti iš anksto nustatant modelio koordinates. Modelio kontūrai susidedantys iš tam tikrų geometrinių figūrų yra braižomi vadovaujantis tam tikromis braižymo taisyklėmis [70,52]. Toliau programai nurodomi iš kokių medžiagų brėžinyje yra sudaryti kontūrai, kitaip tariant uždarieji plotai, ir priskiriamos šiems kontūrams jų dielektrinės skvarbos EL modeliavimo atveju, arba magnetinės skvarbos, jei modeliuojami ML. Vėliau nurodomos šių medžiagų vietos brėžinyje bei jų plotai. Nurodant programai ploto medžiagą, iš karto užduodama komanda skaidyti pasirinktą plotą į trikampius, kurių skaičius gali būti užsakytas projektuotojo, arba parinktas pačia programa. Įprastai programa skaido visus uždarus plotus, jei nėra nurodyta kitaip. Mano atveju, laidų plotai nėra skaidomi trikampaiais, nes laidininko vidujė laukų nėra. Tolesnėje žingsnyje nurodome paviršių įtampas arba srovių dydžius. Modeliuojant EL, kiekvieno fazinio laidininko įtampos reikšmė yra nustatoma lygi efektinei nominalios įtampos reikšmei, o ML atžvilgiu – efektinei faze tekančios srovės reikšmei.

Kadangi nagrinėjama linija yra simetriška Y ašies atžvilgiu, pakanka sudaryti jos modelį remiantis rekomendacijomis [36,37]. Paruošta modeliavimui FEMM programos terpėje modelio schema yra parodyta 3.2 paveiksle. Modelio apatinis lygis sutampa su X ašimi. Tai reiškia, kad, įvertinus Klaipėdos sąsiaurio gylį, nagrinėjami žemės arba vandens paviršiai, virš kurių bus modeliuojami laukai yra $h=12$ metrų atstumu nuo koordinačių pradžios Y ašies kryptimi. Paveiksle 3.2 atkarpa OA vaizduoja horizontaliąją simetrijos ašį, atkarpa OB – vertikaliąją simetrijos ašį, atkarpos B_1A_1 , B_2A_2 ir B_3A_3 – atitinkamai žemės arba vandens, ledo ir rūko paviršių lygmenis. Matmuo H yra lygus žaibosaugos lyno pakabinimo aukščiui. Linijos laidų skerspjūvių centrų abscisės bus įvedamos remiantis apskaičiuotomis jų reikšmėmis, o ordinatės – prie apskaičiuotų reikšmių pridėdant dydį h.

Siekiant atlikti tikslų modeliavimą, patartina nustatyti kraštines arba kitaip vadinamas ribines sąlygas. Vertikaliajai modelio atkarpai OB nėra nustatomos jokios ribinės sąlygos, kas atitinka komandą *None* FEMM programoje. *None* komanda nusako taip vadinamąjį Neumano arba antrąją kraštinę sąlygą,

kurios matematinė išraiška yra: $d\phi/dn \neq 0$. Modeliuojant EL pasiskirstymą, vandens, rūko bei ledo horizontalioms paviršių riboms, kurios paveiksle 3.2 yra parodytos atkarpomis B₁A₁, B₂A₂ ir B₃A₃ taip pat yra priskiriama *None* kraštinė sąlyga, turint omenyje, kad šie paviršiai neturi jokio potencialo. Specialiai tokio tipo sąlygų nustatinėti nereikia, nes programa pati suteikia jas pagal nutylėjimą. Horizontaliajai atkarpai OA nustatoma pirmoji kraštinė sąlyga, kuri dar vadinama Dirichle uždavinio, arba sąlyga, kuri matematiškai aprašoma šitaip: $\phi(x,y)=0$. Taikant Dirichle kraštinę sąlygą turima omenyje, kad tam tikro modelio paviršiaus potencialas lygus 0 V.



3.2 pav. Nagrinėjamos EOL modelis FEMM programos terpėje

EL egzistuoja ne tik šalia linijos fazinių laidų, bet ir praktiškai begaliniame atstume nuo EOL. Skaitiniams EL apskaičiavimams neįmanoma parinkti be galo didelę skaičiavimo sritį. Bet visgi skaičiavimo srities išorinės ribos turi būti nustatomos pakankamai dideliame atstume nuo EOL laidų. Praktiniuose EL skaičiavimuose FEMM programoje priimama, kad skaičiavimo srities matmenys turi būti mažiausiai 5-10 kartu didesni už EL šaltinių matmenis [52]. Todėl apskritimo lankui AB yra suteikiamos kombinuotosios ribinės sąlygos [71], kurios įvertiną EML begalybę. Šio tipo sąlygai nustatyti specialiaame programos lange turi būti įvedami koeficientai C_0 ir C_1 . Koeficientas C_0 yra apskaičiuojamas:

$$C_0 \neq \frac{2\psi_0}{R} \quad (3.36)$$

Čia: $\psi_0 \neq 8.85418781762 \cdot 10^{12}$ F/m dielektrinė pastovioji;

R - lanko AB spindulys, m, kuris apskaičiuojamas [72]:

$$R \neq \frac{2H \sqrt{3h \sqrt{h_{L1}}}}{\sqrt{3}} \quad (3.37)$$

Taškų A₁, A₂ ir A₃ koordinatės y yra nustatomas remiantis lygtimi:

$$R^2 \neq x^2 \sqrt{y^2} \quad (3.38)$$

EL pasiskirstymas virš minėtų paviršių bus įvertinamas 1,5 m aukštyje. Atskiras dėmesys bus atkreipiamas ELS vertėms, esančioms 100m atstumu nuo vertikaliosios simetrijos ašies, nes 110 kV AĖEOL SAZ sudaro 100m skaičiuojant nuo kraštinio laidininko X ašies krypties link (6 priedas).

3.6 ML modeliavimo parametrų įvesties tvarkos aprašymas

ML modeliavimo schema bus tokia, kaip yra parodyta 3.2 paveiksle. Tačiau uždarujų kontūrų savybių bei kraštinių sąlygų nustatymo tvarka ML atveju šiek tiek skirsis nuo ankščiau aprašytos EL modeliavimo tvarkos. Visų pirma specialiaame programos lange įvedamas norimos uždaro kontūro (bloko) pavadinimą. Pavyzdžiui, mano atveju tai gali būti vanduo. Pasirenkant atitinkamą eilutę iš sąrašo *B-H Curve* (Įmagnetinimo kreivė) nusprendžiama kokio tipo (tiesinę arba netiesinę) įmagnetinimo kreivę turi pasirinkti medžiaga arba terpė. Šiame darbe visos terpės, kuriuose sklinda tiriamosios AĖEOL EMB, pasižymi tiesiškumu, nes jos yra arba diamagnetikai arba paramagnetikai. Todėl pasirenkant *Linear B-H Relationship* (tiesinis ryšis tarp B ir H) bus suaktyvinta parametrų grupė *Linear Material Properties* (medžiagos tiesinė savybė). Į šią eilutę įrašomos terpės (medžiagos) SMS x ir y dedamosios. Sekančioji eilutė *Coercivity* yra skirta koercityvumo jėgai įvesti tuo atveju, jei modeliuojamoje sistemoje yra pastovusis magnetas. Koercityvumo jėgos samprata galioja tik feromagnetinėms ir ferimagnetinėms medžiagoms ir nusako MLS vertę, būtiną pilnajam medžiagos išmagnetinimui. Kadangi nagrinėjamos terpės nėra priskiriamos išvardytoms medžiagoms, šioje eiluteje įrašomas nulis. Redagavimo laukas *Electrical Conductivity* nusako bloke esančios medžiagos savitąjį laidumą γ , $\text{MS/m} = 10^6 \text{ S/m} = 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. Šiame laukelyje medžiagos savitojo laidumo reikšmė įrašoma atsižvelgiant į jos priklausomybę nuo temperatūros. Sekantis įvedamasis dydis *Source Current Density* yra išorinio srovės šaltinio tankis J, MA/m^2 [70,52].

Turint omenyje magnetinį potencialą, ribinės sąlygos yra nustatomos tokios pačios, kaip ir EL modeliavimo atveju. Atkarpai OB (3.2 paveikslas) nėra nustatomos jokios ribinės sąlygos, kas atitinka komandai *None* FEMM programoje. Vandens, rūko bei ledo horizontalių paviršių riboms, kurios paveiksle 3.2 yra parodytos atkarpomis B_1A_1 , B_2A_2 ir B_3A_3 taip pat yra priskiriama *None* kraštinė sąlyga, turint omenyje, kad šie paviršiai neturi jokio potencialo. Horizontaliajai atkarpai OA nustatoma pirma kraštinė sąlyga $A(x,y)=0$, turint omenyje, kad magnetinis potencialas apatinioje modelio riboje yra lygus 0 A. Apskritimo lankui AB yra suteikiami kombinuotosios ribinės sąlygos [37], kurios įvertina EML begalybę. Šio tipo sąlygai nustatyti specialiaame programos lange turi būti įvedami koeficientai C_0 ir C_1 . Modeliuojant ML koeficientas C_0 yra apskaičiuojamas:

$$C_0 \dagger \frac{2}{\ddagger_0 \star R} \quad (3.39)$$

Čia: $\mu_0 \uparrow 1,256 \cdot 10^6 H/m$ - magnetinė pastovioji.

R - lanko AB spindulys, m.

IV. TIRIAMOJI DALIS

4.1 Tiriamojo objekto aprašymas

4.1.1 Tiriamosios linijos dabartinė padėtis

Šiame darbe tyrinėjamas objektas yra 110 kV aukštos įtampos elektros perdavimo linija, kuri yra nutiesta virš Kuršių marių į *Kiaulės nugaros* salą. Ši linija buvo suprojektuota 1984-1985 m. ir pradėta eksploatuoti 1987 m. Bendras linijos ruožo, einančio per Kuršių marias, ilgis sudaro 1790 m. Linija įrengta tarp kampinių Y330-2T+14, Y330-2T ir tarpinių III330-2/50 atramų, viso kurių yra 5. Linijos išdėstymo eskizas bei atramų konstruktyvieji parametrai yra pateikti gautųjų brėžinių kopijos 39/1 ir 39/2 pavidalu 27 priede. Techniniai nagrinėjamos linijos duomenys buvo gauti iš Klaipėdos LitGrid filialo skirstomųjų tinklų skyriaus dokumentacijos archyvo. Dėl gautos informacijos konfidencialumo bei tam tikrų išpareigojimų darbo autorė negali viešai skelbti suteiktųjų informacijos asmenų vardų ir pavardžių. Tačiau visi gautieji brėžiniai yra perbraižyti autorės į atskirus brėžinius, nurodant, kad tai yra šių brėžinių kopijos. Kopijos buvo daromos grežtai laikantis egzistuojančių originaluose topografinių bei konstruktyviųjų EOL matmenų. Darbo autorė sąlyginai padalino liniją į ruožus A-B; B-C; C-D; D-E, kurie atitinka linijos dalių atstumams tarp atitinkamų atramų (4.1 pav.). Didžiausią įdomumą sukelia ruožai B-C ir C-D, nes šiuose linijos ruožuose laidai yra ištiesti virš Kuršių marių vandens paviršiaus. Todėl EML skaičiavimai turi būti atlikti šių linijos dalių didžiausių laidų įlinkių vietose. Kaip yra matoma brėžinyje 39/1 ir 4.1 paveiksle, vandens lygis apatinės linijos fazės padėties atžvilgiu nuolat svyruoja ir įvairiais atvejais gali siekti ruože B-C nuo 9 iki 13 m, o ruože C-D nuo 27-30 m. Toks vandens lygio svyravimas tiesiogiai priklauso nuo oro sąlygų Kuršių mariose. Kadangi ruožo C-D gabaritas apytiksliai yra triskart didesnis, negu ruožo B-C gabaritas, prasminga atlikti EML modeliavimus būtent linijos B-C ruožui, nes, kuo didesnis linijos gabaritas, tuo mažesnis yra šios linijos EL intensyvumas.

Nagrinėjamos AĖOL reikalingi EML modeliavimui linijos elektriniai parametrai (srovės ir įtampos) bus apskaičiuojami, naudojant linijos ekvivalentinės schemos skaičiavimo metodiką. Taip pat

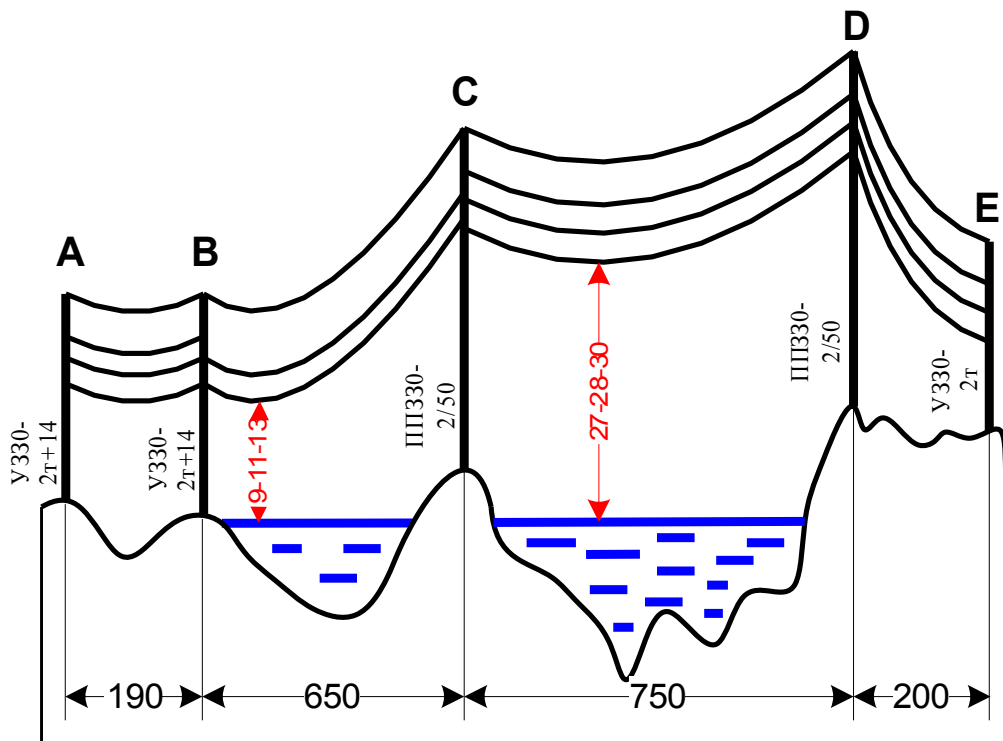
modeliuojant EML virš vandens ir žemės paviršių, bus atkreiptas ypatingas dėmesys terpių dielektrinei ir magnetinei skvarboms nustatyti, priklausomai nuo terpių temperatūros, kintamosios srovės dažnio.

Linijos laidžiai daliai yra panaudoti ACKC 185/128 plieno aliuminio laidai; apsaugai nuo žaibo - C 100 lynas. Faziniai laidai bei žaibosaugos lynai yra pritvirtinti prie atramų pakabinamųjų izoliatorių ПФ6-А (П-4,5) girliandomis, kurių kiekvienos ilgis yra 1,2 m. Projektuota maksimali perdavimo galia $P_{\text{perd}} = 29,2$ MW; galios faktorius $\cos\varphi = 0,9$.

4.1.2 Linijos rekonstrukcijos ateities planai

Ateityje numatomas aukštos įtampos linijos iškėlimas, kuris yra reikalingas ne tik dėl dujų terminalo statybos prie Kiaulės nugaros. Buvo ne vienas atvejis, kai krovos įranga užkabino ir nutraukė aukštos įtampos laidus. Laimingo atsitiktinumo dėka žmonės nežuvo. Aukštos įtampos laidus buvo užkabinusios ir į Kuršių marias plaukusios užsieniečių jachtos. Tragiškų atvejų taip pat buvo išvengta, streso – ne. Šiandien dar neaišku, kaip dujų terminalui, kurio statybą nuspręsta spartinti, būtų panaudojama Kiaulės nugarą. Galbūt per ją būtų tiesiami dujų vamzdiniai. Yra planų sujungti Kiaulės nugarą su Smeltės pusiasaliu ir ateityje naudoti ne tik dujų terminalo veiklai.

Pasak LitGrid inžinierių nagrinėjamos orinės linijos nuėmimo ir pakeitimo į kabelinę liniją projektas yra seniai parengtas. Remiantis šiuo projektu aukštos įtampos kabelis aplenktų Smeltės pusiasalį ir Kiaulės nugarą. Kabelis nuo transformatorinės ties Vakarų laivų gamykla būtų tiesiamas ties Perkėlos gatve. Preliminariai kabelio tiesimas kainuoja apie 8 mln. litų. Bendra linijos iškeldinimo iš uosto suma būtų apie 50 mln. litų. Svarstyta, kad oro linijos iš uosto iškeldinimas galėtų būti siejamas su Lietuvos ir Švedijos elektros linijos tiesimu. Kol kas nepateikta data, kada ta linija bus tiesiama. Preliminariai kalbama apie 2014 metus. Iki to laiko prie Kiaulės nugaros jau turėtų būti pradėtas statyti dujų terminalas. Iki šiol situacija nėra aiški ir dėl linijos iškeldinimo rangovų.



4.1 pav. 110 kV EOL dalies, ištiestos virš vandens telkinio, eskizas

4.2 Fazinių laidų padėtis erdvėje

4.2.1 Grandininės linijos lygtis

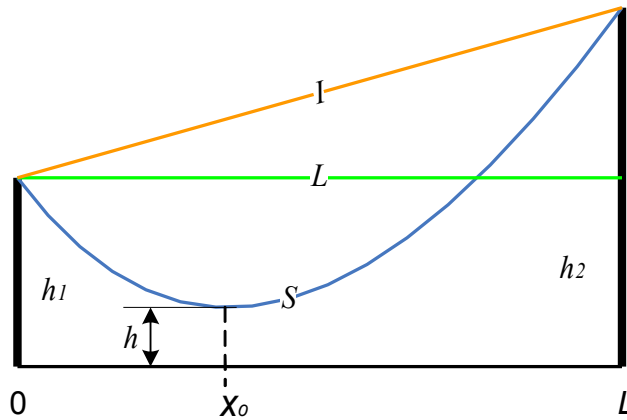
Jeigu GL viršūnė sutampa su Dekarto koordinatinių pradžia, o ordinačių ašis yra nukreipta vertikaliai į viršų, tai GL lygtis užrašoma [53]:

$$y(x) \dagger \frac{a}{2} ch(x) \dagger a \quad (4.1)$$

Čia: a – toks laido atkarpos ilgis, kurios svoris yra lygus tempimo jėgos horizontaliajai dedamajai. Dydis a dar vadinamas GL parametru.

Taikant formulę (4.1) laidų koordinatėms nustatyti, buvo atsižvelgta, kad Dekarto koordinatinių sistemos ašys turi kirstis kairiosios atramos pamate ir tokiu būdu jie yra pastumti horizontalia kryptimi dydžiu x_0 , o vertikalia kryptimi dydžiu h (4.2 pav.). Todėl formulė (4.1) turės tokį pavidalą [62]:

$$y(x) \dagger h \dagger a \dagger ch \dagger \frac{x - x_0}{a} \dagger 1 \quad (4.2)$$

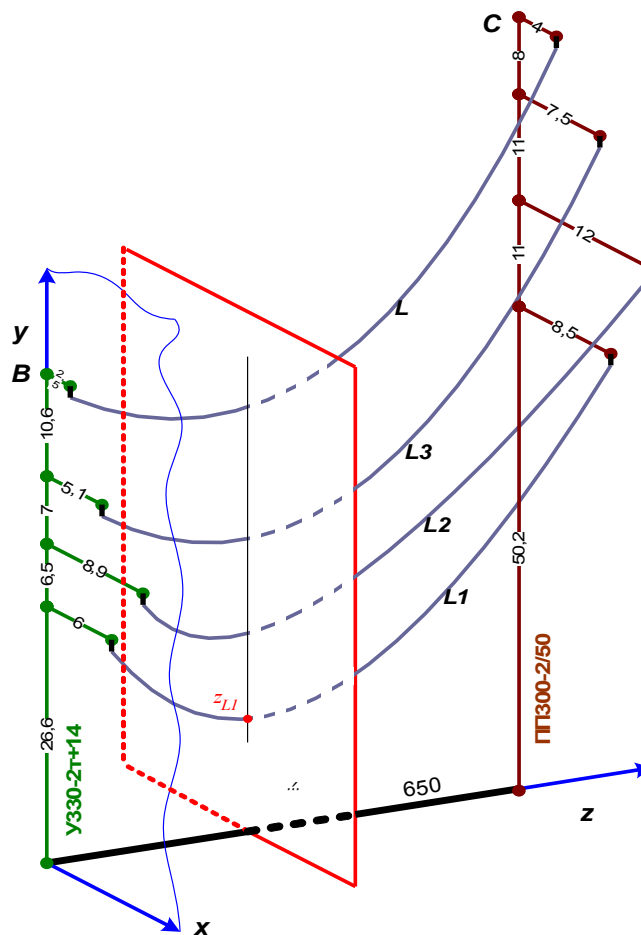


4.2 pav. Laidų koordinatų nustatymo paaiškinamoji schema[62]

Apatinės linijos fazės koordinatų skaičiavimas iš esmės yra GL formulės (4.2) konstantų x_0 , h ir a , reikšmių radimas. Tam tikslui pasiekti yra sudaroma trijų netiesinių lygčių sistema su trimis nežinomaisiais x_0 , h ir a . Pirmosios dvi lygtys yra gaunamos, nagrinėjant du atskiros linijos fazės prie atramų tvirtinimo taškus: $(0; h_1)$ – kairioji atrama Y330-2T+14 ir $(L; h_2)$ dešinioji atrama ПП300-2/50 (4.1 pav.). Trečioji lygtis yra GL lanko ilgis. Fazių koordinatų skaičiavimai yra atlikti *Mathcad* kompiuterinės programos terpėje, taikant skaitinį metodą sprendiniams rasti. Todėl prieš skaičiuojant lygties (4.2) nežinomuosius x_0 , h ir a , jiems yra priskiriamos apytiksles reikšmes (7 priedas) bei yra nustatomi GL geometriniai matmenys (h_1 , h_2 , L ir S). Nežinomųjų x_0 ir h apytiksles reikšmes nėra sunku parinkti. Reikšmė x_0 bus lygi $L/2$, jei $h_1 = h_2$. x_0 reikšmė artės prie nulio (kairioji atrama), jei $h_1 < h_2$ arba – prie L reikšmės (dešinioji atrama), jei $h_1 > h_2$. Šiek tiek sunkiau yra intuityviai nuspėti nežinomojo a apytiksle reikšmę. Reikšmė a turi būti didesnė už nulį, kitaip galima gauti išgaubtos formos GL. Siekiant užduoti kuo tikslesnį vienos fazės ilgio S reikšmę (4.2 pav.), yra skaičiuojama šios fazės minimaliojo ilgio I reikšmė. Kai $h_1 \neq h_2$ ir S reikšmė skaitine prasme bus artima I reikšmei, fazės įlinkio taškas slinks prie vienos arba kitos atramos.[62]

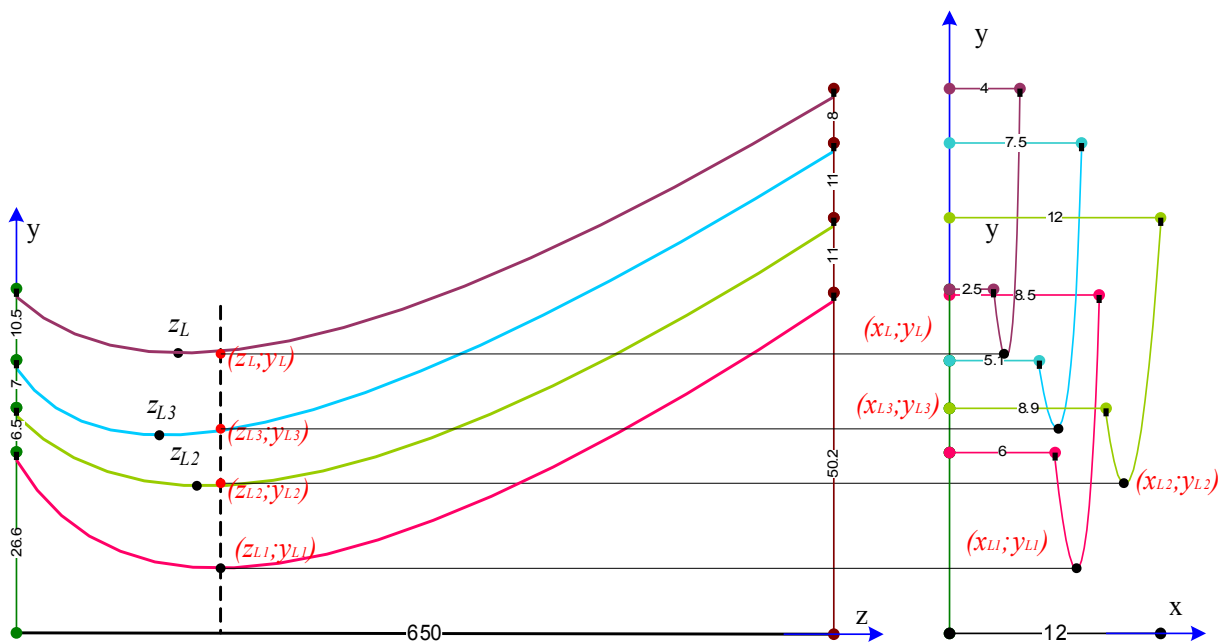
4.2.2 Laidų pjūvių koordinatų nustatymas

Siekiant atlikti EML modeliavimą FEMM programos terpėje, būtina sudaryti modeliujamo objekto brėžinį tam tikroje plokštumoje. Įprastai EML yra modeliuojami, skersai perpjaunant linijos laidus įsivaizduojama plokštuma lygiagrečiai plokštumai XY (4.3 pav.).



4.3 pav. 110 kV EOL ruožo B-C eskizas

Taigi modeliavimas yra atliekamas XY plokštumoje. 27 priedo 39/1 brėžinyje atstumas nuo arčiausios atramos iki kraštinės linijos fazės įlinkio taško nuo vandens paviršiaus nėra nurodytas. Todėl kraštinės fazės įlinkio taško koordinatė z nustatoma, pritaikant skaičiavimams grandininės linijos lygtį. Grandininės linijos lygtis yra sudaroma kiekvienai fazei bei nuo žaibo apsaugančiam lynui atskirai, nes, kaip yra matoma 4.3 paveiksle, dėl atramų ruože B-C skirtingų konstruktyviųjų matmenų, linijos laidų projekcijos į YZ plokštumą nėra išdėstyti lygiagrečiai vienas kito atžvilgiu (4.4 pav.).



4.4 pav. 110 kV EOL ruožo B-C laidų projekcijos

Dėl tos pačios priežasties fazių bei apsaugos lyno įlinkių taškai turi skirtingus atstumus, skaičiuojant nuo bet kurių iš atramų. EOL EML prasminga yra tyrinėti tose linijos vietose, kuriose kraštinės linijos fazė yra daugiausiai įlinkusi, t.y. turi mažiausią atstumą nuo tam tikro paviršiaus (žemės arba vandens). Todėl, apskaičiavus kraštinės fazės L1 koordinatę z_{L1} , šios aplikatės skaitinė reikšmė yra taikoma kitų fazių bei apsaugos lyno y_{L2} , y_{L3} , y_{zL} ordinatėms nustatyti, pasinaudojant grandininės linijos lygtimis. Koordinatinių nustatymo rezultatai yra pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. 100 kV B-C ruožo linijos laidų įlinkių taškų koordinatinių radimo rezultatai YZ plokštumoje

| | h_1, m | h_2, m | L, m | Z_{Ln}, m | Y_{Ln}, m | a, m | Laido GL lygtis |
|-----------|----------|----------|--------|-------------|-------------|--------|---|
| L1 | 25,4 | 49 | 650 | 253,948 | 8,978 | 1966 | $y_{L1}(z) \uparrow 8,978 \downarrow 1966 * ch \uparrow \frac{z \uparrow 253,948 \downarrow}{1966} \uparrow 1 \downarrow * \downarrow$ |
| L2 | 31,9 | 60 | 650 | 245,666 | 15,522 | 1845 | $y_{L2}(z) \uparrow 15,522 \downarrow 1845 * ch \uparrow \frac{z \uparrow 245,66 \downarrow}{1845} \uparrow 1 \downarrow * \downarrow$ |
| L3 | 48,9 | 71 | 650 | 275,939 | 22,661 | 1455 | $y_{L3}(z) \uparrow 22,661 \downarrow 1455 * ch \uparrow \frac{z \uparrow 275,939 \downarrow}{1455} \uparrow 1 \downarrow * \downarrow$ |
| L | 59,4 | 79 | 650 | 281,695 | 31,92 | 1448 | $y_L(z) \uparrow 31,92 \downarrow 1448 * ch \uparrow \frac{z \uparrow 281,695 \downarrow}{1448} \uparrow 1 \downarrow * \downarrow$ |

Įstačius L1 kraštinės fazės aplikatės $z = 253,948$ m reikšmę į kitos fazės GL aprašančias lygtis, YZ plokštumoje buvo nustatytos tikrosios būtinos modeliavimo schemai sudaryti linijos laidų Y koordinatės, kurių skaitinės reikšmės yra pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Nagrinėjamos linijos B-C ruožo laidų YZ plokštumos koordinatės, atitinkančios apatinės fazės Z koordinatę

| | Z_{Ln},m | Y_{Ln},m |
|----|------------|------------|
| L1 | 254 | 9 |
| L2 | 254 | 15,5 |
| L3 | 254 | 22,8 |
| L | 254 | 32,2 |

Pritaikius GL parametrų radimo skaičiavimo algoritmą (7 priedas), buvo apskaičiuotos laidų koordinatės XY plokštumoje. Skaičiavimo rezultatai yra pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. 100 kV linijos B-C ruožo laidų taškų koordinatės XY plokštumoje

| | h_1,m | h_2,m | L,m | X_{Ln},m | Y_{Ln},m | a,m |
|----|---------|---------|-------|------------|------------|-------|
| L1 | 25,4 | 49 | 2.5 | 7,25 | 9 | 0,231 |
| L2 | 31,9 | 60 | 3.1 | 10,45 | 15,5 | 0,297 |
| L3 | 48,9 | 71 | 2.4 | 6,3 | 22,8 | 0,205 |
| L | 59,4 | 79 | 1.5 | 3,25 | 32,2 | 0,117 |

4.3 Linijos elektros parametrai

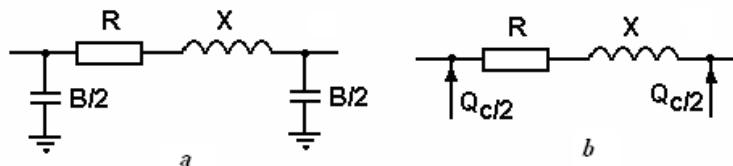
EOL parametrų yra priskiriama fazių varžos ir laidžiai, kurie tolygiai yra pasiskirstę išilgai linijos. Linijos skaičiavimo procesas, kai yra įvertinamas jos parametrų pasiskirstymas, yra gana sudėtingas ir yra taikomas tik labai ilgoms daugiau negu 500 kV įtampos turintiems EOL, kurių ilgis yra lygus elektromagnetinės bangos ilgiui [77].

Daugumos elektros energetinių sistemų EOL turi žymiai mažesnius ilgius nei EM bangos ilgis. Tokioms linijos pasiskirstymo parametrų įvertinimas žymiai apsunkina elektros tinklų skaičiavimus ir panaikina skaičiavimo rezultatų akivaizdumą, esant nežymiems jų patikslinimams [67]. Todėl EOL, turinčių ilgius iki 300 km, skaičiavimas atliekamas padarant prielaidą, kad tokių linijų parametrai yra sutelktieji. Esant tokiai prielaidai, skaičiavimo paklaidos neviršija 1-2%, kas yra leistina inžineriniuose skaičiavimuose [61].

4.3.1 AĖEOL ekvivalentinės schemos parametrai

Elektros tinklo elemento vaizdavimas jo parametrais yra vadinama šio elemento ekvivalentinio keitimo schema. Skaičiuojant simetrinius režimus, schemos sudaromos vienai fazei. Skaičiuojant elektros tinklus, oro ir kabelinės elektros tiekimo linijos yra vaizduojamos II pavidalo keitimo schema. Tokio tipo schemos yra žymiai patogesnis linijos skaičiuojamasis modelis, atspindintis pagrindines linijoje vykstančių reiškinų charakteristikas [69]. 110...220 kV AĖEOL rekomenduojama taikyti ekvivalentinę

keitimo schemą su išilginėmis aktyviosiomis ir induktyviosiomis varžomis ir su skersiniu talpiniu laidžiu (pav.4.5-a) arba su užkraunamąja galia (pav.4.5-b).



4.5 pav. AĖOL ekvivalentinės keitimo schemas [61]

AĖOL pagrindinai yra naudojami iš plieno ir aliuminio padaryti laidai, kurių plieninės šerdies varža yra paneigiama. Žinoma, kad laidininko elektrinė varža priklauso nuo jo temperatūros:

$$R_t \approx R_{20} [1 + \alpha (t - 20)] \quad (4.3)$$

Čia: α - medžiagos šiluminis plėtimosi koeficientas, priklausantis nuo temperatūros; laidininko AC 185/128 $\alpha = 15,5 \cdot 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ [71];

R – laidininko varža, Ω , esant $t = 20^{\circ}\text{C}$;

t – laidininko temperatūra, $^{\circ}\text{C}$.

Realiose supančios aplinkos temperatūros kitimo sąlygose laidininko temperatūra kinta nežymiai. Ši teiginį autorė įrodė plieno aliuminio laidininko vidinės temperatūros ir varžos priklausomybių nuo supančios liniją oro temperatūros skaičiavimais, kurių išsami eiga yra pateikta 13 priede, o šios priklausomybės iliustracijos – 4.6 paveiksle. Todėl inžineriniuose skaičiavimuose laidininko varžos kitimas yra paneigiamas.

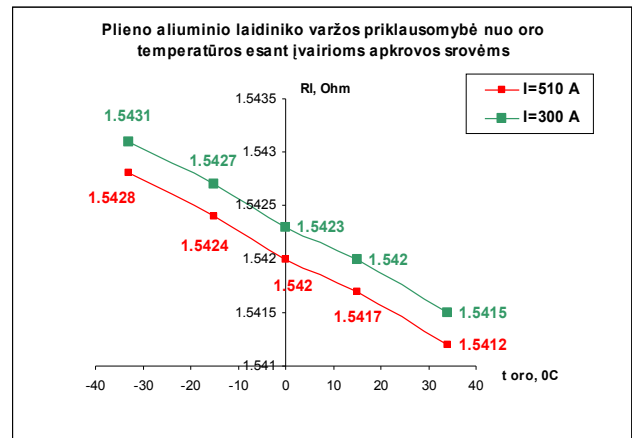
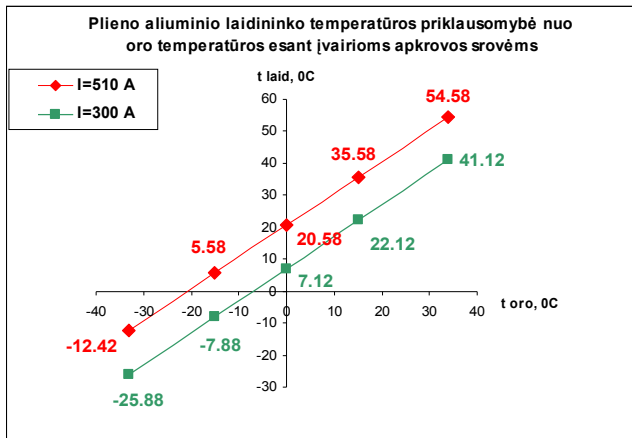
Išilginė aktyvioji linijos varža apskaičiuojama [60]:

$$R \approx \frac{1}{n} r_0 L \quad (4.4)$$

Čia: r_0 - ilginė aktyvioji varža, Ω/km , aliuminio plieno laidui AC158/128 $r_0 \approx 0,1543 \Omega / \text{km}$ [29];

L - linijos ilgis, km;

n - grandinių skaičius linijoje, $n = 2$.



4.6 pav. Plieno aliuminio laidininko temperatūros bei varžos priklausomybės nuo oro temperatūros.

Skaičiuojant linijos laidų induktyviasias varžas, padaroma prielaida, kad, esant bet kokiems jų tarpusavio išsidėstymams erdvėje, kad ir viengrandinėse arba dvigrandinėse linijose, induktyviosios varžos yra vienodos. Tada ilginė induktyvioji varža apskaičiuojama:

$$x_0 \doteq 0.1441 \lg \frac{D_{vid}}{R_{laid}} \doteq 0.016 \quad (4.5)$$

Čia: D_{vid} - vidutinis geometrinis atstumas tarp laidų, m;

R_{laid} - laido spindulys, m.

Vidutinis geometrinis atstumas tarp laisvai išdėstytų erdvėje fazinių laidų, apskaičiuojamas:

$$D_{vid} \doteq \sqrt[3]{D_{L1L2} D_{L1L3} D_{L2L3}} \quad (4.6)$$

Čia: D_{L1L2} , D_{L1L3} , D_{L2L3} - atstumas tarp L1- L2, L1-L3 ir L2-L3 fazinių laidininkų skerspjūvių centrų atitinkamai, m;

Induktyvioji linijos varža:

$$x \doteq \frac{1}{n} x_0 L \quad (4.7)$$

Dėl elektrostatinio lauko poveikio tarp fazinių laidų bei tarp laidų ir žemės atsiranda slinkties srovės. Šių užkraunamųjų srovių reikšmės yra nusakomos talpomis tarp fazių ir talpomis tarp kiekvienos fazės ir žemės. Šių talpų dydis, priklausomai nuo laidininkų geometrinių matmenų ir jų tarpusavio padėties, o taip pat nuo izoliacijos dielektrinių savybių, nusako elektros tiekimo linijos talpinį laidį. Ilginis talpinis linijos laidis apskaičiuojamas:

$$b_0 \doteq \frac{7.58 \cdot 10^{16}}{\lg \frac{D_{vid}}{R_{laid}}} \quad (4.8)$$

Visos linijos talpinis laidis:

$$b \doteq \frac{1}{2} n b_0 L \quad (4.9)$$

Linijos reaktyvioji varža apskaičiuojama:

$$X \doteq \sqrt{\frac{x}{b}} \quad (4.10)$$

Linijos ilgis sudaro $L = 20$ km. Visi kiti linijos parametrai, kurie yra parodyti 4.4 lentelėje, buvo apskaičiuoti naudojant (4.3 - 4.10) formulės. Ilginės aktyviosios varžos reikšmė buvo nustatyta, remiantis [29]. Visi plieno aliumininio laido ACKC 185/128 duomenys yra pateikti 8 priede, o skaičiavimai – 11 priede.

4.4 lentelė. 100 kV linijos parametrai

| $L,$ km | $r_0,$ Ω / km | $R,$ Ω | $r_{laid},$ km | $D_{vid},$ m | $x_0,$ Ω / km | $x,$ Ω | $b_0,$ Cm / km | $b,$ Cm | $X,$ Ω |
|--------------|-------------------------|------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| 20 | 0,1543 | 1,543 | 0,01155 | 10,35 | 0,441 | 4,409 | $2,567 \cdot 10^{-6}$ | $5,135 \cdot 10^{-5}$ | 293 |

4.3.2 Fazinės įtampos ir srovės

Tiriamojame dvigrandininėse linijoje grandys veikia sinchroniškai.

Didžiausia fazinė įtampa:

$$U_{f \max} \doteq k \cdot U_l \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (4.11)$$

Čia: $k \doteq 1,15$ - koeficientas, įvertinantis įtampos kritimą linijoje.

Kiekvienos fazės įtampa [67]:

$$U_{Lk} \doteq U_{f \max} \cdot e^{j p_k^0} \quad (4.12)$$

Čia: $k \doteq 1,2,3$;

$$p_1 \doteq 0; p_2 \doteq \pm 120; p_3 \doteq \pm 240.$$

Kadangi fazių apkrova yra simetrinė ir kiekvienos fazės laidininko aktyviosios ir induktyviosios varžos yra vienodos, tai fazės varža apskaičiuojama:

$$Z_L \doteq Z_{L1} \doteq Z_{L2} \doteq Z_{L3} \doteq R \dot{+} jX \quad (4.13)$$

Čia: aktyviosios R ir induktyviosios X varžų reikšmės paaimamos iš 4.4 lentelės.

Kiekvienos fazės srovė:

$$I_{Lk} \doteq \frac{U_{Lk}}{Z_L} \quad (4.14)$$

Fazinių įtampų bei srovių skaitinės reikšmės yra pateiktos 4.5 lentelėje. Išsami skaičiavimo eiga yra pateikta 12 priede.

4.5 lentelė. 100 kV linijos fazinės įtampos ir srovės

| laipsniai | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | 360 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| t,s | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| $U_{L1}=U_{L1'} \text{ (kV)}$ | 103.3 | 89.45 | 51.6 | 0 | -51.6 | -89.45 | -103.3 | -89.45 | -51.6 | 0 | 51.6 | 89.45 | 103.3 |
| $U_{L2}=U_{L2'} \text{ (kV)}$ | -51.6 | -89.45 | -103.3 | -89.45 | -51.6 | 0 | 51.6 | 89.45 | 103.3 | 89.45 | 51.6 | 0 | -51.6 |
| $U_{L3}=U_{L3'} \text{ (kV)}$ | -51.6 | 0 | 51.6 | 89.45 | 103.3 | 89.45 | 51.6 | 0 | -51.6 | -89.45 | -103.3 | -89.45 | -51.6 |
| $I_{L1}=I_{L1'} \text{ (A)}$ | 1.77 | -170.4 | -296.8 | -343.8 | -298.6 | -173.4 | -1.77 | 170.4 | 296.8 | 343.8 | 298.6 | 173.4 | 1.77 |
| $I_{L2}=I_{L2'} \text{ (A)}$ | -298.6 | -173.4 | -1.77 | 170.4 | 298.6 | 343.8 | 298.6 | 173.4 | 1.77 | -170.4 | -296.8 | -343.8 | -298.6 |
| $I_{L3}=I_{L3'} \text{ (A)}$ | 296.8 | 343.8 | 298.6 | 173.4 | 1.77 | -170.4 | -296.8 | -343.8 | -298.6 | -173.4 | -1.77 | 170.4 | 296.8 |

Kadangi EOL srovių ir įtampų, kintančių sinusu dėsnio, reikšmės skirtingu laiko momentu nėra vienodos, patartina EML modeliavimui kiekvienos fazės įtampos bei srovės reikšmes pasirinkti lygias efektingoms reikšmėms [60,61], kurios yra tokios:

$$U_{fRMS} \dagger \frac{U_{f \max}}{\sqrt{2}} \dagger \frac{103.3}{\sqrt{2}} \dagger 73.028kV \quad (4.15)$$

$$I_{IRMS} \dagger I_{fRMS} \dagger \frac{I_{f \max}}{\sqrt{2}} \dagger \frac{343.792}{\sqrt{2}} \dagger 243,01A \quad (4.16)$$

4.4 Dielektrinė skvarba

Aplinkos santykinė dielektrinė skvarba (SDS) ϵ yra bematis dydis, charakterizuojantis izoliuojamos (dielektrinės) terpės savybes. SDS yra siejamas su dielektrikų poliarizacija elektriniame lauke ir su charakterizuojančiu šį efektą dielektrinės terpės jautrumo dydžiu. Dydis ϵ nusako (parodo), kiek kartų dviejų krūvių sąveikos jėga tam tikroje terpėje yra mažesnė nei vakuume. Esant normalioms sąlygoms (Atmosferos slėgis: 101325 Pa = 760 mm Hg; Oro temperatūra: 273,15 K = 0° C.) oro ir daugumos dujų SDS yra artima vienetui [56], nes visos dujos ir oras turi žemus tankius. Daugumos kietųjų ir skystųjų dielektrikų SDS yra nuo 2 iki 8 diapazone [56,60,68] (čia turima omenyje statinis laukas). Vandens SDS elektrostatiiniame lauke yra pakankamai aukšta – 80-81.

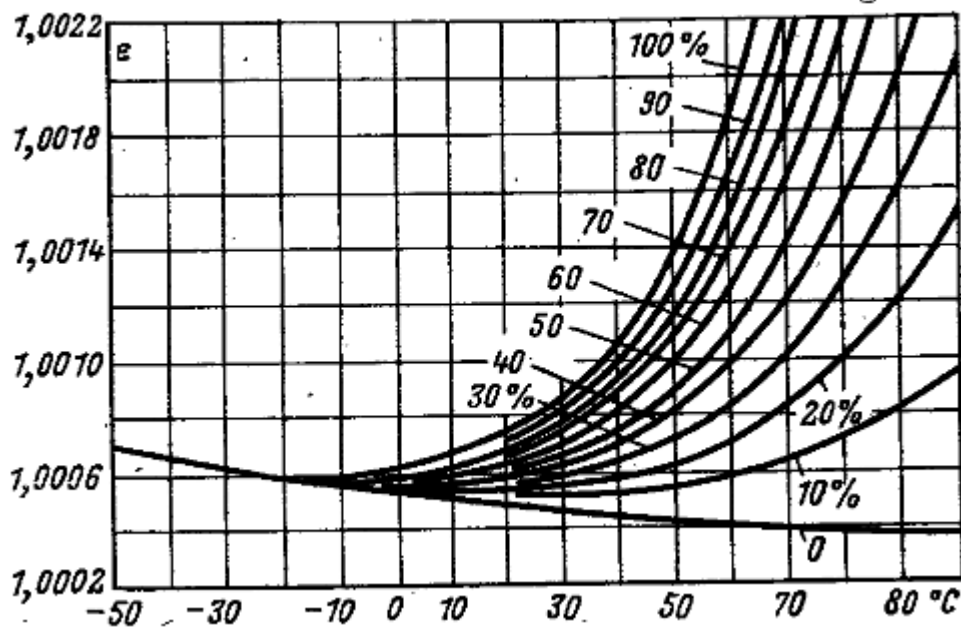
Jeigu bet kuri medžiaga yra apšviečiama kintamuoju EL, tai SDS nustoja būti pastoviu dydžiu ir smarkai mažėja aukštą dažnį turinčiuose laukuose. Taigi medžiagos DS priklauso nuo lauko dažnio.

4.4.1 Oro dielektrinė skvarba

Atmosferos oras yra daugelio dujinių medžiagų mišinys. Be deguonies ir azoto, sudarančių pagrindinę oro masę, oro sudėtyje yra nedidelis kiekis inertinių dujų, anglies dioksido ir vandens garų. Taip pat oro sudėtyje egzistuoja tam tikras kiekis dulkių ir atsitiktinės priemaišos. Deguonis, azotas ir inertinės dujos yra pastoviosios oro sudedamosios dalys, nes jų kiekis ore praktiškai visur yra vienodas. Anglies dioksido, vandens garų bei dulkių kiekis oro sudėtyje gali kisti priklausomai nuo skirtingų sąlygų.

Kaip yra žinoma, esant normaliam slėgiui ir temperatūrai, įvairios dujos, įeinančias į oro sudėtį, yra dielektrikai. Dėl didelių atstumų tarp molekulių dujinės medžiagos yra charakterizuojamos labai mažais tankiais. Todėl visų be išimčių dujinių dielektrikų dielektrinė skvarba yra nežymi ir artima vienetui [56].

Dujų dielektrinės skvarbos dydis, esant pastoviam slėgiui, priklauso nuo jų temperatūros. Paveiksle 4.7 parodyta oro DS priklausomybės nuo temperatūros.



4.7 pav. Oro SDS priklausomybė nuo temperatūros. Skaičiai šalia kreivių nurodo santykinę oro drėgmę [60]

Tačiau oro dielektrinė skvarba priklauso ne tik nuo oro temperatūros ir santykinės drėgmės, bet ir nuo atmosferos slėgio. Todėl oro dielektrinės skvarbos apskaičiavimas, esant skirtingiems oro drėgmės, temperatūros bei atmosferos slėgio reikšmėms gali būti atliktas naudojant Volperto (Wolpert) formulę [60]:

$$\epsilon \approx 1 + \frac{p}{T} \left(211 + \frac{\$ \cdot p_s \cdot 10160}{p \cdot T} \right) \cdot 10^{-6} \quad (4.17)$$

Čia: P - oro slėgis, mm Hg;

p_s - sočiųjų vandens garų stangrumas esant tam tikrai temperatūrai T , mm Hg;

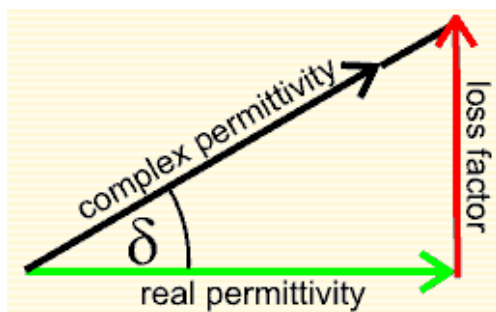
$\$$ - santykinė oro drėgmė, %;

T - absoliučioji temperatūra, K

Sočiųjų vandens garų stangrumas p_s apskaičiuojamas [60]:

$$\lg p_s \approx 7,45 + \frac{T - 273}{T + 38,3} \approx 0,656 \quad (4.18)$$

Dielektrinių medžiagų bei terpių, veikiamų kintamuoju lauku, savybes patogiau nagrinėti, naudojant KDS sąvoką. KDS turi menamąją, dar vadinamą dielektrinių nuostolių koeficientu, dedamąją ir realiąją dedamąją (4.8 pav.).



4.8 pav. KDS vektorinis vaizdavimas [49]

Dielektriniai nuostoliai ore priklauso nuo EMB dažnio[56]:

$$\epsilon_{lm} \uparrow \frac{\omega}{\omega_0} \quad (4.19)$$

Čia: ω - dažnis rad/s;

ω_0 - dielektrinė pastovioji; $\omega_0 \uparrow 8,85 \times 10^{12} F/m$.

Visų dujų, o taip ir oro savitasis laidumas skaičiuojamas:

$$\sigma \uparrow \frac{1}{\omega} \quad (4.20)$$

Oro savitosios varžos [56] priklausomybė nuo temperatūros gali būti apskaičiuota:

$$\rho \uparrow (1,7 \times 10^{17} T^3 + 5 \times 10^{14} T^2 + 0,1263 T + 12,191) \times 10^{16} \quad (4.21)$$

Realioji oro SDS dedamoji skaičiuojama:

$$\epsilon_{Re} \uparrow \sqrt{\epsilon^2 + \epsilon_{lm}^2} \quad (4.22)$$

Remiantis Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos duomenimis [34] šalčiausios užregistruotos temperatūros minimumas yra lygus -33 °C, o karščiausios temperatūros maksimumas siekia 34°C. Todėl EML bus modeliuojamos penkioms skirtingoms orų temperatūroms (4.6 lentelė). Oro SDS apskaičiuojama, taikant (4.15)-(4.20) formules. Reikiamos skaičiavimams santykinės oro drėgmės ir slėgio reikšmės buvo nustatytos iš [39]. Oro SDS skaičiavimai yra pateikti 14 priede.

4.6 lentelė. Oro SDS sąlygojančių parametrų ir apskaičiuotų reikšmių suvestinė

| | | | | | |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| t, °C | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| T,K | 240 | 258 | 273 | 288 | 307 |
| φ,% | 75 | 85 | 98 | 80 | 87 |
| P, h Pa/ mm Hg | 1027/770 | 1022/766 | 1010/757 | 1017/763 | 1011/758 |
| P _s , mm Hg | 0,274 | 1,404 | 4,579 | 12,692 | 39,691 |

| | | | | | |
|------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ϵ_{Re} | 1,0006784 | 1,0006315 | 1,0005982 | 1,0005796 | 1,0005627 |
| ϵ_{Im} | $3,59 \cdot 10^{-8}$ | $4,15 \cdot 10^{-8}$ | $4,906 \cdot 10^{-8}$ | $6,342 \cdot 10^{-8}$ | $1,252 \cdot 10^{-7}$ |
| ϵ_{oro} | 1,0006784 | 1,0006315 | 1,0005982 | 1,0005796 | 1,0005627 |

4.4.2 Vandens dielektrinė skvarba

EML kinta ne tik bėgant laikui, bet įgauna skirtingas EML parametrų vertes skirtinguose erdvės taškuose, t.y. EML kinta erdvėje. Šiomis aplinkybėmis vandens DS skaitinė reikšmė taip pat kinta. Todėl vandeniui būdinga vietinio pobūdžio poliarizacija.[75]

1929 m. Olandijos fizikas P. Debajus (Debye) pasiūlė aprašinėti vandens reakciją išoriniam EL kompleksinės dielektrinės skvarbos (KDS) pagalba [9]:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega D} + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_\infty}{1 + j\omega_2} \quad (4.23)$$

Čia: ϵ_r^* - KDS ;

ϵ_∞ - SDS aukštų dažnių diapazone, (optinė skvarba);

ϵ_s - SDS žemų dažnių diapazone, (statinis EL);

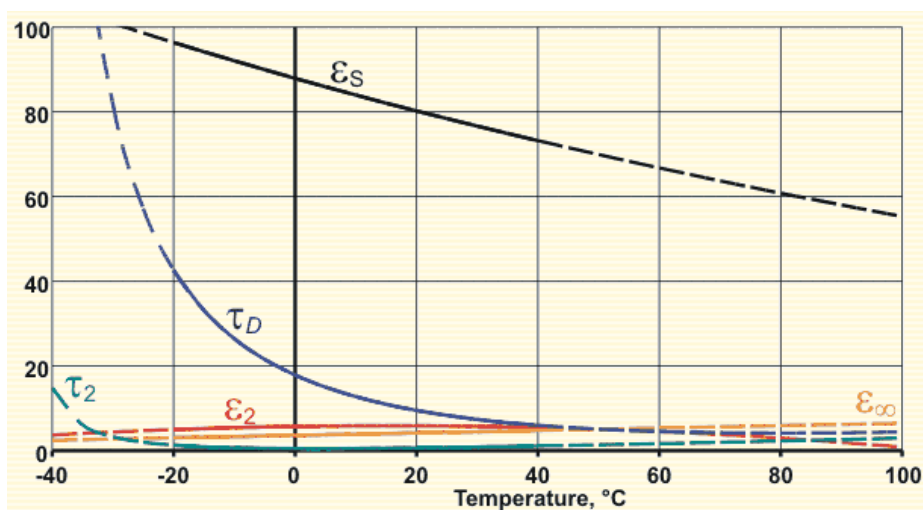
ϵ_2 - tarpinė SDS;

$\frac{1}{100D}$ ir $\frac{1}{100\omega_2}$ - relaksacijos laikotarpiai, 10^{-12} s ;

ω - dažnis rad/s

$\frac{1}{100D}$ relaksacijos laikotarpio trukmei sąlygoja jungties su vandenilio ryšiais sukimosi relaksacija, todėl $\frac{1}{100D}$ laikotarpis yra gana ilgas ($18 \cdot 10^{-12}$ s esant 0°C). Šis laikotarpis gali būti sumažintas, didinant vandens temperatūrą, to dėka vandenilio jungtis silpnėja ir susiskaido. $\frac{1}{100\omega_2}$ relaksacijos trukmė priklauso nuo vandeniliu surišų jungčių slenkamosios vibracijos (apie 200 cm^{-1}) [23]. $\frac{1}{100\omega_2}$ relaksacijos laikotarpio trukmė yra maža (apie $1 \cdot 10^{-12}$ s) [9], arba ($0,2 \cdot 10^{-12}$ s) [31] ir nežymiai priklauso nuo temperatūros.

Grafikai, pateikti 4.9 paveiksle vaizduoja gėlo vandens KDS parametrų priklausomybės nuo jo temperatūros nuo -20°C iki $+40^\circ\text{C}$ diapazone. Punktyrinėmis linijomis yra nusakomos KDS parametrų tendencijos; relaksacijos trukmės Y ašies matavimo vienetai yra 10^{-12} s.



4.9 pav. Vandens dielektrinės skvarbos parametrų nustatymo grafikai [35]

Lygtis (4.21) gali būti supaprastinama, padauginant sumoje esančias pirmą ir antrą trupmenas iš išraiškų \hat{H}_D^f ir \hat{H}_D^f atitinkamai:

$$\hat{U}_r^* \hat{U}_i \hat{G} \frac{\omega_S \hat{H}_2}{1 \hat{G} j \hat{H}_D} * \frac{1 \hat{H}_D^f}{1 \hat{H}_D^f} \hat{G} \frac{\omega_2 \hat{H}_i}{1 \hat{G} j \hat{H}_2} * \frac{1 \hat{H}_2^f}{1 \hat{H}_2^f} \quad (4.24)$$

$$\hat{U}_r^* \hat{U}_i \hat{G} \frac{\omega_S \hat{H}_2}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} D} * \frac{1 \hat{H}_D^f}{1 \hat{H}_D^f} \hat{G} \frac{\omega_2 \hat{H}_i}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} 2} * \frac{1 \hat{H}_2^f}{1 \hat{H}_2^f} \quad (4.25)$$

KDS išraiška (4.25) yra pertvarkoma, išskiriant joje realiąją ir menamąją (nuostolių koeficientas) dalis:

$$\hat{U}_r^* \hat{U}_i \hat{G} \frac{\omega_S \hat{H}_2}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} D} \hat{G} \frac{\omega_2 \hat{H}_i}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} 2} \hat{G} j \frac{\hat{H}_D^f \omega_S \hat{H}_2^f}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} D} \hat{G} \frac{\hat{H}_2^f \omega_2 \hat{H}_i^f}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} 2} \quad (4.26)$$

Formulės (4.26) realioji dalis:

$$\hat{U}_r^{\prime} \hat{U}_{rRe} \hat{U}_i \hat{G} \frac{\omega_S \hat{H}_2}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} D} \hat{G} \frac{\omega_2 \hat{H}_i}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} 2} \quad (4.27)$$

Formulės (4.26) menamoji dalis, atitinkanti nuostolių koeficientui (Nk):

$$Nk \hat{U}_{rIm} \hat{U}_i \hat{G} \frac{\hat{H}_D^f \omega_S \hat{H}_2^f}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} D} \hat{G} \frac{\hat{H}_2^f \omega_2 \hat{H}_i^f}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} 2} \quad (4.28)$$

Kadangi $(\epsilon_S - \epsilon_2) \gg (\epsilon_S - \epsilon_\infty)$ ir $\tau_D \gg \tau_2$, DS išraiškos (4.27) realioji dalis gali būti aproksimuota:

$$\hat{U}_r^{\prime} \hat{U}_{rRe} \hat{U}_i \hat{G} \frac{\omega_S \hat{H}_i}{1 \hat{G} \sqrt{2 \frac{12}{100}} 2} \quad (4.29)$$

O DS išraiškos (4.28) menamoji dalis gali būti aproksimuota:

$$Nk \uparrow \omega_{r, \text{Im}} \uparrow \frac{\sqrt{F_{\omega_S} H \omega_i f}}{1 \text{ G} \sqrt{\frac{2 \cdot 1^2}{100}}} \quad (4.30)$$

Čia: $\frac{1}{100}$ - relaksacijos trukmė, 10^{-12} s.

Nustatant realiąją ir menamąją KDS dedamąsias, vandens SDS gali būti apskaičiuota:

$$\omega_r \uparrow \sqrt{F_{\omega_{r, \text{Re}}} f^2 \text{ G} F_{\omega_{r, \text{Im}}} f^2} \quad (4.31)$$

Pasitelkus šaltinio [39] duomenis, buvo nustatyta Kuršių marių vandens temperatūra pasirinktoms oro temperatūros reikšmėms. Vandens SDS buvo apskaičiuota naudojant (4.27), (4.28) ir (4.31) formules. Visi reikiami skaičiavimui dydžiai buvo nustatyti iš grafiko (4.8 pav.). Skaičiavimo algoritmas yra pateiktas 15 priede, o skaičiavimo rezultatai 4.7 lentelėje.

4.7 lentelė. Vandens SDS sąlygojančių parametru ir apskaičiuotų reikšmių suvestinė

| | | | | | |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| oro t, °C | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| vandens t, °C | 0 | 0,4 | 1 | 25 | 27 |
| ω_i | 3,93 | 3,93 | 3,93 | 5,76 | 5,76 |
| ω_S | 87,71 | 87,17 | 87 | 78,58 | |
| ω_2 | 6,07 | 6,07 | 6,07 | 4,29 | 4,29 |
| ∇ | 314 | 314 | 314 | 314 | 314 |
| $\frac{1}{100D}$ | 17,32 | 17,68 | 16,96 | 8,21 | 7,86 |
| $\frac{1}{100\epsilon_2}$ | 0 | 0 | 0 | 0,89 | 0,91 |
| ϵ_{Re} | 87,1 | 87,17 | 87 | 78,58 | 77,51 |
| ϵ_{Im} | $4,4 \cdot 10^{-7}$ | $4,5 \cdot 10^{-7}$ | $4,3 \cdot 10^{-7}$ | $1,9 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{-7}$ |
| $\epsilon_{\text{vandens}}$ | 87,71 | 87,17 | 87,03 | 78,58 | 77,51 |

4.4.3 Ledo dielektrine skvarba

Ledo DS priklauso nuo ledo temperatūros ir elektromagnetinių bangų, sklindančių ledo terpėje, dažnio[51] ir, mažėjant temperatūrai, didėja. Kai elektromagnetinių bangų dažnis yra lygus 108 Hz, ledo DS pasiekia savo pastoviosios, nepriklausančios nuo tolimesnio temperatūros mažėjimo, reikšmės lygį 3,15. Jei ir toliau didinti dažnį, DS nesikeis[51]. Atsižvelgiant į tai, kad ledas yra vandens agregatinė būsena ir vanduo pavirsta ledu esant jau 0 °C, dažnio diapazone nuo 0Hz iki $3,49 \cdot 10^7$ Hz ledo DS reikšmės gali būti nustatytos, naudojant šio darbo poskyrio 4.4.2 grafinę priklausomybę (4.9 pav.)[35] arba formulės (4.29),(4.30) ir (4.31), kuriose:

ω_i - ledo SDS aukštų dažnių diapazone, (optinė skvarba), ledo $\omega_i \uparrow 3.15$;

ω_S - ledo SDS žemų dažnių diapazone,(statinis EL);

$\frac{1}{100} \uparrow \frac{1}{100}$ - relaksacijos laikas, s;

▼ - dažnis rad/s;

Statinė ledo SDS priklausomybė nuo temperatūros taip pat gali būti apskaičiuota, naudojant formulę [75]:

$$\psi_s \approx 1982.08 + 22.098 T + 0.087 T^2 + 1.1596 \cdot 10^{-4} T^3 \quad (4.32)$$

Čia: T - ledo temperatūra, K.

Kai temperatūrų diapazonas yra nuo -40 iki 0 °C, santykinė skaičiavimo paklaida neviršija 1.5 %.

Relaksacijos laikas apskaičiuojamas [75]:

$$\frac{1}{100\rho} \approx 53258.816 \cdot e^{(0.078 T + 1.119 \cdot 10^{-3} T^2 + 2 \cdot 10^{-6} T^3)} \quad (4.33)$$

Ledo DS apskaičiuojama naudojant formulės (4.29)–(4.33). Skaičiavimo algoritmas yra pateiktas 16 priede, o rezultatai yra parodyti 4.8 lentelėje.

4.8 lentelė. Ledo SDS sąlygojančių parametų ir apskaičiuotų reikšmių suvestinė

| $t, ^\circ\text{C, oro}$ | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------|---|----|----|
| $t, ^\circ\text{C/K, ledo}$ | -10/263 | -4/269 | - | - | - |
| ψ_i | 3,15 | 3,15 | - | - | - |
| ψ_s | 94,906 | 93,086 | - | - | - |
| $\frac{1}{100\rho}$ | $5,579 \cdot 10^{-5}$ | $3,17 \cdot 10^{-5}$ | - | - | - |
| ▼ | 314 | 314 | - | - | - |
| ϵ_{Re} | 94,8 | 93,08 | | | |
| ϵ_{Im} | 1,61 | 0,895 | | | |
| ϵ_{ledo} | 94,8 | 93,08 | - | - | - |

4.4.4 Rūko dielektrinė skvarba

Rūkas – ore susidariusi gausi smulkių vandens lašų arba kristalų sankaupa, dėl kurios horizontalus matomumas atmosferos priežemio sluoksnyje yra mažesnis nei 1 kilometras. Rūkas kaip ir debesys atsiranda, kai ore kondensuojasi vandens garai. Kai oro temperatūra aukštesnė kaip -20 °C, rūkas paprastai būna vien iš vandens lašelių. Kuo rūkas vandeningesnis (g/m^3) ir kuo didesnės jo dalelės, tuo mažesnis matomumas. Santykinė oro drėgmė rūko metu yra artima 100 %. Ežerai, pelkės, upių slėniai yra vieni iš pagrindinių vietinių rūko susiformavimo veiksnių [10]. Virš vandens telkinių, netgi žemos metu, gali susiformuoti garavimo rūkas. Tokio tipo rūkas atsiranda, kai oro temperatūra yra 10 – 12° žemesnė už vandens temperatūrą. Didelis kiekis vandens garų susimaišo su oru, gana staigiai įsisotina ir kondensuojasi, sudarydami rūką. Garavimo rūkų aukštis virš vandens telkinio gali siekti 3 – 5 m. Vandens lašų kiekis silpno rūko atveju siekia 1-10 vnt/cm³, o stipraus rūko atveju – 400 – 600 vnt/cm³. Rūką sudarančių lašų spindulys yra lygus (2-15)·10⁻⁶ m. Garavimo rūkai yra charakterizuojami vandeningumu.

Vandeningumas nusako, kokia vandens masė yra ištirpinta viename oro tūryje. Labai stiprių garavimo rūkų vandeningumas siekia 1-1,5 g/m³ [10]. Kadangi rūkas iš esmės yra vandens garų ir oro mišinys, tai tokio mišinio DS apskaičiuojama taikant Lichtenekerio (Lichtenecker) formulę[55]:

$$\lg \psi \approx y_1 \lg \psi_1 + y_2 \lg \psi_2 \quad (4.34)$$

Čia: y_1 - vandens masės dalis rūko tūryje;

y_2 - oro masės dalis tūryje;

ψ_1 - vandens SDS, atitinkanti vandens temperatūrą rūko metu;

ψ_2 - oro SDS, atitinkanti oro temperatūrai rūko metu.

Vandens ir oro masių dalys rūke apskaičiuojamos:

$$y_1 \approx \frac{m_{vand}}{m_{ruk}} \quad (4.35)$$

$$y_2 \approx \frac{m_{oro}}{m_{ruk}} \quad (4.36)$$

Čia: m_{vand} - vandens masė, esanti viename rūko m³; $m_{vand} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$

m_{ruk} - vieno m³ rūko masė;

m_{oro} - oro masė, esanti viename rūko m³.

Rūko metu drėgmės savitasis laidis ore siekia $5 \cdot 10^{-11} - 7 \cdot 10^{-11} (\Omega m)^{-1}$, o lietaus metu – $2,1 \cdot 10^{-11} - 26 \cdot 10^{-11} (\Omega m)^{-1}$ [68]. KDS dedamųjų įvertinimui savitasis rūko laidis buvo priimtas $\gamma = 7 \cdot 10^{-11} (\Omega m)^{-1}$. Rūko SDS apskaičiuojama, įvertinant vandens ir oro mases viename kubiniame rūko tūryje bei atsižvelgiant į rūko tankio priklausomybę nuo oro temperatūros. Taip pat įvertinant vandens ir oro SDS, esant tam tikroms oro (lentelė 4.6) ir vandens (lentelė 4.7) temperatūroms, rūko SDS buvo skaičiuojama taikant (4.34) - (4.36). Rūko KDS dedamųjų apskaičiavimui buvo panaudotos formulės (4.19) ir (4.22). Skaičiavimo eiga yra pateikta 17 priede, o rezultatai - 4.9 lentelėje.

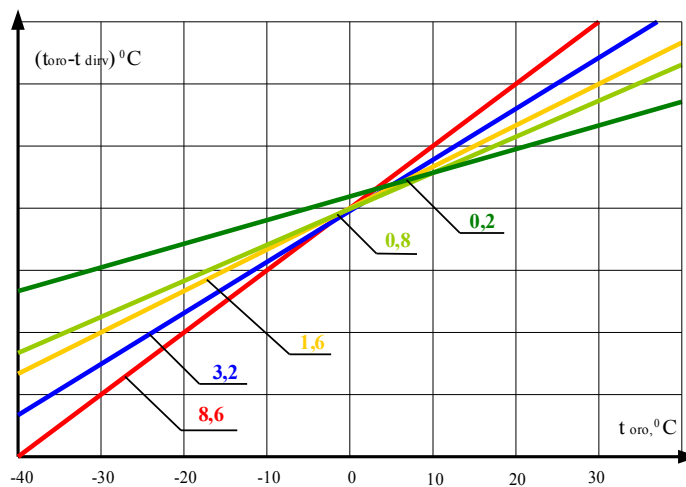
4.9 lentelė. Rūko SDS sąlygojančių parametru ir apskaičiuotų reikšmių suvestinė

| | t, °C | ε | m, kg | ρ, kg/m ³ |
|-----------------|-------|-----------|----------------------|----------------------|
| oras | 15 | 1,0005796 | 1,23 | 1,23 |
| vanduo | 25 | 78,58 | 1,5·10 ⁻³ | - |
| rūkas | | 1,0059 | 1,23159032 | - |
| ε _{Re} | | 1,0056 | | |

| | | | |
|-----------------|--|--------|--|
| ϵ_{lm} | | 0,0252 | |
|-----------------|--|--------|--|

4.4.5 Dirvožemio dielektrinė skvarba

Žemės SDS tam tikroje vietovėje tiesiogiai priklauso nuo dirvožemio sudėties, susidedančių dalelių matmenų ir elektromagnetinių bangų dažnio [74]. Daugumoje dirvožemiai susideda iš mineralinių ir/arba organinių medžiagų, surištosios vandens ir oro. Kuo didesnis vandens kiekis dirvožemyje, tuo jo SDS yra didesnė [43]. Remiantis Lietuvos Respublikos aplinkos ministerijos parengto projekto duomenimis [49], Kuršių marios Klaipėdos sąsiaurio dugno dirvožemio sudėtyje pagrindiniai vyrauja smėlis. Kai kurių dirvožemio tipų SDS [65] yra pateiktos 9 priede. Dirvožemio temperatūra tiesiogiai priklauso nuo oro temperatūros virš dirvožemio paviršiaus (4.10 pav.). Skaičiai šalia spalvotų tiesių nurodo dirvožemio matuojamo gyli. Praktiškai dirvožemio temperatūra, gyliui pasiekiant 8,6m ir tolstant žemyn nuo šios ribos, nesikeičia [74].



4.10 pav. Dirvos temperatūros pokyčio priklausomybė nuo oro temperatūros [74]

Dabartiniu metu moksliniame pasaulyje yra vykdomi įvairių tipų dirvožemių SDS priklausomybės nuo sudėties, drėgnumo ir dažnio tyrinėjimai, bandant išvesti bendrąją, pakankamai tiksliai įvertinančią visų tipų dirvožemių SDS, formulę Debajaus dėsnio pagrindu.[43],[65],[44]. Smėlio SDS priklausomybė nuo temperatūros gali būti apskaičiuota [50]:

$$\epsilon_r(T) \approx 2,13 * e^{0,0022 * T} \quad (4.37)$$

Čia: T – dirvožemio temperatūra, K

Dirvožemio dielektriniai nuostoliai gali būti įvertinami formule (4.19), kurioje smėlėtų dirvožemių savitojo laidžio priklausomybė nuo jo temperatūros Kelvinais nustatoma formule[43]:

$$\sigma(T) \approx 8 \cdot 10^{12} T^4 + 6 \cdot 10^{19} T^3 + 2 \cdot 10^{26} T^2 + 2 \cdot 10^{34} T + 0.2744 \cdot 10^{42} \quad (4.38)$$

Dirvos SDS menamajai dedamajai apskaičiuoti buvo taikoma formulė (4.22).

Kadangi žemės sluoksnių, esančių skirtingu atstumu nuo paviršiaus, temperatūros nevienodos, tai dirvožemio temperatūra, atitinkanti tam tikrajai oro temperatūrai virš žemės paviršiaus, buvo nustatoma iš grafiko (4.10 pav.) kaip vidutinę per visus matuojamus gylius. Dirvožemio temperatūros nustatymas yra pateiktas 10 priede; SDS skaičiavimo eiga – 18 priede, o rezultatai – 4.10 lentelėje.

4.10 lentelė. Dirvos SDS sąlygojančių parametru ir apskaičiuotų reikšmių suvestinė

| oro t , °C | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
|------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| dirv. Vid t , °C, /K | -5,2 / 267,8 | -2,6 / 270,4 | 0,4 / 274,4 | 4,6 / 277,6 | 10,6 / 283,6 |
| ε_{dirv} | 3,84 | 3,86 | 3,89 | 3,92 | 3,97 |
| ε_{Re} | 3,69 | 3,72 | 3,74 | 3,78 | 3,83 |
| ε_{Im} | 1,044 | 1,046 | 1,048 | 1,051 | 1,055 |

4.5 Būtinų ML modeliavimui terpių fizikinių dydžių nustatymas

4.5.1 Terpių magnetinė skvarba

Išoriniame magnetiniame lauke visos terpės ir medžiagos įsimagnetina. Medžiagos įsimagnetinimo dydis charakterizuojamas medžiagos SMS. Skirtingos medžiagos turi skirtingas SMS. Atsižvelgiant į SMS dydį, visos medžiagos gali būti suskirstytos į tris dideles grupes [30] (4.11 pav.). Diamagnetinių medžiagų MS vertės yra šiek tiek mažesnės už vienetą. Pavyzdžiui, kvarcas, vanduo, druskos yra priskiriamos diamagnetinių medžiagų grupei [42]. Išorinis ML praktiškai visiškai neveikia diamagnetikams. Paramagnetikų SMS yra šiek tiek didesnė už vienetą. Nikelis, deguonis, azotas, oras yra paramagnetikai [28]. Paramagnetikai yra silpnai veikiami išoriniais ML. Veikiant išoriniu ML feromagnetinių medžiagų vidinis magnetinis laukas yra sustiprinamas.

Medžiagos SMS patogiu apskaičiuoti žinant terpės optinį lūžio rodiklį [28]:

$$n \approx \sqrt{\varepsilon_r \kappa_r} \quad (4.39)$$

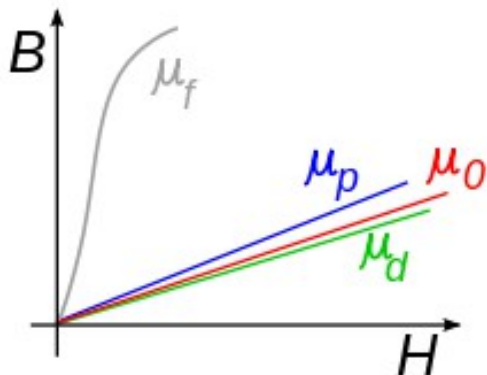
Čia: ε_r - medžiagos SDS;

κ_r - medžiagos SMS.

EMB lūžio rodiklis nustatomas formule [75]:

$$n \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_r \varepsilon_{Re}}{2}} \quad (4.40)$$

Čia: ε_{Re} - medžiagos SDS realioji dedamoji.



4.11 pav. Įvairių terpių (medžiagų) SMS schematiškas vaizdavimas [42]
 μ_p – paramagnetikai; μ_d – diamagnetikai; μ_f – feromagnetikai; μ_0 – vakuumas

Terpių lūžio rodiklių skaičiavimo rezultatai yra pateikti 4.11 lentelėje.

4.11 lentelė. Terpių lūžio rodikliai esant 50 Hz dažniui

| Oras | | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| t, °C | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| n | 1.00033914 | 1.0003157 | 1.00029906 | 1.00028976 | 1.00028131 |
| Vanduo | | | | | |
| t, °C | 0 | 0,4 | 1 | 25 | 27 |
| n | 9.365 | 9.336 | 9,327 | 8,865 | 8,803 |
| Ledas | | | | | |
| t, °C/K, ledo | -10/263 | -4/269 | | | |
| n | 9,732 | 9,648 | | | |
| Rūkas | | | | | |
| n | | | | 1,0029 | |
| Dirvožemis | | | | | |
| d. vid. T, °C, /K | -5,2 / 267,8 | -2,6 / 270,4 | 0,4 / 274,4 | 4,6 / 277,6 | 10,6 / 283,6 |
| n | 1,94 | 1,947 | 1,953 | 1,962 | 1,975 |

Apskaičiavus modelyje esančių terpių lūžio rodiklius taip, kaip yra pateikta 19 priede, terpių SMS apskaičiuojami, taikant pertvarkytą (4.39) formulę:

$$\epsilon_r \uparrow \frac{n^2}{\epsilon_r} \quad (4.41)$$

4.5.2 Terpių savitųjų laidžių priklausomybės nuo temperatūros nustatymas

Oro SL priklausomybė nuo temperatūros išreiškiama formulėmis (4.20),(4.21). Oro SL skaitinių reikšmių, atitinkančių pasirinktoms temperatūros reikšmėms, nustatymas yra pateiktas 14 priede. Apie

rūko SL buvo minėta šio darbo 4.4.4 poskyryje ir nustatyta, kad rūko SL yra lygus $\gamma_r = 7 \cdot 10^{-11} (\Omega m)^{-1} = 7 \cdot 10^{-17} M(\Omega m)^{-1}$ [68]. Smėlėto dirvožemio SL priklausomybė nuo jo temperatūros yra aprašoma formule (4.38). Visi skaičiavimai, susieti su dirvožemio SL nustatymais yra pateikti 18 priede.

Vandens temperatūrai padidėjus 1°C, gėlo vandens SL didėja apytiksliai 2%. Vandens temperatūrai esant $t = 20^\circ C$, jo SL yra lygus $\gamma_v = 5 \cdot 10^{-6} (\Omega m)^{-1} = 5 \cdot 10^{-12} M(\Omega m)^{-1}$ [35]. Todėl vandens SL yra išreiškiamas šitokia tiesine priklausomybe nuo temperatūros[35]:

$$\gamma_v = 5 \cdot 10^{-6} + 0,02 \cdot (T - 20) \cdot 10^{-6} \quad (4.42)$$

Vandens SL apskaičiavimas yra pateiktas 15 priede.

Ledo SL yra kelis kartus mažesnis už vandens SL ir gali būti apskaičiuotas [51]:

$$\gamma_L = 2073,5 \cdot e^{0,03287 \cdot T} \cdot 10^{-13} \quad (4.43)$$

Ledo SL skaičiavimas yra pateiktas 16 priede. Visų terpių SL skaitinės reikšmės, atitinkančios pasirinktosios temperatūros yra pateiktos 4.14 lentelėje.

4.5.3 Srovės tankio bei kitų ML modeliavimo parametrų nustatymas

Išorinių srovės šaltinių tankis J_s modelio plote S_s apskaičiuojamas:

$$J_s = 3 \cdot \frac{I}{S_s} + \frac{3 \cdot I \cdot R}{\sqrt{R^2}} \quad (4.44)$$

Čia: I - EOL laidininkais tekančios srovės efektinė vertė, $I \approx 243 A$;

S_s - FEMM programoje EOL modelio plotas $S_s \approx \frac{\sqrt{R^2}}{4} m^2$;

R - modelio spindulys, m; $R \approx 110 m$.

Faziniu laidininku tekančios srovės tankis J_l laidininko skerspjūvio plote S_l apskaičiuojamas:

$$J_l = \frac{I}{S_l} + \frac{I}{\sqrt{r^2}} \quad (4.45)$$

Čia: r - laidininko spindulys, m; $r \approx 11,55 \cdot 10^{-3} m$.

AĮEOL pagrindinai yra naudojami neizoliuoti aliuminio plieno arba vien aliuminio laidai. Aliuminio plieno laiduose plieno šerdies varža yra paneigiama, turint omenyje, kad srovė teka tik aliuminio laidininko dalimi. Todėl tokio tipo laidininkams SMS yra priimama lygus aliuminio SMS [62,70].

4.6 Modeliavimo rezultatų aptarimas

4.6.1 Elektros laukas

Tiriamosios AĖEOL modelis FEMM programos terpėje buvo sudarytas remiantis lentelėje 4.12 pateiktais geometriniais duomenimis, apskaičiuotais taip, kaip buvo aptarta šio darbo 3.5 poskyryje. ELS modeliavimo schemas vaizdas FEMM programoje yra pateiktas 20 priede. Terpių dielektrinių skvarbų dydžiai, atitinkantys pasirinktosios orų sąlygoms, kombinuotųjų kraštinių sąlygų koeficientų bei faziniams laidams modeliavimo metu priskiriamos įtampų reikšmės yra pateiktos 4.13 lentelėje.

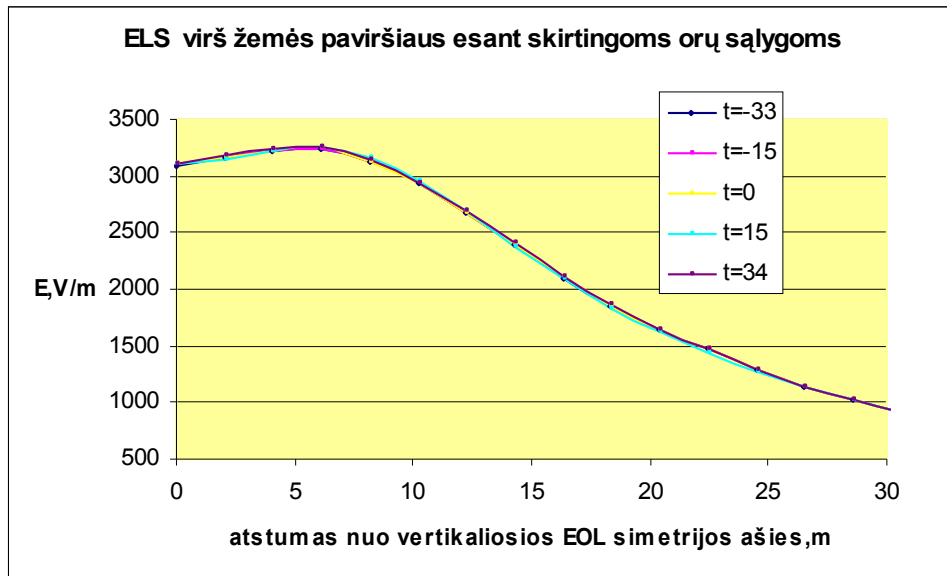
4.12 lentelė. EML modeliavimo schemas geometriniai parametrai

| | | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| d_L,m | d_{L1}=d_{L2}=d_{L3},m | H,m | h,m |
| 6,5 · 10 ⁻³ | 23,1 · 10 ⁻³ | 32,2 | 12 |
| R,m | O (x,y),m | A (x,y),m | B (x,y),m |
| 110 | (0;0) | (110,0) | (0;110) |
| B₁ (x,y),m | A₁ (x,y),m | B_{2(0,5)} (x,y),m | A_{2(0,5)} (x,y),m |
| (0;12) | (109,34;12) | (0;12,5) | (109,29;12,5) |
| B_{2(0,3)} (x,y),m | A_{2(0,3)} (x,y),m | B₃ (x,y),m | A₃ (x,y),m |
| (0;12,3) | (109,31;12,3) | (0;17) | (108,678;17) |

4.13 lentelė. EL modelio įvesties parametų suvestinė

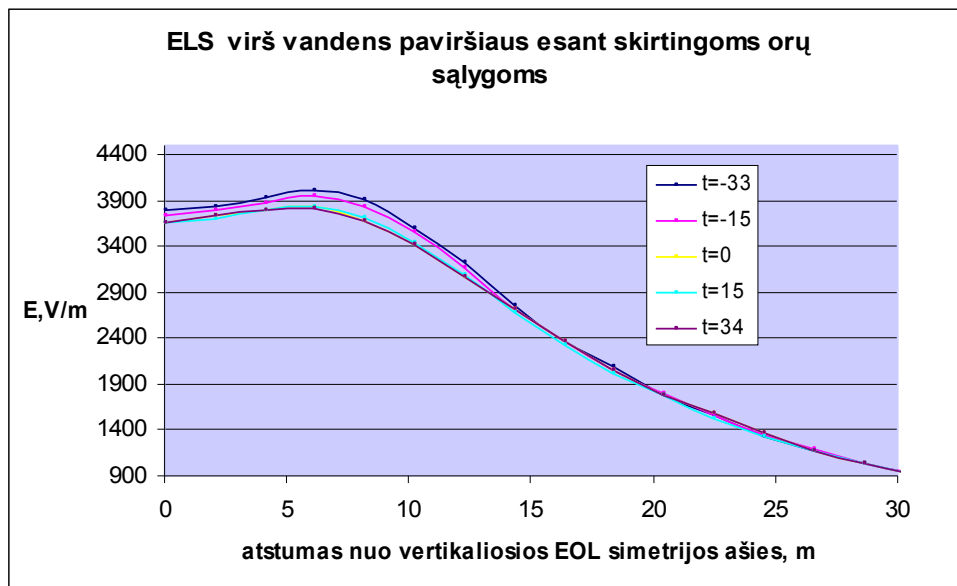
| | Virš vandens paviršiaus | | | | | Virš žemės paviršiaus | | | | | |
|---------------------|-------------------------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|--|
| t oro, °C | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | |
| ε oro | 1,0006784 | 1,0006315 | 1,0005982 | 1,0005796 | 1,0005627 | 1,0006784 | 1,0006315 | 1,0005982 | 1,0005796 | 1,0005627 | |
| ε ledo | 94,8 | 93,08 | | | | | | | | | |
| ε ruko | | | | 1,0059 | | | | | 1,0059 | | |
| ε vand. /ε dirv. | 87,71 | 87,17 | 87,03 | 78,58 | 77,51 | 3,84 | 3,86 | 3,89 | 3,92 | 3,97 | |
| | C₀ | | | C₁ | | | U_{fRMS}, kV | | | | |
| | 0 | | | 0,1609 · 10 ⁻¹² | | | 73 | | | | |

ELS pasiskirstymų virš vandens ir žemės paviršių grafinės interpretacijos esant skirtingoms orų sąlygoms yra pavaizduotos 4.12 ir 4.13 paveiksluose atitinkamai, o išsamūs ELS modeliavimo rezultatai lentelės pavidalu yra pateikti 23 priede. Remiantis paveikslo 4.12 grafiku, skaitinės ELS reikšmės virš žemės paviršiaus, atitinkantys tam tikroms orų sąlygoms, praktiškai nesikeičia. Todėl galima teigti, kad ELS tam tikrame aukštyje ir atstume nuo EOL vertikaliosios ašies išlieka pastovus ir yra nepriklausantis nuo orų permainingos.

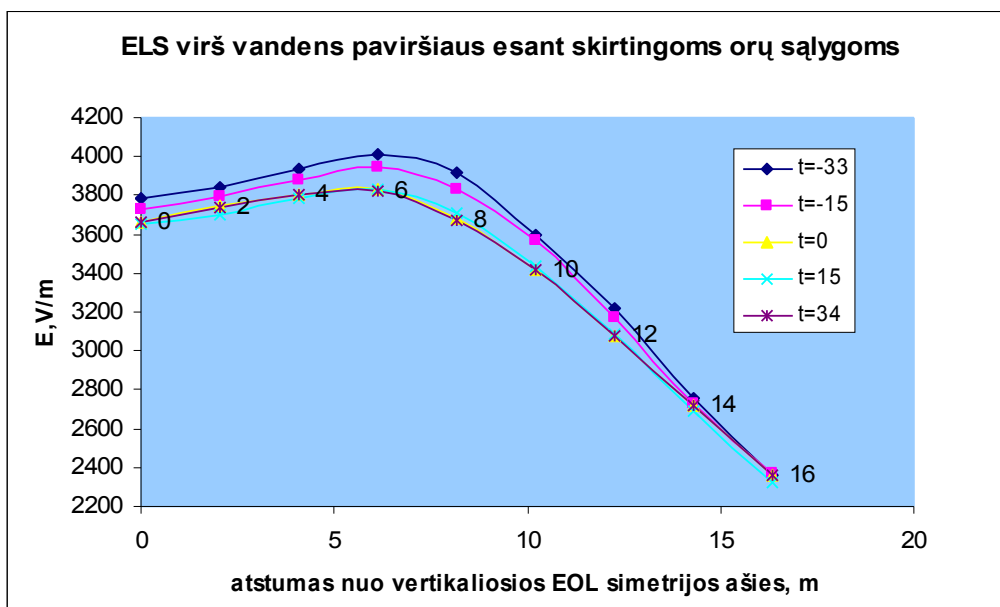


4.12 pav. EL virš žemės paviršiaus modeliavimo rezultatų grafinis vaizdavimas

Nežymus ELS reikšmių skirtumas virš vandens paviršiaus (4.13 pav.), atitinkantis įvairioms orų sąlygoms, yra pastebėtinai atstume nuo 0 iki 15 metrų (4.14 pav.), t.y. tarp fazinių laidų. Vidutiniškai šis skirtumas sudaro 681 V/m. Tolstant nuo vertikalsios EOL ašies simetrijos link atstumams, didesniems negu 15 m, ELS reikšmės tampa beveik vienodos (4.13 pav.).

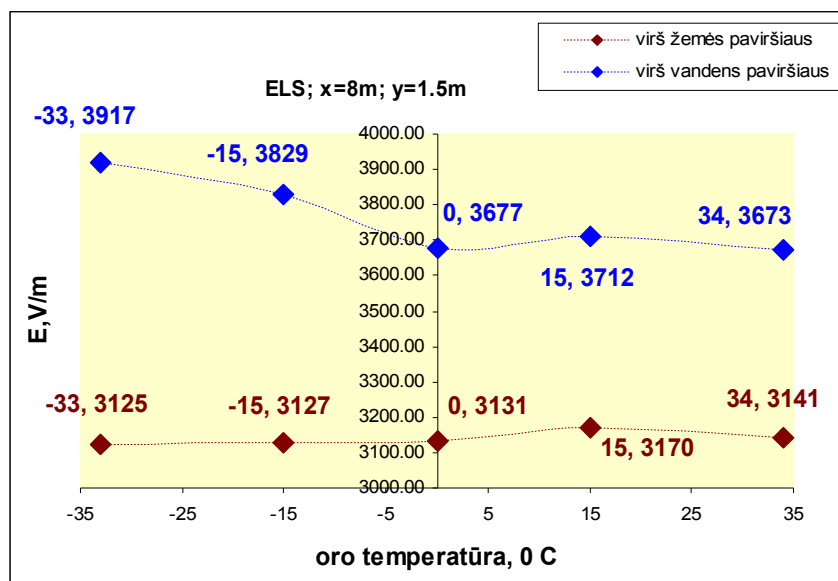


4.13 pav. EL virš vandens paviršiaus modeliavimo rezultatų grafinis vaizdavimas



4.14 pav. ELS virš vandens paviršiaus patikslintas vaizdas

Remiantis 4.14 paveikslu, didžiausias skirtumas tarp ELS verčių virš vandens paviršiaus yra pastebėtinai 8 m atstume nuo vertikalsios linijos simetrijos ašies. Todėl orų permainų įtakai ELS vertėms virš skirtingų paviršių įvertinti buvo nubraižyti ELS verčių priklausomybės nuo oro temperatūros, kurios yra pateiktos 4.15 paveiksle.

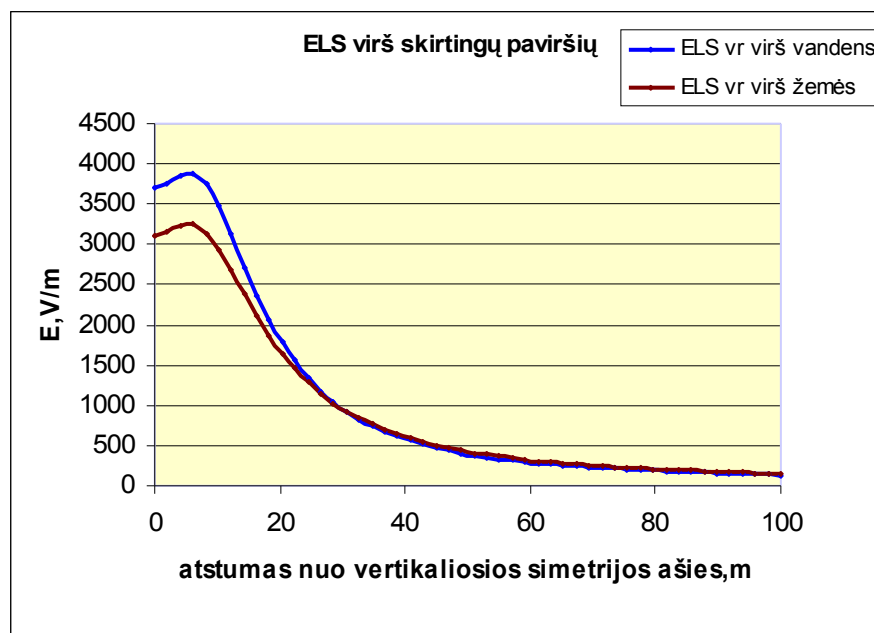


4.15 pav. Palyginamasis ELS vaizdavimas didžiausiame verčių srities skirtume

Akivaizdu, kad ELS vertės virš vandens paviršiaus yra apytiksliai lygios 3670 V/m, kai oro temperatūra yra $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $t = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$. ELS, vidutiniškai 203 V/m padidėjimas matomas žemų temperatūrų diapazone, kurį sąlygoja ledo sluoksnio buvimas telkinio paviršiuje. Remiantis apibrėžtomis šio darbo 3.3 poskyryje orų sąlygomis, esant oro temperatūrai $t = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, ledo sluoksnio storis sudaro 0,3 m, o esant

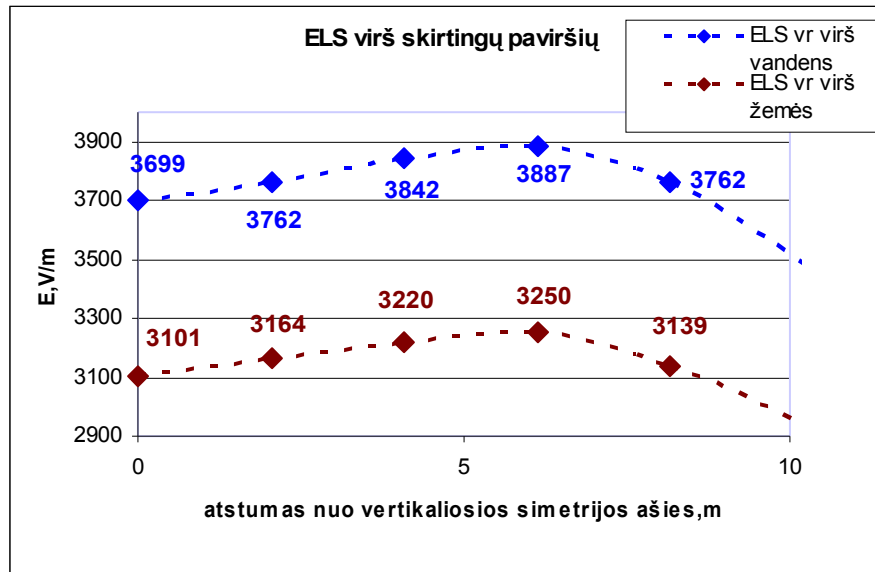
žemiausiai oro temperatūrai ledo sluoksnio storis siekia 0,5 m. Šiomis sąlygomis ELS verčių skaitinės reikšmės yra lygios 3829 V/m ir 3917 V/m atitinkamai. Rūko metu ELS virš vandens paviršiaus yra lygus 3712 V/m, kas yra 42 V/m daugiau lyginant šią vertę su kitomis ELS vertėmis teigiamųjų oro temperatūrų diapazone. Pastebėtinai ELS vertės padidėjimas 39 V/m matomas rūko buvimo metu virš žemės paviršiaus, tuo tarpu esant kitoms likusioms oro temperatūros reikšmėms, ELS virš žemės paviršiaus nesikeičia ir yra lygus 3130 V/m. Labai nežymus 10 V/m ELS padidėjimas virš žemės paviršiaus yra matomas, kai oro temperatūra siekia $t = 34^{\circ} \text{C}$. Tad galima teigti, kad ELS verčių padidėjimui tiesiogiai įtakoja paviršių sudarančios terpės agregatinės būsenos fizikinių savybių kitimas.

ELS verčių palyginamajai tarpusavyje analizei virš abiejų paviršių atlikti, buvo prasminga apskaičiuoti vidutines ELS vertes konkrečiuose 0, 1, ..., 100 m atstumuose nuo EOL vertikaliosios simetrijos ašies pasirinktųjų oro temperatūrų diapazone ir nubraižyti grafiką, kuris yra parodytas 4.16 paveiksle. Vidutinis skirtumas tarp ELS verčių virš skirtingų paviršių sudaro 516 V/m, t.y. ELS vertės virš vandens paviršiaus yra vidutiniškai 516 V/m didesnės negu virš žemės paviršiaus.

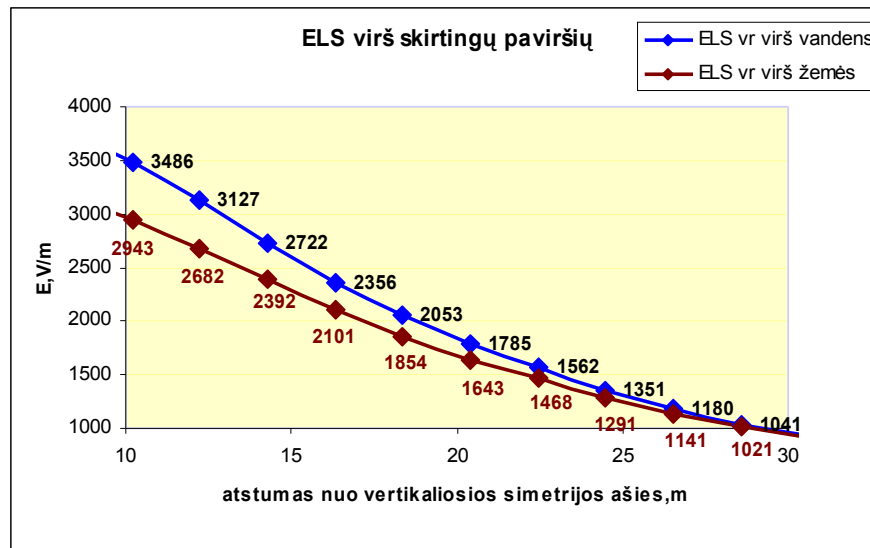


4.16 pav. Vidutinių ELS verčių virš skirtingų paviršių vaizdavimas

Remiantis elektros tinklų apsaugos zonos nustatymo reikalavimais (6 priedas), nagrinėjamos 110 kV AĖEOL SAZ teritorijos plotas nustatomas lygus 100 m, skaičiuojant nuo kraštinio linijos laido L2 pakabinimo atstumų, kuriame galima užsiimti tam tikra veikla (5 priedas), jei ELS SAZ teritorijoje, neviršija 1 kV/m, o ELS po linijos laidais neviršija 5 kV/m. Tad tiriamojo objekto SAZ riba yra nustatoma [10;110] intervalu metrais X ašies kryptimi, įvertinus kraštinio EOL laido abscisės reikšmę (4.3 lentelė). ELS vertė Y ašies kryptimi buvo nustatoma 1,5 m aukštyje, kas atitinka vidutiniam žmogaus ūgiui.



4.17 pav. ELS skaitinės po linijos laidais

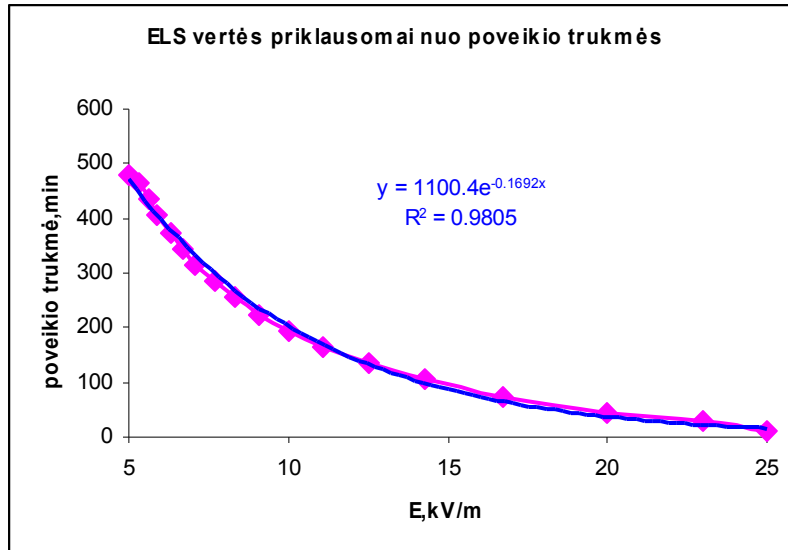


4.18 pav. ELS SAZ teritorijos ruože

Apibendrinant gautuosius modeliavimo rezultatus, pateiktus 4.17 ir 4.18 paveiksluose, galima teigti, kad tiriamosios linijos ELS vertės po linijos laidais neviršija nustatytos ribinės vertės: ELS maksimumas virš vandens paviršiaus siekia 3887 V/m, o virš žemės paviršiaus - 3250 V/m. Tuo tarpu SAZ teritorijos [10m; 30m] ruože, ELS verčių vidurkis (2066 V/m) virš vandens paviršiaus viršija nustatytą 1 kV/m SAZ teritorijai ribinę vertę vidutiniškai 2,1 karto; o ELS vidurkis (1483 V/m) virš žemės paviršiaus atveju – 1,5 karto.

Galimai rizikai žmogaus sveikatai įvertinti buvo pasitelkta kintamųjų EML ribinių verčių nustatymo darbo vietoje vertėmis (3 priedas; 1,3 lentelės), nusakančiomis imtis prevencijos priemonių, įgalinčių apsaugoti darbuotoją/ žmogų nuo žalingo EML poveikio, kai ELS vertė sudaro 10 V/m. Todėl

padaroma išvada, kad žmogui yra pavojinga būti ne tik po linijos laidais, bet ir SAZ teritorijose. Siekiant nustatyti kaip ilgai esant neišvengiamam reikalui gali išbūti žmogus/darbuotojas nagrinėjamos linijos SAZ, remiantis 3 priede 4 lentelėje pateiktais duomenimis buvo nubraižytas ELS didžiausių leistinų verčių darbo vietose priklausomybės nuo poveikio trukmės grafikas, kuris yra parodytas 4.19 paveiksle.



4.19 ELS didžiausios leidžiamos vertės darbo vietose priklausomai nuo poveikio trukmės

Nubraižytai kreivei (4.19 pav.) buvo pritaikytas eksponentinis trendas matematiškai aprašantis poveikio trukmės nuo ELS didžiausių leidžiamų verčių priklausomybę. Remiantis eksponentinio trendo lygtimi bei ELS vidutinėmis vertėmis buvo apskaičiuotos poveikio trukmės 5 m, 20 m ir 65 m atstumuose nuo vertikaliosios linijos simetrijos ašies. 5 m atstumas atitinka linijos ruožą po laidais, 20 m atstumas – linijos ruožą, kuriame ELS viršija normuotą vertę, o 65 m yra parinktas kaip likusios SAZ vidurio taškas. Įvertinimo rezultatai yra pateikti 4.14 lentelėje.

4.14 lentelė Atskiruose linijos ruožuose buvimo trukmės

| | | | |
|--|-----|-----|------|
| atstumas nuo linijos simetrijos ašies, m | 5 | 20 | 65 |
| ELS, kV/m | 3,9 | 1,8 | 0,26 |
| ne ilgiau, kaip;min | 586 | 815 | 1057 |
| ne ilgiau, kaip;val | 9 | 13 | 17 |

4.6.2 Magnetinis laukas

ML modeliavimo schemas geometriniai matmenys yra tokie pat, kaip EL atveju (4.12 lentelė). ML modelio būtini įvesties parametrai yra pateikti 4.15 lentelėje.

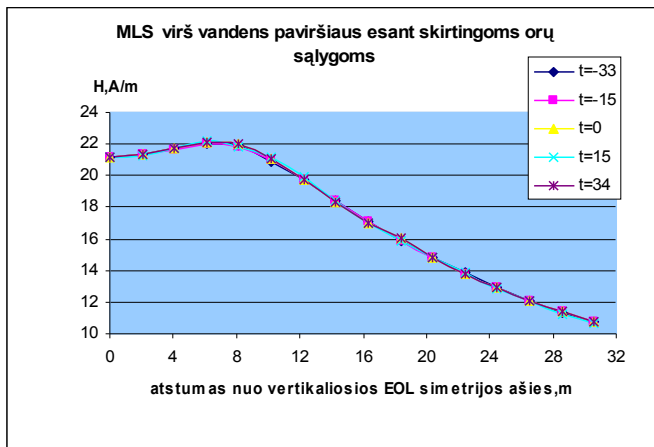
4.15 lentelė. ML modelio įvesties parametrų suvestinė

| Virš vandens paviršiaus | | | | | | |
|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------|
| $t_{oro}, ^\circ C$ | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | |
| μ_{oro} | 1.0000017 | 1.0000085 | 1.0000019 | 1.0000005 | 1.0000174 | |
| $\gamma, M(\Omega m)^{-1}$ | $9,978 \cdot 10^{-23}$ | $1,154 \cdot 10^{-22}$ | $1,364 \cdot 10^{-22}$ | $1,763 \cdot 10^{-22}$ | $3,481 \cdot 10^{-22}$ | |
| μ_{ledo} | 0.99907 | 0.99012 | | | | |
| $\gamma, M(\Omega m)^{-1}$ | $3,72 \cdot 10^{-14}$ | $3,05 \cdot 10^{-14}$ | | | | |
| $\mu_{rūko}$ | | | | 1,0001084 | | |
| $\gamma, M(\Omega m)^{-1}$ | | | | $7 \cdot 10^{-17}$ | | |
| μ_{vand} | 0,99992 | 0,99989 | 0,99957 | 0,99985 | 0,99978 | |
| $\gamma, M(\Omega m)^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-12}$ | $3,01 \cdot 10^{-12}$ | $3,1 \cdot 10^{-12}$ | $5,5 \cdot 10^{-12}$ | $5,7 \cdot 10^{-12}$ | |
| Virš žemės paviršiaus | | | | | | |
| $t_{oro}, ^\circ C$ | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | |
| μ_{oro} | 1.0000017 | 1.0000085 | 1.0000019 | 1.0000005 | 1.0000174 | |
| $\gamma, M(\Omega m)^{-1}$ | $9,978 \cdot 10^{-23}$ | $1,154 \cdot 10^{-22}$ | $1,364 \cdot 10^{-22}$ | $1,763 \cdot 10^{-22}$ | $3,481 \cdot 10^{-22}$ | |
| $\mu_{rūko}$ | | | | 1,0001084 | | |
| $\gamma, M(\Omega m)^{-1}$ | | | | $7 \cdot 10^{-17}$ | | |
| $\mu_{dirv.}$ | 0,98010 | 0,98207 | 0,98052 | 0,98200 | 0,98253 | |
| $\gamma, M(\Omega m)^{-1}$ | $2,902 \cdot 10^{-15}$ | $2,907 \cdot 10^{-15}$ | $2,913 \cdot 10^{-15}$ | $2,922 \cdot 10^{-15}$ | $2,934 \cdot 10^{-15}$ | |
| C_0 | C_1 | $J_s, MA/m^2$ | $J_l, MA/m^2$ | μ_{Al} | $\gamma_{Al}, M(\Omega m)^{-1}$ | I_{fRMS}, A |
| $1,447 \cdot 10^4$ | 0 | $7,7 \cdot 10^{-8}$ | 0,5798 | 1 | 37 | 243 |

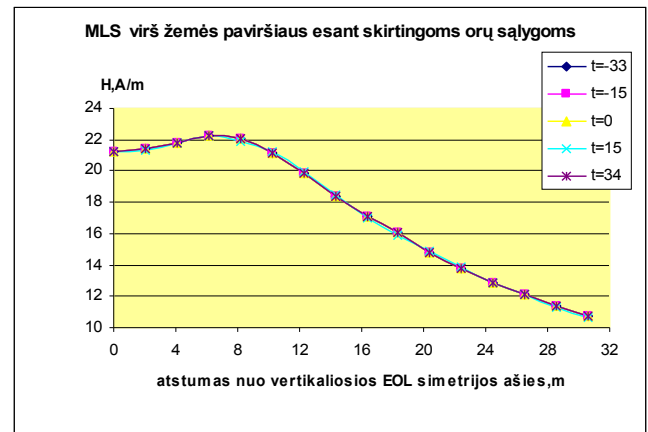
4.6.2.1 Magnetinio lauko stipris

MLS grafiniai modeliavimo rezultatai virš skirtingų paviršių yra pateikti 4.20 paveiksle, o modeliavimo duomenys, pagal kuriuos šie grafikai buvo nubraižyti, - 24 priede. ML modeliavimo schemas vaizdas FEMM programos terpėje pateiktas 21 priede.

Remiantis 4.20 paveikslo grafikais, MLS, esant skirtingoms orų sąlygoms praktiškai nesiskiria nei virš vandens paviršiaus nei virš žemės paviršiaus. Norėdama išsiaiškinti ar yra principinis skirtumas tarp ML pasiskirstymų virš skirtingų paviršių, autorė apskaičiavo vidutines ML vertes, atitinkančias konkrečioms 0, 1,...100 m atstumams nuo EOL simetrijos ašies. Šitų vidutinių ML verčių grafikai yra parodyti sekančiame 4.21 paveiksle. Tikslesniam skirtumui tarp vidutinių ML verčių virš tyrinėjamų paviršių nustatyti buvo sudaryta padidinta grafiko 4.21 versija, pavaizduota 4.22 paveiksle.

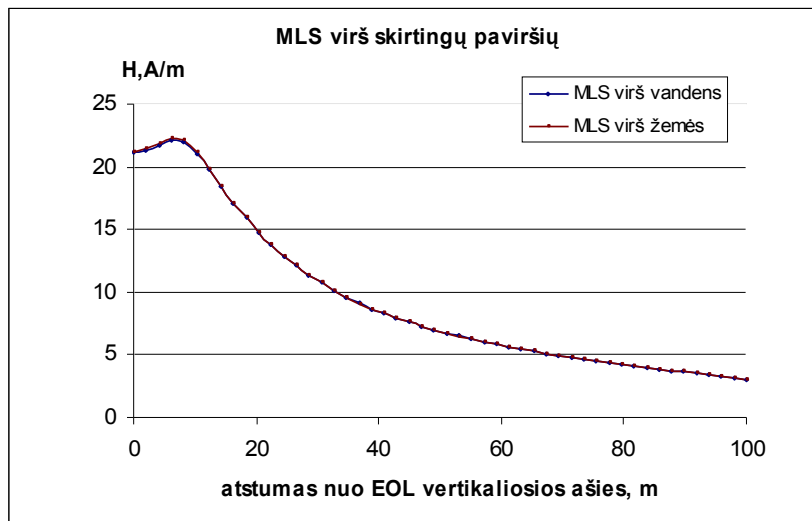


a



b

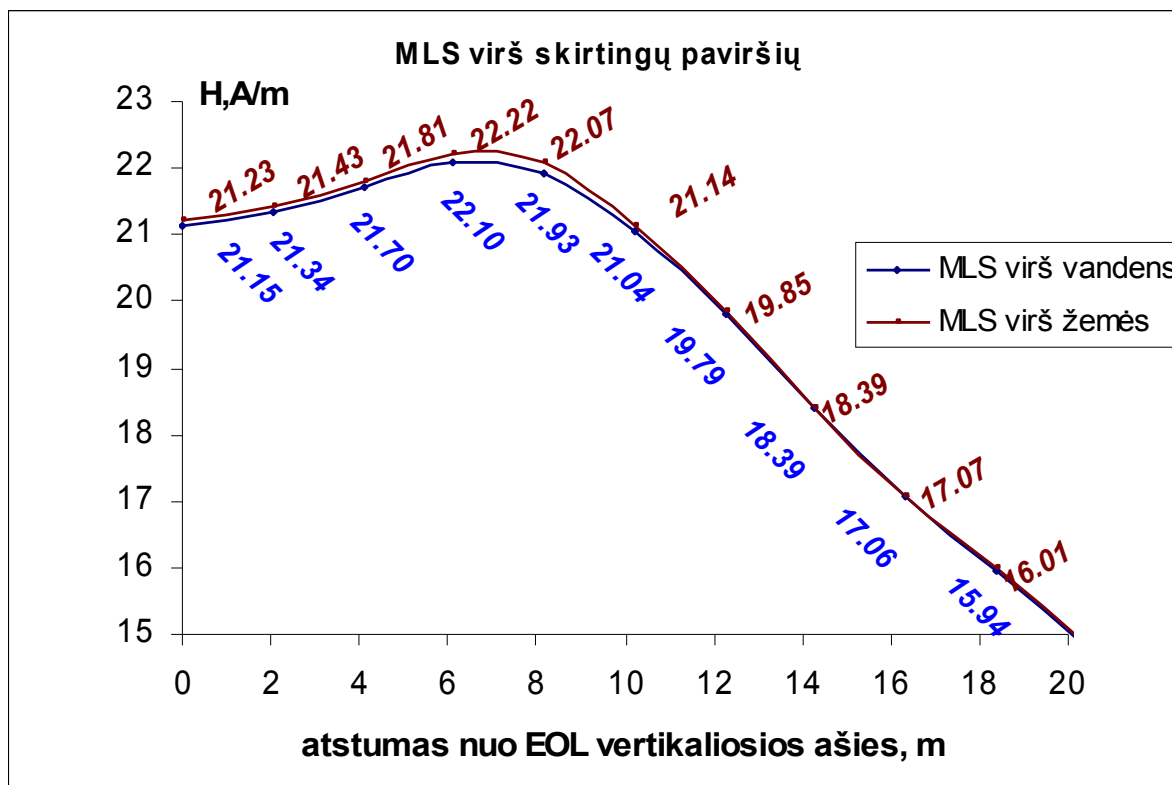
4.20 pav. MLS grafiniai modeliavimo rezultatai: a- virš vandens paviršiaus; b- virš žemės paviršiaus



4.21 pav. Vidutinių MLS verčių vaizdavimas virš skirtingų paviršių

Analizuojant grafikus, vaizduojančius MLS pasiskirstymą virš skirtingų paviršių, 4.21 paveiksle galima sakyti, kad MLS vertės beveik nesiskiria tarpusavyje. Tačiau to paties grafiko dalis, vaizduojanti MLS pasiskirstymą atstumuose 0-10m nuo nagrinėjamos AĖEOL, parodo (4.22 pav.), kad skirtumas visgi egzistuoja ir MLS virš žemės paviršiaus yra truputį didesnis negu virš vandens paviršiaus. Tačiau šis skirtumas sudaro sveikojo skaičiaus šimtąją dalį, todėl šį skirtumą galima paneigti ir padaryti išvadą, tvirtinančią ML stiprio nepriklausomumą ne tik nuo orų permainos, bet ir nuo paviršiaus terpių fizikinių savybių bei agregatinių būsenų.

Remiantis MLS modeliavimo rezultatais virš vandens paviršiaus buvo nustatyta didžiausia, lygi 22,10 A/m MLS vertė po laidais. SAZ MLS buvo įvertintas, apskaičiavus visų gautų SAZ ruože MLS verčių vidurkį. Ši MLS vertė yra lygi 7,7 A/m.

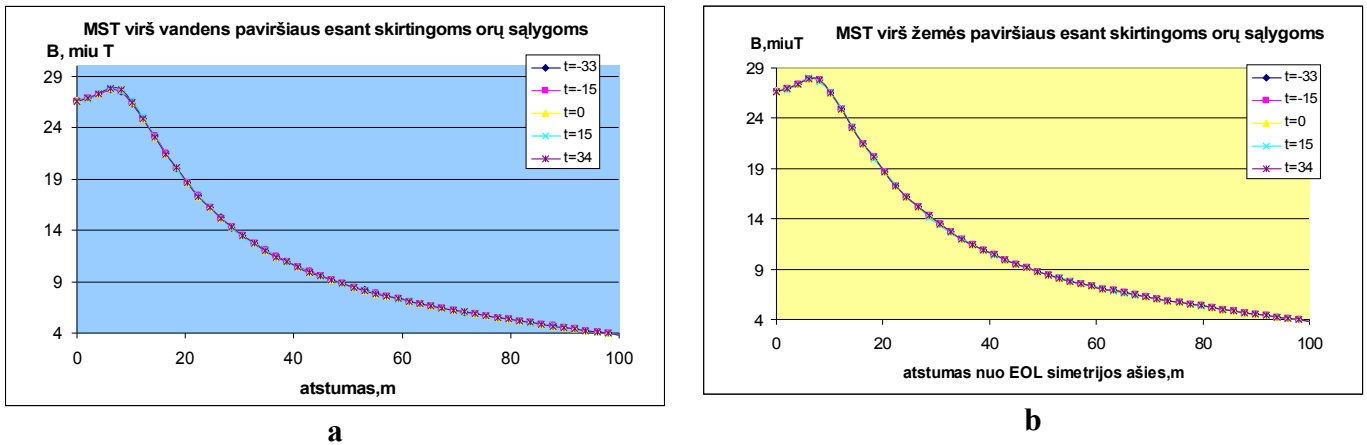


4.22 pav. Vidutinių MLS verčių vaizdavimas linijos ruože po laidais

Kaip buvo minėta šio darbo pradžioje, EOL ir AĖOL ML parametrai nėra normuojami taip, kaip ELS. Norint palyginti gautuosius MLS modeliavimo rezultatus su egzistuojančiais įvairiuose norminiuose dokumentuose bei higienos normų vertėmis, pirmiausiai kyla klausimas, kokiam aplinkos tipui yra priklausoma vieta, kurioje EOL yra įrengta. EOL ML parametrų tokios vietos nėra apibrėžtos. Todėl modeliavimo rezultatus buvo bandoma vertinti, taikant 3 priede 1 lentelėje pateiktomis MLS ribinėmis vertėmis. Esant 50Hz EMB dažniui MLS ribinė vertė darbo vietose sudaro 800 A/m. Tad šio atveju tyrinėjamos linijos MLS nei po laidais, nei SAZ nėra kenksmingos žmogaus sveikatai. Tačiau remiantis EML ribinėmis vertėmis, kurios yra pateiktos 3 priedo 3 lentelėje, esant EMB dažnio 25–820 Hz, ribinė MLS vertė, kuriai esant privaloma imtis prevencijos priemonių, įgalinčių apsaugoti dirbantį žmogų nuo žalingo ML poveikio, yra lygus 0,4 A/m.

4.6.2.2 Magnetinio srauto tankis

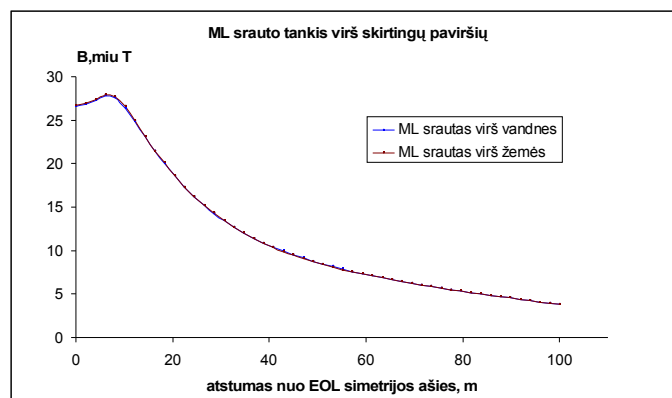
MST virš skirtingų paviršių grafikai yra pateikti 4.23 paveiksle, o gautųjų modeliavimo rezultatų reikšmės - 25 priede.



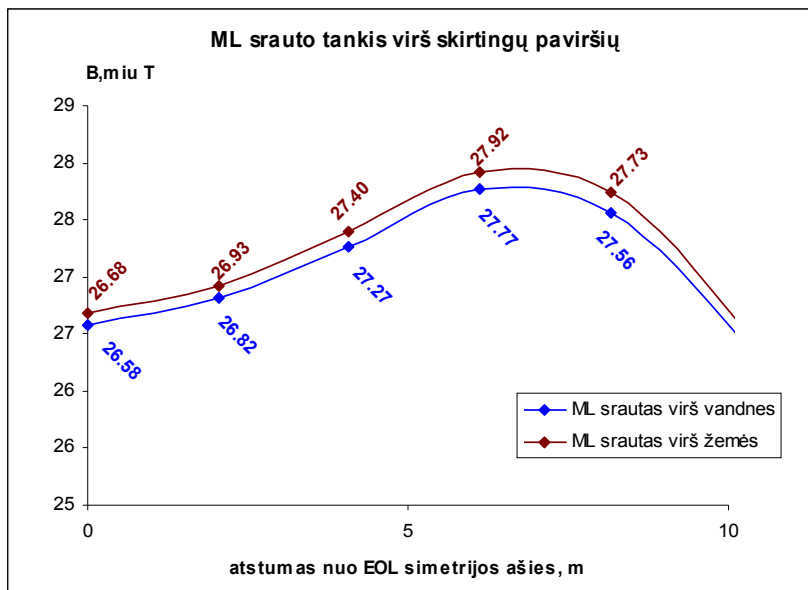
4.23 pav. MST virš skirtingų paviršių grafiniai modeliavimo rezultatai:
a- virš vandens paviršiaus; b- virš žemės paviršiaus

Akivaizdu, kad, kaip ir MLS atveju, MST vertės virš skirtingų paviršių ir esant skirtingoms orų sąlygoms praktiškai yra vienodos. Todėl šis EML parametras taip pat nepriklauso nei nuo fazinių linijos laidininkus supančios aplinkos orų sąlygos, nei nuo paviršių fizikinių savybių. Paveikslai 4.24 ir 4.25 rodo vidutinių MST verčių, esant skirtingoms orų sąlygoms, apskaičiuotų atstumuose 0,1,...100 m virš skirtingų paviršių, pasiskirstymą.

Paveikslo 4.24 grafikai įrodo, kad vidutinės MST virš nagrinėjamų paviršių turi vienodas reikšmes, o patikslintas šio grafiko variantas (4.25 pav.), iliustruojantis MST vertes atstumuose 10 m nuo nagrinėjamos AĖEOL vertikaliosios simetrijos ašies, rodo, kad skirtumas egzistuoja, bet jis taip pat, kaip MLS atveju yra nereikšmingas, nors MST virš žemės paviršiaus yra truputį didesnis negu virš vandens paviršiaus.



4.24 pav. Vidutinių MST verčių vaizdavimas virš skirtingų paviršių



4.25 pav. Vidutinių MST verčių vaizdavimas 10m atstumuose nuo EOL simetrijos ašies

SAZ ribose MST vidutinė vertė yra lygus $9,67\mu\text{T}$, o linijos ruože po laidais - $28\mu\text{T}$. EOL MST taip pat nėra normuojamas. Modeliavimo rezultatus buvo bandoma palyginti su MST vertėmis, pateiktomis 3 priedo 1 ir 3 lentelėse. Remiantis kintamųjų EML ribinių verčių nustatymais (1lentele) darbo vietose, MST ribinė vertė sudaro $1000\mu\text{T}$. Tad taikant šią MST vertę kaip palyginamąją modeliavimo rezultatams įvertinti, tyrinėjamos linijos MST po laidais yra apytiksliai 33 kartus mažesnė už normuotas vertes. O remiantis 3 priedo 3 lentelės duomenimis MST vertė, kuriai esant privaloma imtis prevencinių priemonių, sudaro $0,5\mu\text{T}$. Remiantis pasaulinių mokslininkų tyrimais, didžiausia leistina MST vertė turi būti priimta lygi $0,2\mu\text{T}$. Tad lyginant modeliavimo rezultatus su 3 lentelėje pateikta MST ribine verte, tiriamojo objekto MST po laidais yra 56 kartus didesnė, o SAZ MST vertė yra vidutiniškai 19 kartų didesnė už nustatytą ribinę.

MAGISTRANTO PARUOŠTAS PUBLIKAVIMUI STRAIPSNIS

1. Jelena Dikun , Eleonora Guseinoviene “A PROBABILISTIC MODEL FOR ELECTRIC FIELD MEASUREMENTS FOR ENERGY TRANSMISSION LINES”

Co-author: Eleonora Guseinoviene, Prof. Dr.,
Klaipeda University, Electrical Eng. Dept.

Publisher: Submitted to” *The Journal of Scientific & Industrial Research*”

Status: Under Review

Šiame straipsnyje yra pateikiamas elektros lauko stiprio matematinis modelis, kuris buvo sukurtas remiantis aukštos įtampos perdavimo linijos elektros lauko stiprio matavimais, kurie buvo atlikti laboratorijos sąlygose. Apkraunant dirbtinę aukštos įtampos perdavimo liniją trimis skirtingomis įtampomis, elektros lauko stipris buvo matuojamas skirtinguose atstumuose žemės paviršiaus ir linijos simetrijos ašies atžvilgiu. Gautųjų matavimo metu elektros lauko stiprių skaitinių reikšmių pasiskirstymui erdvėje aplink dirbtinosios aukštos įtampos elektros perdavimo linijos matematinei išraiškai aprašyti buvo panaudota eksponentinė atsitiktinio dydžio tikimybių pasiskirstymo funkcija. ELS verčių tikimybini pasiskirstymas, priklausantis nuo nominalios linijos laido įtampos reikšmės gali būti apskaičiuojamas taikant formulę:

$$p(U) = 0,00013 + 0,0023 \cdot e^{-0,3 \cdot U}$$

1. Apžvelgus šiuolaikinius tarptautinius ir Lietuvoje galiojančius teisės aktus ir norminius dokumentus, buvo nustatyti EML parametrų ribinės vertės.
2. Remiantis tyrinėjimais, pramoninio dažnio EML srityje buvo išanalizuotas EOL laukų žalingas poveikis bei ši poveikį įgalintys sumažinti apsaugos būdai ir priemonės.
3. Išnagrinėjus egzistuojančius EML skaičiavimo būdus bei EML modeliavimo programas, EML skaičiavimams buvo parinktas baigtinių elementų metodas bei FEMM modeliavimo programa.
4. Modelio sudarymui linijos fazinių laidų skerspjūvių koordinatės buvo apskaičiuotos atsižvelgiant į linijos konstrukciją; linijos elektros parametrai buvo apskaičiuoti, taikant linijos keitimą ekvivalentine schema.
5. Pasitelkus meteorologijos tarnybų duomenis buvo nustatytos nagrinėjamą liniją supančios aplinkos orų sąlygos.
6. EML modeliavimui, esant apibrėžtosioms orų sąlygoms, buvo nustatyti terpių laidumai elektrai, dielektrinių ir magnetinių skvarbų priklausomybės nuo jų temperatūros bei EMB dažnio.
7. EML parametrai buvo sumodeliuoti pasirinktoms orų sąlygoms virš skirtingų paviršių. Atlikta gautųjų modeliavimo rezultatų palyginamoji analizė, kuria remiantis galima teigti, kad ML parametrai MLS ir MST visiškai nepriklauso nuo paviršiaus fizikinių savybių bei terpių agregatinių būsenų ir todėl tolimesniuose panašaus pobūdžio tyrimuose galima paneigti orų permainas. Tuo tarpu ELS verčių padidėjimui tiesiogiai įtakoja paviršių sudarančių terpių agregatinių būsenų fizikinių savybių kitimai. ELS yra vidutiniškai 516 V/m didesnis virš vandens paviršiaus negu virš žemės paviršiaus. Taip pat buvo nustatyta, kad ELS SAZ yra 2,1 karto didesnis už normoje nustatytas ribinės vertes. ML parametrai buvo lyginami su įvairiomis normuotomis vertėmis, reglamentuojamomis skirtinguose dokumentuose. Pagal vieną iš jų ML parametrai neviršija nustatytos ribinės vertės, o remiantis kitomis normomis, šių parametrų vertės yra neleistinais aukštos. Todėl AĮEOL ML parametrų nustatymo ir vertinimo problema turi būti paliekama tolimesniems tyrimams.

REKOMENDACIJOS, TOLIMESNI TYRIMAI

1. Siekiant nustatyti, kaip tiksliai modeliavimo rezultatai sutampa su tikrosiomis EML parametru vertėmis, siūloma atlikti nagrinėjamos linijos EML parametru natūrinius matavimus, įvertinant vandens, oro ir kitų matavimo metu egzistuojančių terpių fizikinius dydžius, bei linijos apkrovos srovę.
2. Siūloma atlikti EML parametru matavimus esant krituliams: sniegui, lietai.
3. Spėjama, kad natūriniai matavimai taip pat neatitiks tikriesiems nuo tyrinėjamos EOL sklindančių EML verčių parametrų, nes natūrinių matavimų vertės turės tam tikrą dalį pašalinių pramoninio ir nepramoninio dažnio, esančių šalia EOL šaltinių, elektromagnetinės spinduliuotės dedamųjų. Tad tikriesiems EOL EML parametrų nustatyti siūloma taikyti elektromagnetinių signalų filtravimo metodus.
4. Vertinant elektromagnetinės spinduliuotės šaltinių įrengimo vietų paskirtį siūloma tęsti mokslinius tyrimus pramoninio ir nepramoninio dažnio ML parametru ribinių bei leistinų verčių nustatymo srityje, įgalinčius tiksliai apibrėžti ML parametru skaitines vertes. ML parametru žmogaus sveikatos būklės įtakai nustatyti siūloma taikyti emocijos būsenų atpažinimo matuoklį ir kitas su šiuo prietaisu siejamas Klaipėdos Universiteto Elektrotechnikos katedroje esančias metodikas ir sukauptą praktinę patirtį.
5. Siekiant sumažinti viršijančias ELS vertes iki nustatytos SAZ ribinės vertės, rekomenduojama virš vandens paviršiaus išstętos tyrinėjamosios linijos dalyje įdiegti EL ekranuojantį lyną arba padidinti linijos gabaritus.

LITERATŪRA

1. Aarts B., Denison D., Keizer E., Popova G.; Fuzzy Grammar-A Reader, Hardback, 2004, 536 p.
2. Abu Izzeddin Salma , Berbari Kamal , Obeid Hiba; ELECTROMAGNETIC FIELD FROM POWER LINES; EECE 502;Beirut- 2006;prieiga internetu: http://www.aub.edu.lb/fea/ece/research/Documents/Report/fyp_0506/37_Report.pdf;žiūrėta:2012 02 16.
- 3.Adel Z. El Dein; MITIGATION OF MAGNETIC FIELD UNDER EGYPTIAN 500KV OVERHEAD TRANSMISSION LINE; Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II;WCE 2010, June30 – July 2, 2010, London,U.K; priega internetu: http://www.iaeng.org/publication/WCE2010/WCE2010_pp956-961.pdf; žiūrėta: 2012 03 01
4. Afaneen A. Alkhazraji, Suad I. Shahl; APPLICATION OF GIS FOR THE EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS FOR IRAQI 132KV ELECTRICAL TRANSMISSION SYSTEM; Eng. and Tech. Journal. Vol.29,Nr.9(2011); priega internetu:<http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=31719>; žiūrėta: 2012 02 28
- 5.Aliyu Ozovehe, Maina Ibrahim, Abubakar Tafawa Balewa; Ali Hamdallah; ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC POLLUTION DUE TO HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES; Journal of Energy Technologies and Policy; Vol.2, No.7, 2012; priega internetu: <http://www.iiste.org/Journals/index.php/JETP/article/download/2745/2769>; žiūrėta:2013 02 14
- 6.Al Salameh M. S. H., Nejdawi I. M., Alani O. A.; USING THE NONLINEAR PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) ALGORITHM TO REDUCE THE MAGNETIC FIELDS FROM OVERHEAD HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES; IJRRAS 4 (1), July 2010; priega internetu: http://www.arpapress.com/Volumes/Vol4Issue1/IJRRAS_4_1_03.pdf ; žiūrėta:2012 02 16.
- 7.Arieh Shenkman, Naum Sonkin,Vitaly Kamensky; ACTIVE PROTECTION FROM ELECTROMAGNETIC FIELD HAZARDS OF A HIGH VOLTAGE POWER LINE; HAIT Journal of Science and Engineering B, Volume 2, Issues 1-2, pp. 254-265; 2005 priega internetu: <http://www.magniel.com/jse/B/vol0201B/s040722.pdf>; žiūrėta: 2012 02 17
8. Barauskas R., Belevičius R., Kačianauskas R. Baigtinių elementų metodo pagrindai, Vilnius, Technika, 2004, 610p.
9. Buchner B – R, Barthel J., Stauber J., The dielectric relaxation of water between 0° C and 35° C, Chem. Phys. Lett. 1999, 306 p.
10. Bukantis A., Atmosferos reiškinių stebėjimai, Metodinė priemonė, Vilnius, 2009.
- 11.DĖL DARBUOTOJŲ APSAUGOS NUO ELEKTROMAGNETINIŲ LAUKŲ KELIAMOS RIZIKOS NUOSTATŲ PATVIRTINIMO; LR SOCIALINĖS APSAUGOS IR DARBO MINISTRO ĮSAKYMAS; 2006 m.balandžio 25 d. Nr. A1- 119,Vilnius; priega internetu: <http://www3.lrs.lt/cgi-bin/getfmt?C1=e&C2=274922>; žiūrėta:2013 02 13
- 12.DĖL ELEKTROS TINKLŲ APSAUGOS TAISYKLIŲ PATVIRTINIMO; LR ENERGETIKOS MINISTRO ĮSAKYMAS,2010 m. Kovo 29 d. Nr. 1-93,Vilnius;

prieiga internetu: <http://www.infolex.lt/lite/ta/131831>; žiūrėta:2012 02 15

13. Electromagnetic compatibility; Directive 2004/108/EC of the European Parliament and of the Council prieiga internetu: <https://osha.europa.eu/lt/legislation/directives/exposure-to-physical-hazards/osh-related-aspects/council-directive-2004-108-ec>; žiūrėta:2013 02 13

14. Elektrinių ir elektros tinklų eksploatavimo taisyklės, patvirtintos Lietuvos Respublikos ūkio ministro 2001 m. gruodžio 21 d. įsakymu Nr. 389 (Žin., 2002, Nr. 6-252; 2004, Nr. 8-207)

15. Electromagnetic fields and waves; Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council; prieiga internetu:<https://osha.europa.eu/data/legislation/directive-2004-40-ec-of-the-european-parliament-and-of-the-council>; žiūrėta:2013 02 12

16. Elektros įrenginių eksploatavimo saugos taisyklės, patvirtintos Lietuvos Respublikos ūkio ministro 2004 m. lapkričio 26 d. įsakymu Nr. 4-432 (Žin., 2004, Nr. 175-6502)

17. ELF. ELECTROMAGNETIC FIELDS AND THE RISK OF CANCER. Health Protection Agency; Advisory Group on Non-ionizing Radiation. Documents of NPRB, 12(1); 2007. prieiga internetu: <http://www.hpa.org.uk/Publications/Radiation/NPRBArchive/DocumentsOfTheNRPB/>; žiūrėta:2013 02 12

18. Elektros linijų ir instaliacijos įrengimo taisyklės, patvirtintos Lietuvos Respublikos ūkio ministro 2007 m. sausio 31 d. įsakymu Nr. 4-40 (Žin., 2007, Nr. 24-936)

19. Elektros tinklų statybos rūšys, patvirtintos Lietuvos Respublikos ūkio ministro ir Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2004 m. kovo 17 d. įsakymu Nr. 4-74/D1-117 (Žin., 2004, Nr. 44-1470)

20. EXTREMELY LOW FREQUENCY FIELDS. ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA, Vol. 238. Geneva, 2007.; World Health Organization. EMF publication and information resources; prieiga internetu http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html; žiūrėta:2013 02 12

21. EXPOSURE TO STATIC AND LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS, BIOLOGICAL EFFECTS AND HEALTH CONSEQUENCES (0-100 KHZ); International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; Review of the Scientific Evidence and Health Consequences. Munich: 2003. ISBN 978-3-934994-03-4; prieiga internetu: <http://www.icnirp.de/PubEMF.htm#>; žiūrėta: 2013 02 12

22. Gabriele Grandi, A SIMPLE METHOD TO APPROXIMATE THE MAGNETIC FIELD IN THE VICINITY OF OVERHEAD POWER LINES, INTERNATIONAL JOURNAL OF MODELLING AND SIMULATION NR.7- 2001; prieiga internetu: <http://www.die.ing.unibo.it/pers/grandi/papers/PES01.pdf>; žiūrėta: 2012 02 22

23. Gaiduk V. I., Vij J. K., The concept of two stochastic processes in liquid water and analytical theory of the complex permittivity in the range 0 – 1000 cm⁻¹, Phys. Chem. Chem. Phys.,2001, 600p.

24. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz). Health Physics 99(6):818-836; 2010; International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP); prieiga internetu: <http://www.icnirp.de/documents/LFgdl.pdf>; žiūrėta: 2013 02 12

25. Girish Kulkarni, Dr. W.Z. Gandhare,; PROXIMITY EFFECTS OF HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES ON HUMANS; ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering, Vol. 03, No. 01, Feb 2012;
prieiga internetu: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/74/68/87/PDF/11.pdf>; žiūrėta: 2013 02 12
26. GYVENTOJŲ SAUGA NUO ELEKTROS ORO LINIJŲ SUKURIAMŲ ELEKTRINIŲ LAUKŲ; LIETUVOS HIGIENOS NORMA HN 104: 2011; prieiga internetu: <http://www.infolex.lt/lite/ta/122354>;
žiūrėta: 2013 02 12
27. Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. Health Physics 96(4):504-514; 2009; International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) prieiga internetu: <http://www.icnirp.de/PubEMF.htm>; žiūrėta: 2013 02 12
28. Hayt W.H, Buck J.A, Engineering Electromagnetics, Sixth Edition, 2007, 247 p.
29. IRKUTSKKABEL, Official site of the company; non-isolation steel-aluminium cables; prieiga internetu: http://irkutskkabel.ru/catalog_descriptions/provoda_stalealuminivie_as_ask_asks/stalealuminivie_neizolirovannie_as_ask_asks.html, žiūrėta: 2013 03 17
30. Jukonis Jonas, Viskas apie elektromagnetines bangas ir jų poveikius; BIOTRONIKA; prieiga internetu: http://www.biotronika.lt/straipsniai/elektromagnetines_bangos_ir_ju_poveikiai.php;
žiūrėta: 2013 02 12
31. Kaatze U., Behrends R., Pottel R., Hydrogen network fluctuations and dielectric spectrometry of liquids, J. Non-Cryst. Solids, 2002, 305 p.
32. Klemen Deželak, Gorazd Štumberger; ARRANGEMENT OF OVERHEAD POWER LINE CONDUCTORS RELATED TO THE ELECTROMAGNETIC FIELD LIMITS, Modern Electric Power Systems 2010, MEPS'10 - paper 13.2; Wrocław, Poland; Slovenia. prieiga internetu: <http://www.meps10.pwr.wroc.pl/submission/data/papers/13.2.pdf>; žiūrėta: 2012 02 16
33. Kuzavinis M. Klaipėdos sąsiauris. Visuotinė lietuvių enciklopedija, T. X (Khmerai-Krelle). – Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas, 2006. 222 psl.
34. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos, prieiga internetu: http://www.meteo.lt/skaitmenine_prog_lt_zem.php; žiūrėta: 2013 03 25
35. Meissner T., Wentz F. J, The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 42; 2004, 103 p.
36. Meeker D., Finite Element Method Magnetics, User's Manual, 2010, prieiga internetu: <http://femm.foster-miller.com>; žiūrėta: 2013 04 16
37. Meeker D., FEMM 4.2 Electrostatics Tutorial, 2006, prieiga internetu: <http://femm.foster-miller.com>; žiūrėta: 2013 04 16

38. Pirro Cipo, Myrteza Braneshi, Luan Ahma, Enver Hamiti; CALCULATION AND MEASUREMENT OF THE MAGNETIC FIELD OF POWER TRANSMISSION LINES; KONFERENCA SLOVENSКИH ELEKTROENERGETIKOV – Velenje 2005; CIGRE ŠK C3 – 1; prieiga internetu: <http://www.cigre-cired.si/Images/File/MIRO/VELENJE2005/C3/CIGREC3-1.pdf>; žiūrėta: 2012 02 19
39. POGODA.BY., Архив метеорологических наблюдений, prieiga internetu: <http://pogoda.by/zip/index.php?Year=2012>, žiūrėta: 2013 03 25
40. PRAMONINIO DAŽNIO (50 HZ) ELEKTROMAGNETINIS LAUKAS DARBO VIETOSE. PARAMETRŲ LEIDŽIAMOS SKAITINĖS VERTĖS IR MATAVIMO REIKALAVIMAI; LIETUVOS HIGIENOS NORMA HN 110: 2001, prieiga internetu: <http://tar.tic.lt/Default.aspx?id=2&item=results&aktoid=0D269E29-61D3-4870-AE1B-078B90BF750E>; žiūrėta: 2013 02 12
41. Razavipour S.S, Jahangiri M., Sadeghipoor H.; ELECTRICAL FIELD AROUND THE OVERHEAD TRANSMISSION LINE; World Academy of Science, Engineering and Technology 62; 2012; prieiga internetu: <https://www.waset.org/journals/waset/v62/v62-103.pdf>; žiūrėta: 2012 02 28
42. Rinkevičius V, Elektra ir magnetizmas, Vilnius, 2001, 120 p.
43. Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D. and Friedman S.P., A REVIEW OF ADVANCES IN DIELECTRIC AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY MEASUREMENT IN SOIL USING TIME DOMAIN REFLECTOMETRY, 2003, 480 p.
44. Schwank M., Stahli M., Wydler H., Leuenberger J., Mätzler C., Flühler H. MICROWAVE L-BAND EMISSION OF FREEZING SOIL // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004. Vol. 42. – № 6. – P. 1252–1260; prieiga internetu: <http://edoc.gfz Potsdam.de/gfz/get/15787/0/cc4f371dba66d2ed11dda1cfd7e3a234/15787.pdf>, žiūrėta: 2013 03 28
45. Stašelis A, Merkevičius S, Stašelis V; THE RESEARCH OF MAGNETIC FIELDS OF THE HIGH VOLTAGE POWER AERIAL LINES; Environmental research, engineering and management, 2006.No.2(36), P.31-36; prieiga internetu: <http://apini.ktu.edu/lt/Zurnalas/Straipsniai/36/04-Staselis.pdf>; žiūrėta: 2012 02 24
46. The limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz); EP Council Recommendation 1999/519/EC; prieiga internetu: <https://osha.europa.eu/data/links/council-recommendation-1999-519-ec-on-the-limitation-of-exposure-of-the-general-public-to-electromagnetic-fields-0-hz-to-300-ghz>; žiūrėta: 2013 02 12
47. Tupsie S.; Isaramongkolrak A; Pao-la-or P., ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS USING FEM FOR TRANSMISSION LINES TRANSPOSITION; World Academy of Science, Engineering and Technology Nr.29 – 2009; prieiga internetu: <https://www.waset.org/journals/waset/v29/v29-141.pdf>; žiūrėta: 2012 02 22
48. Vesna Ranković, Jasna Radulović, ENVIRONMENTAL POLLUTION BY MAGNETIC FIELD AROUND POWER LINES; International Journal for Quality Research, 2009; UDK- 378.014.3(497.11) prieiga internetu: <http://www.cqm.rs/2009/3iqc/24.pdf>; žiūrėta: 2012 02 19

49. VŠĮ Gamtos paveldo fondas, Kuršių marių akvatorijos gamtinių, ypatumų, esamos Kuršių marių krantų būklės ir jos kaitos tendencijų analizė, Vilnius, 2012.
50. Беляева Т.А., Бобров П.П., Ивченко О.А., Мандрыгина В.Н., ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В ПОЧВАХ ОТ ЕЕ КОЛИЧЕСТВА, СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА; Том: 3;Номер: 2 ;Год: 2006 Страницы: 281-286; prieiga internetu: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol2-281-286.pdf>; ; žiūrėta: 2013 03 28
51. Бордонский Г.С., Истомина А.С., Крылов С.Д.; ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ЛЬДА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ; КОНДЕНСИРОВАННЫЕ СРЕДЫ И МЕЖФАЗНЫЕ ГРАНИЦЫ, Том 11, № 3, 2009; prieiga internetu: http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_11_3_2009_004.pdf, žiūrėta: 2013 03 24
52. Буль О. Б., Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов, Москва, 2005, АСАДЕМА, 337 стр.
53. Выгодский М. Я., Справочник по высшей математике, “Джангар”, “Большая медведица”, Москва, 2001, 863 стр.
54. Гордеева М.А., Ильминских Н. Г, ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ГЕРПЕТОБИОНТОВ; Биология. Экология. Естественное знание. Науки о Земле. Nr.2/2012; prieiga internetu: <http://www.nauka-dialog.ru/userFiles/file/%20Ильминских.pdf>; ; žiūrėta: 2012 02 14.
55. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П., Теплопроводность смесей и композиционных материалов, Москва, 2001, 143 стр.
56. Зайцев Ю.В., Соловьёв А.В., Носачёв К.В., ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВ, ЭФФЕКТ ГЕНЕРАЦИИ ИОНОВ, Электронный журнал «Исследовано в России», (25)-2004, prieiga internetu: <http://scipeople.ru/publication/2067/>, žiūrėta: 2013 03 21
57. Инкин А.И., Бланк А.В., АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, 2007, Новосибирск, 74 стр.
58. Картавых Т.Н., ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛЭП НА ПОПУЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ В РЕКЕ СОК; Вестник СамГУ- 2002 Nr.4(26); prieiga internetu: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/SGU/Vestnik_EstN/2002-04/sgu0204_17.pdf ; žiūrėta: 2012 02 14
59. Корнюшин П. Н.; ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ; Издательство Дальневосточного университета; ВЛАДИВОСТОК; 2002 – 104 стр.
60. Корицкий Ю. В., Пасынков В.В., Тареева Б. М., Справочник по электротехническим материалам, том-1, Москва, Энергоатомиздат, 1999, 368 стр.

61. Костин В. Н., Распопов Е. В., Родченков Е. А., Передача и распределение энергии, Учебное пособие, Санкт-Петербург, 2003, 145 стр.
62. Краснитский Ю.А., МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЦЕПНОЙ ЛИНИИ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ; Transport and Telecommunication, Vol.4, N 1, 2003.
63. Мичурина Н. Ю., В.Г. Подковкин; ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛЭП-110 КВ НА БИОМАССУ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ; Вестник СамГУ- 2005 Nr.2(36),
prieiga internetu: <http://vestnik-samgu.samsu.ru/est/2005web2/biol/200520404.pdf>; žiūrēta:2012 02 14
64. Наам А.Г., Брюханов Н.Н., Петухов Р.А., Амузаде А.С.; РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОТ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ КЛАССОМ НАПРЯЖЕНИЯ 220 кВ; VII Всероссийская конференция «Молодёжь и наука» -2011;prieiga internetu:
<http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/5419>; žiūrēta: 2012 02 25
65. Нерпин С. В., Чудновский А. В., Физика почвы, 2001, Санкт-Петербург, 584 стр.
66. Новичкова Е.А., Подковкин В.Г., ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛЭП-110 КВ НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И КОНЦЕНТРАЦИЮ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ У КЛЕНА ЯСЕНЕЛИСТНОГО *ACER NEGUNDO L.*; Вестник СамГУ-2007 Nr.8(58);prieiga internetu:http://vestnik-samgu.samsu.ru/est/2007web8/biol/Novichkova_mk.pdf;
žiūrēta:2012 02 14.
67. Овеловский И. М., ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ, Т-3, Минск, 2006, 188 стр.
68. Оржанова Ж. К. ПОВЫШЕНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛЭП И ПОДСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, Автореферат, Алматы, 2007, prieiga internetu:
<http://dis.podelise.ru/text/index-59455.html?page=6>, žiūrēta: 2013 04 22.
69. Потапенко А.Н., Канунникова Е.А., Донева О.В., ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТ, XV Всероссийская научно-методическая конференция „Телематика‘2008“, prieiga internetu:
http://www.ict.edu.ru/vconf/index.php?a=vconf&c=getForm&r=thesisDesc&d=light&id_sec=254&id_thesis=8338; žiūrēta: 2013 04 18.
70. Рымша В.В., Процына З.П., Якимец А.М. Расчет магнитных систем классическим и численным методом., ОДЕССА, 2010; 68 стр.
71. Семенов А. В., ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ НОРМ НА ИНДУКЦИЮ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА; УДК 504.064:537.612; prieiga internetu: <http://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-predelno-dopustimyh-norm-na-induktsiyu-magnitnyh-poley-promyshlennoy-chastoty-dlya-cheloveka> ; žiūrēta: 2013 04 09.
72. Федорович Г.В. “ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ”; Издательский дом “Дрофа”, 2004 -140 стр.

73. Чехов В. И., "Экологические аспекты передачи элетроэнергии", - учебное пособие; Изд-во МЭИ; 2001-44 стр.

74. Чудинова С. М., ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВЫ И КАТЕГОРИИ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2009, Nr.4, prieiga internetu: http://cryosol.ru/_ld/0/3_Pochved4_09Chud.pdf; žiūrėta:2013 03 24

75. Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Никулин В.Н., Шермухамедов У.А.;ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ЛЬДА; Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), Кафедра экспериментальной физики атмосферы (ЭФА), prieiga internetu: <http://www.meteolab.ru/projects/dielectric/>, žiūrėta:2013 03 24

76. Шакарян Ю.,Тимашова Л., Карева С.,Постолатий В.,Быкова Е.,Суслов В., ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ 220 И 500 КВ; Журнал «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ»; Nr.5-2007; prieiga internetu: http://www.ruscable.ru/print.html?p=/article/Texnicheskie_aspekty_sozdaniya_kompaktnyx/; žiūrėta:2012 02 15

77.Ясеневский М. Н. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий; 2013,Москва; 67стр.

PRIEDAI:

1 PRIEDAS

Magnetinio srauto tankio ribinės vertės

| Žalingas poveikis | Magnetinio srauto tankis, B(T) |
|---------------------|--------------------------------|
| Darbo vietose | |
| Galva ir liemuo | 2 T |
| Galūnės | 8 T |
| Viešosiose vietose | |
| Bet kuri kūno dalis | 400 mT |

2 PRIEDAS

Žmogaus kūnui kintamųjų EML poveikio ribinių verčių nustatymas

| Žalingas poveikis | Dažnių diapazonas | Elektros laukas viduje (Vm ⁻¹) |
|--|-------------------|--|
| Darbo vietose | | |
| Galvos CNS audiniai | 1Hz – 10 Hz | 0,5/f |
| | 10 Hz – 25 Hz | 0,05 |
| | 25 Hz – 400 Hz | $2 \cdot 10^{-3}f$ |
| | 400 Hz – 3 kHz | 0,8 |
| | 3 kHz – 10 MHz | $2,7 \cdot 10^{-4}f$ |
| Galvos ir kūno audiniai | 1 Hz – 3 kHz | 0,8 |
| | 3 kHz – 10 MHz | $2,7 \cdot 10^{-4}f$ |
| Viešuosiuose vietose | | |
| Galvos CNS audiniai | 1Hz – 10 Hz | 0,1/f |
| | 10 Hz – 25 Hz | 0,01 |
| | 25 Hz – 1000 Hz | $4 \cdot 10^{-4}f$ |
| | 1000 Hz – 3 kHz | 0,4 |
| | 3 kHz – 10 MHz | $1,35 \cdot 10^{-4}f$ |
| Galvos ir kūno audiniai | 1 Hz – 3 kHz | 0,4 |
| | 3 kHz – 10 MHz | $1,35 \cdot 10^{-4}f$ |
| Pastaba: CNS – centrinė nervų sistema; f – dažnis hercais. | | |

1 lentelė. Kintamųjų EML ribinių verčių nustatymas darbo vietose

| Dažnių diapazonas | Elektros lauko stipris, E, (kV/m) | Magnetinio lauko stipris, H, (A/m) | Magnetinio srauto tankis, B(T) |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Hz – 8 Hz | 20 | $1,63 \cdot 10^5/f^2$ | $0,2 /f^2$ |
| 8 Hz – 25 Hz | 20 | $2 \cdot 10^4/f$ | $2,5 \cdot 10^{-2}/f$ |
| 25 Hz – 300 Hz | $5 \cdot 10^2/f$ | $8 \cdot 10^2$ | $1 \cdot 10^{-3}$ |
| 300 Hz – 3 kHz | $5 \cdot 10^2/f$ | $2,4 \cdot 10^5/f$ | $0,3/f$ |
| 3 kHz – 10MHz | $1,7 \cdot 10^{-1}$ | 80 | $1 \cdot 10^{-4}$ |
| Pastaba: f – dažnis hercais | | | |

2 lentelė. Kintamųjų EML ribinių verčių nustatymas viešuosiose vietose

| Dažnių diapazonas | Elektros lauko stipris, E, (kV/m) | Magnetinio lauko stipris, H, (A/m) | Magnetinio srauto tankis, B(T) |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Hz – 8 Hz | 5 | $3,2 \cdot 10^4/f^2$ | $4 \cdot 10^{-2} /f^2$ |
| 8 Hz – 25 Hz | 5 | $4 \cdot 10^3/f$ | $5 \cdot 10^{-3}/f$ |
| 25 Hz – 50 Hz | 5 | $1,6 \cdot 10^2$ | $2 \cdot 10^{-4}$ |
| 50 Hz – 400 Hz | $2,5 \cdot 10^2/f$ | $1,6 \cdot 10^2$ | $2 \cdot 10^{-4}$ |
| 400 Hz – 3 kHz | $2,5 \cdot 10^2/f$ | $6,4 \cdot 10^4/f$ | $8 \cdot 10^{-2}/f$ |
| 3 kHz – 10MHz | $8,3 \cdot 10^{-2}$ | 21 | $2,7 \cdot 10^{-5}$ |
| Pastaba: f – dažnis hercais | | | |

3 lentelė. EML vertės prevencijos veiksams pradėti (praktikoje taikomos nusistovėjusios efektingos vertės)

| Dažnių diapazonas | Elektrinio lauko stipris E (V/m) | Magnetinio lauko stipris H (A/m) | Magnetinio srauto tankis B (μT) | Lygiavertės plokščios bangos energijos tankis S_{eq} (W/m ²) | Kontaktinė srovė I_C (mA) | Indukuotoji srovė galūnėse I_L (mA) |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|---------------------------------------|
| 0–1 Hz | – | $1,63 \times 10^5$ | 2×10^5 | – | 1,0 | – |
| 1–8 Hz | 20 000 | $1,63 \times 10^5/f^2$ | $2 \times 10^5/f^2$ | – | 1,0 | – |
| 8–25 Hz | 20 000 | $2 \times 10^4/f$ | $2,5 \times 10^4/f$ | – | 1,0 | – |
| 0,025–0,82 kHz | $500/f$ | $20/f$ | $25/f$ | – | 1,0 | – |
| 0,82 kHz–2,5 kHz | 610 | 24,4 | 30,7 | – | 1,0 | – |
| 2,5 kHz–65 kHz | 610 | 24,4 | 30,7 | – | $0,4f$ | – |
| 65–100 kHz | 610 | $1\,600/f$ | $2\,000/f$ | – | $0,4f$ | – |
| 0,1–1 MHz | 610 | $1,6/f$ | $2/f$ | – | 40 | – |
| 1–10 MHz | $610/f$ | $1,6/f$ | $2/f$ | – | 40 | – |
| 10–110 MHz | 61 | 0,16 | 0,2 | 10 | 40 | 100 |
| 110–400 MHz | 61 | 0,16 | 0,2 | 10 | – | – |
| 400–2 000 MHz | $3\sqrt{f}$ | $0,008\sqrt{f}$ | $0,01\sqrt{f}$ | $f/40$ | – | – |
| 2–300 GHz | 137 | 0,36 | 0,45 | 50 | – | – |

4 lentelė. EML stiprių didžiausios leidžiamos vertės darbo vietose priklausomai nuo poveikio trukmės

| Poveikio trukmė, min. | Elektrinio lauko stiprio leidžiama skaitinė vertė, kV/m | Magnetinio lauko stiprio leidžiama skaitinė vertė, k A/m |
|--------------------------|--|---|
| Iki 10 | 25,0 | 5,1 |
| 11-30 | 23,0 | 4,7 |
| 31-60 | 20,0 | 4,3 |
| 61-90 | 16,7 | 3,9 |
| 91-120 | 14,3 | 3,5 |
| 121-150 | 12,5 | 3,2 |
| 151-180 | 11,1 | 2,8 |
| 181-210 | 10,0 | 2,5 |
| 211-240 | 9,1 | 2,3 |
| 241-270 | 8,3 | 2,0 |
| 271-300 | 7,7 | 1,8 |
| 301-330 | 7,1 | 1,6 |
| 331-360 | 6,7 | 1,4 |
| 361-390 | 6,3 | 1,3 |
| 391-420 | 5,9 | 1,2 |
| 421-450 | 5,6 | 1,1 |
| 451-480 | 5,3 | 1,0 |
| 481 ir ilgiau | 5,0 | 0,9 |

1 lentelė. Leidžiami elektros lauko stipriai

| Vietovė | Elektros lauko stipris E, kV/m | Buvimo trukmė |
|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Gyvenamųjų ir viešosios paskirties pastatų viduje | 0,5 | Neribojama. |
| Gyvenamųjų namų ir viešosios paskirties pastatų teritorijoje | 1 | Neribojama. |
| Urbanizuotose (užstatytose) teritorijose, įskaitant jų perspektyvinę 10 metų plėtrą, ir priemiestinėje žaliajoje zonoje, daržų ir sodų teritorijose | 5 | Neribojama. |
| Automobilinių magistralinių ar krašto kelių ruožuose, virš kurių nutiestos elektros oro linijos | 10 | ne ilgiau kaip 180 min. ¹ |
| Negyvenamoje vietovėje, transporto priemonėmis prieinamoje ir žemėnaudos vietovėse | 15 | ne ilgiau kaip 90 min. ¹ |
| Transportu ir žemės ūkio mašinomis neprieinamoje vietovėse, kur draudžiama gyventojams būti | 20 | ne ilgiau kaip 10 min. ¹ |
| Pastaba: 1- Likusį laiką asmuo gali būti aplinkoje, kur ELS neviršija 5 kV/m; | | |

2 lentelė. EML parametrų leidžiamų verčių lentelė

| Eil. Nr. | Objekto pavadinimas | Elektromagnetinio lauko parametrų leidžiamos vertės (ne daugiau kaip) | | |
|----------|--|--|-----------------------------------|---------------------------------------|
| | | Elektrinio lauko stipris (E), kV/m | Magnetinio lauko stipris (H), A/m | Magnetinio srauto tankis (B), μ T |
| 1. | Gyvenamosios ir visuomeninės paskirties pastatų patalpos | 0,5 | 16,0 | 20 |
| 2. | Gyvenamoji aplinka | 1,0 | 32,0 | 40 |

Higieniniai reikalavimai EOL projektavimui ir įrengimui (ištrauka)

1. Projektuojant 110 kV ir didesnės įtampos elektros oro linijas turi būti parinktos teritorijos galimai toliau nuo urbanizuotos teritorijos ar gyvenamųjų namų. Projektuojant 330 kV įtampos elektros oro linijas turi būti numatytas ne mažesnis kaip 250 m atstumas nuo jų iki gyvenamųjų namų. Išimtiniais atvejais, kai vietinės sąlygos neleidžia įvykdyti šio reikalavimo, 330 ir 400 kV įtampos elektros oro linijas galima priartinti prie urbanizuotų (užstatytų) teritorijų, bet ne arčiau kaip 20, 30 m atitinkamai, užtikrinant, kad oro linijų elektrinio lauko stipriai po laidais neviršys 5 kV/m. Galimybė priartinti oro linijas prie urbanizuotų (užstatytų) teritorijų turi būti suderinta su visuomeninės sveikatos priežiūros institucijomis.

2. Siekiant apsaugoti gyventojus nuo žalingo oro linijų elektrinio lauko poveikio, turi būti nustatyta sanitarinė apsaugos zona (SAZ). Šioje zonoje ribojama ar visiškai draudžiama ūkinė veikla:

2.1. Statyti gyvenamuosius namus, visuomeninius pastatus, išdėstyti poilsio aikštes, zonas.

2.2. Steigti autotransporto aptarnavimo įmones ir naftos produktų sandėlius.

2.3. Sandėliuoti visų rūšių degiąsias medžiagas ir atlikti bet kuriuos darbus su jomis.

2.4. Važiuoti mašinomis ir mechanizmais, kurių bendras aukštis su kroviniu arba be krovinių nuo kelio paviršiaus daugiau kaip 4,5 m.

2.5. Dirbti su laistymo mašinomis, kurių čiuurklė gali pasiekti oro linijų laidus.

2.6. Išdėstyti ilgus, neįžemintus laidininkus (vielines tvoras, vynuogių ar apynių pakabinimo metalinius tinklus ir kt.) vietose, prieinamose žmonėms.

2.7. Vienu metu kirsti keletą medžių, lipti į medžius, dirbti, esant stipriam vėjui, rūkui, plikledžiui (kai atliekami oro linijų trasos skynimo ar valymo darbai).

3. Elektros oro linijų SAZ teritorijoje leidžiama:

3.1. Auginti žemės ūkio kultūras, nereikalaujančias ilgo žmonių buvimo jas prižiūrint.

3.2. Išsaugoti ir eksploatuoti 110–400 kV įtampos oro linijų SAZ teritorijoje gyvenamuosius pastatus ir individualius žemės sklypus su sąlyga, kad gyvenamųjų pastatų viduje ir atviroje teritorijoje elektrinio lauko stipriai neviršys 0,5 ir 1 kV/m atitinkamai.

6 PRIEDAS

Elektros tinklų apsaugos zonos (ištrauka)

6. Elektros tinklų apsaugos zonos nustatomos:

6.1. išilgai elektros oro linijų – žemės juostos ir oro erdvė, apribotos vertikaliomis plokštumomis, esančiomis abiejose linijos pusėse nuo kraštinių laidų (kai jie nėra atlenkti) šiuo atstumu:

6.1.1. iki 1 kV įtampos elektros oro linijoms – 2 metrai;

6.1.2. 6 ir 10 kV įtampos elektros oro linijoms – 10 metrų;

6.1.3. 35 kV įtampos elektros oro linijoms – 15 metrų;

6.1.4. 110 kV įtampos elektros oro linijoms – 20 metrų;

6.1.5. 330–400 kV įtampos elektros oro linijoms – 30 metrų;

6.1.6. 750 kV įtampos elektros oro linijoms – 40 metrų;

6.2. išilgai elektros oro kabelių linijų – žemės juostos ir oro erdvė apribotos vertikaliomis plokštumomis, esančiomis abiejose linijos pusėse nuo kraštinių kabelių (kai jie nėra atlenkti) 2 metrų atstumu;

6.5. išilgai elektros oro linijų sankirtų su vandens telkiniais (upėmis, kanalais, ežerais ir kitais) – oro erdvė virš vandens telkinių paviršiaus, apribota vertikaliomis plokštumomis, esančiomis abiejose linijos pusėse nuo kraštinių laidų (kai jie nėra atlenkti):

6.5.1. laivybiniais vandens telkiniais – 100 metrų atstumu;

6.5.2. nelaivybiniais vandens telkiniais – atstumais, nustatytais Taisyklių 6.1 punkte;

- h_1 fazinio laidininko pirmoje atramoje pakabinimo aukštis, m
- h_2 fazinio laidininko pakabinimo aukštis antroje atramoje, m
- L ilgis tarp atramų, m
- h fazinio laidininko gabaritas, m
- x_0 fazinio laidininko didžiosios linkio vietos speliojama abscisė, m
- a GL parametras
- n skaičiavimo tikslumas
- I ilgis tarp laidininko galų tvirtinimo prie atramos vietose, m
- S fazinio laidininko ilgis, m

$$h_1 := 49 \quad h_2 := 76 \quad L := 750$$

$$h := 27 \quad x_0 := 300 \quad a := 2000 \quad n := 7$$

$$I := \sqrt{L^2 + (h_1 - h_2)^2} = 750.486 \quad S := 754.6 \quad \text{CTOL} := 10^{-n} = 1 \times 10^{-7}$$

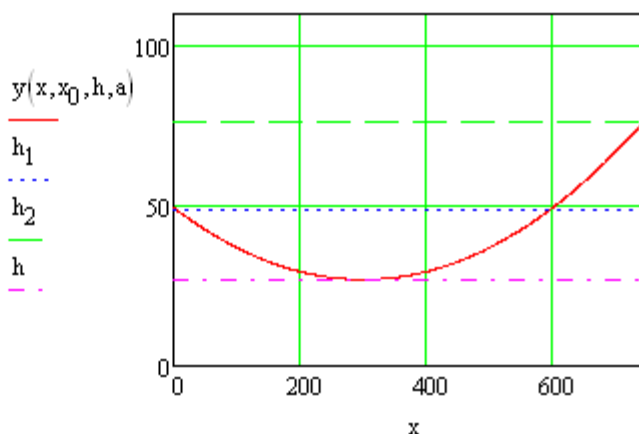
$$y(x, x_0, h, a) := h + a \left(\cosh\left(\frac{x - x_0}{a}\right) - 1 \right)$$

$$\text{Given} \quad h_1 = y(0, x_0, h, a) \quad h_2 = y(L, x_0, h, a) \quad S = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y(x, x_0, h, a)\right)^2} dx$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ h \\ a \end{pmatrix} := \text{Find}(x_0, h, a)$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ h \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 300.972 \\ 27.061 \\ 2.068 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

+



8 PRIEDAS

Aluminio plieno laidas ACKC 185/128

| | | |
|-------------|--------|--|
| Nominalusis | Pjūvis | Skaičiavimams skirti AC, ACKII, ACKC, ACK laidų parametrai |
|-------------|--------|--|

| pjūvis, mm ² | Al/plienas, mm ² | diametras, mm | | 1 km laido varža esant 20°C, Ω | nutūkimo pastanga, N | 1 km laido mase, kg | |
|----------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|--|----------------------------|------------------------|-----------------|
| | | laido | plieno šerdis | | | Al dalis | plieno dalis |
| 185/128 | 187/128 | 23,1 | 14,7 | 0,1543 | 183816 | 517 | 1008 |

9 PRIEDAS

Dirvožemio tipų SDS vertės

| Dirvožemio tipas | SDS vertė | |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| | Natūralios drėgmės | Įsotintų vandenių |
| Nevienodi smėliai | 4-9 | 16-25 |
| Priemolis | 9-25 | 16-30 |
| Molis | 16-30 | 20-36 |
| Akmens- smėlio | 4-9 | 10-20 |
| Akmens-molio | 6-16 | 10-25 |
| Smėlio | 4-16 | 10-25 |
| Klintis tvirtas | 4-7 | - |

10 PRIEDAS

Smėlėto dirvožemio vidutinės temperatūros nustatymas

| t oro, °C | -33 | | -15 | | 0 | 15 | | 34 | |
|----------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| matavimo gylis, m | t _o -t _d | t _d | t _o -t _d | t _d | t _o -t _d | t _d | t _o -t _d | t _d | t _o -t _d |
| 8.6 | -33 | 0 | -15 | 0 | 0 | 15 | 0 | 33 | 1 |
| 3.2 | -28 | -5 | -14 | -1 | 0 | 12 | 3 | 27 | 7 |
| 1.6 | -22 | -11 | -11 | -4 | 0 | 10 | 5 | 23 | 11 |
| 0.8 | -19 | -1 | -10 | -5 | 0 | 8 | 7 | 19 | 15 |
| 0.2 | -11 | -9 | -7 | -3 | 2 | 7 | 8 | 15 | 19 |
| | | -26 | | -13 | 2 | | 23 | | 53 |
| t dirvos, °C | | -5.2 | | -2.6 | 0.4 | | 4.6 | | 10.6 |

11 PRIEDAS

Linijos parametų skaičiavimas

r_0 laidininko aktyvioji ilginė varža, Ω/km $r_0 := 0.1543$

d_1 laidininko skersmuo, mm $d_1 := 23.1$

D_{vid} vidutinis geometrinis atstumas tarp fazinių laidininkų, mm

x_n n-ojo laidininko skerspjūvio centro abscisė, mm

y_n n-ojo laidininko skerspjūvio centro ordinatė, mm

$x_1 := 8500$ $x_2 := 12000$ $x_3 := 7500$

$y_1 := 27000$ $y_2 := 38000$ $y_3 := 49000$

D_{12} atstumas tarp laidininkų L1 ir L2, mm

D_{23} atstumas tarp laidininkų L2 ir L3, mm

D_{31} atstumas tarp laidininkų L3 ir L1, mm

$$D_{12} := \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = 1.154 \times 10^4$$

$$D_{23} := \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} = 1.188 \times 10^4$$

$$D_{31} := \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} = 2.202 \times 10^4$$

$$D_{\text{vid}} := \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = 1.446 \times 10^4$$

a tarpinių skaičiavimų reiškinys, Ω/km

+

$$a := \log \left(\frac{D_{\text{vid}}}{\frac{d_1}{2}} \right) = 3.097$$

x_0 ilginė induktyvioji varža, Ω/km

b_0 ilginis talpinis laidis, S/km

$$x_0 := 0.144 \cdot a + 0.0157 = 0.462$$

$$b_0 := \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{a} = 2.447 \times 10^{-6}$$

U_N linijos įtampa, V $U_N := 110000$

L_1 linijos ilgis, km $L_1 := 20$

x linijos ekvivalentinės schemos induktyvioji varža, Ω

r linijos ekvivalentinės schemos aktyvioji varža, Ω

b linijos ekvivalentinės schemos talpinis laidis, S

n grandinių skaičius linijoje $n := 2$

$$x := \frac{x_0 \cdot L_1}{n} = 4.617$$

$$r := \frac{r_0 \cdot L_1}{n} = 1.543$$

$$b := \frac{n \cdot b_0 \cdot L_1}{2} = 4.894 \times 10^{-5}$$

$$X_1 := \sqrt{\frac{x}{b}} = 307.151$$

Fazinių įtampų ir srovių skaičiavimas

+ k koeficientas įvertinantis įtampos kritimą linijoje k := 1.15

U_N linijinė EOL įtampa, V $U_N := 110000$

U_{fmax} didžiausia fazinė įtampa, V

$$U_{fmax} := k \cdot U_N \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1.033 \times 10^5$$

t laiko momentas, s t := 6

n fazės poslinkis n := $t \cdot \frac{\pi}{6}$

U_{L1} fazinio laidininko L1 įtampa laiko momentu t, V

U_{L2} fazinio laidininko L2 įtampa laiko momentu t, V

U_{L3} fazinio laidininko L3 įtampa laiko momentu t, V

$$U_{L1} := U_{fmax} \cdot e^{-i \cdot (0+n)} = -1.033 \times 10^5 \quad |U_{L1}| = 1.033 \times 10^5$$

$$U_{L2} := U_{fmax} \cdot e^{-i \cdot \left(\frac{2\pi}{3} + n\right)} = 5.164 \times 10^4 + 8.945i \times 10^4 \quad |U_{L2}| = 1.033 \times 10^5$$

$$U_{L3} := U_{fmax} \cdot e^{-i \cdot \left(\frac{4\pi}{3} + n\right)} = 5.164 \times 10^4 - 8.945i \times 10^4 \quad |U_{L3}| = 1.033 \times 10^5$$

R_1 vieno fazinio laidininko aktyvioji varža, Ω $R_1 := 1.543$

X_1 vieno fazinio laidininko reaktyvioji varža, Ω $X_1 := 300.43$

Z pilnoji fazinio laidininko varža, Ω

$$Z := R_1 + i \cdot (X_1) = 1.543 + 300.43i$$

I_{L1} fazinio laidininko L1 srovė laiko momentu t, V

I_{L2} fazinio laidininko L2 srovė laiko momentu t, V

I_{L3} fazinio laidininko L3 srovė laiko momentu t, V

$$I_{L1} := \frac{U_{L1}}{Z} = -1.766 + 343.788i \quad I_{L2} := \frac{U_{L2}}{Z} = 298.612 - 170.365i$$

$$I_{L3} := \frac{U_{L3}}{Z} = -296.846 - 173.423i \quad |I_{L1}| = 343.792 \quad |I_{L2}| = 343.792 \quad |I_{L3}| = 343.792$$

$$I_{RMS} := \frac{343.792}{\sqrt{2}} = 243.098$$

+

Aluminio plieno laido varžos priklausomybės nuo oro temperatūros apskaičiavimas

| | |
|------------|--|
| AC185 /128 | fazinio plieno aliuminio laidininko tipas |
| S_{p1} | laidininko plieno dalies skerspjūvis, mm ² |
| S_{A1} | laidininko aliuminio dalies skerspjūvis, mm ² |
| S_1 | laidininko bendras skerspjūvis, mm ² |
| α | laidininko AC 185 /128 temperatūros plėtimosi koeficientas, OC ⁻¹ |
| I | apkrovos srovė, A |
| r | laidininko spindulys, mm |

$$S_{p1} := 128 \quad S_{A1} := 187 \quad S_1 := 315 \quad \alpha := 15.5 \cdot 10^{-6} \quad I := 300$$

$$r := \sqrt{\frac{S_1}{\pi}} = 10.01337$$

$$L_1 \quad \text{linijos ilgis, mm} \quad L_1 := 20 \cdot 10^6 \quad L_{11} := 20$$

S laidininko šoninio paviršiaus plotas, mm²

$$S := 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L_1 = 1.25832 \times 10^9$$

R_1 laidininko aktyvioji varža, esant $t=20$ OC, Ω

r_0 laidininko ilginė aktyvioji varža, Ω/km

$$r_0 := 0.1543 \quad R_1 := \frac{1}{2} r_0 \cdot L_{11} = 1.543$$

t_1 laidininko temperatūra, OC

t_{oro} oro temperatūra, OC $t_{\text{oro}} := -33$

$$t_1 := \frac{I^2 \cdot R_1}{\alpha \cdot S} + t_{\text{oro}} = -25.87989$$

R_t laidininko varža, esant tam tikrajai oro temperatūrai, Ω

$$R_t := R_1 [1 - \alpha (t_1 + 20)] = 1.54314$$

Oro SDS skaičiavimas

- p oro slėgis, mm Hg
 p_S sočiųjų vandens garų stangrumas esant temperatūrai T , mm Hg
 ϕ santykinė oro drėgmė, %
 T temperatūra Kelvinais

$$T := 307$$

$$a := 7.45 \cdot \frac{T - 273}{T - 38.3} + 0.656$$

$$a = 1.5986870115370302 \quad p_S := 10^a$$

$$p_S = 39.6905403565706$$

$$p_1 := 101100 \quad p := \frac{p_1}{133.32}$$

$$p = 758.3258325832584 \quad \phi := 87$$

$$\epsilon_O := 1 + \frac{p}{T} \left[211 + \frac{\phi p_S}{p} \cdot \left(\frac{10160}{T} - 29.4 \right) \right] \cdot 10^{-6} = 1.000562749232386$$

σ_{oro} oro savitoji varža, Ωm

γ_{oro} oro savitasis laidis, $(\Omega m)^{-1}$

ω pramoninis dažnis, rad/s

ϵ_{Im} dielektriniai nuostoliai

$$f := 50 \quad \epsilon_{00} := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f = 314.1592653589793$$

$$\sigma_{oro} := \left(-7 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0.1263 \cdot T + 12.191 \right) \cdot 10^{16} = 2.8728990000000283 \times 10^{15}$$

$$\gamma_{oro} := \frac{1}{\sigma_{oro}} = 3.4808045810172583 \times 10^{-16}$$

$$\epsilon_{rIm} := \frac{\gamma_{oro}}{\omega \cdot \epsilon_{00}} = 1.2519485988831875 \times 10^{-7}$$

$$\epsilon_{rRe} := \sqrt{(\epsilon_O)^2 - (\epsilon_{rIm})^2} = 1.0005627492323783$$

Vandens SDS skaičiavimas

| | |
|------------------|-----------------------------|
| f | pramoninis dažnis |
| ϵ_{beg} | SDS aukštų dažnių diapazone |
| ϵ_s | SDS žemų dažnių diapazone |
| ϵ_2 | tarpinė SDS |
| $\tau_D \tau_2$ | relaksacijų trukmės |
| ω | dažnis, rad/s |

$$f := 50$$

$$\epsilon_{beg} := 5.76 \quad \epsilon_s := 77.51 \quad \epsilon_2 := 4.29$$

$$\tau_D := 7.86 \cdot 10^{-12} \quad \tau_2 := 0.91 \cdot 10^{-12} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f = 314.15926536$$

$$\epsilon_{rRe} := \epsilon_{beg} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_2}{1 + \omega^2 \cdot (\tau_D)^2} + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_{beg}}{1 + \omega^2 \cdot (\tau_2)^2} = 77.51$$

$$\epsilon_{rIm} := \frac{\epsilon_s - \epsilon_2}{1 + \omega^2 \cdot (\tau_D)^2} \cdot \omega \cdot \tau_D + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_{beg}}{1 + \omega^2 \cdot (\tau_2)^2} \cdot \omega \cdot \tau_2 = 1.80381297 \times 10^{-7}$$

$$\epsilon_{rV} := \sqrt{(\epsilon_{rRe})^2 + (\epsilon_{rIm})^2} = 77.51$$

$$T := 300$$

$$\gamma_{\nabla} := (0.1 \cdot T - 24.3) \cdot 10^{-12} = 5.7 \times 10^{-12}$$

Ledo SDS skaičiavimas

| | |
|------------------|---|
| ϵ_{beg} | SDS aukštų dažnių diapazone |
| ϵ_s | SDS žemų dažnių diapazone |
| τ_p | relaksacijos trukmė |
| ω | kampinis dažnis |
| T | ledo temperatūra Kelvinais |
| γ | ledo savitasis laidumas, $M(\Omega m)^{-1}$ |

$$T := 263$$

$$\tau_p := 53258.81606 \cdot e^{(0.077697 \cdot T - 1.1187 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 1.9937 \cdot 10^{-6} \cdot T^3)} = 5.579 \times 10^{-5}$$

$$\epsilon_s := 1982.084329 - 22.098339 \cdot T + 0.087238 \cdot T^2 - 1.1596 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 = 94.906$$

$$\epsilon_{beg} := 3.15$$

$$\epsilon_{rRe} := \epsilon_{beg} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{beg}}{1 + \omega^2 \cdot (\tau_p)^2} = 94.878$$

$$\epsilon_{rIm} := \frac{\omega \cdot \tau_p \cdot (\epsilon_s - \epsilon_{beg})}{1 + \omega^2 \cdot (\tau_p)^2} = 1.607$$

$$\epsilon_{rL} := \sqrt{(\epsilon_{rRe})^2 + (\epsilon_{rIm})^2} = 94.892$$

$$\gamma := (2073.5 \cdot e^{-0.0328 \cdot T}) \cdot 10^{-13} = 3.718 \times 10^{-14}$$

Rūko SDS skaičiavimas

T oro temperatūra Kelvinais
 ϕ santykinė oro drėgmė, %
 p sistemos oras-vanduo absoliutusias slėgis, Pa
 p_d sauso oro slėgis, Pa
 p_v vandens garo slėgis, Pa
 p_{sat} sočiųjų garų slėgis, mb
 R_d sauso oro dujų pastovioji, J/(kg K)
 R_v garo pastovioji, J/(kg K)
 ρ_{do} drėgno oro tankis, kg/m³

$$T := 288 \quad \phi := 80\% \quad p := 101700$$

$$p_{sat} := 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot T - 2048.625}{T - 35.85}} = 16.88830936$$

$$p_v := \phi \cdot p_{sat} = 13.51064749$$

$$p_d := p - p_v = 1.01686489 \times 10^5$$

$$R_d := 287.058 \quad R_v := 461.495$$

$$\rho_{do} := \frac{p_d}{R_d \cdot T} + \frac{p_v}{R_v \cdot T} = 1.23009032$$

V_o oro turis, m³
 m_v vandens masė viename rūko turyje, kg
 m_o oro masė viename rūko turyje, kg
 m_r vieno rūko turio masė, kg

$$V_o := 1 \quad m_o := \rho_{do} \cdot V_o = 1.23009032 \quad m_v := 1.5 \cdot 10^{-3}$$

$$m_x := m_v + m_o = 1.23159032$$

y_1 vandens masės dalis rūke

y_2 oro masės dalis rūke

ϵ_v vandens dielektrinė skvarba, kai vandens $t=25$ OC

ϵ_o oro dielektrinė skvarba, kai oro $t=15$ OC

$$y_1 := \frac{m_v}{m_x} = 1.21793747 \times 10^{-3} \quad y_2 := \frac{m_o}{m_x} = 0.99878206$$

$$\epsilon_v := 78.58 \quad \epsilon_o := 1.0005796$$

$$a := y_1 \cdot \log(\epsilon_v) + y_2 \cdot \log(\epsilon_o) = 2.5597092 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_r := 10^a = 1.00591135$$

$$\gamma_r \text{ rūko savitasis laidumas, } (\Omega m)^{-1} \quad \gamma_r := 7 \cdot 10^{-11}$$

$$f \text{ dažnis, Hz} \quad f := 50$$

$$\omega \text{ dažnis, } \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \epsilon_{00} := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

ϵ_{rIm} dielektriniai nuostoliai rūke

$$\epsilon_{rIm} := \frac{\gamma_r}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_{00}} = 0.02517705$$

$$\epsilon_{rRe} := \sqrt{(\epsilon_r)^2 - (\epsilon_{rIm})^2} = 1.00559622$$

Dirvos SDS skaičiavimas

t dirvožemio temperatūra, 0 C

T dirvožemio temperatūra, K

γ_d dirvožemio savitasis laidis, (Ωm)⁻¹

$$t := 10.6$$

$$T_d := t + 273 = 283.6$$

$$\gamma_d := \left(8 \cdot 10^{-12} \cdot T_d^4 - 6 \cdot 10^{-9} \cdot T_d^3 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot T_d^2 - 0.0002 \cdot T_d + 0.2744 \right) \cdot 10^{-8} = 2.934 \times 10^{-9}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314.159$$

$$\epsilon_{00} := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

$$\epsilon_{rd} := 2.13 \cdot e^{0.0022 \cdot T_d} = 3.975$$

$$\epsilon_{dIm} := \frac{\gamma_d}{\omega \cdot \epsilon_{00}} = 1.055$$

$$\epsilon_{dRe} := \sqrt{(\epsilon_{rd})^2 - (\epsilon_{dIm})^2} = 3.832$$

19 PRIEDAS

Terpių lūžio, absorbcijos rodiklių bei dielektrinių nuostolių apskaičiavimas

ϵ_r terpės SDS

ϵ_{Re} terpės SDS realioji dedamoji

ϵ_{Im} terpės SDS menamoji dedamoji

n lūžio rodiklis

a absorbcijos rodiklis

$\text{tg}\sigma$ terpės dielektriniai nuostoliai

$$\epsilon_r := 3.84$$

$$\epsilon_{Re} := 3.69$$

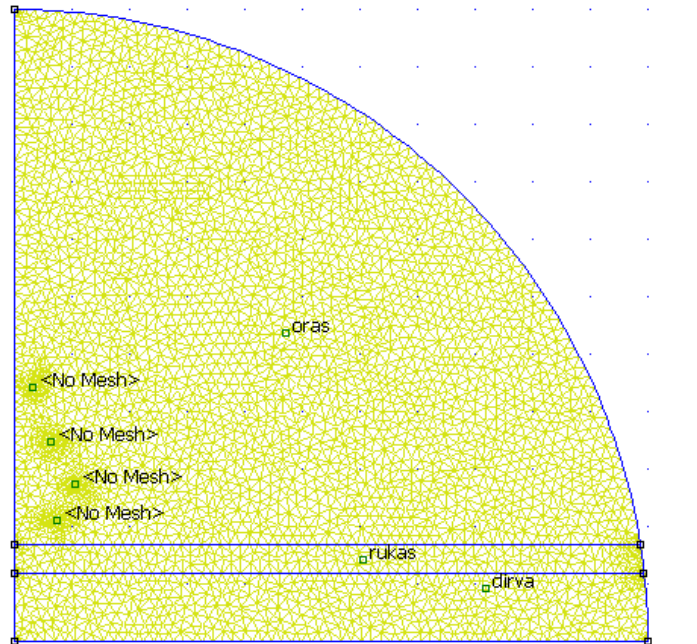
$$\epsilon_{Im} := 1.044$$

$$n := \left(\frac{\epsilon_r + \epsilon_{Re}}{2} \right)^{0.5} = 1.94036079$$

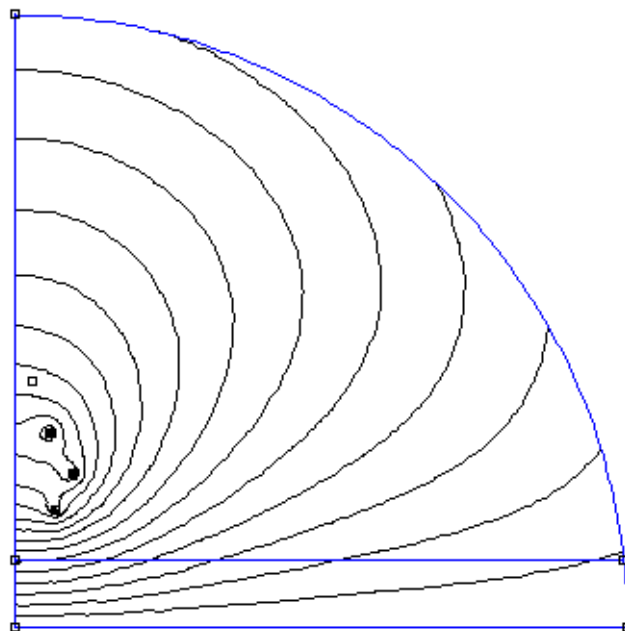
$$a := \left(\frac{\epsilon_r - \epsilon_{Re}}{2} \right)^{0.5} = 0.27386128$$

$$\text{tg}\sigma := \frac{\epsilon_{Im}}{\epsilon_{Re}} = 0.2829268$$

ELS modeliavimo schema FEMM programos terpėje



MLS ir MST modeliavimo schema FEMM programos terpėje



1 lentelė. ELS, V/m virš žemės paviršiaus esant skirtingai oro temperatūrai

| atstumas, m | Oro temperatūra, °C | | | | | atstumas, m | Oro temperatūra, °C | | | | |
|----------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| 0 | 3095.73 | 3098.34 | 3102.18 | 3098.43 | 3112.17 | 51 | 410.64 | 410.52 | 410.34 | 407.89 | 409.88 |
| 2 | 3163.73 | 3166.37 | 3170.28 | 3137.66 | 3180.43 | 53 | 387.23 | 387.11 | 386.94 | 384.37 | 386.48 |
| 4 | 3214.74 | 3217.43 | 3221.40 | 3215.01 | 3231.72 | 55 | 368.05 | 367.92 | 367.74 | 362.37 | 367.27 |
| 6 | 3242.01 | 3244.68 | 3248.61 | 3257.21 | 3258.84 | 57 | 344.89 | 344.77 | 344.60 | 343.18 | 344.13 |
| 8 | 3124.91 | 3127.42 | 3131.12 | 3170.09 | 3140.73 | 59 | 328.01 | 327.89 | 327.71 | 322.61 | 327.26 |
| 10 | 2932.84 | 2935.04 | 2938.28 | 2963.73 | 2946.72 | 61 | 309.80 | 309.68 | 309.51 | 306.45 | 309.05 |
| 12 | 2675.59 | 2677.41 | 2680.11 | 2691.93 | 2687.12 | 63 | 295.12 | 295.00 | 294.83 | 292.72 | 294.38 |
| 14 | 2393.80 | 2395.29 | 2397.48 | 2371.16 | 2403.19 | 65 | 281.28 | 281.17 | 281.00 | 278.79 | 280.56 |
| 16 | 2102.78 | 2103.95 | 2105.67 | 2084.48 | 2110.14 | 67 | 269.30 | 269.19 | 269.02 | 265.48 | 268.59 |
| 18 | 1856.01 | 1856.89 | 1858.18 | 1835.49 | 1861.54 | 69 | 255.76 | 255.65 | 255.49 | 254.02 | 255.07 |
| 20 | 1645.40 | 1646.06 | 1647.03 | 1626.90 | 1649.55 | 71 | 244.53 | 244.42 | 244.26 | 243.52 | 243.85 |
| 22 | 1474.52 | 1475.02 | 1475.76 | 1434.54 | 1477.68 | 73 | 234.54 | 234.43 | 234.28 | 233.74 | 233.88 |
| 24 | 1293.95 | 1294.31 | 1294.83 | 1273.38 | 1296.20 | 76 | 227.13 | 227.03 | 226.87 | 224.84 | 226.47 |
| 27 | 1141.97 | 1142.17 | 1142.46 | 1135.54 | 1143.22 | 78 | 218.15 | 218.05 | 217.89 | 216.87 | 217.50 |
| 29 | 1020.91 | 1021.01 | 1021.15 | 1019.10 | 1021.52 | 80 | 210.92 | 210.82 | 210.67 | 208.93 | 210.28 |
| 31 | 920.77 | 920.82 | 920.90 | 913.30 | 921.09 | 82 | 203.75 | 203.65 | 203.50 | 200.83 | 203.12 |
| 33 | 839.83 | 839.84 | 839.86 | 832.25 | 839.89 | 84 | 196.98 | 196.88 | 196.74 | 194.94 | 196.36 |
| 35 | 761.48 | 761.45 | 761.40 | 763.09 | 761.28 | 86 | 190.04 | 189.94 | 189.79 | 188.08 | 189.42 |
| 37 | 701.71 | 701.66 | 701.57 | 693.45 | 701.35 | 88 | 183.90 | 183.80 | 183.66 | 181.97 | 183.29 |
| 39 | 642.58 | 642.49 | 642.37 | 630.38 | 642.05 | 90 | 177.83 | 177.74 | 177.60 | 177.25 | 177.23 |
| 41 | 587.27 | 587.17 | 587.03 | 581.33 | 586.66 | 92 | 172.74 | 172.65 | 172.51 | 170.94 | 172.14 |
| 43 | 545.17 | 545.07 | 544.91 | 543.50 | 544.50 | 94 | 167.57 | 167.48 | 167.34 | 165.19 | 166.97 |
| 45 | 503.93 | 503.81 | 503.65 | 500.08 | 503.21 | 96 | 161.85 | 161.75 | 161.61 | 161.31 | 161.24 |
| 47 | 471.02 | 470.90 | 470.73 | 465.23 | 470.27 | 98 | 156.90 | 156.81 | 156.66 | 156.56 | 156.29 |
| 49 | 440.99 | 440.87 | 440.70 | 437.28 | 440.25 | 100 | 151.95 | 151.85 | 151.71 | 151.30 | 151.33 |

2 lentelė. ELS, V/m virš vandens paviršiaus esant skirtingai oro temperatūrai

| atstumas, m | Oro temperatūra, °C | | | | | atstumas, m | Oro temperatūra, °C | | | | |
|----------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| 0 | 3786.98 | 3730.55 | 3664.53 | 3653.60 | 3660.68 | 51 | 378.46 | 380.75 | 383.29 | 382.26 | 383.48 |
| 2 | 3839.45 | 3790.10 | 3742.57 | 3699.23 | 3738.65 | 53 | 354.57 | 355.46 | 360.57 | 357.99 | 360.75 |
| 4 | 3940.53 | 3877.62 | 3804.24 | 3789.58 | 3800.24 | 55 | 330.23 | 333.63 | 340.55 | 331.95 | 340.74 |
| 6 | 4007.94 | 3943.24 | 3827.73 | 3831.69 | 3823.75 | 57 | 312.02 | 313.01 | 318.49 | 317.43 | 318.66 |
| 8 | 3917.40 | 3829.06 | 3677.11 | 3712.17 | 3673.34 | 59 | 295.18 | 299.43 | 302.26 | 299.10 | 302.44 |
| 10 | 3594.33 | 3565.34 | 3418.00 | 3436.86 | 3414.69 | 61 | 281.26 | 281.63 | 284.15 | 282.78 | 284.32 |
| 12 | 3220.20 | 3168.58 | 3078.53 | 3090.74 | 3075.78 | 63 | 264.54 | 266.86 | 270.05 | 268.93 | 270.21 |
| 14 | 2757.05 | 2723.70 | 2721.34 | 2688.06 | 2719.11 | 65 | 252.93 | 253.52 | 256.94 | 255.32 | 257.10 |
| 16 | 2363.73 | 2372.76 | 2360.22 | 2327.16 | 2358.46 | 67 | 240.52 | 242.25 | 245.59 | 242.13 | 245.74 |
| 18 | 2091.21 | 2058.12 | 2048.21 | 2022.83 | 2046.90 | 69 | 227.88 | 231.74 | 232.73 | 231.50 | 232.88 |
| 20 | 1777.63 | 1797.18 | 1788.49 | 1775.06 | 1787.52 | 71 | 219.43 | 219.34 | 222.18 | 221.81 | 222.32 |
| 22 | 1557.60 | 1558.05 | 1583.44 | 1525.88 | 1582.71 | 73 | 210.11 | 211.42 | 212.73 | 212.29 | 212.86 |
| 24 | 1330.32 | 1346.30 | 1370.81 | 1334.99 | 1370.29 | 76 | 200.57 | 202.96 | 205.50 | 203.76 | 205.64 |
| 27 | 1171.87 | 1185.91 | 1182.27 | 1177.86 | 1182.01 | 78 | 193.30 | 194.76 | 197.05 | 196.35 | 197.18 |
| 29 | 1037.08 | 1045.19 | 1039.05 | 1045.89 | 1038.94 | 80 | 186.58 | 187.22 | 190.24 | 188.77 | 190.37 |
| 31 | 920.09 | 934.98 | 928.96 | 924.72 | 928.92 | 82 | 179.49 | 180.64 | 183.47 | 181.87 | 183.60 |
| 33 | 817.78 | 828.59 | 838.34 | 829.91 | 838.37 | 84 | 172.67 | 173.80 | 177.00 | 176.33 | 177.12 |
| 35 | 741.67 | 743.21 | 751.36 | 752.90 | 751.45 | 86 | 166.80 | 167.81 | 170.33 | 168.97 | 170.45 |
| 37 | 672.35 | 676.54 | 686.14 | 679.85 | 686.27 | 88 | 161.16 | 162.08 | 164.44 | 163.04 | 164.56 |
| 39 | 612.13 | 617.50 | 621.53 | 615.52 | 621.69 | 90 | 154.96 | 156.75 | 158.60 | 157.57 | 158.71 |
| 41 | 556.66 | 558.65 | 563.84 | 560.56 | 564.01 | 92 | 149.99 | 151.04 | 153.67 | 152.29 | 153.78 |
| 43 | 521.59 | 509.92 | 519.77 | 517.36 | 519.96 | 94 | 144.98 | 146.18 | 148.54 | 146.67 | 148.65 |
| 45 | 474.44 | 472.17 | 477.31 | 475.10 | 477.50 | 96 | 140.09 | 140.59 | 142.88 | 142.74 | 142.99 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 47 | 434.58 | 441.08 | 443.33 | 447.39 | 443.53 | 98 | 134.88 | 136.20 | 137.78 | 137.98 | 137.90 |
| 49 | 404.38 | 406.80 | 414.14 | 409.08 | 414.33 | 100 | 130.57 | 130.57 | 132.62 | 132.63 | 132.74 |

24 PRIEDAS

1 lentelė. MLS, A/m virš žemės paviršiaus esant skirtingai oro temperatūrai

| atstumas, m | Oro temperatūra, °C | | | | | atstumas, m | Oro temperatūra, °C | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| 0 | 21.239 | 21.230 | 21.237 | 21.219 | 21.228 | 51 | 6.731 | 6.732 | 6.731 | 6.703 | 6.732 |
| 2 | 21.448 | 21.439 | 21.446 | 21.373 | 21.437 | 53 | 6.476 | 6.477 | 6.476 | 6.511 | 6.477 |
| 4 | 21.812 | 21.803 | 21.810 | 21.801 | 21.801 | 55 | 6.212 | 6.212 | 6.212 | 6.259 | 6.213 |
| 6 | 22.214 | 22.206 | 22.213 | 22.266 | 22.204 | 57 | 6.024 | 6.024 | 6.024 | 6.014 | 6.024 |
| 8 | 22.111 | 22.103 | 22.109 | 21.927 | 22.101 | 59 | 5.839 | 5.839 | 5.839 | 5.814 | 5.839 |
| 10 | 21.126 | 21.119 | 21.124 | 21.223 | 21.117 | 61 | 5.625 | 5.625 | 5.625 | 5.616 | 5.625 |
| 12 | 19.834 | 19.829 | 19.833 | 19.943 | 19.828 | 63 | 5.462 | 5.463 | 5.462 | 5.427 | 5.463 |
| 14 | 18.375 | 18.371 | 18.374 | 18.475 | 18.370 | 65 | 5.290 | 5.290 | 5.290 | 5.281 | 5.291 |
| 16 | 17.076 | 17.073 | 17.075 | 17.037 | 17.072 | 67 | 5.124 | 5.124 | 5.124 | 5.097 | 5.124 |
| 18 | 16.038 | 16.036 | 16.037 | 15.885 | 16.035 | 69 | 4.967 | 4.967 | 4.967 | 4.954 | 4.967 |
| 20 | 14.809 | 14.807 | 14.809 | 14.856 | 14.807 | 71 | 4.818 | 4.818 | 4.818 | 4.802 | 4.818 |
| 22 | 13.773 | 13.771 | 13.772 | 13.842 | 13.771 | 73 | 4.668 | 4.668 | 4.668 | 4.661 | 4.668 |
| 24 | 12.899 | 12.898 | 12.899 | 12.866 | 12.898 | 76 | 4.528 | 4.528 | 4.528 | 4.531 | 4.528 |
| 27 | 12.092 | 12.092 | 12.092 | 12.097 | 12.091 | 78 | 4.374 | 4.374 | 4.374 | 4.371 | 4.374 |
| 29 | 11.414 | 11.414 | 11.414 | 11.271 | 11.414 | 80 | 4.256 | 4.256 | 4.256 | 4.249 | 4.256 |
| 31 | 10.746 | 10.746 | 10.746 | 10.668 | 10.746 | 82 | 4.130 | 4.130 | 4.130 | 4.107 | 4.130 |
| 33 | 10.147 | 10.147 | 10.147 | 10.069 | 10.147 | 84 | 3.986 | 3.986 | 3.986 | 3.972 | 3.986 |
| 35 | 9.542 | 9.542 | 9.542 | 9.648 | 9.542 | 86 | 3.872 | 3.872 | 3.872 | 3.870 | 3.872 |
| 37 | 9.082 | 9.082 | 9.082 | 9.079 | 9.082 | 88 | 3.723 | 3.723 | 3.723 | 3.726 | 3.723 |
| 39 | 8.669 | 8.669 | 8.669 | 8.628 | 8.669 | 90 | 3.624 | 3.624 | 3.624 | 3.632 | 3.624 |
| 41 | 8.293 | 8.293 | 8.293 | 8.256 | 8.293 | 92 | 3.496 | 3.496 | 3.496 | 3.504 | 3.496 |
| 43 | 7.883 | 7.884 | 7.883 | 7.879 | 7.884 | 94 | 3.381 | 3.382 | 3.381 | 3.380 | 3.382 |
| 45 | 7.585 | 7.586 | 7.585 | 7.575 | 7.586 | 96 | 3.248 | 3.248 | 3.248 | 3.268 | 3.248 |
| 47 | 7.273 | 7.273 | 7.273 | 7.273 | 7.273 | 98 | 3.151 | 3.151 | 3.151 | 3.154 | 3.151 |
| 49 | 6.993 | 6.994 | 6.993 | 6.967 | 6.994 | 100 | 3.030 | 3.030 | 3.030 | 3.028 | 3.030 |

2 lentelė. MLS, A/m virš vandens paviršiaus esant skirtingai oro temperatūrai

| atstumas, m | Oro temperatūra, °C | | | | | atstumas, m | Oro temperatūra, °C | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| 0 | 21.153 | 21.145 | 21.151 | 21.139 | 21.150 | 51 | 6.738 | 6.735 | 6.735 | 6.706 | 6.735 |
| 2 | 21.346 | 21.337 | 21.361 | 21.293 | 21.360 | 53 | 6.495 | 6.488 | 6.480 | 6.515 | 6.480 |
| 4 | 21.717 | 21.614 | 21.725 | 21.721 | 21.724 | 55 | 6.259 | 6.255 | 6.215 | 6.262 | 6.215 |
| 6 | 22.021 | 22.018 | 22.131 | 22.189 | 22.131 | 57 | 6.037 | 6.039 | 6.026 | 6.017 | 6.026 |
| 8 | 21.875 | 21.861 | 22.035 | 21.856 | 22.035 | 59 | 5.836 | 5.843 | 5.842 | 5.817 | 5.842 |
| 10 | 20.908 | 20.997 | 21.061 | 21.162 | 21.060 | 61 | 5.649 | 5.648 | 5.627 | 5.619 | 5.627 |
| 12 | 19.755 | 19.739 | 19.782 | 19.894 | 19.781 | 63 | 5.468 | 5.465 | 5.465 | 5.429 | 5.465 |
| 14 | 18.407 | 18.419 | 18.334 | 18.436 | 18.334 | 65 | 5.278 | 5.298 | 5.293 | 5.283 | 5.293 |
| 16 | 17.071 | 17.121 | 17.045 | 17.009 | 17.045 | 67 | 5.132 | 5.119 | 5.126 | 5.098 | 5.126 |
| 18 | 15.895 | 15.900 | 16.015 | 15.864 | 16.014 | 69 | 4.969 | 4.969 | 4.969 | 4.955 | 4.969 |
| 20 | 14.817 | 14.797 | 14.793 | 14.840 | 14.793 | 71 | 4.816 | 4.814 | 4.820 | 4.804 | 4.820 |
| 22 | 13.850 | 13.818 | 13.762 | 13.832 | 13.762 | 73 | 4.673 | 4.671 | 4.670 | 4.662 | 4.670 |
| 24 | 12.897 | 12.939 | 12.892 | 12.860 | 12.892 | 76 | 4.526 | 4.526 | 4.529 | 4.532 | 4.529 |
| 27 | 12.116 | 12.097 | 12.088 | 12.093 | 12.088 | 78 | 4.393 | 4.388 | 4.375 | 4.373 | 4.375 |
| 29 | 11.348 | 11.384 | 11.413 | 11.270 | 11.412 | 80 | 4.263 | 4.260 | 4.257 | 4.250 | 4.257 |
| 31 | 10.734 | 10.726 | 10.746 | 10.669 | 10.746 | 82 | 4.135 | 4.123 | 4.131 | 4.108 | 4.131 |
| 33 | 10.169 | 10.144 | 10.148 | 10.070 | 10.148 | 84 | 3.994 | 3.998 | 3.987 | 3.973 | 3.987 |
| 35 | 9.570 | 9.624 | 9.544 | 9.650 | 9.544 | 86 | 3.867 | 3.869 | 3.874 | 3.871 | 3.874 |
| 37 | 9.135 | 9.129 | 9.085 | 9.081 | 9.085 | 88 | 3.757 | 3.753 | 3.724 | 3.728 | 3.724 |
| 39 | 8.677 | 8.688 | 8.672 | 8.631 | 8.672 | 90 | 3.623 | 3.625 | 3.625 | 3.633 | 3.625 |
| 41 | 8.318 | 8.291 | 8.296 | 8.260 | 8.296 | 92 | 3.510 | 3.508 | 3.497 | 3.506 | 3.497 |
| 43 | 7.916 | 7.933 | 7.887 | 7.883 | 7.887 | 94 | 3.390 | 3.390 | 3.383 | 3.382 | 3.383 |
| 45 | 7.584 | 7.611 | 7.589 | 7.578 | 7.589 | 96 | 3.282 | 3.273 | 3.250 | 3.270 | 3.250 |
| 47 | 7.262 | 7.298 | 7.277 | 7.277 | 7.277 | 98 | 3.160 | 3.165 | 3.153 | 3.157 | 3.153 |
| 49 | 7.003 | 7.001 | 6.997 | 6.970 | 6.997 | 100 | 3.037 | 3.041 | 3.033 | 3.031 | 3.033 |

1 lentelė. MST, μT virš žemės paviršiaus esant skirtingai oro temperatūrai

| atstumas, m | Oro temperatūra, $^{\circ}\text{C}$ | | | | | atstumas, m | Oro temperatūra, $^{\circ}\text{C}$ | | | | |
|----------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| 0 | 26.690 | 26.679 | 26.687 | 26.668 | 26.676 | 51 | 8.459 | 8.459 | 8.459 | 8.424 | 8.460 |
| 2 | 26.952 | 26.941 | 26.950 | 26.861 | 26.939 | 53 | 8.138 | 8.139 | 8.139 | 8.183 | 8.139 |
| 4 | 27.409 | 27.398 | 27.407 | 27.399 | 27.396 | 55 | 7.806 | 7.807 | 7.807 | 7.866 | 7.807 |
| 6 | 27.915 | 27.905 | 27.913 | 27.983 | 27.903 | 57 | 7.569 | 7.570 | 7.570 | 7.558 | 7.570 |
| 8 | 27.785 | 27.776 | 27.783 | 27.557 | 27.774 | 59 | 7.338 | 7.338 | 7.338 | 7.307 | 7.338 |
| 10 | 26.547 | 26.539 | 26.545 | 26.672 | 26.537 | 61 | 7.068 | 7.069 | 7.068 | 7.058 | 7.069 |
| 12 | 24.924 | 24.918 | 24.923 | 25.063 | 24.917 | 63 | 6.864 | 6.864 | 6.864 | 6.820 | 6.865 |
| 14 | 23.091 | 23.086 | 23.089 | 23.218 | 23.085 | 65 | 6.648 | 6.648 | 6.648 | 6.637 | 6.648 |
| 16 | 21.458 | 21.454 | 21.457 | 21.411 | 21.454 | 67 | 6.439 | 6.440 | 6.439 | 6.405 | 6.440 |
| 18 | 20.154 | 20.151 | 20.153 | 19.964 | 20.151 | 69 | 6.242 | 6.242 | 6.242 | 6.226 | 6.242 |
| 20 | 18.610 | 18.608 | 18.609 | 18.670 | 18.607 | 71 | 6.054 | 6.055 | 6.054 | 6.035 | 6.055 |
| 22 | 17.307 | 17.306 | 17.307 | 17.397 | 17.306 | 73 | 5.866 | 5.866 | 5.866 | 5.858 | 5.866 |
| 24 | 16.209 | 16.209 | 16.209 | 16.170 | 16.208 | 76 | 5.690 | 5.690 | 5.690 | 5.694 | 5.690 |
| 27 | 15.195 | 15.195 | 15.195 | 15.203 | 15.195 | 78 | 5.497 | 5.497 | 5.497 | 5.494 | 5.497 |
| 29 | 14.343 | 14.343 | 14.343 | 14.165 | 14.343 | 80 | 5.348 | 5.348 | 5.348 | 5.340 | 5.348 |
| 31 | 13.504 | 13.504 | 13.504 | 13.408 | 13.504 | 82 | 5.190 | 5.190 | 5.190 | 5.161 | 5.190 |
| 33 | 12.751 | 12.751 | 12.751 | 12.654 | 12.751 | 84 | 5.009 | 5.009 | 5.009 | 4.992 | 5.009 |
| 35 | 11.991 | 11.991 | 11.991 | 12.125 | 11.991 | 86 | 4.866 | 4.866 | 4.866 | 4.863 | 4.866 |
| 37 | 11.412 | 11.413 | 11.412 | 11.410 | 11.413 | 88 | 4.678 | 4.678 | 4.678 | 4.683 | 4.678 |
| 39 | 10.894 | 10.894 | 10.894 | 10.843 | 10.895 | 90 | 4.554 | 4.554 | 4.554 | 4.565 | 4.554 |
| 41 | 10.421 | 10.421 | 10.421 | 10.376 | 10.421 | 92 | 4.393 | 4.393 | 4.393 | 4.404 | 4.393 |
| 43 | 9.906 | 9.907 | 9.906 | 9.903 | 9.907 | 94 | 4.249 | 4.249 | 4.249 | 4.248 | 4.250 |
| 45 | 9.532 | 9.532 | 9.532 | 9.520 | 9.533 | 96 | 4.081 | 4.082 | 4.081 | 4.107 | 4.082 |
| 47 | 9.140 | 9.140 | 9.140 | 9.141 | 9.140 | 98 | 3.960 | 3.960 | 3.960 | 3.964 | 3.960 |
| 49 | 8.788 | 8.789 | 8.788 | 8.755 | 8.789 | 100 | 3.808 | 3.808 | 3.808 | 3.806 | 3.808 |

2 lentelė. MST, μT virš vandens paviršiaus esant skirtingai oro temperatūrai

| atstumas, m | Oro temperatūra, $^{\circ}\text{C}$ | | | | | atstumas, m | Oro temperatūra, $^{\circ}\text{C}$ | | | | |
|----------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 | | -33 | -15 | 0 | 15 | 34 |
| 0 | 26.581 | 26.572 | 26.579 | 26.567 | 26.579 | 51 | 8.468 | 8.464 | 8.463 | 8.428 | 8.463 |
| 2 | 26.824 | 26.814 | 26.843 | 26.760 | 26.842 | 53 | 8.162 | 8.153 | 8.143 | 8.187 | 8.143 |
| 4 | 27.290 | 27.162 | 27.301 | 27.299 | 27.300 | 55 | 7.865 | 7.860 | 7.810 | 7.870 | 7.811 |
| 6 | 27.672 | 27.669 | 27.811 | 27.887 | 27.811 | 57 | 7.586 | 7.589 | 7.573 | 7.561 | 7.573 |
| 8 | 27.489 | 27.471 | 27.690 | 27.468 | 27.690 | 59 | 7.334 | 7.342 | 7.341 | 7.311 | 7.341 |
| 10 | 26.274 | 26.386 | 26.466 | 26.596 | 26.465 | 61 | 7.098 | 7.097 | 7.072 | 7.061 | 7.072 |
| 12 | 24.825 | 24.805 | 24.858 | 25.002 | 24.858 | 63 | 6.871 | 6.867 | 6.867 | 6.823 | 6.867 |
| 14 | 23.131 | 23.146 | 23.039 | 23.170 | 23.039 | 65 | 6.633 | 6.658 | 6.651 | 6.639 | 6.651 |
| 16 | 21.452 | 21.515 | 21.419 | 21.377 | 21.419 | 67 | 6.449 | 6.433 | 6.442 | 6.408 | 6.442 |
| 18 | 19.974 | 19.980 | 20.125 | 19.938 | 20.125 | 69 | 6.244 | 6.244 | 6.244 | 6.228 | 6.244 |
| 20 | 18.620 | 18.594 | 18.590 | 18.651 | 18.590 | 71 | 6.053 | 6.050 | 6.057 | 6.037 | 6.057 |
| 22 | 17.404 | 17.365 | 17.294 | 17.384 | 17.294 | 73 | 5.872 | 5.869 | 5.868 | 5.860 | 5.868 |
| 24 | 16.207 | 16.260 | 16.201 | 16.162 | 16.201 | 76 | 5.687 | 5.688 | 5.691 | 5.696 | 5.692 |
| 27 | 15.226 | 15.202 | 15.191 | 15.199 | 15.191 | 78 | 5.520 | 5.514 | 5.498 | 5.495 | 5.498 |
| 29 | 14.260 | 14.305 | 14.341 | 14.164 | 14.342 | 80 | 5.357 | 5.353 | 5.349 | 5.341 | 5.349 |
| 31 | 13.488 | 13.479 | 13.504 | 13.408 | 13.504 | 82 | 5.197 | 5.182 | 5.191 | 5.162 | 5.191 |
| 33 | 12.779 | 12.747 | 12.753 | 12.656 | 12.753 | 84 | 5.019 | 5.024 | 5.010 | 4.993 | 5.010 |
| 35 | 12.026 | 12.094 | 11.994 | 12.128 | 11.994 | 86 | 4.859 | 4.862 | 4.868 | 4.865 | 4.868 |
| 37 | 11.479 | 11.472 | 11.416 | 11.413 | 11.416 | 88 | 4.721 | 4.716 | 4.680 | 4.685 | 4.680 |
| 39 | 10.904 | 10.918 | 10.898 | 10.847 | 10.898 | 90 | 4.553 | 4.556 | 4.556 | 4.566 | 4.556 |
| 41 | 10.453 | 10.419 | 10.425 | 10.381 | 10.426 | 92 | 4.411 | 4.409 | 4.395 | 4.406 | 4.395 |
| 43 | 9.948 | 9.970 | 9.911 | 9.907 | 9.911 | 94 | 4.260 | 4.259 | 4.251 | 4.250 | 4.251 |
| 45 | 9.530 | 9.565 | 9.537 | 9.524 | 9.537 | 96 | 4.125 | 4.113 | 4.084 | 4.110 | 4.084 |
| 47 | 9.126 | 9.171 | 9.144 | 9.146 | 9.144 | 98 | 3.971 | 3.978 | 3.963 | 3.967 | 3.963 |
| 49 | 8.800 | 8.798 | 8.793 | 8.760 | 8.793 | 100 | 3.816 | 3.821 | 3.811 | 3.809 | 3.811 |

Magistro paruošto publikavimui straipsnio kopija

A probabilistic model for electric field measurements for energy transmission lines

Jelena Dikun, Eleonora Guseinoviene

Klaipeda University, Electrical Engineering Department, 91225, Klaipeda-Lithuania

Abstract

In this study, a prototype of transmission lines is considered at the high voltage laboratory environment. Electric field measurements versus different distances are evaluated in the manner of statistical properties using the curve fitting based upon the exponential mathematical modeling. Hence, using the modeled data, the electric field values are estimated for different measurement points of the space at around the line. Also, a probability density function of the exponential distribution is determined as a probabilistic model of the measurements as well as the mathematical modeling. Hence, statistical parameters of the probability density functions are connected with physical states of the experiment in the sense of voltage levels.

Keywords: Electric fields, High-Voltage, Energy transmission line, probability density function.

©Sila Science. All rights reserved.

1. Introduction

In literature, there are so many studies on the electric and magnetic measurements around the AC high-voltage (HV) transmission lines [1-10]. Sometimes, these two different physical measurements are evaluated independently and their biological effects are classified [1,7]. In this paper, the measurement of the electrical field distribution around AC high-voltage lines in laboratory medium is demonstrated. In terms of the methods purposed for electric fields, there are two important approaches: One of them is a theoretical approach as a semi-numerical method and it is related with the laws of electrostatic techniques. Another one is connected with numerical solutions like finite difference and fine element methods (FEM) [1,3,11]. In most cases, electric fields can be considered in two dimensional spaces under the HV transmission line (Overhead line) and FEM is used to compute the two dimensional electric field distributions by means of the specific boundary conditions.

In sense of the practical applications there are two different sources of the electric and magnetic fields. These are the high potential (Voltage) of the conductors and the current of phase conductors for the electrical fields and magnetic fields respectively. These quantities are very important in sense of the electro-magnetic-compatibility (EMC) for various devices.

In terms of installations, the electric fields must be limited by the safety distances with respect to the conductors (lines). For this reason, there are different limiting values for the different countries and geographical regions. And also, there are standards formed for the time the person who stays within the electric field under the collaboration between the International Radiation Association (IRPA) and the World Health Organization (WHO). For the general public, these limiting values is at around 10 KV/m if the exposure time is only a few hours/day [7].

**Corresponding author: Tel: +370 46 398686; fax:+370 46 398682

E-mail addresses: eleonora.guseinoviene@ku.lt (E. Guseineviene)

In this research, the electric field measurements are taken under the simulated HV transmission line at the different voltage levels like 5.8 kV, 8.7 kV and 21 kV at the HV laboratory of Istanbul Technical University (ITU) in Maslak-Campus [5]. Hence measured values of the electric fields can be defined by the decreasing exponential curves

and calculated their probability density functions (pdf). As a result of this study, the applied voltage levels were connected with the parameters of probability functions.

2. Calculation of Electric Fields

The electric field can be computed by superposing the [point charge fields](#) of infinite small charge elements of the line [12,13]. Differential form of the electric field is given by

$$dE_y \uparrow \frac{k \cdot dx \cdot y}{r^2} \tag{1}$$

Taking the integral along the line, it becomes,

$$E_y \uparrow \frac{k \cdot b}{y} \int_a^b \frac{dx}{\sqrt{y^2 + x^2}} \tag{2}$$

Where $k = 1/4\pi\epsilon_0$, and also, as a and b approach infinity, it is $E_y = \lambda/2\pi y\epsilon_0$.

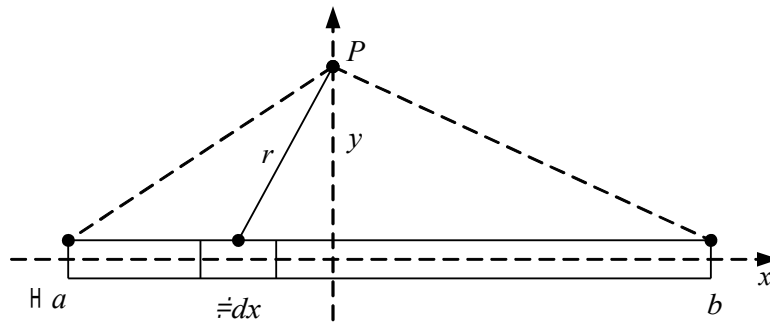


Fig. 1. Calculation of electric field at around a finite line

3. Mathematical Background

The mathematical background of this research is based on two different applications [14-17]: These are the mathematical modeling of the data and its representation in sense of probability density function.

3.1. Mathematical Modeling

In term of the mathematical modeling of the collected data, exponential type modeling is considered as below [14].

$$E(x) \uparrow A e^{-\alpha x} \tag{3}$$

Where E is electric field; x is distance; A is a constant and α is also attenuation. This is a nonlinear model and the parameters of this model function can be determined by curve fitting methods. For this purpose, linearization of the exponential model function can be shown by the following equations.

$$\ln E(x) \uparrow \ln A - \alpha x$$

And, it is represented by a linear equation as below

$$Y(X) \uparrow \dots_1 X \dots_2$$

Hence, linear least squares analysis is applied to find the best-fit line [14], and two parameters are calculated as

$$\beta_1 = -\alpha, \text{ and } \beta_2 = \ln A.$$

3.2. Exponential Distribution

Definition: Let any exponential distribution function be $E(x)$ like the representation of the electric field. In this case, it is defined as

$$E(x) \sim e^{-\lambda x} \quad (4)$$

Here the parameter α is reciprocal of the mean value and it is shown as

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

Where μ is mean value of the distribution [15].

Hence the probability density function (pdf) of the exponential distribution is shown by $p(x)$ and it is calculated as follow:

$$p(x) = \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda x} dx = (1 - e^{-\lambda x}) \Big|_0^{\infty} = 1 \quad (6)$$

4. Experimental Set up and Data

For this research, the experimental study is based upon the following measurement circuit as shown in Figure 2 at the HV laboratory of ITU (Istanbul Technical University) and, electric field values shown in Table 1 are measured and recorded point by point with a special device (Model HI-3604 ELF Survey Meter [5]) in the direction of x of the coordinate system.

Table 1. Electric Field Measurements at ground level

| Distance [m] X | Electric Field [V/m] U1=5.8 kV | Electric Field [V/m] U2=8.7 kV | Electric Field [V/m] U3=21 kV |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 680 | 930 | 2100 |
| 1 | 510 | 900 | 2050 |
| 2 | 390 | 630 | 1500 |
| 3 | 210 | 330 | 870 |
| 4 | 80 | 168 | 420 |

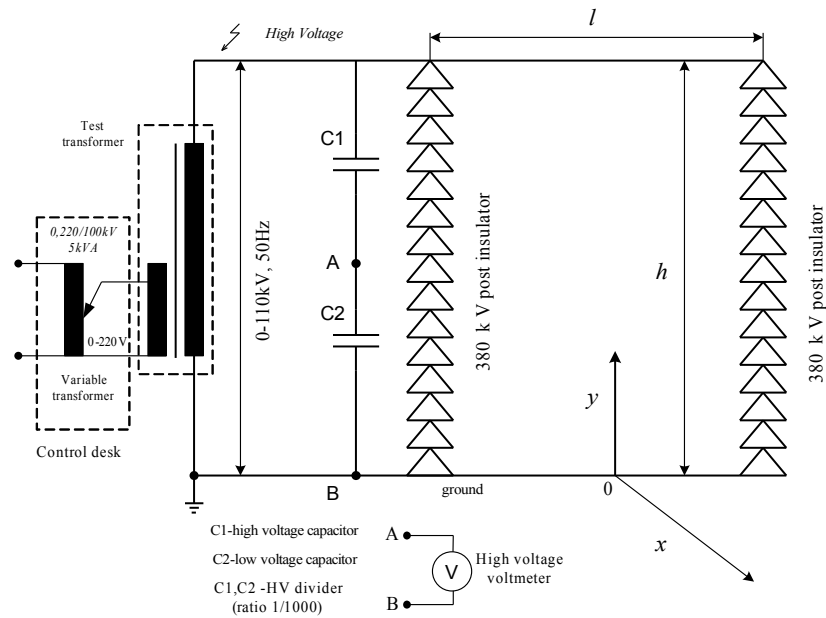


Fig. 2. Measurement circuit for experimental study.

Hence, variations of the collected data at three voltage levels are presented by means of the graphical illustration as shown in Figure 3.

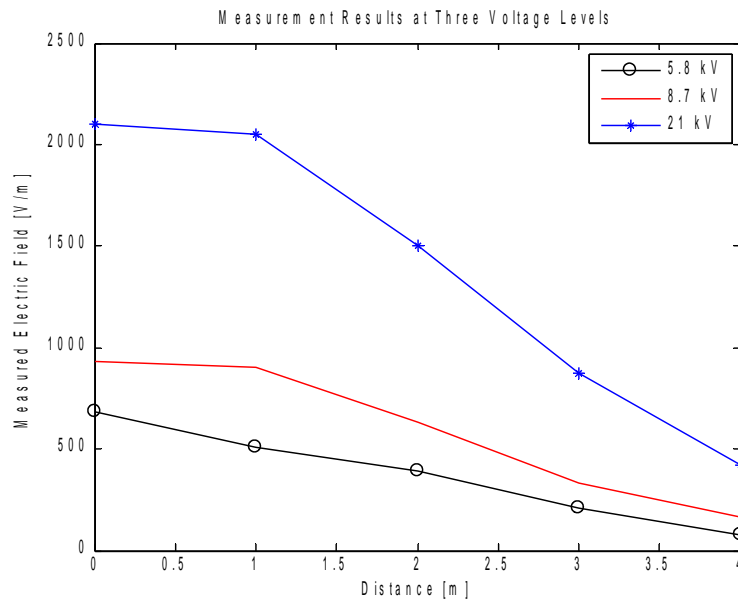


Fig. 3. Graphical illustrations of electric field measurements.

5. Determinations of Probabilistic Models at Different Voltage Levels

As an application part of this study, measured data is modeled using an exponential approach and after this modeling, each model can be represented by an exponential distribution functions under the different parameter values.

5.1 Mathematical Models

In this application, using an exponential curve fitting approach, the measurement results are presented exponential curves by Equations (7) and their graphical illustrations as shown in Figure 4. Calculated exponential models can be given as below:

$$\begin{aligned}
 \text{Model (1):} \quad & E_1(x) = 700 e^{-0.39x} \\
 \text{Model (2):} \quad & E_2(x) = 1050 e^{-0.28x} \\
 \text{Model (3):} \quad & E_3(x) = 2290 e^{-0.31x}
 \end{aligned} \tag{7}$$

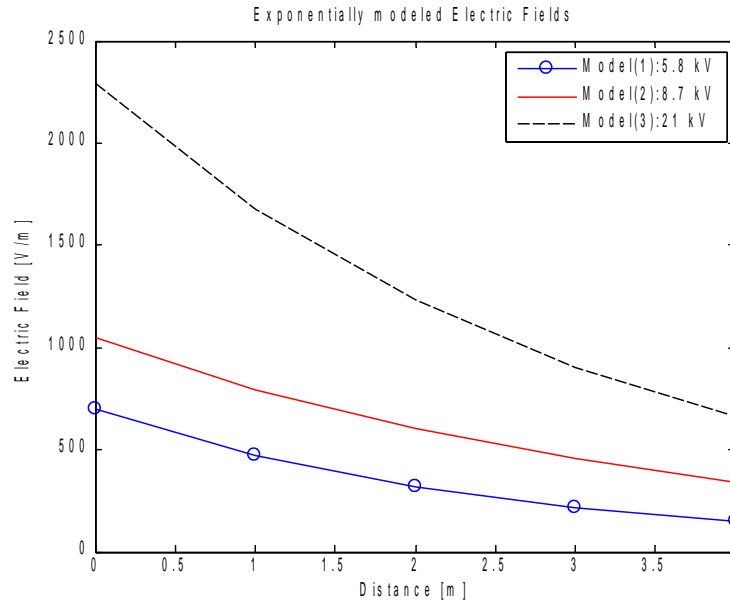


Fig. 4. Exponential models of the data at three different voltage levels.

Using these mathematical models, unmeasured electrical field values can be easily estimated.

5.2. Determination of probabilistic models and factors

In order to define the probabilistic models, the similarity between Equations (3) and (4) is used and then, the parameter A of the mathematical modeling can be defined as two multipliers for each model level m. Where A_m , k_m and α_m are the parameter A, multiplier k and attenuation parameter α for each model level m respectively.

$$A_m = k_m \alpha_m \quad m=1, 2, 3, \dots \tag{8}$$

As a result of this definition, the Equation (3) can be used to define the model based probability density function, which is indicated by p_m , as shown in Equation (9).

$$p(x) = \int_0^r \alpha_m e^{-\alpha_m x} dx = \frac{1}{k_m} \quad m=1, 2, 3, \dots \tag{9}$$

Therefore, the model based probability value p_m becomes as below and it is interpreted as a reciprocal of probability factor k_m as used in Equation (10).

$$p_m = \frac{1}{k_m} = \frac{\alpha_m}{A_m} \quad m=1, 2, 3, \dots \tag{10}$$

Hence, using the models described in Equation (7), the probability factors for three different cases can be calculated as shown in Table (2) by means of the Equation (10).

Table 2. Model parameters and probability factors

| Applied Voltages | Model Am[kV/m] | Parameters [kV/m] | Probability (Factor) 1/ km |
|------------------|----------------|-------------------|----------------------------|
| U1=5.8 kV | 700 | 0.39 | 0.000557 |
| U2=8.7 kV | 1050 | 0.28 | 0.000267 |
| U3=21 kV | 2090 | 0.31 | 0.000135 |

Also, the probability factors computed according to the different applied voltage levels are plotted as shown in Figure 5.

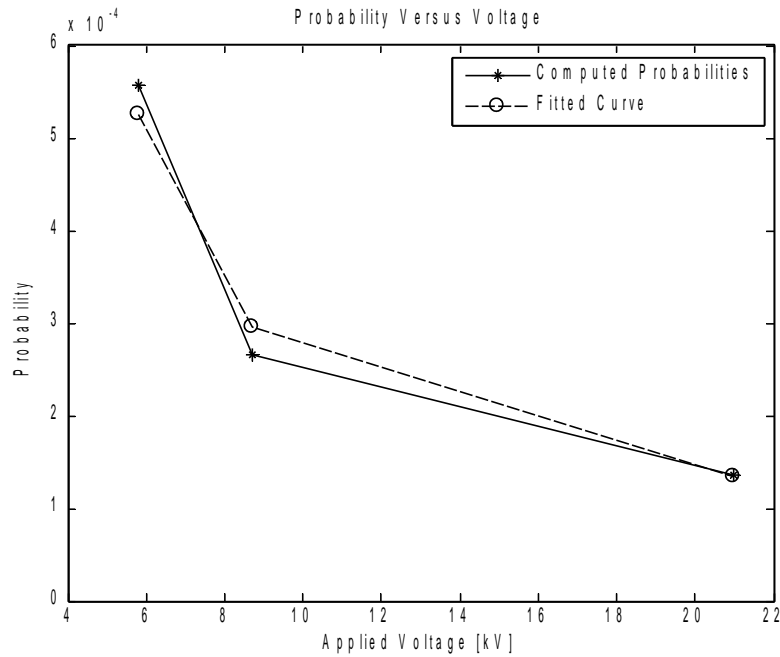


Fig. 5. Variation of probability factor versus to applied voltage

As seen in Figure 5, the probability values, which are defined for different applied voltage levels, show a decreasing variation. It looks like an exponential one under the curve fitting approach.

6. Conclusions and Discussions

In this study, the electric field measurements are realized under the HV transmission line simulated in laboratory environment. For this purpose, three different voltage levels are applied to the transmission line and related electrical fields are measured at different distances on the ground level. Hence Mathematical models are computed by using the exponential function approach and their model parameters are also used to define the probability density function of an exponential distribution. With this way, as seen in Figure 5, probability variation depending on the applied voltage levels are found and represented with an exponential function approach by the following equation.

$$p(U) \dagger 0.00013 \hat{G} 0.0023 e^{\#0.3U} \tag{11}$$

This new approach can be presented as a probabilistic model of the experimental study and, it is said that uncertainty over the electric field decreases with increasing voltage level since the probability is a measure of the uncertainty.

Acknowledgement

This study was realized during the working period of Mrs. Jelena Dikun between October 22 and November 22, 2012 at the Istanbul Technical University (ITU), Electrical Engineering Department. For this reason, authors present their special thanks to Prof. Dr. Ozcan Kalenderli, Assoc. Prof. Dr. Emel Onal and Prof. Dr. Serhat Seker because of their contributions to the experimental study at the High Voltage Laboratory of ITU, and to Assist Prof. Dr. T. Cetin Akinci for his contributions to collaboration among ITU, Kirklareli University and Klaipeda University. Also, Mrs Jelena Dikun presents thanks to Klaipeda University, Electrical Engineering Department, for financial support provided by projects JUREIVIS, VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-001, and “Lithuanian Maritime Sectors' Technologies and Environmental Research Development”, VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-019.

References

- [1] Razavipour SS, Jahangiri M, Sadeghipoor H. Electrical Field around the overhead Transmission Lines. World Academy of Science, Engineering and Technology 2012; 62:568 -571.
- [2] Onal E, Kalenderli O, Seker S. Multi-resolution wavelet analysis for chopped impulse voltage measurements and feature extraction. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2008;15(3):893-900.
- [3] Freeman EM., Lowther DA. A Novel Mapping Technique for Open Boundary Finite Element Solutions to Poisson's Equation. IEEE Transactions on Magnetics 1988;24(6):2934-2936.
- [4] Freeman EM, Lowther, D.A.: Further Aspects of the Kelvin Transformation Method for Dealing with Open Boundaries, IEEE Transactions on Magnetics 1992;28(2):1667-1670.
- [5] Electromagnetic fields measurement devices: <http://www.ar-europe.ie/ets-lindgren-field-probes.php>, Accessed on January 25, 2013.
- [6] William McNulty. Voltage Detection and Indication by Electric Field Measurement. HD Electric Company 2011.
- [7] WHO, (2007) Environmental health criteria. On line report Available at http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index. Accessed on April 15, 2011.
- [8] Safigianni AS, Spyridopoulos AI, Kanas VL. Electric and Magnetic Field Measurements in a High Voltage Center. Ann. Occup. Hygiene (British Occupational Hygiene Society) 2012;56(1):18–24.
- [9] Trakadas PT, Papakanellos PJ, Capsalis CN. Probabilistic Response of A Transmission Line in A Dissipative Medium Excited by An Oblique Plane Wave. Progress In Electromagnetics Research, PIER 2001;33:45–68.
- [10] Simpson TL, Brice CW. Moment Method Analysis of the Electric Field Under EHV Transmission Lines. IEEE Power Engineering Review 1987;1:1271-1275.
- [11] Silvester PP, Ferrari RL. Finite Elements for Electrical Engineers, Cambridge University Press, 2nd edition 1990.
- [12] Reitz JR, Milford FJ. Foundations of Electromagnetic Theory. Addison-Wesley 1960;1:56-76.
- [13] Electric Field of Line Charge, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/elelin.html#c1>, Accessed on January 25, 2013.
- [14] Borse GJ. Numerical Methods with MATLAB: A Resource for Scientists and Engineers. PWS Publishing Company-ITP 1997;1:316-338.
- [15] Milton JS, Arnold JC. Introduction to Probability and Statistics, 4th Edition. Mc-Graw Hill Comp. 2003;1:110-112.
- [16] AH. Ergonul, G. Kahraman. [Computation of loss of load probability using a Markov Chain with two-day memory. Energy Education Science and Technology Part A 2012;29\(2\):1115-1124.](#)
- [17] A. Unsal, A. Cepe. [Estimation of the probability of failures in a power distribution line by using regression analysis. Energy Education Science and Technology Part A 2012;29\(1\):41-50.](#)