



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Renardas Toliušis

**GEDIMO VIETOS KABELIUOSE NUSTATYMO METODŲ
EFEKTYVUMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas:

Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**GEDIMO VIETOS KABELIUOSE NUSTATYMO METODŲ
EFEKTYVUMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos sistemos (621H63005)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. dr. Saulius Gudžius

(data)

Projektą atliko

(parašas) Renardas Toliušis

(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Renardas Toliušis

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Gedimo vietos kabeliuose nustatymo metodų efektyvumo tiriamasis darbas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano Renardo Toliušio baigiamasis projektas tema „Gedimo vietos kabeliuose nustatymo metodų efektyvumo tiriamasis darbas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Renardas Toliušis. „Gedimo vietos kabeliuose nustatymo metodų efektyvumo tiriamasis darbas“. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Kaunas, 2018. 84 p.

Reikšminiai žodžiai: VSC, Aukštos įtampos nuolatinės srovės, gedimo vietos nustatymo metodai ir jų tikslumai, kabelis.

SANTRAUKA

Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą nustatyta, kad elektros energijos perdavimui dideliais atstumais vis labiau populiarėja VSC tipo aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliai, kurie tarpusavyje būna sujungti kabeliais.

Nuo 2016 m pradžios buvo pradėta eksploatuoti aukštos įtampos nuolatinės srovės jungtis „NordBalt“. Aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklio kabelio jungtis yra vienintelė Pabaltyje, turinti 450 km ilgio kabelio jungtį su Švedija.

Šiame tyrime supažindinama su gedimų formomis, gedimo priežastimis, gedimo atpažinimo būdais. Pasitelkiant gedimo vietų nustatymų metodus (angl. *TDR*, *ICE*, *Murrey bridge*; *Acoustic fault location*, *TW*) ir įrangą, nustatomi privalumai, trūkumai, galimybės, patikimumas ir tikslumas, atliekant kabelio gedimo vietos nustatymus „NordBalt“ jungtyje.

Uždaviniai – praktiniu būdu atlikti „NordBalt“ kabelio gedimo vietos nustatymą, pateikti prietaisų bei metodų tikslumo palyginimą, išanalizuoti mokslinius straipsnius ir pateikti kabelio gedimo vietos nustatymo būdą, panaudojant keitiklių sistemos įvykių registratoriaus *TFR* (angl. *TFR - trace fault recorder*) duomenis. Pateikiamos rekomendacijos, techniniai sprendimai ir alternatyvūs gedimo vietos nustatymo būdai.

Renardas Toliušis. Research work on the efficiency of cable fault determination methods: Master's thesis in title qualification degree / supervisor assoc. Ph.D. Alfonsas Morkvėnas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of power systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences
Kaunas, 2018. 84 p.

Key words: VSC, High Voltage Direct Current, Failure Location Methods and Accuracy, Cable.

SUMMARY

After an overview of the literature, it was found that VSC type HVDC converters are interconnected by the cables and are increasingly popular over long distances. Since the beginning of 2016, high voltage direct current connections "NordBalt" have been put into operation. The high-voltage DC converter cable connection is the only one in the Baltics with such long 450 km cable connection to Sweden.

This research introduces various fault forms, causes of failure as well, using the methods (*TDR*, *ICE*, Murrey bridge, Acoustic fault location, *TW*) for determining the failure locations and fault finding equipment, the advantages, disadvantages, possibilities, reliability and accuracy of the cable failure location in the NordBalt connection are determined.

The tasks are to perform a NordBalt cable fault location in practice, provide a comparison of the accuracy of used devices and methods, analyze the scientific articles and provide a method for determining the cable failure location using trace fault recorder data. Recommendations, technical solutions and alternative fault location methods are suggested.

Turinys

1. Įvadas.....	11
2. Kabelių eksploatacijos problematika.....	12
3. PE, PVC ir XLPE kabelių izoliacija ir struktūra.....	13
3.1 XLPE Kabelių sluoksniai ir skerspjūviai.....	14
3.2 Nedegių kabelių klasifikacija.....	17
3.3 Kabelių sluoksnių paskirtis.....	19
3.3.1 Kabelio laidininkas.....	19
3.3.2 Kabelio puslaidininkis.....	22
3.3.3 XLPE izoliacija.....	22
3.3.4 Vandens barjeras.....	23
3.3.5 Kabelio ekranas.....	24
3.3.6 Kabelio apvalkalas ir armavimas.....	25
3.3.7 Papildomi priedai.....	26
3.4 Pagrindiniai kabelių parametrai.....	27
3.5 XLPE kabeliams keliami reikalavimai.....	31
4. Galios kabelių gedimo tipai ir priežastys.....	32
4.1 Kabelių gedimai.....	32
4.2 Kabelių gedimo tipai.....	33
4.3 Kabelių gedimo priežastys, atpažinimo būdai, išvengimo rekomendacijos.....	35
5 Metodinė dalis.....	42
5.1 Tyrimo objektas.....	43
5.2 Panaudota gedimo vietos nustatymo įranga.....	44
5.2.1 Rekomenduotini žingsniai gedimo vietos paieškai.....	54
5.2.2 Gedimo vietos nustatymas panaudojant prietaisus.....	56
5.3 MACH2 sistemos registratoriaus duomenys ir gedimo vietos nustatymas.....	74
6. Išvados.....	86
7. Literatūra ir šaltiniai.....	89

Iliustracijų sąrašas

1 pav. Viengyslio kabelio skerspjūvis	14
2 pav. Viengyslio armuoto XLPE kabelio be vidiniu metaliniu apvalkalu skerspjūvis	15
3 pav. Viengyslio armuoto XLPE kabelio su vidinio metalinio apvalkalo skerspjūvis	15
4 pav. Trigyslio XLPE kabelio su plokščio tipo šarvu skerspjūvis	16
5 pav. Trigyslio XLPE kabelio su apvalaus metalinio tipo šarvu skerspjūvis	16
6 pav. Laidininkų tipai	19
7 pav. Laidininko S ir Z vyniojimas	20
8 pav. Tuščiaviduris laidininkas	20
9 pav. „Milliken“ tipo laidininkas	21
10 pav. „Eastlink“ projekto HVDC kabelis su ekstruzine izoliacija	22
11 pav. Išbrinkstantys siūlai ir juostos.	23
12 pav. „NordBalt“ kabelio išpjova palikta drėgmėje	24
13 pav. Kabelio ekranas	25
14 pav. Kabelio apvalkalas ir armavimas	25
15 pav. DTS principinė schema	26
16 pav. Kabelio ekranas įžemintas abiejuose galuose	29
17 pav. Atviros grandinės gedimo tipas	33
18 pav. Šuntinis gedimo tipas	33
19 pav. Apvalkalo pažeidimas	34
20 pav. <i>TDR</i> galimos kreivės skirtingais atvejais	39
21 pav. Tiltelio metodas (angl. <i>Morrey loop bridge</i>)	41
22 pav. „NordBalt“ kabelio iliustracija iš duomenų lapo	43
23 pav. „ <i>Teleflex VX</i> “ prietaisas	45
24 pav. LDE 800 prietaisas	46
25 pav. LDE800 prijungimo principinė schema	47
26 pav. SWG 1750 C/CD prietaisas	48
27 pav. SWG 1750 Principinė prijungimo schema	49
28 pav. <i>HVB10</i> prietaisas	50
29 pav. HVB principinės prijungimo schemas, nustatant gedimą laidininke	52
30 pav. HVB principinės prijungimo schemas, nustatant gedimą apvalkale	52
31 pav. „digiPhone“ prietaisas	53
32 pav. Rekomenduojami žingsniai kabelio gedimo vietos nustatymo atveju	56

33 pav. <i>TDR</i> impulso kreivių palyginimas	57
34 pav. „Tiltelio metodo“ gedimo nustatymas 2016-03-23	60
35 pav. <i>TDR</i> gedimo nustatymo 2016-03-23 kreivė 1	62
36 pav. <i>TDR</i> gedimo nustatymo 2016-03-23 kreivė 2	62
37 pav. <i>TDR</i> gedimo nustatymo 2016-03-23 kreivė 3	63
38 pav. <i>TDR</i> gedimo nustatymo 2016-03-23 kreivė 4	64
39 pav. Izoliacijos matuoklio parodymai	65
40 pav. <i>TDR</i> gedimo nustatymo 2016-03-24 kreivė 1	66
41 pav. <i>Tiltelio metodu</i> gedimo nustatymas ant atidalinto kabelio	66
42 pav. <i>TDR</i> gedimo nustatymo 2016-03-25 kreivė 1	69
43 pav. Digiphone prietaiso parodymai	70
44 pav. <i>digiphone</i> parodymų aiškinamoji schema	70
45 pav. „NordBalt“ registratoriaus informacija iš comtrade failo	74
46 pav. Gedimo bangos sklidimo schema	75
47 pav. <i>TFR</i> (angl. Trace fault recorder) gedimo kreivės 2016 balandžio 14 dienos	77
48 pav. <i>TFR</i> (angl. Trace fault recorder) gedimo kreivės 2016 balandžio 21 dienos	78
49 pav. <i>TFR</i> (angl. Trace fault recorder) gedimo kreivės 2016 gruodžio 04 dienos	79
50 pav. <i>TFR</i> (angl. Trace fault recorder) gedimo kreivės 2017 vasario 13 dienos	80
51 pav. <i>TFR</i> (angl. Trace fault recorder) gedimo kreivės 2017 liepos mėn. 2 dienos	81
52 pav. <i>TFR</i> (angl. Trace fault recorder) 2017 liepos mėn. 31 dienos gedimo kreivės	82

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Nedegių kabelių klasifikacija	17
2 lentelė. Papildomi nedegių kabelių žymėjimai	18
3 lentelė. XLPE Kabeliams keliami reikalavimai vadovaujantis IEC Standartais	31
4 lentelė. <i>TDR</i> matavimo privalumai ir trūkumai	40
5 lentelė 2. <i>Teleflex VX</i> charakteristikos	45
6 lentelė. <i>LDE 800</i> techninės specifikacijos	47
7 lentelė. <i>SWG1750</i> techninės specifikacijos	49
8 lentelė. <i>HVB10</i> techniniai parametrai	51
9 lentelė. <i>digiPhone</i> techniniai duomenys:	54
10 lentelė. <i>TDR</i> prietaiso nustatymai	58

11 lentelė. Tiltelio metodo matavimo rezultatai 1 sujungimo būdu	61
12 lentelė. Tiltelio metodo matavimo rezultatai 2 sujungimo būdu	61
13 lentelė. 1 Tiltelio būdu pamatuoti ir perskaičiuoti rezultatai	67
14 lentelė. 2 Tiltelio būdu pamatuoti ir perskaičiuoti rezultatai	68
15 lentelė. 1 Tiltelio būdu pamatuoti ir perskaičiuoti rezultatai	72
16 lentelė. 2 Tiltelio būdu pamatuoti ir perskaičiuoti rezultatai	73
17 lentelė. Keitiklio registratoriaus sistemos techniniai parametrai	74
18 lentelė. <i>TFR</i> duomenys ir gedimo atstumo išskaičiavimai:	82
19 lentelė. Gedimo vietos paklaidos	82
20 lentelė. Siūlomo gedimo vietos nustatymo metodo skaičiavimo rezultatai	84
21 lentelė. Siūlomo gedimo vietos nustatymo metodo paklaidos	84

Trumpiniai

AĮKS – Aukšta įtampa kintama srovė;

AĮNS – Aukšta įtampa nuolatinė srovė;

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

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

XLPE – Angliškas terminas *cross linked polyethylene*. Lietuviškas terminas – vulkanizuotas polietilenas;

TDR - Angliškas terminas *Timed domain reflectometer*. Lietuviškas terminas – reflektrometras;

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

KS – Kintama srovė;

NS – Nuolatinė srovė;

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

ICE – Angliškas terminas *Impulse current envelope*. Lietuviškas terminas – impulsinės srovės būdas.

TW – Angliškas terminas *Traveling Wave*. Lietuviškas terminas – bangos sklidimas.

KL – Kabelio linija;

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

TFR – Angliškas terminas *Trace Fault Recorder*. Lietuviškas terminas – gedimų registratorius;

IEC - Angliškas terminas *International Electrotechnical Commission*. Lietuviškas terminas – Tarptautinė elektrotechnikos komisija;

CELENEC – Prancūziškas terminas *Comité Européen de Normalisation Électrotechnique*.

Lietuviškas terminas – Europos elektrotechnikos standartizacijos komitetas (EESK);

PE – Polietilenas;

PVC – Polivinilchloridas;

EPR – Etileno propilenas;

EVA – Etileno-vinilacetatas;

1. Įvadas

Elektros tinklai nuolat plečiasi, o jų patikimumas tampa vis svarbesnis nei bet kada. Plečiantis elektros tinklui dėl keliamų reikalavimų būtina atsižvelgti į aplinkos reikalavimus atliekant projektavimą, kuriuos reglamentuoja Europos sąjungos bei Lietuvos įstatymai, daugėja ir kabelinių linijų. Daugėjant kabelinių linijų kiekiui, įvykus gedimams kabelio linijose, būtina greitai ir tiksliai lokalizuoti gedimo vietą ir pašalinti gedimą dėl energijos tiekimo vartotojams, sistemos patikimumo, nuostolių sumažinimo.

Net labai gerai suprojektuotose sistemose gali būti nenuspėjami elektros energijos perdavimo įvykiai, kurie viršija suprojektuotas ribas. Tokio įvykio atveju apsaugos ir kontrolės turi užtikrinti sklandų sistemos darbą ir jei įmanoma, atstatyti ją į darbinę būseną per mažiausią laiką. Dažniausiai neišvengiamai atsiranda sistemos gedimų, dėl kurių sistemos neįmanoma pataisyti (atstatyti). Taigi, greitas linijos remontas ir jos atstatymas yra gyvybiškai svarbus sistemos operatoriams. Tačiau dauguma kabelinių linijų yra ilgos ir neišvengiamai kerta įvairų reljefą, dėl tos priežasties linijos fiziniam patikrinimui reikia daug laiko. Nepalankios oro sąlygos tokiems patikrinimams taip pat turi didelės įtakos.

Kabelinių linijų gedimo vietų nustatymo metodai rodo, kad tikslūs ir greiti metodai yra labai svarbūs ir praktiški inžineriniu atžvilgiu. Greita ir tiksli elektros linijų gedimų vietos lokalizacija paspartina sistemos atkūrimą, sumažinti prastovų laiką ir pagerina sistemos našumą bei patikimumą.

Kaip žinoma, didelius iššūkius sukėlė „NordBalt“ aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklio kabelio jungtis, kuri yra vienintelė NS keitiklio jungtis Lietuvoje, turinti 450 km nuolatinės srovės kabelio jungtį su Švedija. Vienas iš iššūkių yra tiksli ir greita gedimo vietos lokalizacija, nes nėra stacionarios gedimo vietos nustatymo įrangos.

Tyrimo tikslas: iširti „NordBalt“ kabelio jungties gedimo vietos nustatymo metodų galimybes ir tikslumus.

Tyrimo uždaviniai:

1. Išanalizuoti „NordBalt“ aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklio kabelio jungtį.
2. Išanalizuoti gautus duomenis bei „Mach2“ sistemos gedimo registratoriaus *TFR* (angl. *trace fault recorder*) duomenimis.
3. Pateikti pasiūlymą gedimo vietos nustatymo išskaičiavimui pagal *TFR* kreives.
4. Išanalizuoti nestacionarius kabelio gedimo vietos nustatymo metodus.
5. Atlikti praktinius gedimo vietos nustatymus, nustatant gedimus „NordBalt“ KL. Išanalizavus duomenis, nustatyti privalumus ir trūkumus. Palyginti galimybes ir tikslumą.
6. Pateikti rekomendacijas ir galimus techninius sprendimus pirminės kabelio gedimo vietos lokalizacijai.

2. Kabelių eksploatacijos problematika

Kabeliai gali sugesti dėl elektrinių, mechaninių ar šiluminių veiksnių ar jų kombinacijų. Tuo atveju, jei kabeliai, jungtys, movos teisingai sumontuotos ir nėra mechaninio poveikio, drėgmei ar ekstremalių temperatūrų svyravimų, tai yra numatomas ilgas tarnavimo laikas. Visgi, kad ir gerai kabeliai sumontuoti ir apsaugoti nuo išorinių poveikių, kabeliuose vyksta senėjimas, kuris pasireiškia kabelių izoliacijos senėjimu ir geba atlaikyti elektrinį krūvį. Gedimai, kurie įvyksta atsitiktinai, paprastai turi įtakos tik mažai tam tikro kabelio atkarpai, kuri yra pakeičiama nauju kabelio intarpu su dvejomis movomis.

Įvada į kanalus, takus, požeminius kanalus ir kabelių dėklus daro poveikį eksploataavimo sąlygoms, kuriomis kabeliai turi veikti. Vamzdynuose ir kabelių loveliuose, kabeliai gali pasižeisti ar paveikti kitus kabelius mechaniniu judesiu dėl grunto judėjimo ar pačio kabelio judėjimo, kuris vyksta dėl temperatūrinių skirtumų arba kabelio šilimo.

Užpildytų kabelių loviai, uždari kanalai arba užpildyti kabelių vamzdynai esantys kartu su kitais elektros kabeliais, turinčiais nuolatinę apkrovą lemia didesnes darbinės temperatūras. Aukštoje temperatūroje įvairūs polimerai, naudojami kabelių izoliacijoje, bus sugriauti, todėl gali atsirasti kabelio izoliacijos pailgėjimai, trapumas ir galiausiai atsirasti izoliacijos sutrūkinėjimas, kas lems kabelio gedimą.

Drėgmė neigiamai veikia kabelių ilgaamžiškumą, kurie yra sumontuoti žemėje žemiau jūros ar vandens lygio arba vamzdžius, į kuriuos gali prasiskverbti vanduo. Kabeliai veikiami vandens kol yra po įtampa, yra paveikiami taip vadinamam - vandens medžio senėjimo procesui, kuriuo metu dėl elektrocheminių reakcijų izoliacijoje atsiranda mikro-įtrūkimai. Drėgmė taip pat gali sukelti įvairių metalinių kabelio ar jos sistemos komponentų, tokių kaip metaliniai ekranai ar laidininkai, įžeminimo sistema, apvalkalo transpozicijos sistemos, koroziją.

Apskritai, izoliacinės medžiagos senėjimo pablogėjimas kelia didžiausią susirūpinimą dėl aukštos ir vidutinės įtampos kabelių.

Kiti sistemos komponentai taip pat gali būti paveikti senėjimo dėl įvairių faktorių; tačiau jų degradacijos greitis paprastai yra mažas. Tinkamai suprojektuotos, sumontuotos ir sukalibruotos apsauginės relės, turi nedelsiant užkirsti kelią tolimesniam kabelio gedimui ir taip apriboti gedimo poveikį kabeliui ar sistemai.

3. PE, PVC ir XLPE kabelių izoliacija ir struktūra

Plastikiniai arba polimerai, naudojami kabelių izoliacijai, yra termoplastiniai arba termoreaktyvūs.

Termoplastinė medžiaga yra suminkštinama kaitinant ir gali būti formuojama, o formą išlieka atvėsinus. Svarbi termoplastinės medžiagos savybė yra tai, kad šis procesas gali būti pakartotas, kai medžiaga pakartotinai suminkštinama kaitinant ir suformuojama (išlenkiama), jei reikia. Šios termoplastinės medžiagos gali būti perdirbamos ir pakartotinai panaudojamos.

Termoreaktyvios medžiagos taip pat gali būti suminkštinamos kaitinant ir suformuojamos, o tada atvėsintos, kad būtų išlaikyta nauja forma, tačiau skirtingai nuo termoplastinės medžiagos, tai galima padaryti tik vieną kartą. Taip yra dėl cheminės reakcijos, vykusios polimerizacijos metu.

Termoplastinių tipų pavyzdžiai yra PVC (polivinilchloridas) ir PE (polietilenas).

Termoreaktyvių tipų pavyzdžiai yra gumos izoliacijos, tokios kaip silikoninės gumos ir EVA (etileno-vinilacetatas).

PE ir PVC taip pat gali būti kryžminiai, todėl jie yra termoreaktyvūs. PVC ir XLPE medžiagos, kurios buvo sujungtos taip, turi didesnę atsparumą temperatūrai, geresnes dielektrines savybes ir atsparumą tam tikroms cheminėms medžiagoms.

XLPE arba kitaip vadinamas kryžminis polietilenas yra termoreaktyvi izoliacinė (angl. thermoset insulation) medžiaga.

Polimerų sukryžminimas (angl. Crosslinking polymers) - tai procesas, kuris pakeičia polimerų grandinių molekulinę struktūrą taip, kad jos yra labiau tarpusavyje sujungtos, o ši kryžminė jungtis atliekama cheminėmis ar fizinėmis priemonėmis. Cheminiu susiejimu pridedama cheminių medžiagų arba aktyvatorių (tokių kaip silanas arba peroksidas, gamybai, siekiant kad susidarytų laisvųjų radikalų, kurie sudaro kryžminį susiejimą.

Polietileno (PE) medžiaga turi puikias dielektrines savybes ir mažą sklaidos koeficientą visuose dažniuose, todėl jis yra idealus izoliatorius, tačiau jo atsparumas temperatūrai yra ribotas (80-110°C.) Kryžminis PE susiejimas su XLPE padidina izoliacijos temperatūros ribas, išlaikant elektrines savybes.

XLPE tinka įtampoms nuo žemos iki itin aukštos įtampos, aplenkiant kitas izoliacines medžiagas, tokias kaip PVC, etileno propileno gumos (EPR) ir silikoninį kaučiuką. Kryžminis polietileno sujungimas taip pat padidina atsparumą chemikalams ir tepalams aukštesnėje temperatūroje, tai leidžia XLPE izoliacija naudoti kaip žemo dūmingumo be halogenine (angl. "Low-Smoke Zero Halogen") medžiaga, kas yra labai aktualu šiuo metu.

XLPE mechaninės savybės yra pranašesnės už daugelį kitų izoliacinių medžiagų, kurios suteikia didesnę atsparumą tempimui, pailgėjimą ir atsparumą smūgiams. XLPE izoliacija neištirpsta net ir kai kurių metalų lydymosi temperatūroje (<300C°), ji padidina atsparumą srautui ir pagerina senėjimo savybes. Geresnis atsparumas vandens įgėrimo kokybei - tai dar viena XLPE izoliacijos teigiama nauda, lyginant su PE izoliacija. Vandens medžių augimas izoliacijoje yra defektas - prastos izoliacijos rezultatas, kai iškrovos linijos atsiranda ir auga elektros lauko kryptimi ir didėja dėl elektros krūvio.

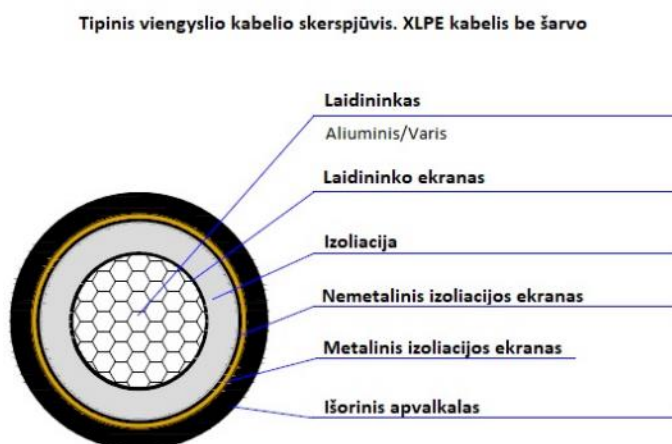
3.1 XLPE Kabelių sluoksniai ir skerspjūviai

NordBalt kabelio pagrindinė izoliacija yra XLPE, tai šiame darbe bus labiau akcentuojami kabeliai su XPLE izoliacija, pateikiami kabelių skerspjūviai.

Šios izoliacijos medžiaga yra mažo tankio polietilenas LDPE (angl. *low density polyethylene*) kurio, kaip aukščiau buvo paminėta, molekulinėje struktūroje papildomai sukuriama kryžminiai ryšiai. Galutinė medžiaga žymima XLPE arba PEX.

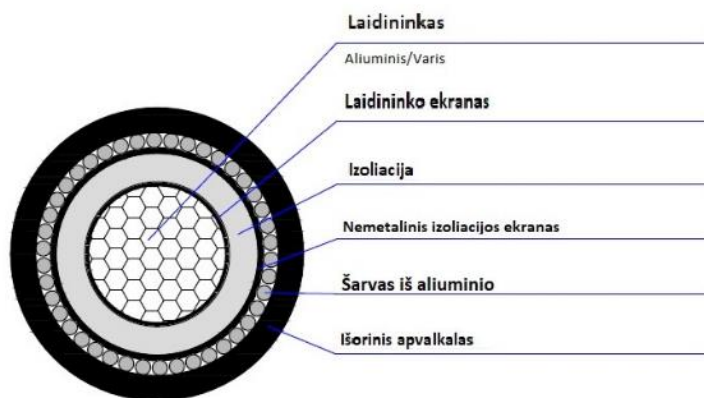
Laidininkas kartu su izoliacijos ekranais yra užliejamas XLPE izoliacijos sluoksniu. Izoliacijos sluoksnis yra užliejamas kartu su laidininko ir izoliacijos ekranais, kaip, kad minėta anksčiau – vykdomas trigubos ekstruzijos procesas. Ekstruderio antgalyje palaikoma aukšta temperatūra ir slėgis, tam kad liejimo metu nesusidarytų burbulų, nes vulkanizacijos metu išsiskiria didelis dujų kiekis, kuris gali suformuoti dujų ertmes. Kabelį atvėsinant, pašalinės reakcijos dujos pasišalina. Vienam milimetrui izoliacijos natūraliam degazavimui reikalinga viena para.

Žemiau pateikiami standartiniai XPLE kabelių skerspjūviai:



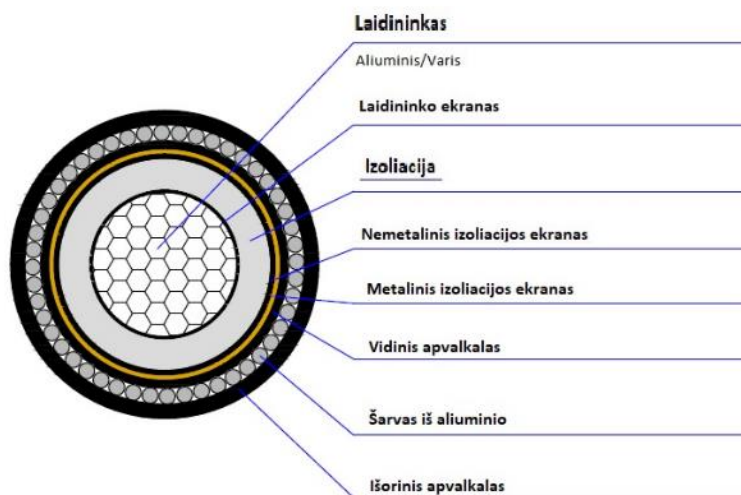
1 pav. Viengyslio kabelio skerspjūvis

Tipinis viengyslio armuoto XLPE kabelio be vidinio metalinio apvalkalo skerspjūvis



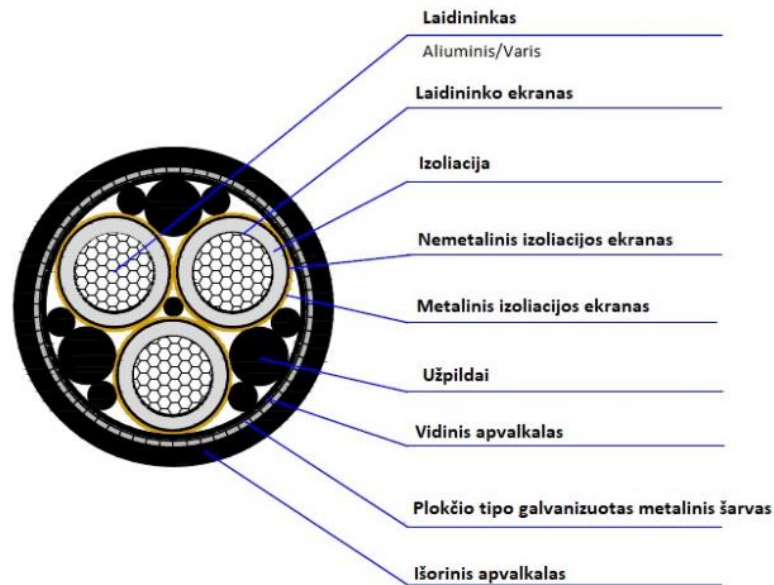
2 pav. Viengyslio armuoto XLPE kabelio be vidinio metalinio apvalkalo skerspjūvis

Tipinis viengyslio armuoto XLPE kabelio su vidiniu metaliniu apvalkalu skerspjūvis



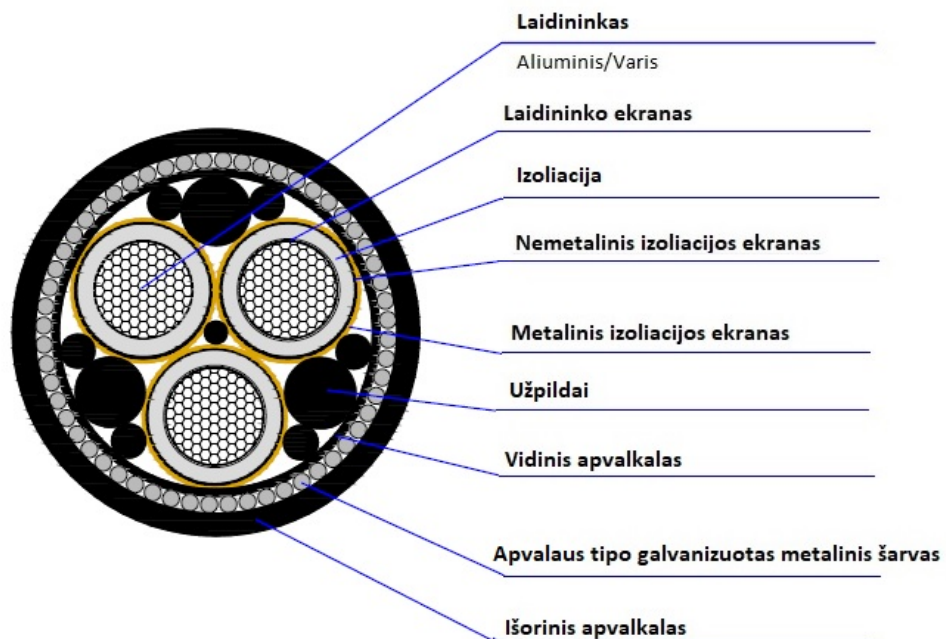
3 pav. Viengyslio armuoto XLPE kabelio su vidiniu metaliniu apvalkalu skerspjūvis

Tipinis trigyslio XLPE kabelio su su metaliniu plokščio tipo šarvu



4 pav. Trigyslio XLPE kabelio su plokščio tipo šarvu skerspjūvis

Tipinis trigyslio XLPE kabelio su apvalaus metalinio tipo šarvu



5 pav. Trigyslio XLPE kabelio su apvalaus metalinio tipo šarvu skerspjūvis

3.2 Nedegių kabelių klasifikacija

2011 m. Europos Sąjunga pradėjo darbus, skirtus nustatyti priešgaisrinės saugos kriterijus ir klasifikuoti statybos sektoriuje naudojamus produktus. Buvo parengta statybos produktų direktyva, kuria vadovaujantis 2016 metų birželio mėnesį buvo parengtas naujas standartas hEN50575 „Galios, valdymo ir ryšių kabeliai“, kuriam buvo suteiktas 1 metų pereinamasis laikotarpis ir visiškas standarto įsigaliojimas 2017 metų liepos mėnesį. Standartas reglamentuoja bendrosios paskirties kabelių, naudojamų statybose, priešgaisrinę klasę.

Standartizuojami šie kabeliai:

- Maitinimo kabeliai ir linijos - izoliuoti laidininkai ir kabeliai, skirti naudoti, pvz., elektros tiekimas;
- Valdymo ir ryšių laidai. Laidai, audio - video kabeliai ir televizijos kabeliai, su metaliniais laidininkais, naudojami, pvz., Kaip telekomunikacijos, duomenų perdavimo, radijo dažnių ir vaizdo ryšio bei signalizavimo ir valdymo įrenginių instaliacijoje;
- Skaidulinis optinis kabelis - naudojamas, pvz., telekomunikacijos, duomenų perdavimo, radijo dažnių ir vaizdo ryšio bei signalizavimo ir valdymo įrenginių instaliacijoje.

1 Lentelė. Nedegių kabelių klasifikacija

Europos standartas	Testavimo metodas	Klasifikacijos kriterijus	Papildomi kriterijai
A	EN ISO 1716 Bendrasis koloringumo potencialas	$PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}$	
B1	EN 50399 (30 kW)	$FS \leq 1.75 \text{ m}$	Dūmų, degių lašelių / dalelių ir rūgščių išsiskyrimas
	Gaisro plitimas	$THR_{1200S} \leq 10 \text{ MJ}$ $HRR = 20 \text{ kW}$ $FIGRA = 120 \text{ W s}^{-1}$	
B2	EN 60332-1-2	$H = 425 \text{ mm}$	Dūmų, degių lašelių / dalelių ir rūgščių išsiskyrimas
	EN 50399 (20.5 kW)	$FS \leq 1.5 \text{ m}$ $THR_{1200S} \leq 15 \text{ MJ}$ $HRR = 30 \text{ kW}$ $FIGRA = 150 \text{ W s}^{-1}$	
C	EN 60332-1-2 Gaisro plitimas	$H = 425 \text{ mm}$	Dūmų, degių lašelių / dalelių ir rūgščių išsiskyrimas
	EN 50399 (20.5 kW)	$FS \leq 2.5 \text{ m}$ $THR_{1200S} \leq 30 \text{ MJ}$ $HRR = 60 \text{ kW}$ $FIGRA = 300 \text{ W s}^{-1}$	
D	EN 50399 (20.5 kW)	$THR_{1200S} \leq 70 \text{ MJ}$ $HRR = 400 \text{ kW}$ $FIGRA = 1300 \text{ W s}^{-1}$	Dūmų, degių lašelių / dalelių ir rūgščių išsiskyrimas
	EN 60332-1-2	$H = 425 \text{ mm}$	
E	EN 60332-1-2	$H = 425 \text{ mm}$	

F	neatitinkantys klasės reikalavimų E	
---	-------------------------------------	--

Priešgaisrinės klasės kabelių žymėjimas pagal hEN 50575 standartines gaires. FIGRA - ugnies greitis, apibrėžiamas kaip HRR_{sm30} (be uždegimo šaltinio poveikio) ir laiko santykis. Ribinės vertės yra tokios: $HRR_{sm30} = 3 \text{ kW}$ ir $THR = 0,4 \text{ MJ}$. THR - bendras šilumos išsiskyrimas (HRR_{sm30}) tarp bandymo pradžios ir pabaigos (išskyrus poveikį uždegimo šaltiniui). HRR - šilumos išsiskyrimo greitis, įvertintas 30 sekundžių slenkamuoju vidurkiu. FS - liepsnos plitimas (žalos diapazonas).

Šiuo metu atsparumas kai kurioms medžiagos savybėms ar reiškiniams yra pažymėtas simboliiais ryšio ir telekomunikacijų kabeliuose - LSOH, LSZH, LSHF, FRNC-C, LSFR-FR ar kt. Taikomi anglų kalbos ženklai pateikti 2 lentelėje.

2 Lentelė. Papildomi nedegių kabelių žymėjimai

Žymėjimas	Reikšmė
LSZH	Mažo dūmingumo, nulinis halogeniškumas
LSF	Mažo dūmingumo, garų
LSOH	Mažo dūmingumo, 0 halogenų
LSHF	Mažo dūmingumo, be halogenų
LSNH	Mažo dūmingumo, nėra halogenų
NHFR	Nėra halogenų, ugniai atsparus
HFFR	Be halogenų, ugniai atsparus
FRNC	Ugniai atsparus, atsparus korozijai
LS	Mažo ar ribojantis dūmingumas
ST	Ribojamas dūmingumas
LSFR-FR	Atsparus ugniai, mažo dūmingumo
RE	Mažos emisijos
LC	Atsparus korozijai
LH	Su mažu kiekiu halogenų

Standartas pakeitė ankstesnės, aukščiau paminėtas, kabelių ir laidų atsparumo ugniai klases A1, A2, B1, B2 ir B3 į naujas septynias klases Aca, B1ca, B2ca, Cca, Dca, Eca ir Fca, todėl galios kabeliai, ryšių ir valdymo kabeliai, skirti įrengimui pastatuose, yra išbandomi dėl liepsnos plitimo, dūmų susidarymo, rūgštingumo, šilumos išsiskyrimo ir izoliacijos lašėjimo (deginant izoliacija plastmasės lašai negali leisti gaisrui plisti) ir atitinkamai klasifikuojami.

Visi kabelių ar laidų gamintojai privalo atlikti nepriklausomų akredituotų tyrimų laboratorijų bandymus, kad gautų atitinkamus sertifikatus, patvirtinančius atsparumo ugniai klasę. Tokie sertifikatai yra pagrindas išduoti veiklos deklaraciją. Gamintojai privalo, atlikus bandymus, išduoti CE ir eksploatacinių savybių deklaraciją.

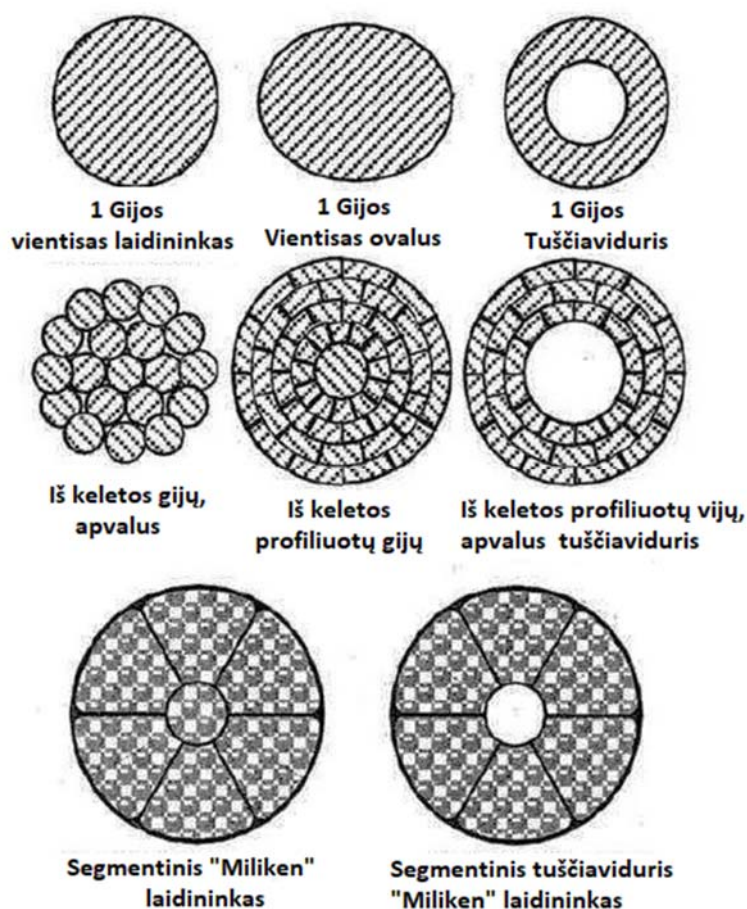
3.3 Kabelių sluoksnių paskirtis

3.3.1 Kabelio laidininkas

HVDC kabelio gysla arba, kitaip tariant, laidininkai yra gaminami iš aliuminio ar varinių vielų. Kaip yra žinoma, vario savitoji varža, palyginus su aliuminio, yra mažesnė esant tam pačiam skerspjūviui. Kabelio didžiąją kainos dalį lemia laidininko medžiagos parinkimas, todėl projektavimo metu yra apskaičiuojama kabelio savikaina, nes vario ir aliuminio kainos kinta, ir tik tuomet pasirenkama, iš ko bus gaminamas kabelio laidininkas,

Investicijos metu labiau atsižvelgiama į investicijos kainą nei į tolimesnius eksploatacinius kaštus, tai dažnai lemia skirtingo kabelio tipo pasirinkimą atliekant montavimus tame pačiame objekte ar toje pačioje linijoje.

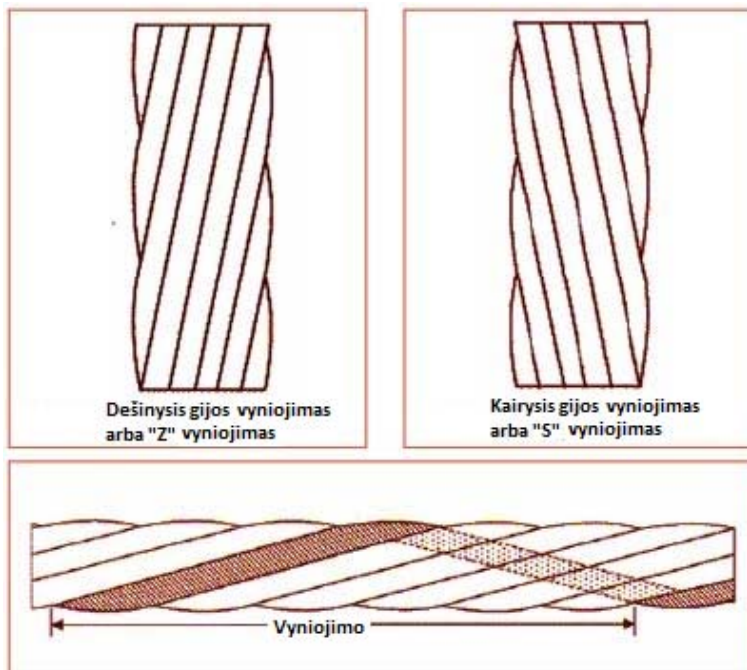
Kaip matoma iš paveikslėlio žemiau, tai laidininkų tipų gali būti įvairių ir jie priklauso nuo to, kur bus montuojamas kabelis ir kokios atsparumo jėgos reikalingos atliekant lenkimą.



6 pav. Laidininkų tipai

Apvalūs vientisi laidininkai naudojami retai dėl jų prastos gebos lenkimui bei riboto skerspjūvio ploto (iki 400 mm²). Tokie kabeliai dažniausiai naudojami HVDC objektuose, kurių įtampa neviršija 150 kV. Žemesnėse įtampose naudojami trejos ar ketverios gyslos viename kabelyje (žr. 5 pav.).

Dažniausiai laidininkai sudaryti ir keletos gijų (apvalių ar profiliuotų), kurių kiekis priklauso nuo laidininko skerspjūvio. Pats laidininkas yra formuojamas susukant vario ar aliuminio gijas S arba Z sukimo būdu bei naudojant šaltąjį valcavimą. Tokiu būdu gaunamas laidininko tūris užpildomas 92 procentais.



7 pav. Laidininko S ir Z vyniojimas. [6]

Tokiu vyniojimo būdu laidininkas įgyja didelį atsparumą lenkimams. Laidininkai standartizuojami, laikantis IEC 60228 standarto.

Kabėliai su tuščia ertme priskiriami alyviniams kabeliams. Tuščiaaviduriai laidininkai dažniausiai buvo naudojami alyviniuose kabeliuose, nes, tekant alyvai ertme, kabelis yra aušinamas.



8 pav. Tuščiaaviduris laidininkas.

„Milliken“ tipo kabelio privalumas – galimybė sumažinti „paviršinės srovės efektą“ (angl. *skin effect*), kuris dažnai pastebimas didelio skersmens laidininkuose. Elektros srovės srautai bus labiau sutelkti laidininko plote, išilgai perimetro, o tai sumažina gysloje tekančios paviršinės srovės dydį.



9 pav. „Milliken“ tipo laidininkas

Kiekviena kabelio gysla yra izoliuojama popieriumi, kuri yra įmirkyta alyvoje. Tokio tipo kabeliai nėra naudojami DC sektoriuje, nes gamyba yra labai brangi bei „Milliken“ gyslos tipo DC kabeliai nėra gaminami, nes nuolatinė srovė nesukelia minėto efekto (angl. *skin effect*).

3.3.2 Kabelio puslaidininkis

Pusiau laidūs XLPE sluoksniai yra pagaminti iš PE pagrindu pagamintu ko-polimerų, sumaišytų su 40 % juodosios anglies. Vadovaujantis tarptautiniais standartais, puslaidininkio varža turi būti mažesnė nei $250 \Omega\text{m}$ (CENELEC) arba mažesnė kaip $500 \Omega\text{m}$ (AEIC, IEC). Jei puslaidininkio medžiagos varža yra per didelė, tai kabelyje atsiras daliniai išlydžiai, kurie sukelia didelius stresus kabelio izoliacijai, kurios po tam tikro laiko tampa laidžios ir galimi izoliacijos pažeidimai.

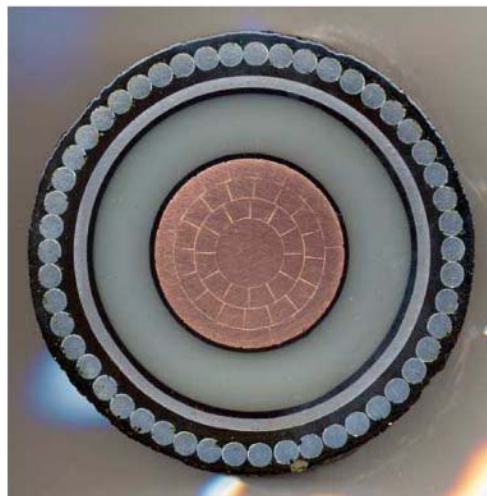
Pusiau laidūs sluoksniai padengiami 1–2 mm storio. Ilgam kabeliai, nors ir tokio mažo storio, pusiau laidinis sluoksnis sudaro dideles išlaidas, nes žaliavos reikalingos gamybai yra ganėtinai brangios.

3.3.3 XLPE izoliacija

Dėl erdvinių krūvių fenomeno XLPE izoliacijoje, įprasta XLPE izoliacija nėra tinkami naudoti HVDC sektoriuje kaip nuolatinės srovės kabeliai. Veikiant nuolatinėi srovei tokia kabelyje, atsirastų erdviniai krūviai, kurios sukeltų magnetinio lauko pikus ir taip paveiktų pačią izoliaciją. Dėl tokių kabelio savybių ilgą laiką nebuvo leidžiama naudoti XPLE kabelių HVDC sektoriuje.

2002 metais buvo sukurta nauja XPLE kabelių formulė, kuri panaikino aukščiau paminėtas blogąją savybę (erdvinių krūvių fenomeną). Pirmasis toks kabelis buvo paklotas tarp Konektikuto ir Longailendo, Niujorke. Nuo to laiko, ekstruziniai XLPE kabeliai, buvo pradėti gaminti kabeliai HVDC sektoriui.

Taip pat, ekstruzinių kabelių privalumas yra tai, kad pati XLPE atlaiko aukštą temperatūrą (300°C) nekeičiant savo standumo, lyginant su standartine PE izoliacija ($\sim 110^{\circ}\text{C}$).



10 pav. „Eastlink“ projekto HVDC kabelis su ekstruzine izoliacija [1]

3.3.4 Vandens barjeras

Vandens blokavimas pasiekiamas užkertant kelią vandeniui, tekančiam kabelio viduje, taip pat tarp kabelio elementų. Tai pasiekama užpildant kabelio laisvą erdvę vandenį blokuojančiomis medžiagomis. Jei vanduo prasiskverbia per apgadintą išorinį apvalkalą, vandenį blokuojančios medžiagos pradeda blokuoti vandenį ir patekti drėgmei giliau į kabelio konstrukcija ar išilgai į kabelio laidininką ar kitus sluoksnius. Kiekvienas kabelio dizaino etapas yra analizuojamas, o visos kabelio sąsajos yra užblokuotos. Kai tarp kabelio sąsajų reikalingas elektrinis kontaktas, naudojama pusiau laidžioji medžiaga, apie kurią aprašyta aukščiau.

Šiuo metu išrasta įvairių vandens sustabdymo būdų. Medžiagos (11 pav.) ir realus pavyzdys (12 pav.) vaizduoja, kad gali būti kietos arba sausos medžiagos, tokios kaip, pavyzdžiui, nuo vandens išbrinkstantys milteliai, išbrinkstančios juostos, siūlai, gijos, skaidulos. Buvo nustatyta, kad juostos ir siūlai yra tinkamiausias būdas užblokuoti vandenį gamybos ir naudojimo požiūriu.



11 pav. Išbrinkstantys siūlai ir juostos. [7]



12 pav. „NordBalt“ kabelio išpjova palikta drėgmėje

Šarvo vandens blokavimas – apsauga nuo vandens – pasiekiamas taikant gausų bitumo sluoksnį. Tai gera tarpinė tarp apvalkalo ir pačio šarvo, kuri ne tik atspari vandeniui, bet ir korozijai.

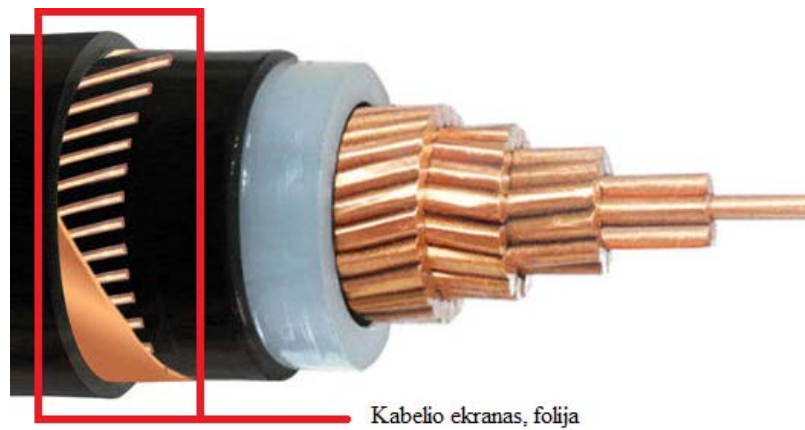
3.3.5 Kabelio ekranas

Apsauginis XLPE kabelio ekranas dažniausiai gaminamas iš aliuminio arba vario smulkių gijų, kurių storis 0,5–4 mm. (13 pav.). PE kabeliuose naudojama laminuota aliuminio folija, kurios storis siekia nuo 0,1 iki 0,3 mm. Dažniausiai gijų skaičius ar bendras ekrano storis yra paskaičiuojamas projektavimo metu pagal techninius projekto parametrus.

Ekrano paskirtis:

1. Kabelio izoliacijos apsauga nuo magnetinių laukų,
2. Ižemėjimo srovės nuvedimas į žeminimo įrenginius.

Kabelio ekrano paskirtis yra apsaugoti kabelio izoliaciją nuo magnetinių laukų, kurie gali paveikti pačią izoliaciją tiesiogiai, sukeldami įtampos svyravimus izoliacijoje.



13 pav. Kabelio ekranas

3.3.6 Kabelio apvalkalas ir armavimas

Kabelio apvalkalas dažniausiai gaminamas iš PE. Pagrindinė paskirtis – kabelio apsauga nuo išorinių mechaninių poveikių.

Eksplotacijos metu šis elementas turi būti tikrinamas su 10 kV nuolatinės srovės įtampa. Tikrinimo metu nustatomi kabelio paviršutiniai pažeidimai, kurie gali turėti įtakos kabelio sistemos veikimui.

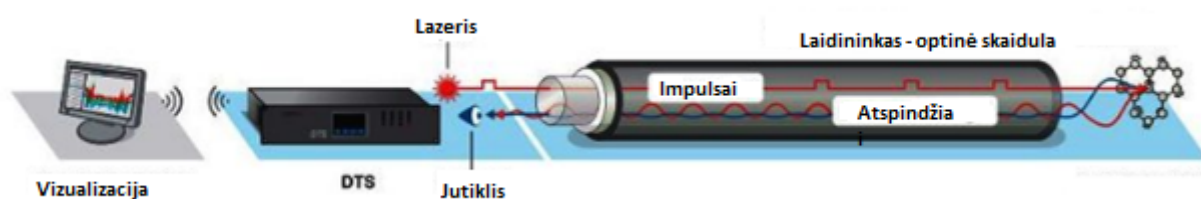
Visi jūriniai kabeliai yra armuojami dėl didelių dinaminų jėgų montavimo metu (pvz.: laivo judesiai montavimo metu). Ant kabelio apvalkalo vyniojamos 2–8 mm storio apvalios armatūros gijos. Ant kabelio armavimo dedamas bitumo sluoksnis su polipropileno siūlais dėl apsaugos nuo vandens ir korozijos (14 pav.).



14 pav. Kabelio apvalkalas ir armavimas

3.3.7 Papildomi priedai

Projektuojant HVDC jungtį projektuojamas ne tik kabelis (neskaitant keitiklio įrenginių), bet lygiagrečiai projektuojamas optinis kabelis, kuris bus paklotas šalia HVDC kabelio ar bus įmontuotas į patį kabelį. Dažniausiai pats optinis kabelis būna paklotas šalia požeminio ar jūrinio kabelio, kai kuriais atvejais panaudojama dalis optinio kabelio skaidulų, kurios sumontuojamos į jūrinio kabelio armavimo viją. Toks poreikis atsiranda norint nustatyti tikslią kabelio temperatūrą, panaudojant DTS (angl. *Distributed temperature sensing*). Toks prietaisas yra sumontuotas ir „NordBalt“ jungtyje (žr. 15 pav.). Deja, šiuo metu (2018 m.), šio prietaiso galimybės ganėtinai ribotos ir apima tik iki 30 km atstumo.



15 pav. DTS principinė schema

3.4 Pagrindiniai kabelių parametrai

Pagrindiniai stacionariųjų režimų parametrai pateikiami žemiau [8]:

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

Čia:

R_{DC} – nuolatinės srovės varža, Ω ;

ρ – savitoji varža, $\Omega \cdot m$;

l – laidininko ilgis;

S – skerspjūvis, mm^2 .

$$R_{DC}(T) = R_{20^\circ}(1 + \alpha_T(T - 20)) \quad (2)$$

Čia:

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

α_T – temperatūrinis koeficientas;

T – temperatūra, $^\circ C$

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

$$\rho = \rho_{sol} \cdot \frac{\pi \cdot R_1^2}{S} \quad (3)$$

Čia:

R_1 – laidininko spindulys, m;

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

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (4)$$

Čia:

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

ε – izoliacijos medžiagos dielektrinė skvarba.

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

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

Čia:

R – kintamosios srovės varža, Ω ;

y_s – paviršinės srovės koeficientas;

y_p – artumo koeficientas;

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

$$R = R_{DC}(1 + 1,5 \cdot (y_s + y_p)) \quad (6)$$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4} \quad (7)$$

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

Čia:

k_s – formulės konstanta, pagal lentelę

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} + 0,27} \right] \quad (9)$$

Čia:

d_c – laidininko skersmuo;

s – atstumas tarp laidininkų centrų.

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

Čia:

k_p – formulės konstanta.

$$L = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{GMR}\right) \quad (11)$$

Čia:

D_e – gylis žemėje;

μ – laidininko magnetinė skvarba

GMR – vidutinis geometrinis laidininko spindulys, m.

$$GMR = R_1 \cdot e^{-\frac{1}{4}} \quad (12)$$

$$D_e = 659 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{earth}}{f}} \quad (13)$$

Čia:

ρ_{earth} – grunto savitoji varža;

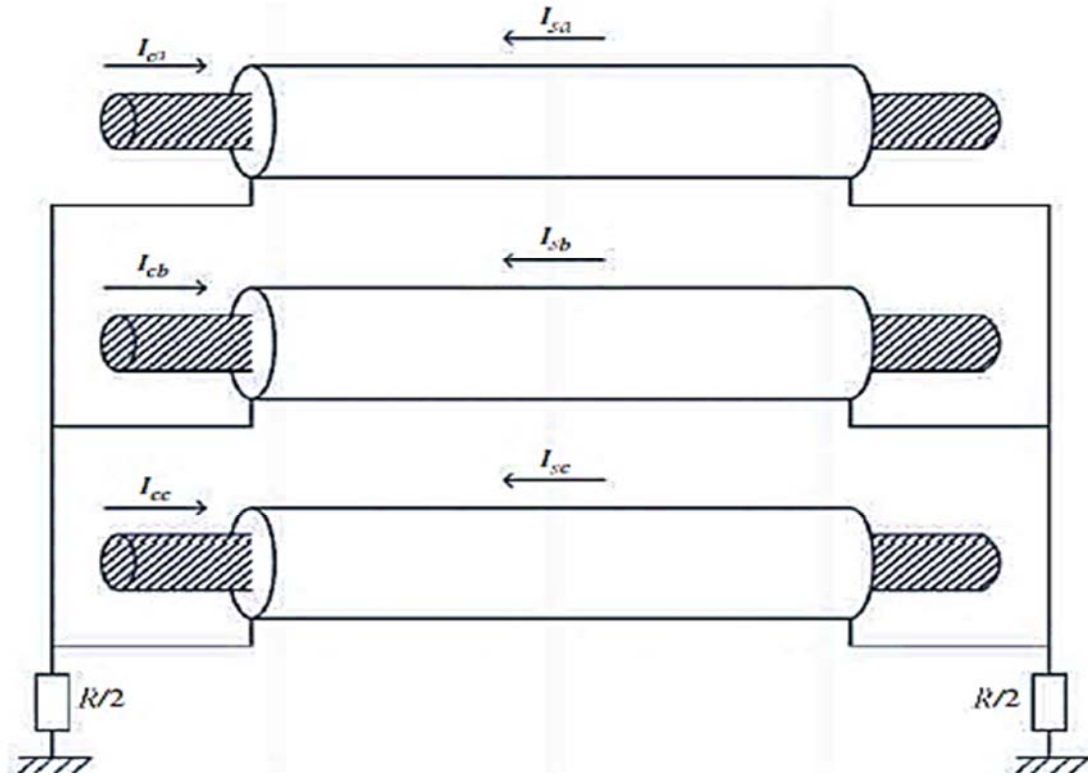
f – dažnis.

Tiesioginės sekos varža, kai kabelio ekranams atlikta transpozicija.

$$Z_{Cross}^+ = (Z_{self} \cdot Z_M) \quad (14)$$

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

$$Z_{Both-ends}^+ = (Z_{self} + Z_M) - \frac{(Z_{M,S} - Z_M)^2}{Z_{self,S} - Z_M} \quad (15)$$



16 pav. Kabelio ekranas įžemintas abiejuose galuose [15]

Nulinės sekos varža

$$Z^0 = Z_{self} + 2 \cdot Z_M - \frac{(Z_{M,S} + 2 \cdot Z_M)^2}{Z_{self,S} + 2 \cdot Z_M} \quad (16)$$

Laidininko varža.

$$Z_{self} = R_{50\text{ Hz}} + R_e + jX_L \quad (17)$$

Ekranų varža.

$$Z_{self,S} = R_S + R_e + jX_S \quad (18)$$

Varža tarp kabelių.

$$Z_M = R_e + j \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D_e}{s}\right) \quad (19)$$

Čia:

s – atstumas tarp fazinių kabelių

Varža tarp laidininko ir ekranų.

$$Z_{M,S} = R_e + j \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D_e}{R_2}\right) \quad (20)$$

Aukščiau išvardinti parametrai nenurodo pereinamųjų kabelio procesų, kintant darbo režimams pvz. išjungiant/įjungiant kabelį ar įvykus trumpiesiems jungimams. Tai galioja tiek kintamos srovės tiek nuolatinės srovės grandinėms.

3.5 XLPE kabeliams keliami reikalavimai

3 Lentelė. XLPE Kabeliams keliami reikalavimai vadovaujantis IEC Standartais

Elementas	Konstrukcija / Paskirtis	Medžiaga	Standartas
Laidininkas	Susluoksniuoti ir sutankinti apskriti laidininkai, apkrovos srovės ir trumpo jungimo srovių atlaikymui .	Sluoksniuoti ir sutankinti - Klasė 2, Atkaitintas / Grynas varis / Aliuminis	IS:8130 / IEC: 60228 / BS EN 60228
Laidininko / ekranas	Kabelių, kurių vardinė reikšmė didesnė kaip 3,3 kV, laidai yra ekranuoti su presuoto puslaidininkinio junginio sluoksniu. Tai pašalina elektros išsikrovimo tikimybę ties laidininko ir izoliacijos sąsaja.	Ekstruzinis puslaidininkis Mišinys	IS:7098-Part 2 / IEC: 60502- Part 2 / BS:6622 / BS:7835
Izoliacija	Izoliacija yra natūralus, kryžminis polietilenas su dideliu dielektriniu stiprumu yra ekstruzinis per puslaidininkio laidininko ekraną. Izoliacijos storis turi atitikti standartų atitinkamas lenteles.	XLPE	IS:7098-Part 2 / IEC: 60502- Part 2 / BS:6622 / BS:7835
Ne metalo tipo Izoliacijos ekranas	Kabeliai, kurių nominali vertė viršija 3,3 kV ir turi ekraną, susidedančią iš ne metalo, tarp laidininko ir izoliacijos. Nemetalinė dalis susideda iš puslaidininkinės sluoksnio, kuri montuojama spiraliniu būdu arba iš ekstruzinio pusiau laidinio junginio arba abiejų sluoksnių. Laidininkų ekranas, XLPE izoliacija ir nemetalinė izoliacijos ekrano dalis yra vienoje operacijoje ekstruduota TRIPLE EXTRUSION (Trigubas ekstruzinis), kuris pašalina ekstruzijos mikro išlydžio susidarymą ir padidina ilgaamžiškumą.	Ekstruzinis puslaidininkis Mišinys	IS:7098-Part 2 / IEC: 60502- Part 2 / BS:6622 / BS:7835
Metalinis izoliacij	Varinė kaitinta juosta / Vario vielos padengiamos virš izoliacijos ekrano, trumpo jungimo srovių nuvedimui į žemę.	Vario juosta / Viela	IS:7098-Part 2 / IEC: 60502- Part 2 / BS:6622 /
Montavimas (daugiagyšlių kabelių)	Izoliuoti laidininkai yra sumontuojami kartu, tušti tarpai užpildomi vandeniui atspariais užpildais, kad kabelis būtų pagamintas apvalus. Trifazių kabelių fazių indentifikavimas daromas nudažant juosta / žymėjimas skaitmenimis	Vandeniui atsparus PVC / Polipropileno pluoštas	
Vidinis apvalkalas	Kabelio šerdys yra su bendru ekstruzinio PVC / PE apvalkalu arba suvynioti plastiko juostomis, kaip reikalauja klientas.	PVC / Polipropilenas / Be halogenų	IS:7098-Part 2 / IEC: 60502- Part 2 / BS:6622 /
Armavimas	GI apvali viela / Plokščiojo laido (juosta) / Dvigubo plieno juostos žiedas ant vidinės apvalkalo, jei yra trijų pagrindinių kabelių. Montavimo kryptis yra kairiosios pusės galutinio sluoksnio atžvilgiu. Viengysliai kabeliai nemagnetiniais šarvais ant vidinės apvalkalo dalies.	GI / Aliuminis – Apvali viela / Plokščia / Dvigubo metalo pluošto juosta/ Dvigubo	IS:7098-Part 2 / IS:3975 IEC: 60502- Part 2 / BS:6622 / BS:7835
Išorinis apvalkalas	Kabeliams su ekstruzine PVC / PE / LSZH / FR / FRLS išorinis apvalkalas virš šarvo. Vieno laidininko neardomiems kabeliams išorinė apvalkalo ekstruzija sumontuota ant nemagnetinės metalinės dalies izoliacijos. Išorinis apvalkalas dažniausiai juodos spalvos, bet galima bet kuri kita spalva pagal gamintojo užsakymą.	PVC / FR PVC / FRLS PVC / Polipropilenas / Be halogenų	IS:7098-Part 2 / IEC: 60502- Part 2 / BS:6622 / BS:7835

4. Galios kabelių gedimo tipai ir priežastys

4.1 Kabelių gedimai

Elektrinio poveikio sukelti gedimai:

- Žaibas
- Komutaciniai viršįtampio impulsai
- Daliniai išlydžiai, kurie gali būti dėl prastos kabelio sistemos izoliacijos konstrukcijos arba gamybos defektų. Šis fenomenas yra labai gerai žinomas ir pastebimas XLPE kabelių izoliacijoje.

Mechaninio poveikio sukelti gedimai:

- Įrenginio montavimo metu gali atsirasti mechaninis pažeidimas, naudojant per didelę trauką ir (arba) viršijant minimalų lenkimo spindulį.
- Kabelis taip pat gali būti sugadintas statybos metu, kai naudojama kasimo įrangą kasant pažeidžiami kabeliai ar kabeliniai kanalai.
- Montavimo ar eksploatacijos metu atliekant pakartotinius lenkimus ir sukimus, gali sukelti negrįžtamą laidininkų įtempimą.

Terminio poveikio sukelti gedimai:

- Terminę kabelio izoliacijos degradaciją lemia tai, kad kabelio izoliacija praranda savo fizines savybes.
- Termiškai sukeltas gedimams dėl perkrovos viršijant projektinius pajėgumus ilgą laiką ir (arba) dėl pernelyg didelės aplinkos temperatūros sąlygų.

Metalo (puslaidininkio) ekrano gedimai:

Kad ekranas atliktų savo funkcijas, jo įžeminimo varža visada turėtų būti pakankamai žema. Esant aukštai varžai, šis sutrikimo režimas apibūdina, kad ekranas neveikia.

Kai metalinis šarvas yra pažeistas arba pažeistas, jo talpa priklauso nuo temperatūros. Esant aukštesnei temperatūrai, metalinio ekrano varža žymiai padidėja (dėl piko apkrovos, srovių ar cirkuliacijos srovių disbalanso) prie aukštos įtampos gradientų aštrių metalinių kraštų, kuri lems el. karūnavimą ir lanko išlydį (iš išorės). Karūnavimas ir lankos išlydžiai gali sunaikinti kabelių izoliaciją.

Blogas metalinio ekrano kontaktas:

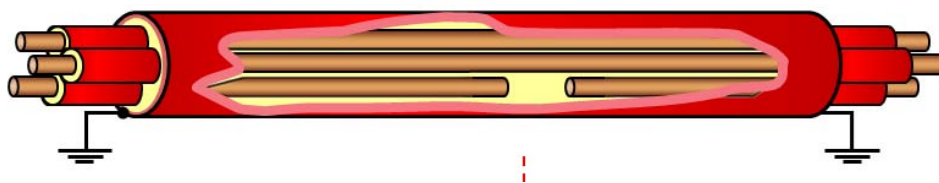
- Kai metalinis šarvas yra izoliuotas nuo ekrano nuo puslaidininkio juostos dėl prasto sąlyčio. Tai gali sukelti metalinio šarvo koroziją. Tokia sąlyga lemtų potencialų skirtumą tarp puslaidininkio ekrano ir metalinio ekrano (šarvo), tai sukelia karūnavimą tarp dviejų ekranų. Karūnavimas kils nuo kabelio šarvo į puslaidininkį ir į izoliaciją,

galiausiai įvyks kabelio gedimas. Kuo daugiau blogų kontaktų, tuo didesnė tikimybė greitesniam kabelio gedimo atsiradimui.

- Daugeliu atvejų gedimai atsiranda prie galinių kabelio movų arba jungiamųjų kabelio movų (kur gamyklinė izoliacija yra pakenkiama).

4.2 Kabelių gedimo tipai

Atviros grandinės gedimo tipas – tai toks gedimo tipas, kai laidininkas yra pilnai nutraukiamas nepažeidžiant izoliacinio sluoksnio tarp laidininko ir vandens, žemės, šarvo.

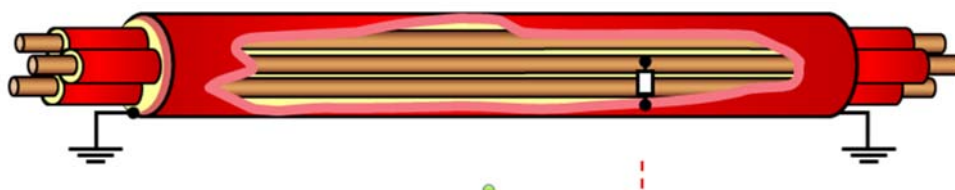


17 pav. Atviros grandinės gedimo tipas

Atviros grandinės galimi gedimo atvejai:

- Laidininko nutrūkimas.
- Gedimai laidininke ir apvalkale.
- Labai retas atvejis jūriniuose kabeliuose, nes labiau pasitaikantis mažo skersmens kabeliuose.
- Pasitaiko seno tipo kabelio movose (įvykus įžemėjimui, movoje esantis laidininkas užsilieja su izoliacine medžiaga).

Šuntinis gedimo tipas – tai toks tipas kai yra pažeidžiamas izoliacijos sluoksnis tarp laidininko ir vandens, žemės, įžeminto šarvo.



18 pav. Šuntinis gedimo tipas

Gedimo variantai:

- Tarp fazės ir apvalkalo.
 - 2-jų ar daugiau laidininkų susilietimas tarpusavyje.
 - Nutrūkstantys gedimai – netiesinės priklausomos nuo įtampos. Viršija leidžiamas įtampos ribas, kol izoliacija pažeidžiama bei atvirkščiai, mažėjant izoliacinės varžos dydžiui ir atsirandant perdengimui izoliacijoje.
 - XLPE žemyninės dalies gedimai – gedimai dažnai pasižymi didele varža.
 - Jūriniai kabeliai – išlydis gedimo vietoje pažeidžia viršutinius sluoksnius, todėl susidaro maža varža. Praktiškai skaitoma šuntas tarp laidininko ir sužeminto šarvo.
-
- **Apvalkalo gedimai**
 - Kabelio apvalkale ir metaliniame apvalkale: pažeidimai paprastai atveria srovės kelią nuo metalinės apvalkalo į žemę dėl vandens patekimo. Dažnai sukelia koroziją metalinėje apvalkale, dėl to dar labiau pakenkiama izoliacijai metaliniame apvalkale arba pagrindinėje izoliacijoje.
 - Metalinio apvalkalo gedimo atveju jo arba ekrano sąveika nuo sąlyčio su žeme priklauso ir gedimo vietos varža, kuri gali būti tiek maža, tiek didelė.



19 pav. Apvalkalo pažeidimas

4.3 Kabelių gedimo priežastys, atpažinimo būdai, išvengimo rekomendacijos

Dažniausiai pasitaikančios kabelio gedimo priežastys:

- Izoliacijos senėjimas,
- Netinkamas parinkimas arba pritaikymas,
- Mechaniniai pažeidimai,
- Apvalkalo ar šarvo korozija,
- Drėgmė izoliacijoje,
- Kabelio šilimas,
- Gaisrai,
- Žaibo išlydžiai,
- Elektrinis pramušimas.

Apvalkalo/Šarvo korozija gali atsirasti dėl šių faktorių:

- Dirvožemio poveikis,
- Rūgštingumo ir šarmų poveikis,
- Galvaninio poveikio (skirtingų metalų oksidacija, oksidacija, korozija),
- Dirvožemio cheminio užterštumas.

Po tam tikro laiko, vykstant korozijai kabelio šarve, drėgmė prasiskverbs iki pagrindinės izoliacijos ir sukels kabelio gedimą. Apvalkalo ar šarvo koroziją galima apriboti ar sumažinti pasitelkiant katodinę apsaugą, kabelio montavimo metu įrengiant tinkamus drenažus ar pašalinant cheminio užteršimo šaltinius.

Drėgmė izoliacijoje gali atsirasti dėl mechaninio kabelio pažeidimo. Pažeidimai dėl drėgmės gali būti nustatomi pagal šiuos požymius:

- Balintas popierius (kabeliuose su popierine izoliacija),
- Atsparumas juostų plyšimui,
- Dėmės ant kabelio apvalkalo paviršiaus,
- Balti aliuminio milteliai laidininke.

Kabelio šilimo priežastys:

- Aplinkos temperatūra,
- Nepakankama ventiliacija,
- Savaiminis šilimas, nes kabeliai yra įrengti per arti vienas kito,
- Išoriniai šilumos šaltiniai.

Kad išvengti kabelio šilimų, pirmiausiai reikia nustatyti aplinkos veiksnius, kurie lems tinkamą kabelių izoliacijos ir laidų dydžio parinkimą. Tinkamai pasirenkant ir montuojant bei tinkamai prižiūrint, užtikrinamas saugus ir ilgalaikis kabelio veikimas.

Gaisrai, pažeidžiantys sveikus kabelius, kabelių kanaluose ir kabeliniuose loviuose dažniausiai įvyksta dėl netinkamo projektavimo arba montavimo. Kad išvengti kabelių pažeidimo įvykus gaisrui, turi būti sumontuojami ugnies barjerai kabeliniuose kanaluose ar skyduose.

Žaibai ir komutaciniai viršįtampiai pažeidžia kabelių izoliacijai. Kad išvengti viršįtampių, būtina įrengti viršįtampio ribotuvus.

Aptariamie kabelių gedimai gali būti toliau klasifikuojami į dvi klases:

- ❖ Esminės priežastys.
- ❖ Neįprastos priežastys

Esminės priežastys gali būti klasifikuojamos taip:

- ❖ Apvalkalo ar šarvo defektai,
- ❖ Izoliacijos defektai,
- ❖ Laidininko defektai.

Apvalkalo ar šarvo defektai kyla dėl:

- ❖ Plono švino/aliuminio sluoksnio (skyla esant nedidelei jėgai),
- ❖ Mažesnio nei 85 % ekscentrinio švino/aliuminio storio,
- ❖ Struktūrinių defektų: laminavimas, radialiniai skilimai, dujų kišenės ir kt.,
- ❖ Smulkių įtrūkimų, iškraipymų, ištempimo, pjūvių, pabraižymų.

Izoliacijos defektai gamyboje, kurių požymiai:

- ❖ Juostelių netolygumas ar raukšlėjimasis,
- ❖ Apvalkalo juostos,
- ❖ Per gilus mechaniniai įbrėžimai izoliacijoje,
- ❖ Minkšti arba netinkami užpildai,
- ❖ Minkštos izoliacijos apvalkalas.

Didelius dielektrinius nuostolius gali nurodyti:

- ❖ popieriaus nudegimas ar karbonizavimas, tai atsitinka vienoje ar keliose vietose,
- ❖ gali būti nustatytas pagal galios faktorių esant 60 °C ar aukštesnei temperatūrai.

Nepilno įsisotinimo požymiai:

- ❖ Junginio trūkumas tarp gretimų juostos kraštų ir paviršių,
- ❖ Blogi popierinės izoliacijos junginiai.

Nestabilaus junginio (pvz., dielektrinė alyva ar silikonas) požymiai:

- ❖ Matomas junginio pokytis (patamsėjęs, dialektinio išlydžio poveikis ir kt.),
- ❖ Atsiskyrimas į vašką mineralinės alyvos ar tepalo atveju.

Laidininko defektų požymiai:

- ❖ Nereguliaros gijos,
- ❖ Aštrūs gijų kampai,
- ❖ Gijų trūkumas,
- ❖ Įbrėžimai ant gijų,
- ❖ Prastas lakavimas.

Neįprastų priežasčių klasifikacijos:

- ❖ Išorinis gaisras ir viršįtampiai (dėl gaisro kabelių grandinėse, žaibo išlydžiai, komutaciniai viršįtampiai),
- ❖ Perkaitimas (dažniausiai dėl perkrovos, išorinės temperatūros poveikio ar aplinkos poveikio),
- ❖ Mechaninis pažeidimas (vibracija, išsiplėtimas ir susitraukimas, išoriniai pažeidimai, pažeidimai instaliacijos metu),
- ❖ Kiti padariniai (didelis vidinis spaudimas, lakių medžiagų migracijos, drėgmės patekimas per defektines jungtis, galines movas ir lenkimus).

4.4 Kabelio gedimo nustatymo būdai

Taikomi pagrindiniai du kabelio gedimo nustatymo būdai:

- Reflektometrinis – *TDR* (angl. *Time domain reflectometer*) [1]; [3]; [9]
- Tiltelio būdas (angl. *Murray loop bridge*) [1];[12];

Naudojant įvairius prietaisus, galima išplėsti *TDR* matavimo ribas:

- Panaudojant LDE prietaisą, galima sustiprinti signalą, kuris gali nustatyti kabelių ilgius bei jų gedimus, ilgesniems nei 1000 km kabeliams;
- *SWG1750* – paduoti aukštos įtampos impulsą ir nustatyti gedimus su didele varža;
- ICE metodas – gedimo vietos nustatymas pagal impulso pločio aptikimą.

4.4.1 *TDR* nustatymo metodas

TDR [3] [1] – tai vienas iš pirminių kabelio gedimo nustatymo būdų, kai įvyksta gedimas ir nežinoma, kur tai įvyko (t.y. stacionari įranga nenustatė atstumo iki gedimo). Metodas praktiškai aptinka bet kokius varžos pokyčius kabelyje, kurie gali būti dėl:

- Kabelio sujungimų (didelė varža),
- Atviro tipo gedimo,
- Vandens įdrėkio į izoliaciją ar kabelio movas,
- Įžemėjimo (tarp laidininko ir apvalkalo),
- Bet kokių kitų poveikių kabelio laidininke ar izoliacijoje, keičiančių kabelio varžą.

TDR veikia kaip radaras. Kabelio sistemoje viename gale paduodamas impulsas. Kadangi impulsas paduodamas į kabelį, tai bet kokia charakteristikos varža (talpos pertrūkiai) pasikeis, signalo dalis bus gražinta į prietaisą (signalo šaltinį). Atstumo pulso komponentai bus teigiami arba neigiami, priklausomai nuo to, ar impedansas yra didesnis arba mažesnis nei kabelio charakteristikos varža. Pradinis impulsas ir atspindys yra parodyti prietaiso ekrane, kaip ir oscilografas. Kadangi prietaisas gali būti kalibruojamas, kad būtų nustatytas impulsų greitis kabeliu, galima nustatyti laidininko atstumą iki sistemos galo.

Ši informacija taip pat gali būti naudojama norint nustatyti sutrikimų, kuriuos rodo atspindintys impulsai. Be to, atspindžio impulsų formos prietaiso ekrane padeda operatoriui nustatyti nutraukimo pobūdį.

Atvaizdavime gaunamos kreivės atsilenkimas į viršų ar į apačią priklausys nuo gedimo pobūdžio (t.y. jei varža didesnė už kabelio varžą, tai ji kils viršun, o jei mažesnė, tai žemyn) (žr. 20 pav.).

TDR galimo kreivės	
Atvejis	TDR kreivė
Kabelio sistema be movų	
Kabelio sistema be movų be movų ir su įžemėjimu ties L vieta (maža varža)	
Kabelio sistema su mova	
Kabelio sistema su drėgna mova ties vieta L	
Kabelio sistema su izoliacijos įdrėkiu ties vieta	
Kabelio sistema su surudyjusia jungtimi (padidėjusi varža)	

20 pav. TDR galimos kreivės skirtingais atvejais

Atspindžio dydis apskaičiuojamas naudojant formulę (prietaisas atlieka tai automatiškai) [1] [3]:

$$\rho = \frac{Z_d - Z_o}{Z_d + Z_o} \quad (21)$$

Čia:

Z_d – kabelio varžos dydis.

Z_o – kabelio varžos kitimo dydis.

4 Lentelė 2. *TDR* matavimo privalumai ir trūkumai

<i>TDR</i> matavimo privalumai ir trūkumai	
Privalumai	<ul style="list-style-type: none"> • Testavimas yra lengvas. • Bandymo įranga yra maža ir nebrangi. • Bandymo įranga naudoja žemą bandymo įtampą (mažesnę nei U_0). • Periodiniai testai pateikia istorinius duomenis, kurie padidina būsimų testų vertes, stebint pokyčius laikui bėgant (tendencijas). Reikia išlaikyti tikslius duomenis. • Nustatomos kabelių sistemos su varžos pokyčio problemos.
Atviros problemos	<ul style="list-style-type: none"> • Gebėjimas atlikti internetinį tyrimą yra neaiškus. • <i>TDR</i> duomenų interpretavimui gali prireikti kabelinės sistemos statybos istorijos. • Žemos įtampos <i>TDR</i> bandymo įtampa gali būti nepakankamai didelė, kad aptiktų kai kuriuos dielektrinius nelygumus. • Sunku interpretuoti kai kuriuos varžos nustatytus nesklandumus. • Sunku interpretuoti rezultatus ant juostos ekranuotų kabelių. • Optimalaus skyrimo ir atstumo nustatymas gali būti problemiškas. • Rezultatų interpretavimas grandinėse yra sudėtingas. • Ilgio matavimas reikalauja nustatyti <i>TDR</i> impulso pradžią, tai gali būti sunku.
Trūkumai	<ul style="list-style-type: none"> • Testavimui ir vėlesnei analizei reikalingi kvalifikuoti operatoriai-inžinieriai. • Aklosios zonos kreivė (impulso pradžia), atsiranda dėl skambesio efekto artimiausioje dalyje, į kurią paduodamas impulsas. • Kabelio ilgis priklauso nuo padavimo būdo ir impulso pločio. • Elektros triukšmas gali trikdyti žemos įtampos <i>TDR</i> signalą. • Sėkminga varžos nutraukimo vieta priklauso nuo tinkamo sklaidimo greičio derinimo su požeminės kabelių sistemos išdėstymu.

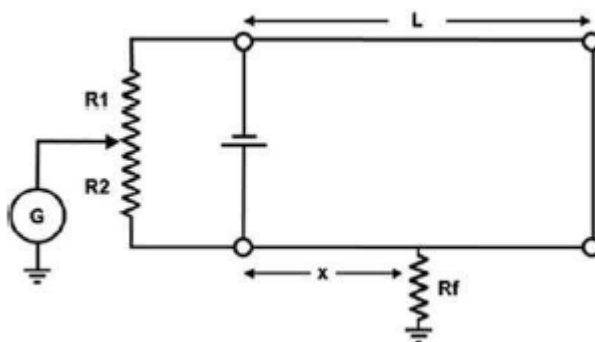
4.4.2 Tiltelio matavimo būdas (angl. *Murray loop bridge*)

Murray tiltelio metodas - yra tilto grandinė, naudojama gedimams nustatyti požeminėse arba povandeninėse kabeliuose [1] Jis buvo naudojamas daugiau nei 100 metų [1].

Tilto matavimo būdas gali būti taikomas, jei yra sveika grįžtančio laidininko gysla. Taip pat gali būti naudojamas lygiagretus kabelis tiltelio matavimui. 21 pav. Parodyta tiltelio metodo (angl. *Morrey loop bridge*) schema kabelio gedimui nustatyti schema.

Kabelio ilgis yra L , o atstumas iki gedimo yra x . R_f izoliacijos įžemėjimas į žemę arba jūros vandenį. Du kabeliai yra sujungiami tarpusavyje, kad gautume kilpą (sujungimas pavaizduotas diagramos dešinėje pusėje). Baterijos įtampa tiekama į grandinę. Reguliuojamos dvi varžos R_1 ir R_2 , kol įtampos matuoklis G rodo nulį (G reiškia "galvanometras", nes šie dalykai buvo naudojami 1880-aisiais matavimų tipas). Kai G yra subalansuotas iki nulio, atstumas x iki kabelio gedimo gali būti nustatyta taip:

$$x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 2L \quad (22)$$



21 pav. Tiltelio metodas (angl. *Morrey loop bridge*)

Šiuolaikiniai prietaisai jau turi savyje instaliuotą logiką, kuri paskaičiuoja ir pateikia rezultatus. Prietaiso operatoriui lieka tik įvertinti pateiktus duomenis ir perskaičiuoti, jei reikia, atstumą iki gedimo vietos.

5 Metodinė dalis

„NordBalt“ aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklio 450 km kabelio jungtis yra vienintelė NS keitiklio jungtis Lietuvoje su Švedija.

Yra keletas gedimų vietos nustatymo metodų, kurių kiekvienas turi savo plusus ir minusus. Priklausomai nuo gedimo tipo ir kabelio techninių specifikacijų bei kabelio konfigūracijų, metodai turės skirtingų perspektyvų sėkmingai lokalizuoti gedimą. Įvykus jūrinio kabelio gedimui, kabelį eksploatuojanti kompanija dažniausiai organizuoja keletą kabelio gedimo nustatymo būdų vienu metu, tam kad būtų išvengta jungties prastovų.

Kabelio gedimo vietos nustatymui nepakanka kabelio gedimo vietos nustatymo įrangos ir supaprastintų instrukcijų. Dažniausiai pristatant įrangą užsakovui, pridedamos instrukcijos, kurios yra supaprastintos. Nors inžinieriai ir apmokomi naudotis šia įranga, bet, deja, ne viskas yra atskleidžiama apmokymo metu, nes teigiama, kad tai praktinė patirtis (angl. *Know-How*), kurią sunku perduoti, nes visi gedimai yra individualūs. Todėl kabelių eksploatacinės organizacijos turi pasirinkti iš keleto variantų ar jų kombinacijų:

1. Periodiškai siųsti inžinierius į apmokymus bei stažuotes.
2. Samdyti kompetentingą kompaniją, turinčią profesionalią įrangą kabelio gedimo vietos nustatymui ir daugiametę patirtį šioje srityje.
3. Įdiegti stacionarią, labai didelį tikslumą turinčią kabelio gedimo vietos nustatymo įrangą ar jų kombinaciją.
4. Galima kombinuoti visus aukščiau minėtus variantus.

Toliau pateikiami kabelio gedimo vietos nustatymo būdai, kurie buvo praktiškai išbandyti kabelio gedimo vietos nustatymui:

- Naudojamos stacionarios įrangos „MACH2“ registratoriaus užregistruotas srovės ir įtampos kreivės;
- *TDR* (angl. Time Domain Reflectometer) metodas;
- Impulso srovės metodas „ICE“ metodas (angl. *including Comparison and Differential Modes*);
- Tiltelio metodas „*Bridge method*“;
- Kabelio gedimo vietos tikslinimas (angl. *Pinpointing*);
- Kabelio temperatūros nustatymas optiniu kabeliu „*DTS (Distributed Temperature Sensing)*“.

5.1 Tyrimo objektas

Praktiniu būdu, taikant aukščiau išvardintus gedimo vietos nustatymo metodus, buvo tiriamos Lietuvos-Švedijos jungties „NordBalt“ kabelio gedimo vietos nustatymo galimybės, pasitelkiant tiek stacionariusius prietaisus (angl. *Trace fault recorder*), tiek nestacionariusius kabelio gedimo vietos nustatymo prietaisus (angl. *Offline cable fault locators*).



22 pav. „NordBalt“ kabelio iliustracija iš duomenų lapo

„NordBalt“ kabelio liniją sudaro:

- 13 km požeminio kabelio paklotas LT teritorijoje; 13 požeminių movų (1 poliuje);
- 400 km jūrinio kabelio, kuris driekiasi nuo Lietuvos Neringos pakrantės iki Švedijos pakrantės; 8 jūrinės movos (1 poliuje);
- 40 km požeminio kabelio paklotas SE teritorijoje; 48 požeminės movos SE pusėje (ant 1 poliuje);
- Bendras kabelio ilgis – 450 km.

Žemiau pateikiami „NordBalt“ jungties kabelio parametrai [8]:

- „NordBalt“ kabelio puslaidininkinio izoliacijos sluoksnio storis – 1,5 mm;
- Izoliacijos storis – 18 mm;
- Išorinio izoliacijos puslaidininkinio sluoksnio storis – 1,4 mm;
- Kabelio gyslos skersmuo – 49,3;
- Viso izoliacinio sluoksnio spindulys – 24,65 mm, išorinio sluoksnio – 45,55 mm;
- Bendras kabelio skersmuo – 123 mm.
- Armavimo pakloto storis – 3 mm,
- Kabelio skersmuo vertinant sluoksnius iki armavimo pakloto – 96,5 mm.
- Armavimo sluoksnio skersmuo – 106,5 mm;
- Polipropileno siūlų storis – 4 mm;

- Kabelio gyslos varža – 0,0172 W;
- Viršįtampių greitis – 166464 km/s;
- Bendras šilumai laidžių sluoksnių storis nuo izoliacijos – 7 mm (išskyrus metalinius sluoksnius);
- Kabelio išorinio paviršiaus plotas – 0,38642 m²/m;
- Jūros dugno temperatūra – 8 °C.
- Pradinė kabelio temperatūra - 8 °C didesnė nei jūros dugno temperatūra;
- Jūrinio kabelio izoliacijos masė (10 km) – 42866,32 kg.
- Kabelio izoliacijos skerspjūvio plotas – 0,004609282;
- Priimamas nemetalinių sluoksnių storis nuo izoliacijos iki paviršiaus – 1 cm.

5.2 Panaudota gedimo vietos nustatymo įranga

Įvykus gedimams „NordBalt“ jungties kabelio linijoje Klaipėda-Nybro, buvo panaudoti šie prietaisai gedimui nustatyti:

1. „Teleflex“ (*TDR*) – reflektometras (žr. 22 pav. „NordBalt“ kabelio iliustracija iš duomenų lapo);
2. LDE800 – reflektometro stiprintuvas ilgiems kabeliams;
3. *SWG1750* – Impulsų generatorius. Naudojamas ICE metodui;
4. „Digiphone+“ – tiksliam kabelio gedimo vietos nustatymui „Pinpointing“
5. HVB arba analogiškas MFM 10 – gedimo vietos nustatymas *tiltelio* metodu.

Teleflex VX / Teleflex VX P

Teleflex VX (žr. 23 pav.) yra elektros tinklų kabelių gedimų vietų nustatymo mikroprocesoriumi valdomas reflektometras su slankiuoju meniu.

Su *Teleflex VX* be šios įrangos galima atlikti šiuos ŽĮ (žemos įtampos) matavimus be jokių papildomų priedų:

- *Teleflex* - trijų fazių *TDR* (paskirto nustatymo atkūrimo) matavimą
- *Teleflex* IFL (nestabiliai atsirandančio gedimo nustatymą)
- Izoliacijos matavimą (reikia ISO moduliui)

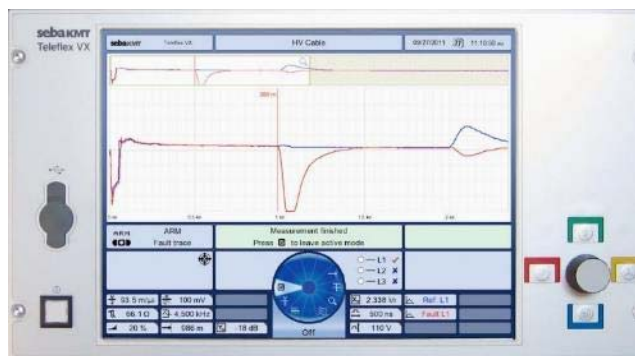
Dėl esamų režimų įvairovės, prietaisas dar gali būti naudojamas atliekant gedimo vietos nustatymo ar bandymų procedūras su turimais papildomais matavimo prietaisais:

- ARM (išlydžio lanko atspindžio metodas) (angl. *Arc reflection method*),

- Įtampos slopinimo metodas (angl. *Voltage Decay Method*)
- Srovės impulsų metodas (angl. *Impulse Current Method*)
- Išdeginimas pagal išlydžio lanko atspindžio metodą (angl. *ARM burning*)

Teleflex VX darbo principas panašus į radaro matuoklį, naudojant gerai žinomą impulso atspindžio techniką. Šiuo tikslu atitinkamos formos bandymo impulsai yra perduodami į bandomą kabelį. Impulsai keliauja būdingu šiam kabeliui greičiu. Trūkimo vietoje siūstovo impulsas atsispindi nuo kiekvienos vietos, kur keičiasi kabelio elektrinės charakteristikos ir šie atsispindėję komponentai pavaizduojami ekrane. Minėti kabelio elektrinių charakteristikų pasikeitimai gali rodyti galimo kabelio gedimo vietą arba konkrečias vietas, kaip antai kabelio movas ar galus. Gedimo pobūdis ir atstumas iki jo gali būti įvertintas pagal atspindžių formą ir vėlavimo laiką. Tokiu būdu *Teleflex VX* rodomas aiškus ir permatomas tikrinamo kabelio vaizdas.

Norint matuoti su išorine įranga (pvz., ARM slopinimu), impulsai perduodami per patį išorinį įrenginį, kai *Teleflex VX* (veikdamas laikinu įrašymo režimu) tik įrašo atsispindėtus įtrūkimų impulsus.



23 pav. „Teleflex VX“ prietaisas

5 lentelė. *Teleflex VX* charakteristikos

Parametras	Vertė
Didžiausias prijungiamų laidininkų skaičius	3
Intervalai (kai $v/2 = 80\text{m}/\text{As}$)	20 m 1280 km 65,65 pėdos 4201,6 kft 250 ns... 16 ms
Impulso trukmė	20 ns, 30 ns, 50 ns, 100 ns, 200 ns, 500 ns, 1 s, 2 s, 5 s, 10 s
Impulso amplitudė	30 V 160 V
Skyra	iki 0,1 m
Didž. matavimų intervalas	400 MHz
Atnaujinimų dažnis	maždaug 10 vaizdų/s

V ₂ intervalai	10 149,9 m/s 32,9 491,8 ft/s
NVP diapazonas	0,067 1 NVP
Dinaminis diapazonas	> 80 dB
Išvesties pilnutinė varža	50Ω
Kompensacija	10Ω... ~, reguliuojamas žingsniais

ISO modulis, kuriam būdingi tokie parametrai:

Parametras	Vertė
Matuojama įtampa	<6 V 500 V
	1000 V (<i>Teleflex VXP</i> neatpažįsta)
Varžos matavimo intervalas	1 Ω ... 2 k Ω (kai <6 V) 1 Ω... 2 G Ω (kai 500 V) 1 Ω ... 2 G Ω (kai 1000 V)
Matavimo diapazono geba (tik su 500 V arba 1000 V)	0- 20 pF (skyra 0,1 pF)
Matavimas pagal laiką (tik su 500 V arba 1000 V)	iki 15 minučių

LDE 800 Impulsų generatorius

Impulsų generatorius LDE 800 (žr. 24 pav.) generuoja 800 V (prie 100 Ω) amplitudės ir maks. 10 μs impulso pločio impulsus. Dėl to tai yra idealus impulsų generatorius ilgesniems kabeliams.

Kad būtų galima išmatuoti optimalų impulsų atspindėjimą, impulsų generatorių galima pakoreguoti pagal kabelio arba linijos varžą. Siuntimo impulsą galima praktiškai visai eliminuoti naudojant kompensavimo potenciometrą. Reflektogramą galima papildomai išryškinti, naudojant integruotus didelės pralaidos ir žemos pralaidos filtrus.

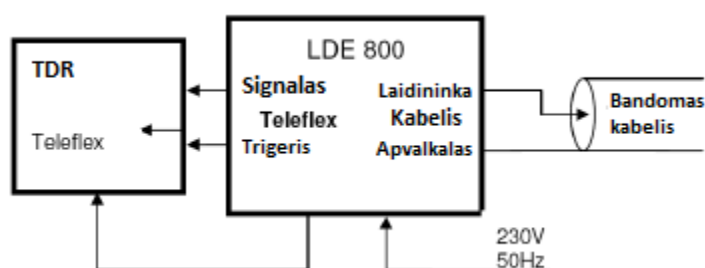


24 pav. Impulsų generatorius LDE 800

6 lentelė. LDE 800 techninės specifikacijos

Parametras	Vertė
Elektros srovės įtampa	230 V ±10 %, 46- 61 Hz, 60 VA Saugikliai: 4 A (lėto suveikimo)
Maksimali impulso galia	6500 W
Impulso amplitudė prie 100 Q	100 V, 300 V, 500 V, 800
Impulso plotis	0,5 μs, 1 μs, 2 μs, 5 μs, 10 μs
Charakteringa išvesties pilnutinė	3- 400 Q (reguliuojama)
Impulsų per sekundę	1
Veikimo režimai	Nuolatinų impulsų, Vieno impulso, Išorinio impulso IMTIS
Stiprinimas	-30 dB, -20 dB, -10 dB, 0 dB, 10 dB, 20 dB
Padidinimas	Maks. 40 dB (nuo atstumo priklausantis amplitudės)
Kompensacija	0- 200 Ω (vidinė) arba per išorinį kabelį
Filtras	Aukštų dažnių pralaidos $f_{LL} = 6- 587$ kHz (intervalais) Žemų dažnių pralaidos $f_{UL} = 16- 15500$ kHz (intervalais)

Pateikiama impulsų generatoriaus LDE 800 prijungimo principinė schema (25 pav.) vaizduojanti, kad tai tik pagalbinis įrenginys *Teleflex VX* prietaisui, kuris skirtas signalo stiprinimui bei papildomų parametrų išplėtimui.



25 pav. LDE800 prijungimo principinė schema

SWG 1750 C/CD impulsinių pokyčių bangų generatorius

SWG 1750 C/CD impulsinių pokyčių bangų generatorius yra skirtas nustatyti kabelio gedimo vietą. Šiuo tikslu impulsinių pokyčių kondensatoriai įkraunami (pagal pasirinkimą iki 32 kV) ir po to iškraunami siunčiant impulsą į kabelį, kurio veikimas yra sutrikęs, taip kabelio izoliacijoje (pažeistoje vietoje) sukeliama elektros lanką. Po impulso gaunama triukšmą bei magnetinio impulso sklaidą į žemę galima įrašyti, sustiprinti ir įvertinti naudojant impulsinių pokyčių imtuvą (pvz., digiPHONE+, žr. 26 pav.). Atstumą iki gedimo galima apskaičiuoti naudojant didelio kibirkščiavimo triukšmo garsumo lygį arba laiko skirtumą tarp magnetinio impulso gavimo ir stipraus kibirkščiavimo triukšmo.

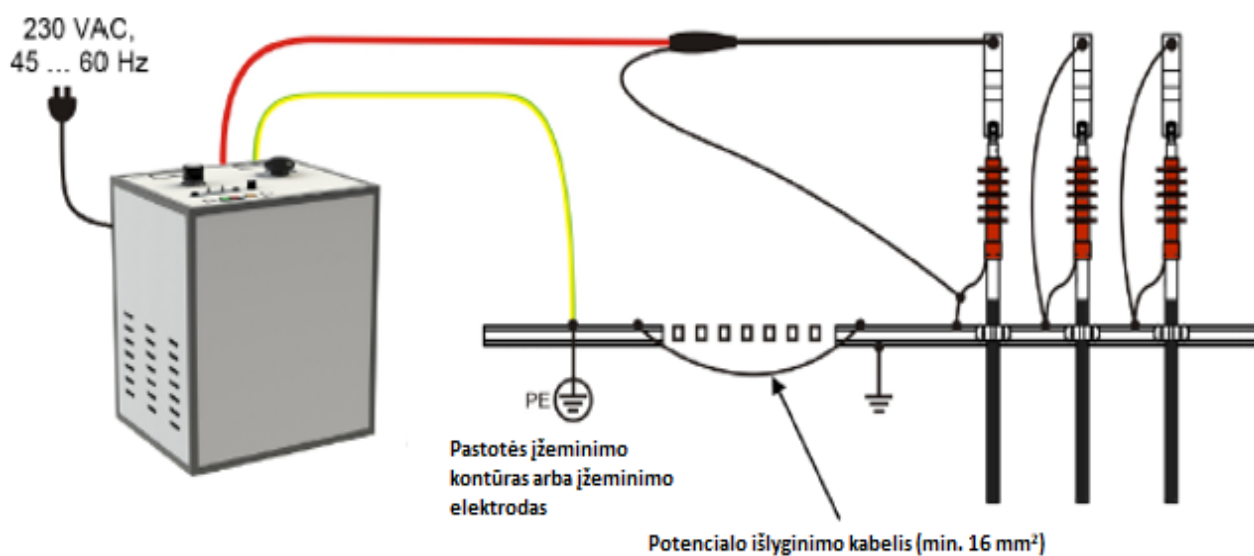
Naudojant kartu su reflektometru ir ARM filtru testavimo aplinkoje, SWG 1750 C/CD impulsinių pokyčių bangų generatorių taip pat galima naudoti nustatyti kabelių gedimų vietas naudojant arkos atspindžio matavimą (ARM) ir / arba srovės atjungimą (ICE, impulsų srovės įrangą).



26 pav. SWG 1750 C/CD impulsinių pokyčių bangų generatorius

7 lentelė. SWG1750 Techninės specifikacijos

Parametras	Vertė
Viršįtampis	0,8 kV / 16 kV / 32 kV
Išvesties galia	1750 J
<ul style="list-style-type: none"> • C modelis • CD modelis 	3500 J
Impulsinio pokyčio seka	Vienas impulsas arba nuo 2,5 s iki 10 s
Maksimali įkrovimo srovė	210 mA
<ul style="list-style-type: none"> • nuo 0 iki 8 kV • nuo 0 iki 16 kV • nuo 0 iki 32 kV 	105 mA
	53 mA
Geba	54,4 μF (C) arba 109 μF (CD)
<ul style="list-style-type: none"> • nuo 0 iki 8 kV • nuo 0 iki 16 kV • nuo 0 iki 32 kV 	13,6 μF (C) arba 27,2 μF (CD)
	3,4 μF (C) arba 6,8 μF (CD)



27 pav. SWG 1750 Principinė prijungimo schema

HVB 10 / MFM10 prietaisais kabelio gedimo vietos nustatymui tiltelio būdu

HVB 10 / MFM10 skirtas kabelių gedimo vietos nustatymams tiltelio metodu (angl. *Murray loop bridge*).

HVB 10 (žr. 28 pav.) prietaisais integruotos šios funkcijos:

- patogų ir paprastą valdymą naudojant sukamąjį manipuliatorių („EasyGo“) ir jutiklinį ekraną,
- bipoliniai matavimai,
- du iš anksto nustatyti vietų režimai, skirti tenkinti skirtingus tikslumo reikalavimus pagal gedimo tipą,
- deginimo režimas su rankiniu išvesties įtampos valdymu, pasirenkant srovės ribą ir iki 200 mA nuolatinės išeinančios srovės (maks. 5 min.),
- tikslios vietos nustatymas naudojant impulsinę nuolatinės srovės įtampą,
- visiškai automatizuotas matavimo procesas,
- nepriklausomybė nuo papildomų laidų ir patikrinimo laidų varžos,
- aptinkamas neteisingas prisijungimas prie laido, atliekant patikrinimą,
- gedimo aptikimas aukštos įtampos varžinėse aplinkose laidų viduje,
- paskutinių naudotų procesų aptikimas, išsaugojimas ir duomenų įrašymas (valymas, prapūtymas),

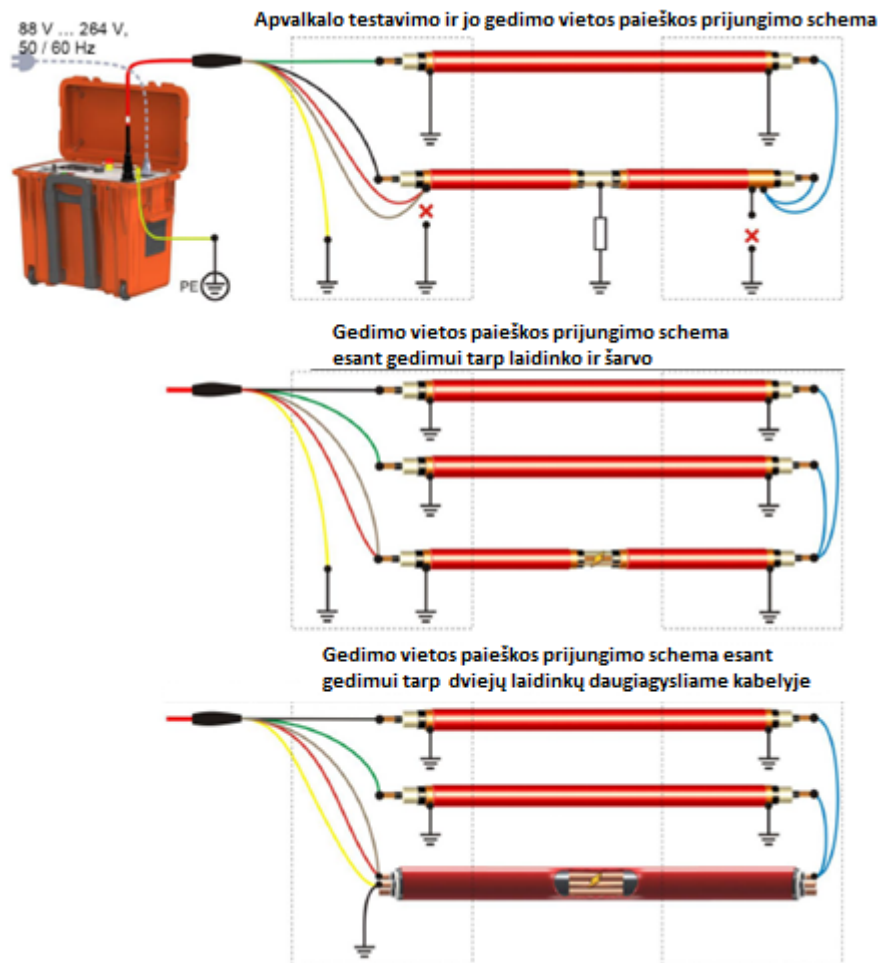


28 pav. HVB10 prietaisas

8 lentelė. *HVB10* techniniai parametrai

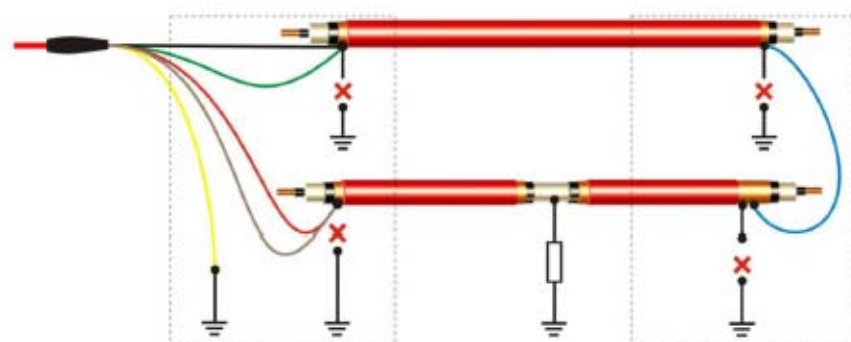
Parametras	Vertė
Išeinanti įtampa	Nuo 0 iki 10 kV nuol. sr., bipolinė
Išvesties srovė	200 mA su nuo 0,5 iki 1,5 kV, 60 mA prie 5 kV, 30 mA prie 10 kV
Maksimali leistina bandymo tikslo (objekto) šiluminė varža	25 μ F
Bandymo įtampa	Nuo 0 iki 10 kV
Apytikslės vietos nustatymo metodas	Įtampos kritimo metodas (visiškai automatinis)
Matavimo tikslumas	$\pm 0,1\%$
Tikslios vietos nustatymas	
• Įtampa	0-10 kV DC, impulsinė pasirinktinai
• Veikimo ciklas,	0, 5:1 / 1:2 / 1,5:0,5 / 1,5:3,5
• Impulso dažnis	4,8 Hz („vLoc“ A rėmas iš „VivaxMetrotech“)
• Radijo dažniai (tik prietaisai su AP dažniu)	3 Hz („SFL2“ A rėmas iš „Metrotech“) $f = 8,44$ kHz, $U_0 = 100 V_{rms}$, $P = 7 W_{peak}$ (at 500 Q)

Principinės HVB10 / MFM10 prietaiso prijungimo schemas, pateikiamos 29 pav.:



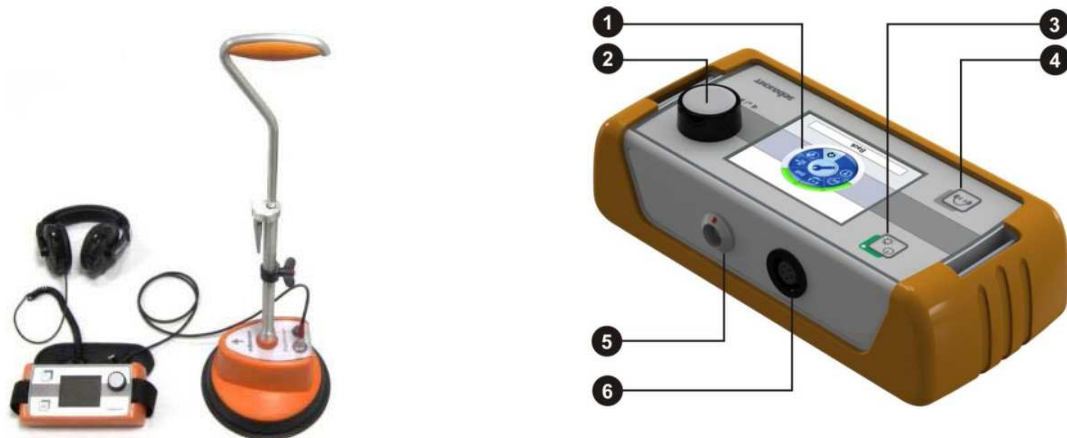
29 pav. HVB principinės prijungimo schemas nustatant gedimą laidininke

Apytikslės vietos nustatymas naudojant tik vieną pagalbinį laidininką, žr. 30 pav.



30 pav. HVB principinės prijungimo schemas nustatant gedimą apvalkale

„digiPhone“ Impulsinio pokyčio bangų imtuvas



31 pav. „digiPhone“ Impulsinio pokyčio bangų imtuvas

„digiPHONE+“ yra nešiojamasis ir universalus impulsinio pokyčio bangų imtuvas, skirtas tiksliai nustatyti stipraus kibirkščiavimo gedimus užkastuose kabeliuose.

Impulsinių pokyčių generatorius siunčia viršįtampio impulsus į sugedusio laido galą. Dėl to gedimo vietoje susidaro didelio kibirkščiavimo įtampa (lankai). Sukeliamas didelio kibirkščiavimo triukšmas sklinda į žemę ir yra įrašomas naudojant įžeminimo triukšmo jutiklį ant žemės paviršiaus. Atstumą iki gedimo galima apskaičiuoti naudojant didelio kibirkščiavimo triukšmo garsumo lygį arba laiko skirtumą tarp magnetinio impulso gavimo ir stipraus kibirkščiavimo triukšmo.

„digiPHONE+“ integruotos šios funkcijos:

- Linijos sekimas naudojant kairįjį / dešinįjį indikatorių ekrane,
- Išskirtinės akustinės savybės, leidžiančios greitai ir patikimai rasti gedimus,
- Aukšto lygio tikslumas dėl selektyvaus magnetinių laukų įrašymo,
- Akustinio ir magnetinio kanalų suaktyvinimo ribinės vertės nustatomos visiškai automatiškai,
- Pažangus fono triukšmo mažinimas (BNR),
- Automatinis artumo nutildymas (APM),
- Garsumo ribotuvas, kurį galima įjungti ir išjungti,
- Reguliuojamo aukščio teleskopinė rankena, skirta jutikliui.

9 lentelė. *digiPhone* techniniai duomenys

Parametras	Vertė
Akustinis stiprinimas	> 120 dB (galima įjungti ir išjungti įtaisą, ribojantį stiprinimą iki 84 dB (A))
Dinaminis jutiklio diapazonas <ul style="list-style-type: none"> • Akustinis kanalas • Magnetinis kanalas 	110 dB 110 dB
Jutiklio dažnių diapazonas	Nuo 100 iki 1 500 Hz
Filtravimo etapai <ul style="list-style-type: none"> • Žemųjų dažnių pralaida • Pralaida • Aukštųjų dažnių pralaida 	Nuo 100 iki 400 Hz Nuo 150 iki 600 Hz Nuo 200 iki 1500 Hz

5.2.1 Rekomenduotini žingsniai gedimo vietos paieškai

Pateikiami rekomenduojami žingsniai kabelio gedimo atveju pagal pateiktą schemą (žr. 32 pav.):

1. Gedimas – gedimo priežasties paieškos:
 - Bandymas po remonto;
 - Bandymas po instaliacijos;
 - Periodinis bandymas eksploatacijos metu;
 - Išorinis pažeidimas;
 - Izoliacijos senėjimas.
2. Kabelio tipo ir informacijos pateikimas:
 - Kodėl įvyko gedimas (iš aukščiau pateiktų variantų);
 - Kur įvyko gedimas (jei žinoma preliminarus atstumas);
 - Istorija apie kabelį – ankstesnieji gedimai, kabelio eksploatavimo trukmė;
 - Informacija apie kabelį – gamintojas, tipas, galinės movos, jungiamųjų movų skaičius, kabelio instaliavimo išpildomoji medžiaga;
 - Kitos detalės galinčios pagelbėti nustatyti gedimą – statybos ar kt. darbai kabelio linijoje, gedimo pobūdis (trumpas tarp fazių, vienos fazės išėmėjimas, apvalkalo izoliacijos pažeidimas bandymo metu ir kt.);
3. Gedimo indentifikavimas:

Gedimas:

 - Gedimas tarp 2-jų fazių;
 - Gedimas fazė į apvalkalą;
 - Gedimas fazė į apvalkalą;

- Gedimas fazė į žemę;
- Gedimas apvalkalas į žemę;

Likutinė varža gedimo vietoje:

- Izoliacijos matavimas
- DC bandymas

4. Gedimo vietos nustatymo metodo pasirinkimas:

Mažos varžos atveju (10-100 Ω):

- TDR;
- Impulsinis;
- Reflektrometrinis.

Didelės varžos atveju (>100 Ω):

- ICE;
- ARM
- Decay.

5. Gedimo vietos tikslinimas:

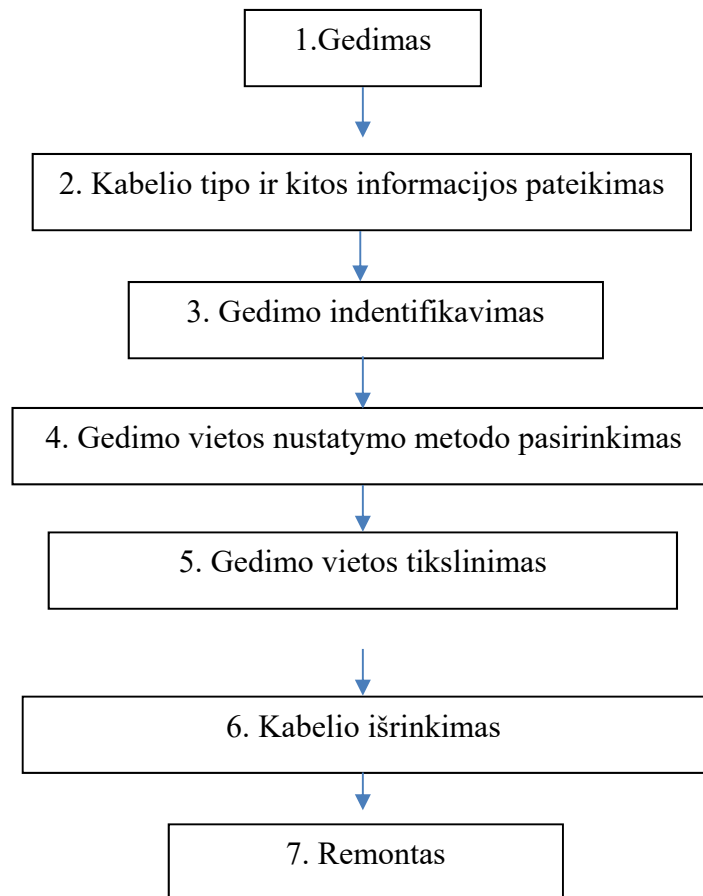
- SWG impulsų generatoriaus ir akustinio prietaiso pagalba;
- Žingsnio įtampos matavimo prietaiso pagalba.

6. Kabelio išrinkimas – dažniausiai kabeliniuose kanaluose būna sumontuota daug kabelių, todėl reikia atrinkti sugedusį, nes ne visada yra matomi gedimo požymiai (ypač vidutinės įtampos kabeliuose):

- Aukštos įtampos impulsinis metodas – paduodant impulsą ir vizualiai apžiūrint;
- Impulso krypties nustatymo metodas (angl. Pulse direction);
- Impulso stiprumo nustatymo metodas (angl. Pulse intensity).

7. Remontas:

- Privaloma vadovautis šalies įstatymiais aktais nurodančiais saugų darbą eksploatuojamuose elektros įrenginiuose;
- Galimi bandymai po remonto:
 - Dalinių išlydžių;
 - Izoliacijos testavimas;
 - Bandymas nuolatinės srovės įtampa;
 - Labai žemu dažniu;
 - Įsisotinimo testas (angl. *Soak test*) – dažniausiai atliekamas 110 kV ir aukštesnės įtampos kabeliams;
 - Apvalkalo bandymas (po apvalkalo remonto) nuolatinės srovės įtampa.



32 pav. Rekomenduojami žingsniai kabelio gedimo vietos nustatymo atveju

5.2.2 Gedimo vietos nustatymas panaudojant prietaisus

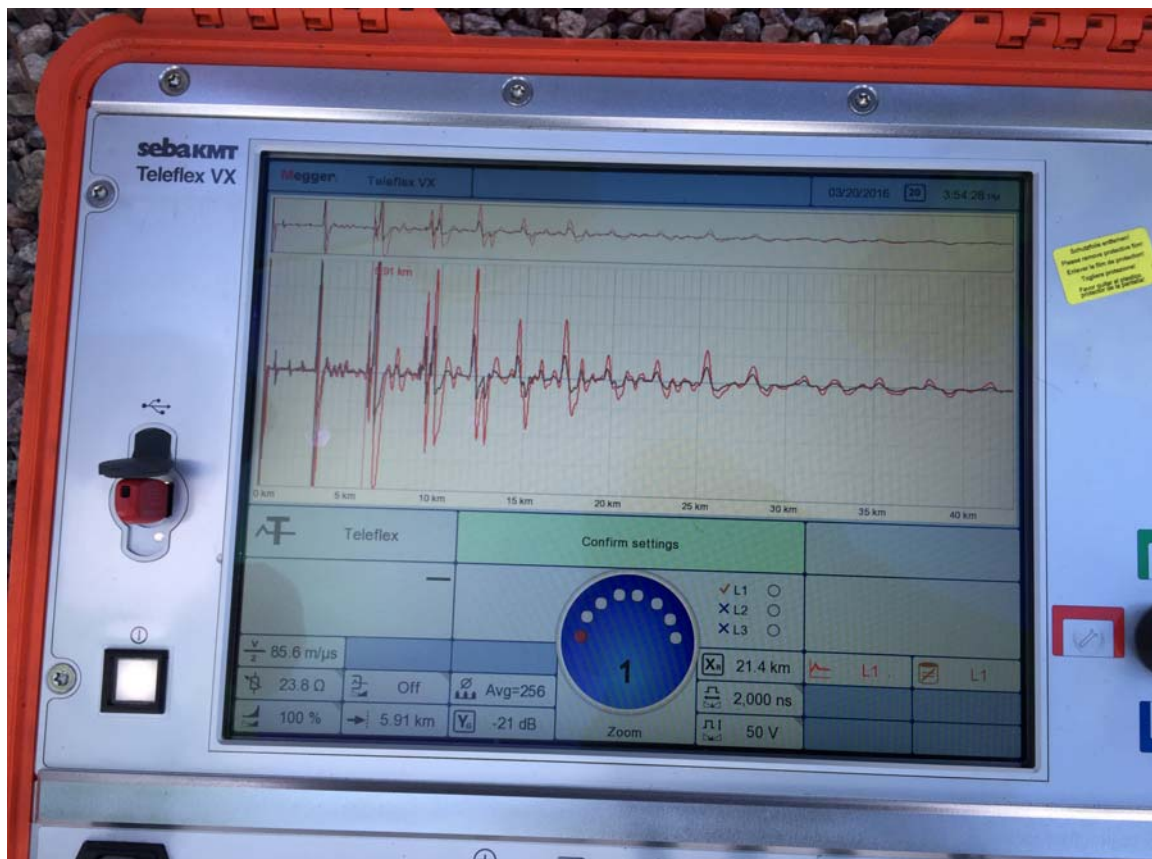
„NordBalt“ pirmasis kabelio gedimas įvyko 2016 metų kovo 19 dieną.

2016 metų kovo 20 dieną buvo organizuoti gedimo paieškos darbai.

Gedimo vietos nustatymo paieška atliekama iš Švedijos keitiklio, esančio netoli Nybro miesto. Pagal pirmines diagramas, gautas iš keitiklių stoties, numanoma kabelio gedimo vieta arčiau Nybro keitiklio, požeminėje dalyje. Požeminio kabelio ilgis iki jūros – 43 km (detalesni duomenys pateikti prie tiriamojo objekto aprašymo aukščiau). Taip pat šioje atkarpoje sumontuotos 48 movos ant vieno kabelio (per abu kabelius yra 116 movų).

Gedimą nustatinėja rangovų kabelių gedimo vietos nustatymo specialistų komanda, dalyvaujant užsakovo atstovams, naudojant „Teleflex“ (*TDR*) įrangą ir pasitelkiant metodiką [3] [5].

Palyginama išmatuota impulso kreivė su pirmine *TDR* impulso kreive (žr. 33 pav.), kuri buvo pamatuota sumontavus kabelį ir buvo nustatomas atstumas iki gedimo vietos.












33 pav. TDR impulso kreivių palyginimas

Į įrenginį įkraunama originalioji kabelio kreivė, kuri buvo išmatuota sumontavus kabelį. Nustatomi parametrai pagal 7 lentelę ir paduodamas impulsas iš *Teleflex VX* prietaiso į kabelio laidininką. Prietaiso ekrane atvaizduojamas kreivių nesutapimas (atspindys iš galimai pažeistos kabelio gedimo vietos), tai nurodo apie kabelio gedimą. Naudojant prietaiso žymeklį, nustatome ties vieta kur labiausiai nesutampa pirminė (juoda) ir išmatuotoji kreivės (raudona). Nustačius prietaisas atvaizduoja atstumą iki gedimo vietos. Nustatyta preliminari gedimo vieta **5,91 km** nuo „Nybro“ keitiklio.

Prietaiso nustatymai ir išmatuoti duomenys matomi 33 pav. ir surašomi į 10 lentelę.

10 lentelė. *TDR* prietaiso nustatymai

Funkcija	Funkcijos reikšmė	Nustatymas arba rezultatas prietaise
	Pasirinktas <i>TDR</i> režimas	Aktyvus
	Kompensavimas skirtas reguliuoti įdiegtą siųstuvo impulsų rodymo slopinimo kompensavimą. Vertė turi atitikti faktinį kabelio kompensavimą. Gali būti naudojamas tik atliekant „Teleflex“, IFL ir ARM matavimus.	23,8 Ω
	Silpimo panaikinimas- naudojant silpimo panaikinimo funkciją elektros impulso silpimas, pasireiškiantis jam sklindant per kabelį, gali būti kompensuojamas. Tai pasiekama sustiprinant įvesties signalą, kuris stiprėja ilgėjant sklidimo laikui, t. y. kuo toliau atspindžio taškas, tuo labiau sustiprinamas signalas. Proceso metu stipris didėja eksponentiškai, kol pasiekama nustatyta didžiausia vertė.	100 %
	Filtrai - kuriuo galima reguliuoti pralaidos filtrą, nustatantį dažnių diapazoną, kurį reikia išmatuoti. Šios dažnio diapazonui trukdantys signalai yra slopinami.	Išjungtas
$\frac{V}{2}$	Signalų sklidimo greitis	85,6 m/μs
	Nurodomas atstumas iki žymeklio nustatymo vietos (preliminari gedimo vieta) X ašyje.	5,91 km
	Suaktyvina Y ašies stiprinimo automatinis reguliavimas, kai yra pradama brėžti kreivė	-21dB
	Suaktyvinta X ašies mastelio automatinis reguliavimas, kai yra pradama brėžti kreivė.	21,4

	<p>Impulso plotis - galima pakoreguoti išvesties signalo impulso plotį (50 ns ... 5 μs) (pagal prietaiso galimybes).</p> <p>Gali būti naudojamas tik atliekant „Teleflex“ prietaisu atliekant TDR matavimą bei ARM matavimą.</p>	<p>2000 ns</p>
	<p>Impulso amplitudė - rankiniu būdu prireikus koreguojama impulso amplitudę. Netoli gedimo vietos gali būti tikslinga bandyti nustatyti mažesnes impulso amplitudes. Ir priešingai, atliekant labai ilgų kabelių matavimus, turėtų būti nustatoma didesnė impulso amplitudė.</p> <p>Keičiant x ašies diapazoną, pulso amplitudė automatiškai pakoreguojama iki tinkamos vertės.</p>	<p>50 V</p>

Pasiklojus prietaiso pateiktai rezultatais buvo nutarta organizuoti preliminaros kabelio gedimo vietos atkasimo darbus. 2016-03-22 Atkasus ir apžiūrėjus kabelį, gedimo vieta nebuvo patvirtinta, nes vizualios kabelio pažeidimo vietos nebuvo. Gedimo paieška tęsiama toliau kitą dieną, pasitelkiant alternatyvius gedimo vietos nustatymo būdus, kadangi *TDR* matavimai iškreipti ir nerodo atstumo iki gedimo.

2016-03-23

Pirmasis alternatyvus pasirinktas gedimo vietos nustatymo būdas – tiltelio gedimo vietos nustatymo būdas (angl. „*Murray loop bridge*“).

Tarpusavyje sujungus teigiamo ir neigiamo kabelio polius Klaipėdos keitiklyje, atliekamas matavimas „*Bridge*“ iš Nybro keitiklio.

Naudojamas MFM 10 prietaisas.

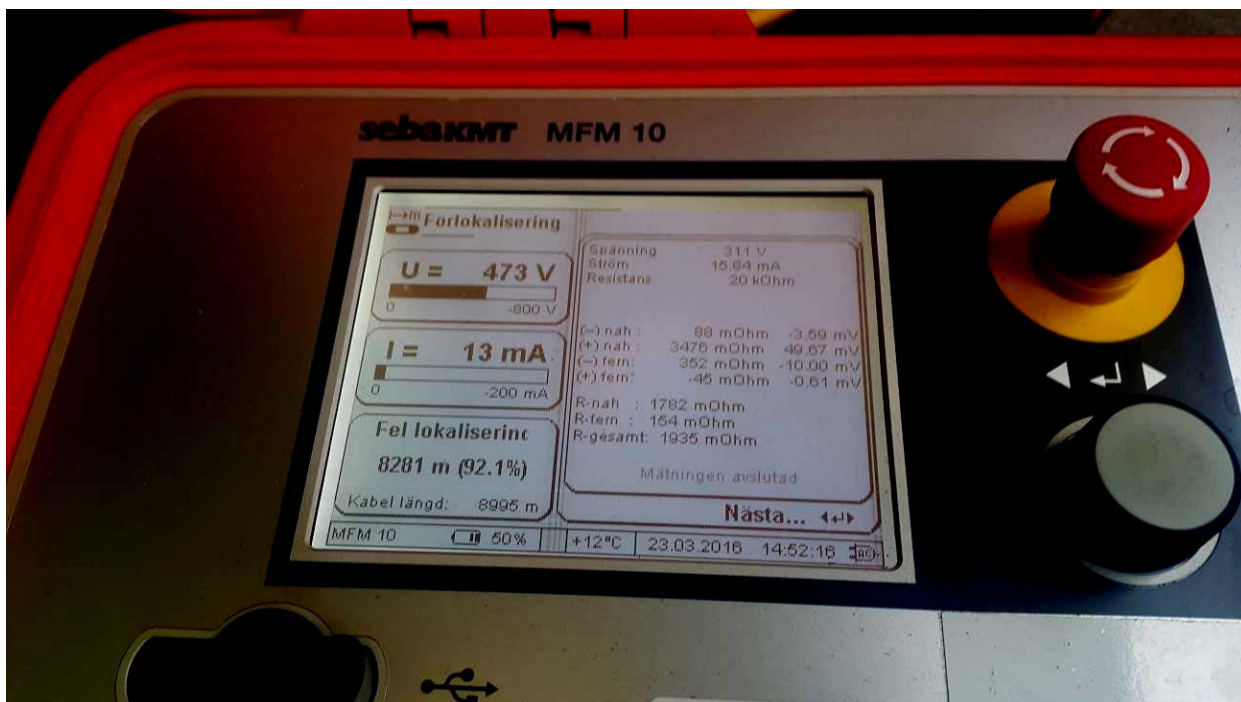
Matavimai atliekami naudojant skirtingas įtampas (500 V, 800 V, 400 V, 1000V ir t.t.).

Matavimo laidai prijungiami tokiu būdu:

1. Teigiamas prie teigiamo poliaus laidininko, o neigiamas prie neigiamo poliaus laidininko. Įžeminimo laidas prie įžeminimo. Matavimas teigiamo poliaus atžvilgiu (atstumas iki gedimo teigiamam poliuije). Parodymai išreiškiami procentais iki gedimo vietos.

2. Teigiamas prie neigiamo poliaus laidininko, o neigiamas prie teigiamo laidininko. Įžeminimo laidas prie įžeminimo. Matavimas atliekamas neigiamo poliaus atžvilgiu. (atstumas iki gedimo vietos neigiamam poliuije). Parodymai išreiškiami procentais iki gedimo vietos.

Pateikiama nuotrauka, kaip iš pirmojo matavimo:



34 pav. Gedimo nustatymas tiltelio metodo 2016-03-23

Kadangi šis prietaisas skirtas nustatyti kabelio gedimams iki 10 km atstumu (nustatymas yra tik iki 10000 m), tai reikia išreikšti bendrą „NordBalt“ kabelio ilgį ir paversti santykiniais vienetais, kurie bus išreikšti prietaiso matavime kaip metrai.

Prietaiso parametruose nustatoma 8995 m, kurie atitinka 899,5 km „NordBalt“ kabelio ilgį. Šis nustatymas visiškai neturi jokios įtakos prietaiso matavimo tikslumui. Perskaičiuojama ir nustatoma tam, kad būtų gautas rezultatas procentais nuo kabelio ilgio, todėl vėliau tiesiog bus galima apskaičiuoti atstumą metrais.

11 Lentelė. Tiltelio metodo matavimo rezultatai 1 sujungimo būdu

Matavimas	Įtampa (V)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (%)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (%)	Prietaiso paklaida per visa kabelio ilgį (%)
1	500	75,3	677,361	33,285	3,7	71,60
2	800	92,1	828,486	33,285	3,7	88,40
3	1000	62,1	558,621	33,285	3,7	58,40

12 Lentelė. Tiltelio metodo matavimo rezultatai 2 sujungimo būdu:

Matavimas	Įtampa (V)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (%)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (%)	Prietaiso paklaida per visa kabelio ilgį (%)
1	500	47,3	425,487	866,215	96,3	49,00
2	800	31,6	284,258	866,215	96,3	64,70
3	1000	72,2	649,475	866,215	96,3	24,10

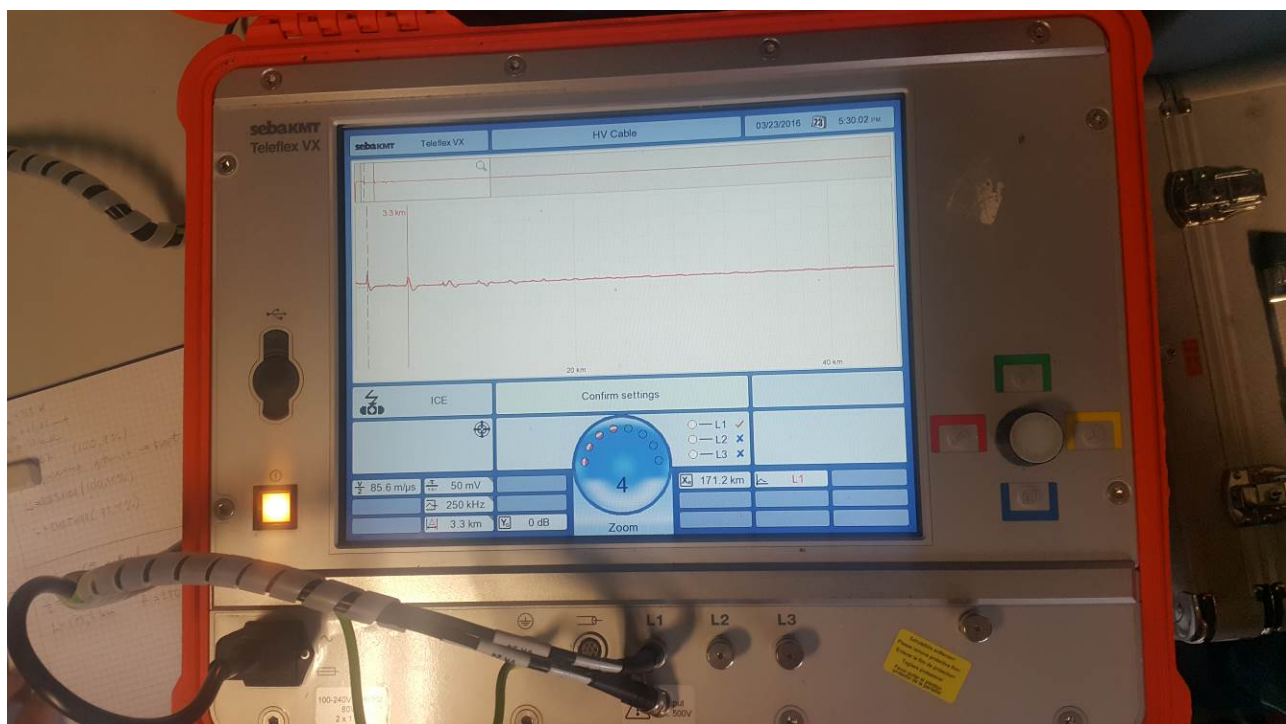
Skaitoma, kad nustatymo metodas netinkamas dėl didelių paklaidų ir vis skirtingų matavimų rezultatų. Taip pat žinoma, kad kabelio gedimas buvo ant teigiamo poliaus, o pateikiant procentinę išraišką virš 50 %, nurodoma gedimas ant neigiamo poliaus.

Antrasis būdas:

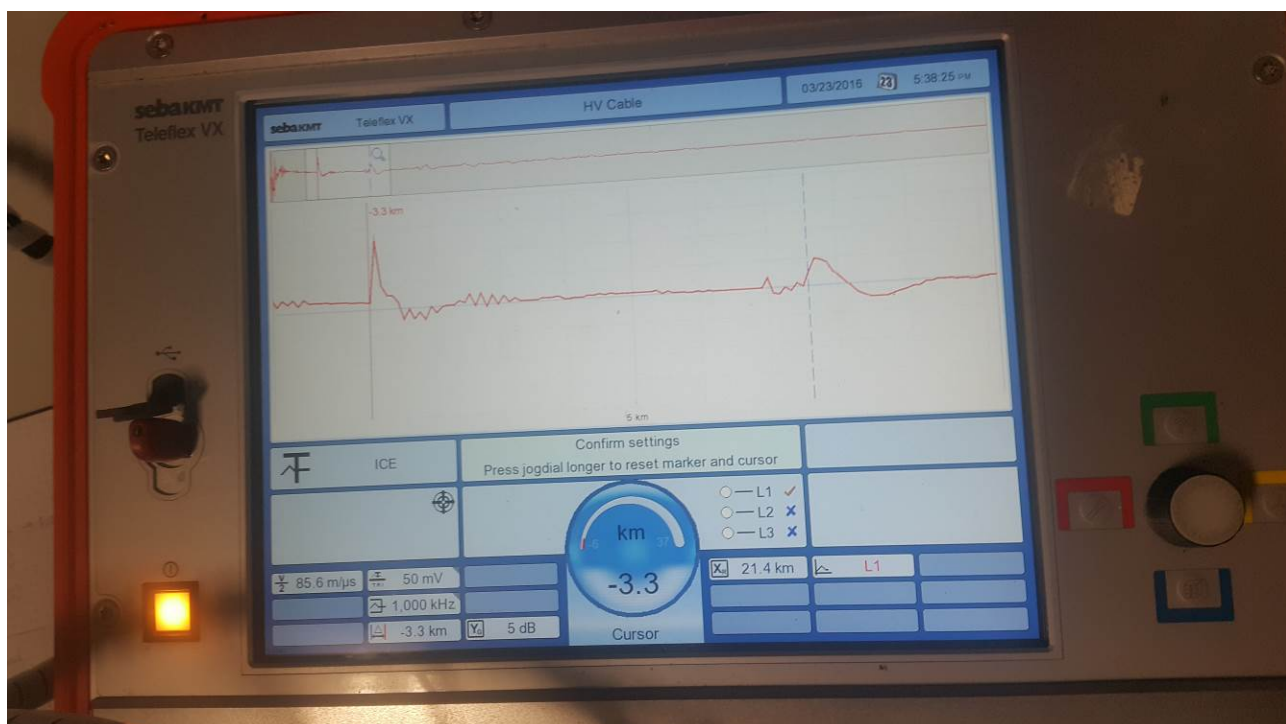
Nuspręsta išbandyti alternatyvų gedimo vietos nustatymo būdą – impulsų srovės gedimo vietos nustatymo būdą.

Impulsų srovės nustatymo būdas „ICE“, skiriasi nuo *TDR* matavimo tik, tuo kad išduodamas pasirinktos įtampos impulsas iš *SWG1750* prietaiso pagal pateiktas prietaiso specifikacijas.

„ICE“ metodas buvo atliekamas tik ant teigiamo poliaus kabelio, panaudojant „*Teleflex VX*“ prietaisą ir impulsų generatorių *SWG 1750*. Nustatytas impulso įtampa – 8 kV.



35 pav. TDR gedimo nustatymo 2016-03-23 kreivė 1



36 pav. TDR gedimo nustatymo 2016-03-23 kreivė 2

Nustatomi parametrai ir paduodamas impulsas iš *SWG1750* prietaiso į kabelio laidininką. **Teleflex VX** prietaiso ekrane atvaizduojama kreivė, kuri turi atsilenkti į teigiamą arba neigiamą pusę esant gedimui. Kreivėje (žr. 35 pav. ir 36 pav.) Matomas atspindys iš galimai pažeistos kabelio gedimo vietos. Naudojant prietaiso žymeklį, nustatome ties vieta kur kreivė atsilenkia daugiausiai. Nustačius prietaisas atvaizduoja atstumą iki gedimo vietos. Pagal gedimo

atsilenkimo kreives 34 pav. ir 35 pav., nustatyta preliminari gedimo vieta yra apie 3300 m nuo Nybro keitiklio (Kabelio mova su kabelio apvalkalo įžeminimo vieta).

Su rangovo komanda nuvykus į nustatytą preliminaria gedimo vietą, ji buvo tikslinama naudojant prietaisą „Digiphone+“. Paduodant impulsą į kabelį panaudojant *SWG1750* prietaisą, gedimo vietoje turi atsirasti iškrovos garsas ir prietaise turi atsirasti matavimo duomenys žr. 43 pav. ir 44 pav., tačiau nustatytoje preliminarioje gedimo vietoje akustinio garso nebuvo ir prietaisas neregistravo jokių gedimo požymių.

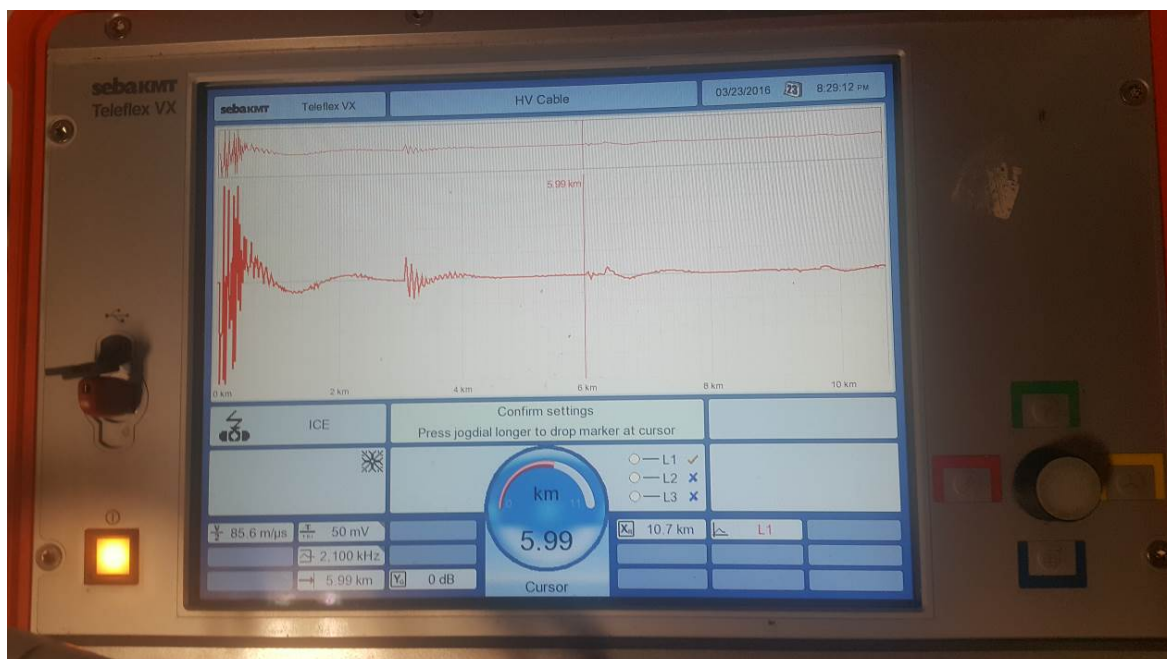
Pasitarus su rangovais, buvo nuspręsta, kad verta šį bandymą atlikti ant sveiko kabelio bei palyginti abiejų kabelių išmatuotus duomenis.

Atlikus matavimus:

Nustačius parametrus ir padavus impulsą iš *SWG1750* prietaiso į sveiko kabelio laidininką, ir sulyginus *Teleflex VX* prietaiso ekrane atvaizduotą kreivę (žr. 37 pav. ir 38 pav.) su sugedusio kabelio gauta kreive (žr. 35 pav. ir 36 pav) nustatyta, kad prietaisu pasikliauti negalima dėl identiškų rezultatų. Tiek sugedusio kabelio kreivė tiek sveiko kabelio kreivė atsilenkia ties ~3,3 km. (movos, kurioje sumontuotas šarvo įžeminimas). Tai nurodo, kad atspindys gaunamas iš movos, o ne iš gedimo vietos.



37 pav. TDR gedimo nustatymo 2016-03-23 kreivė 3



38 pav. TDR gedimo nustatymo 2016-03-23 kreivė 4

2016-03-24

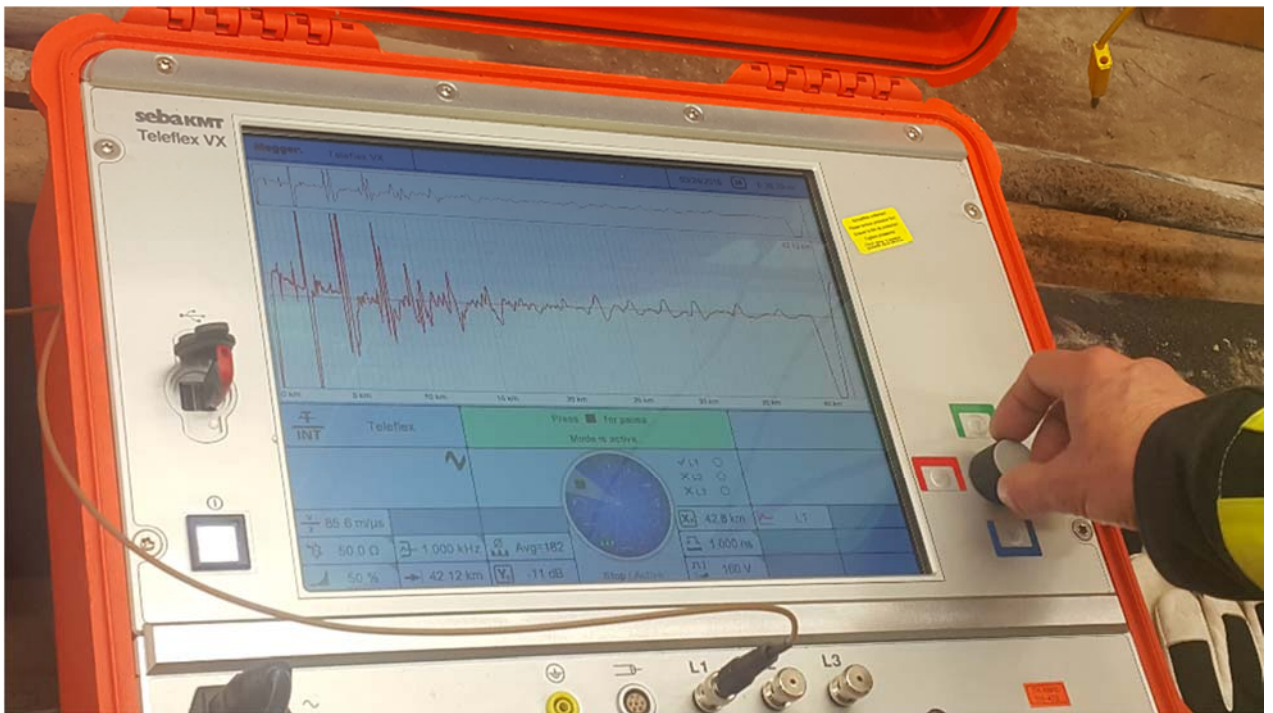
Dėl per didelio kabelio ilgio (kaip minėta, kad matuojant tiltelio būdu, kabelis turi būti sujungtas Klaipėdos keitiklyje, o bendrasis ilgis sudaro 899,5 km) netinkamas nei vienas gedimo vietos nustatymo metodas. Dėl sudėtingos paieškos, kuri truko jau 3 dienas, buvo nuspręsta atidalinėti požeminį kabelį nuo jūrinio, išardant kabelio movas prie jūros, sutrumpinant kabelį iki 42 km ir palengvinant paiešką. Taip pat pakartotinai taikomas tiltelio bandymo metodas MFM10 prietaiso pagalba.

Atidalinus teigiamo poliaus kabelį išardant movą, buvo atliktas kabelio izoliacijos varžos matavimas prietaisu MIT515 (5 kV Megger), paduodant 5 kV įtampą. Patikrinus požeminio kabelio dalį į Nybro pusę, nustatytas izoliacijos pažeidimas (52 kohm.). Patikrinus jūrinio kabelio dalį į Klaipėdos pusę, izoliacijos pažeidimas nenustatytas.



39 pav. Izoliacijos matuoklio parodymai

Teleflex VX prietaiso pagalba buvo gauta *TDR* kreivė. Pagal kreivę 39 pav. matomi dideli atspindžiai nuo movų ir nustatoma, kad gedimo vieta yra už 5 km nuo kabelių atidalintos vietos į Nybro keitiklio pusę. Kadangi pagal kreivę dėl didelių klaidinančių atspindžių, tikslios gedimo vietos patvirtinti negalima, buvo nuspręsta laikyti matavimą nepavykusiu ir išardyti antrąją movą (neigiamo poliaus) bei tiltelio metodu (angl. „*Murray loop bridge*“) atlikti matavimą (žr. 41 pav.).



40 pav. TDR gedimo nustatymo 2016-03-24 kreivė 1



41 pav. Tiltelio metodu gedimo nustatymas ant atidalinto kabelio

MFM 10 prietaiso nustatymai

Taikant tiltelio gedimo vietos nustatymo metodą iš atidalintos kabelio vietos (sujungus + ir – kabelio polius Nybro pastotėje) nustatyta preliminari gedimo vieta 5900–6300 m atstumu nuo matavimo vietos. Matavimai buvo atlikti kelis kartus, siekiant nustatyti tikslesnę vietą (visi atlikti matavimai patenka į preliminarų gedimo vietos atstumą).

Matavimo laidai prijungiamai:

1. Teigiamas prie teigiamo poliaus laidininko, o neigiamas prie neigiamo poliaus laidininko. Įžeminimo laidas prie įžeminimo. Matavimas teigiamo poliaus atžvilgiu (atstumas iki gedimo teigiamam poliuje). Parodymai išreiškiami procentais iki gedimo vietos.
2. Teigiamas prie neigiamo poliaus laidininko, o neigiamas prie teigiamo laidininko. Įžeminimo laidas prie įžeminimo. Matavimas atliekamas neigiamo poliaus atžvilgiu. (atstumas iki gedimo vietos neigiamam poliuje). Parodymai išreiškiami procentais iki gedimo vietos.

Prietaiso matavimo diapazono parinkimas – prietaise nustatomas bendras kabelio ilgis 8170 m.

Kaip jau anksčiau buvo paminėta, tikrasis ilgis turi būti perskaičiuojamas taip, kad tilptume į 10000 m, tam kad prietaisas išreikštų gedimo atstumą procentais.

81700 m, kas prilygsta kabelio atkarpai nuo Nybro iki atidalinimo vietos ir padauginus iš 2.

Žinant tikslia kabelio gedimo vietą ir turint atliktus matavimus *tiltelio metodu* galima apskaičiuoti prietaiso paklaidą.

Matavimo rezultatai:

13 lentelė. 1 Tiltelio būdu pamatuoti ir perskaičiuoti rezultatai

Matavimas	Įtampa (V)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (%)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (%)	Prietaiso paklaida per visa kabelio ilgį (%)
1	400	7,2	5,882	6,098	7,464	-0,26
2	400	7,7	6,291	6,098	7,464	0,24
3	400	7,6	6,209	6,098	7,464	0,14
4	500	7	5,719	6,098	7,464	-0,46
5	500	7,7	6,291	6,098	7,464	0,24

14 lentelė. 2 Tiltelio būdu pamatuoti ir perskaičiuoti rezultatai

Matavimas	Įtampa (V)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (%)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (%)	Prietaiso paklaida per visa kabelio ilgį (%)
1	400	93,1	76,063	75,602	92,536	0,56
2	400	92,90	75,899	75,602	92,536	0,36
3	400	92,9	75,899	75,602	92,536	0,36
4	400	93,1	76,063	75,602	92,536	0,56
5	400	93	75,981	75,602	92,536	0,46

2016-03-25

Buvo nuspręsta „pakartotinai atlikti *TDR* matavimą panaudojant *Teleflex VX* iš „Nybro“ keitiklio. Į įrenginį įkraunama originalioji kabelio kreivė, kuri buvo išmatuota sumontavus kabelį. Nustatomi parametrai pagal 10 lentelę ir paduodamas impulsas iš *Teleflex VX* prietaiso į kabelio laidininką.

Vadovaujantis išmatuota prietaiso *TDR* kreive (žr. 40 pav.), ir jau žinant atstumą iki kabelio gedimo, kuris buvo nustatytas tiltelio metodu 2016-03-24, gedimo vietos nebuvo įmanoma patvirtinti, nes ties gedimo vieta kreivė nesikeičia (galimai dėl didelės kabelio gedimo likutinės varžos).



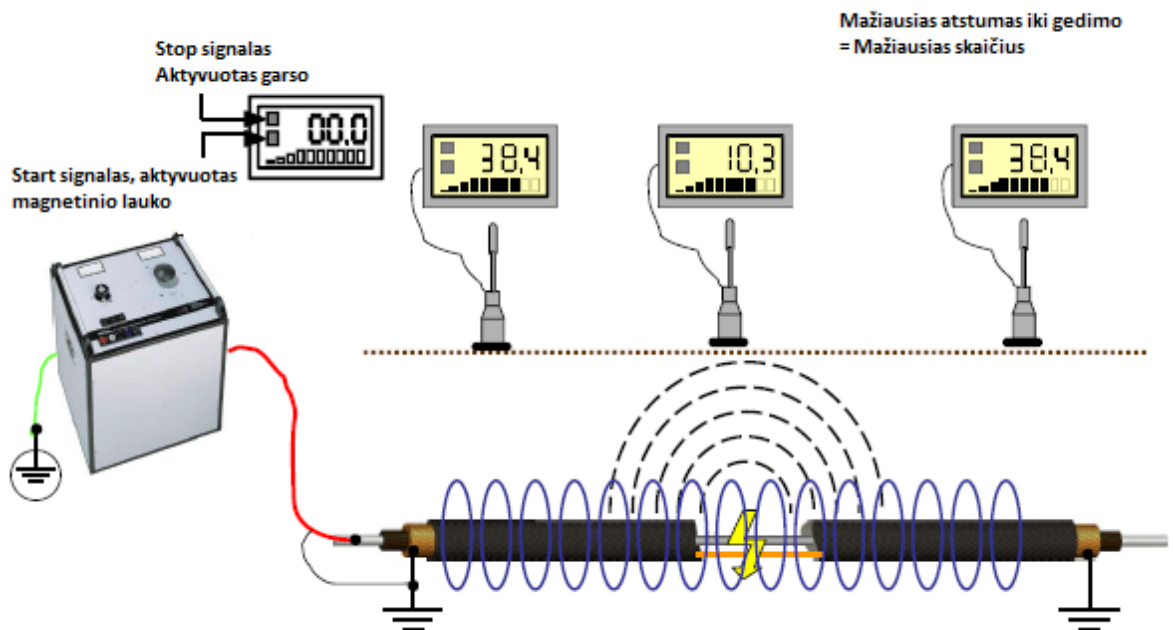
42 pav. TDR gedimo nustatymo 2016-03-25 kreivė 1

Preliminarios gedimo vietas yra tikslinamos akustiniu būdu, pasitelkiant „didPhone+“ matavimo prietaisą.

Nuvykus į preliminarią gedimo vietą, kuri buvo nustatyta prieš 2016-03-24, tiltelio metodu, buvo nustatinėjama tiksli vieta, paduodant 8 kV impulsą į kabelį ir klausomasi per ausines bei stebimi duomenys ekrane (žr. 43 pav. ir 44 pav.). Preliminarioje gedimo vietoje buvo girdimas akustinis garsas, kuris susidarė gedimo vietoje impulso išsikrovimo metu. Gedimo vieta patvirtinta ~1–2 m tikslumu.



43 pav. Digiphone prietaiso parodymai



44 pav. *digiphone* parodymų aiškinamoji schema

Laikai

Gedimo paieškos laikas nuo keitiklio atsijungimo – 7 dienos

Gedimo pašalinimo – movų montavimo laikas – 4 dienos.

(2016-03-19) gedimo vietos nustatymo išvados:

1. Dėl naujo tipo kabelio ir jam skirtų požeminių movų, pasitikėti *TDR* matavimu gedimo vietos nustatymui negalima, nes neatvaizduojama gedimo vieta. Kaip matyti iš nuotraukos, kuri buvo atlikta matuojant iš kabelio atidalinimo vietos, gedimo vieta ties 6171 m atstumu nesimato. Gedimo atveju kreivė turi būti neigiamoje / teigiamoje pusėje.
2. „ICE“ metodu pasikliauti negalima dėl klaidingai atspindinčio signalo kabelio šarvo / apvalkalo įžeminimo prijungimo vietoje ar dėl toje vietoje kabelio movos montavimo ypatumų. Taikant „ICE“ metodą gedimo vietos nustatymui, buvo matomas atstumas tik iki 1-os įžeminimo prijungimo vietos.
3. Kabelio gedimo vietos nustatymas, naudojant tiltelio metodą („Bridge method“), taipogi buvo neefektyvus dėl bendro kabelio ilgio, kurį sudarė 900 km (kai kabelio poliai sujungti tarpusavyje Klaipėdos keitiklyje). Kol kabelis buvo sujungtas (neatidalintas), matuojant buvo gaunami skirtingi duomenys (didelė paklaida bendro kabelio ilgio atžvilgiu), nurodant skirtingas gedimo vietas. Atidalinus kabelį (t.y. sutrumpinus jo ilgį) ir kelis kartus atlikus matavimą, pakankamai tiksliai (palyginus su kabelio ilgiu) buvo nustatyta gedimo vieta.
4. Neišbandytas apvalkalo gedimo nustatymo metodas dėl didelio paruošiamųjų darbų kiekio. Norint atlikti apvalkalo gedimo nustatymus visose kabelio apvalkalo transpozicinėse dėžėse „Link-box“ reikia atjungti įžeminimą (Švedijos požeminio kabelio dalyje jų yra 15 vnt., o Lietuvoje 6 vnt.). Visi „Link-Box“ užkasti po žeme. Taip pat, atkasimo darbams atlikti reikalingi privačių žmonių, kelininkų ir kitų institucijų leidimai.

Gedimo paieška Lietuvoje 2017-07-02

Tai devintasis kabelio gedimas. Pateikiami rezultatai:

1. Kabelio gedimo paieškos, panaudojant *Teleflex VX* prietaisą (*TDR* matavimo būdas) yra visiškai neefektyvios. Tai yra todėl, kad visi gedimai yra kabelio movose su didele likutine izoliacijos varža.
2. ICE gedimo nustatymo metodas, taipogi nepasitvirtino, nes yra pagrįstas *TDR* gedimo vietos nustatymo principu.
3. Tiltelio gedimo vietos nustatymo metodas (anlg. *Murrey bridge method*) atliekant matavimus ant laidininko, sujungiant kabelio teigiama ir neigiama polius kitame linijos gale, yra neefektyvus, nes parodymai pateikiami su didelėmis paklaidomis. Tokiu atveju buvo nuspręsta atlikinėti gedimo paieška ant kabelio apvalkalo.
4. Pateikiami rezultatai atliekant kabelio gedimo paiešką ant kabelio apvalkalo, atidalinant kabelio apvalkalą intarpais. Atidalinti apvalko 5,941 km atstume ir sujungti tarpusavyje, kas sudaro bendrą kabelio apvalkalo ilgį 11,882 km, kuris yra įvedamas ir prietaiso nustatymus, kad būtų matomas gedimo atstumas procentais

15 Lentelė. 1 Tiltelio būdu pamatuoti ir perskaičiuoti rezultatai

Matavimas	Įtampa (V)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (%)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (%)	Prietaiso paklaida per visa kabelio ilgį (%)
1	400	41,00	4,872	4,881	41,08	0,08
2	400	41,50	4,931	4,881	41,08	-0,42
3	400	42,00	4,990	4,881	41,08	-0,92
4	500	41,20	4,895	4,881	41,08	-0,12
5	500	41,90	4,979	4,881	41,08	-0,82

16 Lentelė. 2 Tiltelio būdu pamatuoti ir perskaičiuoti rezultatai

Matavimas	Įtampa (V)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (%)	Pamatuotas atstumas iki gedimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (km)	Atstumas iki tikrojo gedimo, kuris buvo nustatytas nuo matavimo vietos (%)	Prietaiso paklaida per visa kabelio ilgį (%)
1	400	58,10	6,903	7,001	58,92	0,82
2	400	58,90	6,998	7,001	58,92	0,02
3	400	59,00	7,010	7,001	58,92	-0,08
4	400	58,40	6,939	7,001	58,92	0,52
5	500	58,80	6,987	7,001	58,92	0,12

5.3 MACH2 sistemos registratoriaus duomenys ir gedimo vietos nustatymas

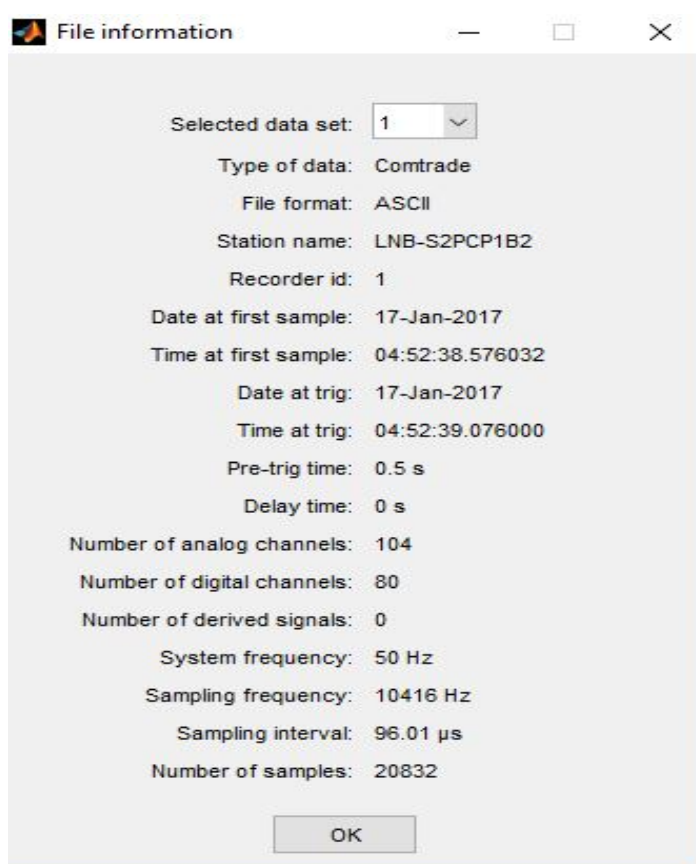
Tiriamas objektas:

NordBalt HVDC keitiklio registratoriaus duomenys, panaudojant TSPLIT programą.

17 lentelė. Keitiklio registratoriaus sistemos techniniai parametrai

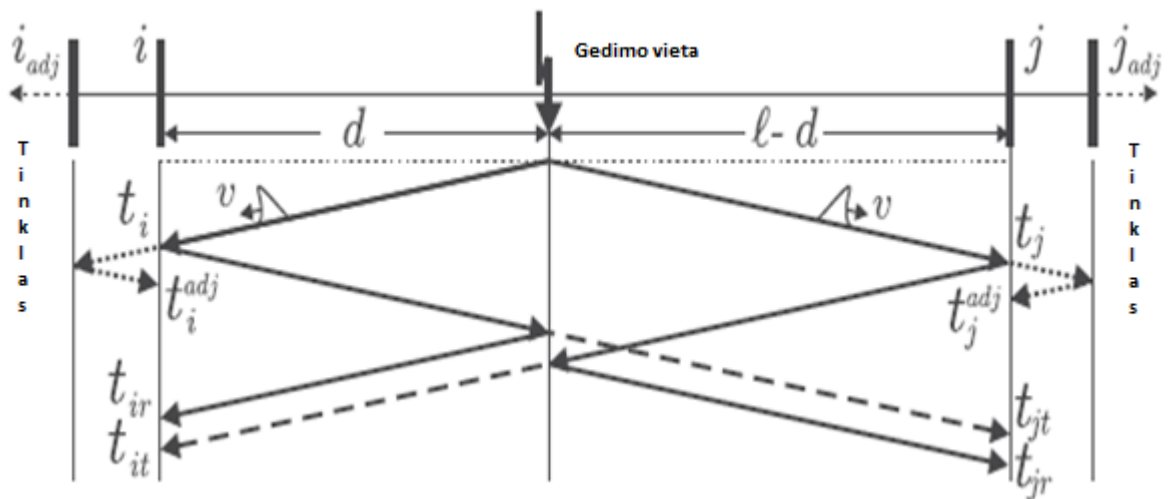
<i>TFR</i> (ang. <i>Trace fault recorder</i>) (registratoriaus failo pavadinimas)	Skenavimo periodas (angl. <i>Sampe period</i>)	Skenavimo dažnis (angl. <i>Sample rate</i>)	Laikas prieš gedimą (angl. <i>Pre-time</i>)	Laikas po gedimo (angl. <i>Post-time</i>)
	(μ s)	(Hz)	(s)	(s)
PCP MC1 Id:1	100	10000	0,5	1,5

Žemiau pateikia nuotraukos (žr. 45 pav.) ir registratoriaus sistemos, kurioje matomi tikslesni registratoriaus duomenys:



45 pav. „NordBalt“ registratoriaus informacija iš comtrade failo

Pasinaudojant duomenų analizavimo sistema TSPLIT (comtrade failų analizei) išanalizuojamos kreivės ir pagal išaiškinimą ir formulę iš mokslinio straipsnio [14], nustatomas atstumas iki gedimo.



46 pav. Gedimo bangos sklidimo schema

46 pav. parodyta laiko ir erdvės schema yra naudojama iliustruojant gedimų sukeltų TW (angl. *Traveling wave*) sklidimą palei ilgio l perdavimo liniją, jungiančią linijų gnybtus, kuriuose įrengti gedimų nustatymo įtaisai: vietos terminalas (pastotės šynos i) ir nuotolinis terminalas (kitos pastotės šynos j). Siekiant paaiškinti pagrindinius klaidų šaltinius, susijusius su TW pagrįstais gedimų nustatymo algoritmais, atsižvelgiama į gretimus perdavimo linijas, jungiančias pastotes i_{adj} ir j_{adj} su i ir j šynomis.

Kaip parodyta 46 pav. pavaizduotoje diagramoje: gedimas yra atstumu d nuo šynų i ; pirmas įvykis TW pasiekia i ir j šynas atitinkamai momentais t_i ir t_j . Atsirandantys iš gedimo taško t_i ir t_j , sklinda atgal atitinkamai i ir j šynas t_{ir} ir t_{jr} , todėl gaunami kreivių iškreipymai šynose registratoriaus kreivės kaip pasikartojančios bangos. Šios bangos pasireiškia į šynas kaip i_{adj} ir j_{adj} , pasiekia stebimas šynas i ir j atitinkamai t_{adj} ir t_j .

Taigi, darant prielaidą, kad "Šynos i " yra atskaitos taškas, klasikinis matavimas iš vieno terminalo, apskaičiuoja atstumą iki gedimo vietos naudojant šią formulę:

$$\tilde{d} = 0.5(t_{ir} - t_i)v; \quad (21)$$

Čia:

\tilde{d} -atsumas iki gedimo išreikštas km;

t_{ir} – bangos sklidimas (žr. 46 pav.);

t_i - bangos sklidimas (žr. 46 pav.);

v -bangos sklidimo greitis pagal kabelio specifikacija, kuris lygus 166464 km/s.

Jeigu abu terminalai yra tarpusavyje sinchronizuoti, tai galima naudoti šią formulę:

$$\tilde{d} = 0.5[l - (t_{ir} - t_i)v];$$

(22)

Čia:

\tilde{d} -atsumas iki gedimo išreikštas km;

t_{ir} – bangos sklidimas (žr. 46 pav.);

t_i - bangos sklidimas (žr. 46 pav.);

l - kabelio bendras ilgis;

v -bangos sklidimo greitis pagal kabelio specifikacija, kuris lygus 166464 km/s.

Pasitelkiant aukščiau išvardintas formules ir žemiau pateiktas kreives bei žinant tikslų gedimo atstumą, perskaičiuojama gedimo vieta pagal realias registratoriaus kreives.

Taip pat panaudojama ir rekomenduojama gedimo vietos nustatymo kreivė, kad palyginti gedimo vietos nustatymo tikslumą.

Rekomenduojama gedimo vietos nustatymo formuluotė, įsivaizduojant, kad į abu terminalus yra gaunamos gedimo sklidimas yra kokybiškas ir gerai aptiktas, nuo gedimo vietos, tai d ir l gali būti išskaičiuoti sekančiai:

$$d = 0.5[(t_{ir} - t_i)v];$$

(23)

$$l - d = 0.5(t_{jr} - t_j)v;$$

(24)

Čia:

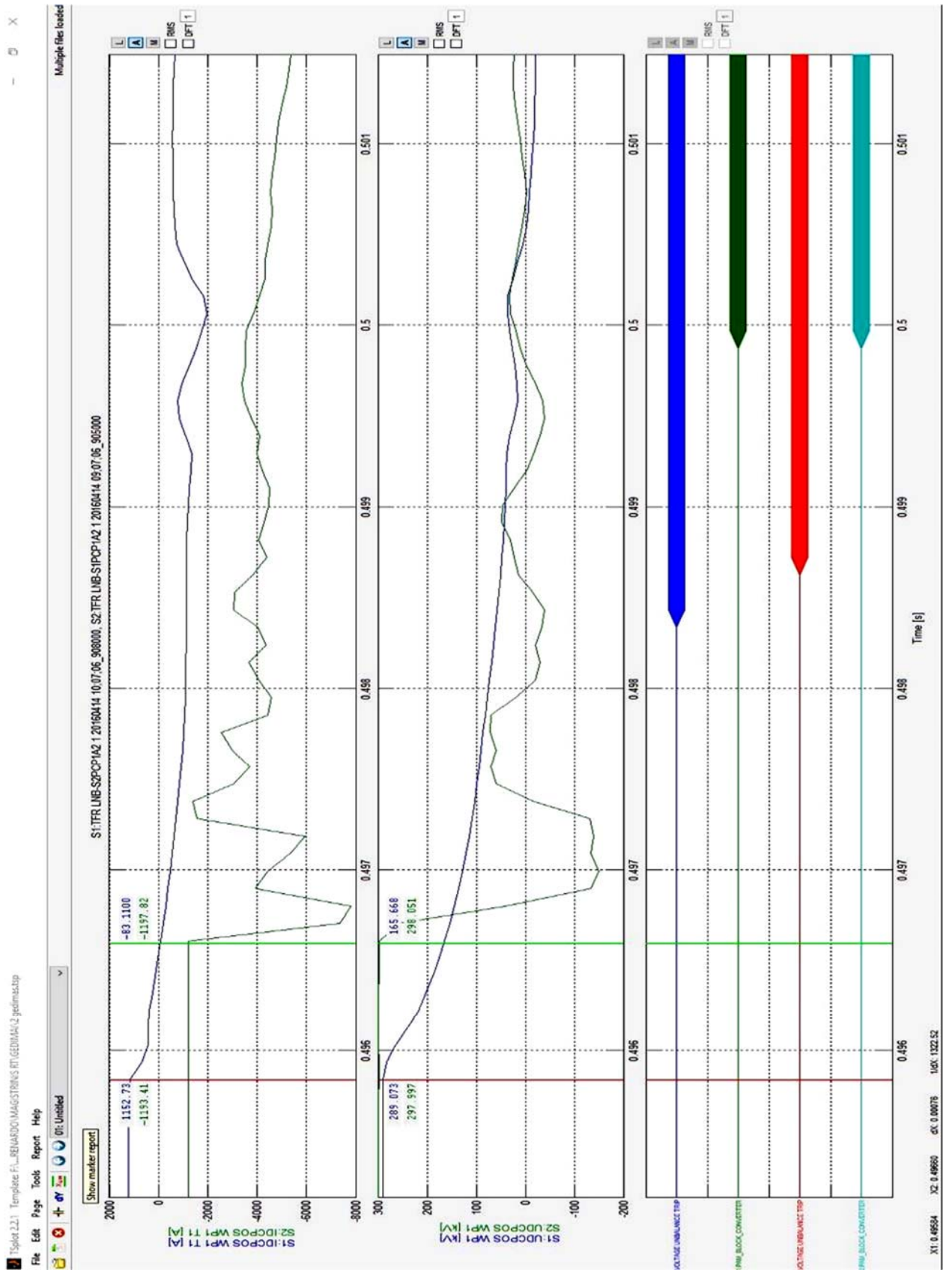
t_{ir} – bangos sklidimas (žr. 46 pav.);

t_i - bangos sklidimas (žr. 46 pav.);

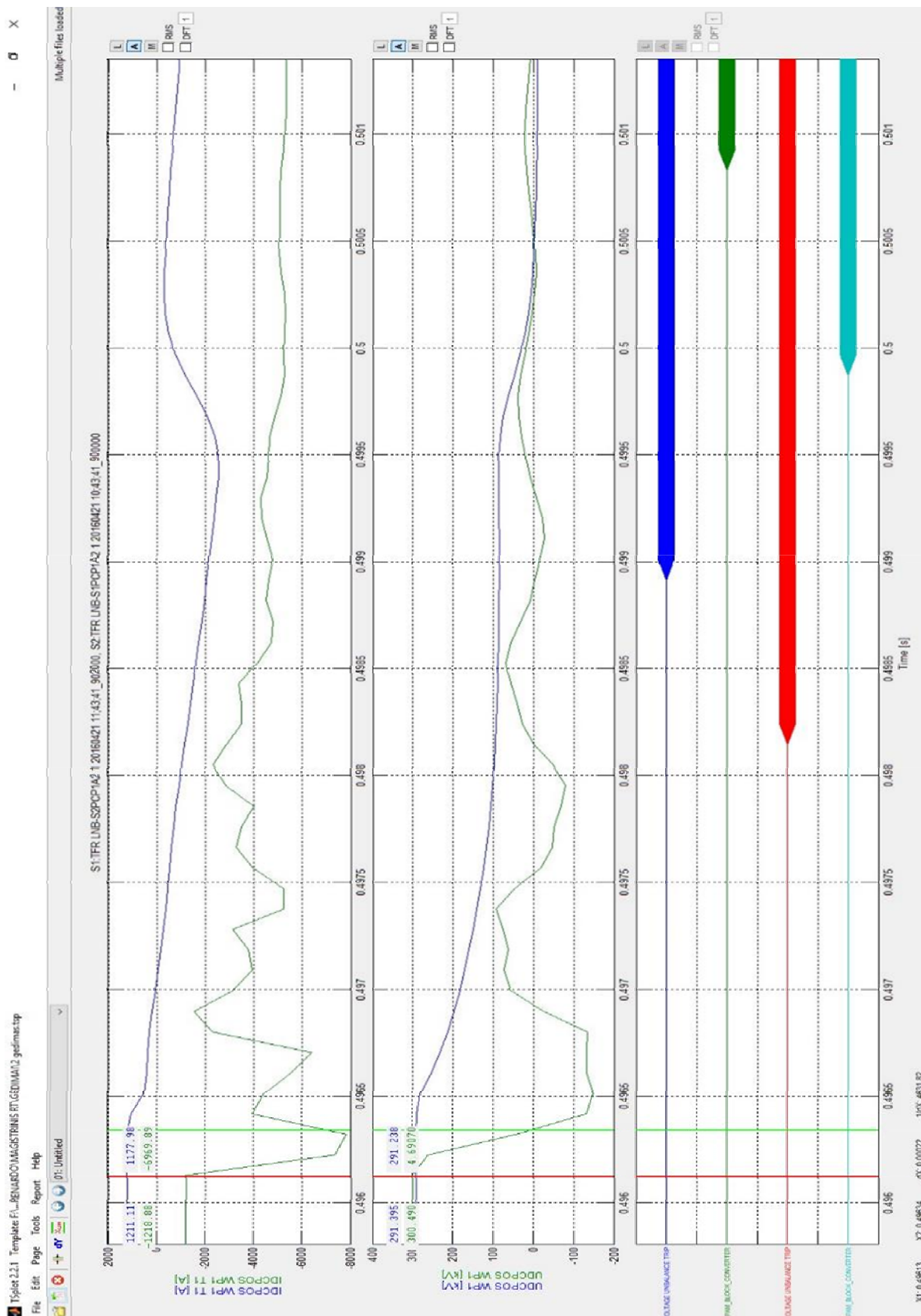
l - kabelio bendras ilgis;

v -bangos sklidimo greitis pagal kabelio specifikacija, kuris lygus 166464 km/s.

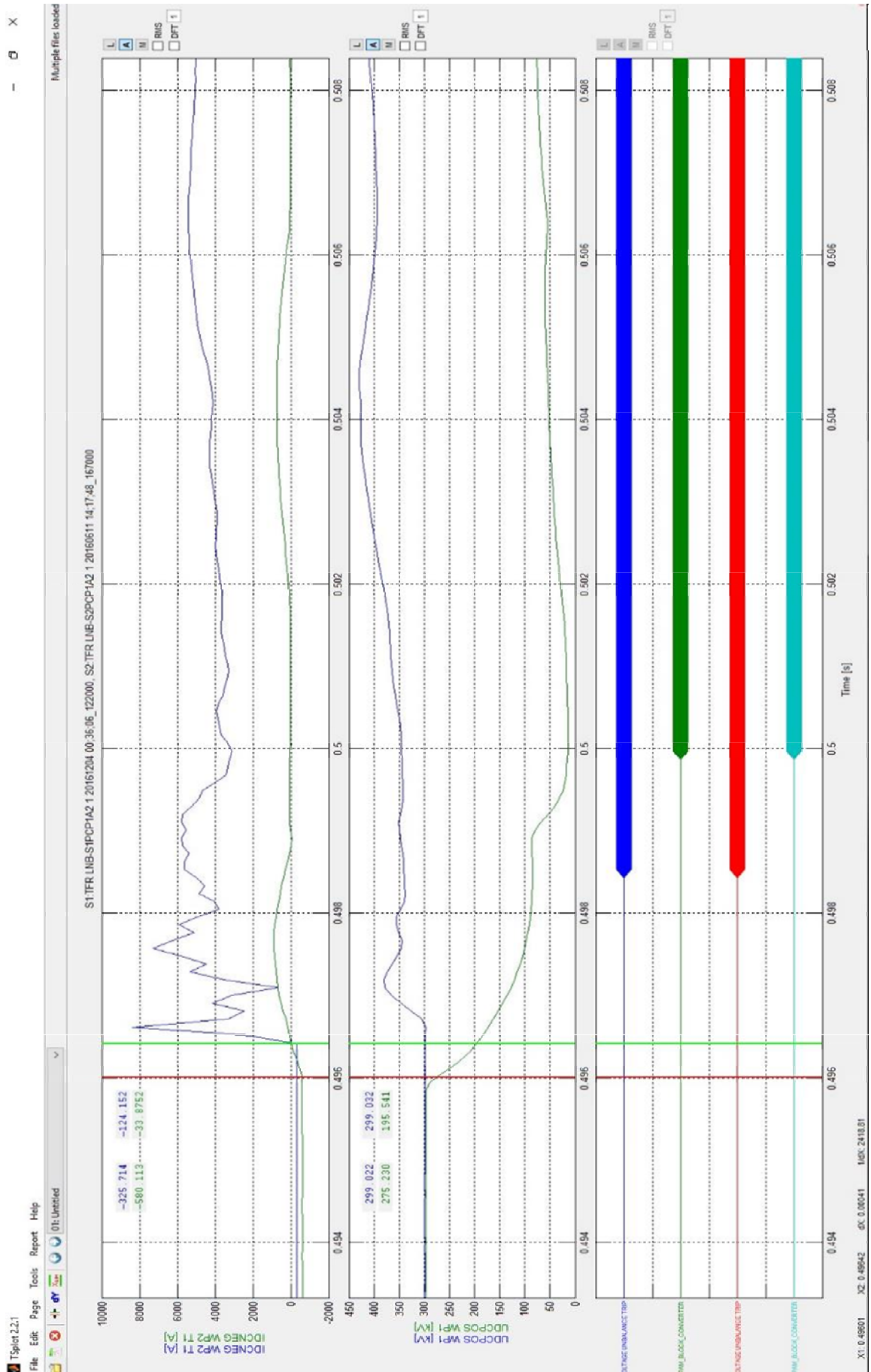
47 pav. TFR gedimo kreivės 2016 balandžio 14 dienos:



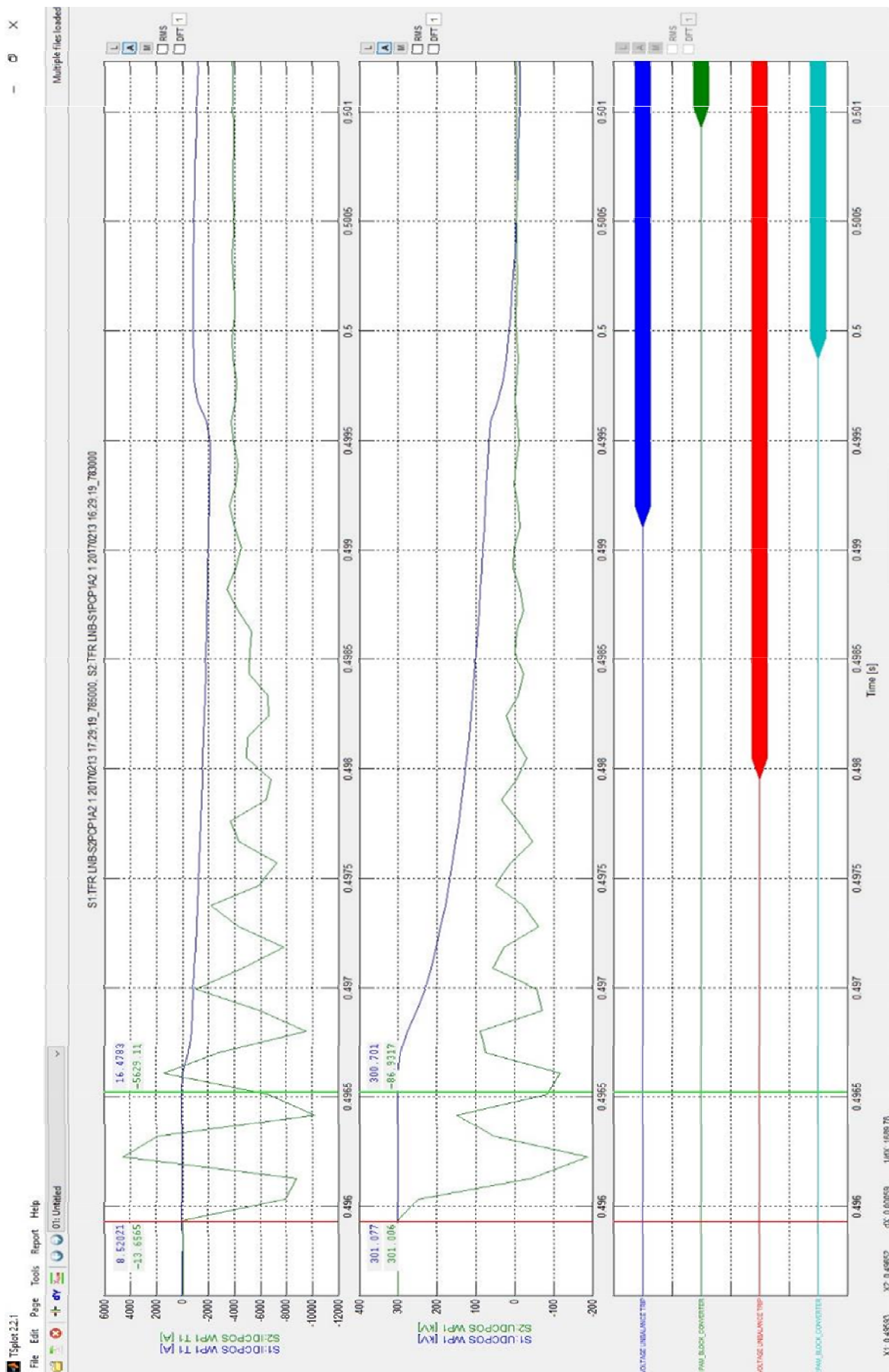
48 pav. TFR gedimo kreivės 2016 balandžio 21 dienos:



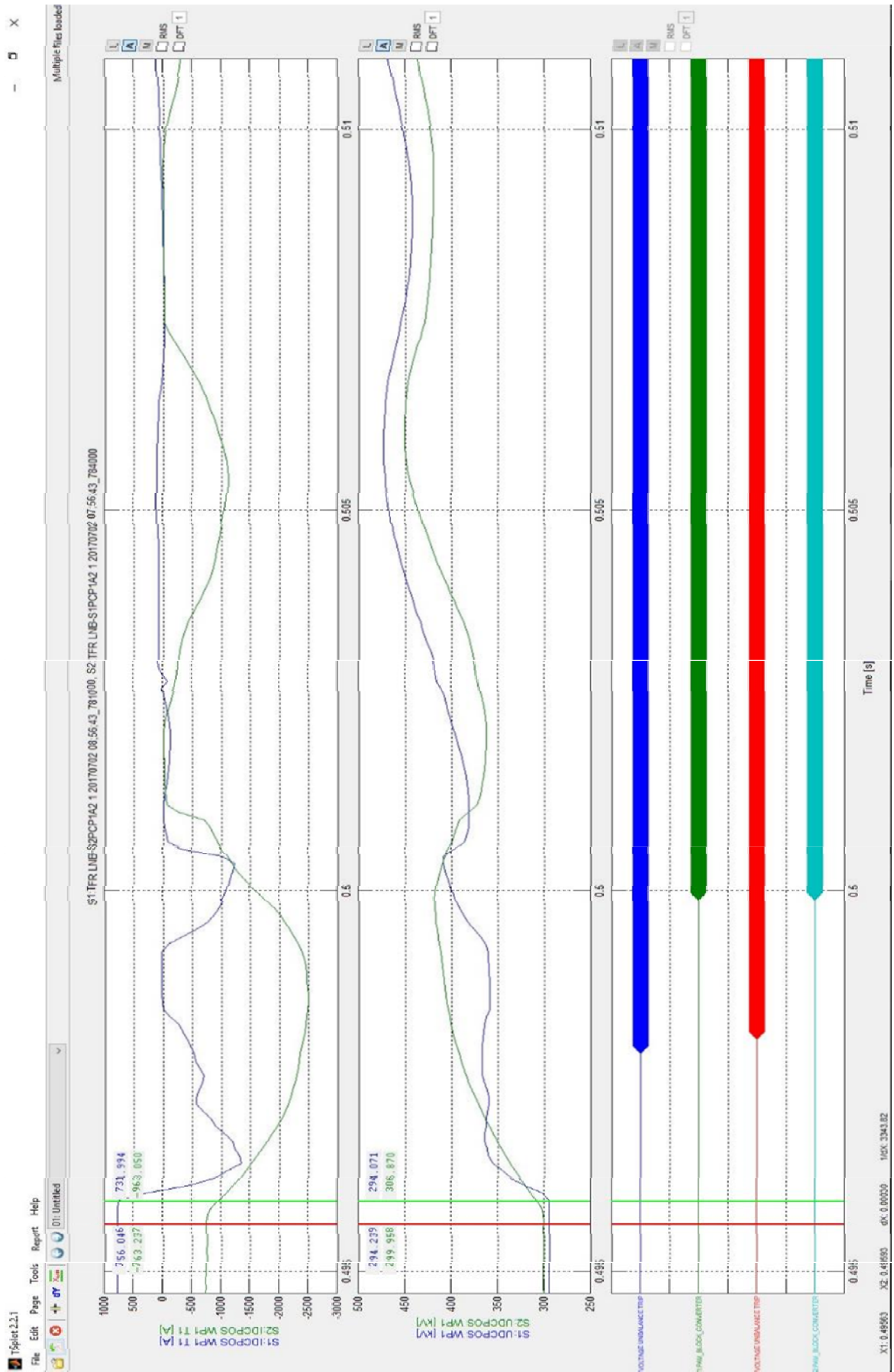
49 pav. TFR gedimo kreivės 2016 gruodžio 04 dienos:



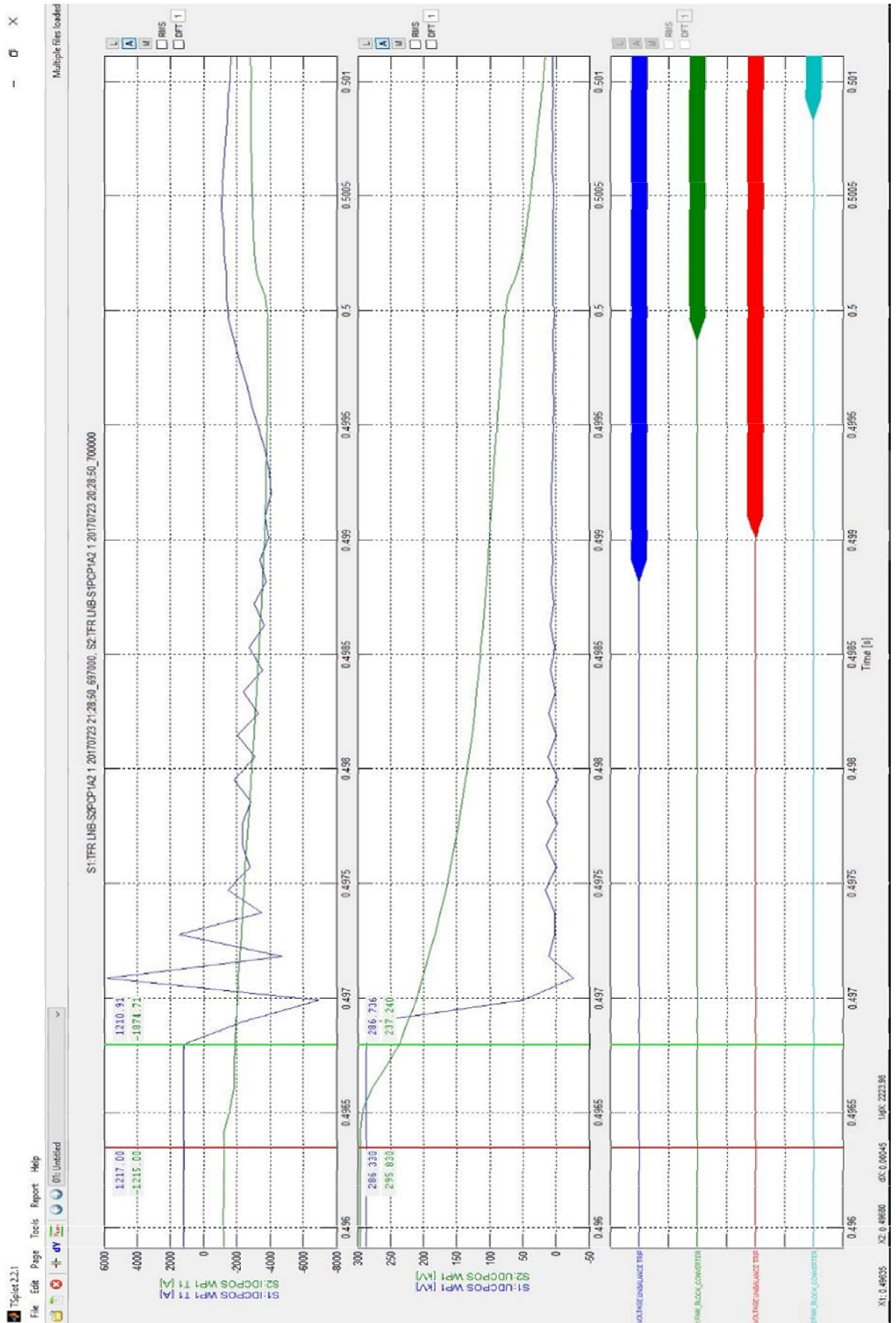
50 pav. TFR gedimo kreivės 2017 vasario 13 dienos:



51 pav. TFR gedimo kreivės 2017 liepos mėn. 2 dienos:



52 pav. TFR 2017 liepos mėn. 31 dienos gedimo kreivės:



Išanalizavus kreives, surašomi gauti duomenys pagal 46 pav. Gedimo bangos sklidimo schema. Atliekami skaičiavimai, panaudojant dviejų keitiklių duomenis, pagal aukščiau pateiktas formules (21) ir schemą (žr. 46 pav.):

18 lentelė 15. *TFR* duomenys ir gedimo atstumo išskaičiavimai

Gedimo Nr.	Polius (Teigiamas / Neigiamas)	Įvykio data	Atstumas iki gedimo (km)	Išskaičiuotas atstumas iki gedimo (km) formulė (21)	t_i LT (s)	t_j SE (s)	Skirtumas tarp 2 keitiklių dx (s)
8	Teigiamas	2017-02-13	7,315	49,1069	0,49593	0,49652	0,00059
6	Neigiamas	2016-12-04	31,646	56,5978	0,49575	0,49643	0,00068
2	Teigiamas	2016-04-14	37,743	64,0886	0,49584	0,49661	0,00077
3	Teigiamas	2016-04-21	38,748	17,4787	0,49613	0,49634	0,00021
10	Teigiamas	2017-07-23	1,962	37,4544	0,49635	0,49680	0,00045
9	Neigiamas	2017-07-02	4,881	24,9696	0,49563	0,49593	0,0003

19 lentelė. Gedimo vietos paklaidos

Gedimo Nr.	Atstumas iki gedimo (km)	Atstumas iki gedimo (%)	Išskaičiuotas atstumas iki gedimo (km) formulė (22)	Išskaičiuotas atstumas iki gedimo (%)	Paklaida (%)
8	7,315	1,63	49,1069	10,91	9,29
6	31,646	7,03	56,5978	12,58	5,54
2	37,743	8,39	64,0886	14,24	5,85
3	38,748	8,61	17,4787	3,88	-4,73
10	1,962	0,44	37,4544	8,32	7,89
9	4,881	1,08	24,9696	5,55	4,46

Moksliniame straipsnyje [14] siūlomi gedimo vietos nustatymo būdu, kuris yra išaiškintas aukščiau, atliekami skaičiavimai panaudojant formules (22) (23):

20 lentelė. Siūlomo gedimo vietos nustatymo metodo skaičiavimo rezultatai:

Gedimo Nr.	Formulė	Keitiklis	Atstumas iki gedimo (km)	Išskaičiuotas atstumas iki gedimo (km)	t_{ir} / t_{jr} (s)	t_i / t_j (s)	Skirtumas dx (s)
8	(23)	Nybro	7,315	24,13728	0,49594	0,49623	0,00029
	(24)	Klaipėda	442,685	385,36416	0,49661	0,50124	0,00463
6	(23)	Nybro	31,646	16,6464	0,49641	0,49661	0,00020
	(24)	Klaipėda	418,354	471,92544	0,49608	0,50175	0,00567
2	(23)	Nybro	37,743	24,9696	0,4966	0,4969	0,00030
	(24)	Klaipėda	412,257	415,32768	0,49583	0,50082	0,00499
3	(23)	Nybro	38,748	24,13728	0,49613	0,49642	0,00029
	(24)	Klaipėda	411,252	336,25728	0,49635	0,50039	0,00404
10	(23)	Klaipėda	1,962	24,13728	0,4968	0,49709	0,00029
	(24)	Nybro	448,038	499,392	0,49641	0,50241	0,006
9	(23)	Klaipėda	4,881	14,98176	0,49577	0,49595	0,00018
	(24)	Nybro	445,119	431,14176	0,49575	0,50093	0,00518

21 lentelė. Siūlomo gedimo vietos nustatymo metodo paklaidos:

Gedimo Nr.	Keitiklis	Atstumas iki gedimo (km)	Atstumas iki gedimo (%)	Išskaičiuotas atstumas iki gedimo (km)	Išskaičiuotas atstumas iki gedimo (%)	Paklaida (%)
8	Nybro	7,315	1,63	24,1373	5,36	-3,74
	Klaipėda	442,685	98,37	385,364	85,64	12,74
6	Nybro	31,646	7,03	16,6464	3,70	3,33
	Klaipėda	418,354	92,97	471,925	104,87	-11,90
2	Nybro	37,743	8,39	24,9696	5,55	2,84
	Klaipėda	412,257	91,61	415,32768	92,30	-0,68
3	Nybro	38,748	8,61	24,13728	5,36	3,25

	Klaipēda	411,252	91,39	336,25728	74,72	16,67
10	Klaipēda	1,962	0,44	24,13728	5,36	-4,93
	Nybro	448,038	99,56	499,392	110,98	-11,41
9	Klaipēda	4,881	1,08	14,98176	3,33	-2,24
	Nybro	445,119	98,92	431,14176	95,81	3,11

6. Išvados

1. Išanalizuota „NordBalt“ aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklio kabelio jungtis. Pateikta kabelio specifikacija:
 - 13 km požeminio kabelio paklota LT teritorijoje; 13 požeminių movų (1 poliuje);
 - 400 km jūrinio kabelio, kuris driekiasi nuo Lietuvos Neringos pakrantės iki Švedijos pakrantės; 8 jūrinės movos (1 poliuje);
 - 40 km požeminio kabelio paklotas SE teritorijoje; 48 požeminės movos SE pusėje (1 poliuje);
 - Bendras kabelio ilgis – 450 km.
 - „NordBalt“ kabelio puslaidininkinio izoliacijos sluoksnio storis – 1,5 mm;
 - Izoliacijos storis – 18 mm;
 - Išorinio izoliacijos puslaidininkinio sluoksnio storis – 1,4 mm;
 - Kabelio gyslos skersmuo – 49,3;
 - Viso izoliacinio sluoksnio spindulys – 24,65 mm, išorinio sluoksnio – 45,55 mm;
 - Bendras kabelio skersmuo – 123 mm.
 - Armavimo pakloto storis – 3 mm,
 - Kabelio skersmuo vertinant sluoksnius iki armavimo pakloto – 96,5 mm.
 - Armavimo sluoksnio skersmuo – 106,5 mm;
 - Polipropileno siūlų storis – 4 mm;
 - Kabelio gyslos varža – 0,0172 W;
 - Viršįtampių greitis – 166464 km/s;
 - Bendras šilumai laidžių sluoksnių storis nuo izoliacijos – 7 mm (išskyrus metalinius sluoksnius);
 - Kabelio išorinio paviršiaus plotas – 0,38642 m²/m;
 - Jūros dugno temperatūra – 8 °C.
 - Pradinė kabelio temperatūra - 8 °C didesnė nei jūros dugno temperatūra;
 - Jūrinio kabelio izoliacijos masė (10 km) – 42866,32 kg.
 - Kabelio izoliacijos skerspjūvio plotas – 0,004609282;
 - Priimamas nemetalinių sluoksnių storis nuo izoliacijos iki paviršiaus – 1 cm.

Pateikti sistemos registratoriaus TFR duomenys:

<i>TFR</i> (ang. <i>Trace fault recorder</i>) (registratoriaus failo pavadinimas)	Skenavimo periodas (angl. <i>Sampe period</i>)	Skenavimo dažnis (angl. <i>Sample rate</i>)	Laikas prieš gedimą (angl. <i>Pre-time</i>)	Laikas po gedimo (angl. <i>Post-time</i>)
	(μ s)	(Hz)	(s)	(s)
PCP MC1 Id:1	100	10000	0,5	1,5

2. Panaudojant keitiklio sistemos registratoriaus *TFR* (angl. *Trace Fault Recorder*) atlikti gedimo vietos nustatymo paskaičiavimai. Panaudojant gedimo bangos sklidimo laiką iki abiejų keitiklių ir jų skirtumą, naudojant gedimo nustatymo metodiką „*Two-Terminal Transmission Line Fault Location Using Traveling Wave*“, buvo nustatytos gedimo vietos ir paklaidos, kurios siekė iki 9 % .

Remiantis moksliniais straipsniais [14] [16] [21] nustatyta, kad, panaudojant sistemos registratoriaus kreives, reikia detalesnių duomenų. Nustatytos galimos duomenų paklaidų priežastys:

- Sistemos registratoriaus skenavimo dažniai su GPS laikrodžiu.
 - GPS laikrodžio delsa ir jos poveikis registratoriaus duomenų užregistravimui.
 - Abiejų keitiklių registratorių sistemų sinchronizavimas tarpusavyje laikai.
 - Duomenų sukalibravimas, atliekant analizę.
 - Srovinių ir įtampinių grandinių skenavimo dažnis (šiuo metu 10 kHz arba 96,01 μ s, kas prilygta 15,9 km paklaidai nustatant gedimą).
3. Remiantis moksliniais straipsniais, nustatyta, kad paklaidą galima sumažinti iki 5%, nustatant gedimą iš artimesnio keitiklio iki gedimo vietos, palyginus su kabelio gedimo vietos nustatymu naudojant dviejų keitiklių metodą.
 4. Tyrime yra išanalizuoti ir pateikti šie nestacionarieji gedimo vietos nustatymo metodai: Tiltelio gedimo vietos nustatymo būdas (angl. *Murray loop bridge*); Reflektometrinis *TDR* (angl. *Time domain reflectometer*); ICE - impulsinės srovės būdas (angl. *Impulse current envelope*); Apvalkalo gedimo vietos nustatymas *Tiltelio* būdu.
 5. Atliekant gedimo vietos nustatymus *TDR* būdu ant „NordBalt“ kabelio, gedimų nustatyti nepavyko. Panaudojant metodikas ir mokslinius straipsnius buvo nustatyta, kad šiuo būdu sudėtinga nustatyti gedimus kabeliuose, jei yra didelė likutinė varža gedimo vietoje. Kadangi visi gedimai „NordBalt“ kabelyje buvo movose ir su ganėtinai didele likutine varža, tai laikyti *TDR* gedimo vietos nustatymo būdą netinkamu negalima.

ICE gedimo vietos nustatymo metodas yra analogiškas *TDR* metodui. Skiriasi tik paduodamo impulso įtampa (*TDR* – žema įtampa >2kV, ICE – aukšta įtampa <32 kV). Šis metodas skirtas nustatyti gedimus esant didelėms likutinėms varžoms gedimo vietoje. Remiantis metodikomis ir moksliniais straipsniais nustatyta, kad, dėl didelio kiekio movų ir ilgo kabelio, gali būti gaunami atspindžiai nuo movų, kurie nuslopina gedimo vietos kreivę.

Tyrimo metu nustatytos prietaiso paklaidos parodo, kad, atliekant matavimus *Tiltelio metodu* ant ilgesnių kabelių (pvz. 900 km), paklaida siekia 70%. Tuo tarpu, ant trumpesnių kabelių atliekami matavimai (atlikti matavimai iki 80 km kabelio atkarpai) parodo, kad paklaida siekia tik iki 1%.

Kabelio gedimo vietos nustatymas *Tiltelio būdu* (angl. *Murrey Bridge Method*) buvo išbandytas kabelio gedimo vietos paieškoje, atliekant matavimus ant kabelio apvalkalo, kuris pasiteisino ir nurodė tikslią gedimo vietą, nustatytas tikslumas siekė 0,02 – 0,8 % (7 km ilgyje).

6. Rekomenduojama, esant galimybėms, padidinti sistemos registratoriaus srovinių ir įtampinių grandinių skenavimo dažnį.

Kaip alternatyvus kabelio gedimo vietos nustatymo metodas gali būti panaudotas rinkoje greitai plintantis, kabelio gedimo vietos nustatymas optinio kabelio pagalba, aptinkant akustinius dažnio signalus (angl. *C-OTDR Coherent Optical Time Domain Reflectometry*). Tokių prietaisų galimybės yra apribotos iki 50 km, tačiau pakankamos gedimo vietos nustatymui „NordBalt“ kabelio jungčiai nuo keitiklių iki jūros.

Norint atlikti apvalkalo gedimo nustatymą *tiltelio metodu*, visose kabelio apvalkalo transpozicinėse dėžėse (angl. *Link-box*) reikia atjungti įžeminimą (Švedijos požeminio kabelio dalyje jų yra 15 vnt., o Lietuvoje 6 vnt.). Visos transpozicinės dėžės yra užkastos po žeme – atkasimo darbams atlikti būtini privačių asmenų, kelininkų ir kitų institucijų leidimai – visa tai didina darbų kaštus ir keitiklio pristovos laiką. Rekomenduojama parengti organizacinių priemonių planą bei raštus dėl žemės kasinėjimo darbų.

Kadangi vienas iš efektyviausių ir tiksliausių būdų yra gedimo vietos nustatymas *Tiltelio* metodo būdu, atliekant matavimus ant apvalkalo, rekomenduojama reguliari kabelio apvalkalo priežiūra, atliekant apvalkalo bandymą 10 kV paaukštinta įtampa.

7. Literatūra ir šaltiniai

- [1] T. Worzyk, *Submarine Power Cables Design, Installation, Repair, Enviromental Aspects*, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [2] Glenn O'Reilly, Joseph Kearney, John Lawler, Design of an Underwater Cable Fault Location Device to Precisely Locate Submarine Cable Faults, Universities Power Engineering Conference (UPEC), IEE publication, 2017
- [3] Jean Carlos Hernandez-Mejia „Time domain reflectometer (*TDR*). Chapter 5“. Board of Regents of the University System of Georgia, 2016
- [4] Jin Yang, John O'Reilly, John E. Fletcher, An Overview of DC Cable Modelling for Fault Analysis of VSC-HVDC Transmission Systems, New Zealand: IEEE, 2011
- [5] Young-Jin Kwon, Sang-Hee Kang, Dong-Gyu Lee, Hyung-Kyu Kim Fault Location Algorithm Based on Cross Correlation Method for HVDC Cable Lines, Korea: Next-generation Power Technology Center, Myongji University, 2008, 360-364p.
- [6] Md. Fakhrul Islam, Amanullah M T Oo, Salahuddin. A. Azad1 , “Locating Underground Cable Faults: A Review and Guideline for New Development” , Indonesia: 22nd Australasian Universities, IEEE, 2012
- [7] EE publishers. Published in Articles: Energize. August 4th, 2014, Prieiga per internetą:
<http://www.ee.co.za/article/water-blocking-mv-xlpe-cables.html>
- [8] J. Vaišnys „Aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelio darbo režimų analizė“, KTU, Kaunas, 2016
- [9] Gu-Young Kwon, Chun-Kwon Lee, Geon Seok Lee, Yeong Ho Lee, Seung Jin Chang, Chae-Kyun Jung, Ji-Won Kang, and Yong-June Shin, *Senior Member*, “Offline Fault Localization Technique on HVDC Submarine Cable via Time–Frequency Domain Reflectometry” IEEE transactions on power delivery, vol. 32, no. 3, IEEE, 2017
- [10] „Murray loop bridge“. Prieiga per internetą:
https://en.wikipedia.org/wiki/Murray_loop_bridge
- [11] Jianhui Song*, Yang Yu, and Hongwei Gao “Cable Length Measurement Systems Based on Time Domain Reflectometry” School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, China, 2011
- [12] C. F. Jensen, *Online Location of Faults on AC Cables in Underground Transmission Systems*, Switzerland: Springer Theses, 2014
- [13] Paul Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*, CRC Press: Second Edition, 2016, 1000 psl.

- [14] Felipe V. Lopes, Karcius M. Dantas, Kleber M. Silva and Flávio B. Costa, “Accurate Two-Terminal Transmission Line Fault Location Using Traveling Waves” *IEEE transactions on power delivery*, vol. 33, no. 2, 2017
- [15] d. S. Filipe Faria ir B. Claus Leth, *Electromagnetic Transients in Power Cables*, New York: Springer, 2013.
- [16] H. Lee and A. M. Mousa, “GPS travelling wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 3, pp. 1214–1223, Jul. 1996.
- [17] F. V. Lopes, K. M. Silva, F. B. Costa, W. L. A. Neves, and D. Fernandes, “Real-time traveling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data,” *IEEE transactions on power delivery.*, vol. 30, no. 3, Jun. 2015.
- [18] F. V. Lopes, D. Fernandes, and W. Neves, “A traveling-wave detection method based on Park’s transformation for fault locators,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 3, pp. 1626–1634, Jul. 2013.
- [19] Manfred Bawart, Massimo Marzinotto, Giovanni Mazzanti *A Deeper Insight into Fault Location on Long Submarine Power Cables*, *İtraukta Jicable*, Paris, 2014.
- [20] H. Nigel, H. Rick, L. Hakan, O. Harry ir R. Ram, „Long-Life XLPE Insulated Power Cable,“ *İtraukta Jicable*, Paris, 2007.
- [21] Pu Zhao, Qing Chen, Kongming Sun and Chuanxin Xi, *A Current Frequency Component-Based Fault-Location Method for Voltage-Source Converter-Based High-Voltage Direct Current (VSC-HVDC) Cables Using the S Transform*, China, 2017, Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1115/pdf>
- [22] Jianhui Song, Yang Yu, and Hongwei Gao, *Cable Length Measurement Systems Based on Time Domain Reflectometry*, China: Shenyang Ligong University, Shenyang, 2017 Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/2965/c2c29317d376d2a660165ea1f4c66b72ee05.pdf>
- [23] IEEE Std 1234, *Guide for Fault-Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems*, JAV: IEEE, 2007, 37psl.