

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
ENERĢĒTIKAS UN ELEKTROTEHNIKAS FAKULTĀTE
ENERĢĒTIKAS INSTITŪTS
ELEKTRISKO MAŠĪNU UN APARĀTU KATEDRA

Viesturs ZIMACKIS

Doktora studiju programmas "Enerģētika un elektrotehnika" doktorants

**ZIBENSAIZSARDZĪBAS IETAIŠU IZVIETOŠANAS
METODOLOĢIJA IZOLĒTO VADU LĪNIJĀM
VIDSPRIEGUMA TĪKLĀ**

Promocijas darbs

Zinātniskā vadītāja
Profesore Dr.sc.ing.
S. Vītoliņa

RĪGA, 2018

PATEICĪBA

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes Enerģētikas institūtā.

Izsaku vislielāko pateicību promocijas darba zinātniskajai vadītājai profesorei Dr. sc. ing. Sandrai Vītoļiņai par padomu sniegšanu promocijas darba izstrādē, kā arī neizsīkstošu enerģiju motivēt un atbalstīt grūtākajos promocijas darba izstrādes posmos.

Vēlos pateikties Dr. sc. ing. Kārlim Timmermanim par ieinteresēšanu zibensizlādes procesos un zibensaizsardzības aktualitātē, kā arī pamudinājumu studēt doktorantūrā tieši zibens un pārspriegumaizsardzības virzienā.

Īpaši liels paldies Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra prognožu un klimata daļas vadītājam Andrim Vīksnam par atsaucību zibensizlādes datu izsniegšanai.

Paldies pētniekam Dr. sc. ing. Oļegam Sļiskim un studiju biedram Mg. sc. ing. Iljam Dvorņikovam par EMTP/ATP programmatūras pamatu ielikšanu un tehnisko palīdzību zibensizlādes simulācijas modeļa izstrādē.

Vislielākais paldies ģimenei par atbalstu un sapratni, īpaši sievai par pacietību visā promocijas darba tapšanas laikā.

Promocijas darbs ir veltīts nu jau mūžībā aizgājušajam vectēvam, ievērojamam Latvijas elektroenerģētiķim, Edmundam Zimackim.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs veltīts zibensaizsardzības ietaišu izvietojuma biežuma metodoloģijas izstrādei vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnījās. Efektīvi izvietotas aizsargietaišes paaugstina elektroapgādes drošumu un samazina vidējā pārtraukuma ilgumu SAIDI un vidējo pārtraukuma biežumu SAIPI.

Promocijas darba ietvaros veikta zibensizlādes vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnījā datorsimulācijas modeļa izstrāde. Zibensizlādes statistikas apkopošana un analīze Latvijas teritorijā, izstrādātas elektrolīnījai tuvumā esošo objektu noseģšanas koeficienta S_f vērtību tabulas un līknes. Dota elektrolīnijas elementu spriegumizturības datu bāzes struktūra. Izvērtēta elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas spriegumizturību, kā arī izstrādātas spriegumizturības samazinājuma koeficienta līknes vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas ekspluatācijas periodam.

Piedāvāta zibensaizsardzības ietaišu izvietojuma biežuma noteikšanas metodoloģija, kurā līdz šim praksē izmantotā zibensizlādes radītā elektrolīnijas pārklāšanās skaita F vietā ieviests jauns lielums – elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ . Šis lielums ir ieviests, lai būtu tieša sasaiste ar elektrolīnijas ekspluatācijas ilgumu, ko izsaka gados un varētu pielietot papildus kritērijus, kas ir prognozētā izolēto vadu elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu un alternatīvo risinājumu analīze. Promocijas darba ietvaros šī kritērija robežlielumi ir verificēti, izmantojot dažādus iespējamus scenārijus.

Promocijas darbā izstrādātās metodoloģijas algoritms sastāv no 7 aprēķinu blokiem, kas ņem vērā:

- 1) reģiona zibensizlādes statistiku;
- 2) parametrus, kas atkarīgi no elektrolīnijas trases;
- 3) elektrolīnijas spriegumizturības noteikšanu;
- 4) aizsargietaišes tipa izvēli;
- 5) elektrolīnijas pārklāšanās skaitu;
- 6) elektrolīnijas nolietojuma prognozi;
- 7) alternatīvu analīzi.

Piedāvātās metodoloģijas rezultātā tās lietotājs iegūst ieteicamo aizsargietaišu izvietojuma biežumu aplūkojamās elektrolīnijas posmam. Piedāvāto metodoloģiju iespējams pielietot gan projekta stadijā, gan ekspluatācijā esošām vīdsprieguma izolēto vadu līnijām.

Promocijas darbā detalizēti aprakstīts piemērs, ko var izmantot kā metodoloģijas pielietojuma vadlīniju.

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 6 nodaļas, rezultātus un secinājumus, literatūras sarakstu un 22 pielikumus. Darba kopapjoms ir 135 datorsalikuma lapaspuses, kurā ietverti 64 attēli, 32 tabulas un 23 pielikuma lapaspuses. Literatūras sarakstā norādīti 130 izmantotās literatūras avoti.

ABSTRACT

The dissertation is devoted to the development of a methodology for the placement frequency of lightning protection devices in medium voltage overhead lines with covered conductors. Effectively positioned protective devices increase the reliability of the power supply and reduce the SAIDI and SAIFI values.

Within the framework of the dissertation, a computer simulation model is developed for lightning discharge in medium voltage overhead lines with covered conductors. The compilation and analysis of lightning statistics in the territory of Latvia, as well as tables and curves for shielding factor of objects close to the power line have been developed. Developed a structure of the power line element critical flashover voltage values. Evaluated the power line depreciation impact on critical flashover value and developed critical flashover reduction factor curves for operating period of medium voltage overhead lines with covered conductors.

The methodology for determining the frequency of lightning protection device placement is proposed, in which a new criterion, the flashover frequency ζ , has been introduced in addition to currently in practice used insulation flashovers from direct and indirect lightning strokes F . This value has been introduced to have a direct connection to the lifetime of the power line, expressed in years, and could be used in addition criteria that are the predicted effect of the depreciation on the flashover frequency of the medium voltage overhead lines with covered conductors and the analysis of alternatives. Within the framework of the dissertation, thresholds for this criterion have been verified using various possible scenarios.

The methodology developed in the doctoral thesis consists of 7 calculation blocks that take into account:

- 1) regional lightning statistics;
- 2) parameters depending on the route of the power line;
- 3) determination of critical flashover voltage of the power line;
- 4) the choice of type of protection device;
- 5) insulation flashover;
- 6) power line depreciation impact forecast
- 7) analysis of alternatives.

As a result of the proposed methodology, the user obtains the recommended frequency of placement of protective devices for the power line in question. The proposed methodology can be applied both at the project stage and in the existing medium voltage overhead line with covered conductors.

The dissertation describes in detail an example that can be used as a guide to the application of the methodology.

The dissertation is written in Latvian, it contains an introduction, 6 chapters, main results and conclusions, bibliography and 22 annexes. The total volume of dissertation is 135 pages, containing 64 figures, 32 tables and 23 annex pages. In the bibliography 130 sources of literature are given.

SATURS

IEVADS	7
Darba aktualitāte.....	7
Promocijas darba mērķis un atrisinātie uzdevumi.....	7
Promocijas darba zinātniskā novitāte	8
Promocijas darba praktiskā nozīme.....	8
Pētījuma metodes un līdzekļi	9
Promocijas darba aprobācija	9
Autora publikācijas.....	9
Promocijas darba struktūra un apjoms	10
1. AIZSARGIETAIŠU IZVIETOŠANA IZOLĒTO VADU LĪNIJĀS	11
1.1. Izolētie vadi un to pielietošana.....	11
1.2. Elektriskā loka aizsargierīces un to izvietošanas biežums	13
1.2.1. Elektriskā loka aizsargietaišu tipi un prasības to izvietošanai	13
1.2.2. Aizsargietaišu izvietošanas biežums atbilstoši IEEE 1410 metodoloģijai ...	15
1.2.3. Aizsargietaišu izvietošanas biežums atbilstoši SINTEF metodoloģijai	18
1.3. Ieskats piedāvātajā metodoloģijā	19
1.4. Pirmās nodaļas secinājumi	20
2. ZIBENSSTRĀVA UN TĀS MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA	21
2.1. Zibensstrāvu raksturojošie parametri	21
2.2. Zibensstrāvas matemātiskie modeļi	23
2.2.1. Zibensstrāvas diveksponenšu matemātiskais modelis.....	24
2.2.2. Heidlera zibensstrāvas matemātiskais modelis	24
2.2.3. CIGRE zibensstrāvas matemātiskais modelis	25
2.3. Izstrādātais EMTP/ATP modelis zibensstrāvas simulācijai vīdsprieguma izolēto vadu līnijās	27
2.3.1. Zibensstrāvas simulācijas modelis	27
2.3.2. Zibensstrāvas simulācijas modelis izolēto vadu līnijā	29
2.3.3. Zibensstrāvas simulācijas modelis izolēto vadu līnijā ar aizsargietaisi	30
2.4. Otrās nodaļas secinājumi.....	33
3. ZIBENSIZLĀDES PUNKTA NOTEIKŠANA	34
3.1. Zibenizlādes biežums	34
3.2. Zibensizlādes statistika Latvijā	36
3.3. Elektroģeometriskais modelis	38
3.4. Tuvumā esošo objektu ietekme uz tiešas zibensizlādes skaitu	41
3.4.1. Tuvumā esošo objektu ietekme uz tiešas zibensizlādes skaitu atbilstoši IEEE 1410 metodoloģijai	41
3.4.2. Tuvumā esošo objektu ietekme uz tiešas zibensizlādes skaitu atbilstoši piedāvātajai metodoloģijai	42
3.5. Trešās nodaļas secinājumi	47
4. PĀRSPRIEGUMI VĪDSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJĀS	48
4.1. Pārspriegumu veidi.....	48

4.2.	Tiešas zibensizlādes radīti pārspriegumi	49
4.3.	Netiešas zibensizlādes radīti pārspriegumi	50
4.3.1.	Parametri, kas ietekmē netiešas zibensizlādes radīta pārsprieguma vērtību	50
4.3.2.	Ruska modelis	52
4.3.3.	Agravala modelis.....	54
4.5.	Vidsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas izolācijas spriegumizturība	58
4.6.	Izolēto vadu nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas CFO	61
4.6.1.	Bojātas izolācijas ietekme uz elektrolīnijas CFO.....	61
4.6.2.	Apkārtējas vides piesārņojuma ietekme uz elektrolīnijas CFO	62
4.6.3.	Izolācijas novecošanas ietekme uz elektrolīnijas CFO	63
4.6.4.	Elektrolīnijas nolietojuma ietekmes uz elektrolīnijas CFO prognoze.....	64
4.7.	Ceturtās nodaļas secinājumi	66
5.	PIEDĀVĀTAIS ALGORITMS ZIBENSAIZSARDZĪBAS AIZSARGIETAISU OPTIMĀLA IZVIETOŠANAS BIEŽUMA NOVĒRTĒŠANAI	67
5.1.	Izvirzītie izolēto vadu zibens aizsardzības ietaišu izvietojuma kritēriji	67
5.2.	Algoritma struktūra	68
5.3.	Izvērtētais metodoloģijas skaidrojums ar lietojuma piemēru	70
5.3.1.	Objekta raksturojums	70
5.3.2.	No reģiona zibensizlādes statistikas iegūstamie lielumi	72
5.3.3.	Parametri, kas atkarīgi no elektrolīnijas trases	72
5.3.4.	Elektrolīnijas spriegumizturības noteikšana.....	73
5.3.5.	Aizsargietais tipa izvēle	74
5.3.6.	Elektrolīnijas pārklāšanās skaita aprēķins.....	75
5.3.7.	Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekme	78
5.3.8.	Alternatīvu analīze	81
5.3.9.	Ar metodoloģiju iegūtais ieteicamais aizsargietais izvietojuma biežums ..	84
5.4.	Piektās nodaļas secinājumi.....	85
6.	PIEDĀVĀTĀS METODOLOĢIJAS VERIFIKĀCIJA	87
6.1.	Elektrolīnijas pārklāšanās biežuma izvērtējums	87
6.1.1.	Mainīgo parametru ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu	87
6.1.2.	Elektrolīnijas pārklāšanās biežuma robežkritēriju analīze	96
6.2.	Piedāvātās metodoloģijas rezultāti salīdzinājumā ar citu metožu iegūtajiem rezultātiem	97
6.3.	Sestās nodaļas secinājumi	100
	GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	102
	IZMANTOTĀ LITERATŪRA	104
	PIELIKUMI	112

IEVADS

Darba aktualitāte

Izolēto vadu līnijas ir ekonomiski izdevīgākais risinājums, pārbūvējot 20 kV sadales tīklu līnijas mežu teritorijās, jo samazinās līnijas gabarīti un uzkrītuši koki nerada būtiskus bojājumus līnijai. Šī iemesla dēļ Latvijā apmēram puse no 20 kV līnijām tiek pārbūvētas izolēto vadu izpildījumā [5]. Pēdējo 40 gadu laikā pasaulē izolēto vadu līniju skaits ir strauji pieaudzis, piemēram, Somijā un Zviedrijā 80 % [1] no jauna izbūvējamām videsprieguma līnijām ir izolēto vadu izpildījumā. Kailvadu gaisvadu līnijas pārbūvējot par izolēto vadu līnijām, dabas parādību izraisīto bojājumu skaits samazinās vairāk nekā 10 reizes [27], kas samazina vidējā pārtraukuma ilgumu (*SAIDI*, angļu val.: *System Average Interruption Duration Index*), vidējo pārtraukuma biežumu (*SAIFI*, angļu val.: *System Average Interruption Frequency Index*) un vidējo īslaicīgo pārtraukumu biežumu (*MAIFI*, angļu val.: *Momentary Average Interruption Frequency Index*) [7]. Izolēto vadu līnijām paliekošo bojājumu skaits uz 100 km ir nepilnas trīs reizes mazāks nekā kabeļlīnijām [27], kas tās padara par efektīvu, ekonomisku un videi draudzīgu veidu, kā samazināt elektrolīnijas bojājumu skaitu.

Izolēto vadu līnijām īpaša uzmanība jāpievērš zibensaizsardzībai, jo tiešas vai netiešas zibensizlādes radīts elektriskais loks izolācijas dēļ nespēj pārvietoties pa līnijas vadiem, kā tas ir kailvadu gadījumā. Elektrolīnijas aizsardzības nostrādes laiks ir pietiekoši ilgs, lai radītu bojājumus izolējošajā apvalkā, kas var radīt turpmākus bojājumus pašam vadam un palielināt bojājumiem sekojošu līnijas atslēgumu skaitu. Efektīvs veids, kā novērst zibensizlādes radīta elektriskā loka bojājumus, ir izolēto vadu aprikošana ar elektriskā loka aizsargietaisēm.

Standartā EN 50397-3 [32] ir teikts, ka elektriskā loka aizsargierīču uzstādīšana, lai novērstu elektriskā loka radītus izolācijas bojājumus, var tikt paredzēta nacionālajos standartos vai tehniskajos norādījumos. Tomēr Latvijas energostandartā LEK 015 [28], Austrālijas *Ausgrid* NS220 [6], kā arī Somijas un Norvēģijas tehniskajos norādījumos [41] šīs rekomendācijas nav viennozīmīgas. Aizsargietaišu izvietošanas biežumu var noteikt, balstoties uz ekonomisko principu [26]. Tomēr primāri ir jāizvērtē zibensizlādes, apkārtējās vides un elektrolīnijas parametru ietekme uz aizsargietaišu izvietošanas biežumu un tam sekojošo elektrolīnijas bojājumu skaitu.

Metodoloģijas aizsargietaišu izvietošanai piedāvātas gan IEEE 1410 [23], gan Norvēģijas neatkarīgās izpētes organizācijas *SINTEF* pētījumā [26], tomēr tām ir zināmas nepilnības, no kurām galvenās ir: netiek ņemta vērā elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas spriegumizturību un trūkst alternatīvas analīzes konkrētam objektam, kas ļauj ātri pārbaudīt, kā mainīgie elektrolīnijas parametri ietekmē elektrolīnijas bojājumu skaitu un tā izrietošo aizsargietaišu izvietošanas biežumu. Tāpat šīs metodes ir balstītas uz vispārpieņemtām vidējām zibensstrāvas vērtībām, kas ir pieņemtas pārāk lielas [13]. Tāpēc nepieciešams aplūkot konkrēta reģiona zibensizlādes statistiku, kas ietver gan zibensstrāvas maksimumvērtības vidējās vērtības, gan negaisa dienu skaitu gadā.

Promocijas darba mērķis un atrisinātie uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju zibensaizsardzības ietaišu izvietošanas biežuma noteikšanai izolēto vadu līnijām videsprieguma tīklā, kas balstīta uz zibensizlādes radītu elektrolīnijas pārklāšanās skaitu, elektrolīnijas nolietojuma ietekmes prognozi un

alternatīvo risinājumu (citas zibensstrāvas maksimumvērtības un elektrolīnijas elementu ietekme) analīzi.

Mērķa sasniegšanai promocijas darbā atrisinātie uzdevumi:

- 1) izvēlēti būtiskākie parametri, kas ietekmē aizsargietaišu izvietošanas biežumu;
- 2) veikta Latvijas teritorijas zibensizlādes statistikas analīze un izstrādāta vidējo negaisa dienu T_d Latvijas karte;
- 3) izstrādāts datorsimulācijas modelis zibensstrāvas modelēšanai izolēto vadu līnijās;
- 4) izstrādātas elektrolīnijai tuvumā esošo objektu noseģšanas koeficienta S_f vērtību tabulas un līknes trīs dažādām zibensstrāvas maksimumvērtībām, septiņiem dažādiem elektrolīnijas augstumiem un sešiem dažādiem objektu augstumiem;
- 5) piedāvāta atsevišķu elektrolīnijas elementu un to spriegumizturības datubāzes struktūra, lai veiktu alternatīvu analīzi, izvēloties elektrolīnijas elementus;
- 6) izvērtēts, kā elektrolīnijas nolietojums ietekmē elektrolīnijas spriegumizturību un no tā izrietošo elektrolīnijas pārklāšanās skaitu, kā arī izstrādātas prognozētā elektrolīnijas spriegumizturības samazinājuma koeficienta k_{CFO} līknes;
- 7) izstrādāts algoritms aizsargietaišu izvietošanas biežuma noteikšanai.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Promocijas darbā izstrādāta metodoloģija zibensaizsardzības ietaišu izvietošanas biežuma viennozīmīgai noteikšanai vīdsprieguma izolēto vadu līnijās. Metodoloģijā:

- 1) piedāvāts jauns novērtēšanas kritērijs – elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ , kura robežlielumi verificēti, izvērtējot dažādu elektrolīnijas ģeogrāfisko, ģeometrisku un elektrisko parametru ietekmi;
- 2) izstrādāts elektrolīnijas elementu kritiskā pārklāšanās sprieguma samazinājuma koeficients k_{CFO} , tādējādi piedāvātajā metodoloģijā iekļaujot elektrolīnijas nolietošanās prognozi;
- 3) izstrādāta elektrolīnijas elementu datubāzes struktūra un veikta relatīvo izmaksu analīze, kas piedāvātajā metodoloģijā ļauj iekļaut alternatīvu analīzi.

Ar datorsimulācijas programmu *EMTP/ATP* izstrādāts modelis zibensizlādes simulācijai vīdsprieguma izolēto vadu līnijā ar vai bez zibensaizsardzības ietaisēm, kas ļauj analizēt zibensizlādes procesus izolēto vadu līnijās, kā arī aizsargietaišu izvietošanas vietas nozīmi.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Promocijas darbā izstrādātā metodoloģija ļauj:

- 1) aprēķināt vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas tiešas un netiešas zibensizlādes radīto bojājumu skaitu, no kura iespējams iegūt viennozīmīgu zibens aizsargietaišu izvietošanas biežumu;
- 2) palīdz izvērtēt elektrolīnijas nolietojuma ietekmi uz elektrolīnijas bojājumu skaitu, kas ļauj jau projektēšanas stadijā prognozēt, pēc cik gadiem jāizvērtē elektrolīnijas pārbūve vai papildināšana ar aizsargietaisēm, lai samazinātu zibens radīto bojājumu skaitu;
- 3) izstrādāto elektrolīnijas elementu datubāzi, ko iespējams papildināt, ērti lietot, lai noskaidrotu, kā izolatoru vai izolētā vada nomaiņa uz citu ietekmē iegūto rezultātu.

Pētījuma metodes un līdzekļi

Promocijas darbā izmantotas teorētiskās metodes, statistiskās metodes, varbūtību analīze, alternatīvu analīze. Tiešas zibensizlādes elektrolīnijā simulācija *EMTP/ATP* datorprogrammā, nosegšanas koeficienta vērtību atrašana ar zibens uztvērējvirsmas metodi *AutoCAD* datorprogrammā.

Promocijas darba aprobācija

1. "Zibensaizsardzības pilnveidošanas tendences". LEEA seminārs projektētājiem "No vispārīgiem principiem līdz novitātēm zibensaizsardzības projektēšanā". Rīga, Latvija, 26. oktobris, 2018.
2. "Methodology for optimal placement of lightning protection devices in medium voltage overhead lines with covered conductors". 7th International Doctoral School of Electrical Energy Conversion and Saving Technologies. Ronīši, Latvija, 25.–26. maijs, 2018.
3. "Simulation of direct lightning strike in medium voltage covered conductor overhead line with arc protection device". 58th International Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Latvija, Rīga, 12.–13. oktobris, 2017.
4. "Zibensaizsardzības sistēmas pilnveidošanas tendences". Seminārs Elektrum Energoefektivitātes centrā. Jūrmala, Latvija, 26. oktobris, 2016.
5. "Comparison of Commonly Used Mathematical Models for Lightning Return Stroke Current Waveform". 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues. Lietuva, Kauņa, 26.–27. maijs, 2016.

Autora publikācijas

1. Zimackis, V., Vītoļa, S. Simulation of Direct Lightning Strike in Medium Voltage Covered Conductor Overhead Line with Arc Protection Device. 2017 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Proceedings, Latvija, Rīga, 12.–13. oktobris, 2017. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON.2017.8124820 (**IEEE, SCOPUS**).
2. Šļiskis, O., Vītoļa, S., Ketners, K., Zimackis, V. Insulation Failures Flashover Rate Estimation for Metal Constructions in Overhead Transmission Lines. 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Proceedings, Latvija, Rīga, 12.–13. oktobris, 2017. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON.2017.8124772 (**IEEE, SCOPUS**).
3. Zimackis, V. Comparison of Commonly Used Mathematical Models for Lightning Return Stroke Current Waveform. No: 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues: Proceedings of CYSENI 2016, Lietuva, Kaunas, 26.–27. maijs, 2016. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 2016, 123.–130.lpp. ISSN 1822-7554.
4. Zimackis, V., Vītoļa, S. Advancements in Building Lightning Protection Zone Estimation. 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG): Proceedings, Latvija, Rīga, 11.–13. maijs, 2015. 211.–214.lpp. Pieejams: doi:10.1109/PowerEng.2015.7266321 (**IEEE, SCOPUS**).
5. Zimackis, V., Timmermanis, K. Ēku zibensnovēdēja aizsargzona un tās aplēses metodika. *Enerģija un pasaule*, 2014, Nr. 2, 66.–73.lpp. ISSN 1407-5911.

Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 6 nodaļas, rezultātus un secinājumus, literatūras sarakstu un 22 pielikumus. Darba kopapjoms ir 135 datorsalikuma lapaspuses, kurās ietverti 64 attēli, 32 tabulas un 23 pielikuma lapaspuses. Literatūras sarakstā norādīti 130 izmantotās literatūras avoti.

Pirmajā nodaļā pamatota izolēto vadu pielietojuma efektivitāte un nozīme bojājumu skaita samazināšanai. Apskatītas izolēto vadu galvenās priekšrocības un trūkumi. Definēta zibensaizsardzības ietaišu nozīme izolēto vadu līnijām. Salīdzinātas elektriskā loka aizsargietaišes. Aplūkoti esošie standarti un metodes aizsargietaišu izvietojanas vietas un biežuma noteikšanai. Dots ieskats piedāvātās metodoloģijas struktūrā.

Otrajā nodaļā apskatīti zibensstrāvas galvenie raksturojošie parametri un matemātiskie modeļi, kā arī veikts apskatīto matemātisko modeļu salīdzinājums. Apskatīts arī zibensstrāvas varbūtējais raksturs un varbūtības sadalījuma izteiksmes parametri. Dots izstrādā EMTP/ATP zibensizlādes simulācijas vīdsprieguma izolēto vadu līnijās modeļa apraksts un iegūto rezultātu analīze.

Trešajā nodaļā apskatīti zibensizlādes punkta noteikšanas faktori. Apskatīti ikgadējā zibens spērienu blīvuma un ikgadējo zibens spērienu skaita elektrolīnijā varbūtējais raksturs. Veikta Latvijas zibensizlādes statistikas apkopošana un analīze. Aplūkoti modeļi zibensizlādes punkta noteikšanai, kā arī IEEE un autora piedāvātā metodoloģija tuvumā esošu objektu ietekmes uz tiešu zibensizlādi aprakstīšanai.

Ceturtajā nodaļā apskatīti pārspriegumu veidi un to ietekme uz vīdsprieguma elektrotīkla bojājumiem. Tiešas un netiešas zibensizlādes radītas elektrolīnijas pārklāšanās skaita aprēķins. Apskatīti un salīdzināti matemātiskie modeļi netiešas zibensizlādes gaisvadu līnijā inducētā pārsprieguma aprēķinam. Apskatīta vīdsprieguma elektrolīnijas spriegumizturība, tās aprēķina metodes un prognozētais samazinājums ekspluatācijas laikā, kā arī galvenie faktori, kas ietekmē spriegumizturības samazināšanos.

Piektajā nodaļā doti piedāvātās metodoloģijas aizsargietaišu izvietojanas biežuma noteikšanas kritēriji. Dots algoritms metodoloģijas pielietojumam, kā arī detalizēti aprakstīta piedāvātā metodoloģija un dots pielietojuma piemērs, kur atsevišķi aplūkots katrs vienkāršotās blokshēmas bloks un tajā iegūtie rezultāti.

Sestajā nodaļā veikta izstrādātās metodoloģijas verifikācija, kur aplūkots, kā aprēķina mainīgie parametri ietekmē elektrolīnijas pārklāšanās biežumu. Dota elektrolīnijas pārklāšanās biežuma robežkritēriju izvēles analīze. Piedāvātās metodoloģijas rezultāti salīdzināti ar esošo metožu iegūtajiem rezultātiem.

Pielikumā dotas naseģšanas koeficienta S_f vērtības un apkārtējas vides piemēri un to sadalījums pēc piesārņojuma pakāpes.

1. AIZSARGIETAIŠU IZVIETOŠANA IZOLĒTO VADU LĪNIJĀS

1.1. Izolētie vadi un to pielietošana

Pārklātais jeb izolētais vads sastāv no vadītāja, kas ir pārklāts ar izolējošu materiālu, lai pasargātu no nejaušas saskares ar citām izolēto vadu līnijām vai sazemētiem objektiem, piemēram, kokiem. Salīdzinājumā ar izolētiem vadītājiem, piemēram, kabeļlīniju, šim pārklājumam nav tik labas izolācijas īpašības, tāpēc attiecībā uz elektriskās strāvas triecienu tie jāuztver kā kailvadi [81].

Amerikā un Austrālijā vīdsprieguma gaisvadu elektrolīnijās izolētie vadi sāka aizstāt kailvadus kopš 1960. gadu sākuma. Tomēr interese par tiem nebija liela, jo vietā, kur vadītājs tika piestiprināts pie izolatora, bija nepieciešams noņemt izolāciju, kas noveda pie paātrinātas vadītāja korozijas. 1970. gadu sākumā izolēto vadu līnijas atkal sāka plaši pielietot, jo tika atrasts risinājums vadītāja stiprināšanai pie izolatora, kas novērš korozijas problēmu. Šajā laikā arī Eiropā parādījās pirmās izolēto vadu gaisvadu elektrolīnijas. Pirmās izolēto vadu līnijas parādījās Somijā (pazīstama kā SAX sistēma, vēlāk arī kā PAS sistēma), tālāk sekoja Zviedrija un Norvēģija (zināma kā BLX sistēma) un Apvienotā Karaliste [101]. Izolēto vadu pozitīvo īpašību dēļ mūsdienās tās tiek plaši lietotas visā pasaulē, piemēram, Somijā un Zviedrijā no jaunizbūvētajām vīdsprieguma elektrolīnijām apmēram 80 % ir tieši izolēto vadu līnijas [1], Dienvidkorejā 96 % no vīdsprieguma elektrolīnijām ir izolēto vadu izpildījumā, kas skaidrojams ar to, ka Japānā un Dienvidkorejā apdzīvotās vietās elektrolīnijām obligāti ir jābūt izolēto vadu izpildījumā [38], [32].

Neskatoties uz to, ka izolēto vadu gaisvadu elektrolīnijas ierīkošanas izmaksas ir nedaudz lielākas kā kailvadu elektrolīnijām, kopējās ekspluatācijās izmaksas samazinās. Galvenā izolēto vadu priekšrocība ir, ka uzkrītis koks vai koka zars neatslēdz elektrolīniju, kā tas ir kailvadu elektrolīnijas gadījumā, tāpēc netiek pārtraukta elektroenerģijas piegāde gala patērētājam. Izolēto vadu elektrolīnijas ir videi draudzīgākas, salīdzinot dzīves cikla novērtējumu un tā ietekmi uz vidi, pazemes kabeļlīnijas uz vidi atstāj vislielāko negatīvo ietekmi, kas skaidrojams ar atslēgto kabeļlīniju atstāšanu zemē un nepārstrādāšanu. Kopējais paliekošo bojājumu skaits izolēto vadu līnijām ir viszemākais, salīdzinot kailvadus, izolēto vadu līnijas, virszemes kabeļlīnijas un pazemes kabeļlīnijas (skat. 1.1. tabulu) [70], [76], [87].

1.1. tabula

Paliekošo bojājumu skaits uz 100 km Somijas vīdsprieguma sadales tīklos 2007. gadā [70]

Bojājuma iemesls	Kailvads	Izolētais vads	Gaisa kabelis	Pazemes kabelis
Dabiska parādība	3,39	0,24	0,21	0,10
Tehnisks iemesls	0,54	0,04	0,14	0,33
Cits iemesls	0,84	0,04	0,01	0,38
Kopā	4,77	0,32	0,36	0,81

Cilvēku drošība ir vēl viena izolēto vadu priekšrocība, salīdzinājumā ar kailvadu elektrolīnijām, piemēram, nejauši ar celtni vai makšķeres kātu aizskarta elektrolīnija netraumē cilvēku, pie nosacījuma, ka netiek bojāta izolācija. Izolēto vadu līnijas ir arī dzīvniekiem draudzīgākas, piemēram, putni, ar spārniem pieskaroties pie fāzes vadiem, netiek pakļauti elektriskās strāvas triecienam [76].

Līdz ar vidējās temperatūras pieaugumu pasaulē, pieaug arī negaisa dienu skaits, jo negaisa veidošanās ir cieši saistīta ar silto gaisa masu pacelšanos atmosfērā. Pieaugot CO₂ koncentrācijai atmosfērā, negaisa dienu skaits var pieaugt pat par 30 %. Eiropā ziemeļu platuma grādos jau tagad novērojama negaisa dienu skaita pieauguma tendence [120]. 1.2. tabulā doti dabisko parādību (vētra, negaiss, sniegs un apledums u.c.) radīti traucējumi uz 100 km Somijas vīdsprieguma sadales tīklos. Salīdzinot 1.1. un 1.2. tabulas datus, redzams, ka dabisko parādību radītu bojājumu skaits pieaug, kas ir īpaši svarīgi gaisvadu elektrolīnijām, t.sk., izolēto vadu līnijām, jo apmēram 70 % no līnijas bojājumiem rada tieši dabiskās parādības.

1.2. tabula

Dabisku parādību radītu traucējumu skaits uz 100 km Somijas vīdsprieguma sadales tīklos
2010.-2014. gadā [44]

	2010	2011	2012	2013	2014	Vidēji
Kailvads	5,68	6,43	5,00	6,42	5,57	5,82
Izolētais vads	0,27	0,39	0,37	0,45	0,38	0,37
Gaisa kabelis	0,06	0,14	0,15	0,35	0,22	0,18
Pazemes kabelis	0,14	0,05	0,03	0,03	0,04	0,06

Izolēto vadu gaisvadu līnijām salīdzinājumā ar kailvadu līnijām ir jāpievērš pastiprināta uzmanība zibensaisardzībai. Tiešas vai netiešas zibensizlādes rezultātā elektrolīnijā rodas pārspriegums, kas ir vairākus simtus kilovoltu liels un ir apmēram vienāds visās fāzēs. Pārsprieguma vilnis virzās uz tuvāko balstu, kur izveidojas elektriskais loks starp fāzēm vai starp fāzi un traversu. Kailvadu elektrolīnijās magnētisko lauku ietekmē šis elektriskais loks virzās slodzes virzienā, līdz tas nodziest. Izolēto vadu elektrolīnijās izolācijas dēļ elektriskais loks stāv uz vietas un izdedzina izolācijā caurumu un turpina degt tik ilgi, kamēr tiek bojāts vai pārdedzināts vadītājs. Elektrolīnijas aizsardzība nespēj pietiekoši ātri nostrādāt, lai atslēgtu līniju un nodzēstu elektrisko loku, pirms tas ir sabojājis vadītāju, piemēram, 30 kA liela zibensstrāva 50 mm² alumīnija vadu var sakarsēt virs 200 °C tikai 0,2 sekunžu laikā, izolēto vadu līnijai ar 2,3 mm biezu XLPE pārklājumu temperatūra vadītāja centrā nepārsniegs 120 °C, tomēr izolācijā atstās 2–3 mm diametra caurumu, kas var novest pie pastiprinātas vadītāja korozijas. Lai izvairītos no elektriskā loka radītiem bojājumiem, izolēto vadu līnijas ir jāapriko ar elektriskā loka aizsargietaisēm. Elektriskā loka aizsargietaisē nodrošina drošu elektriskā

loka degšanu, kamēr nostrādā elektrolīnijas aizsardzība un nodzēš elektrisko loku [120], [112], [130].

1.2. Elektriskā loka aizsargierīces un to izvietojšanas biežums

1.2.1. Elektriskā loka aizsargietaišu tipi un prasības to izvietojšanai

Lai nodrošinātu izolēto vadu gaisvadu elektrolīniju aizsardzību no tiešas vai netiešas zibensizlādes, tās ir jāaprīko ar elektriskā loka aizsargietaisēm. Standartā EN 50397-3 [82] ir doti trīs elektriskā loka aizsargietaišu tipi: ragizlādnis (turpmāk tekstā APD, no angļu: *arc protection device*), dzirksteļsprauga (turpmāk tekstā PAD, no angļu: *power arc device*) un strāvu ierobežojoša aizsargietaisē (turpmāk tekstā CLAH, no angļu: *current limiting arcing horn*).

Vienkāršākā no aizsargietaisēm ir APD, kas paredzēta elektriskā loka novirzīšanai pietiekošā attālumā no vadītāja un izolatora. Zibensizlādes radīta pārsprieguma vilnis, atduroties pret izolatoru, rada elektrisko loku, APD komplektā esošā alumīnija stieple to novirza uz APD, elektriskajam lokam degot, tas jonizē gaisu, palielinot tā vadītspēju, kamēr rodas starpfāžu īsslēgums starp blakus fāzēs esošiem APD un nostrādā elektrolīnijas aizsardzības, kas bezstrāvas pauzē nodzēš elektrisko loku. APD var ērti uzstādīt jau esošā izolēto vadu elektrolīnijā, turklāt, izmantojot speciālu APD ragu, to var izmantot arī kā pārnēsājamā zemējumu stiprināšanas vietu, lai netiktu bojāta izolācija. APD ir jāuzstāda slodzes pusē, tas nozīmē, ka maģistrālās vai saites līnijā APD ir jāuzstāda abās pusēs. Ja attālums starp fāzes vadiem ir lielāks par 600 mm, tad APD lietošana ir neefektīva. Pie nelielām īsslēguma strāvām nepieciešams lietot divas 25 mm² alumīnija stieples, pie īsslēguma strāvām zem 1 kA APD pastiprināti bojā izolatoru, jo pie mazām īsslēguma strāvām elektriskais loks pa stiepli pārvietojas lēni [112], [102].

Lai novērstu izolatora bojāšanos pie mazām īsslēguma strāvām, iespējams uzstādīt PAD, kas rada starpfāžu īsslēgumu caur metāla traversu. PAD atšķirībā no APD iespējams uzstādīt arī piekarizolatoriem, tos savienojot ar metāla plāksni. PAD nav atkarīgs no slodzes virziena, tāpēc tos var uzstādīt jebkurā balsta pusē. Attālumam starp PAD elektrodiem jābūt 100 ÷ 150 mm [112].

APD un PAD darbībai nepieciešams elektrolīniju aprīkot ar ātrdarbīgu automātisku atpakaļieslēgšanas ierīci (ĀAAI), lai nodrošinātu pēc iespējas īsāku elektroapgādes pārtraukumu. Ja elektrolīnija nav aprīkota ar ĀAAI un ir būtiski nodrošināt nepārtrauktu elektroapgādi, tad ieteicams uzstādīt CLAH, kas ekonomiski ir izdevīgāk kā izlādņus. CLAH sastāv no neliela metāloksīda izlādņa (MO) un dzirksteļspraugas, kas nozīmē, ka pie līnijas pārspriegumiem izlādnis nenostādā un to nav nepieciešams tik bieži mainīt. CLAH tāpat kā PAD nav atkarīgs no slodzes virziena, tomēr, lai CLAH darbotos, traversai ir jābūt sazemētai [112]. Elektriskā loka aizsargietaišu salīdzinājums apkopots 1.3. tabulā.

Pārāk reti izvietotas elektriskā loka aizsargietaisē elektrolīnijā nepildīs savu funkciju, savukārt pārāk bieži izvietot nav ekonomiski izdevīgi, turklāt pārāk bieži izvietotas elektriskā loka aizsargietaisē var radīt problēmas ar elektroapgādes kvalitāti un pakļaut elektriskās strāvas triecienam putnus, vāveres un citus zvērus. Slikts kontakts starp APD un savienojošo stiepli var radīt augstfrekvences traucējumus [120]. Elektriskā loka aizsargietaisē nav izolētas, tas nozīmē, ka pārlietu bieži uzstādītas aizsargietaisē var negatīvi ietekmēt izolēto vadu līniju

priekšrocības attiecībā pret kailvadu elektrolīnijām. Standartā EN 50397-3 [82] ir teikts, ka elektriskā loka aizsargierīču uzstādīšana, lai novērstu elektriskā loka radītus izolācijas bojājumus, var tikt paredzēta nacionālajos standartos vai tehniskajos norādījumos. Šīs prasības var ietvert arī papildus informāciju, piemēram, kur šīs ietaises drošības nolūkos būtu jāuzstāda, piemēram, līnijas galā, ceļu pārejās, vietās, kur ir noņemta izolācija, stūra balstos utt. Dažādu valstu norādījumi aizsargietaišu izvietojumam apkopoti 1.4. tabulā.

1.3. tabula

Elektriskā loka aizsargietaišu salīdzinājums

Parametrs	Aizsargietais tips		
	APD	PAD	CLAH
Attālums starp fāzēm, mm	< 600	Jebkurš	Jebkurš
Īsslēguma strāva, kA	1÷3 ^a > 3	Jebkāda	Jebkāda
Citu līnijas elementu aizsardzība	Nav	Mazas jaudas transformatori	Mazas jaudas transformatori
Ietaises izturība	2-3 reizes pie 10 kA/s	2-3 reizes pie 10 kA/s	Var tikt bojāta pie zibensstrāvas
Izolatora tips	Tapizolators	Jebkurš	Jebkurš
Atkarīgs no slodzes virziena	Jā	Nē	Nē
Nepieciešams sazēmēt traversu	Nē	Nē	Jā
Elektroapgādes pārtraukums	ĀAAI	ĀAAI	Nav pārtraukums

^a ar dubultu 25 mm² alumīnija stiepli

Aplūkojot dažādu valstu nacionālos standartus un tehniskos norādījumus, redzams, ka atšķiras gan aizsargietaišu izvietojanas biežums, gan izmantojamo aizsargietaišu tips, kā arī doti papildus norādījumi, kur aizsargietais jāizvieto. Lielākā problēma ir tieši ar šiem papildus norādījumiem, jo nav doti robežlielumi, kas noteiktu, kura vieta ir atklāta, cik augstiem kokiem jābūt, lai elektrolīniju varētu neaizsargāt, cik tālu no ceļa vēl ir paralēli ceļam utt. Šī iemesla dēļ ir nepieciešama metodoloģija aizsargietaišu izvietojšanai, lai nerastos situācijas, kad dotos norādījumus var interpretēt atšķirīgi. Aizsargietais tipu un izvietojanas biežumu var noteikt arī, balstoties uz ekonomisko principu [69], [13], tomēr primāri aizsargietaišu izvietojanas principi būtu jāizvērtē no elektrolīnijas aizsardzības viedokļa, balstoties uz zibensizlādes, apkārtējās vides un elektrolīnijas parametriem.

Elektriskā loka aizsargietaišu izvietojanas prasības dažādās valstīs

Valsts	Izvietojanas biežums	Papildus norādījumi	Avots
Latvija	Katrs 4.-5. balsts	Vietās, kur elektrolīnijas trase ierīkota paralēli ceļiem un sporta trasēm, kā arī šķērsojumos ar šīm vietām. Pilsētās, ciemos un citās blīvi apdzīvotās vietās. Aizsargietais tips: PAD, APD	[71]
Norvēģija un Somija	Katrs 3. balsts vai 300 m	Atklātās vietās katrā balstā. Vietās ar augstiem kokiem nav nepieciešamas aizsargietais. Ja nav informācija, tad katrā 2. balstā. Aizsargietais tips: PAD, APD	[117]
Apvienotā Karaliste	Katrs 2. balsts	Aizsargietais tips: PAD, APD	[120]
Austrālija	Katrs 4. balsts vai 200-250 m.	Vietās, kas pakļautas biežākai zibensizlādei katrā 2. balstā. Aizsargietais tips: CLAH	[9]
Japāna	Katrā balstā	Aizsargietais tips: CLAH	[120]

1.2.2. Aizsargietaišu izvietojanas biežums atbilstoši IEEE 1410 metodoloģijai

IEEE 1410 dotā metodoloģija ir paredzēta izlādņu izvietojanas biežuma noteikšanai kailvadu elektrolīnijā, tomēr, izmainot elektrolīnijas spriegumizturību, ņemot vērā izolētā vada īpašības un izlādņa paliekošo spriegumu V_{IR} aizstājot ar elektriskā loka aizsargietais loka veidošanās spriegumu, metodoloģija ir pielietojama izolēto vadu aizsargietaišu izvietojanas biežuma noteikšanai [23].

Ja tieša zibensizlāde notiek laidumā starp balstu bez aizsargietais un balstu ar aizsargietaisi, tad pārspriegumu, kas rodas balstā bez aizsardzības, var noteikt no attāluma starp zibensizlādes vietu un balstu ar aizsargietaisi, ko var aprakstīt ar izteiksmi [58]

$$V = V_{IR} + \frac{L}{2} \cdot \frac{I_m \cdot Z_s}{c \cdot t_m}, \quad (1.1)$$

kur V – pārsprieguma maksimumvērtība, kV,

V_{IR} – aizsargietais paliekošais spriegums, kV,

L – attālums starp balstu bez aizsargietais un balstu ar aizsargietaisi, m,

c – pārsprieguma viļņa izplatīšanās ātrums ($3 \cdot 10^8$ m/s),

I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA,

Z_s – elektrolīnijas pārsprieguma viļņa pretestība, Ω ,

t_m – lineārais ekvivalents 0-100 % viļņa kāpumlaikam, pirmai impulsstrāvai pieņem 2 μ s.

Strāvas maksimumvērtību elektrolīnijā I_{ml} , kas nepieciešama, lai notiktu elektrolīnijas pārklāšanās $V = V_{CFO}$ (skat. 4. nodaļu), izsaka no (1.1) izteiksmes un iegūst

$$I_{ml} = \frac{2 \cdot C \cdot t_m \cdot (V_{CFO} - V_{IR})}{L \cdot Z_s}. \quad (1.2)$$

Kad aprēķināta strāvas maksimumvērtība elektrolīnijā, kas nepieciešama, lai notiktu pārklāšanās, izmantojot izteiksmi (2.3) (skat. 2. nodaļu), var aprēķināt, kāda ir varbūtība, ka zibensstrāvas maksimumvērtība pārsniegs aprēķināto strāvas maksimumvērtību elektrolīnijā.

Ja balsts nav aprīkots ar aizsargietaisi, tad tiešas zibensizlādes gadījumā pārklāšanās notiek 100 % gadījumos, ja balsts ir aprīkots ar aizsargietaisi, tad pārklāšanās nenotiek, tomēr ir iespēja, ka pārklāšanās notiks nākošajā neaizsargātajā balstā, ko var aprēķināt [58]

$$I_{mb} = \frac{V_{CFO} - V_{IR}}{R_0}, \quad (1.3)$$

kur I_{mb} – strāvas maksimumvērtība elektrolīnijas balstā, lai notiktu izolācijas pārklāšanās, kA,

V_{IR} – aizsargietaises paliekošais spriegums, kV,

V_{CFO} – elektrolīnijas izolācijas spriegumizturība, kV,

R_0 – balsta zemētāja pretestība, Ω .

Kad aprēķināta strāvas maksimumvērtība elektrolīnijas balstā, kas nepieciešama, lai notiktu pārklāšanās, izmantojot izteiksmi (2.3), var aprēķināt, kāda ir varbūtība, ka zibensstrāvas maksimumvērtība pārsniegs aprēķināto strāvas maksimumvērtību elektrolīnijas balstā.

Izmantojot varbūtības, kas iegūtas balstiem ar aizsargietaisi, elektrolīnijas laidumam (pieņemot, ka 50 % zibensizlādes notiks laidumā) un balstiem bez aizsargietaisēm, var aprēķināt kopējo varbūtību. Varbūtība, ka notiks elektrolīnijas pārklāšanās no tiešas zibensizlādes atkarībā no aizsargietaišu izvietojanas biežuma dota 1.5. tabulā, pieņemot, ka $t_m = 2 \mu s$, $Z_s = 400 \Omega$, $L = 75 m$, $V_{IR} = 40 kV$ un $I_m = 31 kA$ [58].

1.5. tabula

Varbūtība, ka notiks elektrolīnijas pārklāšanās no tiešas zibensizlādes pie dažāda aizsargietaišu izvietojuma biežuma

Laidumi starp aizsargietaisēm	Pārklāšanās varbūtība, % ($R_0 = 10 \Omega$, $V_{CFO} = 350 kV$)	Pārklāšanās varbūtība, % ($R_0 = 25 \Omega$, $V_{CFO} = 350 kV$)	Pārklāšanās varbūtība, % ($R_0 = 10 \Omega$, $V_{CFO} = 150 kV$)
1	0	0	0
2	70	83	94
3	80	89	96
4	85	91	97
5	88	93	97
Nav aizsargietaise	100	100	100

No 1.5. tabulas aprēķinātajām tiešas zibensizlādes radītām pārklāšanās varbūtībām, redzams, ka elektrolīnijas CFO izmaiņai ir lielāka ietekme uz pārklāšanās varbūtību kā balsta zemētāja pretestības izmaiņai.

Netiešas zibensizlādes inducētā pārsprieguma radītā izolācijas pārklāšanās skaita aprēķinam izmanto rezultātus, kas iegūti, veicot aprēķinus ar LIOV kodu (skat. sīkāk 4.3.3. nodaļu). Ikgadējais netiešas zibensizlādes radīts elektrolīnijas pārklāšanās skaits tiek rēķināts kā [58]

$$F_p = 2 \cdot \frac{n}{n_{tot}} \cdot N_g \cdot y_{max}, \quad (1.4)$$

kur F_p – netiešas zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, pārklāšanās gadā/km;

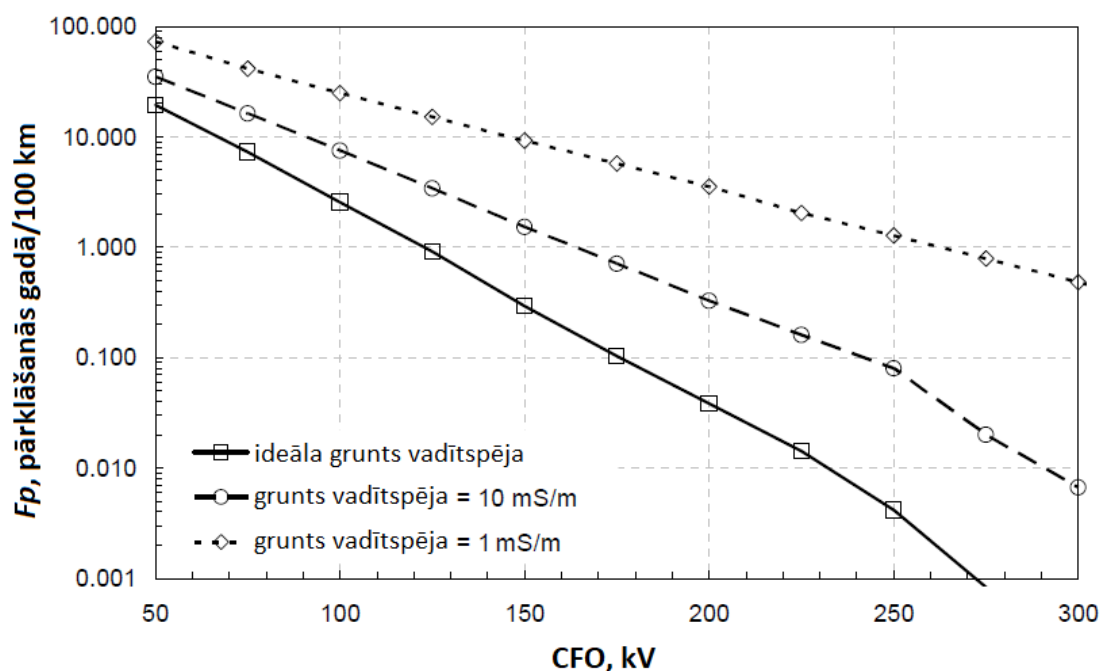
N_g – ikgadējais zibens spērienu blīvums, zibensizlādes gadā/km²;

y_{max} – attālums no elektrolīnijas, līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, m;

n – zibensizlāžu skaits, kas elektrolīnijā inducējis pārspriegumu lielāku par V_{CFO} (skat. 4.nodaļu);

n_{tot} – kopējais zibensizlāžu skaits attālumā $\pm y_{max}$.

Netiešas zibensizlādes radīts elektrolīnijas pārklāšanās skaits uz 100 km atkarībā no grunts vadītspējas un elektrolīnijas CFO dots 1.1. attēlā, pieņemot, ka elektrolīnijas augstums $h_l = 10$ m un ikgadējais zibens spērienu blīvums $N_g = 1$ zibensizlāde gadā/km².



1.1. att. Netiešas zibensizlādes radītas elektrolīnijas pārklāšanās skaits, atkarībā no elektrolīnijas CFO un grunts vadītspējas [58]

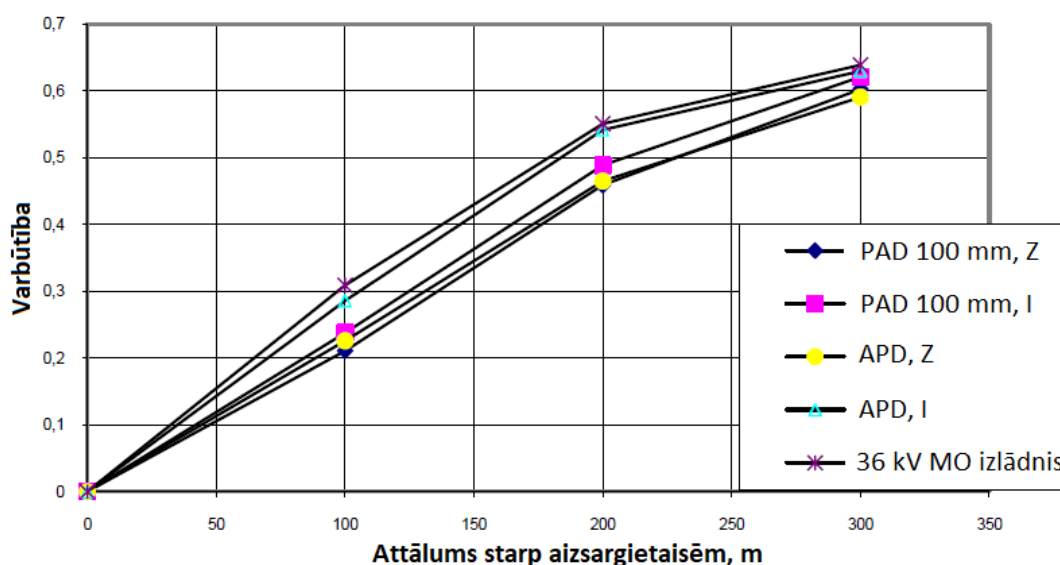
Netiešas zibensizlādes inducētā pārsprieguma radītu pārklāšanās skaitu var aprēķināt arī ar Ruska piedāvāto modeli, izmantojot formulu (4.4) (skat. detalizētāk 4. nodaļu) [58].

1.2.3. Aizsargietaišu izvietojanas biežums atbilstoši SINTEF metodoloģijai

Norvēģijas neatkarīgās izpētes organizācijas SINTEF metodoloģija ir paredzēta, lai aprēķinātu varbūtību, ka notiks tiešas zibensizlādes radīta izolācijas pārklāšanās zibensizlādes vietā, ņemot vērā ikgadējo zibens spērienu blīvumu, aizsargietaišu izvietojanas biežumu un elektrolīnijai tuvumā esošo koku augstumu. SINTEF modelis pieņem, ka elektrolīnijas pārklāšanās notiek zibensizlādes vietā vai arī vietā, kur ir uzstādīta elektriskā loka aizsargietais. Šī metodoloģija neņem vērā netiešas zibensizlādes radītos pārspriegumus. Metodoloģijas ietvaros ir ņemti vērā sekojoši faktori:

- 1) zibensstrāvas maksimumvērtību un stāvumu statistika;
- 2) elektriskā loka starp fāzēm veidošanās procesi;
- 3) aizsargietaišu tipi;
- 4) attālums starp aizsargietaisēm;
- 5) zibensizlādes vietas atkarība no aizsargietaisa tipa;
- 6) traversa ir saņemta vai nav [69].

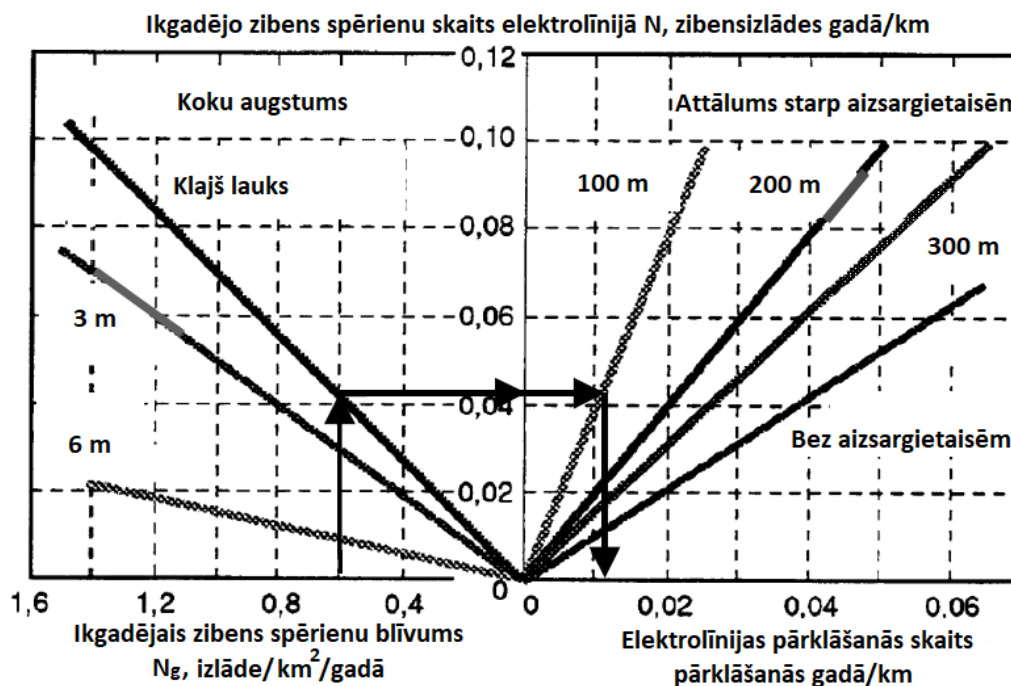
Attālums starp fāzēm pieņemts 0,5 m. Elektrolīnijas pārklāšanās varbūtības līknes, notiekot zibensizlādei nejaušā elektrolīnijas punktā, atkarībā no aizsargietaisa tipa dotas 1.2. attēlā. SINTEF modelis, pieņem, ka nav būtiska atšķirība starp aizsargietaisa tipiem, tāpēc varbūtība visiem aizsargietaisa tipiem tiek pieņemta vienāda. Ja attālums starp aizsargietaisēm ir 100 m, 200 m un 300 m, tad varbūtība, ka veidosies elektriskais loks izlādes vietā attiecīgi ir 0,25, 0,5 un 0,65 [69].



1.2. att. Varbūtība, ka veidosies elektriskais loks, atkarībā no attāluma starp aizsargietaisēm [69]

Z – zemēta traversa, I – izolēta traversa

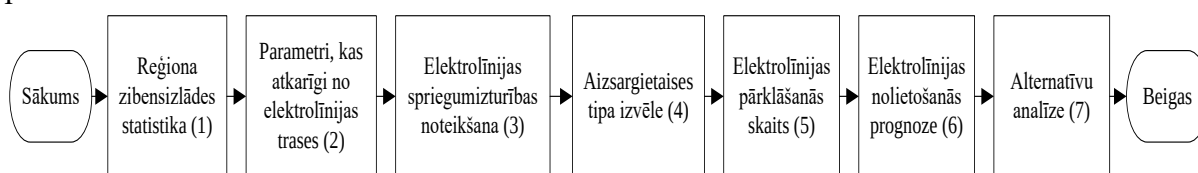
Zinot ikgadējo zibens spērienu blīvumu, elektrolīnijas augstumu un platumu, elektrolīnijai tuvumā esošo koku augstumu, ar elektroģeometriskā modeļa palīdzību iespējams noteikt elektrolīnijas pārklāšanās skaitu. 1.3. attēlā dota nomogramma elektrolīnijas pārklāšanās skaita noteikšanai. Ar bultām parādīts piemērs, ja ikgadējais zibens spērienu blīvums $N_g = 0,6$ izlādes/km²/gadā, elektrolīnija atrodas klajā laukā, tātad ikgadējo zibens spērienu skaits elektrolīnijā $N = 0,043$ zibensizlādes/km/gadā. Ja aizsargietais ir izvietots ik pēc 100 m, tad gada laikā elektrolīnijas pārklāšanās skaits uz 1 km ir 0,011. Ja aizsargietais nav uzstādīts, tad gada laikā uz 1 km elektrolīnija pārklāsies 0,04 reizi [69].



1.3. att. Nomogramma elektrolīnijas pārkļāšanās skaita noteikšanai [69]

1.3. Ieskats piedāvātajā metodoloģijā

Iepriekšējā nodaļā aprakstītās elektriskā loka aizsargietaišu izvietojanas biežuma noteikšanas metodoloģijas nav pilnīgas, jo IEEE-1410 piedāvātā metodoloģija tiešā veidā neņem vērā zibensizlādes statistiku konkrētajā reģionā, tāpat netiek parādīts, kā elektrolīnijai tuvumā esošie objekti ietekmē aizsargietaišu izvietojanas biežumu. Iepriekš veiktos pētījumos [122], [96] ir pierādīts, ka elektrolīnijai tuvumā esoša būves var pilnībā pasargāt elektrolīniju no tiešas zibensizlādes, tomēr ar kokiem pilnīgu elektrolīnijas aizsardzību realizēt ir grūti. Savukārt SINTEF metodoloģijā netiek ņemts vērā netiešas zibensizlādes radīts pārspriegums, kas sadales tīklu līnijai var būt noteicošs faktors. Ņemot vērā to, ka izolēto vadu līnijas bieži tiek ierīkotas cauri mežam un mežā esošie koki parasti ir augstāki par elektrolīniju, tāpēc tieša zibensizlāde samazinās, bet netiešas izlādes ietekme palielinās [97]. Elektrolīnijai tuvumā esošie koki lietus laikā palielina elektrolīnijas pārkļāšanās skaitu [98]. Turklāt zibensizlāde augstākos objektos inducē lielāku spriegumu elektrolīnijā, nekā zibensizlāde zemē [11]. Nevienā no abiem modeļiem netiek piedāvāta alternatīvu analīze, piemēram, izmantot citu zibensstrāvas vērtību, citus izolatorus vai balstu tipus, ja iegūtais aizsargietaišu izvietojanas biežums nav apmierinošs, tāpat netiek ņemts vērā tas, ka izolēto vadu izolācijas spriegumizturība ar gadiem pasliktinās [18]. Šī iemesla dēļ piedāvātajā metodoloģijā tiek apkopoti elektrolīnijas spriegumizturības ietekmējošie faktori un tiek veikta alternatīvu analīze. Piedāvātā metodoloģija sākotnēji izstrādāta Latvijas teritorijai, tās vienkāršotā blokshēma parādīta 1.4. attēlā.



1.4. att. Piedāvātās metodoloģijas vienkāršotā blokshēma

Piedāvātā metodoloģija sastāv no vairākiem galvenajiem blokiem:

- 1) Reģiona zibensizlādes statistika – tiek ņemts vērā ikgadējais zibensizlādes blīvums Latviju, sadalot 25 km x 25 km lielās teritorijās. Tāpat tiek ņemta vērā zibensstrāvas maksimumvērtības mediāna strāva;
- 2) Parametri, kas atkarīgi no elektrolīnijas trases – šajā blokā tiek ņemta vērā elektrolīnijai tuvumā esošo objektu (koku, ēku u.c.) ietekme uz tiešu zibens izlāžu skaitu;
- 3) Elektrolīnijas spriegumizturības noteikšana – šajā posmā tiek noteikta elektrolīnijas spriegumizturība, tiek dota iespēja salīdzināt dažādus izolatoru un vadītāju tipus;
- 4) Aizsargietais tipa izvēle – šajā blokā tiek izvēlēta atbilstošā aizsargietais;
- 5) Elektrolīnijas pārklāšanās skaits – tiek aprēķināts kopējais izlāžu skaits, kad tiek caursista elektrolīnijas izolācija un notiek līnijas pārklāšanās, ņemot vērā tiešu un netiešu zibensizlādi;
- 6) Elektrolīnijas nolietojuma prognoze – tiek doti elektrolīnijas spriegumizturības koeficienti, ņemot vērā izolācijas novecošanos, apkārtējās vides, kā arī izolācijas bojājuma ietekmi;
- 7) Alternatīvu analīze – tiek aplūkota mainīgo parametru ietekme uz aizsargietaišu izvietojuma biežumu.

1.4. Pirmās nodaļas secinājumi

1. Izolēto vadu līnijas ir efektīvs, ekonomisks un labai draudzīgs veids, kā samazināt elektroapgādes piegādes traucējumu skaitu. Kailvadu gaisvadu līnijas pārbūvējot par izolēto vadu līnijām, bojājumu skaits samazinās vairāk kā 10 reizes. Izolēto vadu līnijām tehnisko un citu bojājumu skaits ir vairāk kā 8 reizes zemāks kā kabeļlīnijām, turklāt izbūves izmaksas ir zemākas.
2. Galvenais izolēto vadu trūkums salīdzinājumā ar kailvadu līnijām ir to nepieciešamība pēc zibens radītā elektriskā loka aizsardzības. Gaisvadiem kailvadu izpildījumā zibensizlādes inducēta pārsprieguma radīts elektriskais loks elektromagnētiskā laukā ietekmē brīvi pārvietojas pa elektrolīnijas vadu, līdz tas nodziest, bet izolēto vadu līnijām šo brīvo kustību ierobežo vada izolējošais apvalks, kā rezultātā var tikt bojāta izolētā vada izolācija un pats vadītājs.
3. Eiropas standartā EN 50397-3 ir noteikts, ka aizsargietaišu izvietojuma prasības tiek noteiktas nacionālajos standartos vai tehniskajos norādījumos. Nacionālie normatīvie dokumenti nedod viennozīmīgu atbildi uz jautājumu, cik bieži un kur būtu jāizvieto izolēto vadu elektriskā loka aizsargietais, lai efektīvi tiktu pasargāts vadītājs.
4. Aizsargietaišu izvietojuma biežuma noteikšanai ir piedāvātas metodoloģijas, piemēram, IEEE 1410 standarta un SINTEF modelis. Šīm metodoloģijām tiek izmantotas reģionam neatbilstošas zibensstrāvas maksimumvērtības, kas rezultātā dod neprecīzu rezultātu un netiek ņemta vērā alternatīvu (piemēram, cita zibensstrāva, izolators vai izolētais vads) analīze, kā arī netiek ņemta vērā izolēto vadu izolācijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas spriegumizturību. Piedāvātā metodoloģija izmanto reģionam atbilstošus zibensizlādes parametrus, kā arī ņem vērā izolēto vadu nolietojanos un alternatīvu analīzi, kā rezultātā, tiek iegūts precīzāks aizsargietaišu izvietojuma biežums.

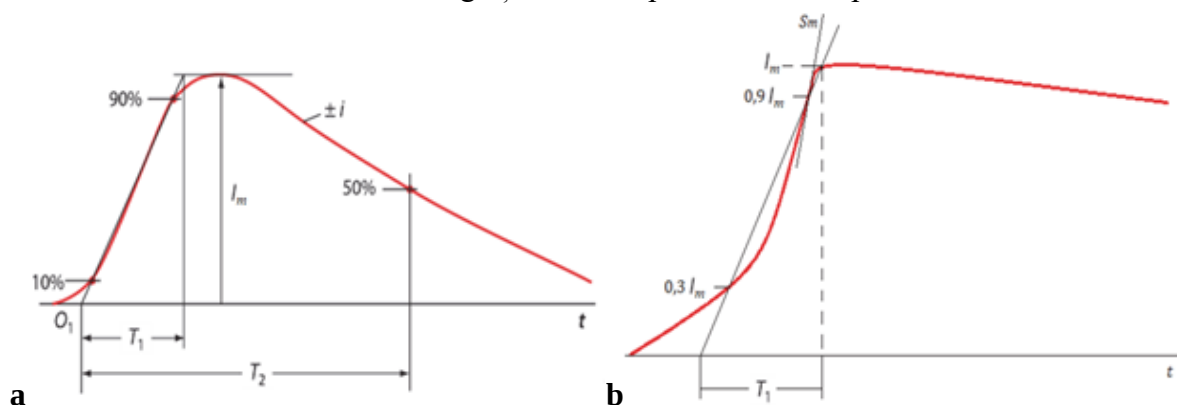
2. ZIBENSSTRĀVA UN TĀS MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

2.1. Zibensstrāvu raksturojošie parametri

Zibensizlāde ir viena no dabas parādībām, kuru nav iespējams novērst ne ar vienu metodi vai ietaisi, tāpēc ir svarīgi apzināt un novērtēt zibensizlādes parametrus, kas var radīt bīstamo iedarbi. Zibensizlādes radītos bojājumus var ievērojami samazināt, izvēloties atbilstošu aizsargietaisi. Ar matemātisko modeļu palīdzību ir iespējams modelēt zibensstrāvu un tās ietekmi uz aizsargājamo objektu, kā rezultātā ir iespējams izvēlēties nepieciešamo elektropārvades līnijas izolācijas noturību pret pārspriegumiem, kā arī aizsargietaišu izvietojanas vietas un biežumu.

Zibensstrāvas parametri tiek pētīti kopš 20. gs. vidus un lielākoties tiek iegūti no mērījumiem, kas veikti augstos objektos. IEC 62305-1 [40] dati balstās CIGRE iegūto mērījumu rezultātu apkopojumu. Zibensstrāva parasti sastāv no vienas vai vairākām komponentēm (pirmās impulsstrāvas, sekojošām impulsstrāvām vai ilgstrāvas) [28], [40]. Būtiskākie zibensstrāvu raksturojošie parametri [40], [21]:

- 1) zibensstrāvas maksimumvērtība I_m , kA;
- 2) zibensstrāvas impulsa kāpumlaiks T_1 , μ s: aplēses parametrs, kas noteikts kā 1,25-kārtīgs laiks starp punktiem, kuros impulsa frontes strāva ir 10 % un 90 % no impulsa maksimumvērtības (sk. 2.1. att.);
- 3) zibensstrāvas impulsa ilgums T_2 , μ s: aplēses parametrs, ko izsaka ar laiku no impulsa aplēses sākuma O_1 līdz brīdim, kad impulsa strāva ir samazinājusies līdz pusei no tās maksimumvērtības (sk. 2.1. att. a);
- 4) zibensstrāvas impulsa vidējais stāvums di/dt , kA/ μ s: strāvas izmaiņas vidējais ātrums laika intervālā;
- 5) zibensstrāvas impulsa maksimālais stāvums s_m , kA/ μ s (sk. 2.1. att. b);
- 6) zibens impulsa lādiņš Q , C: zibensstrāvas integrālis strāvas impulsa laikā;
- 7) zibensstrāvas īpatenerģija W/R , kJ/ Ω : zibensstrāvas plūšanas laikā noteiktā zibensstrāvas kvadrāta integrāļa attiecība pret elektriskās pretestības vienību.



2.1. att. Zibensstrāvas impulsa raksturojošo parametru grafiskā interpretācija saskaņā ar
a) IEC 62305-1 [40], b) CIGRE [21]

T_1 – zibensstrāvas impulsa kāpumlaiks, T_2 – zibensstrāvas impulsa ilgums, I_m – zibensstrāvas impulsa maksimumvērtība, O_1 – zibensstrāvas impulsa aplēses sākums, s_m – zibensstrāvas impulsa maksimālais stāvums

Jāatzīmē, ka zibens ilgstrāvām un sekojošajām impulsstrāvām nav tik liela bīstamā iedarbe kā pirmajām zibensizlādes impulsstrāvām, tāpēc tās turpmāk netiks apskatītas.

Zibensstrāvas parametriem ir varbūtējs raksturs, katra parametra pieņemtie lielumi ir balstīti uz vairāku gadu novērojumiem, turklāt katrā pasaules reģionā šie dati var mainīties, kas tikai vēlreiz pierāda to, cik zibensizlāde var būt neprognozējama. Ir pieņemts, ka katra parametra skaitliskās vērtības sadalījums ir vienāds ar logaritmisko normālo sadalījumu, kur katra zibensstrāvas parametru iespējamības blīvumu var izteikt ar vienādojumu [58], [21]

$$f(x) = \frac{1}{\beta \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2}}, \text{ kur} \quad (2.1)$$

$$z = \frac{\ln(x/M)}{\beta}$$

kur $f(x)$ – zibensstrāvas parametra iespējamības blīvums,

M – zibensstrāvas parametra mediāna vērtība,

β – logaritmiskā standarta novirze (logaritma bāze e).

Katra parametra vidējo vērtību var izteikt kā [21]

$$\mu = M \cdot e^{\beta^2/2}, \quad (2.2)$$

kur μ – zibensstrāvas parametra vidējā vērtība,

M – zibensstrāvas parametra mediāna vērtība,

β – logaritmiskā standarta novirze (logaritma bāze e).

IEEE [58], [56] ir pārņēmusi J.G. Andersona [5] piedāvāto vienkāršoto zibensstrāvas varbūtības sadalījumu, ko vispārināti var aprakstīt ar izteiksmi

$$P(I_m \geq i_m) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_m}{I_m}\right)^{k_{sad}}}, \quad (2.3)$$

kur $P(I_m \geq i_m)$ – varbūtība, ka zibensstrāvas maksimumvērtība I_m pārsniegs iespējamo zibensstrāvas maksimumvērtību i_m ;

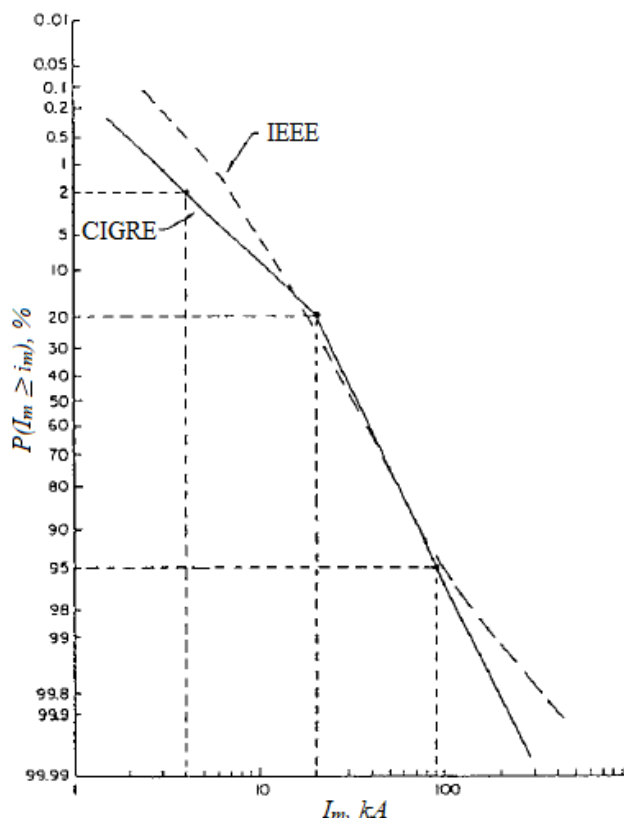
k_{sad} – sadalījumu koriģējošs parametrs.

J. G. Andersons rekomendē zibensizlādes pirmās negatīvās impulsstrāvas varbūtības sadalījumam lietot sekojošus parametrus $2 \text{ kA} \leq i_m \leq 200 \text{ kA}$, $I_m = 31 \text{ kA}$, $k_{sad} = 2,6$, bet sekundārās negatīvās impulsstrāvas varbūtības sadalījumam – $I_m = 12 \text{ kA}$, $k_{sad} = 2,7$ [58]. IEEE pieņemtā J. G. Andersona zibensstrāvas sadalījuma salīdzinājums ar CIGRE lietoto sadalījumu parādīts 2.2. att. No dotajām līknēm redzams, ka IEEE vienkāršotais sadalījums un CIGRE divu līniju sadalījums ļoti labi sakrīt varbūtības $P(I_m \geq i_m) = 20 \div 95 \%$ diapazonā. CIGRE [21] atļauj zibensstrāvas maksimumvērtības noteikšanai izmantot abus sadalījumus, tāpēc aprēķinos biežāk tiek lietots vienkāršotais zibensstrāvas varbūtības sadalījums.

CIGRE un IEEE pieņemtās zibensstrāvas maksimumvērtības iespējams ir noteiktas pārāk augstas, ko pierāda ASV zibens novērojumi [31], piemēram, Ņujorkā zibensizlādes pirmās negatīvās impulsstrāvas vidējās maksimumvērtības I_m bija $18 \div 19 \text{ kA}$ robežās, bet Floridā $24 \div 25 \text{ kA}$ robežās. Tāpat pēdējā laikā tiek aplūkoti arī citi zibensstrāvas varbūtības sadalījuma parametri izteiksmē (2.3), kas dod precīzāku zibensstrāvas varbūtības sadalījumu. Dažādi zibensstrāvas varbūtības sadalījuma parametri apkopti 2.1. tabulā.

Izteiksmē (2.3) lietotie parametri zibensizlādes pirmās negatīvās impulsstrāvas varbūtības sadalījuma noteikšanai

I_m , kA	31,0	25,0	40,0	15,0	15,4	17,2	15,0	15,28	19,0	20,3
k_{sad}	2,6	2	3,09	3,09	2,31	2,49	2,4	2,44	2,56	2,87
Avots	[5]	[103]	[66]	[95]	[14]	[14]	[14]	[14]	[14]	[14]



2.2. att. Rašanās varbūtības raksturlīknes zibensstrāvai, kas var pārsniegt kritisko strāvu I_m [21]

2.2. Zibensstrāvas matemātiskie modeļi

Praksē tiek lietoti vairāki zibensstrāvas matemātiskie modeļi, tomēr, lai tos varētu plašāk pielietot, zibensstrāvas matemātiskajam modelim ir jāizpilda sekojošas prasības [49], [50]:

- 1) zibensstrāvas impulsa formai jābūt pēc iespējas tuvākai dabā novērotajai un izmērītajai;
- 2) jābūt iespējai noteikt būtiskākos zibensstrāvas parametrus;
- 3) jābūt iespējai mainīt zibensstrāvas impulsa stāvumu;
- 4) zibensstrāvas matemātiskā modeļa funkcijai jābūt atvasināmai, lai varētu aprēķināt zibensstrāvas radītos elektromagnētiskos laukus, turklāt pirmās un otrās kārtas atvasinājumiem jābūt nepārtrauktiem;
- 5) jābūt pēc iespējas vienkāršākam.

Šajā nodaļā sīkāk ir aplūkoti biežāk sastopamie un aprēķinos lietotie matemātiskie modeļi: diveksponenšu modelis, Heidlara matemātiskais modelis, kas tiek lietots IEC standartos, kā arī CIGRE matemātiskais modelis.

2.2.1. Zibensstrāvas diveksponeņu matemātiskais modelis

Zibensstrāvas diveksponeņu matemātiskais modelis ir vienkāršākais no matemātiskajiem modeļiem. Šis zinātnieku C. E. Brūsa (*C. E. Bruce*) un R. H. Goldija (*R. H. Golde*) 1941. gadā piedāvātais matemātiskais modelis ir pirmais, kas centās iekļaut tajā laikā pieejamo informāciju no zibenizlādes novērojumiem [28], [121]. Šo modeli var pierakstīt sekojoši

$$i(t) = I_0 \left(e^{-\alpha t} - e^{-\theta t} \right), \quad (2.4)$$

kur I_0 – zibensstrāvas vērtība, kA;

α un θ – viļņa pieaugumu un rimšanu raksturojoši koeficienti, s^{-1} .

Šim matemātiskajam modelim ir divi ierobežojumi. Parametriem I_0 , α un θ nav tieša fizikālā pamatojuma izteiksmē (2.4) un to vērtības nav tieši saistītas ar zibensstrāvas raksturojošajiem parametriem. Šos ierobežojumus var novērst pierakstot izteiksmi (2.4) šādā formā [49], [50]

$$i(t) = \frac{I_m}{\eta} \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), \quad (2.5)$$

kur I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA;

τ_1 un τ_2 – viļņa pieaugumu un rimšanu raksturojoši koeficienti, s^{-1} ;

η – zibensstrāvas maksimumvērtības labojuma koeficients, ko aprēķina sekojoši

$$\eta = e^{-\frac{t_{max}}{\tau_1}} - e^{-\frac{t_{max}}{\tau_2}}, \quad (2.6)$$

kur

$$t_{max} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right). \quad (2.7)$$

Ar zibensstrāvas diveksponeņu matemātisko modeli nav iespējams modelēt zibensstrāvas impulsus ar mazu zibensstrāvas impulsa kāpumlaiku, jo rezultātā rodas pārmērīgi augsts maksimālais zibensstrāvas impulsa stāvums, piemēram, ja zibensstrāvas maksimumvērtība $I_m = 50$ kA un zibensstrāvas impulsa kāpumlaiks $T_1 = 0,25$ μs , tad maksimālais zibensstrāvas impulss s_m ir apmēram 545 kA/ μs , kas ir vairāk kā divas reizes augstāka kā IEC [40] noteiktā maksimālā vērtība [51]. Šai funkcijai ir pārtraukums pirmās kārtas atvasinājumam un pie $t = 0$, zibensstrāvas impulsa stāvums jeb funkcijas pirmās kārtas atvasinājums sākās ar tās maksimālo vērtību [39], [51]. Zibensstrāvas diveksponeņu modelim ir izstrādātas arī dažādas modifikācijas [62], [45], tomēr arī šajos modeļos netiek izpildīts nosacījums $(di/dt)_{t=0} = 0$ [49].

2.2.2. Heidlara zibensstrāvas matemātiskais modelis

Visbiežāk sastopamais zibensstrāvas matemātiskais modelis ir F. Heidlara piedāvātais modelis, kuru izmanto arī IEC 62305 sērijas standartos. Heidlara modelim ir stingri pieņemts, ka strāva sāk plūst tikai, kad $t = 0$. Lai būtu iespējams atsevišķi aplūkot zibenizlādes lādiņu, zibensstrāvas impulsa stāvumu un zibensstrāvas maksimumvērtību, vispārīgi šo modeli var pierakstīt sekojoši [49]:

$$i(t) = I_m \cdot x(t) \cdot y(t), \quad (2.8)$$

kur I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA;

$x(t)$ – zibensstrāvas pieauguma funkcija;

$y(t)$ – zibensstrāvas rimšanas funkcija.

Izteiksmē (2.8) ir noteikts, ka pieauguma funkcija $x(t)$ ir pilnībā nodalīta no rimšanas funkcijas $y(t)$, ko panāk, pieņemot, ka pieauguma fāzē rimšanas funkcija mainās, kamēr $y(t) = 1$, un rimšanas fāzē pieauguma funkcija arī mainās, kamēr $x(t) = 1$. Rimšanas fāzei parasti ir neliela ietekme, aplūkojot zibensstrāvas ietekmi uz aizsargājamo objektu. Rimšanas fāzi var izteikt ar funkciju [49]

$$y(t) = e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (2.9)$$

kur τ_2 – viļņa rimšanas koeficients.

Pieauguma fāzi var izteikt ar funkciju [49]

$$x(t) = \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}, \quad (2.10)$$

kur τ_1 – viļņa pieauguma koeficients,

n – zibensstrāvas stāvuma koeficients.

Ievietojot (2.8) izteiksmes (2.9) un (2.10), iegūstam Heidlera zibensstrāvas matemātisko modeli [49]

$$i(t) = \frac{I_m}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (2.11)$$

kur I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA;

τ_1 – viļņa pieauguma koeficients;

τ_2 – viļņa rimšanas koeficients;

n – zibensstrāvas stāvuma koeficients;

η – zibensstrāvas maksimumvērtības labojuma koeficients, ko aprēķina sekojoši [27]

$$\eta = e^{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}}. \quad (2.12)$$

Ar lielu zibensstrāvas stāvuma koeficientu iespējams ļoti labi nošķirt zibensstrāvas pieauguma un rimšanas fāzes, bet ar mazu koeficientu iespējams panākt lēzenāku pāreju starp abām fāzēm. Heidlera funkcijas pirmā un otrā atvasinājuma funkcijas ir nepārtrauktas, turklāt tās ir vienādas ar nulli, kad $t = 0$, kas atbilst reāliem zibensstrāvas mērījumiem [49], [39].

2.2.3. CIGRE zibensstrāvas matemātiskais modelis

CIGRE zibensstrāvas matemātiskais modelis ir balstīts uz vairāk kā 10 gadus ilgu pētījumu datu analīzi, galvenās prasības, kas tika izvirzītas šim modelim ir sekojošas [21]:

- 1) jānodrošina precīza zibensstrāvas maksimumvērtība;

- 2) zibensstrāvas kāpuma stāvuma vērtībai jāatbilst strāvas maksimumvērtībai, pieņemts 90 % no zibensstrāvas maksimumvērtības;
- 3) pirmo zibensizlāžu vidējais stāvums tiek izteikts kā kāpuma laiks, kas iet caur 30 % un 90 % vērtībām no zibensstrāvas maksimumvērtības (2.1. att. b). Lai nodrošinātu izliekumu zibensstrāvas impulsa kāpuma posmā, šim kāpuma laikam jābūt lielākam par zibensstrāvas maksimumvērtības I_m dalījumu ar zibensstrāvas impulsa maksimālo stāvumu s_m . Sekojošām zibensizlādēm šo prasību var neņemt vērā.

Šī modeļa galvenais trūkums ir tas, ka zibensstrāvas impulss tiek izteikts ar divām atsevišķām izteiksmēm, viena raksturo kāpuma posmu līdz 90 % no zibensstrāvas maksimumvērtības, bet otra rimšanas posmu. Pirmās zibensizlādes zibensstrāvas kāpuma posmu var izteikt kā

$$i(t) = At + Bt^n, \quad (2.13)$$

kur A un B ir konstantes. Pieņemts, ka zibensstrāvas stāvuma maksimālā vērtība tiek sasniegta pie 90 % no zibensstrāvas maksimumvērtības laikā t_n , kas ir atkarīgs no stāvuma koeficienta n . Abas mainīgo vērtības tiek noteiktas iterāciju ceļā, par pamata vienādojumu pieņemot [21]:

$$\left(\frac{1-3x}{2S_N}\right)(1-x)^n = \frac{x(n-1)}{2S_N} + \left(\frac{1-3X_N}{2S_N}\right)(1-x), \quad (2.14)$$

kur

$$S_N = s_m \frac{t_f}{I_m} \quad \text{un} \quad X_N = 0,6 \frac{t_f}{t_n}, \quad (2.15)$$

kur I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA;

s_m – zibensstrāvas impulsa maksimālais stāvums, kA/μs;

t_f – kāpuma laiks, μs.

Parametrus t_n un n atrod no izteiksmēm [21]:

$$t_n = 0,6t_f \left[\frac{3S_N^2}{(1+S_N^2)} \right] \quad \text{un} \quad (2.16)$$

$$n = 1 + 2(S_N - 1) \left(2 + \frac{1}{S_N} \right). \quad (2.17)$$

Izteiksmes (2.13) konstantes A un B var izteikt sekojoši [21]:

$$A = \frac{1}{n-1} \left[0,9 \frac{I_m}{t_n} \cdot n - s_m \right], \quad B = \frac{1}{t_n^n (n-1)} [s_m \cdot t_n - 0,9I_m]. \quad (2.18)$$

Sekojošo zibensizlāžu kāpuma posmu var izteikt kā [21]:

$$i(t) = s_m \cdot t_f. \quad (2.18)$$

Zibensstrāvas impulsa rimšanas posma lielākajam stāvumam jābūt tā sākumā, lai nodrošinātu pēc iespējas laidenāku pāreju no zibensstrāvas impulsa kāpuma posma, šādu pāreju nodrošina izteiksme [21], ko pieraksta sekojoši:

$$I = I_1 e^{-(t-t_n)/t_1} - I_2 e^{-(t-t_n)/t_2}, \quad (2.19)$$

kur I_1, I_2 – strāvas vērtības, kA;

t_1, t_2 – kāpuma un rimšanas laiks, μ s;

t_n – laiks, kurā tiek sasniegta zibensstrāvas maksimumvērtība, μ s.

Strāvas vērtības aprēķina sekojoši [21]:

$$I_1 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \left[s_m + 0,9 \frac{I}{t_2} \right], \quad I_2 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \left[s_m + 0,9 \frac{I}{t_1} \right], \quad (2.20)$$

bet kāpuma un rimšanas laikus [21]:

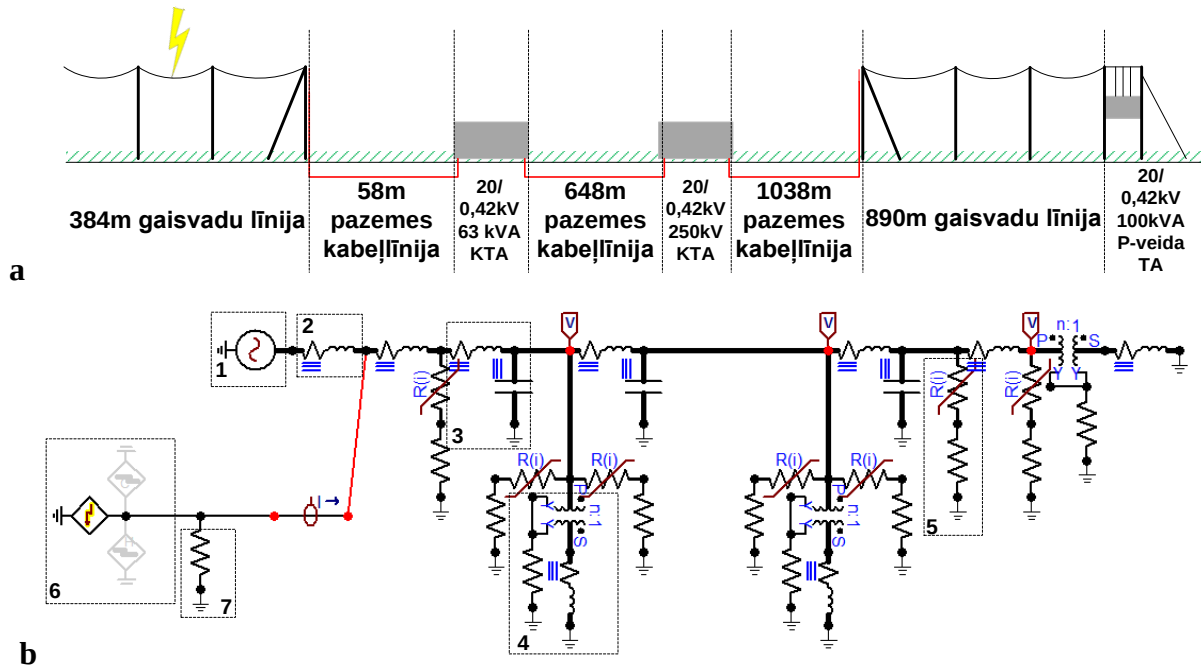
$$t_1 = \frac{(t_h - t_n)}{\ln 2}, \quad t_2 = 0,1 \frac{I_m}{s_m}, \quad (2.21)$$

kur t_h jeb T_2 – zibensstrāvas impulsa ilgums, μ s.

2.3. Izstrādātais EMTP/ATP modelis zibensstrāvas simulācijai vidsprieguma izolēto vadu līnijās

2.3.1. Zibensstrāvas simulācijas modelis

Pirmā prasība, kuru nepieciešams salīdzināt, ir ar matemātisko modeli iegūtā zibensstrāvas impulsa formu ar dabā novēroto. Autora publikācijā [127] zibensstrāvas matemātiskie modeļi tika pārbaudīti, modelējot zibensizlādi vidsprieguma nozares līnijā, kas attēlota 2.3. att. Zibensizlādes modelēšanai tika lietota EMTP/ATP datorprogramma. Jāatzīmē, ka zibensstrāvas modelēšanai vēl netiek izmantotas izolēto vadu līnijas, lai iegūtos rezultātus varētu salīdzināt ar literatūrā atrodamajiem

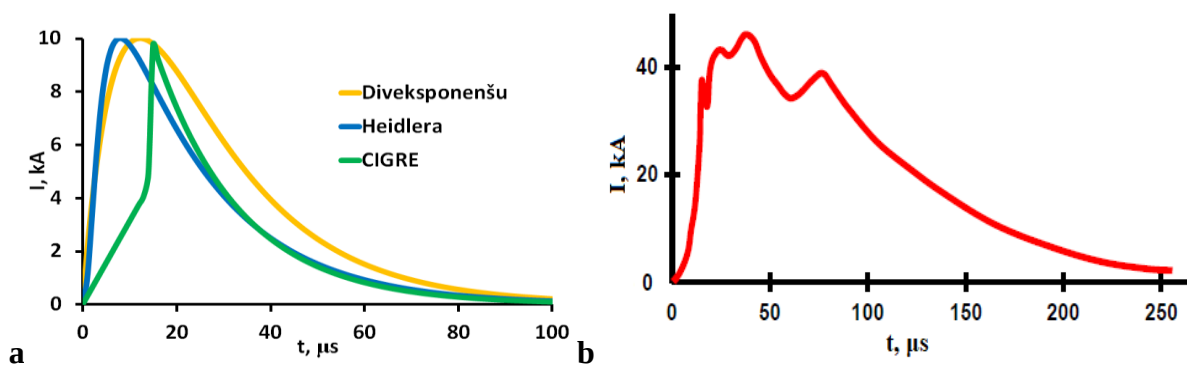


2.3. att. Zibensizlāde vidsprieguma elektropārvades līnijā [127]

a) elektropārvades līnijas attēlojums, b) EMTP/ATP shematiskais attēlojums

1 – tīkla sprieguma avots, 2 – gaisvadu līnijas posms, 3 – kabeļlīnijas posms, 4 – transformatoru apakšstacija ar pieslēgto slodzi, 5 – metāloksīda izlādnis, 6 – zibensstrāvas avots, 7 – zibens kanāla pretestība

EMTP/ATP datorprogrammā tīkla spriegums tika modelēts ar trīsfāžu (20 kV, 50 Hz) maiņstrāvas avotu (1), tēraudalumīnija kailvadu modelēšanai tika izmantota RL ķēde (2) ar līnijas aktīvo un induktīvo īpatpretestību $0,7774 \Omega/\text{km}$ un $0,4 \Omega/\text{km}$, pazemes kabeļlīnija tika aizstāta ar RL ķēdi un paralēli ieslēgtu kondensatoru (3), kur kabeļa aktīvā īpatpretestība ir $0,11 \Omega/\text{km}$, induktivitāte $0,35 \text{ mH}/\text{km}$ un kapacitāte $0,29 \mu\text{F}/\text{km}$. Transformatoru apakšstacijas tika aizvietotas ar ideālu trīsfāžu transformatoru un slodzi, kas izteikta kā RL ķēde (4) ar parametriem atbilstoši transformatora nominālajai jaudai. Pārsprieguma izlādņi tika modelēti, izmantojot nelineārus, strāvas atkarīgus rezistorus (5). Izlādņi tika izvietoti atbilstoši Latvijas energostandartam LEK 042-1 [73], zemējuma pretestība pieņemta 10Ω , atbilstoši LEK 048 [74] un izlādņa parametri kā ABB POLIM-D 24kV [34] izlādņiem. Zibensstrāvas modelēšanai tika lietoti EMTP/ATP piedāvātie Heidlera, CIGRE un diveksponeņu strāvas avotu modeļi (6). Zibens kanāla pretestība (7) parasti ir pieņemta vienāda ar 400Ω [4], tomēr literatūrā tiek piedāvāti arī citi lielumi līdz pat 2500Ω [22], [10]. Zibensstrāvas matemātisko modeļu iegūto zibensstrāvas impulsu formu grafiskais salīdzinājums parādīts 2.4. att. a, bet 2.4. att. b redzama dabā novērotās pirmās negatīvās zibensizlādes zibensstrāvas impulsa forma.



2.4. att. Zibensstrāvas impulsa formu grafiskais salīdzinājums a) matemātisko modeļu zibensstrāvas impulss 10 kA, 8/20 μs b) dabā novērotās pirmās negatīvās zibensizlādes zibensstrāvas impulss [51]

Salīdzinot 2.4. att. dotās līknes redzam, ka neviens no matemātiskajiem modeļiem nespēj pilnīgi attēlot zibensstrāvas impulsu, jo dabā zibensstrāvai nav tik gluda forma.

Autora publikācijā [127], salīdzinot zibensstrāvas matemātiskos modeļus vīdsprieguma elektriskajā tīklā, var novērot, ka Heidlera piedāvātais matemātiskais modelis vislabāk apraksta zibensstrāvas impulsa vilni. Diveksponeņu un CIGRE zibensstrāvas matemātisko modeļu pirmās kārtas atvasinājums $(di/dt)_{t=0} \neq 0$, tas nozīmē, ka maksimālā zibensstrāvas stāvuma parādīšanās laiks neatbilst dabā novērotajam. Turklāt diveksponeņu modeli nevar pielietot pie maziem zibensstrāvas impulsa kāpumlaikiem, bet CIGRE modeļa pielietojumu apgrūstina, tas ka zibensstrāvas impulsa forma tiek aprakstīta ar divām izteiksmēm. Arī zibensstrāvas impulsa parametrus nav iespējams precīzi pielāgot zibensstrāvas impulsam, jo to diapazons ir pietiekoši plašs [116]. Galveno parametru diapazons dots 2.2. tabulā. Tas tikai vēlreiz pierāda, to, cik zibensizlādei ir varbūtējs raksturs un cik sarežģīti inženieriem ir paredzēt tās bīstamo iedarbi uz elektropārvades līniju vai jebkuru citu objektu.

Zibensstrāvas impulsa parametru diapazons [118]

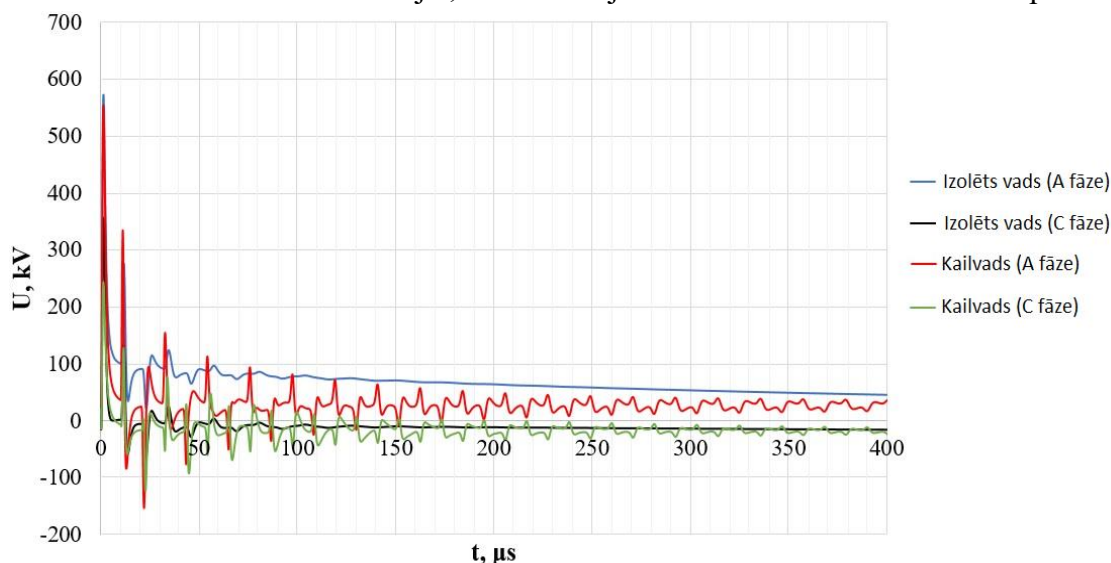
Zibensstrāvas impulsa parametrs	Diapazons
Zibensstrāvas maksimumvērtība I_m	1 ÷ 250 kA
Zibensstrāvas impulsa stāvums di/dt	1 ÷ 210 kA/ μ s
Zibensstrāvas impulsa kāpumlaiks T_1	0,5 ÷ 30 μ s
Zibensstrāvas impulsa ilgums T_2	10 ÷ 250 μ s
Zibens impulsa lādiņš Q	0,2 ÷ 20 C

Ņemot vērā augstāk minēto zibensaizsardzības ietaišu simulācijas modelī zibensstrāvas impulsa aprakstīšanai ir lietots Heidlera matemātiskais modelis.

2.3.2. Zibensstrāvas simulācijas modelis izolēto vadu līnijā

Kad noskaidrots piemērotākais zibensstrāvas modelis, nepieciešams izstrādāt modeli zibensstrāvas simulācijai izolēto vadu līnijā. Lai pilnvērtīgi izstrādātu datormodeli zibensizlādes modelēšanai izolēto vadu elektrolīnijā ir veikta zibensstrāvas simulācija videsprieguma kailvadu un izolēto vadu elektrolīnijā, izmantojot *EMTP/ATP* līniju un kabeļu konstantes bloku *LCC* (*Line/Cable Constant*) ar *JMarti* modeli [84]. *JMarti* modelis paredz darbības frekvenču diapazonā no $5 \cdot 10^{-2}$ Hz līdz $5 \cdot 10^8$ Hz, ievērojot virsmas efekta ietekmi [4]. *LCC* blokā iespējams izmantot arī citus modeļus, piemēram, *PI* modeli, kas piemērots īsu, līdz dažu desmitu kilometru elektrolīniju simulēšanai, tomēr no frekvences atkarīgais *JMarti* modelis, aplūkojot zibensstrāvas izplatīšanos elektrolīnijā, ir precīzāks, bet aprēķinu process ir laikietilpīgāks [111], [88], [104]. Simulācijai izmantots 2.6. attēlā dots modelis, bez 5. – 9. bloka. Mainot iestatījuma parametrus, *LCC* blokā iespējams izvēlēties kailvadu, izolēta vada/kabeļa līniju vai slēgtu cauruli.

2.5. attēlā redzams, ka zibensizlādes ar $I_m = 15$ kA radītais pārspriegums izolēto vadu elektrolīnijā ir mazliet lielāks kā kailvadu elektrolīnijā, bet tas arī samazinās straujāk, turklāt ar mazāk svārstībām. Izolēto vadu elektrolīnijai blakus fāzēs inducētais pārspriegums ir apmērām 20 % lielāks kā kailvadu elektrolīnijai, kas skaidrojams ar samazināto attālumu starp fāzēm.

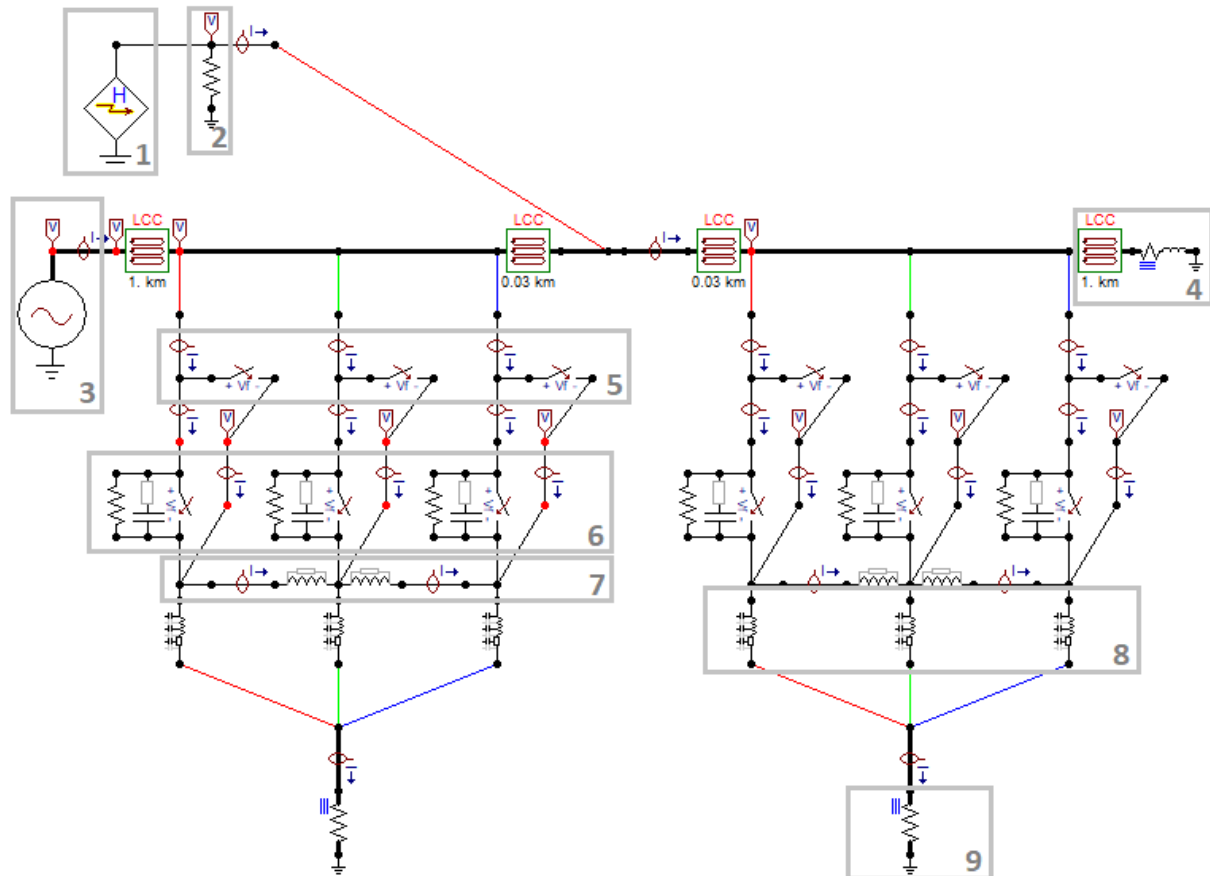


2.5. att. 60 m no zibensizlādes fāzē A radīts pārspriegums fāzēs A un C [129]

2.3.3. Zibensstrāvas simulācijas modelis izolēto vadu līnijā ar aizsargietaisi

Autora publikācijā [129] apskatīts arī elektriskā loka aizsargietaise un tā darbības simulācijas modelis, zibensizlādei notiekot vīdsprieguma nozares elektrolīnijas balstā. Promocijas darbā aplūkots modelis, kas dots 2.6. attēlā, kur zibensizlāde notiek laiduma vīdū starp diviem balstiem. Ar doto modeli aplūkoti varianti, kad aizsargietaise izvietota abos balstos, aizsargietaise nav nevienā balstā, aizsargietaise ir balstā, kas atrodas barošanas avota pusē un aizsargietaise balstā, kas atrodas slodzes pusē.

Zibensstrāvas impulsa aprakstīšanai, kā iepriekš tika noskaidrots, ir lietots Heidlera strāvas avots (2.6. att. 1), ko matemātiski apraksta izteiksme (2.11). Zibensstrāvas maksimumvērtība $I_m = 3$ kA. Atbilstoši IEC-62305-1 [40] pirmās zibensizlādes aprakstīšanai $\eta = 0,93$, $\tau_1 = 19$ μ s, $\tau_2 = 485$ μ s un $n = 10$.



2.6. att. EMTP/ATP modelis zibensizlādes simulācijai vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas laidumā

1 – Heidlera zibensstrāvas avots, 2 – zibens kanāla pretestība, 3 – tīkla sprieguma avots, 4 – elektrolīnijas slodze, 5 – PAD aizsargietaises, 6 – izolatori, 7 – traversa, 8 – elektrolīnijas balsts, 9 – balsta zemētāja pretestība

Zibens kanāla pretestība (2.6. att. 2) vienāda ar 400 Ω . Tīkla spriegums (2.6. att. 3) ir vienāds ar 20 kV un 50 Hz frekvenci. Elektrolīnijas slodze (2.6. att. 4) ir vienāda ar RL slodzi, kas atbilst 250 kVA jaudas transformatoram. Izolēto vadu līnija attēlota ar LCC bloku ar JMarti modeli, kur posma garums dots pie katra bloka. Modelī ir lietots CCXWK tipa 70 mm² izolētais vads ar īpatnējo pretestību 0,493 Ω /km. PAD tipa aizsargietaise (2.6. att. 5) ir attēlota kā sprieguma kontroles slēdzis starp izolēto vadu un traversu, iestatītais nostrādes spriegums ir 180 kV. Elektrolīnijas izolators (2.6. att. 6) ir attēlots kā paralēla RC ķēde starp izolēto vadu un traversu, kur $R = 25$ M Ω un $C = 100$ pF (piekarizolatoram $C = 80$ pF) [55]. Izolatora pārklāšanās ir modelēta ar paralēlu sprieguma kontroles slēdzi ar nostrādes spriegumu

191,7 kV, kas atbilst spriegumam, kas nepieciešams, lai notiktu izolēto vadu elektrolīnijas pārklāšanās. Metāla traversas (2.6. att. 7) induktivitāte $L_{ca} = 1 \mu\text{H}$, ko aprēķina sekojoši [37]:

$$L_{ca} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_{ca}}{r_{ca}} \right), \quad (2.22)$$

kur h_{ca} – traversas augstums virs zemes, m,

r_{ca} – ekvivalents traversas rādiuss, m.

Elektrolīnijas balsta pretestība ir aprakstīta ar izkļiedētu parametru pretestību, ko EMTP/ATP apraksta LINEZT_1 bloks (2.6. att. 8), kur balsta pretestība $Z_p = 295 \Omega/\text{m}$, ko aprēķina sekojoši [19]:

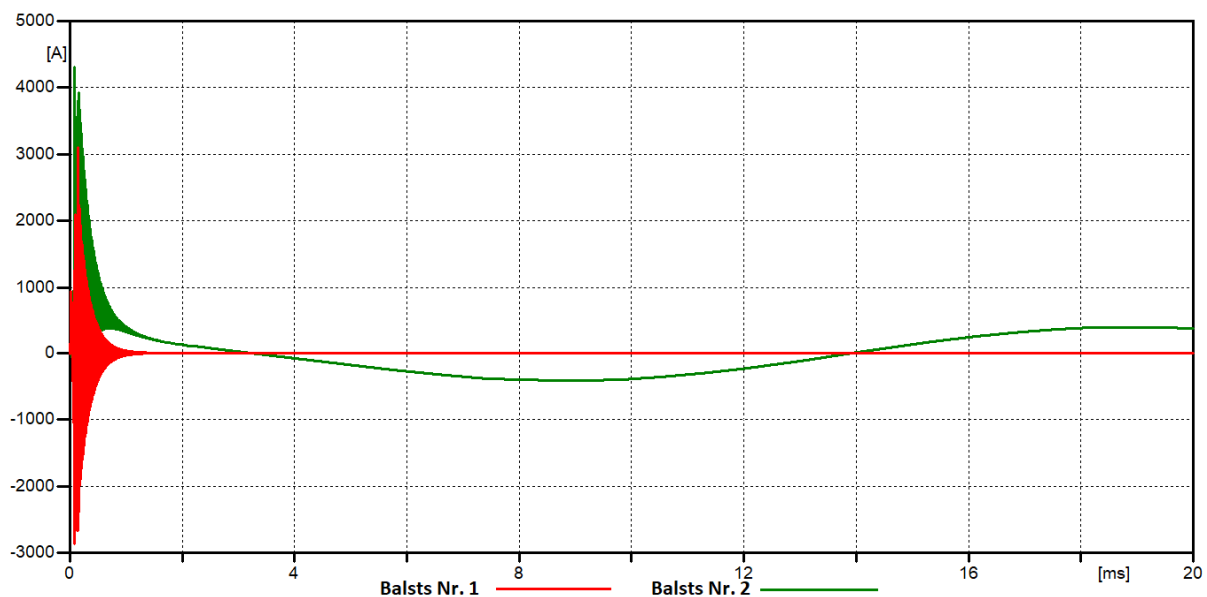
$$Z_p = 60 \cdot \ln \left(2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{H_p}{r_p} \right) - 60, \quad (2.23)$$

kur H_p – balsta augstums m,

r_p – balsta rādiuss, m.

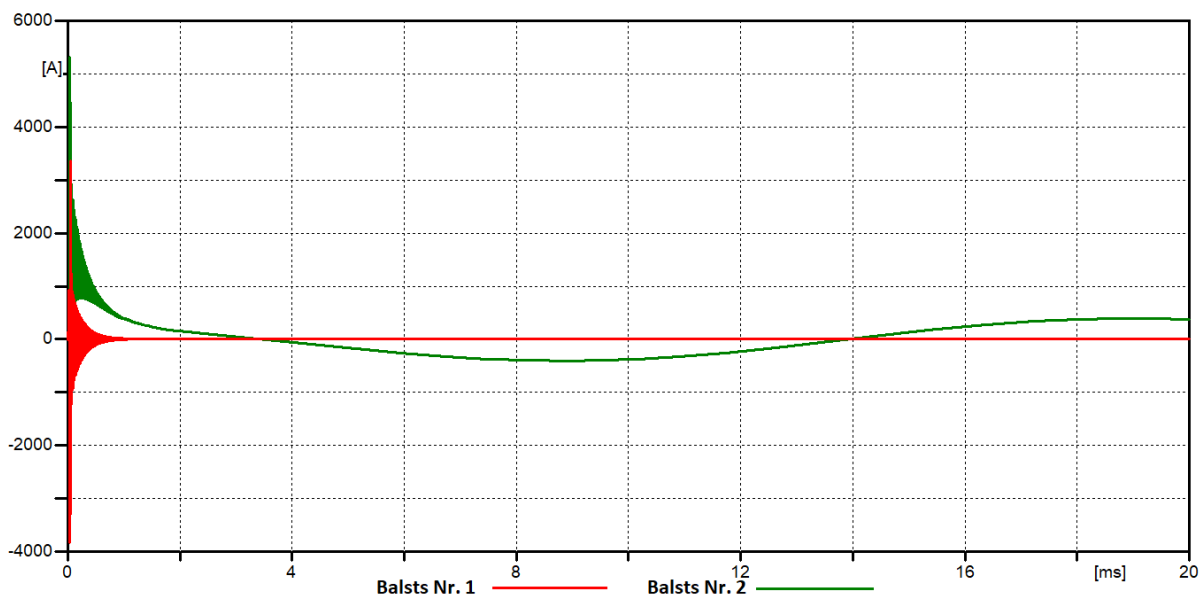
Balsta zemētāja pretestība (2.6. att. 9) balstiem bez zemējuma ir 1000Ω [19].

Kā pirmo aplūkosim variantu, kad aizsargietais nav uzstādīts nevienā balstā, tātad elektrolīnijā bez aizsargietaisēm. 2.7. attēlā ir dotas strāvu vērtības katrā balstā, balsts Nr. 1 ir balsts, kas atrodas barošanas avota pusē, bet balsts Nr. 2 – slodzes pusē.



2.7. att. Strāvu vērtības balstos bez aizsargietaisēm

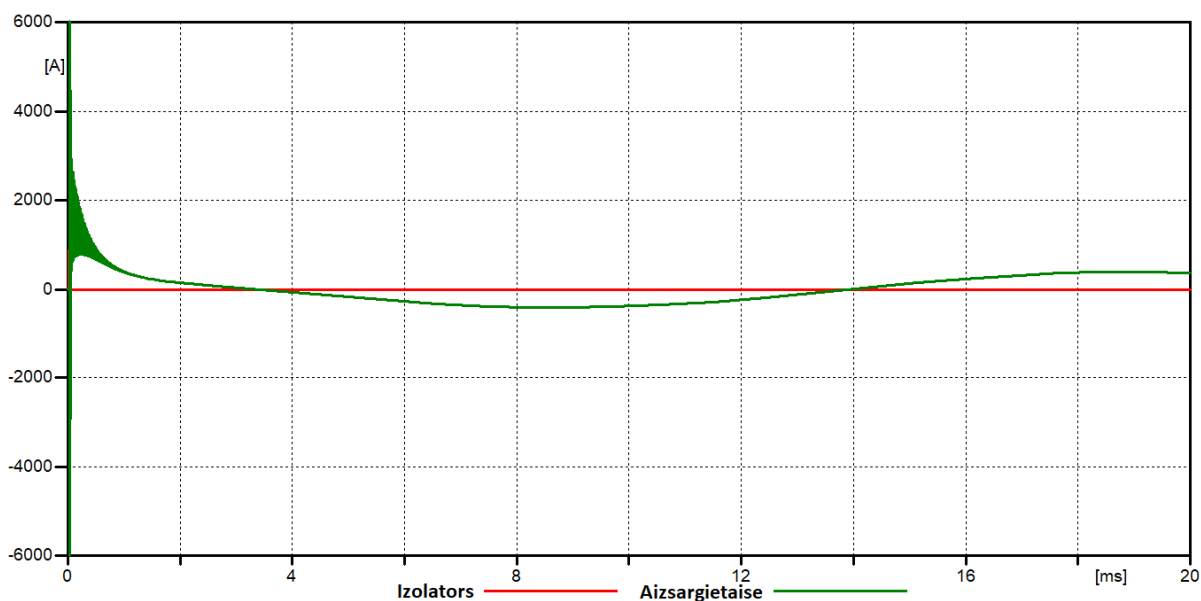
No 2.7. attēla redzams, ka, notiekot zibensizlādei, notiek elektrolīnijas pārklāšanās balstā Nr. 2 jeb balstā, kurš atrodas slodzes pusē, kas atbilst teorētiski sagaidāmajam, t.i., zibensizlādes radītais pārspriegums virzās uz slodzes pusi līdz balstam, kurā iedegas elektriskais loks. 2.8. attēlā dotas strāvu vērtības variantā, kad aizsargietais uzstādīts abos balstos.



2.8. att. Strāvu vērtības balstos ar aizsargietaisēm abos balstos

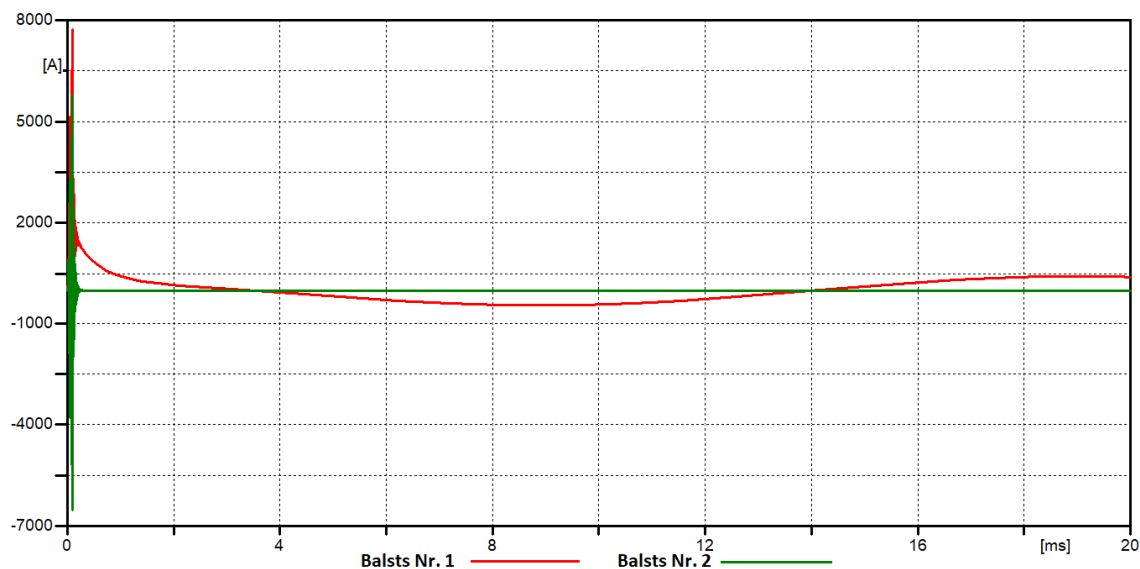
Kā redzams 2.8. attēlā, iegūtais rezultāts būtiski neatšķiras no 2.7. attēlā dotā. Lai notiktu elektrolīnijas pārklāšanās strāvai jāpārsniedz $I_{ml} = 4500$ A, kas arī redzams 2.7. un 2.8. attēlā. Balstā Nr. 2 jeb balstā, kas ir slodzes pusē, šī vērtība tiek pārsniegta, tāpēc arī ir notikusi elektrolīnijas pārklāšanās, bet balstā Nr. 1 šī vērtība nav pārsniegta, tāpēc arī nav notikusi elektrolīnijas pārklāšanās.

2.9. attēlā dots balsta Nr. 2 strāvas sadalījums uz izolatora un aizsargietaisies.



2.9. att. Strāvas sadalījums uz izolatora un aizsargietaisies balstā Nr. 2, ja aizsargietaisies izvietotas abos balstos

2.9. attēlā skaidri redzams, ka elektriskais loks ir iededzies uz aizsargietaisies nevis notikusi elektrolīnijas pārklāšanās, tātad elektrolīnija netiek bojāta. Ja aizsargietaisē ir uzstādīta tikai balstā Nr. 2, tad iegūtie rezultāti sakrīt ar 2.8. un 2.9. attēlā dotajiem, tāpēc šie rezultāti nav atsevišķi aplūkoti. 2.10. attēlā dotas strāvu vērtības gadījumā, kad aizsargietaisē ir uzstādīta tikai balstā Nr. 1.



2.10. att. Strāvu vērtības balstos, ja aizsargietais izvietots tikai balstā Nr. 1

No 2.10. attēla redzams, ka, notiekot zibensizlādei laiduma vidū ar aizsargietaisi tikai barošanas avota pusē, pārklāšanās balstā, kas atrodas slodzes pusē, nenotiek, kaut gan strāvas vērtība pārsniedz $I_{ml} = 4500$ A, kas nepieciešama, lai notiktu elektrolīnijas pārklāšanās. Tas skaidrojams ar to, ka balstā Nr. 1 ir nostrādājusi aizsargietaisē un elektriskais loks ir iededzies uz tās, tāpēc visa zibensizlādes enerģija tiek novadīta uz aizsargietaisi un izolēto vadu elektrolīnija netiek bojāta.

Izstrādātais EMTP/ATP modelis zibensstrāvas simulācijai izolēto vadu elektrolīnijā tiks lietots piedāvātās metodoloģijas rezultātu pārbaudei.

2.4. Otrās nodaļas secinājumi

1. Aplūkojot zibensizlādes bīstamo iedarbi, zibensizlādes sekundārajām impulsstrāvām un ilgstrāvām ir minimāla bīstamība. Būtiskākie zibensstrāvas parametri, kas ietekmē radīto bojājumu apmērus, ir zibensstrāvas maksimumvērtība, zibensstrāvas impulsa kāpumlaiks un zibensstrāvas impulsa stāvums.
2. Neviens no matemātiskajiem modeļiem nespēj pilnīgi precīzi attēlot dabā novēroto zibensizlādi, jo tās parametru diapazons ir ļoti plašs un mainīgs. Tāpat dabā novērotās zibensizlādes impulsstrāvas viļņa forma nav tik gluda, kā to apraksta matemātiskie modeļi.
3. Vistuvāk dabā novērotajām zibensizlādēm atbilst Heidlara matemātiskais modelis, kas tiek lietots arī IEC 62305 standartu sērijā. Heidlara matemātiskais modelis ir ērti lietojams, turklāt ar tā ieejas datiem ir iespējams pielāgot zibensizlādes impulsstrāvu dažādiem apstākļiem.
4. Ar EMTP/ATP modeli iespējams pilnvērtīgi simulēt zibensizlādi izolēto vadu elektrolīnijā. Zibensstrāvas izplatīšanos pārklāto vadu līnijā visprecīzāk var modelēt ar no frekvences atkarīgo JMarti LCC bloku, bet aizsargietaisi ir iespējams modelēt, izmantojot, spriegumkontroles slēdzi ar nostrādes spriegumu, kas ir vienāds ar aizsargietaisē nostrādes spriegumu.
5. No izstrādātā modeļa iegūtajiem rezultātiem redzams, ka barošanas avota pusē uzstādīta aizsargietaisē arī var pasargāt elektrolīniju no zibensizlādes, tomēr elektriskais loks biežāk veidojas slodzes pusē esošajā balstā.

3. ZIBENSIZLĀDES PUNKTA NOTEIKŠANA

3.1. Zibenizlādes biežums

Zibenizlādes var rasties negaisa laikā, vulkānu izvirdumos, putekļu un sniega vētrās, tomēr vairumā gadījumu galvenais zibenizlādes cēlonis ir negaiss. Ir vairāku veidu zibenizlādes: iekšmākoņa, starpmākoņu un izlāde uz zemi. Izlāde uz zemi ir tieši tā, kas rada lielākos bojājumus elektrolīnijām un citiem objektiem uz zemes. Negaisa laikā elektroenerģijas pārtraukumus rada arī vēja sagāztie koki, tāpēc precīzu zibenizlāžu radītu elektrolīnijas bojājumu skaitu ir grūti noteikt.

Viens no parametriem, kas ietekmē elektrolīniju zibensaizsardzības ietaišu izvietojanas biežumu, ir ikgadējais zibens spērienu blīvums N_g , kas ir zibenizlāžu skaits gada laikā uz vienu km^2 . Ikgadējo zibens spērienu blīvumu N_g var noteikt no zibens spērienu blīvumu kartēm, tomēr daudzviet šādas kartes nav pieejamas. Zinot keraunlīmeni jeb vidējo negaisa dienu T_d vai stundu skaitu T_h gadā, ir iespējams aprēķināt N_g . Mēreni kontinentāla klimata apgabalos (t.sk. Latvijā) N_g aprēķinam, zinot T_d , ieteicams lietot sekojošu formulu [58]:

$$N_g = 0,04T_d^{1,25}, \quad (3.1)$$

kur N_g – ikgadējais zibens spērienu blīvums, zibenizlādes gadā/ km^2 ;

T_d – negaisa dienu skaits gadā.

Tropiskās joslas apgabaliem šī formula dod lielu kļūdu, tāpēc atšķirīgiem apgabaliem ieteicams lietot formulas, kas iegūtas no attiecīgā reģiona mērījumiem, 3.1. tabulā dažādās literatūrās piedāvātās izteiksmes dažādiem reģioniem.

3.1. tabula

Empīriskās izteiksmes N_g aprēķinam dažādos pasaules reģionos [58], [66], [56]

Pasaules reģions	Formula N_g aprēķinam
Meksika	$0,024T_d^{1,12}$
Brazīlija	$0,03T_d^{1,12}$
Kolumbija	$0,0017T_d^{1,56}$
Dienvīdāfrika	$0,04T_d^{1,25}$
Zviedrija	$0,004T_d^2$
Apvienotā Karaliste	$0,0026T_d^{1,9}$
ASV (ziemeļu daļa)	$0,11T_d$
ASV (dienvidu daļa)	$0,17T_d$
Krievija	$0,036T_d^{1,3}$
Indija	$0,1T_d$
Taizeme	$6,5 \cdot 10^{-5} T_d^{2,277}$

Maziem apgabaliem vai apgabaliem ar mazu negaisa dienu skaitu gadā T_d ir liela standarta novirze, apmēram 50%, tas nozīmē, lai iegūtu precīzus datus, ir nepieciešami vairāki gadi. Minimālais zibens izlāžu novērojumu skaits uz apskatāmo teritoriju ir 400, piemēram, ja $T_d = 5$ negaisa dienas gadā, tad, lai šādu skaitu sasniegtu, ir nepieciešami 80 gadi [52], [58].

Ikgadējo zibens spērienu blīvumu N_g iespējams aprēķināt arī, ja ir zināms negaisa stundu T_h skaits gadā [58]

$$N_g = 0,054T_h^{1,1}, \quad (3.2)$$

kur N_g – ikgadējais zibens spērienu blīvums, zibensizlādes gadā/km²;

T_h – negaisa stundu skaits gadā.

Kad aprēķināts ikgadējais zibens spērienu blīvums N_g , nepieciešams aprēķināt ikgadējo zibens spērienu skaitu N elektrolīnijā, kas ir zibensizlāžu skaits elektrolīnijā gada laikā uz vienu kilometru. Elektrolīnijas parasti atrodas augstāk, tāpēc tās ir pakļautas lielākam zibensizlādes riskam, īpaši, ja tuvumā nav augstu koku vai ēku. Ikgadējo zibens spērienu skaitu N var aprēķināt, izmantojot formulu [25]

$$N = \frac{K_o \cdot N_g \cdot (b + 10,5 \cdot h_l^{0,75})}{1000}, \quad (3.3)$$

kur N – ikgadējo zibens spērienu skaits elektrolīnijā, zibensizlādes gadā/km;

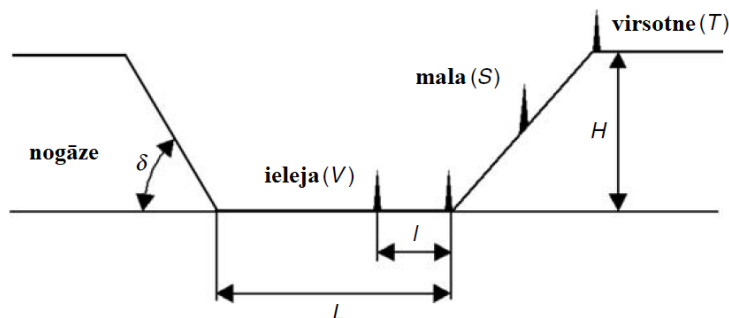
K_o – orogrāfiskais koeficients;

N_g – ikgadējais zibens spērienu blīvums, zibensizlādes gadā/km²;

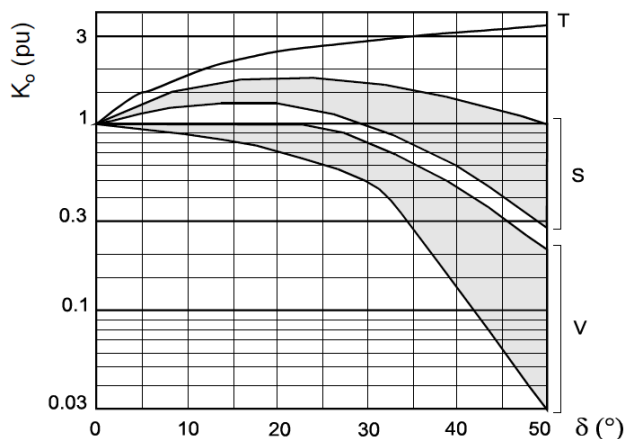
b – elektrolīnijas platums, m;

h_l – vidējais elektrolīnijas augstums, m.

Orogrāfiskā koeficienta K_o vērtības, kas ir atkarīgas no 3.1. attēlā doto parametru vērtībām, dotas 3.2. attēlā.



3.1. att. Orogrāfiskie parametri, kas ietekmē tiešu zibens spērienu skaitu videsprieguma elektrolīnijā [24]



3.2. att. Orogrāfiskā koeficienta K_o vērtības atkarībā no 3.1. att. dotajiem orogrāfiskajiem parametriem [24]

Ja orogrāfiskie parametri nav zināmi, tad orogrāfiskais koeficients tiek pieņemts $K_o = 1,8$. Ievietojot šo vērtību (3.3), iegūstam rezultātu, kas ir pielīdzināms Erikssona [42] piedāvātajai un CIGRE [21] un IEEE [58] rekomendētajai izteiksmei

$$N = \frac{N_g}{1000} (28h^{0,6} + b), \quad (3.4)$$

kur N – ikgadējo zibens spērienu skaits elektrolīnijā, zibensizlādes gadā/km;

N_g – ikgadējais zibens spērienu blīvums, zibensizlādes gadā/km²;

h – augstākā vadītāja augstums elektrolīnijas balstā, m;

b – elektrolīnijas platums, m.

Zibensizlādes ikgadējā zibens spērienu blīvuma un skaita elektrolīnijā aprēķinam metodoloģijas 1. blokā no 1.4. attēla, ir lietotas attiecīgi (3.1) un (3.4) izteiksmes.

3.2. Zibensizlādes statistika Latvijā

Lai aprēķinātu ikgadējo zibensizlādes blīvumu N_g , ir nepieciešams noskaidrot, cik liels ir negaisa dienu skaits gadā T_d Latvijas teritorijā. Pētījuma ietvaros no Valsts SIA "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs" neapstrādātā veidā tika iegūti zibensizlādes dati no zibens sensoriem, kas ietvēra sekojošu informāciju: izlādes datumu, laiku, koordinātes, zibensstrāvas maksimumvērtību, zibens spērienu skaitu izlādes laikā, vietas kļūdu un izlādes tipu (izlāde uz zemi vai izlāde mākonī). No iegūtajiem datiem ar statistikas metodēm un MS Excel un AutoCAD datorprogrammām, tika apkopota informācija par katru gadu un aprēķināta vidējā vērtība dotajā periodā. Sīkāk tika aplūkota tikai izlāde uz zemi, jo izlāde mākonī nerada bīstamu pārspriegumus vīdsprieguma elektrolīnijās. Statistika par izlādes uz zemi polaritāti un zibensstrāvas vērtību apkopota 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Statistika par izlādes uz zemi polaritāti un zibensstrāvas vērtību Latvijā (2006.-2017.g)

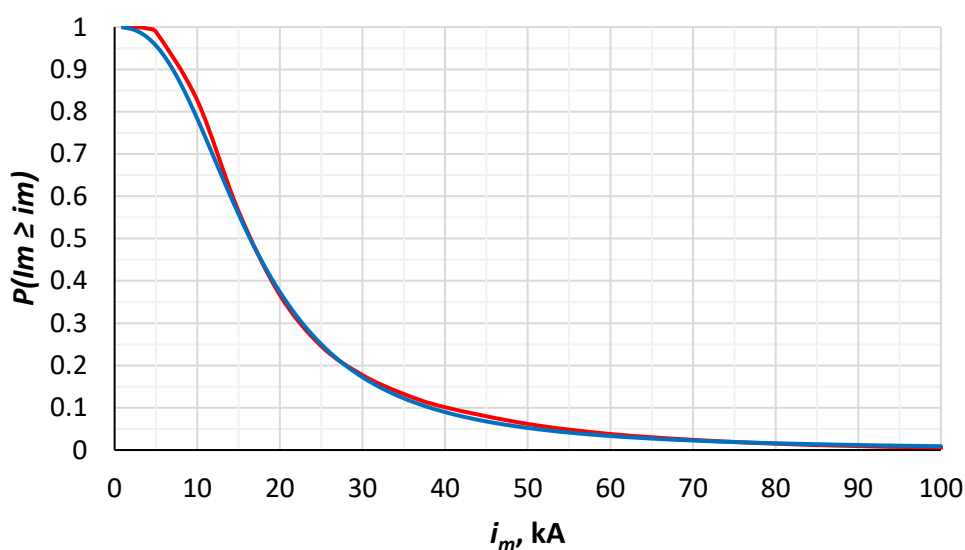
	Negatīva izlāde				Pozitīva izlāde			
	%	Zibensstrāvas vērtība, kA			%	Zibensstrāvas vērtība, kA		
		Mediāna	Min.	Max.		Mediāna	Min.	Max.
2006	89	17,1	2,8	244,6	11	23,6	1,3	382,9
2007	90	17,2	2,6	288,5	10	19,7	1,5	275,1
2008	87	17,5	1,9	189,7	13	19,7	1,7	311,5
2009	85	16,4	4,0	271,4	15	19,4	1,6	260,0
2010	86	16,7	3,5	222,0	14	15,3	2,8	271,6
2011	90	17,7	3,8	315,6	10	16,1	2,9	269,4
2012	88	18,1	4,4	279,7	12	20,5	3,3	385,4
2013	87	18,6	3,6	257,7	13	22,9	3,0	370,0
2014	82	15,8	3,5	315,7	18	12,3	3,5	357,8
2015	80	13,6	3,3	302,8	20	18,8	3,7	458,6
2016	82	14,8	3,4	310,4	18	11,2	5,0	246,5
2017	79	13,4	1,8	277,2	21	9,9	5,0	391,2
Vidējā vērtība	86	16,4	3,2	272,9	14	17,5	2,9	331,7

No 3.2. tabulas redzams, ka strāvu diapazons arī ir ļoti plašs, vidēji no 3,2 kA līdz 272,9 kA negatīvas izlādes gadījumā un no 2,9 kA līdz 331,7 kA pozitīvas izlādes gadījumā. Negatīvas polaritātes zibensizlādes vidēji ir 86 % no visām izlādēm uz zemi, tāpēc turpmākajos aprēķinos pozitīvas polaritātes zibensizlādes zibensstrāvas vērtības netiks aplūkotas. Latvijā negatīvas polaritātes zibensstrāvas vidējā mediānā vērtība ir 16,4 kA, kas arī turpmākajā darbā ir izmantota aprēķinos kā 50 % iespējamības strāva.

Zibensstrāvas sadalījums tiek aprakstīts ar izteiksmi (2.3) un koeficientiem no 2.1. tabulas, sadalījuma līkne dota 3.3. attēlā. Latvijas zibensstrāvas sadalījumu vislabāk raksturo [5] izmantotā funkcija

$$P(I_m \geq i_m) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_m}{16,4}\right)^{2,6}}, \quad (3.5)$$

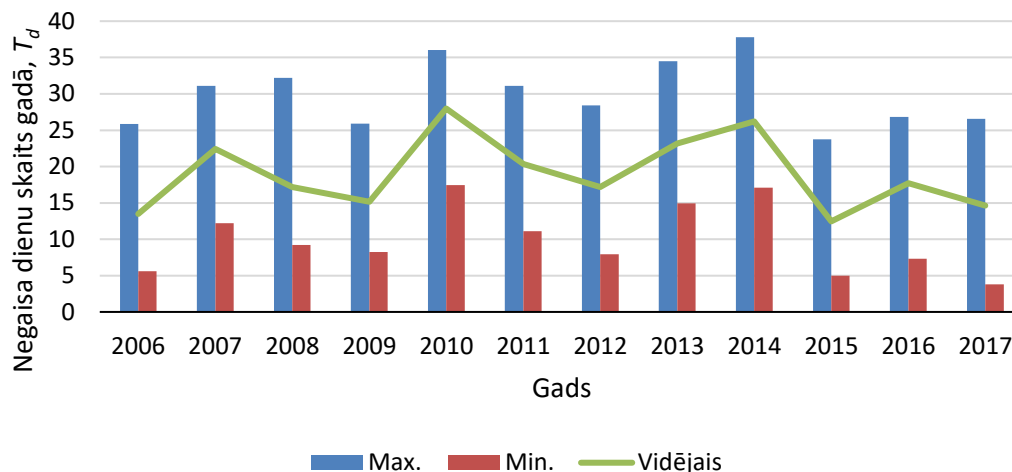
kur $P(I_m \geq i_m)$ – varbūtība, ka vidējā zibensstrāvas maksimumvērtība I_m pārsniegs iespējamo zibensstrāvas maksimumvērtību i_m .



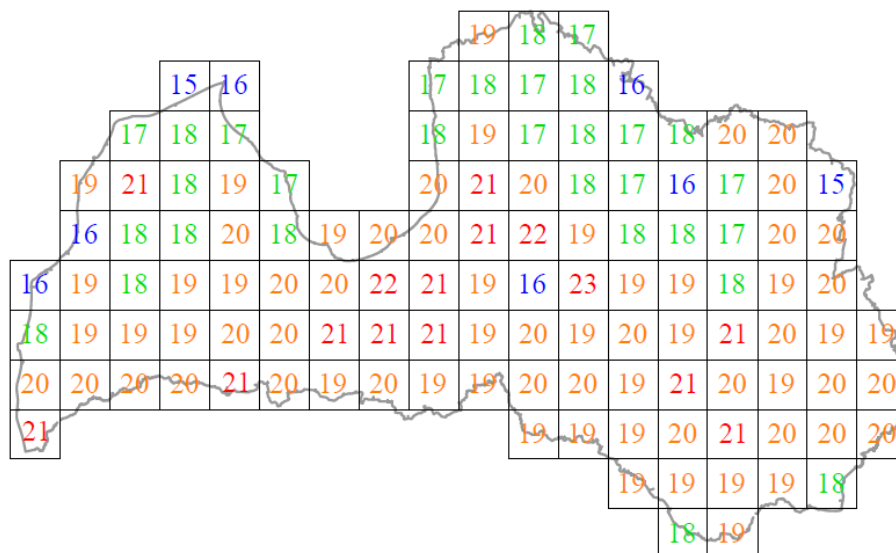
— Latvijas zibensizlādes statistika — Zibensstrāvas sadalījums pēc (3.5)

3.3. att. Zibensstrāvas maksimumvērtības sadalījuma līkne Latvijas teritorijā

Ikgadējā zibens spēriena blīvuma noteikšanai konkrētā Latvijā teritorijā, Latvija tika sadalīta 25 km × 25 km laukumos. Mazākos laukumos, piemēram, 10 km × 10 km, ir nevajadzīgi precīzs sadalījums, kas palielina apskatāmo laukumu skaitu. Savukārt laukums 30 km × 40 km, kas parasti ir sastopams kartēs ar mērogu 1:50000, ir pārāk liels [83]. Katram laukumam tika apkopots negaisa dienu skaits katrā gadā un tad aprēķināts vidējais negaisa dienu skaits dotajā periodā. Rezultātā negaisu dienu skaits gadā apskatāmajos laukumos dots 3.4. attēlā. Vidējais negaisa dienu skaits gadā T_d Latvijas teritorijā dots 3.5. attēlā.



3.4. att. Negaisa dienu skaits gadā T_d Latvijā pa gadiem aplūkotajos $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ laukumos



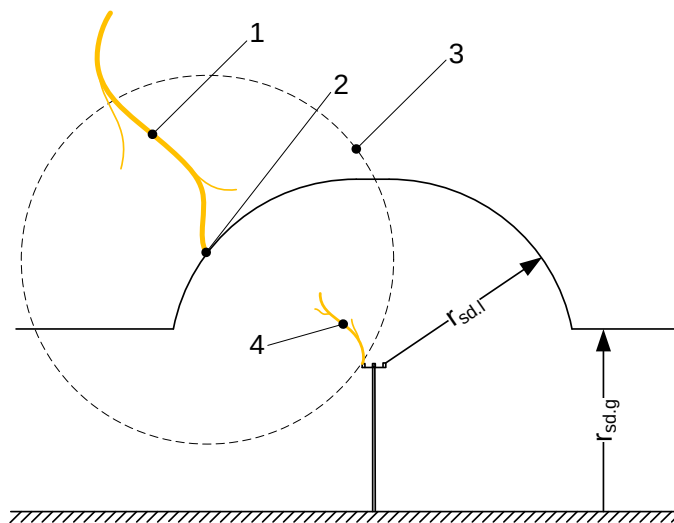
3.5. att. Vidējais negaisa dienu skaits gadā T_d Latvijas teritorijā (2006.-2017. g.). Sadalījums laukumos $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$

3.5. attēlā dotās T_d vērtības turpmāk izmantojamas ikgadējā zibens spērienu blīvuma N_g aprēķinam, izmantojot izteiksmi (3.1), bet iegūto zibensstrāvas sadalījumu izmanto zibensizlādes inducēto pārspriegumu aprēķinam (skat. 4. nodaļu) un zibensizlādes punkta noteikšanai.

3.3. Elektroģeometriskais modelis

Pirmlīderis, tuvojoties zemei, rada spēcīgu elektrisko lauku, kā rezultātā uz zemes esoši objekti, īpaši tie, kas atrodas augstāk par zemes līmeni, rada pretlīderi, kas virzās pretī pirmlīderim. Zibensizlādes rodas, pirmlīderim saskaroties ar pretlīderi, un tiek noteikts zibensizlādes punkts – punkts, kurā zibens sasniedz zemi vai virs tās paaugstinātu objektu – būvi, elektrolīniju, koku u.c. Turklāt vienam zibenim var būt vairāki izlādes punkti [40]. Attālumu no pirmlīdera virsotnes līdz objektam, kurā notiek zibensizlāde, sauc par

zibensizlādes attālumu. Uz zibensizlādes attālumu balstās elektroģeometriskais modelis, kas ilustrēts 3.6. att. Elektroģeometriskā modeļa pirmsākumi meklējami 1945. gadā, kad tika pētīts zibensizlāžu biežums elektropārvades līnijā [46]. Elektroģeometriskais modelis tādā formā (3.6), kā to lietojam šobrīd, tika izstrādāts 20. gadsimta sešdesmito gadu beigās [6], [125].



3.6. att. Zibensizlādes punkta noteikšana atbilstoši elektroģeometriskajam modelim
1 – pirmlīderis, 2 – pirmlīdera virsotne, 3 – zibenslode, 4 – pretlīderis $r_{sd,l}$ – zibensizlādes attālums no elektrolīnijas, $r_{sd,g}$ – zibensizlādes attālums no zemes

Zibensizlādes attālums, termins, ko pirmo reizi lietoja Benžamins Franklins 1767. gadā, tiek definēts kā attālums no pirmlīdera virsotnes līdz objektam, kurā iesper zibens, sasniedzot zibensizlādei nepieciešamo kritisko elektriskā lauka intensitāti. Kritiskā elektriskā lauka intensitāte ir vidējā spraugas caursites elektriskā lauka intensitāte (caursites spriegums dalīts ar zibensizlādes attālumu). Objektam, kas rada pretlīderi, lai ierosinātu caursiti (izlādi), elektriskā lauka intensitātei normālā temperatūrā un spiedienā jābūt vienāgai vai lielākai par $3 \cdot 10^6$ V/m, ar nosacījumu, ka objekta augstums ir tuvu jūras līmenim. Caursites elektriskā lauka intensitāte samazinās, pieaugot augstumam virs jūras līmeņa. Zibensizlādes attālumu ir jāpārvar gan pirmlīderim, kas tuvojas zemei, gan pretlīderim, kas rodas sazemētajos objektos uz zemes. Elektriskā lauka intensitātei visā zibensizlādes attālumā jābūt pietiekoši augstai, lai iespējamā zibensizlādes punkta tuvumā tiktu veicināta pretlīdera veidošanās. Nav zināms, cik lielu daļu no zibensizlādes attāluma veic pretlīderis un cik pirmlīderis. Tas ir atkarīgs no abu izlāžu vidējā izplatīšanās ātruma. Tāpat nav zināms, vai ierosinot pretlīderi, pirmlīderis nekavējoties pārorientējas pretlīdera virzienā vai turpina kustību pa to pašu trajektoriju un, ja turpina, tad cik tālu [115].

Sākotnēji zibensizlādes attāluma noteikšanai tika analizēts zibensizlādes lādiņš, tomēr [6] tika ierosināts zibensizlādes attālumu izteikt, izmantojot zibensstrāvas maksimumvērtību

$$r_{sd} = a \cdot I_m^b, \quad (3.6)$$

kur r_{sd} – zibensizlādes attālums, m;

I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA;

a, b – koeficienti.

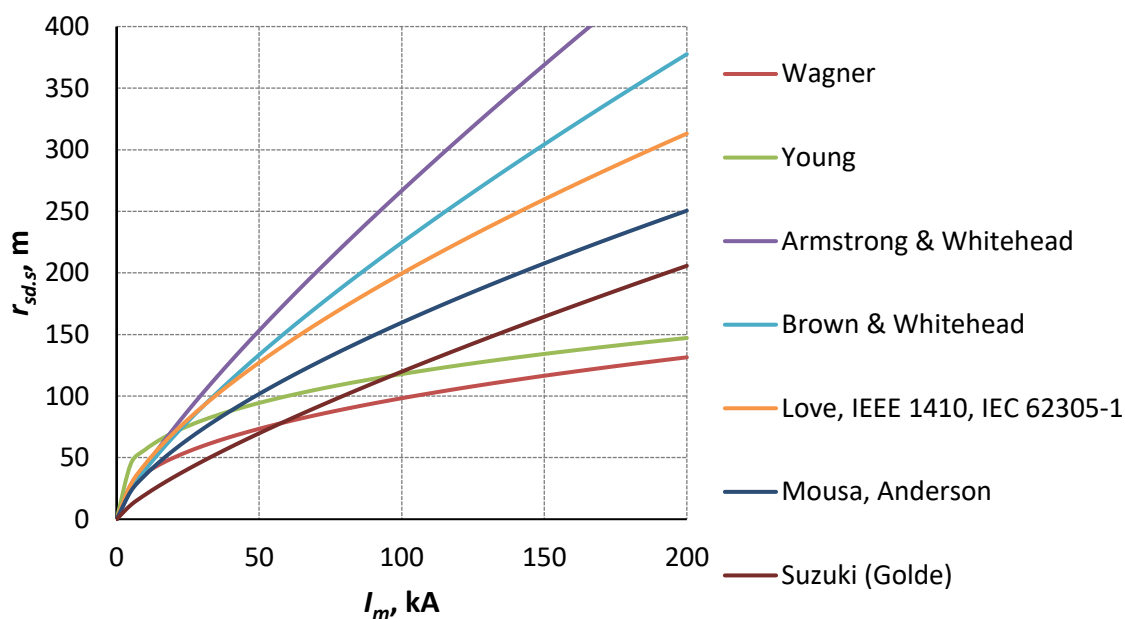
Koeficientiem a un b literatūrā tiek piedāvātas dažādas vērtības, biežāk sastopamās vērtības dotas 3.3. tabulā.

Koeficientu a un b vērtības izteiksmē (3.6)

Zibensizlādes attālums no elektrolīnijas $r_{sd.l}$		Zibensizlādes attālums no zemes $r_{sd.g}$		Avots
a	b	a	b	
14,2	0,42	14,2	0,42	Wagner [119]
27,0 ^c	0,32	27,0	0,32	Young [125]
6,7	0,8	6,0	0,8	Armstrong & Whitehead [6]
7,1	0,75	6,4	0,75	Brown & Whitehead [16]
10,0	0,65	10,0	0,65	Love [80], IEC 62305-1 [40]
8,0	0,65	8,0	0,65	Mousa [91]
3,3	0,78	3,3	0,78	Suzuki [113] no Golde [46]
10,0	0,65	9,0	0,65	IEEE 1410 [58]
8,0 ^d	0,65	8,0	0,65	Anderson [5]

^c Ja elektrolīnijas augstums $h > 18$ m, tad $12000/(462-h)$ ^d Tikai sadales tīklu līnijām

Zibensizlādes attāluma izteiksmes (3.6) grafiskais salīdzinājums atkarībā no koeficientiem a un b zibensizlādei elektrolīnijā dots 3.7. att.

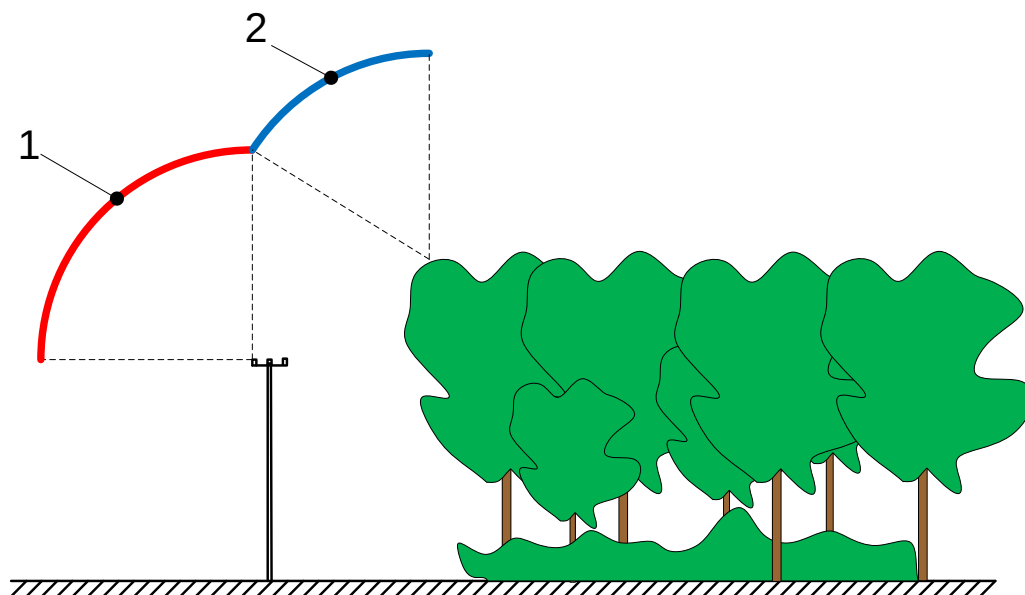


3.7. att. Zibensizlādes attāluma atkarība no zibensstrāvas maksimumvērtības atbilstoši izteiksmei (3.6) un koeficientiem no 3.3. tabulas, notiekot zibensizlādei elektrolīnijā

No 3.7. attēla līknēm, redzams, ka IEEE [58] un IEC [40] adaptētā Lova [80] atrodas pa vidu aplūkotajām zibensizlādes attālumu raksturojošajām līknēm, tāpēc šie koeficienti ir lietoti turpmākajā darbā, aprēķinot zibensizlādes attālumu r_{sd} . Zibensizlādes attālums ir vienāds ar, zibensizlādes punkta noteikšanai plaši lietotās, zibenslodes rādiusu.

Zibens uztvērējvirsmas metode

Autora publikācijā [128] ir aplūkotas tendences zibens aizsargzonas un zibensizlādes vietas noteikšanas metodes, no kurām zibens uztvērējvirsmas metodi ir iespējams ērti pielietot zibensizlādes elektrolīnijā biežuma noteikšanai. Zibens uztvērējvirsmas metode (3.8. att.) ir balstīta uz elektroģeometriskā modeļa principu. Tā pamatā tiek lietota, lai noteiktu aizsargājamā objekta punktus, kas ir pakļauti vislielākajam zibens trāpījumu riskam. Zibens uztvērējvirsmas metodē tiek pielietots tas pats princips, kas zibenslodes metodē, lai noteiktu punktus, kuros varētu trāpīt zibens. Tikai zibenslodes virsmas vietā, tiek aplūkots tās centrs, kurā atrodas pirmlīdera virsotne, un kādas formas un izmēra trajektoriju atstās tā atrašanās vieta, veļot to pāri aizsargājam objektam. Blakus esošo objektu virsma arī veido noteiktu zibens uztvērējvirsmas laukumu, abas šīs virsmas var savā starpā krustoties. Kad krustojas divas zibens uztvērējvirsmas, tad noteiktā punkta uztvērējvirsmas tiek pārcelta uz šo abu uztvērējvirsmu krustpunktu. Varbūtība, ka noteiktajā objektā iespers zibens ir proporcionāla atbilstošās zibens uztvērējvirsmas laukumam jeb pirmlīdera virsotnes atstātās trajektorijas garumam [47].



3.8. att. Zibens uztvērējvirsmas metodes grafiskais attēlojums

1 – elektrolīnijas veidotā zibens uztvērējvirsmas, 2 – blakus esošā koka zibens uztvērējvirsmas

Zibens uztvērējvirsmas laukums ir atkarīgs no zibensizlādes attāluma, tātad arī zibensstrāvas maksimumvērtības. Aplūkojamam objektam lietderīgi ir aplūkot zibens uztvērējvirsmas pie dažādām zibensstrāvas maksimumvērtībām. Zibens uztvērējvirsmas metodes princips sastopams arī citos zibens aizsargzonas noteikšanas modeļos, piemēram, dinamiskajā elektroģeometriskajā modelī [63] un jonizējošās virsmas modelī [7].

3.4. Tuvumā esošo objektu ietekme uz tiešas zibensizlādes skaitu

3.4.1. Tuvumā esošu objektu ietekme uz tiešas zibensizlādes skaitu atbilstoši IEEE 1410 metodoloģijai

Elektrolīnijas tuvumā esošo objektu ietekmi uz tiešu zibensizlāžu skaitu aprēķina, izmantojot nosegšanas koeficientu S_f , kas tiek definēts kā elektrolīnijas vienība, kas tiek

nosegtā ar tuvumā esošo objektu. Zinot koeficientu S_f , var aprēķināt ikgadējo zibens spērienu skaitu elektrolīnijā, kuras tuvumā atrodas citi objekti

$$N_s = N(1 - S_f), \quad (3.7)$$

kur N_s – ikgadējo zibens spērienu skaits citu objektu nosegtā elektrolīnijā, zibensizlādes gadā/km;

N – ikgadējo zibens spērienu skaits elektrolīnijā (3.4), zibensizlādes gadā/km;

S_f – noseģšanas koeficients, vērtība no 0 līdz 1.

Ja elektrolīnija atrodas atklātā laukā bez tuvumā esošiem objektiem, tad noseģšanas koeficients $S_f = 0$. Ja $S_f = 1$, tad elektrolīnijai tuvumā esošie objekti pilnībā to aizsargā no tiešiem zibens spērieniem. Vidējās tuvinātās noseģšanas koeficienta S_f vērtības standartā dotas līkņu veidā. Līkņu noteikšanai izmantots elektroģeometriskais modelis, kuru apraksta izteiksme (3.6) ar 3.3. tabulā dotajām parametru vērtībām, kur redzams, ka IEEE 1410 standartā pieņemts, ka zibensizlādes attālums uz zemi ir par 10 % mazāks, kā zibensizlādei elektrolīnijā [58].

Noseģšanas koeficienta S_f līknes var izmantot arī, ja elektrolīnijai abās pusēs tuvumā atrodas objekti, šajā gadījumā tiek summētas abu pušu noseģšanas koeficientu vērtības

$$N_s = N[1 - (S_{f_l} + S_{f_k})], \quad (3.8)$$

kur N_s – ikgadējo zibens spērienu skaits citu objektu nosegtā elektrolīnijā, zibensizlādes gadā/km;

N – ikgadējo zibens spērienu skaits elektrolīnijā (3.4), zibensizlādes gadā/km;

S_{f_l}, S_{f_k} – noseģšanas koeficients katrā elektrolīnijas pusē, vērtība no 0 līdz 1.

Ja summārā noseģšanas koeficienta vērtība ir lielāka par vienu, tad noseģšanas koeficientu pieņem vienādu ar vienu [58].

IEEE 1410 dotajām līknēm ir sekojošas nepilnības, kas tās traucē ērti pielietot praksē: noseģšanas koeficienti S_f doti tikai 10 m augstai elektrolīnijai tikai pie vispārpieņemtās vidējās zibensstrāvas maksimumvērtības $I_m = 31$ kA.

3.4.2. Tuvumā esošu objektu ietekme uz tiešas zibensizlādes skaitu atbilstoši piedāvātajai metodoloģijai

Tuvumā esošu objektu ietekmi uz tiešu zibensizlādi raksturojošo noseģšanas koeficientu S_f ietekmē vairāki faktori:

- 1) zibensstrāvas maksimumvērtība I_m ;
- 2) elektrolīnijas augstums h_l ;
- 3) elektrolīnijas platums b ;
- 4) tuvumā esošo objektu augstums h_k ;
- 5) tuvumā esošo objektu attālums no elektrolīnijas s_k ;
- 6) tuvumā esošo objektu joslas platums;
- 7) zibensizlādes attālums r_{sd} .

Piedāvātajā metodoloģijā aplūkotas 3 zibensstrāvas maksimumvērtību iegūti koeficienti, ņemot vērā zibensstrāvas maksimumvērtības sadalījumu Latvijā (3.3. att.). Izmantotas 10 %, 50 % un 90 % varbūtības, kas atbilst attiecīgi 38,2 kA, 16,4 kA un 7,0 kA.

Elektrolīnijas augstumi tiek ņemti no LEK 120 [75] 20 kV elektrolīniju koka balstu izolētiem vadiem piedāvātajiem augstumiem. Aplūkojot visus iespējamās balstu tipus elektrolīnijas augstums, noapaļojot līdz veseliem metriem, virs zemes ir robežās no 7 m līdz 13 m.

Elektrolīnijas platums ir robežās no $\sim 0,65$ m līdz $\sim 2,5$ m. Veicot koeficienta aprēķinus robežvērtībām, nasegšanas koeficienta S_f vērtība netiek būtiski ietekmēta, atšķirība ir 1-2 % robežās, tāpēc, lai koeficientu pielietošanu padarītu praktiskāku, turpmākajos aprēķinos tiek lietots viens elektrolīnijas platums $b = 0,8$ m, kas atbilst starpbalsta S20.I-HT [75] platumam.

Tuvumā esošo objektu augstumam tiek piedāvātas 7 alternatīvas: 0/3, 1/3, 2/3, 3/3, 4/3, 5/3 un 6/3 no elektrolīnijas augstuma h_l . Augstumi tiek piedāvāti kā daļa no elektrolīnijas augstuma, jo, aplūkojot kokus vai citus objektus elektrolīnijas tuvumā, ērtāk ir noteikt objekta augstumu proporcionāli elektrolīnijas augstumam, nevis konkrētās mērvienībās.

Objektu attālumam no elektrolīnijas piedāvāts diapazons no 2,5 m līdz 80 m, īpaši akcentējot 2,5 m un 6,5 m atzīmi, kas atbilstoši Aizsargjoslu likumam [3] ir elektrolīnijas trases platums, attiecīgi apdzīvotās vietās, pilsētās un ciemos un ārpus apdzīvotām vietām, pilsētām un ciemiem, kā arī meža teritorijās.

Tuvumā esošo objektu joslas platums praktisku apsvērumu dēļ netiks ņemts vērā, jo gadījumā, kad blakus elektrolīnijai ir meža masīvs, nasegšanas koeficients S_f ir mazliet lielāks kā gadījumā ar atsevišķi stāvošu koku. Tāpēc turpmākajiem aprēķiniem tiek pieņemts, ka elektrolīnijai blakus esošie objekti ir izvietoti paralēli elektrolīnijai vienmērīgā, taisnā līnijā.

Zibensizlādes attālums r_{sd} tiek pieņemts vienāds gan izlādei uz zemi, gan izlādei elektrolīnijā, jo no 3.3. tabulas redzams, ka vairumā gadījumu sadales tīklu līnijām, kuru augstums no zemes, salīdzinot ar pārvades tīklu līnijām, ir neliels, zibensizlādes attālums ir vienāds, neatkarīgi no izlādes vietas. Turpmākajiem aprēķiniem zibensizlādes attālums

$$r_{sd} = 10I_m^{0,65}, \quad (3.9)$$

kur r_{sd} – zibensizlādes attālums, m;

I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA.

Nasegšanas koeficienta S_f noteikšanai tiek lietota zibens uztvērējvirsmas metode (3.8. att.). Sākumā tiek noteikts elektrolīnijas zibens uztvērējvirsmas veidotā loka garums l_1 , gadījumā, kad elektrolīnija atrodas atklātā laukā. Pēc tam tiek noteikts, cik lielu daļu no elektrolīnijas zibens uztvērējvirsmas laukuma nosedz elektrolīnijai tuvumā esošā objekta zibens uztvērējvirsmas, un tiek noteikts nenosegtās zibens uztvērējvirsmas veidotā loka garums l_2 . Piemērs zibens uztvērējvirsmas veidoto loku garuma noteikšanai dots 3.9. attēlā.

Kad noteikti loku garumi l_1 un l_2 , iespējams aprēķināt nasegšanas koeficientu

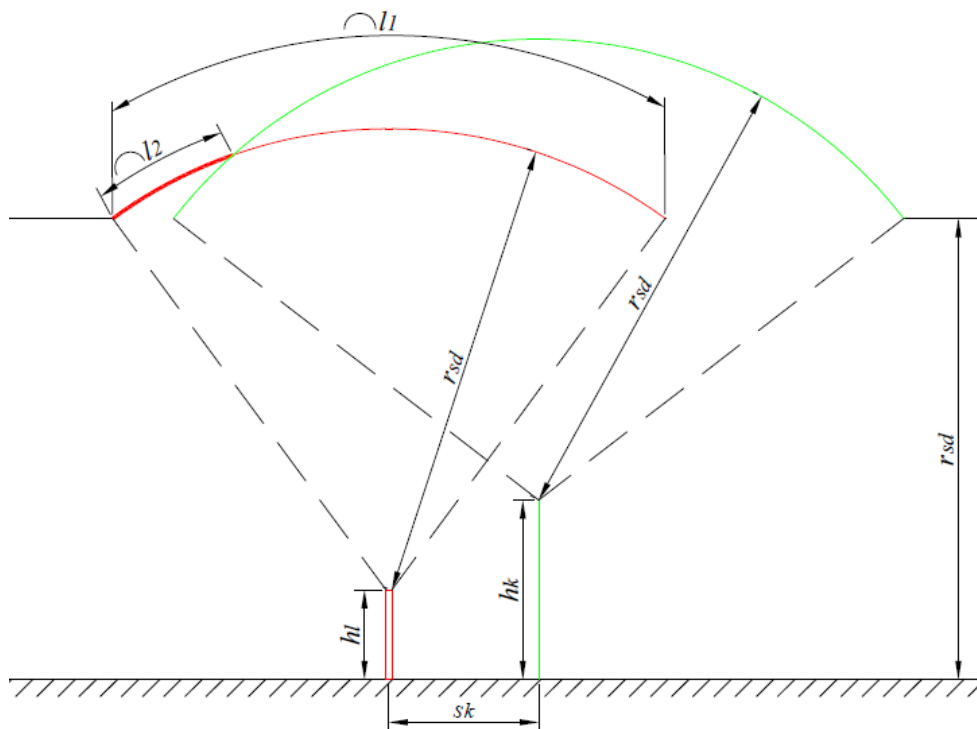
$$S_f = 1 - \frac{l_2}{l_1}, \quad (3.10)$$

kur S_f – nasegšanas koeficients;

l_1 – elektrolīnijas atklātā laukā zibens uztvērējvirsmas veidotā loka garums, m;

l_2 – nenosegtās elektrolīnijas zibens uztvērējvirsmas veidotā loka garums, m.

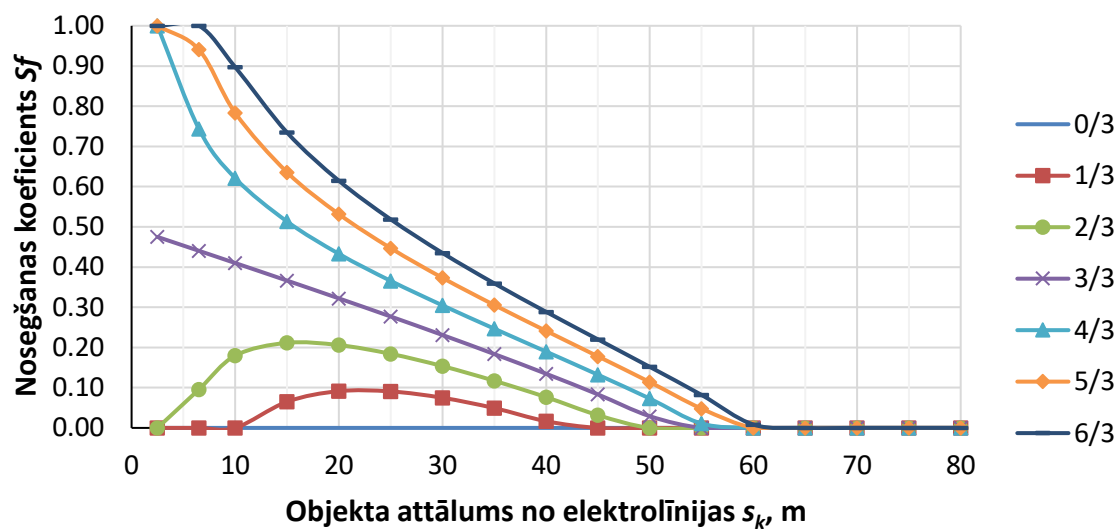
Kad iegūtas nasegšanas koeficienta S_f vērtības, izmantojot izteiksmes (3.7) vai (3.8), iespējams aprēķināt ikgadējo zibens spērienu skaits citu objektu nasegtā elektrolīnijā N_s .



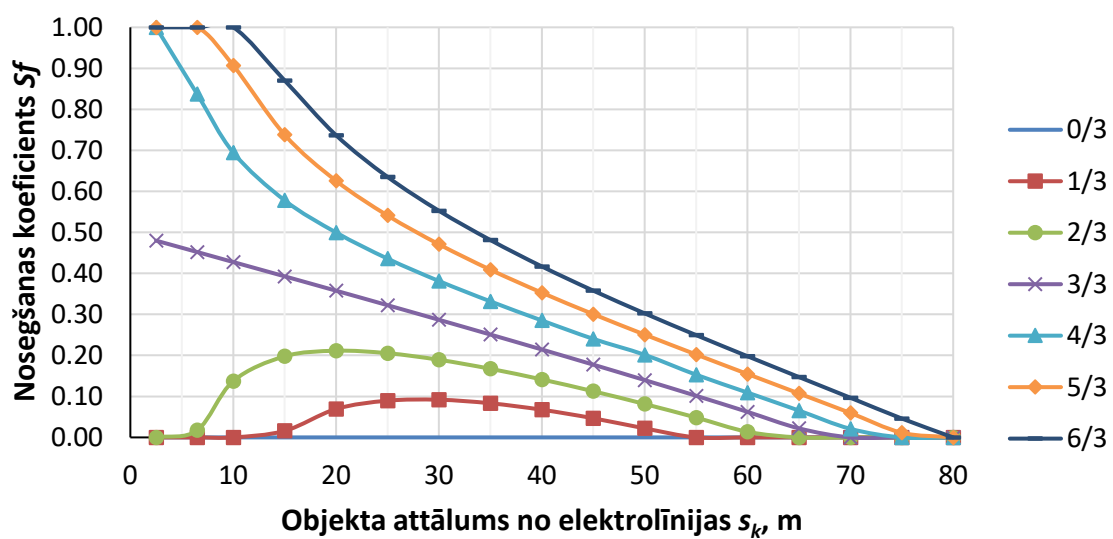
3.9. att. Piemērs zibens uztvērējvirsmas veidoto loku garuma noteikšanai S_f aprēķinam
 h_l – elektrolīnijas augstums, s_k – objekta attālums no elektrolīnijas, h_k – objekta augstums, r_{sd} – zibensizlādes attālums, l_1 – elektrolīnijas atklātā laukā zibens uztvērējvirsmas veidotā loka garums, l_2 – nenosegtās elektrolīnijas zibens uztvērējvirsmas veidotā loka garums

Aprēķinātie nosegšanas koeficienti S_f elektrolīnijai ar augstumu $h_l = 10$ m un zibensstrāvas maksimumvērtībām $I_m = 7,0$ kA, 16,4 kA un 38,2 kA grafiski līkņu veidā doti 3.10. attēlā, bet ar zibensstrāvas maksimumvērtību $I_m = 16,4$ kA un elektrolīnijas augstumu $h_l = 7$ m, 10 m un 13 m 3.11. attēlā.

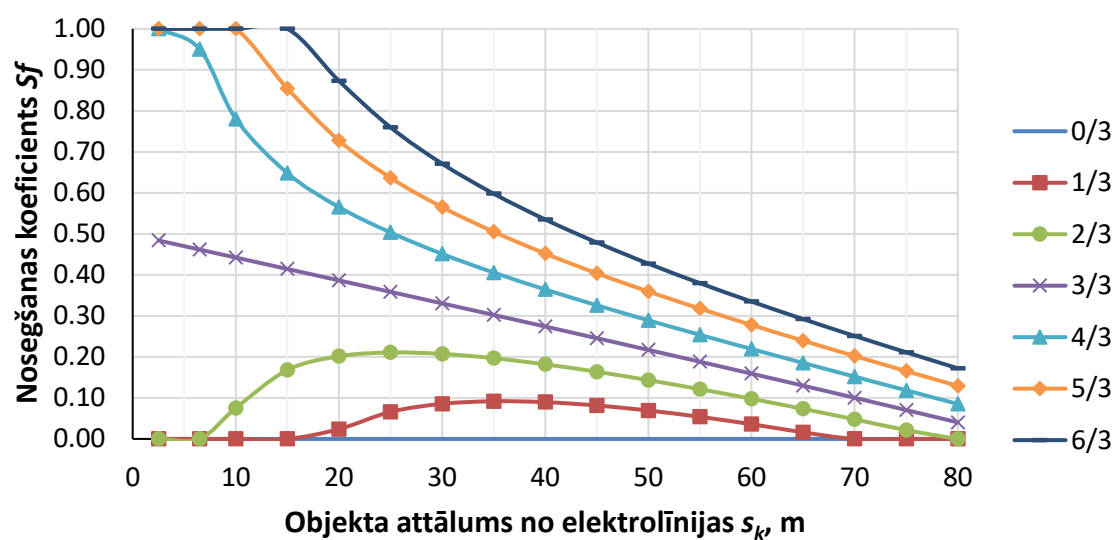
Aplūkojot 3.10. attēlā dotās līknes redzams, ka, pieaugot objekta augstumam h_k , pieaug arī nosegšanas koeficienta S_f vērtība un, pieaugot objekta attālumam no elektrolīnijas s_k , nosegšanas koeficienta S_f vērtība samazinās. Ja elektrolīnijai blakus esošā objekta augstums ir vienāds ar elektrolīnijas augstumu $h_k = h_l$, tad nosegšanas koeficienta vērtība izmainās lineāri. Kad $h_k < h_l$, tad redzams, ka S_f vērtība, pieaugot objekta attālumam no elektrolīnijas s_k , sākumā pieaug un tikai pēc tam samazinās. Samazinoties zibensstrāvas maksimumvērtībai blakus esošo objektu ietekme uz tiešu zibens izlāžu skaitu elektrolīnijā samazinās, kas izskaidrojams ar zibenslodes rādiusa samazināšanos, ko aprēķina, izmantojot izteiksmi (3.9), tomēr pie neliela objekta attāluma $s_k < 25$ m un $h_k < h_l$ novērojams, pretējs efekts, proti, pieaugot zibensstrāvas maksimumvērtībai, samazinās S_f vērtība.



a

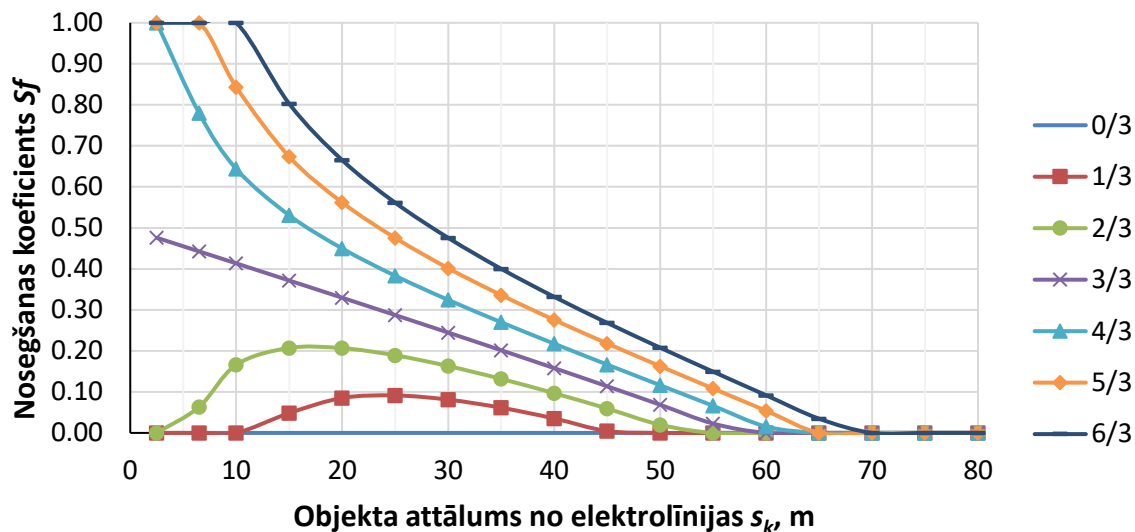


b

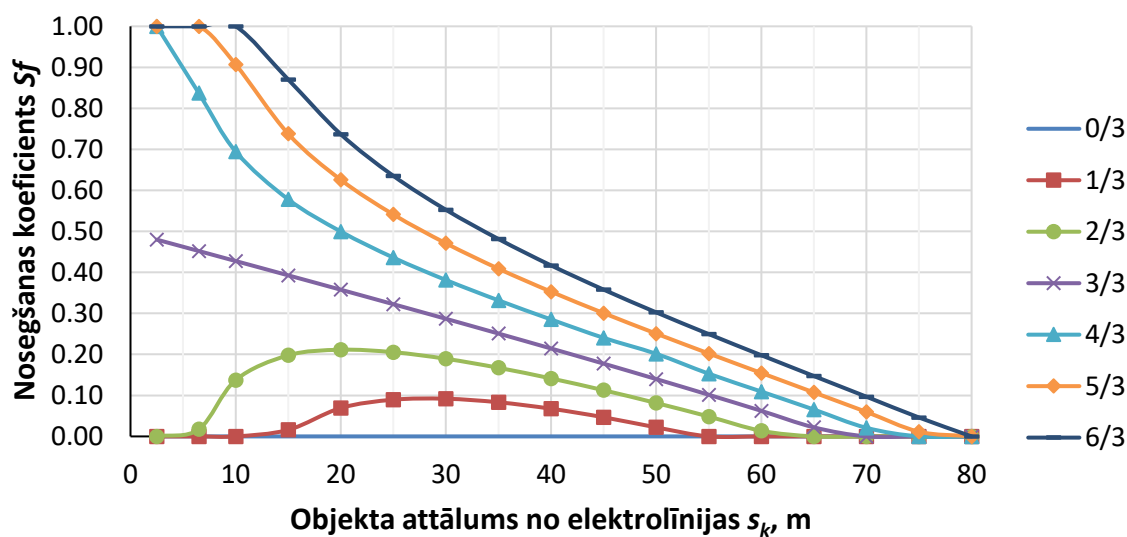


c

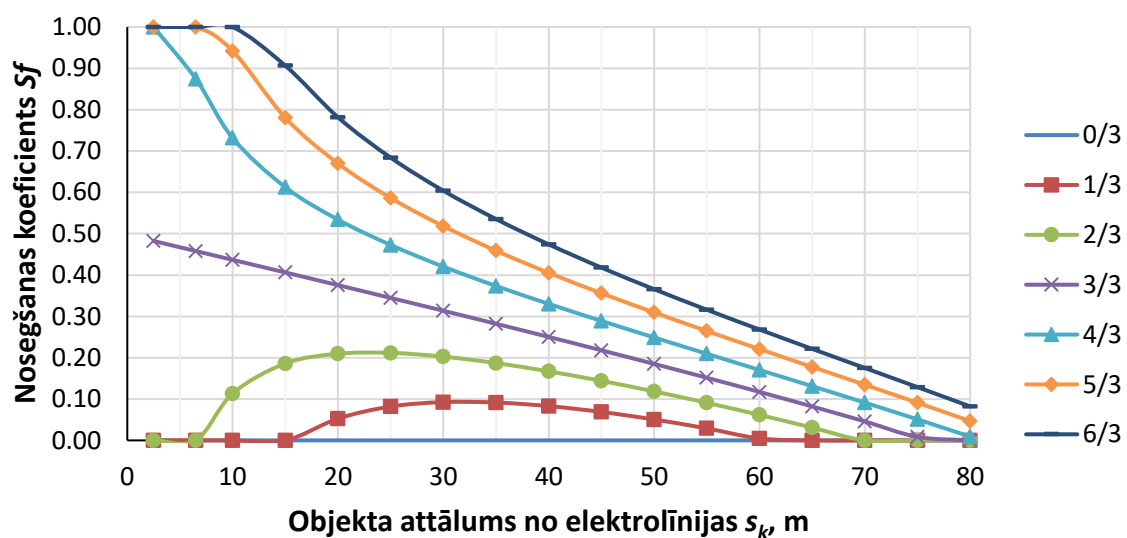
3.10. att. Nosešanas koeficients S_f kā funkcija no objekta attāluma līdz elektrolīnijai s_k ar nemainīgu elektrolīnijas augstumu $h_l = 10$ m un mainīgu zibensstrāvas maksimumvērtību $I_m = 7,0$ kA (a), $16,4$ kA (b) un $38,2$ kA (c)



a



b



c

3.11. att. Nosegšanas koeficients S_f kā funkcija no objekta attāluma līdz elektrolīnijai s_k ar nemainīgu zibensstrāvas maksimumvērtību $I_m = 16,4$ kA un mainīgu elektrolīnijas augstumu $h_l = 7$ m (a), 10 m (b) un 13 m (c)

Salīdzinot 3.11. attēlā dotās līknes novērojama līdzīgas sakarības kā 3.10. attēlā. Pieaugot elektrolīnijas augstumam h_l , pieaug arī noseģšanas koeficienta S_f vērtība īpaši, ja blakus esošā objekta attālums no elektrolīnijas s_k ir lielāks par 60 m. Šo pieaugumu var izskaidrot ar proporcionāli pieaugošo blakus esošā objekta augstumu h_k , jo pie $h_l = 7$ m augstākie aplūkojamie objekti ir 14 m, bet pie $h_l = 13$ m to augstums jau ir 26 m, tāpēc arī tie uztver vairāk zibensizlādes kā zemākie koki, neskatoties uz to, ka blakus esošās elektrolīnijas augstums arī ir lielāks.

3.5. Trešās nodaļas secinājumi

1. Ikgadējo zibensizlādes skaitu elektrolīnijā N ietekmē elektrolīnijas ģeometriskie parametri, zibensizlādes blīvums N_g un orogrāfiskie parametri jeb zemes reljefa īpatnību kopums. Elektrolīnijai tuvumā esošie objekti būtiski ietekmē ikgadējā zibensizlādes skaita elektrolīnijā N vērtību. Piemēram, 10 m augstai elektrolīnijai tikai 3 m augstu objektu rinda 20-40 m attālumā no elektrolīnijas samazina N vērtību par nepilniem 10 %.
2. Latvijas teritorijā laika posmā no 2006. līdz 2017. gadam novērots, ka vidēji 86 % no zibensizlādēm uz zemi ir negatīva polaritāte ar zibensstrāvas maksimumvērtības mediāno vērtību 16,4 kA. Zibensstrāvu maksimumvērtības ir iespējamās ļoti plašā diapazonā no nepilniem 2 kA līdz pat vairāk kā 300 kA. Visā Latvijas teritorijā vidējais negaisa dienu skaits gadā $T_d = 19$. Atkarībā no aplūkojamās teritorijas un gada T_d var mainīties no 4 līdz pat 38 negaisa dienām gadā.
3. Zibensizlādes punkta noteikšanai izplatītākā ir zibenslodes metode. Lai noteiktu varbūtību, cik bieži konkrētais punkts būs pakļauts zibensizlādes riskam, piedāvātās metodoloģijas ietvaros pielieto uz zibenslodes metodi balstīto zibens uztvērējvirsmas metodi. Šī metodes pamatā ir zibenslodes centra trajektorijas veidotās virsmas laukuma vai loka garuma analīze, lai noteiktu zibens spērieniem biežāk pakļautos punktus.
4. Pārklāšanās koeficienta S_f praktiskai lietošanai Latvijas apstākļiem izstrādātas koeficientu tabulas un līknes vairākām zibensstrāvas maksimumvērtībām un elektrolīnijas augstumiem, kas ļauj ērtāk, neveicot papildus aprēķinus, veikt nepieciešamos aprēķinus elektrolīnijas aizsardzībai no zibensizlādes.

4. PĀRSPRIEGUMI VIDSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJĀS

4.1. Pārspriegumu veidi

Par pārspriegumu sauc jebkuru sprieguma vērtību starp fāzi un zemi vai starp fāzēm, ja tā maksimālā vērtība pārsniedz elektroiekārtās pieļaujamo lielāko spriegumu [68]. Piedāvātās metodoloģijas 5. blokā no 1.4. attēla nepieciešams aprēķināt elektrolīnijas pārklāšanās skaitu, kas atkarīgs no pārsprieguma, tāpēc nepieciešams apskatīt, kāda tipa pārspriegumi ir un kā tie ietekmē elektrolīnijas pārklāšanos.

Pārspriegumus var iedalīt 4 tipos [41]:

- 1) kvazistacionārs pārspriegums – relatīvi ilgs (nerimstošs vai vāji rimstošs) pārspriegums, kas dotajā tīkla punktā mainās ar tīkla frekvenci. Šādu pārspriegumu izraisa slodzes nomešana, vienfāzes zemesslēgums, kā arī nelineāru elementu radītas harmonikas un ferorezonanses [68]. Kvazistacionārs pārspriegums parasti nerada būtiskus draudus elektrotīklā.
- 2) komutācijas pārspriegums – komutācijas procesa radīts pārejas pārspriegums, pēc kura formas nosaka komutācijas sprieguma standartimpulsu (250/2500 μs) [68]. Šī pārsprieguma atvasinājums jeb impulsa vidējais stāvums ir ļoti neliels, tāpēc komutācijas pārspriegums nerada būtiskus bojājumus elektrotīklā.
- 3) zibensizlādes pārspriegums – zibensizlādes procesa radīts pārejas pārspriegums, pēc kura formas nosaka zibensizlādes sprieguma standartimpulsu (1,2/50 μs) [68]. Zibensizlādes pārspriegumu var radīt tieša zibensizlāde, netieša zibensizlāde un pretpārklāšanās.
- 4) ļoti īsu impulsu radīti pārspriegumi – pārspriegumi ar impulsa kāpumlaiku mazāku par 0,1 μs. Šāda tipa pārspriegumi parasti rodas elegāzes slēgiekārtās. Salīdzinoši augstā iztursprieguma dēļ vīdsprieguma tīklā ļoti īsu impulsu radīti pārspriegumi nav bīstami.

Vīdsprieguma elektrotīklā būtiskus bojājumus rada tikai zibensizlādes pārspriegumi [114], tāpēc tie ir aplūkoti sīkāk. Pārējo tipu pārspriegumi ir jāņem vērā, izvēloties izlādņus un citas ietaises.

Kopējo zibensizlādes inducēto pārspriegumu radīto elektrolīnijas pārklāšanās skaitu elektrolīnijā var aprēķināt, ņemot vērā tiešas un netiešas zibensizlādes radīto pārklāšanās skaitu [90]

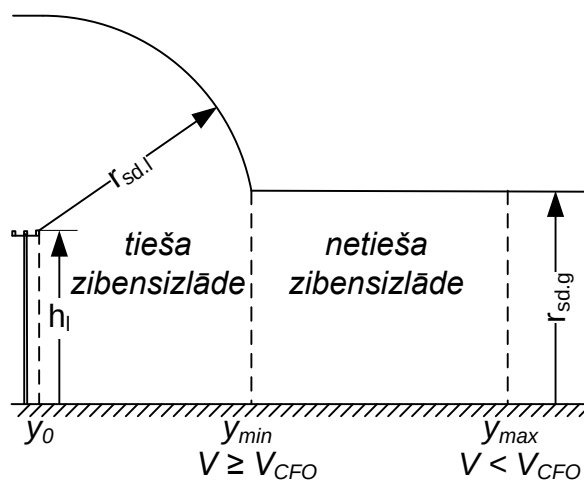
$$F = F_d + F_p, \quad (4.1)$$

kur F – kopējais zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, pārklāšanās gadā/km;

F_d – tiešas zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, pārklāšanās gadā/km;

F_p – netiešas zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, pārklāšanās gadā/km.

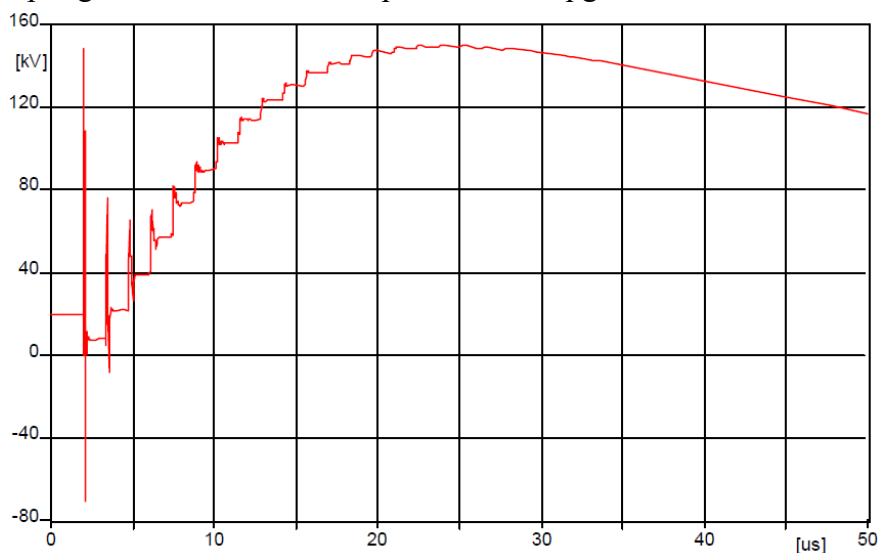
Zibensizlādes radītu pārspriegumu elektrolīnijā vispārīgs attēlojums dots 4.1. attēlā, kur y_{min} ir attālums no elektrolīnijas, līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešai zibensizlādei un tās radītiem pārspriegumiem, bet y_{max} ir attālums, līdz kuram elektrolīnija ir pakļauta tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, ja inducētais spriegums V ir lielāks vai vienāds ar elektrolīnijas izolācijas spriegumizturību V_{CFO} .



4.1. att. Zibensizlādes radītu pārspriegumu elektrolīnijā vispārīgs attēlojums

4.2. Tiešas zibensizlādes radīti pārspriegumi

Notiekot zibensizlādei elektrolīnijā, strāvas impulsviļņi izplatās abos virzienos, attiecīgi zibensizlādes radītais pārspriegums ir puse no zibensstrāvas vērtības, kas reizināta ar elektrolīnijas raksturpretestību Z_0 , kas ir apmēram 400Ω . Tātad pat 1 kA liela zibensstrāva elektrolīnijā rada 200 kV lielu pārspriegumu [25]. 4.2. attēlā dots tiešas zibensizlādes radīts pārspriegums kailvadu elektrolīnijā 600 m attālumā no zibensizlādes punkta ar 30 kA lielu zibensstrāvas maksimumvērtību. Pirmie pīķi ir ļoti stāvi, kas tiek nogriezti, elektrolīnijai pārklājoties, pie izlādes tuvākā balsta. Šo pīķu maksimumvērtības parasti pārsniedz elektrolīnijas spriegumizturības vērtības. Nogludinātā pārsprieguma impulsviļņa forma ir līdzīga zibensstrāvas impulsa formai. Šī impulsa maksimumvērtība ir aptuveni vienāda ar elektrolīnijas spriegumizturības vērtību, tāpēc tā netiek apgriezta [24].



4.2. att. Tipiskas tiešas zibensizlādes radīts pārspriegums vīdsprieguma elektrolīnijā. Zibensstrāvas maksimumvērtība $I_m = 30 \text{ kA}$, 600 m no zibensizlādes punkta [24]

Tieša zibensizlāde kailvadu elektrolīnijās parasti nerada paliekošus bojājumus, ja radītais īsslēgums tiek ierobežots ar pārsprieguma ietaisēm. Kailvadu elektrolīnijām papildus zibensaizsardzība nav nepieciešama. Izolēto vadu elektrolīnijām pārklāšanās radītais

elektriskais loks var radīt paliekošus mehāniskus bojājumus, jo šo vadu izolācija neļauj elektriskajam lokam pārvietoties pa elektrolīniju. Transformatoriem un pazemes kabeļlīnijām pārklāšanās rada paliekošus bojājumus, tāpēc to aizsardzībai ir nepieciešami izlādņi [24].

Tiešas zibensizlādes radīto elektrolīnijas izolācijas pārklāšanos var aprēķināt [89]

$$F_d = N \int_{I_F}^{\infty} f(I) dI, \quad (4.2)$$

kur F_d – tiešas zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, pārklāšanās gadā/km;

N – ikgadējo zibens spērienu skaits elektrolīnijā (3.4), zibensizlādes gadā/km;

I_F – minimālā tiešas zibensizlādes zibensstrāvas maksimumvērtība, kas ierosina pārklāšanos, kA;

$f(I)$ – zibensstrāvas maksimumvērtības varbūtības blīvuma funkcija no (2.1)

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta I} \exp\left[-\frac{(\ln I - \ln \bar{I})^2}{2\beta^2}\right], \quad (4.3)$$

kur β – logaritmiskā standarta novirze;

$\bar{I}$ – zibensstrāvas maksimumvērtības mediānā vērtība [90].

Vidsprieguma elektrolīniju salīdzinoši zemās spriegumizturības dēļ var pieņemt, ka integrāļa vērtība (4.2) elektrolīnijām bez izlādņiem ir aptuveni 1, tātad $F_d \approx N$ [89]. Ja elektrolīnija nav aizsargāta ar izlādņiem, tad vairāk kā 99 % no tiešām zibens izlādēm radīs izolācijas pārklāšanos, neatkarīgi no izolācijas spriegumizturības, fāžu savstarpējā attāluma un zemējuma pretestības [58]. No tā izriet, ka tiešas zibensizlādes radīto izolācijas pārklāšanās skaitu klajā laukā var aprēķināt, izmantojot (3.4) formulu, bet elektrolīnijai ar tuvumā esošiem objektiem (3.7) vai (3.8) formulu.

4.3. Netiešas zibensizlādes radīti pārsprigumi

4.3.1. Parametri, kas ietekmē netiešas zibensizlādes radīta pārspriguma vērtību

Zibensizlāde uz zemi vai uz zemes esošā objektā tuvumā elektrolīnijai inducē tajā spriegumu, kas var ievērojami pārsniegt elektrolīnijas nominālo spriegumu un pat izolācijas spriegumizturību, radot izolācijas caursiti un elektrisko loku starp fāzēm, līdzīgi kā tas ir tiešas zibensizlādes gadījumā. Līdz pat apmēram 1930. gadam tika uzskatīts, ka elektrolīnijas jāaizsargā tikai no netiešas zibensizlādes radītiem pārsprigumiem, jo tika uzskatīts, ka tiešas zibensizlādes iespējamība elektrolīnijā ir ļoti neliela [52]. Zibensizlādes uz zemi ierosināts pārsprigums var radīt elektrolīnijas izolācijas pārklāšanos pat 200 m attālumā no zibensizlādes vietas. Šis attālums ir atkarīgs no zibensizlādes parametriem (zibensstrāvas maksimumvērtības, maksimālā stāvuma un izlādes kustības ātruma), elektrolīnijas garuma un augstuma, zibensizlādes vietas, grunts pretestības un elektrolīnijas izolācijas spriegumizturības [94]. Pie sliktas grunts vadītspējas šis attālums var būt pat daži simti metri [35].

Netiešas zibensizlādes radīto elektrolīnijas pārklāšanās skaitu var aprēķināt [58]

$$F_p = 2 \cdot N_g \cdot 0,1 \cdot \sum_{i=1}^{200} P_i \cdot (y_{i\max} - y_{i\min}), \quad (4.4)$$

kur F_p – netiešas zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, pārklāšanās gadā/km;

N_g – ikgadējais zibens spērienu blīvums (3.1), zibensizlādes gadā/km²;

i – zibensstrāvas maksimumvērtība intervālā no 1 kA līdz 200 kA;

P_i – varbūtība ar strāvu i , izmantojot izteiksmi (2.3);

$y_{i \max}$ – attālums no elektrolīnijas, līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, m (4.1. att.);

$y_{i \min}$ – attālums no elektrolīnijas, līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, m (4.1. att.).

Minimālo attālumu $y_{\min}$ no elektrolīnijas, pēc kura elektrolīnijā nenotiek tieša zibensizlāde, var aprēķināt sekojoši [58]

$$y_{\min} = \sqrt{r_{sd.l}^2 - (r_{sd.g} - h_l)^2}, \quad (4.5)$$

kur $y_{\min}$ – attālums no elektrolīnijas, līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, m;

$r_{sd.l}$ – zibensizlādes attālums no elektrolīnijas, m;

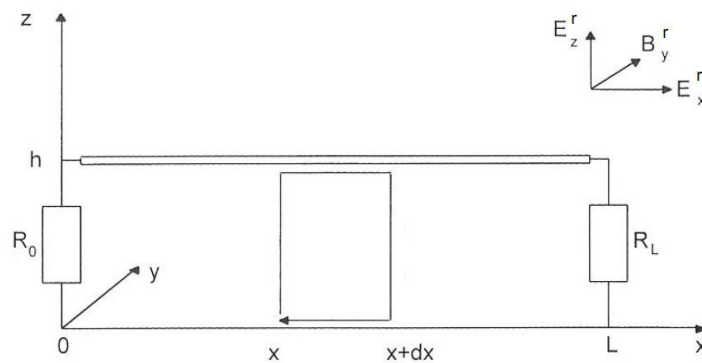
$r_{sd.g}$ – zibensizlādes attālums no zemes, m;

h_l – vidējais elektrolīnijas augstums no zemes, m.

Zibensizlādes attālumus no elektrolīnijas $r_{sd.l}$ un no zemes $r_{sd.g}$ aprēķina, izmantojot izteiksmi (3.6) un koeficientus no 3.3. tabulas.

Lai aprēķinātu maksimālo attālumu $y_{\max}$ no elektrolīnijas, līdz kuram elektrolīnija ir pakļauta tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, ir jāaprēķina inducētais pārspriegums, kas ir lielāks vai vienāds ar elektrolīnijas izolācijas spriegumizturību V_{CFO} , ko pieņem 1,5 reizes lielāku kā elektrolīnijas izolācijas kritisko pārklāšanās spriegumu pie zibensizlādes sprieguma standartimpulsa (1,2/50 μs) standarta atmosfēras apstākļos [58].

Netiešas zibensizlādes gaisvadu elektrolīnijā inducētā pārsprieguma aprēķinam vispārīgā gadījumā pieņem bezzudumu viendzīslas vadītāju, kas iet paralēli x asij un xz plaknē beidzas ar divām pretestībām R_0 un R_L (4.3. att.). Jāatzīmē, ka raksturīgais elektromagnētiskais lauks E^r , B^r , kas parādīts 4.3. attēlā ir vienāds ar zibensizlādes radītā elektriskā lauka un zemes atstarotā elektriskā lauka summu [20].



4.3. att. Netiešas zibensizlādes gaisvadu līnijā inducētā pārsprieguma aprēķina shēma [20]

Summārais lauks E , B ir vienāds ar raksturīgā lauka E^r , B^r un izkliedes lauka E^i , B^i summu. Izkliedes lauks raksturo elektrolīnijas reakciju uz raksturīgo lauku. Raksturīgais elektromagnētiskais lauks ir atkarīgs no skalārā potenciāla V^r un vektoriālā potenciāla A^r [20]:

$$E^r = -\left(\nabla V^r + \frac{\partial A^r}{\partial t}\right), \quad (4.6)$$

$$\mathbf{B}^r = \nabla \times \mathbf{A}^r. \quad (4.7)$$

Maksimālā pārsprieguma, kas tiek inducēts elektrolīnijā no netiešas zibensizlādes, aprēķinam literatūrā tiek piedāvāti dažādi modeļi un divi no tiem šajā nodaļā ir sīkāk aplūkoti un salīdzināti.

4.3.2. Ruska modelis

Zviedru inženieris Sūne Rusks (*Sune Rusck*) [107] zibenizlādes un elektrolīnijas savstarpējās mijiedarbības aprakstīšanai vispirms piedāvā kopējo elektrisko lauku uz vadītāja virsmas izteikt atkarībā no skalārā un vektoriālā potenciāla. Piedāvātie mijiedarbības vienādojumi [20]

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial}{\partial t} [V(x,t) - V^r(x,t)] = 0, \quad (4.9)$$

kur L' – elektrolīnijas īpatnējā induktivitāte;

C' – elektrolīnijas īpatnējā kapacitāte;

$i(x,t)$ – kopējā līnijas strāva;

V – kopējais skalārais potenciāls;

V^r – raksturīgais skalārais potenciāls.

Kopējo inducēto spriegumu var aprēķināt sekojoši:

$$u(x,t) = V(x,t) + \int_0^h \frac{\partial \mathbf{A}_z^r(x,z,t)}{\partial t} dz, \quad (4.10)$$

kur $u(x,t)$ – kopējais inducētais spriegums;

V – kopējais skalārais potenciāls;

h – elektrolīnijas augstums;

$\mathbf{A}_z^r$ – raksturīgā vektoriālā potenciāla vertikālā komponente.

Robežvērtības (4.8) un (4.9) vienādojumiem [26]

$$V(0,t) = -R_0 i(0,t) - \int_0^h \frac{\partial \mathbf{A}_z^r(0,z,t)}{\partial t} dz, \quad (4.11)$$

$$V(L,t) = R_L i(L,t) - \int_0^h \frac{\partial \mathbf{A}_z^r(L,z,t)}{\partial t} dz, \quad (4.12)$$

kur R_0 – elektrolīnijas sākuma robežas pretestība;

R_L – elektrolīnijas beigu robežas pretestība;

h – elektrolīnijas augstums;

$\mathbf{A}_z^r$ – raksturīgā vektoriālā potenciāla vertikālā komponente.

Rusks piedāvā arī vienkāršoto formulu aptuvenam elektrolīnijā inducētā pārsprieguma maksimumvērtības aprēķinam [58]

$$U_m = Z_0 \cdot \frac{k_v \cdot h_l \cdot I_m}{y}, \quad (4.13)$$

kur U_m – inducētā pārsprieguma maksimumvērtība, kV;

h_l – elektrolīnijas augstums, m;

I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA;

y – attālums no zibensizlādes vietas, m;

Z_0 – viļņa īpatpretestība, Ω ;

k_v – zibensizlādes kustības ātrumu raksturojošs koeficients.

Viļņa īpatpretestību gaisā var aprēķināt sekojoši [58]:

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30 \, \Omega, \quad (4.14)$$

kur μ_0 – magnētiskā konstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m;

ϵ_0 – elektriskā konstante $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Zibensizlādes ātrumu raksturojošo koeficientu aprēķina sekojoši [58]:

$$k_v = 1 + \frac{v}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (4.15)$$

kur c – gaismas ātrums vakuumā $c = 3 \cdot 10^8$ m/s;

v – zibensizlādes kustības ātrums, m/s.

Zibensizlādes kustības ātrums var būt robežās no $0,29 \cdot 10^8$ m/s līdz $2,4 \cdot 10^8$ m/s [54], parasti pieņem aptuveni $c/3$ jeb $1,2 \cdot 10^8$ m/s [57]. Zibensizlādes kustības ātrumu tuvināti var aprēķināt arī, ja ir zināma zibensstrāvas maksimumvērtība [52].

$$v = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{500}{I_m}}}, \quad (4.16)$$

kur v – zibensizlādes kustības ātrums, m/s;

I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA.

Ruska vienkāršotā formula (4.13) elektrolīnijā inducētā pārsprieguma aprēķinam nedod nekādu informāciju par inducēto pārsprieguma impulsu stāvumu un ilgumu, kā arī to var pielietot tikai ideālai grunts vadītspējai un kad zibensizlādes kanāls ir perpendikulārs zemei [20].

Vienu no Ruska vienkāršotās formulas ierobežojumiem, kas ir ideāla grunts vadītspēja, efektīvi un pietiekoši precīzi var novērst, mākslīgi palielinot elektrolīnijas augstumu. Austrāļu zinātnieks Mets Darveniza (*Mat Darveniza*) ierosina elektrolīnijas augstumu h_l izteiksmē (4.13) aizvietot ar efektīvo augstumu h_{ef} , kas palielina elektrolīnijas augstumu, ņemot vērā grunts pretestību [33]

$$h_{ef} = h_l + 0,15 \cdot \sqrt{\rho}, \quad (4.17)$$

kur h_{ef} – efektīvais elektrolīnijas augstums, m;

h_l – elektrolīnijas augstums, m;

ρ – grunts pretestība, Ωm .

Neskatoties uz vienkāršotā Ruska modeļa ierobežojumiem, tas ir sevi pierādījis praksē. Salīdzinot dabā novērotos rezultātus 10 km garai 11 kV gaisvadu elektrolīnijai ar vienkāršotā Ruska modeļa iegūtajiem rezultātiem, tika novērota ļoti laba sakritība [43].

4.3.3. Agravala modelis

Indiešu zinātnieks Ašoks K. Agravals (*Ashok K. Agrawal*) kopā ar kolēģiem [2] piedāvā zibenizlādes un elektrolīnijas savstarpējās mijiedarbības aprakstīšanai, kas dota 4.3. att., iekļaut Maksvela vienādojumus un rezultātā mijiedarbības vienādojumus izteikt caur izkliedes spriegumu [20]

$$\frac{\partial u^i(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = E_x^r(x,h,t), \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u^i(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (4.19)$$

kur L' – elektrolīnijas īpatnējā induktivitāte;

C' – elektrolīnijas īpatnējā kapacitāte;

$i(x,t)$ – kopējā līnijas strāva;

$E_x^r(x,h,t)$ – raksturīgā elektriskā lauka horizontālā komponente pa x asi augstumā h ;

$u^i(x,t)$ – izkliedes spriegums, ko izsaka sekojoši

$$u^i(x,t) = -\int_0^h E_z^i(x,z,t) dz, \quad (4.20)$$

kur $E_z^i(x,h,t)$ – izkliedes elektriskā lauka vertikālā komponente pa z asi.

Summāro spriegumu elektrolīnijā var izteikt sekojoši, kā izkliedes un raksturīgā sprieguma summu [20]

$$u(x,t) = u^i(x,t) + u^r(x,t), \quad (4.21)$$

kur $u(x,t)$ – summārais spriegums elektrolīnijā,

$u^i(x,t)$ – izkliedes spriegums,

$u^r(x,t)$ – raksturīgais spriegums, ko izsaka sekojoši [20]

$$u^r(x,t) = -\int_0^h E_z^r(x,z,t) dz, \quad (4.22)$$

kur $E_z^r(x,h,t)$ – raksturīgā elektriskā lauka vertikālā komponente pa z asi.

Robežvērtības izkliedes spriegumam

$$u^i(0,t) = -R_0 i(0,t) - u^r(0,t), \quad (4.23)$$

$$u^i(L,t) = -R_L i(L,t) - u^r(L,t), \quad (4.24)$$

kur R_0 – elektrolīnijas sākuma robežas pretestība;

R_L – elektrolīnijas beigu robežas pretestība;

u^r – raksturīgais spriegums.

Agravala modelis ir vienīgais no zibensizlādes un elektrolīnijas modeļiem, kas pilnvērtīgi pārbaudīts neskaitāmos eksperimentos [85], [29], [106], [36] un salīdzināts ar negaisa laikā iegūtiem mērījumiem. Visi veiktie eksperimenti ir pierādījuši, ka veiktie aprēķini, izmantojot Agravala modeli, ir ļoti tuvi dabā novērotajiem rezultātiem. Ja arī kādā eksperimentā ir novērota kāda nesakritība, tad tas eksperimentā pieļauto kļūdu dēļ, kas turpmākajos pētījumos ir novērstas. Salīdzinot Agravala modeli ar citiem līdzīgiem modeļiem, ir secināts, ka šis modelis ir piemērotākais aprēķinu veikšanai arī gadījumos, kad nav ideāla grunts pretestība, kā arī veicot aprēķinus vairāku vadītāju elektrolīnijām [20].

Agravala modelis tiek izmantots arī plaši lietotās zibensizlādes radīto pārspriegumu (*LIOV – Lightning-induced overvoltage*) datorprogrammas kodā, kas ļauj veikt aprēķinus vairāku vadītāju gaisvadu elektrolīnijām pie dažādām grunts pretestībām, ņemot vērā elektrolīnijas ģeometriskos parametrus, zibensstrāvas impulsa viļņa formu, zibensizlādes kustības ātrumu u.c. LIOV koda pielietošanu aprēķinu veikšanai atļauj arī IEEE [58] un CIGRE, turklāt abās sistēmās ar LIOV kodu iegūtais rezultāts tiek uzskatīts par atsauces lielumu zibensizlādes inducētā pārsprieguma novērtēšanai [78].

Lai izvairītos no sarežģītajiem elektromagnētiskā lauka aprēķiniem, izmantojot multiplās dispersijas analīzi, Maķedonijas zinātnieks Voislavs Jankovs (*Voislav Jankov*) inducētā pārsprieguma maksimumvērtības aprēķinam piedāvā tuvinātu vienādojumu [61]

$$U_m = k_u \cdot I_m \cdot \exp(k_0 + k_1 \cdot \ln y + k_5 \cdot \ln^5 y), \quad (4.25)$$

kur U_m – inducētā pārsprieguma maksimumvērtība, kV;

I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA;

y – attālums no zibensizlādes vietas, m;

k_u, k_0, k_1, k_5 – koeficienti, ko aprēķina sekojoši [61]:

$$k_u = \frac{h_l}{10} \cdot \left[1 - 0,1875 \cdot (\tau_1 - 0,8) - 3,333 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4}{h_l^{0,6}} \cdot \tau_2 \right], \quad (4.26)$$

$$k_0 = 2,25 + 3,25 \cdot \exp\left(-\frac{(\tau_1 - 0,1)^{1,45}}{0,55}\right), \quad (4.27)$$

$$k_1 = -\frac{k_0 - \sqrt{k_0}}{3,45}, \quad (4.28)$$

$$k_5 = \frac{0,7 \cdot \exp\left(-\frac{(\tau_1 - 0,19)^{1,4}}{0,19}\right) + 0,18 \cdot \left(1 - 0,667^{\frac{\tau_2 - 28,85}{28,85}}\right) - 1,15}{10^4}, \tau_1 > 0,1 \mu s, \quad (4.29a)$$

$$k_5 = \frac{7,5 \cdot (\tau_1 - 0,02) - 0,9}{10^4}, 0 < \tau_1 \leq 0,1 \mu s, \quad (4.29b)$$

kur h_l – elektrolīnijas augstums, m;

τ_1 – viļņa pieauguma koeficients;

τ_2 – viļņa rimšanas koeficients.

Pieņemot, ka zibensizlādes kustības ātrums $v = 100 \text{ m}/\mu\text{s}$ un līnija ir ar vienu vadītāju, ar izteiksmi (4.25) aprēķināto inducētā pārsprieguma maksimumvērtību salīdzinot ar Agravala modeli, iegūtajiem lielumiem 21,85 %, 76,4 % un 96,4 % gadījumos relatīvā kļūda attiecīgi ir zem 1 %, 5 % un 10 %. Maksimālā kļūda, ja attālumu d maina robežās no 20 līdz 500 m ir 28,8 %, bet ja robežās no 40 līdz 500 m, tad tā samazinās uz pusi un ir 14,85 % [61].

4.4. Inducēto pārspriegumu aprēķina modeļu salīdzinājums

Lai izvēlētos inducētā pārsprieguma aprēķina modeli ir apkopoti un salīdzināti literatūrā atrodamie pētījumi par Agravala modeli, kas tiek plaši lietots zibensizlādes radīto pārspriegumu aprēķinu veikšanai, bet tā pielietošanai ir nepieciešama datorprogramma, kas ne visiem ir pieejama, un vienkāršoto Ruska modeli un Jankova tuvināto vienādojumu, kas arī tiek plaši pielietots aprēķinu veikšanai.

Kā jau iepriekš tika minēts, vienkāršotais Ruska modelis pieņem, ka ir ideāla grunts vadītspēja un zibensizlādes kanāls ir perpendikulārs zemei, kā arī netiek ņemti vērā zibensstrāvas impulsa viļņa parametri. Visi šie ierobežojumi Agravala modelī tiek ņemti vērā.

Aplūkojot vairāku elektrolīnijas vadītāju ietekmi uz zibensizlādes inducēto pārspriegumu un salīdzinot rezultātus, kas iegūti ar vienkāršoto Ruska modeli un Agravala modeli, pētījumā tika secināts, ka ar vienkāršoto Ruska modeli iegūtā zibensizlādes inducētā pārsprieguma vērtība ir tikai par 6 % mazākā, kā ar Agravala modeli iegūtā [105].

Itāļu zinātnieks Alberto Borgeti (*Alberto Borghetti*) ar kolēģiem savā pētījumā [15] ir aplūkojis zibensstrāvas impulsa maksimālā stāvuma, zibensizlādes kustības ātruma, grunts vadītspējas un zibensizlādes vietas ietekmi uz zibensizlādes inducēto pārspriegumu. Ar LIOV programmu iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar Ruska vienkāršoto modeli. Salīdzinātas tika 3 dažādas zibensstrāvas, kuru raksturlielumi doti 4.1. tabulā. Grunts īpatnējai vadītspējai γ aplūkoti 3 varianti: ideāla grunts vadītspēja, 0,01 S/m un 0,001 S/m. Zibensizlādes kustības ātrumam v 2 varianti: $1,3 \cdot 10^8$ un $1,9 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

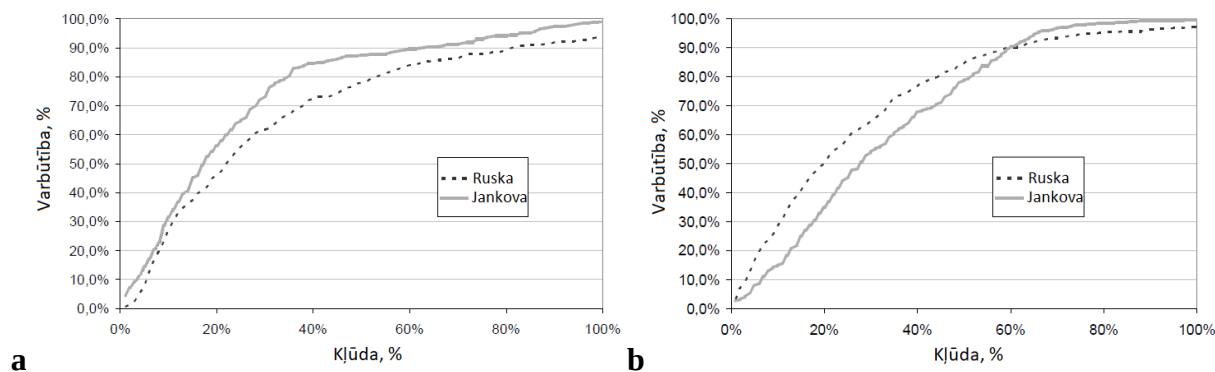
4.1. tabula

Aplūkoto zibensstrāvu parametri [15]

Apzīmējums	A1	A2	A3
I_m, kA	12	12	12
$s_m, \text{kA}/\mu\text{s}$	12	40	120

No iegūtajiem rezultātiem tika secināts, ka Ruska vienkāršotais modelis dod pieņemamu rezultātu gadījumos ar mazu zibensstrāvas impulsa maksimālo stāvumu un gadījumos, kad pieņemts, ka ir ideāla grunts vadītspēja. Pieaugot zibensstrāvas impulsa maksimālajam stāvumam, grunts pretestībai un zibensizlādes kustības ātrumam, Ruska vienkāršotais modelis vairs nedod tik precīzu rezultātu. Ruska vienkāršotais modelis lielākoties dod mazāku inducētā pārsprieguma vērtību, nekā tā ir patiesībā, kas īpaši izteikts ir pie lielas grunts pretestības.

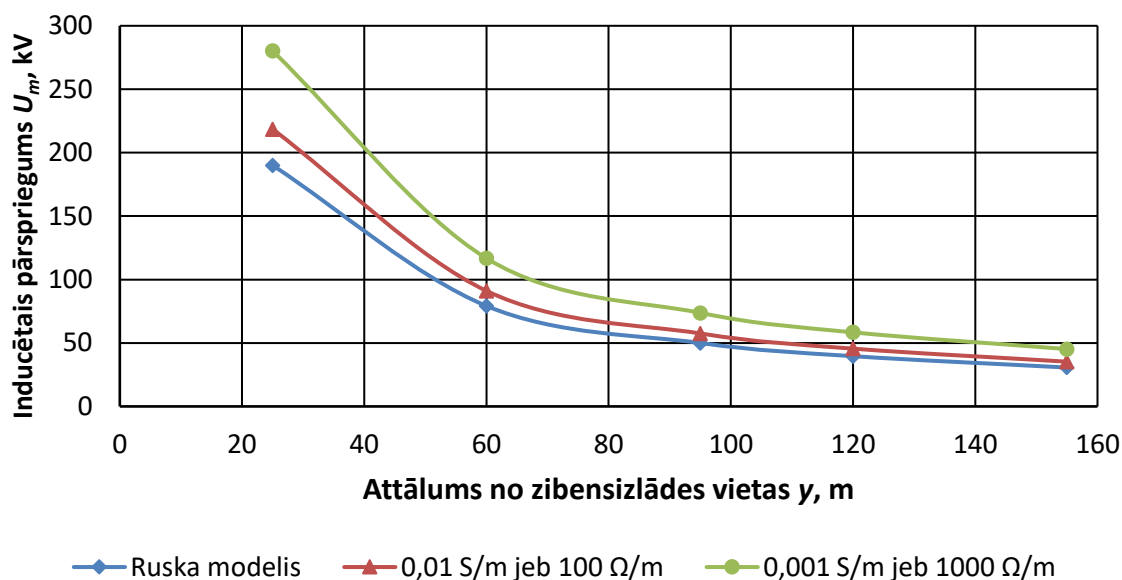
Jankova tuvinātā vienādojuma salīdzinājums ar Ruska vienkāršoto modeli, kur kā atskaites lielums ir ar Agravala modeli iegūtais rezultāts, ir aplūkots 4.4. attēlā. Gadījumā, kad netiek ņemta vērā grunts vadītspēja, vidējā relatīvā kļūda Jankova vienādojumam ir 16 %, bet Ruska modelim 20 %. Gadījumā, kad grunts vadītspēja tiek ņemta vērā, tad Ruska modelim vidējā kļūda paliek 20 %, bet Jankova vienādojumam tā pieaug līdz 30 % [100].



4.4. att. Relatīvo kļūdu varbūtības sadalījums, salīdzinot ar Agravala modeli [100]

a – neņemot vērā grunts vadītspēju, b – ņemot vērā grunts vadītspēju

Neskatoties uz to, ka Ruska modelim vidējā kļūda ir nemainīga pie dažādām grunts vadītspējām, redzams, ka kļūdas varbūtība ir lielāka. Kā iepriekš tika minēts, (4.17) izteiksmē Ruska vienkāršotā modeļa (4.13) trūkums, ka netiek ņemta vērā grunts īpatnējā pretestība, tiek novērsts. 4.5. attēlā salīdzinātas, ar izteiksmēm (4.13) un (4.17) aprēķinātās, zibensizlādes inducētā pārsprieguma vērtības, kas iegūtas elektrolīnijas augstumu h_l , aizvietojo ar efektīvo augstumu h_{ef} .



4.5. att. Inducētā pārsprieguma vērtības, Ruska vienkāršotajā modelī elektrolīnijas augstumu h_l aizvietojo ar efektīvo augstumu h_{ef} pie dažādām grunts vadītspējām

Kā jau iepriekš veiktajos salīdzinājumos tika novērots, pieaugot grunts pretestībai, pieaug arī zibensizlādes inducētā pārsprieguma vērtība. Ja grunts īpatnpretestība $\rho = 100 \Omega/\text{m}$ un $1000 \Omega/\text{m}$, tad nobīde attiecīgi ir 13 % un 32 %. Līdzīga kļūda tika konstatēta arī Ruska vienkāršoto modeli salīdzinot ar Agravala modeli, no kā varam secināt, ka Ruska vienkāršoto modeli (4.13) ar pietiekoši augstu precizitāti var pielietot zibensizlādes inducētā pārsprieguma maksimumvērtību aprēķinam, ja elektrolīnijas augstums h_l tiek aizvietots ar efektīvo augstumu h_{ef} , atbilstoši izteiksmei (4.17). Metodoloģijas ietvaros netiešas zibensizlādes inducētā pārsprieguma aprēķinam lieto Ruska vienkāršoto modeli (4.13), elektrolīnijas augstumu h_l aizvietojo ar efektīvo augstumu h_{ef} (4.17).

4.5. Vidsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas izolācijas spriegumizturība

Izolācijas izturību var aprakstīt ar vairākām metodēm, tādām kā pamata zibensizlādes impulsa izolācijas līmenis (turpmāk tekstā BIL, no angļu: *basic lightning impulse insulation level*), pamata komutācijas impulsa izolācijas līmenis (turpmāk tekstā BSL, no angļu: *basic switching impulse insulation level*) un kritiskais pārklāšanās spriegums (turpmāk tekstā CFO, no angļu: *critical flashover voltage*) [52].

Statistiskā BIL ir definēta kā zibensizlādes sprieguma standartimpulsa (1,2/50 μs) maksimālā vērtība, pie kuras izolācijas izturības varbūtība ir 90 %. BIL parasti tiek definēts sausos apstākļos. Savukārt statistiskā BSL ir definēta kā komutācijas sprieguma standartimpulsa (250/2500 μs) maksimālā vērtība, pie kuras izolācijas izturības varbūtība ir 90 %. BSL parasti tiek definēts mitros apstākļos. BIL un BSL ir definēti no statistikas vai varbūtības, tas nozīmē, ka, katru reizi pielietojot attiecīgo sprieguma standartimpulsu ar maksimālo vērtību, kas vienāda ar BIL vai BSL, ir 10 % varbūtība, ka notiks izolācijas pārklāšanās. Vispārīgi izolācijas izturību var aprakstīt ar normālo jeb Gausa sadalījumu. Šī sadalījuma vidējā vērtība tiek definēta kā CFO jeb impulsa viļņa maksimālā vērtība, pie kuras ir 50 % varbūtība, ka notiks izolācijas pārklāšanās. BIL vai BSL ir 1.28 standarta novirze zem CFO jeb vienādojuma formā [52]:

$$BIL \text{ vai } BSL = CFO \left(1 - 1,28 \frac{\sigma_f}{CFO} \right), \quad (4.30)$$

kur σ_f – variācijas koeficients, kas zibensizlādes sprieguma standartimpulsam ir 2–3 %, bet komutācijas sprieguma standartimpulsam – 5 %.

Visi lielumi parasti tiek doti sekojošiem standarta atmosfēras apstākļiem:

- 1) apkārtējās vides temperatūra: 20 °C;
- 2) atmosfēras spiediens 101,3 kPa jeb 760 mm Hg;
- 3) absolūtais gaisa mitrums: 11 grami ūdens/m³ gaisa;
- 4) mitruma testiem: 1 mm līdz 1,5 mm ūdens/minūtē [52].

Jāatzīmē, ka piedāvātās metodoloģijas ietvaros tiek pieņemts, ka dotās CFO vērtības ir pie standarta atmosfēras apstākļiem un tās netiek koriģētas. Atmosfēras apstākļu korekcijas būtu lietderīgi veikt, analizējot konkrētu izolācijas pārklāšanās gadījumu, kad ir zināmi visi apkārtējās vides faktori.

Elektrolīnijas parasti sastāv no vairākiem elementiem, katrs ar savu izolācijas izturību, piemēram, porcelāns, kompozītmateriāli un gaiss. Kopējo elektrolīnijas izolācijas līmeni ir sarežģīti precīzi noteikt, jo to ietekmē sekojoši faktori:

- 1) atmosfēras apstākļi, t.sk. gaisa blīvums, lietus, vēja ātrums un atmosfēras piesārņojums;
- 2) polaritāte un pārsprieguma viļņa forma;
- 3) fiziskie faktori, tādi kā izolatoru forma, izolatoru novietojums (horizontāli, vertikāli vai slīpi), kā arī metālisko daļu forma [58], [53].

Lietojot kombinēti vairākus izolācijas materiālus, to kopējā izolācija nav vienāda ar visu materiālu izolācijas CFO summu. Parasti tā ir mazāka, apmēram 60-80 % no to summas [123]. Kopš laboratorijas mērījumu datu pieejamības ir pētītas dažādas metodes, kā noteikt summāro elektrolīnijas elementu izolācijas CFO. Viena no šādām metodēm ir pievienotā elementa izolācijas (*insulation-strength-added*) CFO. Šī metode ņem vērā katra pievienotā elementa

izolācijas CFO ieguldījumu kopējai elektrolīnijas izolācijas CFO vērtībai. Otrā pievienotā elementa izolācijas CFO

$$CFO_{add.sec} = 0,45 \cdot CFO_{ins}, \quad (4.31)$$

kur $CFO_{add.sec}$ – otrā pievienotā elementa CFO, kV;

CFO_{ins} – primārā elementa izolācijas CFO, kV,

Trešā un katra nākamā pievienotā elementa izolācijas CFO

$$CFO_{add.third} = 0,2 \cdot CFO_{ins}, \quad (4.32)$$

kur $CFO_{add.third}$ – trešā un katra nākamā pievienotā elementa CFO, kV;

CFO_{ins} – primārā elementa izolācijas CFO, kV,

Kopējā elektrolīnijas izolācijas CFO vērtība

$$CFO_T = CFO_{ins} + CFO_{add.sec} + CFO_{add.third} + \dots + CFO_{add.n}, \quad (4.33)$$

kur CFO_T – visu elementu kopējās izolācijas CFO, kV;

CFO_{ins} – primārā elementa izolācijas CFO, kV;

$CFO_{add.sec}$ – otrā pievienotā elementa CFO, kV;

$CFO_{add.third}$ – trešā pievienotā elementa CFO, kV;

$CFO_{add.n}$ – n-tā pievienotā elementa CFO, kV [58].

Pievienotā elementa izolācijas CFO metode parasti dod rezultātu ar 20 % precizitāti, precīzākai CFO noteikšanai ir jāveic laboratorijas impulsu testi. Veicot impulsu testus sausos apstākļos, iegūtais rezultāts jāpareizina ar 0,8, lai iegūtu CFO slapjiem apstākļiem [58].

Elektrolīnijai iespējami vairāki izolācijas pārklāšanās ceļi, piemēram, izolētā vada izolācija un izolators vai izolētā vada izolācija un gaiss. Gadījumos, ja traversa, pie kuras tiek stiprināti izolatori nav no metāla, tad jāņem vērā arī traversas CFO. Koka balstiem, kur izolatori tiek stiprināti uz metāla kāšiem, jāņem vērā arī koka balsta CFO. Tāpēc svarīgi ir apzināt visus iespējamās pārklāšanās ceļus un turpmākiem aprēķiniem izmantot viszemāko elektrolīnijas CFO vērtību.

Dažādu elektrolīnijas elementu CFO lielumi apkopoti 4.2. tabulā.

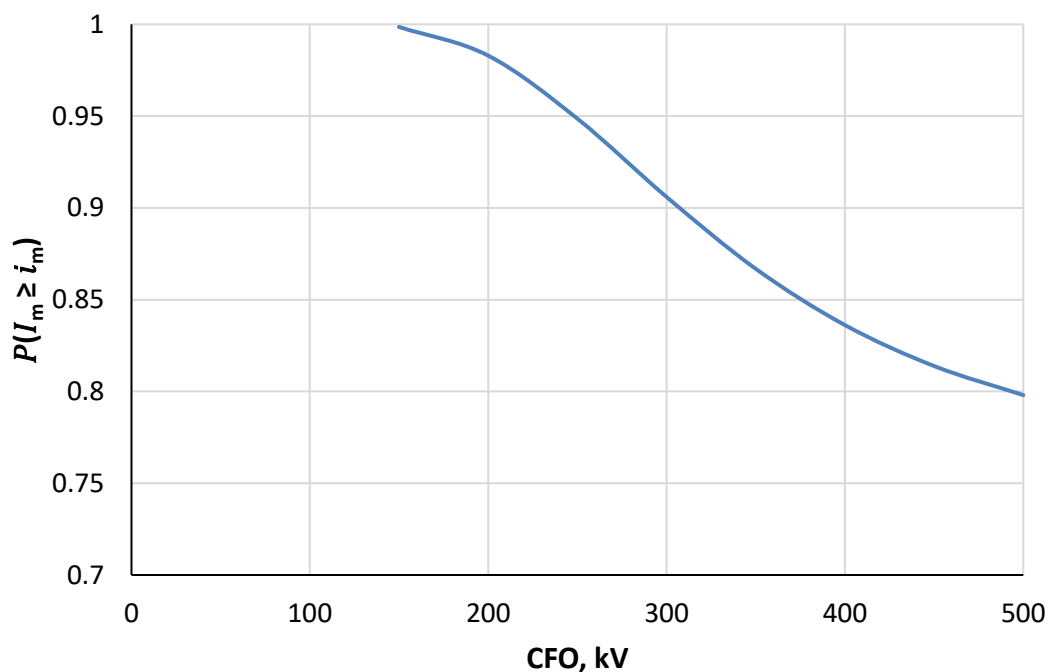
4.2. tabula

Dažādu elektrolīnijas elementu CFO minimālās vērtības

Izolatori	
Tips	kV
Tapizolators SDI37 [112]	125
Tapizolators SDI30 [112]	125
Piekarizolators SDI90.150 [112]	126
Piekarizolators SDI90.280 [112]	171
Piekarizolators LK-70/20-III [30]	125
Piekarizolators LK-70/20-VII [30]	135

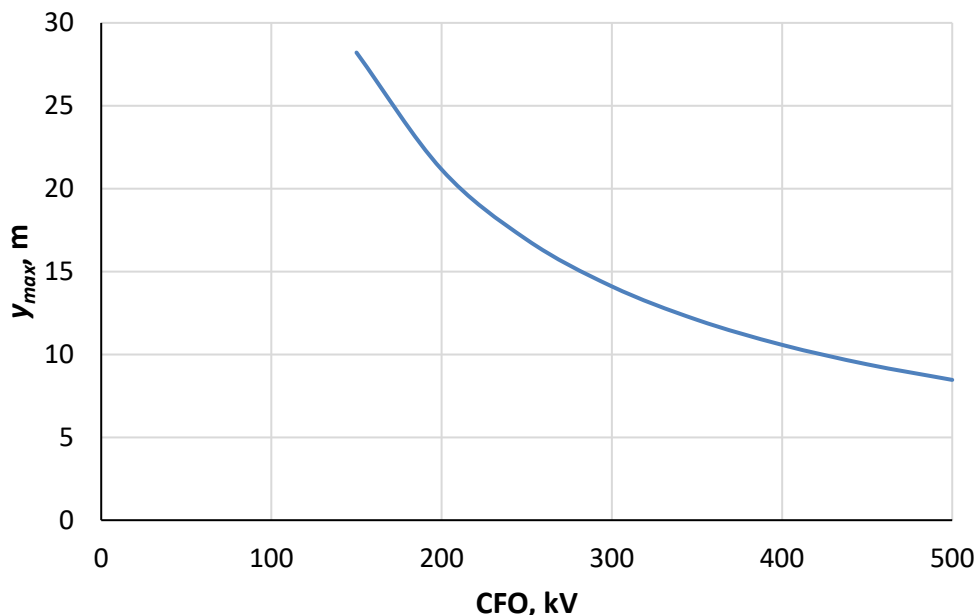
Izolētais vads	
Pārklājums	kV
XLPE 2,3 mm [69]	92
XLPE 3,1 mm [92]	130
HDPE 3,9 mm [92]	221
Izolējošais materiāls	
Materiāls	kV/m
Gaiss [58]	600
Koka balsts [58]	330
Elektriskā loka aizsargietais	
Tips	V_{IR} , kV
APD	vienāds ar izolatora CFO
PAD (100 mm) [69]	120
PAD (150 mm) [69]	180
CLAH [48]	70

Elektrolīnijas CFO ir liela nozīme, jo pie lielāka CFO elektrolīnijas izolācijas pārklāšanās notiek retāk. Palielinot elektrolīnijas CFO par 50 kV (piemēram, no 170 kV līdz 220 kV), bojājumu skaitu iespējams samazināt par 13 %, bet, palielinot par 100 kV, samazinājums ir 27 % [92]. Aprēķinātā elektrolīnijas CFO ietekme uz varbūtību (2.3), ka zibensstrāvas maksimumvērtība I_m pārsniegs strāvas maksimumvērtību I_{ml} (1.2), kas rada izolācijas pārklāšanos, dota 4.6. attēlā, pieņemot, ka $I_m = 16,4$ kA, elektrolīnijas augstums $h_l = 10$ m un aizsargietais izvietots katrā 4. elektrolīnijas balstā jeb ik pēc 240 m.



4.6. att. Elektrolīnijas CFO ietekme uz varbūtību, ka zibensstrāvas maksimumvērtība I_m pārsniegs iespējamo zibensstrāvas maksimumvērtību I_{ml} , kas rada izolācijas pārklāšanos

Ar (5.1) izteiksmi aprēķinot, attālumu no elektrolīnijas y_{max} , līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, 4.7. attēlā redzams, ka tas būtiski samazinās, pieaugot elektrolīnijas CFO. Aprēķinā pieņemts, ka elektrolīnijas augstums jeb efektīvais augstums $h_{ef} (\rho = 0) = h_l = 10$ m, zibensstrāvas maksimumvērtība $I_m = 16,4$ kA, viļņa īpatpretestība $Z_0 = 30 \Omega$, bet zibensizlādes kustības ātrumu raksturojošais koeficients $k_v = 1,29$.



4.7. att. Elektrolīnijas CFO ietekme uz attālumu no elektrolīnijas y_{max} , līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem

4.6. Izolēto vadu nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas CFO

Veicot sākotnējos elektrolīnijas aprēķinus, parasti tiek ņemti vērā jaunu elektrolīnijas elementu raksturlielumi un netiek ņemts vērā, ka elektrolīnijas kalpošanas laiks ir vairāki desmiti gadu, kas nozīmē, ka laikapstākļu, apkārtējās vides vai kādu citu iemeslu dēļ elektrolīnijas CFO var samazināties, kas tiek aplūkots metodoloģijas 6. blokā no 1.4. attēla.

Kā tika secināts iepriekš, tad pat 50 kV starpība var radīt 13 % bojājumu pieaugumu vai samazinājumu. Protams, svarīgi ir izvēlēties atbilstošus elektrolīnijas elementus, ņemot vērā apkārtējās vides faktorus, piemēram, nepareizi izvēlēts balsta izolators vai slikts kontakts pat pie 20 kV var radīt augstfrekvences spriegumu, kas var bojāt izolētā vada izolējošo pārklājumu [99]. Tāpēc nepieciešams aplūkot galvenos faktorus, kas ietekmē elektrolīnijas CFO samazinājumu.

4.6.1. Bojātas izolācijas ietekme uz elektrolīnijas CFO

Izolācijas bojājumi var rasties dažādu iemeslu dēļ, sākot ar nepareizu vadu transportēšanu un beidzot ar zibensizlādes radīta elektriskā loka izdedzinātu caurumu. Bojāta izolētā vada izolācijas bojājuma ietekme uz CFO ir pētīta [79], kur tika pārbaudīti divu ražotāju vadītāji ar XLPE 3 mm biezu izolāciju, sākotnēji veicot pārbaudi ar jauniem vadītājiem, līdz parādās elektriskā loka radīts caurums, tad pārbaude tika atkārtota ar nu jau bojātu vadītāju. Iegūtie rezultāti parādīti 4.3. tabulā. Jāatzīmē, ka šīs CFO vērtības ir kopā ar balsta izolatora CFO.

Vidējās CFO vērtības jaunam un bojātam izolētajam vadam [79]

Ražotājs	Jauna vada CFO, kV	Standarta novirze, %	Bojāta vada CFO, kV	Standarta novirze, %
A	237,8	6,7	243,7	7,3
B	249,7	3,3	216,2	20,9

Interesanti, ka ražotajam vadam A pēc bojājuma CFO ir pieaudzis par 2,5 %, tomēr, ņemot vērā standarta novirzi, var pieņemt, ka jauna un bojāta vada CFO ir vienādi. Ražotāja B bojātajam vadam CFO samazinājās par 13,4 %, kas ir skaidrojams ar to, ka vienā no pārbaudēm caurums parādījās 4 cm attālumā no izolatora un šajā gadījumā bojātā vada CFO bija tikai 139 kV, kas ir tuvu kailvada CFO vērtībai. Var secināt, ka vidējā CFO vērtība jaunam vadam ir 243,8 kV, bet bojātam – 230,0 kV, kas ir par 6 % mazāk. Pat ar bojātu izolāciju izolētā vada CFO ir par 77 % augstāks kā kailvadiem [79]. Izolācijas bojājuma ietekme uz CFO ir ņemta vērā elektrolīnijas nolietojuma prognozei.

4.6.2. Apkārtējās vides piesārņojuma ietekme uz elektrolīnijas CFO

Elektrolīnijas CFO ietekmē arī apkārtējās vides faktori, kas apskatāmi [59] 1. tabulā (skat. 22.pielikumu). Apkārtējās vides piesārņojums vairāk ietekmē izolatorus, tomēr pastiprināts piesārņojums var veicināt metālisko daļu koroziju, piemēram, vadītāju, ja bojāts vada izolējošais pārklājums un elektriskā loka aizsargietais. Rūpnieciskais piesārņojums laikapstākļu ietekmē var tikt izplatīts vairāku simtu kilometru rādiusā un nosēties uz elektrolīnijas elementiem, bojājot to virsmu un izolējošas īpašības. Apvidos ar lielu sāls koncentrāciju, izolēto vadu izolējošais apvalks nokļūst ar pusvadošu slāni, kas var veicināt izlādes uz izolētā vada virsmas. Šis ir īpaši aktuāli vadiem ar augstu oglekļa saturu izolācijā, kas paredzēts aizsardzībai no UV stariem [120].

Apkārtējās vides piesārņojuma ietekme uz izolatora spriegumizturību dota 4.4. tabulā.

4.4. tabula

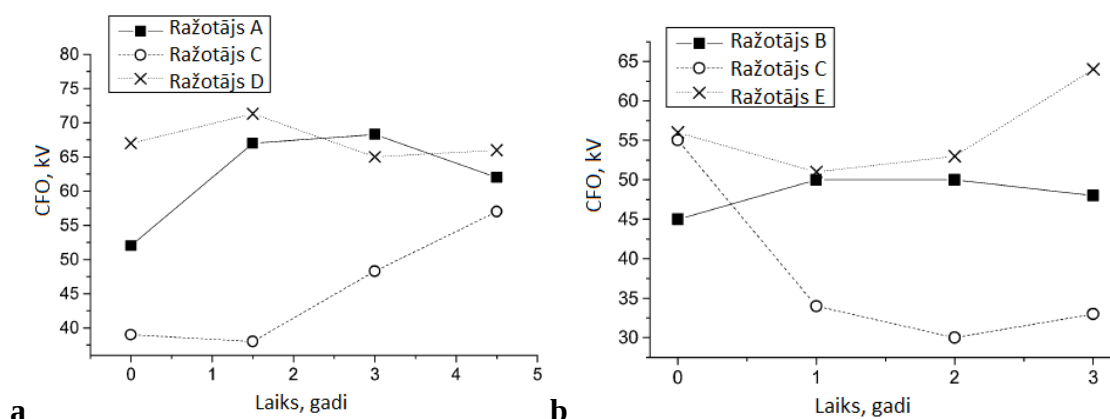
Jaunu un apkārtējās vides piesārņojuma bojātu izolatoru CFO [124]

Izolatora tips	Jauna izolatora izmērītais CFO, kV	Apkārtējās vides bojāta izolatora izmērītais CFO, kV
Tapizolators	145,2	88,7
Piekarizolators	152,4	110,2

No 4.4. tabulas datiem redzams, ka apkārtējās vides piesārņojums būtiski samazina izolatora CFO. Tapizolatora gadījumā samazinājums ir 56,5 kV jeb 39 %, bet piekarizolatora gadījumā attiecīgi 42,2 kV jeb 28 %. Apkārtējās vides ietekme uz elektrolīnijas CFO nolietojumu ir ņemta vērā, prognozējot elektrolīnijas nolietojumu ekspluatācijas laikā. Apkārtējās vides piesārņojuma ietekmei uz elektrolīnijas CFO izmantoti 3 scenāriji atbilstoši 22. pielikumā dotās tabulas piesārņojuma piemēriem.

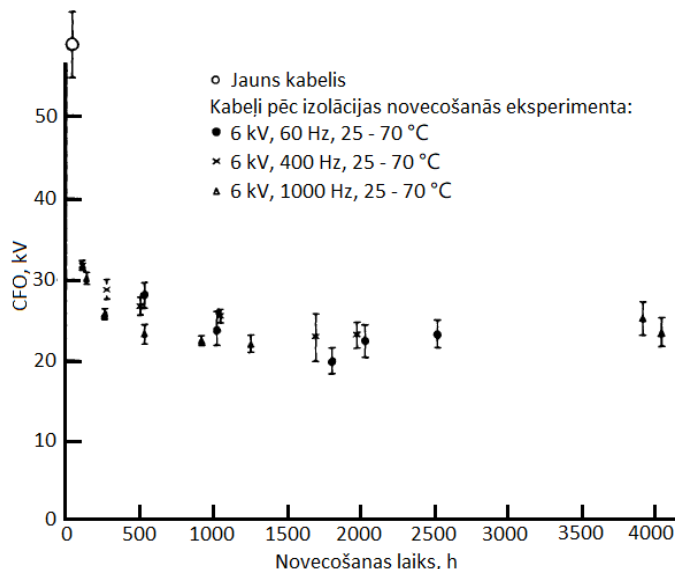
4.6.3. Izolācijas novecošanas ietekme uz elektrolīnijas CFO

Tālāk aplūkosim izolēto vadu izolējošā pārklājuma CFO, vadam novecojot [18], [109]. Dažādu ražotāju (A, B, C, D, E) izolēto vadu ar XLPE izolāciju, divos dažādos Brazīlijas rajonos (R1 un R2) dabīgas novecošanas ietekme uz izolācijas CFO dota 4.8. attēlā. Pirmajā rajonā, kas apzīmēts ar R1 (4.8. att. a) veiktas pārbaudes 1,5, 3 un 4,5 gadus, bet rajonā, kas apzīmēts ar R2 (4.8. att. b) 1, 2 un 3 gadus pēc darbošanās normālā režīmā. Kā redzams, nepilnu 5 gadu periodā novecošanās ietekme uz izolācijas CFO praktiski nav, lielākas izmaiņas redzamas apgabalā R2 ražotāja C izolētajam vadam (4.8. att. b). Pārbaudes laikā tika konstatēts, ka šis vads ir stipri saplaisājis vairākās vietās, kas arī varētu būt iemesls CFO samazinājumam. Nelielās rezultātu svārstības skaidrojamas ar izolējošā polimēra materiāla strukturālajām izmaiņām, tāpēc arī apgabalā R1 ražotāja C un R2 ražotāja E vadam vērojams CFO pieaugums (4.8. att. a) [109].



4.8. att. Dabīgas novecošanas ietekme uz CFO [109]
a – R1, b – R2

Nepilni pieci gadi ir īss laiks, lai spriestu par novecošanās ietekmi uz izolētā vada CFO, tāpēc jāapskata, kas notiek ar XLPE, izolāciju paātrinot novecošanās procesus. Paātrinātās novecošanās procesa eksperiments [18] veikts 33 m garam kabelim ar 0,75 mm biezu XLPE izolāciju, kas satīts spolē un iemērkts ūdenī. Novecošanās temperatūra bija 25 °C vai cikliska 12 stundas 25 °C un 12 stundas 70 °C. Kabeļi pieslēgti 6 kV spriegumam ar 60, 400 un 1000 Hz frekvenci līdz pat 4000 stundām. Rezultāti doti 4.10. attēlā.



4.9. att. Eksperimentāli paātrinātās izolācijas novecošanās ietekme uz CFO [18]

25 °C temperatūrā kabeļiem pēc izolācijas novecošanās eksperimenta tika novērots izteikts CFO samazinājums divas reizes novecošanās periodā, pirmais samazinājums no apmēram 50 kV līdz apmēram 30 kV pirmajās 100-200 stundās, bet otra samazinājuma līdz apmēram 20 kV laiks ir atkarīgs no frekvences. Pie 1000, 400 un 60 Hz, samazinājuma laiks attiecīgi ir apmēram pēc 500, 800 un 2500 stundām. Otrs CFO samazinājums saistīts ar bojāto izolāciju, izolācijas pārklāšanās skaits 25 °C temperatūrā kabeļiem pēc izolācijas novecošanās eksperimenta pieaug, palielinoties frekvencei. No 4.9. attēlā dotajiem rezultātiem redzams, ka cikliskā temperatūrā novecotiem kabeļiem CFO samazinājums no apmēram 50 kV līdz apmēram 25 kV, kas novērojams pirmajās 500 stundās, nav atkarīgs no frekvences. Pētījumā noskaidrots, ka vienānai XLPE izolācijai, kas ražota dažādās rūpnīcās, ievērojami atšķiras izolācijas CFO lielumi [18]. Līdzīgs pētījums ar gaisa kabeļiem veikts arī Irānā [93], kurā iegūtie rezultāti apkopoti 4.5. tabulā.

4.5. tabula

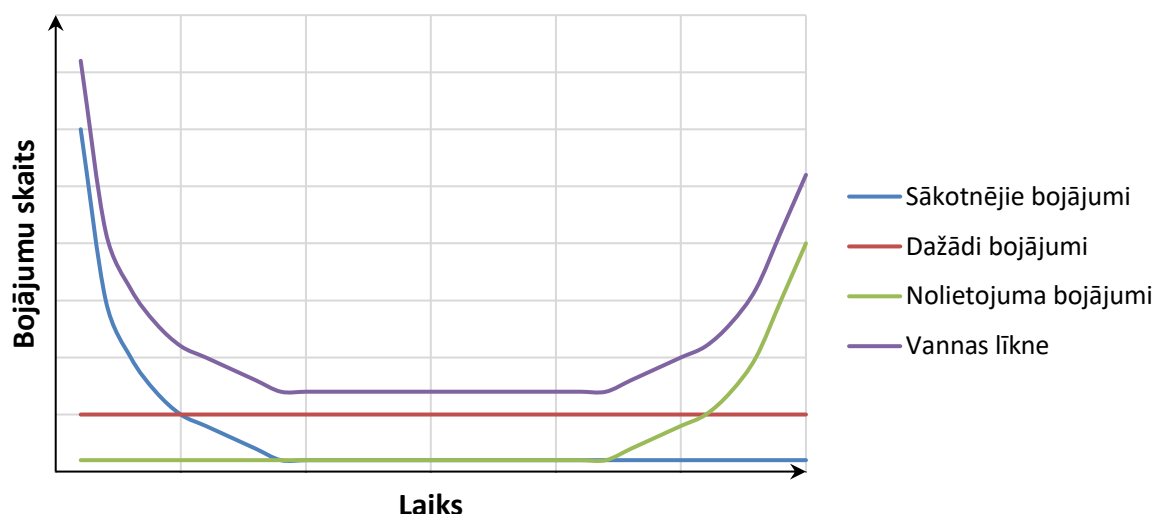
Izmaiņas kabeļa garumā un CFO, kabelim novecojot [93]

Kabeļa vecums, gadi	0	5	10	15	20
Kabeļa garums, mm	1000	1100	1155	1270	1297
Kabeļa CFO, kV	13,6	11,6	9,8	8,8	8,7

No iegūtajiem rezultātiem redzams, ka kabeļiem pēc izolācijas novecošanās eksperimenta CFO samazinās apmēram par 30-50 %, turklāt, sasniedzot noteiktu vērtību, samazinājums vairs netiek novērots. Izolācijas novecošanās ietekme uz elektrolīnijas CFO ir ņemta vērā, prognozējot elektrolīnijas nolietojuma ietekmi uz kopējo elektrolīnijas CFO.

4.6.4. Elektrolīnijas nolietojuma ietekmes uz elektrolīnijas CFO prognoze

Bojājumu skaitu bieži mēdz attēlot ar tā saucamo vannas līkni (4.10. att.), ko veido trīs līkņu summa. Pirmā līkne attēlo bojājumus, ko rada ražošanas, montāžas un citi defekti. Šī līkne parasti strauji nokrīt un turpmāk būtiskus bojājumus nerada. Otrā līkne attēlo dažādu faktoru radītus bojājumus, šo līkni parasti attēlo kā taisnu līniju. Trešā līknē attēlo nolietojuma radītus bojājumus, kas parasti ir pieaugoša līkne [67], [126].



4.10. att. Vannas līknes principiālais attēlojums

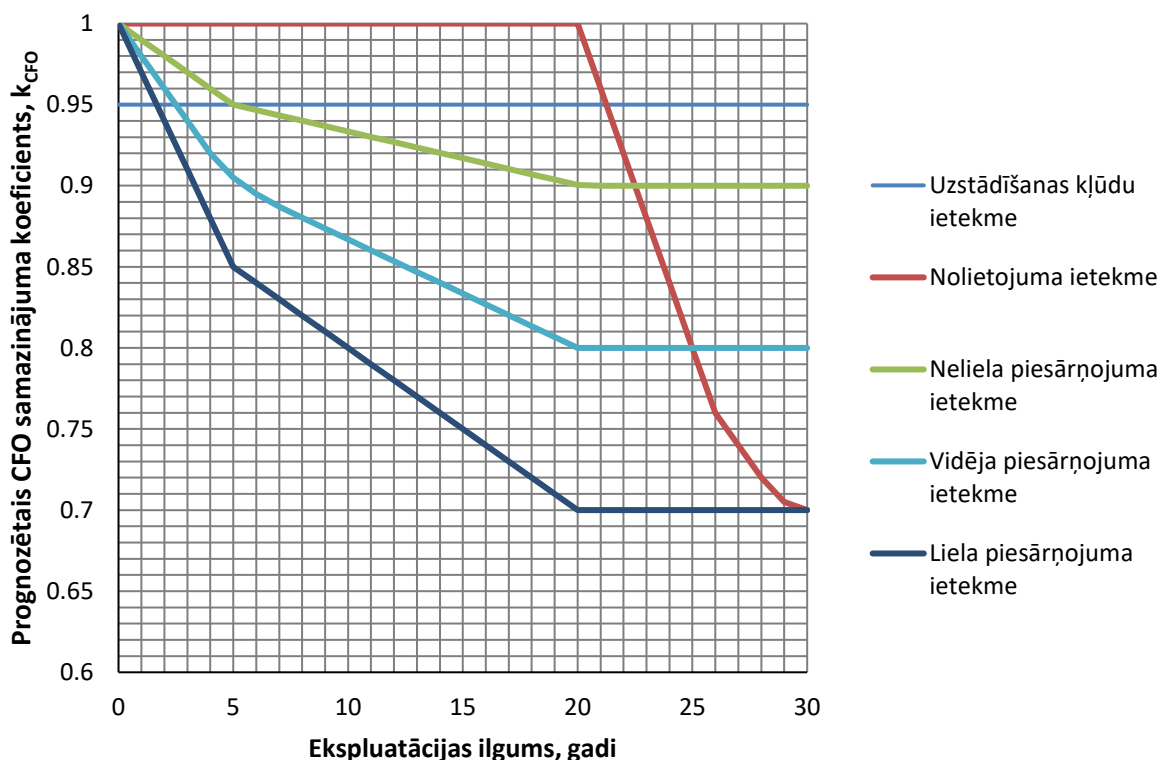
Ekspērimētāli ir pierādīts, ka izolēta kabeļa aptuvenais kalpošanas ilgums ir 20-30 gadi [93], [126]. Piedāvātās metodoloģijas ietvaros elektrolīnijas nolietojuma prognozei tiek apskatīts 30 gadus ilgs ekspluatācijas periods. Vannas līknes princips tiek izmantots elektrolīnijas nolietojuma ietekmes uz elektrolīnijas CFO prognozei, ņemot vērā iepriekš apskatīto faktoru ietekmi uz elektrolīnijas CFO. Atšķirībā no 4.10. attēlā dotās līknes bojājumu skaita vietā ir aplūkots procentuālais elektrolīnijas CFO samazinājums, kas tiek definēts kā prognozētais CFO samazinājuma koeficients k_{CFO} , tāpēc ir saglabāts tikai vannas līknes princips, bet ne līknes forma.

Vannas līkni veidojošā sākotnējo bojājumu līkne (4.10. att.) metodoloģijā piedāvātajā prognozē attēlo apkārtējās vides piesārņojuma ietekmi. Apkārtējās vides piesārņojuma ietekmei piedāvāti 3 varianti, atbilstoši 22. pielikuma tabulas apkārtējās vides piemēriem: neliela piesārņojuma ietekme atbilst piemēram E2, vidēja piesārņojuma ietekme – E3 un E4, bet liela piesārņojuma ietekme – E5, E6 un E7. Neliela piesārņojuma gadījumā izolatora CFO pakāpeniski samazinās par 10 %, vidēja piesārņojuma gadījumā par 20 %, bet liela piesārņojuma gadījumā par 30 %. Piesārņojums pēc 20 gadu ekspluatācijas ir sasniedzis savu maksimumu un turpmāk neietekmē izolatoru CFO. Apkārtējās vides piemēram E1 piesārņojuma ietekme uz elektrolīnijas izolatoru CFO netiek ņemta vērā.

Dažādi bojājumi tiek aizstāti ar izolēto vadu ražošanas, transportēšanas un montāžas defektu (t.sk. izolācijas bojājumu) ietekmi uz CFO. Tiek pieņemts, ka tā samazina izolētā vada CFO par 5 %.

Nolietojuma bojājumi tiek aizstāti ar elektrolīnijas nolietojuma ietekmi uz izolētā vada CFO. Ņemot vērā 4.8. un 4.9. attēlos, kā arī 4.5. tabulā dotos rezultātus, tiek prognozēts, ka pirmos 20 ekspluatācijas gadus nolietojuma ietekme nav redzama, bet pie 20 gadiem izolētā vada CFO 10 gadu laikā samazinās par 30 % un atlikušajā periodā nemainās.

Promocijas darba ietvaros izstrādātās prognozētā CFO samazinājuma koeficienta k_{CFO} vērtības dotas 4.11. attēlā.



4.11. att. Prognozētā CFO samazinājuma koeficienta k_{CFO} līknes

Lai novērtētu elektrolīnijas nolietojuma ietekmi uz aizsargietaišu izvietojuma biežumu, metodoloģijā ir paredzēts atkārtoti veikt zibensizlādes radīta pārklāšanās skaita aprēķinus katram ekspluatācijas 5 gadu periodam, izmantojot prognozēto elektrolīnijas elementu spriegumizturību

$$CFO_i = k_{CFO} \cdot CFO, \quad (4.34)$$

kur CFO_i – prognozētais elektrolīnijas elementa izolācijas CFO, kV;
 CFO – sākotnējā elektrolīnijas elementa spriegumizturība, kV;
 k_{CFO} – prognozētā CFO samazinājuma koeficients no 4.11. attēla;
 i – elektrolīnijas ekspluatācijas gads.

4.7. Ceturtās nodaļas secinājumi

1. Vidsprieguma elektrotīklā būtiskus bojājumus rada tikai zibensizlādes radīti pārspriegumi. Zibensizlādes radītu pārspriegumu bojājumu skaitu elektrolīnijā var aprēķināt, ņemot vērā tiešas un netiešas zibensizlādes radīto izolācijas pārklāšanās skaitu.
2. Vidsprieguma elektrolīniju salīdzinoši zemās spriegumizturības dēļ var pieņemt, ka tiešas zibensizlādes radītu elektrolīnijas pārklāšanās skaits F_d ir vienāds ar ikgadējo zibens spērienu skaits elektrolīnijā N . Pat 1 kA liela tiešas zibensizlādes zibensstrāvas maksimumvērtība elektrolīnijā rada 200 kV pārspriegumu.
3. Netiešas zibensizlādes radīta pārsprieguma aprēķināšanai literatūrā plaši izmanto divas metodes Ruska vienkāršoto modeli un Agravala modeli. Ruska vienkāršotā modeļa galvenais trūkums ir grunts ideālās vadītspējas pieņēmums, ko ar pietiekoši augstu precizitāti var labot M. Darveniza ieteikums elektrolīnijas augstumu h_l aizstāt ar efektīvo augstumu h_{ef} , kas ņem vērā grunts pretestību.
4. Elektrolīnijas spriegumizturība ir būtisks lielums, aprēķinot zibensizlādes inducēto pārspriegumu radītās izolācijas pārklāšanās skaitu. Elektrolīnijas CFO aprēķinam svarīgi apskatīt visus iespējamās pārklāšanās ceļus, ņemot vērā balsta izolatoru, izolētā vada izolācijas, koka balsta un gaisa CFO. Palielinot elektrolīnijas CFO par 50 kV vai 100 kV, iespējams samazināt elektrolīnijas bojājumu skaitu attiecīgi par 13 % vai 27 %.
5. Ekspluatācijas laikā izolēto vadu elektrolīniju CFO var ievērojami samazināties. Izolācijas bojājums samazina CFO par apmēram 6 %, apkārtējās vides piesārņojums par apmēram 30-40 % atkarībā no izolatora tipa, bet vada termiska un elektriska nolietojšanās pat par 50 %, lai gan pirmajos 5 gados ievērojams CFO samazinājums nav redzams.
6. Piedāvātās metodoloģijas prognozē paredzēti 3 CFO krituma posmi. 1. posmā izolētā vada CFO par 5 % samazina mehāniski izolācijas bojājumi, kas nav saistīti ar vada ekspluatācijas apstākļiem, tāpēc tie ir nemainīgi visu ekspluatācijas laiku. 2. posmā atbilstoši apkārtējās vides piesārņojuma pakāpei elektrolīnijas izolatoru CFO pakāpeniski samazinās no 10-30 %, šī ietekme jūtama pirmos 20 ekspluatācijas gadus. 3. posmā, kas ir sākot ar 20. ekspluatācijas gadu, izolētā vada CFO 10 gadu laikā nolietojuma dēļ samazinās par 30 %. Pēc 30. ekspluatācijas gada elektrolīnijas CFO samazinājums netiek prognozēts.

5. PIEDĀVĀTAIS ALGORITMS ZIBENSAIZSARDZĪBAS AIZSARGIETAIŠU OPTIMĀLA IZVIETOŠANAS BIEŽUMA NOVĒRTĒŠANAI

5.1. Izvirzītie izolēto vadu zibenssardzības ietaišu izvietojuma kritēriji

Kā ir minēts 1. nodaļā, notiekot tiešai vai netiešai zibenssildādei, elektrolīnijā rodas pārspriegums, kā rezultātā starp fāzēm veidojas elektriskais loks, kas var bojāt izolēto vadu līnijas izolējošo apvalku. Lai novērstu izolācijas bojājumu, izolēto vadu līnijas ir nepieciešams aprīkot ar elektriskā loka aizsargietaisēm. Esošās metodoloģijas (skat. 1.2.2. un 1.2.3. apakšnodaļas), kā aizsargietaišu izvēles kritēriju izvirza tikai zibenssildādes radītu elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F , tomēr 4.6. apakšnodaļā secināts, ka optimālai izvietojuma biežuma novērtēšanai ar to ir nepietiekoši.

Piedāvātā metodoloģija elektriskā loka aizsargietaišu izvietojuma biežuma novērtēšanai izvirza sekojošus kritērijus:

- 1) kopējais zibenssildādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits F ;
- 2) elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ ;
- 3) prognozētā izolēto vadu elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās skaitu un biežumu;
- 4) alternatīvo risinājumu analīze.

Piedāvātajā metodoloģijā elektriskā loka aizsargietaišu izvietojuma biežumu ietekmē sekojoši faktori un aprēķinu parametri, kas sīkāk apskatīti 3.2., 3.4. un 4.6. apakšnodaļās:

- 1) aplūkojamā reģiona zibenssildādes statistika, kas ietver negaisa dienu skaitu gadā un zibensstrāvas maksimumvērtības varbūtējo sadalījumu;
- 2) elektrolīnijas tuvumā esošo objektu (koku, būvju, utt.) augstums un attālums no elektrolīnijas;
- 3) elektrolīnijas CFO, kas ietver arī iespējamo izolācijas pārklāšanās ceļu analīzi.

Ar piedāvāto metodoloģiju tiek iegūts elektrolīnijas pārklāšanās skaits gan no tiešas, gan netiešas zibenssildādes, no kura tiek aprēķināts elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ , kas kalpo kā aizsargietaišu izvietojuma biežuma novērtēšanas kritērijs, bet detalizēta piedāvātā kritērija analīze aplūkota 6.1.2. apakšnodaļā. Metodoloģijā autora piedāvātie ζ robežlielumi aizsargietaišu izvietojuma biežuma novērtēšanai doti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Aizsargietaišu izvietojuma biežums atkarībā no ζ

Laidumu skaits	ζ , gadi/km
1	≤ 3
2	$3 < \zeta \leq 6$
3	$6 < \zeta \leq 9$
4	$9 < \zeta \leq 20$
5	$20 < \zeta \leq 30$
Bez aizsargietaisēm	> 30

Ar alternatīvu analīzi iespējams izvēlēties cita tipa elektrolīnijas elementu vai elektrolīnijas balstu, veicot relatīvo izmaksu salīdzinājumu.

Piedāvātā metodoloģija neņem vērā balstos esošo iekārtu un to aizsardzību, šķērsojumu ar citām virszemes inženierkomunikācijām un gadījumu, kad zemsprieguma līnija un vidsprieguma līnija montēta kopējos balstos, ietekmi uz aizsargietaišu izvietošanas biežumu.

Visi piedāvātās metodoloģijas pieņēmumi saistīti ar nepieciešamo parametru aprēķinos izmantoto formulu un metožu pieņēmumiem. Ikgadējā zibens spērienu blīvuma N , ikgadējo zibens spērienu skaita elektrolīnijā N_b , strāvas maksimumvērtība elektrolīnijā I_{ml} , strāvas maksimumvērtība elektrolīnijas balstā I_{mb} un netiešas zibensizlādes radīta elektrolīnijas pārklāšanās skaita F_p aprēķinu veikšanai tiek pielietotas IEEE 1410 [58] metodoloģijas formulas un Ruska vienkāršotais modelis [107] ar Darveniza ierosināto efektīvo augstumu h_{ef} [33]. Nosegšanas koeficienta noteikšanai tiek pielietota zibens uztvērējvirsmas metode [47].

5.2. Algoritma struktūra

Vienkāršota elektriskā loka aizsargietaišu izvietošanas metodoloģijas blokshēma dota 1.4. attēlā, bet izvērstā blokshēma ir dota 5.1. attēlā. Algoritms ir sadalīts 7 daļās, ko var sadalīt sīkāk nemainīgās daļas un mainīgās daļas. Pie nemainīgajām algoritma daļām ietilpst:

- 1) reģiona zibensizlādes statistika;
- 2) elektrolīnijas nolietošanās prognozes koeficienti.

Pie mainīgajām algoritma daļām ietilpst:

- 1) parametri, kas atkarīgi no elektrolīnijas trases. Nosegšanas koeficienta S_f vērtību ietekmē zibensstrāvas maksimumvērtība, tāpēc analīzes veikšanai piedāvāts aplūkot trīs iespējamās zibensstrāvas maksimumvērtības variantus – ar iespējamību 10 %, 50 % un 90 %, kas Latvijas teritorijā atbilst attiecīgi 7,0 kA, 16,4 kA un 38,2 kA;
- 2) elektrolīnijas spriegumizturības noteikšana. Izolētā vada izolācijas tips un biezums, kā arī izmantotie izolatori ietekmē elektrolīnijas spriegumizturību;
- 3) aizsargietaišes tipa izvēle, mainīgs paliekošais spriegums V_{IR} ;
- 4) aprēķinātais kopējais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, ko ietekmē augstāk minētie parametri;
- 5) alternatīvu analīze, kur tiek aplūkota mainīgo parametru ietekme uz aizsargietaišu izvietošanas biežumu noteicošajiem lielumiem.

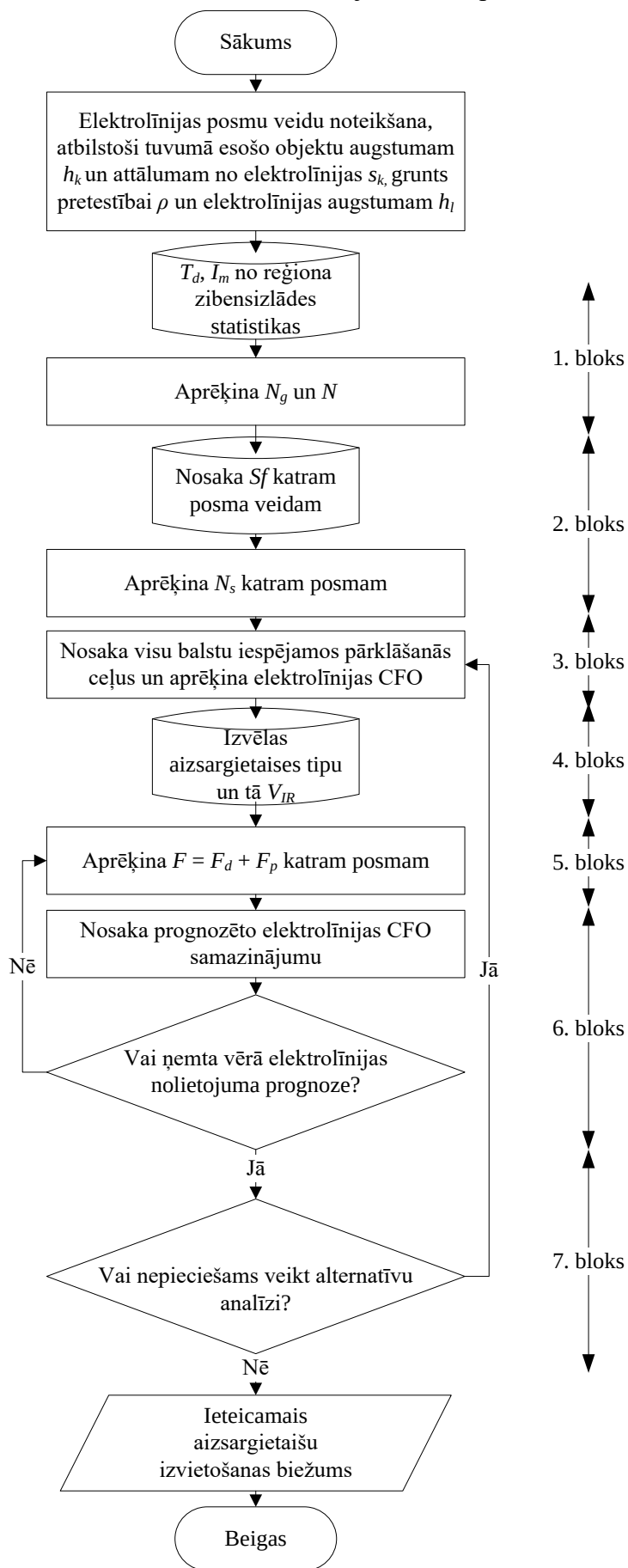
5.1. attēlā dotās blokshēmas objekta raksturojošos lielumus, kas nepieciešami elektrolīnijas posmu veidu noteikšanai, iespējams iegūt, apsekojot pārbūvējamās elektrolīnijas trasi un veicot nepieciešamos mērījumus, piemēram, grunts pretestību ρ (skat. 5.3.1. apakšnodaļu).

1. bloka lielumu aprēķināšanai lieto no autora apkopotās zibensizlādes statistikas iegūto negaisa dienu skaitu gadā, kas dots 3.5. attēlā.

2. blokā izmanto autora aprēķinātās noseģšanas koeficienta S_f vērtības 3 dažādām zibensstrāvas maksimumvērtībām un 7 dažādiem elektrolīnijas augstumiem, dotas 1. – 21. pielikumā. Noseģšanas koeficienta vērtības iespējams aprēķināt arī citām zibensstrāvas maksimumvērtībām, citiem objekta augstumiem un attālumiem no elektrolīnijas, izmantojot 3.4.2. apakšnodaļā doto metodoloģiju.

3. un 4. blokā nepieciešamo elektrolīnijas elementu izvēlei tiek pielietota izstrādātā datu bāze, ko piedāvātās metodoloģijas lietotājs var brīvi papildināt. Balstu tipu datu bāzē šobrīd ir 21 balsts, kas sakrīt ar LEK 120 [75] piedāvātajiem balstu tipiem, elektrolīnijas elementu datu

bāze dota 4.2. tabulā. Elektrolīnijas balstu tipu un elementu sākotnējās izvēles kritērijs ir zemākās izbūves relatīvās izmaksas, ar nosacījumu, ka izpildās visas tehniskās prasības.



5.1. att. Elektriskā loka aizsargietaišu izvietojanas biežuma novērtēšanas izvērstā blokshēma

5. blokā aprēķina kopējo elektrolīnijas pārklāšanās skaitu, no kura iespējams izteikt elektrolīnijas pārklāšanās biežumu. Izmantojot autora piedāvātās robežvērtības no 5.1. tabulas, nosaka ieteicamo aizsargietaišu izvietojanas biežums, ņemot vērā elektrolīnijas novecošanos un citus alternatīvos risinājumus.

6. blokā, izmantojot autora 4.11. attēlā piedāvātās elektrolīnijas nolietojanas prognozes līknes, veic aprēķinus, ņemot vērā elektrolīnijas novecošanos visā ekspluatācijas laikā.

7. blokā, izmantojot elektrolīnijas elementu un balstu tipu datu bāzes, maina elektrolīnijas elementus un balstu tipus un veic aprēķinus, lai noteiktu ieteicamo aizsargietaišu izvietojanas biežumu. Kad aprēķināts ieteicamais aizsargietaišu izvietojanas biežums ar alternatīvajiem elektrolīnijas elementiem, veic relatīvo izmaksu analīzi, lai noteiktu, vai alternatīvais risinājums ir ekonomiski izdevīgāks.

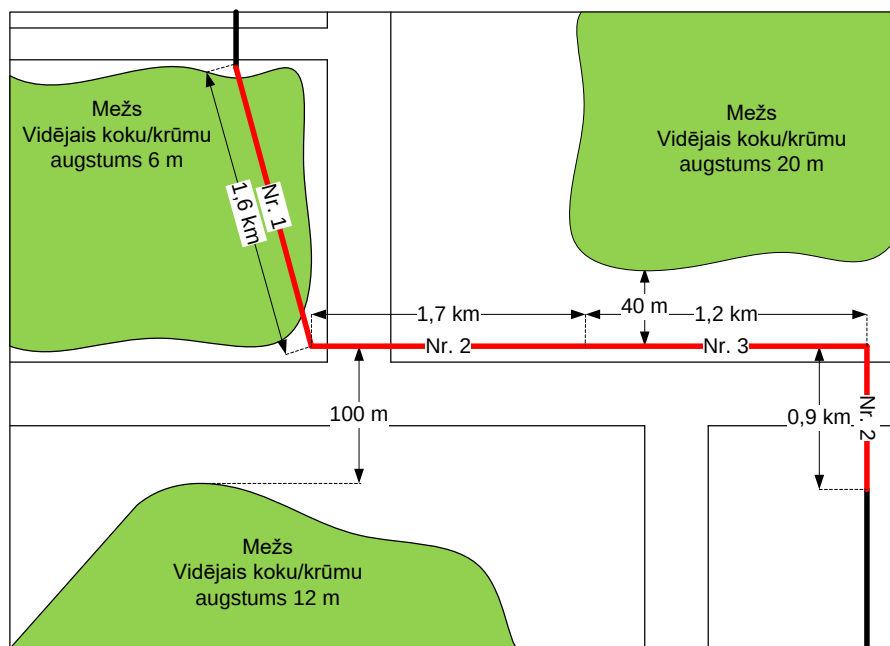
Piedāvātās metodoloģijas rezultātā tās lietotājs iegūst ieteicamo aizsargietaišu izvietojanas biežumu aplūkojamās elektrolīnijas posmam. Piedāvāto metodoloģiju iespējams pielietot gan projekta stadijā, gan ekspluatācijā esošām vīdsprieguma izolēto vadu līnijām.

5.3. Izvērstis metodoloģijas skaidrojums ar lietojuma piemēru

5.3.1. Objekta raksturojums

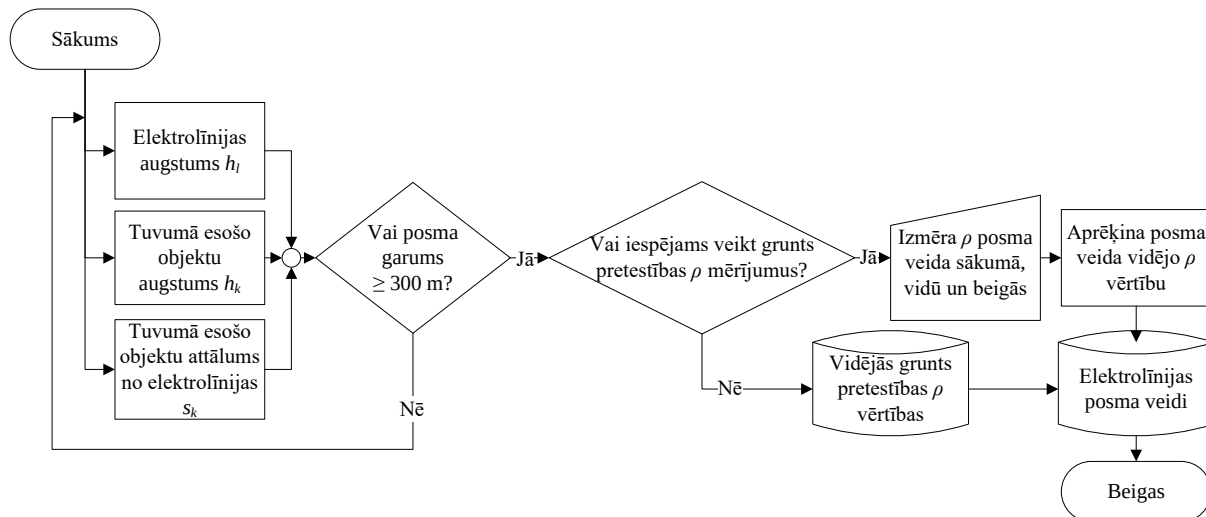
Šajā nodaļā ir aplūkots piedāvātās metodoloģijas pielietojums ar konkrētu piemēru un 5.1. attēlā dotās blokshēmas iekļauto bloku detalizētu aprakstu. 5.2. attēlā dotajā piemērā ir aplūkots Latvijai tipisks vīdsprieguma gaisvadu līnijas pārbūves posms.

Apsekojot pārbūvējamās elektrolīnijas posmu, tiek noteikts elektrolīnijas augstums h_l , atkarībā no reljefa, šķērsojamās zemes lietošanas veida un citiem faktoriem, tuvumā esošo objektu augstum h_k un attālums no elektrolīnijas s_k . Ja iespējams, tad pēc sākotnējās pārbūvējamās elektrolīnijas sadalīšanas posmu veidos, tiek izmērīta grunts pretestība posma veida sākumā, vidū un beigās un aprēķināta vidēja vērtība. Ja nav iespējams veikt grunts pretestības mērījumus, tad tiek izmantotas pieejamās datu bāzes [64], kur dotas vidējās grunts pretestības ρ vērtības atkarībā no grunts tipa.



5.2. att. Pārbūvējamās elektrolīnijas posma shematiskais attēlojums

Kad veikti sākotnēji nepieciešamie mērījumi un aprēķini, pārbūvējamo elektrolīnijas posmu sadala posmu veidos. Kopējais iespējamais posmu veidu skaits ir ļoti liels, jo piedāvātajā metodoloģijā doti 7 dažādi elektrolīnijas augstumi h_l , 7 dažādi tuvumā esošo objektu augstumi h_k , 17 dažādi tuvumā esošā objekta attālumi s_k no elektrolīnijas, kas var būt gan vienā, gan abās elektrolīnijas pusēs. Elektrolīniju sadalot posmu veidos, jāņem vērā, ka posma veida garumam jābūt vismaz 300 m, lai to varētu uzskatīt par atsevišķu veidu. Ja posma garums ir mazāks par 300 m, tad to pieskaita pēc posma veida izvēles kritērijiem tuvākajam posma veidam. Elektrolīnijas pārbūvējamā posma veidu noteikšanas blokshēma dota 5.3. attēlā.



5.3. att. Pārbūvējamās elektrolīnijas sadalīšanas dažādu veidu posmos blokshēma

5.2. attēlā doto piemēru, atbilstoši 5.3. attēlā dotajai blokshēmai iespējams sadalīt 3 dažādos posmu veidos:

1. elektrolīnijas augstums $h_l = 8$ m, tuvumā esošo koku vidējais augstums $h_k = 6$ m, elektrolīnija šķērso meža teritoriju, kur nepieciešams veikt trases tīrīšanu atbilstoši Aizsargjoslu likumam [3], kas ir 6,5 m uz katru pusi no elektrolīnijas ass, tātad $s_k = 6,5$ m. Kopējais šī veida posma garums ir 1,6 km;
2. elektrolīnijas augstums $h_l = 10$ m, elektrolīnija atrodas klajā laukā, jo tuvākie koki atrodas 100 m attālumā, tāpēc to ietekmi var neņemt vērā. Kopējais šī veida posma garums ir 2,6 km;
3. elektrolīnijas augstums $h_l = 10$ m, elektrolīnijai vienā pusē $s_k = 40$ m attālumā atrodas koki ar vidējo augstumu $h_k = 20$ m. Kopējais šī veida posma garums ir 1,2 km.

Piemērā dotais elektrolīnijas posms ir izdomāts un dabā neeksistē, tāpēc grunts pretestības mērījumus veikt nav iespējams. Apmēram 20 – 30 % no Latvijas teritorijas ir smilšaina grunts [65], tāpēc pieņemts, ka visos piemērā dotajos posmu veidos grunts pretestība $\rho = 100 \Omega\text{m}$, kas atbilst smilšainai gruntij [64]. Dotajā piemērā pieņemts, ka 20 kV elektrolīnijai barošana tiek nodrošināta no abām pusēm un tās nozīmīgums elektrosistēmā nav zināms. Objekta raksturojuma etapā jau ir veikta elektrolīnijas trases un pielietojamo elektrolīnijas balstu tipu izvēle, tātad ir noteikts arī elektrolīnijas platums b . Balstu tipu izvēle balstīta uz zemākajām balsta izbūves izmaksām, sākotnēji izvēloties balstus ar zemākajām izmaksām. 5.2. attēlā dotajā piemērā ir pielietoti 3 veidu balsti atbilstoši LEK 120 [75]: starpbalsts S20.I-HT, enkurbalsts E20.I-VP.2 un stūra enkurbalsts SE20, tātad vidējais elektrolīnijas platums $b = 0,8$ m, kas atbilst starpbalsta S20.I-HT platumam.

5.3.2. No reģiona zibensizlādes statistikas iegūstamie lielumi

Šajā nodaļā ir aplūkots sīkāk 5.1. attēla 1. bloks. Pieņemsim, ka elektrolīnija atrodas Latvijas reģionā (3.5. att.), kur $T_d = 20$ negaisa dienas gadā, tālāk aprēķina ikgadējo zibens spērienu blīvumu N_g , izmantojot (3.1) izteiksmi. Nākošais solis ir katram posma veidam aprēķināt ikgadējo zibens spērienu skaitu elektrolīnijā N , izmantojot (3.4) izteiksmi. Iegūtie rezultāti doti 5.2. tabulā.

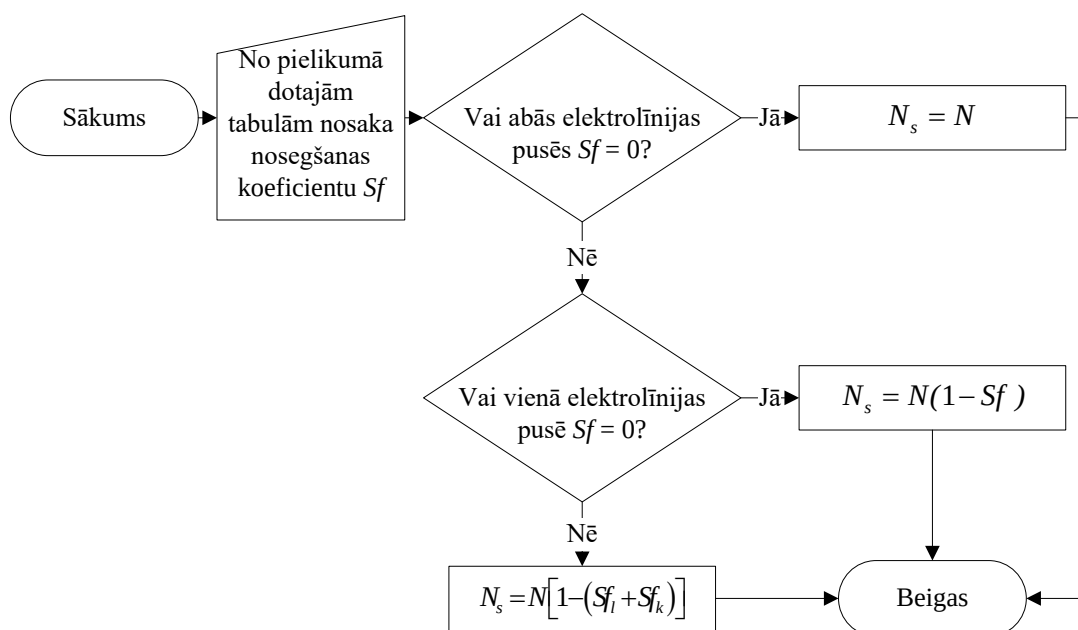
5.2. tabula

Zibens izlādes biežumu raksturojošie lielumi

Lielums	Posma veids			Piezīmes
	Nr. 1	Nr. 2	Nr.3	
h_l , m	8	10	10	No objekta raksturojuma
b , m	0,8	0,8	0,8	No objekta raksturojuma
T_d , negaisa dienas gadā	20	20	20	3.5. attēls
N_g , zibensizlādes gadā/km ²	1,692	1,692	1,692	formula (3.1)
N , zibensizlādes gadā/km	0,166	0,189	0,189	formula (3.4)

5.3.3. Parametri, kas atkarīgi no elektrolīnijas trases

Tālāk seko 2. bloks no 5.1. attēla. Zinot ikgadējo zibens spērienu skaitu elektrolīnijā N , nepieciešams apskatīt, kā elektrolīnijas trasei tuvumā esošie koki ietekmē šo lielumu. Lai to izdarītu, ir jāatrod noseģšanas koeficients S_f katram no piemēra posmu veidiem, kā arī jāaprēķina ikgadējo zibens spērienu skaits citu objektu nosegtā elektrolīnijā N_s , izmantojot (3.7) vai (3.8) izteiksmi. Ikgadējā zibens spērienu skaita citu objektu nosegtā elektrolīnijā noteikšanas blokshēma dota 5.4. attēlā.



5.4. att. Ikgadējā zibens spērienu skaita citu objektu nosegtā elektrolīnijā N_s noteikšanas blokshēma

Ikgadējo zibens spērienu skaitu citu objektu nosegtā elektrolīnijā N_s nosaka pie 90 %, 50 % un 10 % varbūtības zibensstrāvas maksimumvērtībām, kas atbilstoši Latvijas zibensizlādes

statistikai un zibensstrāvas sadalījumam (3.5) attiecīgi ir 7,0 kA, 16,4 kA un 38,2 kA. Vispārējā gadījumā pietiek lietot 50 % varbūtības zibensstrāvas maksimumvērtību, bet lielākas vai mazākas nozīmes elektrolīnijām attiecīgi 90 % vai 10 % varbūtības zibensstrāvas maksimumvērtību. Tomēr salīdzināšanas nolūkam ieteicams veikt aprēķinu visām 3 varbūtējām zibensstrāvas maksimumvērtībām. Iegūtie lielumi un rezultāti doti 5.3. tabulā.

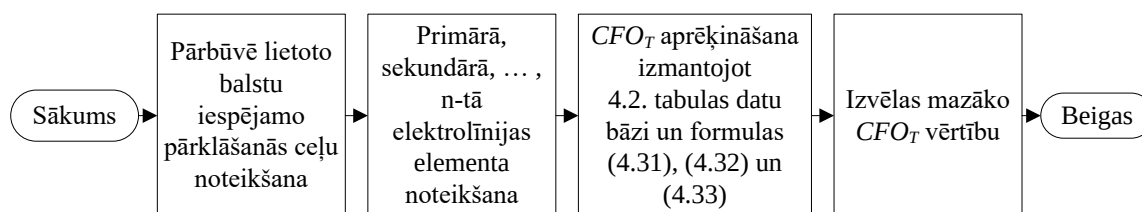
5.3. tabula

Ilggājējo zibens spērienu skaits citu objektu nosegtā elektrolīnijā

Lielums	Posma veids			Piezīmes
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	
N, zibensizlādes gadā/km	0,166	0,189	0,189	no 5.2. tabulas
$Sf_{90\%}$	0,13	0,00	0,26	no 2. un 4. pielikuma
$N_{s90\%}$, zibensizlādes gadā/km	0,126	0,189	0,134	
$Sf_{50\%}$	0,05	0,00	0,42	no 9. un 11. pielikuma
$N_{s50\%}$, zibensizlādes gadā/km	0,149	0,189	0,110	
$Sf_{10\%}$	0,00	0,00	0,56	no 16. un 18. pielikuma
$N_{s10\%}$, zibensizlādes gadā/km	0,166	0,189	0,087	

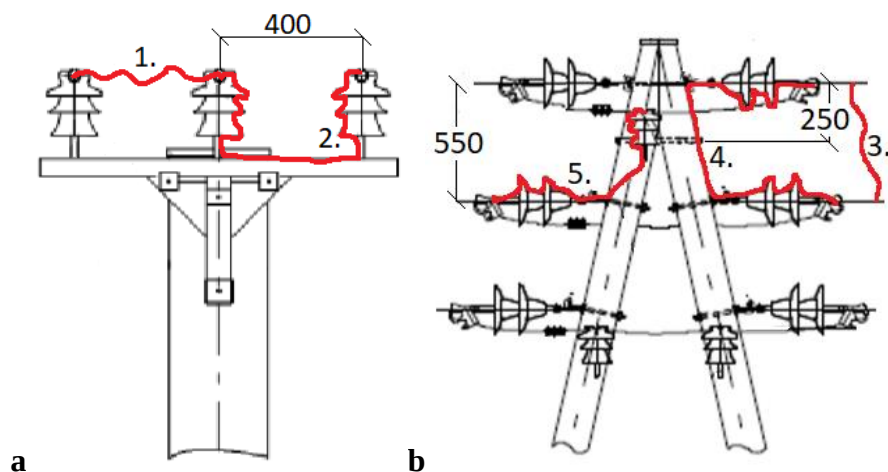
5.3.4. Elektrolīnijas spriegumizturības noteikšana

Elektrolīnijas spriegumizturības noteikšana, kas ir 3. bloks no 5.1.attēla, ir ļoti nozīmīga, nosakot optimālu zibensaizsardzības ietaišu izvietojumu. Tāpat kā balstu tipa izvēlei arī izolētā vada un izolatoru tipa sākotnējais izvēles kritērijs ir zemākās izbūves relatīvās izmaksas. Šajā piemērā starpbalstiem ir lietoti SDI30 tipa izolatori, enkurbalstiem SDI90.150 tipa izolatori, bet izolētais vads ir ņemts ar XLPE 2,3 mm izolāciju. Šo elektrolīnijas elementu CFO minimālās vērtības dotas 4.2. tabulā. Elektrolīnijai tiek kombinēti vairāki izolējošie materiāli, tāpēc ir svarīgi apkopot visus iespējamās pārklāšanās ceļus un turpmākiem aprēķiniem lietot vismazāko CFO_T vērtību, ko aprēķina, izmantojot (4.31), (4.32) un (4.33) formulas. Elektrolīnijas spriegumizturības noteikšanas blokshēma dota 5.5. attēlā. Iespējamie pārklāšanās ceļi un to CFO_T parādīti 5.6. attēlā un apkopti 5.4. tabulā.



5.5. att. Elektrolīnijas spriegumizturības noteikšanas blokshēma

Turpmākiem aprēķiniem tiek lietota elektrolīnijas izolācijas spriegumizturība $V_{CFO} = 1,5 \cdot CFO_T$. Koeficientu 1,5, lieto inducēto spriegumu un aizsargietaišu izvietojuma aprēķiniem, jo šiem spriegumiem ir impulsa ilgums ir mazāks kā zibensizlādes sprieguma standartimpulsam [58].



5.6. att. Iespējamie pārklāšanās ceļi piemērā izmantojamajos elektrolīnijas balstos

a – S20.I-HT, b – E20.I-VP.2 un SE 20

5.4. tabula

Iespējamie pārklāšanās ceļi un to CFO_T

Nr.	Balsta tips [75]	No	Uz	Pārklāšanās ceļš (kV)	CFO_T , kV
1.	S20.I-HT	Malējā fāze	Vidējā fāze	Izolētais vads (92) – Gaiss (108) – Izolētais vads (18,4)	218,4
2.	S20.I-HT	Malējā fāze	Vidējā fāze	Izolētais vads (92) – Izolators (56,3) – Metāla traversa – Izolators (25) – Izolētais vads (18,4)	191,7
3.	E20.I-VP.2 un SE20	Augšējā fāze	Vidējā fāze	Izolētais vads (92) – Gaiss (148,5) – Izolētais vads (18,4)	258,9
4.	E20.I-VP.2 un SE 20	Augšējā fāze	Vidējā fāze	Izolētais vads (92) – Piekarizolators (56,7) – Koka balsts (36,3) – Piekarizolators (25,2) – Izolētais vads (18,4)	228,6
5.	E20.I-VP.2 un SE 20	Augšējā fāze	Vidējā fāze	Izolētais vads (92) – Papildizolators (56,3) – Koka balsts (19,8) – Piekarizolators (25,2) – Izolētais vads (18,4)	211,7

No 5.4. tabulas redzams, ka mazākais kopējais elektrolīnijas $CFO_T = 191,7$ kV, kas ir starpbalstam S20.I-HT, notiekot pārklāšanai starp malējo un vidējo fāzes vadu, pieņemot, ka primārā izolācija ir izolētajam vadam, sekundārā izolatoram, trešā otram izolatoram un ceturtā otram izolētajam vadam.

5.3.5. Aizsargietais tips izvēle

Aizsargietais tips izvēle ir 4. bloks no 5.1. attēla. Tāpat kā citiem elektrolīnijas elementiem arī aizsargietaišu primārais izvēles kritērijs ir relatīvās izbūves izmaksas. No autora

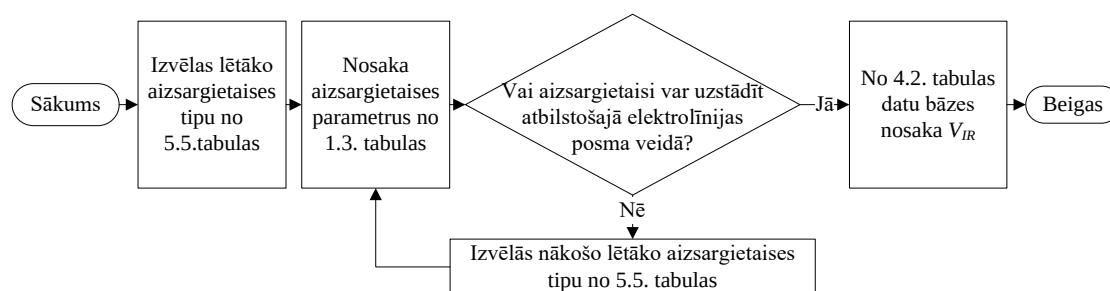
apkopotajām 2018. gadā norādītajām ražotāja [112] cenām iegūtas aizsargietaišu izbūves vidējās relatīvās izmaksas attiecībā pret lētāko aizsargietaisi. Vidējās aizsargietaišu izbūves relatīvās izmaksas dotas 5.5. tabulā.

5.5. tabula

Elektriskā loka aizsargietaišu izmaksas relatīvajās vienībās

Aizsargietais tips	Izbūves relatīvās izmaksas
APD	1,0
PAD	1,4
CLAH	7,3

Ņemot vērā elektrolīnijas parametrus un 1.3. tabulā doto aizsargietaišu salīdzinājumu, un 5.5. tabulā dotās izmaksas, izvēlas aizsargietaisi. Aizsargietaisi izvēles blokshēma dota 5.7. attēlā.



5.7. att. Aizsargietaisi izvēles blokshēma

Elektrolīnijas aizsardzībai no zibens spēriena radīta elektriskā loka visos piemēra elektrolīnijas posmu veidos tiek izvēlēta PAD tipa aizsargietaisi, kur attālums starp dzirksteļspraugas elektrodiem 20 kV vīdsprieguma elektrolīnijām ir 150 mm [112], kam atbilst $V_{IR} = 180$ kV (no 4.2. tabulas) liels paliekošais vai elektriskā loka veidošanās spriegums. Lētākā APD tipa aizsargietaisi netika izvēlēti, jo E20.I-VP.2 un SE 20 tipa balstos ir piekarizolatori, kuriem no 1.3. tabulas dotajiem parametriem nevar uzstādīt APD tipa aizsargietaisi.

5.3.6. Elektrolīnijas pārklāšanās skaita aprēķins

Tālāk seko elektrolīnijas pārklāšanās skaita aprēķins, kas ir 5. bloks no 5.1. attēla, un tas ir arī pirmais kritērijs aizsargietaišu izvietošanas biežuma noteikšanai. Zibensizlādes radītu pārspriegumu ierosināto elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F var aprēķināt, ņemot vērā tiešas un netiešas zibensizlādes radīto pārklāšanās skaitu, ko aprēķina ar (4.1) formulu.

Sākumā nepieciešams aprēķināt netiešas zibensizlādes inducētā pārsprieguma radīto elektrotīkla pārklāšanās skaitu F_p , ko aprēķina pēc (4.4) formulas. Lai aprēķinātu F_d , nepieciešams aprēķināt attālumus y_{min} un y_{max} . Attālumu no elektrolīnijas, līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem y_{min} aprēķina, izmantojot formulu (4.5). Attālumu no elektrolīnijas, līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, y_{max} aprēķina no (4.13) izteiksmes, izsakot attālumu no zibensizlādes vietas y

$$y_{max} = Z_0 \cdot \frac{k_v \cdot h_{ef} \cdot I_m}{V_{CFO}}, \quad (5.1)$$

kur V_{CFO} – elektrolīnijas izolācijas spriegumizturība, kV;

h_{ef} – efektīvais augstums, m (4.17);

I_m – zibensstrāvas maksimumvērtība, kA;

Z_0 – viļņa īpatpretestība, Ω (4.14);

k_v – zibensizlādes kustības ātrumu raksturojošs koeficients (4.15).

Tālāk nepieciešams aprēķināt tiešas zibensizlādes radīto elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F_d , ko vispārīgi aprēķina, izmantojot (4.2) formulu, tomēr, kā iepriekš tika noskaidrots, tad vides sprieguma līniju salīdzinoši zemās spriegumizturības dēļ var pieņemt, ka $F_d \approx N_s$. Lai aprēķinātu F_d , nepieciešams, izmantojot (1.2) formulu, aprēķināt strāvas maksimumvērtību I_{ml} , kas nepieciešama, lai notiktu elektrolīnijas pārklāšanās. Ja ir uzstādīta CLAH aizsargietaisē, tad nepieciešams aprēķināt arī I_{mb} , izmantojot (1.3) formulu. Aprēķins jāveic katram posma veidam un varbūtējās zibensstrāvas maksimumvērtības lielumam atsevišķi. Kad aprēķināta I_{ml} un I_{mb} , aprēķina šīs strāvas rašanās varbūtību ar (3.5) sadalījuma funkciju. Tiešas zibensizlādes radīto elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F_d aprēķina, katra posma N_s pareizinot ar iegūto strāvas rašanās varbūtību, izmantojot sakarību

$$F_{dj} = N_s \cdot \left(\frac{P_{ml}}{j} + \frac{P_{mb}}{2j} + \frac{2j-3}{2j} \right), \quad (5.2)$$

kur F_{dj} – tiešas zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, pārklāšanās gadā/km;

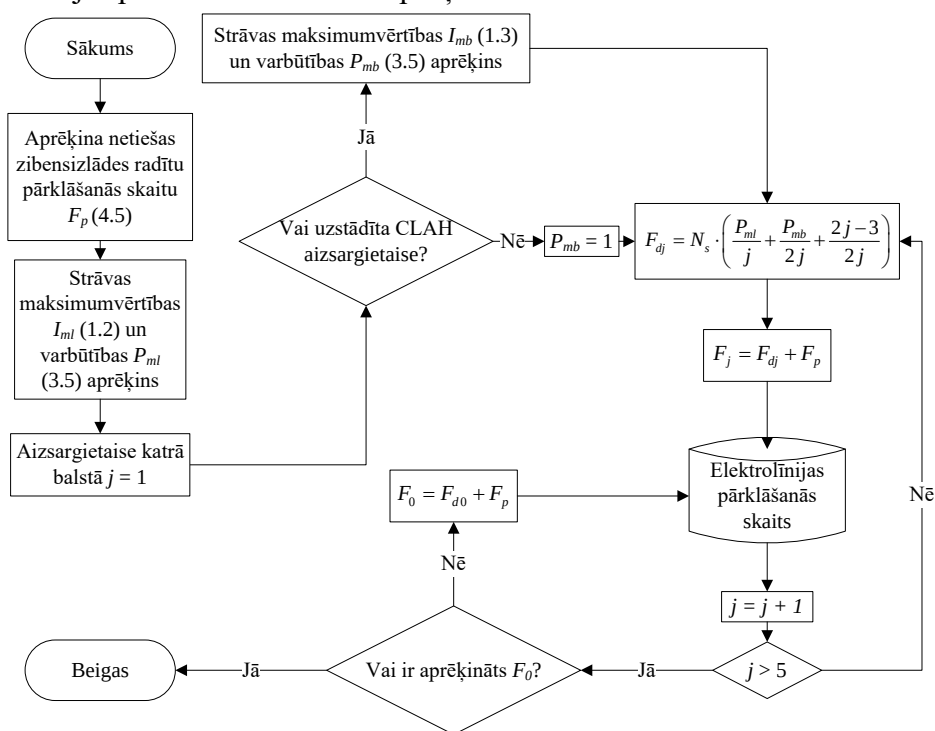
N_s – ikgadējo zibens spērienu skaits citu objektu nosegtā elektrolīnijā, zibensizlādes gadā/km;

P_{ml} – varbūtība, ka zibensstrāvas maksimumvērtība pārsniegs aprēķināto strāvas maksimumvērtību elektrolīnijā;

P_{mb} – varbūtība, ka zibensstrāvas maksimumvērtība pārsniegs aprēķināto strāvas maksimumvērtību elektrolīnijas balstā;

j – laidumu skaits starp aizsargietaisēm.

Elektrolīnijas pārklāšanās skaita F aprēķina blokshēma dota 5.8. attēlā.



5.8. att. Elektrolīnijas pārklāšanās skaita aprēķina blokshēma

Gadījumā bez aizsargietaisēm $F_{d0} = N_s$. Aprēķinos pieņemts, ka $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, $v = 1,2 \cdot 10^8$ m/s, $t_m = 2 \mu s$ [58] un $Z_s = 480 \Omega$ [95], [110]. Vidējais laiduma garums pieņemts $L = 60$ m.

Aprēķinātais elektrolīnijas pārklāšanās skaits no tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem atkarībā no zibensstrāvas maksimumvērtības I_m rašanās varbūtības un posma veida apkopots 5.6. tabulā.

5.6. tabula

Elektrolīnijas pārklāšanās skaits no tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem

Lielums	Zibensstrāvas maksimumvērtības I_m rašanās varbūtība								
	90%			50%			10%		
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
F_p , pārkl. gadā/km	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I_{ml} , kA	4,481	4,481	4,481	4,481	4,481	4,481	4,481	4,481	4,481
P_{ml}	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
I_{mb} , kA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{mb}	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_{d1} , pārkl. gadā/km	0,119	0,183	0,135	0,144	0,183	0,106	0,160	0,183	0,081
F_{d2} , pārkl. gadā/km	0,121	0,186	0,138	0,147	0,186	0,108	0,163	0,186	0,082
F_{d3} , pārkl. gadā/km	0,121	0,187	0,139	0,148	0,187	0,109	0,164	0,187	0,082
F_{d4} , pārkl. gadā/km	0,122	0,188	0,139	0,148	0,188	0,109	0,164	0,188	0,083
F_{d5} , pārkl. gadā/km	0,122	0,188	0,139	0,148	0,188	0,109	0,165	0,188	0,083
F_{d0} , pārkl. gadā/km	0,123	0,189	0,140	0,149	0,189	0,110	0,166	0,189	0,083

No 5.6. tabulas redzams, ka nevienā no posmu veidiem pie šādas elektrolīnijas spriegumizturības, elektrolīnijas augstuma un grunts pretestības netiešas zibensizlādes radīts pārspriegums nerada elektrolīnijas pārklāšanos, un I_{ml} vērtība sakrīt ar 2.3.3. apakšnodaļā aprakstītā datorsimulācijas modeļa iegūto. Ar (4.1) formulu tiek aprēķināts kopējais elektrolīnijas pārklāšanās skaits F , no kura iespējams aprēķināt elektrolīnijas pārklāšanās biežumu

$$\zeta = \frac{1}{F}, \quad (5.3)$$

kur ζ – elektrolīnijas pārklāšanās biežums, gadi/km;

F – kopējais zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, pārklāšanās gadā/km.

Piemērā aplūkotā elektrolīnijas pārbūves posma kopējais elektrolīnijas pārklāšanās skaits F un elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ apkopots 5.7. tabulā.

No 5.7. tabulas iegūstam, ka ar 10 % un 50 % zibensstrāvas varbūtību posma veidā Nr. 1 aizsargietais ieteicams izvietot katrā 3. balstā, posma veidā Nr. 2 – katrā 2. balstā, bet posma veidā Nr. 3 – katrā 4. balstā. Aplūkojot lielumus, kas iegūti ar 90 % varbūtības zibensstrāvas maksimumvērtību, kas atbilst lielākas nozīmes elektrolīnijai, tad aizsargietaišu izvietojanas biežums nemainās posma viedos Nr. 1 un 2, bet posma veidā Nr. 3 aizsargietais ieteicams izvietot katrā 3. balstā. Posma veidam Nr. 1 nelielā koku augstuma h_k un attāluma s_k dēļ ar 10 %

zibensstrāvas varbūtību pieaug ζ lielums, kā rezultātā mazākas nozīmes elektrolīnijai atsevišķos gadījumos var būt ieteicams aizsargietais izvietot biežāk kā lielākas nozīmes elektrolīnijai.

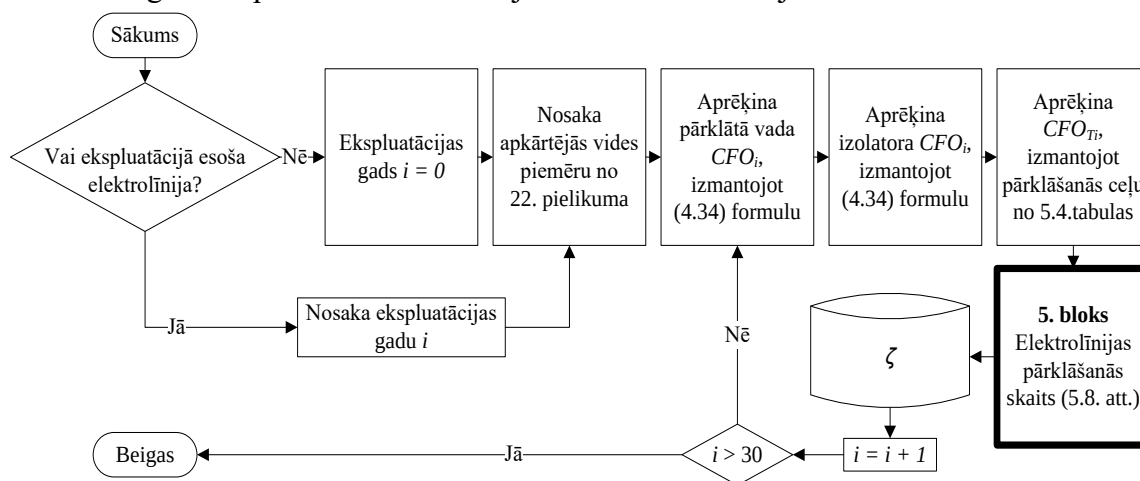
5.7. tabula

Kopējais elektrolīnijas pārklāšanās skaits un elektrolīnijas pārklāšanās biežums

		Laidumi starp aizsargietaisēm	F, pārklāšanās gadā/km			ζ , gadi/km		
			Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Zibensstrāvas maksimumvērtības I_m rašanās	90%	1	0,119	0,183	0,135	8,4	5,5	7,4
		2	0,121	0,186	0,138	8,3	5,4	7,3
		3	0,121	0,187	0,139	8,2	5,3	7,2
		4	0,122	0,188	0,139	8,2	5,3	7,2
		5	0,122	0,188	0,139	8,2	5,3	7,2
		nav aizsargietais	0,123	0,189	0,140	8,2	5,3	7,1
	50%	1	0,144	0,183	0,106	6,9	5,5	9,4
		2	0,147	0,186	0,108	6,8	5,4	9,3
		3	0,148	0,187	0,109	6,8	5,3	9,2
		4	0,148	0,188	0,109	6,8	5,3	9,2
		5	0,148	0,188	0,109	6,7	5,3	9,2
		nav aizsargietais	0,149	0,189	0,110	6,7	5,3	9,1
	10%	1	0,160	0,183	0,081	6,2	5,5	12,4
		2	0,163	0,186	0,082	6,1	5,4	12,2
		3	0,164	0,187	0,082	6,1	5,3	12,1
		4	0,164	0,188	0,083	6,1	5,3	12,1
		5	0,165	0,188	0,083	6,1	5,3	12,1
		nav aizsargietais	0,166	0,189	0,083	6,0	5,3	12,0

5.3.7. Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekme

Iepriekš aprēķinātie lielumi atbilst jaunai elektrolīnijai, tomēr elektrolīnijas ekspluatācijas laikā elektrolīnijas spriegumizturība samazinās, kā tas tika aplūkots 4.6. nodaļā. Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekme ir otrais aizsargietaišu izvietojuma biežuma noteikšanas kritērijs (6. bloks 5.1. attēlā). Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekmes uz aizsargietaišu izvietojuma biežumu novērtēšanas blokshēma dota 5.9. attēlā. Elektrolīnijas nolietojuma ietekmi iespējams aplūkot arī ekspluatācijā esošai izolēto vadu līnijai, ja ir zināms tās uzstādīšanas gads un pielietoto elektrolīnijas elementu sākotnējais CFO.



5.9. att. Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekmes novērtēšanas blokshēma

Elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas CFO_T , kas aprēķināta, izmantojot (4.34) formulu, apkopota 5.8. tabulā. Piemērā apskatītās elektrolīnijās atrašanās vieta, kas ir tuvumā autoceļam, no 22. pielikuma atbilst apkārtējās vides piemēram E2 jeb necīgam piesārņojumam.

5.8. tabula

Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas CFO_T

i, gadi	0	5	10	15	20	25	30
CFO_{Ti}, kV	186,1	182,9	181,3	179,6	178,0	157,0	146,5

Nākošais solis ir aprēķināt elektrolīnijas kopējo pārklāšanās skaitu, izmantojot 5.8. attēlā doto blokshēmu un elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ . Aprēķini tiek veikti katram pārbūvējamās elektrolīnijas posma veidam un varbūtējai zibensstrāvas maksimumvērtībai. Elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz ζ pārbūvējamās elektrolīnijas posma veidiem Nr. 1, 2 un 3 apkopota attiecīgi 5.9., 5.10. un 5.11. tabulā.

5.9. tabula

Pārbūvējamās elektrolīnijas posma veida Nr. 1 nolietojuma ietekme uz ζ

		Laidumi starp aizsargietaisēm	ζ, gadi/km						
			0	5	10	15	20	25	30
Zibensstrāvas maksimumvērtības I_m rašanās varbūtība	90%	1	8,4	8,4	8,3	8,3	8,3	4,1	2,6
		2	8,3	8,3	8,2	8,2	8,2	4,1	2,6
		3	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	4,1	2,6
		4	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	4,1	2,6
		5	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	4,1	2,6
		nav aizsargietaises	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	4,1	2,6
	50%	1	6,9	6,9	6,9	6,8	6,8	3,7	2,4
		2	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	3,7	2,4
		3	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	3,7	2,4
		4	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	3,7	2,4
		5	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	3,7	2,4
		nav aizsargietaises	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	3,7	2,4
	10%	1	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	3,5	2,3
		2	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	3,5	2,3
		3	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	3,5	2,3
		4	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	3,5	2,3
		5	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	3,5	2,3
		nav aizsargietaises	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	3,5	2,3

Posma veidam Nr. 1, ņemot vērā elektrolīnijas nolietošanās prognozi no 5.9. tabulas, neatkarīgi uz varbūtējās zibensstrāvas maksimumvērtības aizsargietaisēs jāizvieto katrā 3. balstā. Redzams, ka pēc ekspluatācijas 20. gada – katrā 2. balstā, bet pēc ekspluatācijas 25. gada prognozējama elektrolīnijas pārklāšanās uz kilometru katrus 2 - 3 gadus, tāpēc būtu jāsāk plānot elektrolīnijas atjaunošanas darbi vai aizsargietaisēs uzstādīšana katrā balstā.

5.10. tabula

Pārbūvējamās elektrolīnijas posma veida Nr. 2 nolietojuma ietekme uz ζ

		Laidumi starp aizsargietaisēm	ζ, gadi/km						
			0	5	10	15	20	25	30
Zibensstrāvas maksimumvērtības I_m rašanās varbūtība	90%	1	5,4	5,4	5,0	4,5	4,1	1,9	1,4
		2	5,4	5,3	4,9	4,5	4,1	1,9	1,4
		3	5,3	5,3	4,9	4,5	4,1	1,8	1,4
		4	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
		5	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
		nav aizsargietaises	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
	50%	1	5,4	5,4	5,0	4,5	4,1	1,9	1,4
		2	5,4	5,3	4,9	4,5	4,1	1,9	1,4
		3	5,3	5,3	4,9	4,5	4,1	1,8	1,4
		4	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
		5	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
		nav aizsargietaises	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
	10%	1	5,4	5,4	5,0	4,5	4,1	1,9	1,4
		2	5,4	5,3	4,9	4,5	4,1	1,9	1,4
		3	5,3	5,3	4,9	4,5	4,1	1,8	1,4
		4	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
		5	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
		nav aizsargietaises	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4

5.11. tabula

Pārbūvējamās elektrolīnijas posma veida Nr. 3 nolietojuma ietekme uz ζ

		Laidumi starp aizsargietaisēm	ζ, gadi/km						
			0	5	10	15	20	25	30
Zibensstrāvas maksimumvērtības I_m rašanās varbūtība	90%	1	7,3	7,3	6,5	5,8	5,2	2,0	1,5
		2	7,2	7,2	6,5	5,7	5,1	2,0	1,5
		3	7,2	7,2	6,4	5,7	5,1	2,0	1,5
		4	7,2	7,2	6,4	5,7	5,1	2,0	1,5
		5	7,2	7,2	6,4	5,7	5,1	2,0	1,5
		nav aizsargietaises	7,1	7,1	6,4	5,7	5,1	2,0	1,5
	50%	1	9,4	9,3	8,1	6,9	6,1	2,2	1,6
		2	9,2	9,2	8,0	6,9	6,1	2,2	1,6
		3	9,2	9,2	8,0	6,9	6,0	2,2	1,6
		4	9,2	9,2	8,0	6,9	6,0	2,2	1,6
		5	9,2	9,1	8,0	6,9	6,0	2,2	1,6
		nav aizsargietaises	9,1	9,1	7,9	6,8	6,0	2,2	1,6
	10%	1	12,3	12,3	10,3	8,5	7,3	2,3	1,6
		2	12,2	12,2	10,2	8,4	7,2	2,3	1,6
		3	12,1	12,1	10,1	8,4	7,2	2,3	1,6
		4	12,1	12,1	10,1	8,4	7,2	2,3	1,6
		5	12,1	12,1	10,1	8,4	7,2	2,3	1,6
		nav aizsargietaises	12,0	12,0	10,1	8,3	7,2	2,3	1,6

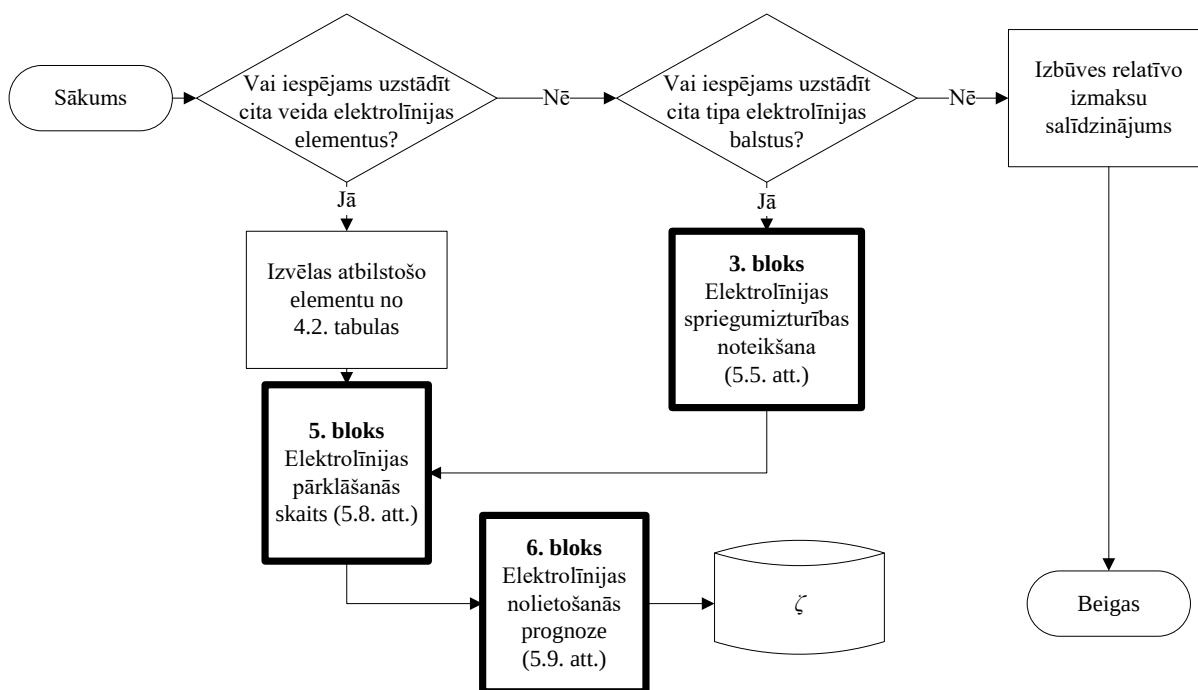
Posma veidam Nr. 2 no 5.10. tabulas rezultātiem redzams, ka neatkarīgi no varbūtējās zibensstrāvas maksimumvērtības pēc 20. ekspluatācijas gada aizsargietais nepieciešams uzstādīt katrā balstā.

No 5.11. tabulas redzams, ka posma veidam Nr. 3 neatkarīgi no varbūtējās zibensstrāvas maksimumvērtības pēc 20. ekspluatācijas gada ieteicams plānot elektrolīnijas atjaunošanas darbus vai aizsargietais uzstādīšanu katrā balstā. Ar 90 % zibensstrāvas maksimumvērtības varbūtību līdz ekspluatācijas 10. gadam aizsargietais ieteicams uzstādīt katrā 3. balstā, līdz 20. ekspluatācijas gadam – katrā 2. balstā. Ar 50 % zibensstrāvas maksimumvērtības varbūtību līdz ekspluatācijas 5. gadam aizsargietais ieteicams uzstādīt katrā 4. balstā, bet līdz ekspluatācijas 20. gadam – katrā 3. balstā. Ar 10 % zibensstrāvas maksimumvērtības varbūtību jeb mazākas nozīmes elektrolīnijai līdz ekspluatācijas 10. gadam aizsargietais ieteicams uzstādīt katrā 4. balstā, bet līdz 20. ekspluatācijas gadam – katrā 3. balstā.

Posma veidiem Nr. 2 un 3 ζ samazinājums pēc 5. ekspluatācijas gada skaidrojams ar to, ka neliels mehānisks izolētā vada izolācijas bojājums un apkārtējās vides ietekme uz izolatoru, kas samazina piemērā aplūkotās elektrolīnijas CFO_T par 11 % var aplūkotās elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F palielināt par 10-14 %, 15 % samazinājums – par 32-45 %, bet 40 % samazinājums – 3-7 reizes. Šis kopējais pārklāšanās skaita pieaugums saistīts ar netiešas zibensizlādes radītas pārklāšanās pieaugumu, samazinoties elektrolīnijas CFO_T .

5.3.8. Alternatīvu analīze

Sākotnējie aprēķini rāda, ka piemērā aplūkotajai elektrolīnijai, lai samazinātu kopējo pārklāšanās skaitu F un aizsargietaišu skaitu, ir nepieciešams palielināt elektrolīnijas CFO_T , tāpēc nepieciešama alternatīvu analīze, kas ir trešais aizsargietaišu izvietojuma biežuma noteikšanas kritērijs un pēdējais – 7. bloks 5.1. attēlā. Alternatīvu analīzes blokshēma dota 5.10. attēlā.



5.10. att. Alternatīvu analīzes blokshēma

Pirmais solis ir aplūkot elektrolīnijas elementu nomaiņas ietekmi uz aizsargietaišu izvietojuma biežumu. No izvēlēto elektrolīnijas balstu tipa un 4.2. tabulas redzams, ka

alternatīva izolatoriem, kas palielinātu CFO_T nav pieejama, tomēr ir iespējams izvēlēties izolēto vadu ar XLPE 3,1 mm ($CFO = 130$ kV) un HDPE 3,9 mm ($CFO = 221$ kV) izolāciju un alternatīvo minimālo CFO_T no 5.4. tabulas attiecīgi 237,3 kV un 346,5 kV. Izmantotais aizsargietais tips ir PAD ar 150 mm attālumu starp dzirksteļspraugas elektrodiem. Iegūtais aizsargietaišu izvietojuma biežums dots 5.12. tabulā.

5.12. tabula

Aizsargietaišu izbūves biežuma salīdzinājums atšķirīgiem izolēto vadu izolācijas tipiem

		Izolācijas tips	Gadi ekspluatācijā						
			0	5	10	15	20	25	30
			Laidumi starp aizsargietaisēm						
Posma veids	Nr. 1	XLPE 2,1 mm	3	3	3	3	3	2	1
		XLPE 3,1 mm	3	3	3	3	3	3	3
		HDPE 3,9 mm	3	3	3	3	3	3	3
	Nr. 2	XLPE 2,1 mm	2	2	2	2	2	1	1
		XLPE 3,1 mm	2	2	2	2	2	2	2
		HDPE 3,9 mm	3	3	3	3	3	2	2
	Nr. 3	XLPE 2,1 mm	4	4	3	3	3	1	1
		XLPE 3,1 mm	4	4	4	4	4	4	2
		HDPE 3,9 mm	4	4	4	4	4	4	4

No 5.12. tabulas redzams, ka izolētā vada nomaiņa pret XLPE 3,1 mm vadu ļauj posma veidiem Nr. 1 un 2 visā ekspluatācijas periodā aizsargietais uzstādīt attiecīgi katrā 3. un 2. balstā, bet posma veidā Nr. 3 tikai pēc 25. ekspluatācijas gada aizsargietaisi ieteicams uzstādīt katrā 2. balstā, nevis katrā 4. balstā, kā tas ir līdz 25. ekspluatācijas gadam. Izolētā vada nomaiņa pret HDPE 3,9 mm vadu posma veidiem Nr. 1 un 3 visā ekspluatācijas laikā aizsargietaisi izvietot attiecīgi katrā 3. un 4. balstā, bet posma veidā Nr. 2 līdz pat 25. ekspluatācijas gadam – katrā 3. balstā, bet pēc 25. ekspluatācijas gada – katrā 2. balstā.

Ar 10 % varbūtējo zibensstrāvas maksimumvērtību iegūtie rezultāti sakrīt ar 50 % varbūtības zibensstrāvas maksimumvērtību, bet 90 % varbūtības zibensstrāvai posma veidam Nr. 3 aizsargietaisi ieteicams uzstādīt katrā 3. balstā, pārējos posma veidos rezultāti sakrīt ar 50 % un 10 % varbūtības zibensstrāvu iegūtajiem rezultātiem. Ja ir zināmas alternatīvo vadu relatīvās izmaksas iespējams salīdzināt elektrolīnijas izbūves kopējās relatīvās izmaksas visam ekspluatācijas laikam.

Pēdējais alternatīvu analīzes etaps ir citu elektrolīnijas balstu tipa salīdzināšana. Lielākais īpatsvars dotajā piemērā ir starpbalstiem S20.I-HT, tāpēc apskatīsim, kā to nomaiņa pret S20.I-VT vai S20.I-VTs tipa balstiem [75] ietekmē aizsargietaišu izvietojuma biežumu. No 5.6. attēlā dotā blokshēmas un izmantojot izolēto vadu ar XLPE 2,3 mm izolāciju, iegūstam S20.I-VT un S20.I-VTs tipa balstu elektrolīnijas kopējo spriegumizturību CFO_T , kas dažādiem pārklāšanās ceļiem dota 5.13. tabulā.

Alternatīvo elektrolīnijas starpbalstu iespējamie pārklāšanās ceļi un to CFO_T

Nr.	Balsta tips [75]	No	Uz	Pārklāšanās ceļš (kV)	CFO_T , kV
1.	S20.I-VT un S20.I-VTs	Augšējā fāze	Vidējā fāze	Izolētais vads (92) – Gaiss (148,5) – Izolētais vads (18,4)	258,9
2.	S20.I-VT	Augšējā fāze	Vidējā fāze	Izolētais vads (92) – Izolators (56,3) – Koka balsts (36,3) – Izolators (25) – Izolētais vads (18,4)	228,0
3.	S20.I-VTs	Augšējā fāze	Vidējā fāze	Izolētais vads (92) – Izolators (56,3) – Metāla traversa – Izolators (25) – Izolētais vads (18,4)	191,7

Salīdzinot 5.13. tabulas un 5.4. tabulas pārklāšanās ceļu CFO_T , redzams, ka S20.I-VTs balsta tipa izmantošana aizsargietaišu izvietošanas biežumu neietekmē, jo tā minimālais CFO_T ir vienāds ar sākotnēji izmantotā balsta S20.I-HT CFO_T . S20.I-VT balsta minimālais $CFO_T = 228$ kV, kas ir lielāks 5.4. tabulas 5. pārklāšanās ceļa $CFO_T = 211,7$ kV balstiem E20.I-VP.2 un SE 20. Veicot aprēķinus atbilstoši 5.8. un 5.9. attēlā dotajām blokshēmām ar $CFO_T = 211,7$ kV un PAD (150 mm) tipa aizsargietaisi, iegūtie rezultāti apkopoti 5.14. tabulā. Lai saglabātu vienādu elektrolīnijas gabarītu pret zemi, posma veidam Nr. 1 elektrolīnijas augstums $h_l = 9$ m, bet Nr. 2 un 3 posmiem $h_l = 11$ m.

No 5.14. tabulas redzams, ka starpbalsta nomaiņa pret S20.I-VT ar 50 % varbūtības zibensstrāvas maksimumvērtību posma veidam Nr. 1 aizsargietaisi var uzstādīt katrā 3. balstā, bet pēc 25. ekspluatācijas gada katrā 2. balstā, posma veidam Nr. 2 – attiecīgi katrā 2. balstā, bet pēc 25. ekspluatācijas gadā katrā balstā vai plānot elektrolīnijas atjaunošanas darbus, posma veidam Nr. 3 – katrā 4. balstā, pēc 25. ekspluatācijas gada katrā 3. balstā, bet pēc 30. ekspluatācijas gada katrā 2. balstā. Ar 90 % varbūtības zibensstrāvas maksimumvērtību, nomainot starpbalsta tipu, posma veidam Nr. 1 aizsargietaisi ieteicams uzstādīt katrā 3. balstā visā ekspluatācijas periodā, posma veidam tikai pēc 25. ekspluatācijas gada ieteicams plānot elektrolīnijas atjaunošanas darbus vai aizsargietaisies uzstādīšanu katrā balstā, posma veidam Nr. 3 pēc 20. ekspluatācijas gada aizsargietaisies jāuzstāda katrā 2. balstā, bet pēc 25. ekspluatācijas gada – katrā balstā. Starpbalsta nomaiņa mazākas nozīmes elektrolīnijai posma veidam Nr. 1 palielina aizsargietaišu izvietošanas biežumu, kas visā ekspluatācijas laikā ir katrs 2. balsts. Pārējos posmu veidos starpbalsta nomaiņa ļauj ilgāk nemainīt aizsargietaišu izvietošanas biežumu. Ja ir zināmas alternatīvo balstu relatīvās izbūves izmaksas, iespējams salīdzināt elektrolīnijas izbūves kopējās relatīvās izmaksas visam ekspluatācijas laikam.

Aizsargietaišu izbūves biežuma salīdzinājums, atšķirīgiem starpbalstu tiptiem

			Starpbalsta tips	Gadi ekspluatācijā						
				0	5	10	15	20	25	30
				Laidumi starp aizsargietaisēm						
Zibensstrāvas maksimumvērtības I_m rašanās varbūtība	90 %	Nr. 1	S20.I-HT	3	3	3	3	3	2	1
			S20.I-VT	3	3	3	3	3	3	3
		Nr. 2	S20.I-HT	2	2	2	2	2	1	1
			S20.I-VT	2	2	2	2	2	2	1
		Nr. 3	S20.I-HT	3	3	3	2	2	1	1
			S20.I-VT	3	3	3	3	3	2	1
	50 %	Nr. 1	S20.I-HT	3	3	3	3	3	2	1
			S20.I-VT	3	3	3	3	3	3	2
		Nr. 2	S20.I-HT	2	2	2	2	2	1	1
			S20.I-VT	2	2	2	2	2	2	1
		Nr. 3	S20.I-HT	4	4	3	3	3	1	1
			S20.I-VT	4	4	4	4	3	2	2
	10 %	Nr. 1	S20.I-HT	3	3	3	3	3	2	1
			S20.I-VT	2	2	2	2	2	2	2
		Nr. 2	S20.I-HT	2	2	2	2	2	1	1
			S20.I-VT	2	2	2	2	2	2	1
		Nr. 3	S20.I-HT	4	4	4	3	3	1	1
			S20.I-VT	4	4	4	4	4	3	2

5.3.9. Ar metodoloģiju iegūtais ieteicamais aizsargietaišu izvietojuma biežums

Aplūkotā piemēra pārbūvējamās elektrolīnijas nozīmīgums elektrosistēmā nav zināms, tāpēc aizsargietaišu izvietojuma biežuma noteikšanai ieteicams lietot 50 % zibensstrāvas maksimumvērtības rašanās varbūtības rezultātus.

No 5.7. tabulas rezultātiem redzams, ka PAD tipa aizsargietaisi ar 150 mm attālumu starp elektrodiem posma veidā Nr. 1 ieteicams uzstādīt katrā 3. balstā, posma veidā Nr. 2 – katrā 2. balstā, bet posma veidā Nr. 3 – katrā 4. balstā. Ņemot vērā elektrolīnijas nolietojumu prognozi no 5.9., 5.10. un 5.11. tabulām, posma veidiem Nr. 1 un 3 aizsargietaisies ieteicams uzstādīt katrā 3. balstā, bet posma veidam Nr. 2 – katrā 2. balstā un pēc 20. ekspluatācijas gada visos posmu veidos plānot elektrolīnijas atjaunošanas darbus vai aizsargietaisies uzstādīšanu katrā balstā.

Rezultātu salīdzināšanas nolūkos ir apskatīts variants, ja būtu zināms elektrolīnijas nozīmīgums elektrosistēmā. Aplūkotā piemēra ieteicamais aizsargietaišu izvietojuma biežums gan mazākas (10 % zibensstrāvas varbūtība), gan lielākas (90 % zibensstrāvas varbūtība) nozīmes elektrolīnijai ir vienāds – posma veidiem Nr. 1 un 3 aizsargietaisies ieteicams izvietot katrā 3. balstā, bet posma veidam Nr. 2 katrā 2. balstā. Ieteicamais aizsargietaišu izvietojuma

biežums un ar dažādu zibensstrāvas maksimumvērtības varbūtību iegūto rezultātu, kā arī alternatīvo risinājumu, ja netiek ņemtas vērā to relatīvās izbūves izmaksas, salīdzinājums dots 5.15. tabulā.

5.15. tabula

Ieteicamais laidumu skaits starp aizsargietaisēm

Risinājuma variants	Zibensstrāvas maksimumvērtības I_m rašanās varbūtība								
	90%			50%			10%		
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Aizsargietais tips	PAD (150 mm)								
Bāzes risinājums	3*	2*	3*	3*	2*	3*	3*	2*	3*
Izolētais vads XLPE 3,1 mm	3	2	3**	3	2	4**	3	2	4
Izolētais vads HDPE 3,9 mm	4	3**	3	3	3**	4	3	3**	4
Starpbalsta tips S20.I-VT	3	2*	3*	3**	2*	4**	2	2*	4**

* pēc 20.-25. ekspluatācijas gada plānot elektrolīnijas posma veida atjaunošanas darbus vai aizsargietaisē uzstādīšanu katrā balstā

** pēc 20.-25. ekspluatācijas gada aizsargietaisē ieteicams uzstādīt katrā 2. balstā

5.4. Piektās nodaļas secinājumi

- Piedāvātā metodoloģija zibensaizsardzības ietaišu izvietojuma biežuma novērtēšanai bez elektrolīnijas pārklāšanās skaita F , kas ir esošo metodoloģiju iegūstamais rezultāts, papildus izvirza sekojošus kritērijus:
 - elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ ar robežlielumiem, kas dod viennozīmīgu ieteicamā aizsargietaišu izvietojuma biežumu;
 - prognozētā izolēto vadu elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F un pārklāšanās biežumu ζ . Izolatoru nolietojums atkarīgs no apkārtējās vides piesārņojuma pakāpes, bet izolētā vada nolietojums no transportēšanas, montāžas u.c. mehāniskiem bojājumiem, kā arī elektriskas un termiskas izolācijas nolietojuma;
 - alternatīvo risinājumu analīze, kas ietver elektrolīnijas elementa (izolatora vai izolētā vada) vai elektrolīnijas balsta tipa nomaiņas ietekmi uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ un no tā izrietošo aizsargietaišu izvietojuma biežumu.
- Piedāvātās metodoloģijas aprēķinu parametru noteikšanai promocijas darba ietvaros ir izstrādāti šādi palīgmateriāli:
 - vidējo negaisa dienu skaits T_d Latvijā, kas iegūts, apkopojot zibensizlādes statistiku no 2006.-2017. gadam;
 - nosegšanas koeficientu S_f tabulas un līknes 3 dažādām varbūtējām zibensstrāvas maksimumvērtībām un 7 elektrolīnijas augstumiem;
 - elektrolīnijas elementu CFO minimālo vērtību datu bāze, ko lietotājs var brīvi papildināt;
 - elektrolīnijas nolietojuma prognozes līknes.

3. Piedāvāto metodoloģiju iespējams pielietot gan projektēšanas stadijā, gan ekspluatācijā esošai izolēto vadu līnijai. Ar piedāvāto metodoloģiju, iespējams pārbūvējamo posmu ērti sadalīt vairākos posmu veidos, kuri, veicot aprēķinus, tiek aplūkoti atsevišķi. Tāpat iespējams izvēlēties nepieciešamo aizsardzības pakāpi atkarībā no elektrolīnijas nozīmīguma elektrosistēmā, izmainot zibensstrāvas maksimumvērtību, kas atkarīga no tās rašanās varbūtības.
4. Ar piedāvāto metodoloģiju iegūtais rezultāts elektrolīnijas posma veidam klajā laukā dod vismazāko laidumu skaitu starp aizsargietaisēm, tālāk seko posma veids ar abās elektrolīnijas pusēs esošiem kokiem, kas ir $2/3$ no elektrolīnijas augstuma un visretāk aizsargietaisēs ieteicams izvietot posmā, kur vienā elektrolīnijas pusē atrodas koki, kas ir $6/3$ no elektrolīnijas augstuma. 20 kV izolēto vadu elektrolīnijas nolietojums pastiprināti sāk ietekmēt elektrolīnijas pārklāšanās skaitu pēc 10. ekspluatācijas gada, kad elektrolīnijas CFO_T samazinājuma dēļ arī netieša zibensizlāde ierosina elektrolīnijas pārklāšanos.

6. PIEDĀVĀTĀS METODOLOĢIJAS VERIFIKĀCIJA

6.1. Elektrolīnijas pārklāšanās biežuma izvērtējums

Elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ metodoloģijā ir izvirzīts kā galvenais kritērijs aizsargietaišu izvietojumam. Tas ir lielums, kas raksturo laika intervālu starp elektrolīnijas pārklāšanos, t.i., cik bieži ir sagaidāma elektrolīnijas pārklāšanās. ζ ir apgrieztais lielums elektrolīnijas pārklāšanās skaitam F , kuru aprēķina, izmantojot (5.3) izteiksmi. Piedāvātajā metodoloģijā ir ieviests lielums ζ , jo aizsargietaišu izvietojuma biežumu noteikšanai tiek apskatīta arī elektrolīnijas nolietojuma prognoze, kas tiek sasaistīta ar elektrolīnijas darbmūžu. Lai noskaidrotu parametrus otram unikālā aizsargietaišu izvēles kritērijam – alternatīvu analīzei, nepieciešams veikt ζ izvērtējumu.

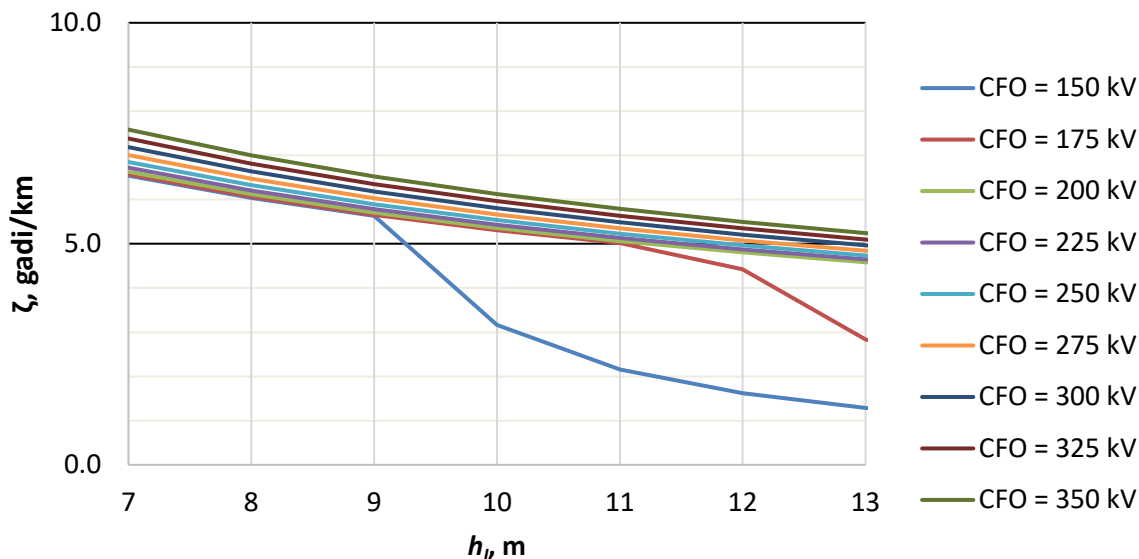
6.1.1. Mainīgo parametru ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu

Elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ ir atkarīgs no dažādiem parametriem, tāpēc nepieciešams aplūkot, kā katrs mainīgais parametrs ietekmē ζ vērtību. Visi mainīgie parametri apskatīti CFO vērtībām diapazonā no 150 kV līdz 350 kV, kas izvēlēts, balstoties uz vides sprieguma tīklam tipiskajām vērtībām [92], [79]. Lai pārbaudītu katra parametra ietekmi, pārējie mainīgie parametri ir nemainīgi un tiem ir bāzes lielums, kas tika izmantots arī 5.3. apakšnodaļā. Piedāvātās metodoloģijas aprēķini ietver sekojošus mainīgos parametrus, iekavās dots bāzes lielums, ja ietekmes noteikšanai nav dots cits lielums:

- 1) elektrolīnijas augstums ($h_l = 10$ m);
- 2) elektrolīnijas platums ($b = 0,8$ m);
- 3) negaisa dienu skaits gadā ($T_d = 20$ negaisa dienas gadā);
- 4) noseģšanas koeficients ($S_f = 0,21$, ja $h_l = 10$ m, $h_k = 10$ m, $s_k = 40$ m, $I_m = 16,4$ kA un objekti atrodas tikai vienā elektrolīnijas pusē);
- 5) aizsargietais paliekošais spriegums ($V_{IR} = 180$ kV);
- 6) elektrolīnijas laiduma garums ($L = 60$ m);
- 7) balsta zemētāja pretestība ($R_0 = \infty$);
- 8) grunts pretestība (ideāla grunts vadītspēja jeb $\rho = 0$ Ω m);
- 9) zibensizlādes kustības ātrums ($v = 1,2 \cdot 10^8$ m/s);
- 10) lineārais ekvivalents 0-100 % viļņa kāpumlaikam ($t_m = 2$ μ s);
- 11) elektrolīnijas pārsprieguma viļņa pretestība ($Z_s = 480$ Ω);
- 12) zibensstrāvas maksimumvērtības mediānā vērtība ($I_m = 16,4$ kA).

Pie ievades lielumiem vēl ir pārsprieguma viļņa izplatīšanās ātrums, kas ir vienāds ar gaismas ātrumu $c = 3 \cdot 10^8$ m/s un zibensstrāvas maksimumvērtība, kas vienāda ar Latvijas zibensstrāvas maksimumstrāvas mediāno vērtību $I_m = 16,4$ kA, kas piedāvātajā metodoloģijā ietekmē tikai noseģšanas koeficienta vērtību S_f , tāpēc abi šie lielumi visos aprēķinos netiek mainīti. Ietekmes izvērtēšanai visi aprēķini veikti, pieņemot, ka aizsargietais ir izvietots katrā 3. balstā.

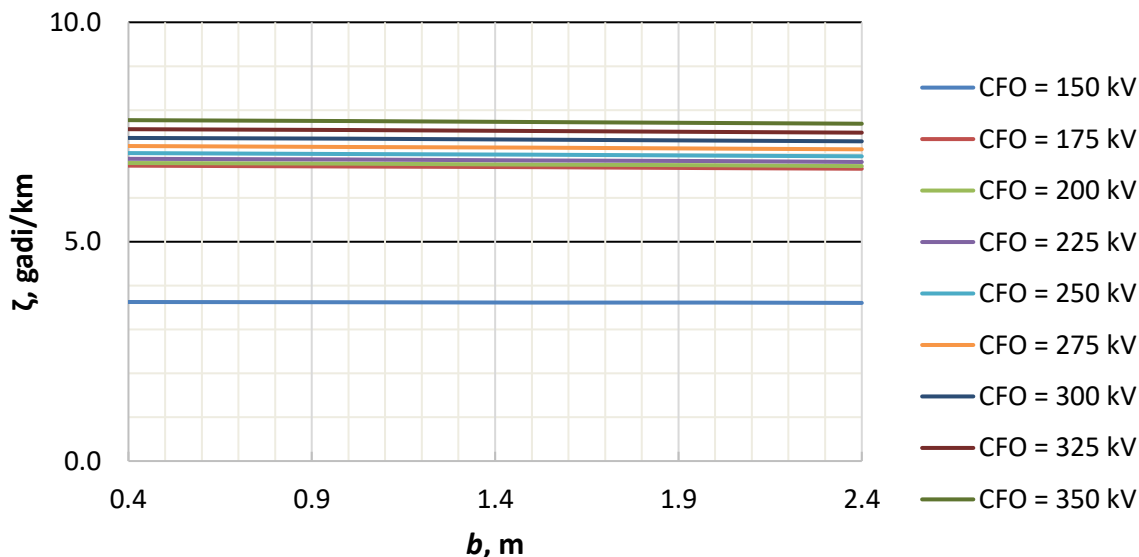
Elektrolīnijas augstuma h_l ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.1. attēlā. Elektrolīnijas augstuma ietekmes salīdzināšanai pieņemts, ka elektrolīnija atrodas klajā laukā un $S_f = 0$. Aplūkots elektrolīnijas augstuma diapazons atbilstoši LEK 120 [75] ir no 7 m līdz 13 m.



6.1. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no elektrolīnijas augstuma

No 6.1. attēla redzams, ka, palielinoties elektrolīnijas augstumam, samazinās ζ lielums. Ja $h_l < 9$ m, tad neatkarīgi no elektrolīnijas CFO h_l ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība. Palielinoties elektrolīnijas augstumam, pie mazākām elektrolīnijas CFO vērtībām ζ lielums samazinās straujāk.

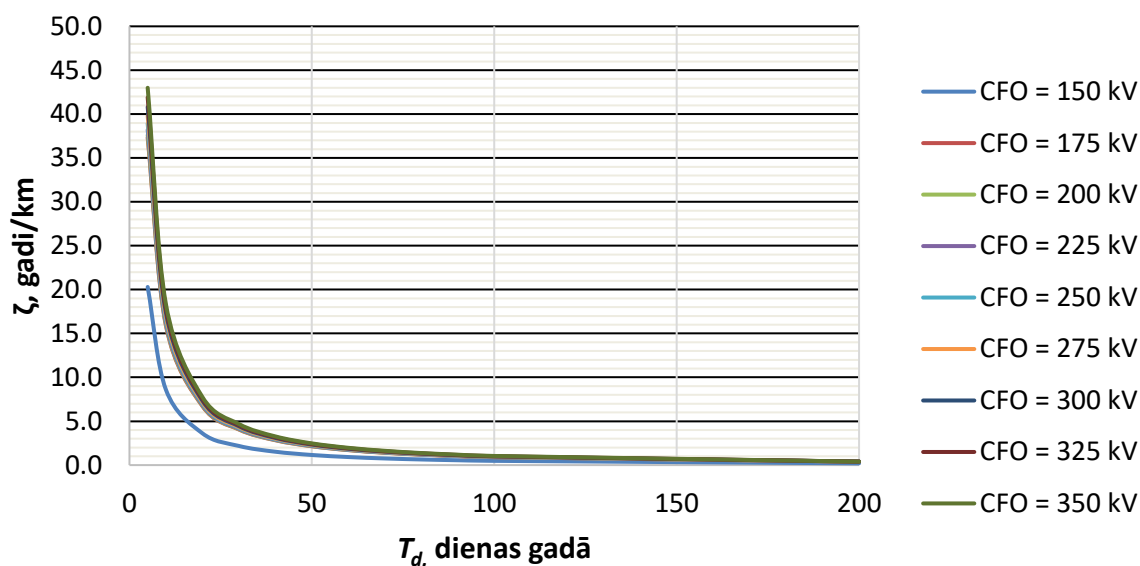
Elektrolīnijas platuma b ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.2. attēlā. Aplūkots elektrolīnijas platuma diapazons ir no 0,4 m līdz 2,4 m. 0,4m atbilst gadījumam ar starpbalstu S20.I-HT, bet 2,4 m, ja izolēto vadu līnija montēta esošajos kailvadu starpbalstos ar traversu St-20, kur attālums starp fāzēm ir 1,2 m [75].



6.2. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no elektrolīnijas platuma

No 6.2. attēla redzams, ka elektrolīnijas platums būtiski neietekmē ζ lielumu un neatkarīgi no elektrolīnijas CFO b ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība.

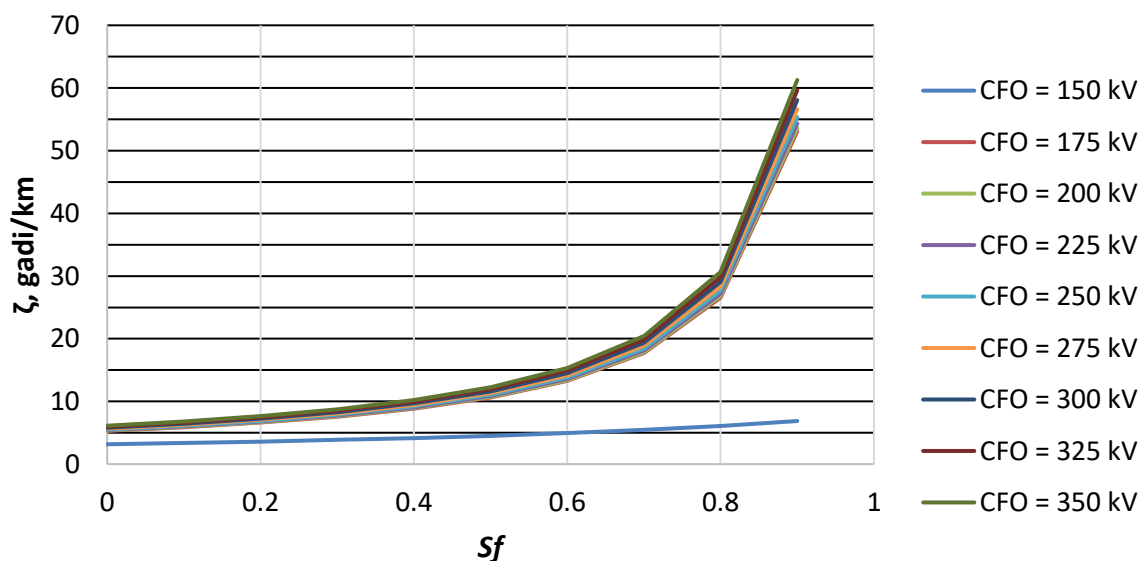
Negaisa dienu skaita gadā T_d ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.3. attēlā. Aplūkots T_d diapazons ir no 5 līdz 200 negaisa dienām gadā [60].



6.3. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no negaisa dienu skaita gadā

No 6.3. attēla redzams, ka, pieaugot T_d lielumam, tā ietekme uz ζ vērtību samazinās. Būtiska T_d ietekme uz ζ vērtību novērojama līdz $T_d = 40$ negaisa dienas gadā. Neatkarīgi no elektrolīnijas CFO T_d ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība. Negaisa dienu skaits gadā tropiskos reģionos var pieaugt līdz pat $T_d = 200$ [60], bet pie nelielas zibensstrāvas maksimumvērtības $I_m = 16,4$ kA, arī ar lielu vīdsprieguma elektrolīnijas spriegumizturību CFO = 350 kV elektrolīnijas pārklāšanās biežums $\zeta = 1$, jau pie $T_d = 100$ negaisa dienām gadā.

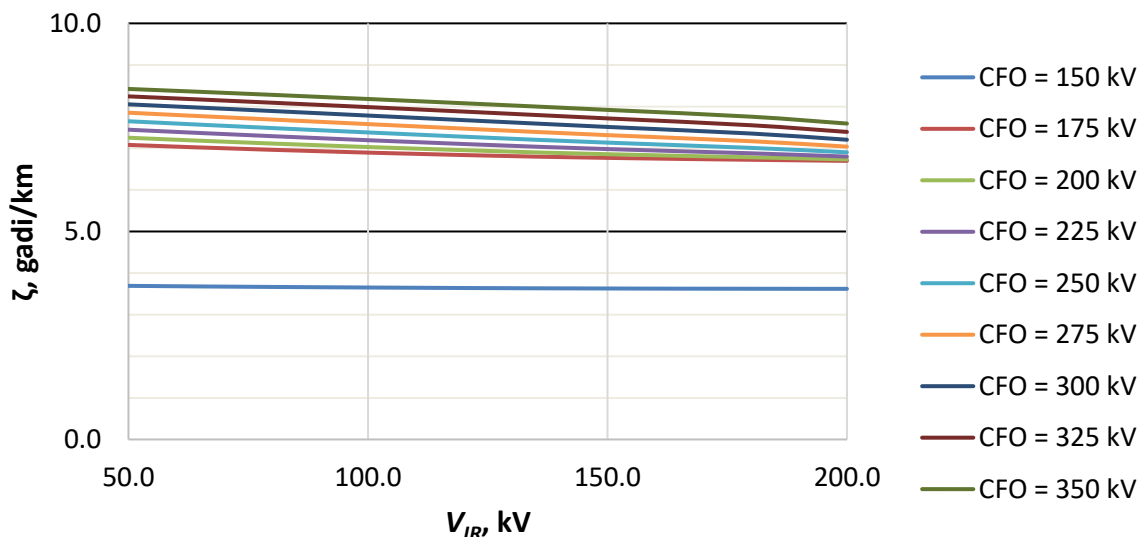
Nosegšanas koeficienta S_f ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.7. attēlā. Aplūkots S_f diapazons ir no 0 līdz 0,9, ja $S_f = 1$, tad tuvumā esošie objekti pilnībā aizsargā elektrolīniju no tiešas zibensizlādes, tāpēc $F = F_p$. Ja $h_l = 10$ m, tad līdz CFO = 184 kV $F_p > 0$, tāpēc $S_f = 1$ netiek attēlots 6.4. attēlā.



6.4. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no noseģšanas koeficienta

No 6.4. attēla redzams, ka, pieaugot S_f lielumam, tā ietekme uz ζ vērtību pieaug. Būtiska S_f ietekme uz ζ vērtību novērojama no $S_f = 0,6$. Neatkarīgi no elektrolīnijas CFO S_f ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība. Izņēmums ir, ja $CFO = 150$ kV, tad S_f ietekme uz ζ vērtību ir neliela, jo ζ ir tikai mazliet vairāk kā 2 reizes lielāks, salīdzinot $S_f = 0$ un $S_f = 0,9$. Ja $CFO \geq 175$ kV, tad ζ ir līdz pat 10 reizēm lielāks.

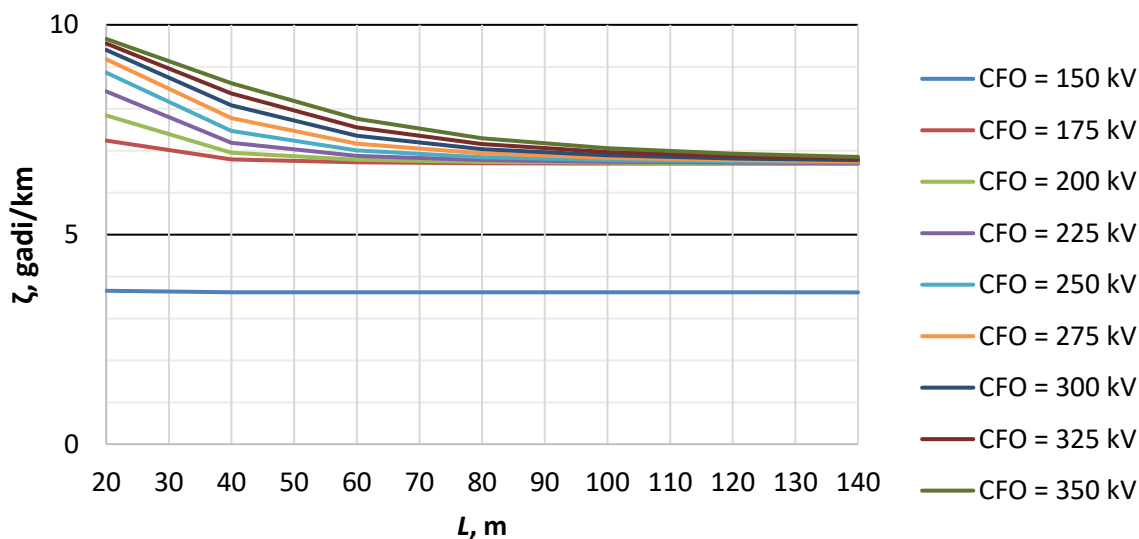
Aizsargietais paliekošā sprieguma jeb aizsargietais loka veidošanās sprieguma V_{IR} ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.5. attēlā. Aplūkots V_{IR} diapazons izvēlēts atbilstoši CLAH un PAD nostrādes spriegumiem [48], [69] ± 20 kV un tas ir no 50 kV līdz 200 kV.



6.5. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no aizsargietais paliekošā sprieguma

No 6.5. attēla redzams, ka aizsargietais paliekošais spriegums būtiski neietekmē ζ lielumu un neatkarīgi no elektrolīnijas CFO V_{IR} ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība.

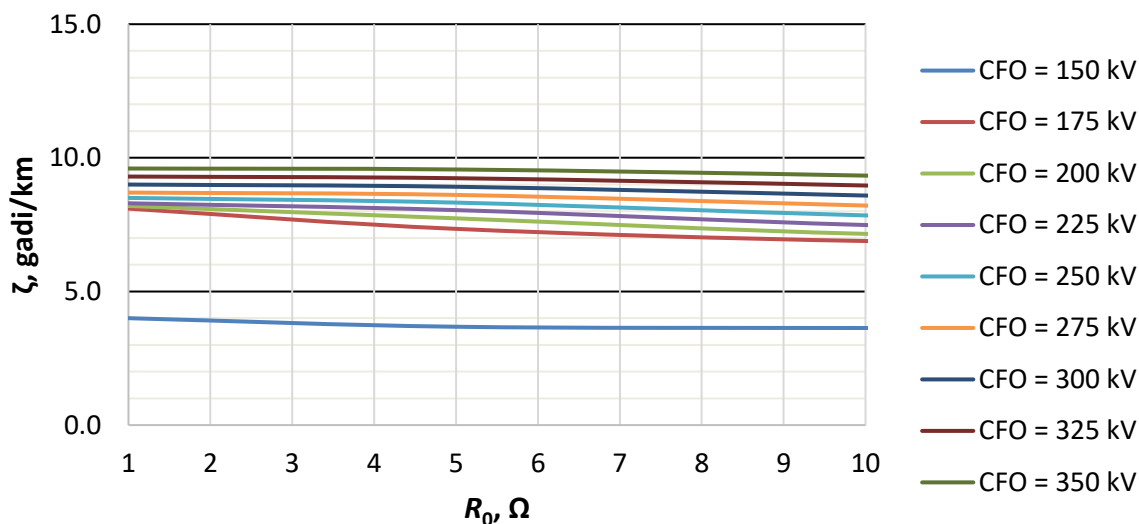
Elektrolīnijas laiduma garuma L ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.6. attēlā. Aplūkots L diapazons izvēlēts atbilstoši LEK 021 [72] un tas ir no 20 m līdz 140 m.



6.6. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no elektrolīnijas laiduma garuma

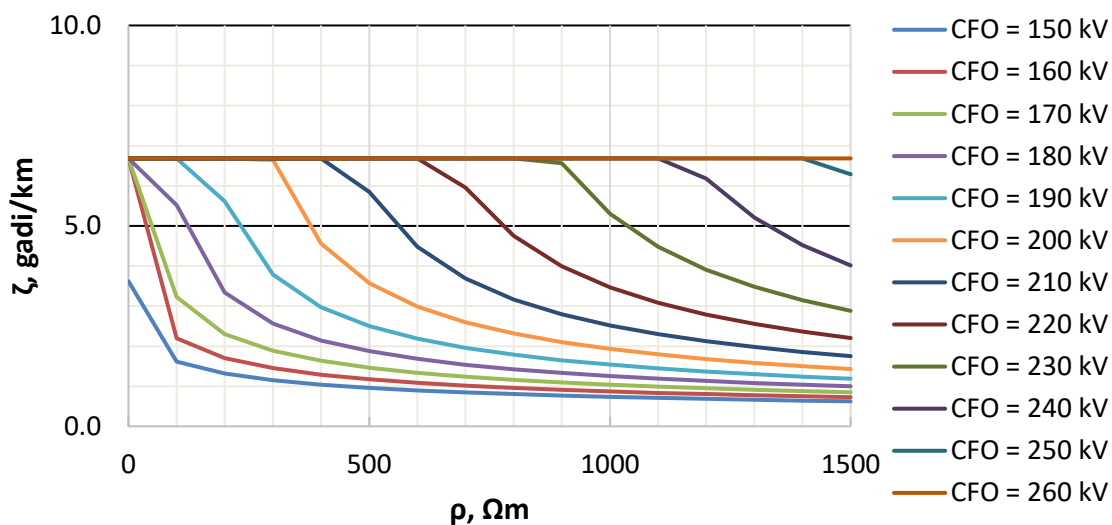
No 6.6. attēla redzams, ka elektrolīnijas laiduma garums $L > 60$ m būtiski neietekmē ζ lielumu un neatkarīgi no elektrolīnijas CFO L ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība.

Elektrolīnijas balsta zemētāja pretestības R_0 ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.7. attēlā. Gadījumā, ja 20 kV balstā tiek uzstādīta CLAH tipa aizsargietais vai balstam ir atsaite, tad piedāvātās metodoloģijas aprēķinu ietekmē arī elektrolīnijas balsta zemētāja pretestība R_0 . Aplūkots R_0 diapazons atbilstoši LEK 048 [74] ir no 1Ω līdz 10Ω .

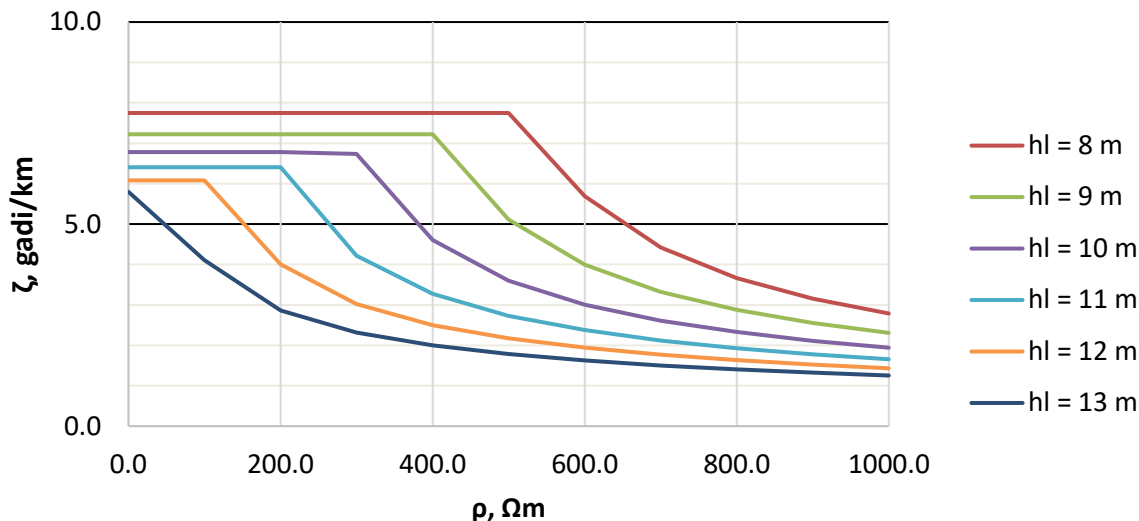


No 6.7. attēla redzams, ka elektrolīnijas balsta zemētāja pretestība R_0 būtiski neietekmē ζ lielumu un neatkarīgi no elektrolīnijas CFO R_0 ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība.

Grunts pretestības ρ ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.8. attēlā. Aplūkots ρ diapazons izvēlēts raksturīgākajām vērtībām, t.i. no $0 \Omega\text{m}$ līdz $1500 \Omega\text{m}$ [64].

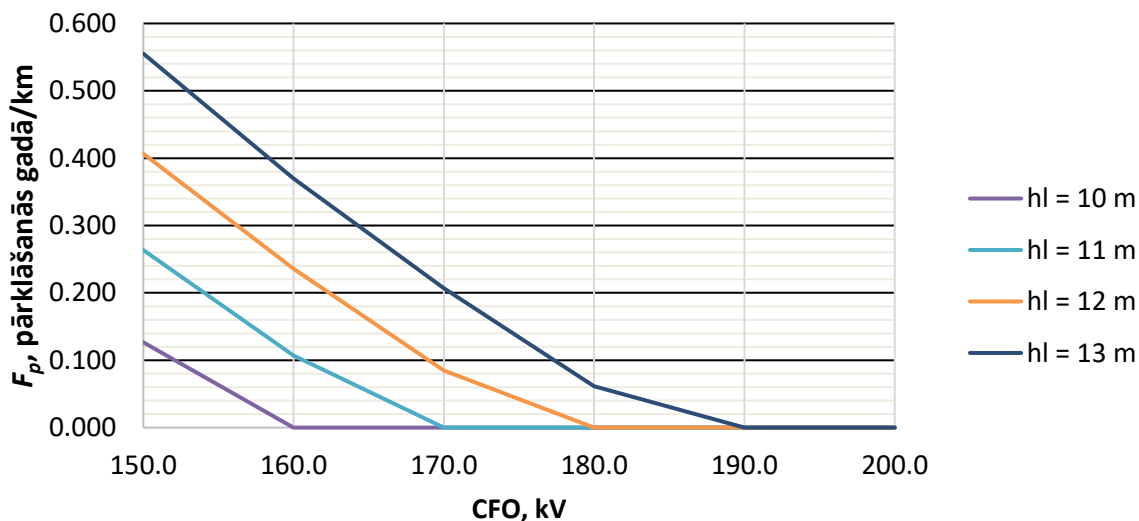


No 6.8. attēla redzams, ka grunts pretestība ρ neietekmē ζ lielumu, ja elektrolīnijas CFO > 250 kV. Jo mazāka elektrolīnijas CFO vērtība, jo lielāka ir ρ ietekme uz ζ lielumu, kas strauji samazinās un tālāk, pieaugot ρ vērtībai, paliek praktiski nemainīgs. Par cik netiešas zibensizlādes pārklāšanās skaits ir atkarīgs no efektīvā augstuma h_{ef} (skat. 4.3.2. apakšnodaļu), kas ir atkarīgs arī no elektrolīnijas augstuma h_l , tad aplūkosim arī grunts pretestības ρ ietekmi uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas augstuma h_l , kas dota 6.9. attēlā.



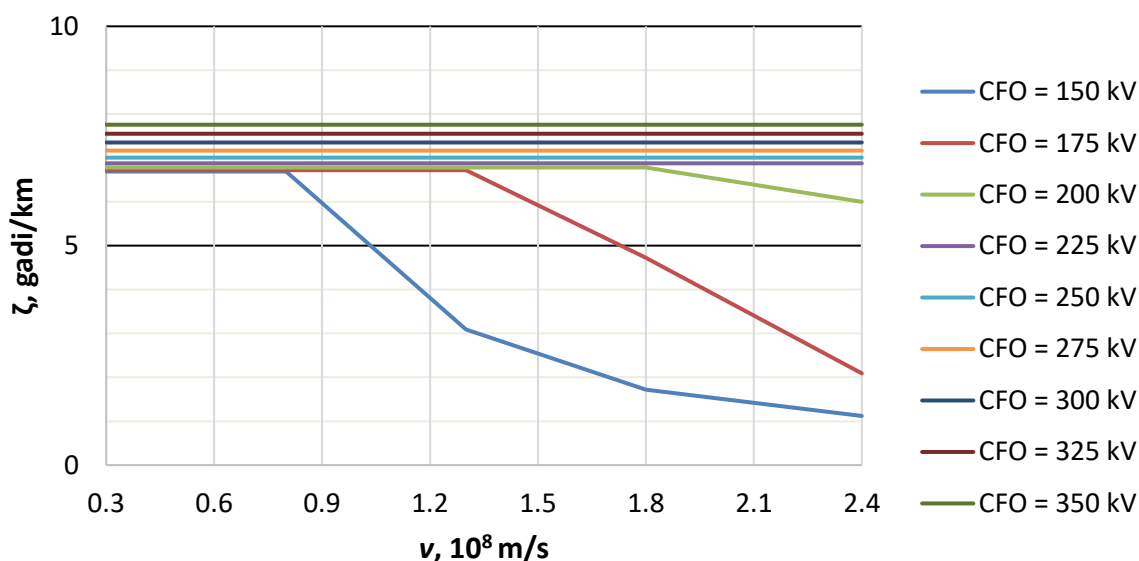
6.9. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no grunts pretestības dažādām elektrolīnijas augstuma h_l vērtībām

No 6.9. attēla redzams, ka grunts pretestība ρ vairāk ietekmē ζ lielumu, ja elektrolīnijas augstums h_l ir lielāks, turklāt līdzīgi kā pie dažādām elektrolīnijas CFO vērtībām ζ strauji samazinās un tālāk, pieaugot ρ vērtībai, paliek praktiski nemainīgs. Samazinoties elektrolīnijas CFO vērtībai, ζ vērtību ietekmē netiešas zibensizlādes radītas elektrolīnijas pārklāšanās skaits F_p , kas pat pie ideālas grunts vadītspējas pieaug, pieaugot elektrolīnijas augstumam, kas uzskatāmi redzams 6.10. attēlā. Vērtības, kur $h_l < 10$ m nav attēlotas, jo ideālas grunts vadītspējas gadījumā nenotiek netiešas zibensizlādes radīta elektrolīnijas pārklāšanās.



6.10. att. Netiešas zibensizlādes radīta elektrolīnijas pārklāšanās atkarībā no elektrolīnijas augstuma h_l un spriegumizturības CFO vērtībām

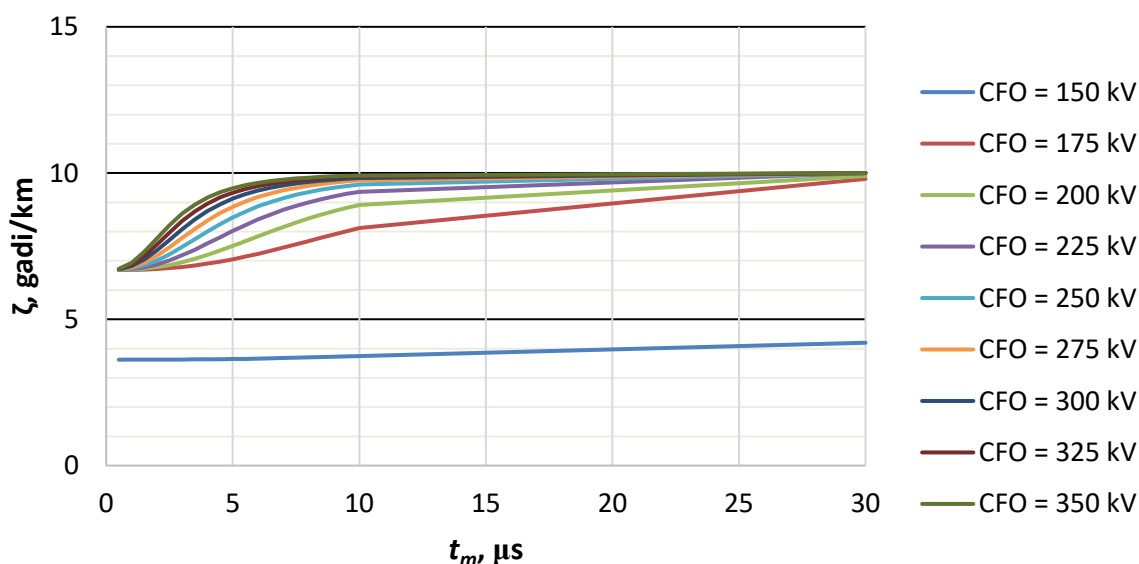
Zibensizlādes kustības ātruma v ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.11. attēlā. Aplūkots v diapazons ir no $0,3 \cdot 10^8$ m/s līdz $2,4 \cdot 10^8$ m/s, kas atbilst izmērītā [54] zibensizlādes kustības ātruma diapazonam.



6.11. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no zibensizlādes kustības ātruma

No 6.11. attēla redzams, ka zibensizlādes kustības ātrums v neietekmē ζ lielumu, ja elektrolīnijas CFO > 200 kV. Jo mazāka elektrolīnijas CFO vērtība, jo lielāka ir v ietekme uz ζ lielumu, kas strauji samazinās un tālāk, pieaugot v vērtībai, paliek praktiski nemainīgs. Tāpat kā ρ arī v ietekme ir atkarīga no netiešas zibensizlādes radīta elektrolīnijas pārklāšanās skaita F_p , kas redzams 6.10. attēlā.

Viļņa kāpumlaika lineārā ekvivalenta t_m ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.12. attēlā. Aplūkots t_m diapazons ir no $0,5 \mu\text{s}$ līdz $30 \mu\text{s}$ [118].

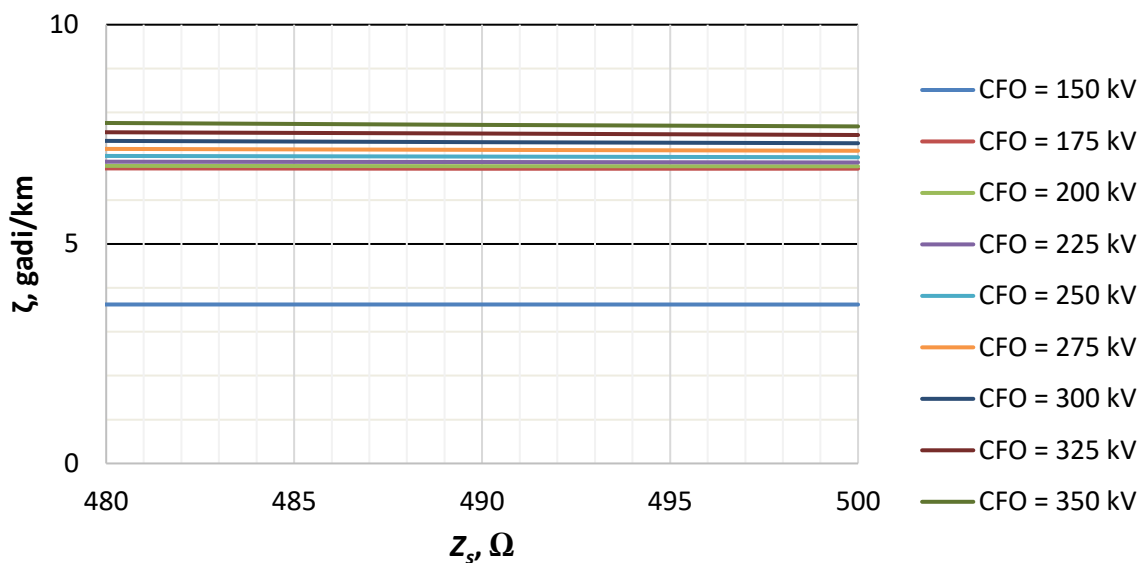


6.12. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no viļņa kāpumlaika lineārā ekvivalenta

No 6.12. attēla redzams, ka zibensstrāvas impulsa viļņa kāpumlaika lineārais ekvivalents t_m ietekmē ζ . Jo lielāks ir elektrolīnijas CFO, jo lielāka ir t_m ietekme uz ζ , lai gan, sasniedzot

noteiktu t_m vērtību, ζ vairs nemainās. Pie CFO = 150 kV t_m neietekmē ζ vērtību un ir novērojams vairāk kā 50 % samazinājums ζ vērtībai salīdzinājumā, ja CFO = 175 kV.

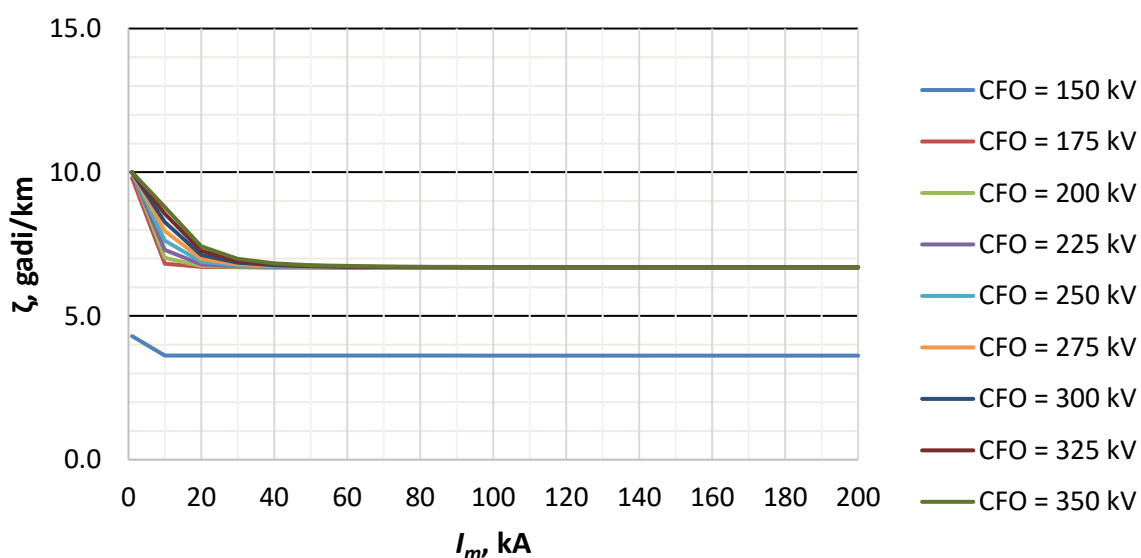
Elektrolīnijas pārsprieguma viļņa pretestības Z_s ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.13. attēlā. Aplūkots Z_s diapazons ir no 480 Ω līdz 500 Ω [110].



6.13. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no elektrolīnijas pārsprieguma viļņa pretestības

No 6.13. attēla redzams, ka elektrolīnijas pārsprieguma viļņa pretestība Z_s būtiski neietekmē ζ lielumu un neatkarīgi no elektrolīnijas CFO Z_s ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība.

Zibensstrāvas maksimumvērtības mediānās vērtības I_m ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ atkarībā no elektrolīnijas CFO dota 6.14. attēlā. Aplūkots I_m diapazons ir no 1 kA līdz 200 kA [40].



6.14. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no zibensstrāvas maksimumvērtības mediānās vērtības

No 6.14. attēla redzams, ka zibensstrāvas maksimumvērtības mediānā vērtība $I_m > 40$ kA būtiski neietekmē ζ lielumu un neatkarīgi no elektrolīnijas CFO Z_s ietekme ir proporcionāla CFO vērtībai, t.i., lielākai CFO vērtībai atbilst lielāka ζ vērtība. Zibensstrāvas maksimumvērtības mediānās vērtības ietekme ir vērā ņemama, ja $I_m < 40$ kA, kas skaidrojams ar, to ka vīdsprieguma elektrolīnijas pārklāšanās ierosināšanai pietiek ar salīdzinoši nelielu zibensstrāvas vērtību, tāpēc, sasniedzot noteiktu zibensstrāvas maksimumvērtības mediāno vērtību, varbūtība, ka tiks pārsniegta strāva, kas rada elektrolīnijas pārklāšanos tuvojas 100 %. Tātad arī reģionos ar lielākām zibensstrāvas maksimumvērtībām piedāvātā metodoloģija var tikt izmantota.

No veiktajiem mainīgo parametru ietekmes uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ aprēķiniem, redzams, ka elektrolīnijai ar CFO < 175 kV būtiski samazinās ζ vērtība. Salīdzinot ζ , kas iegūts ar CFO = 150 kV un CFO = 175 kV, redzams, ka atšķirība ir apmēram 50 %.

Piedāvātās metodoloģijas mainīgo aprēķina parametru ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ apkopota 6.1. tabulā. Ietekmes lielums dots, kā vidējā izmaiņa procentos no visām CFO vērtībām, salīdzinot izvēlētajā diapazona sākuma un beigu vērtību.

6.1. tabula

Piedāvātās metodoloģijas mainīgo aprēķina parametru ietekme uz ζ

Mainīgais parametrs	Diapazons	Izmaiņa, %	Piezīmes
S_f	0 ÷ 0,9	813	Būtiska S_f ietekme uz ζ vērtību novērojama, ja $S_f \geq 0,6$. Ja CFO = 150 kV, tad ζ izmaiņa ir 117 %
T_d , negaisa dienas gadā	5 ÷ 200	99	Būtiska T_d ietekme uz ζ vērtību novērojama līdz $T_d = 40$ negaisa dienas gadā
ρ , Ωm	0 ÷ 1500	62	ρ neietekmē ζ , ja CFO > 250 kV
t_m , μs	0,5 ÷ 30	45	Pieaugot CFO, pieaug t_m ietekme uz ζ
h_l , m	7 ÷ 13	39	Palielinoties h_l , pie mazāka CFO ζ lielums samazinās straujāk
v , m/s	$0,3 \cdot 10^8 \div 2,4 \cdot 10^8$	32	v neietekmē ζ , ja CFO > 200 kV. Ja CFO = 150 kV, tad ζ izmaiņa ir 89 %
I_m , kA	1 ÷ 200	31	$I_m > 40$ kA būtiski neietekmē ζ
L , m	20 ÷ 140	20	$L > 60$ m būtiski neietekmē ζ
R_0 , Ω	1 ÷ 10	8	
V_{IR} , kV	50 ÷ 200	8	
Z_s , Ω	480 ÷ 500	1	
b , m	0,4 ÷ 2,4	1	

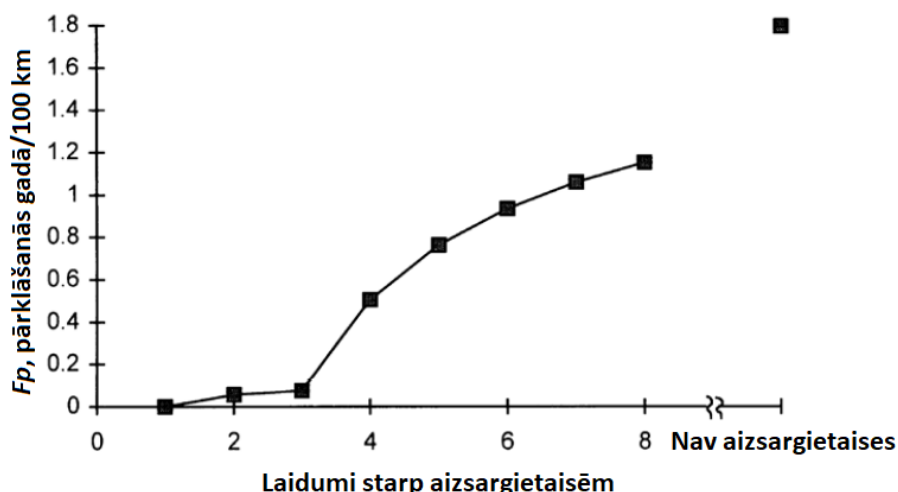
No 6.1. tabulas redzams, ka elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ visvairāk ietekmē nosešanas koeficients S_f un negaisa dienu skaits gadā T_d , bet vismazāk elektrolīnijas platums b un elektrolīnijas pārsprieguma viļņa pretestība Z_s . Atsevišķi parametri ietekmē ζ tikai pie CFO < 200 ÷ 250 kV, kas vēlreiz pierāda, ka izolēto vadu līnijas nolietošānās dēļ, samazināta elektrolīnijas CFO vērtība var būt noteicošais faktors zibensizlādes radītu bojājumu pieaugumam.

Alternatīvu analīzei (skat. 5.3.8. apakšnodaļu) bez CFO_T palielināšanas, mainot elektrolīnijas elementus vai balstu tipu, no 6.1. tabulā dotajiem lielumiem, lai palielinātu ζ lielumu, iespējams variēt ar elektrolīnijas augstumu h_l , elektrolīnijas laiduma garumu L , elektrolīnijas platumu b , balsta zemētāja pretestību R_0 un aizsargietaisies paliekošo spriegumu V_{IR} , pārējie lielumi ir atkarīgi no zibensstrāvas parametriem un elektrolīnijas atrašanās vietas. Elektrolīnijas augstums h_l netiek lietots alternatīvu analīzei, jo ζ iespējams palielināt, samazinot h_l , kas tiek izvēlēts atbilstoši minimālajam gabarītam pret zemi, tāpēc kā alternatīvu apskatīt h_l palielināšanu nav lietderīgi. Laiduma garuma L ietekme uz ζ nav tik liela, lai kompensētu papildus elektrolīnijas balstu izbūves izmaksas, tāpēc arī šis lielums netiek aplūkots kā alternatīva ζ palielināšanai. No 6.1. tabulas redzams, R_0 , b un V_{IR} ietekme uz ζ neliela, tāpēc šos lielumus apskatīt kā alternatīvos risinājumus aizsargietaišu izvietošanas biežuma samazināšanai ir neefektīvi.

6.1.2. Elektrolīnijas pārklāšanas biežuma robežkritēriju analīze

Elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ teorētiski var būt robežās no 0 līdz ∞ , attiecīgi, ja $F = \infty$ vai 0. Tomēr praksē sastomās robežas ir no 1 līdz ∞ . Robežlielums 1 ir elektrolīnijai bez aizsargietaisēm un $CFO = 130$ kV, kas atbilst kailvadam [79]. Elektrolīnijai ar augstumu $h_l = 10$ m, $S_f = 1$ un $CFO > 185$ kV nav sagaidāma elektrolīnijas pārklāšanās no tiešas un netiešas zibensizlādes, tāpēc $\zeta = \infty$.

Izstrādātajā metodoloģijā ir paredzēts variants, kad aizsargietaisies elektrolīnijā neuzstāda, proti, gadījumā, ja $\zeta > 30$ gadi/km (skat. 5.1. tabulas). Ja aizsargietaisies ir nepieciešamas, tās ir piedāvāts izvietot katrā līdz katrā 5. balstā. Katrs 5. balsts, kā robežlielums izvēlēts, jo aizsargietaisies izvietošanas biežums samazina elektrolīnijas pārklāšanās skaitu līdz 3 laidumiem starp aizsargietaisēm, bet sākot ar 4.-5. balstu šis samazinājums vairs nav tik liels. 6.15. attēlā dots netiešas zibensizlādes radīts elektrolīnijas pārklāšanās skaits F_p atkarībā no aizsargietaišu izvietošanas biežuma, ja $CFO_T = 150$ kV, $L = 75$ m, $R_0 = \infty$, $h_l = 10$ m un $N_g = 1$ zibensizlāde gadā/km² [58], [86].



6.15. att. F_p atkarībā no aizsargietaišu izvietošanas biežuma [58]

5.1. tabulā dotie robežkritēriji balstīti uz izolēto vadu elektrolīnijas ekspluatācijas ilgumu, kas ir pieņemts 30 gadi [93], [126]. Ja $\zeta > 30$ gadi/km, tad elektrolīnijā aizsargietaisies nav nepieciešams uzstādīt, jo visā ekspluatācijas laikā netiek prognozēta elektrolīnijas pārklāšanās no tiešas vai netiešas zibensizlādes. Ja $\zeta \leq 3$ gadi/km, kas ir 1/10 no ekspluatācijas laika, tad

atbilstoši piedāvātajai metodoloģijai aizsargietaisi ieteicams uzstādīt katrā balstā, lai samazinātu zibensizlādes radītu bojājumu risku elektrolīnijā. Aizsargietaisi uzstādot retāk, pastāv iespēja, ka zibensizlādes radīts elektriskais loks aizdegies balstā bez aizsargietaisies un tiks bojāta izolētā vada izolācija. Ja aizsargietaisi ir katrā 2. balstā, tad varbūtība, ka elektriskais loks aizdegies balstā ar aizsargietaisi ir 50 %, ar aizsargietaisi katrā 3. balstā – 33 %, utt. Aizsargietaisies uzstādīšanas katrā 2. līdz katrā 5. balstā ζ diapazons 5.1. tabulā, noteikts, balstoties uz to, ka, sākot ar aizsargietaisi katrā 4. balstā, strauji palielinās pārklāšanās skaits F , tāpēc ζ diapazons arī strauji palielinās. Ar aizsargietaisi katrā līdz katrā 3. balstā ζ diapazons ir 3 gadi/km, bet ar aizsargietaisi katrā 4. un katrā 5. balstā – 10 gadi/km.

No 6.1.1. apakšnodaļas rezultātiem redzams, ka biežāk iegūtais elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ ir diapazonā no 5 līdz 10 gadi/km. Elektrolīnijai ar CFO < 175 kV, kas atbilst 20 līdz 30 gadus vecai videsprieguma izolēto vadu līnijai, biežāk novērojams ζ < 5 gadi/km, bet ζ > 30 gadi/km iespējams iegūt tikai ar $S_f > 0,8$, tātad elektrolīnijai, kuru tuvumā esošie objekti pilnībā aizsargā no tiešas zibensizlādes.

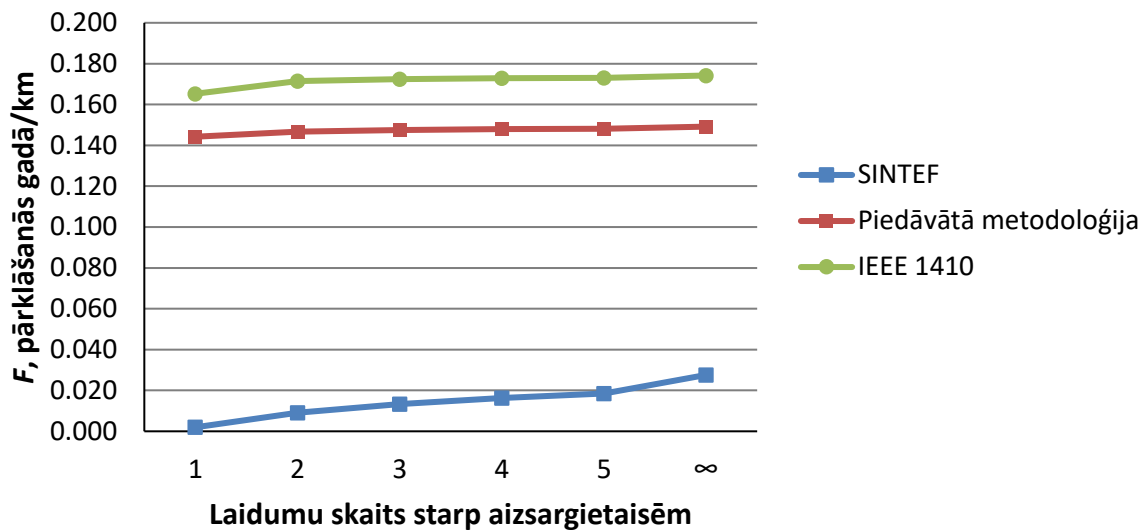
6.2. Piedāvātās metodoloģijas rezultāti salīdzinājumā ar citu metožu iegūtajiem rezultātiem

Lai pārbaudītu, vai ar piedāvāto metodoloģiju iegūtais aizsargietaišu izvietojuma biežums ir pamatots, šajā nodaļā ir salīdzināti piedāvātās metodoloģijas iegūtie rezultāti ar 1.2. apakšnodaļā aprakstīto IEEE 1410 un SINTEF metodoloģiju rezultātiem. Rezultātu salīdzināšanai ir izmantots 5.2. attēlā dotais piemērs un salīdzināts elektrolīnijas pārklāšanās skaits F no 5.7. tabulas, kur netiek ņemta vērā elektrolīnijas nolietojuma prognoze un alternatīvu analīze, jo šādi papildus kritēriji esošajās metodoloģijās netiek piedāvāti.

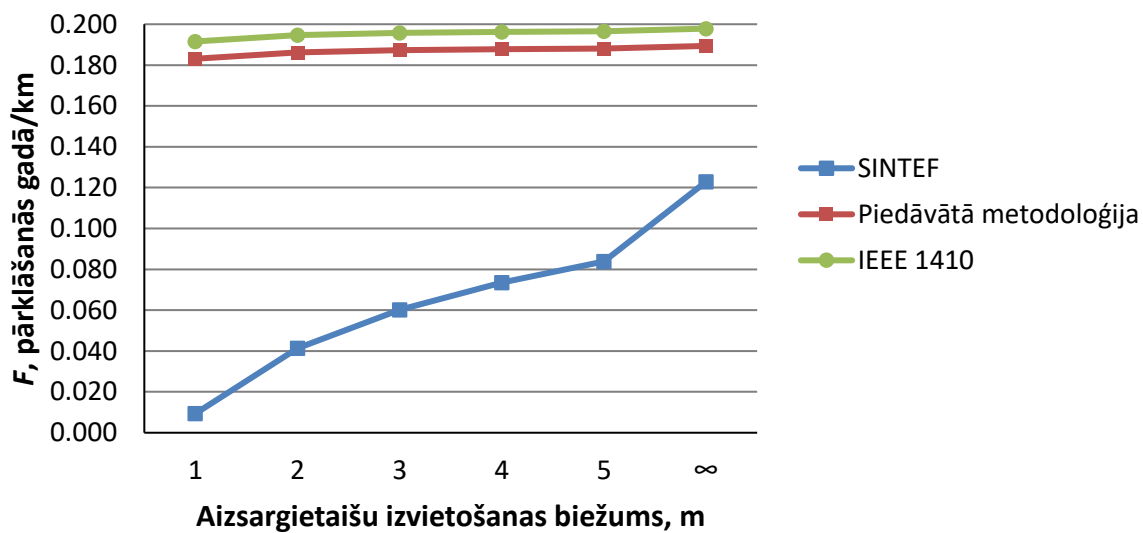
Posma veidam Nr. 1 netiešas zibensizlādes radīta elektrolīnijas pārklāšanās skaita F_p noteikšanai, pieņemts, ka $h_l = 10$ m, jo IEEE 1410 standartā [58] visi aprēķini un līknes doti tikai šādam elektrolīnijas augstumam.

Ar SINTEF metodoloģiju rezultātu iegūšanai izmantota interpolācija, jo 1.3. attēlā dotajā nomogrammā ikgadējais zibens spērienu blīvums N_g ir līdz 1,6 zibensizlādēm gadā/km², bet aplūkotajā piemērā $N_g = 1,692$ zibensizlādes gadā/km² (no 5.2. tabulas), tāpat aizsargietaišu izvietojuma biežums dots tikai ik pēc 100 m, 200 m un 300 m. Posma veidam Nr. 1 ar SINTEF metodoloģiju pieņemts, ka tuvumā esošo koku augstums $h_k = 6$ m, jo augstākiem kokiem, ir pieņemts, ka tie pilnībā aizsargā elektrolīniju un tiešas zibensizlādes. Posma veidam Nr. 2, izmantojot SINTEF metodoloģiju, lai salīdzinātu piedāvātās metodoloģijas iegūtos rezultātus, papildus pieņēmumi nav nepieciešami. Posma veidam Nr. 3, izmantojot SINTEF metodoloģiju ir iespējami 2 varianti, jo nav noteikts, cik tālu elektrolīnijai tuvumā esošie koki ietekmē elektrolīnijas pārklāšanās skaitu. 1. variants – elektrolīnijas tuvumā esošie koki elektrolīniju aizsargā pilnībā, jo $h_k = 20$ m. 2. variants – elektrolīnija atrodas klajā laukā, jo attālums $s_k = 40$ m un var pieņemt, ka tādā attālumā esošie koki neietekmē pārklāšanās skaitu. Šajā variantā rezultāts sakrīt ar posma veida Nr. 2 iegūtajiem rezultātiem.

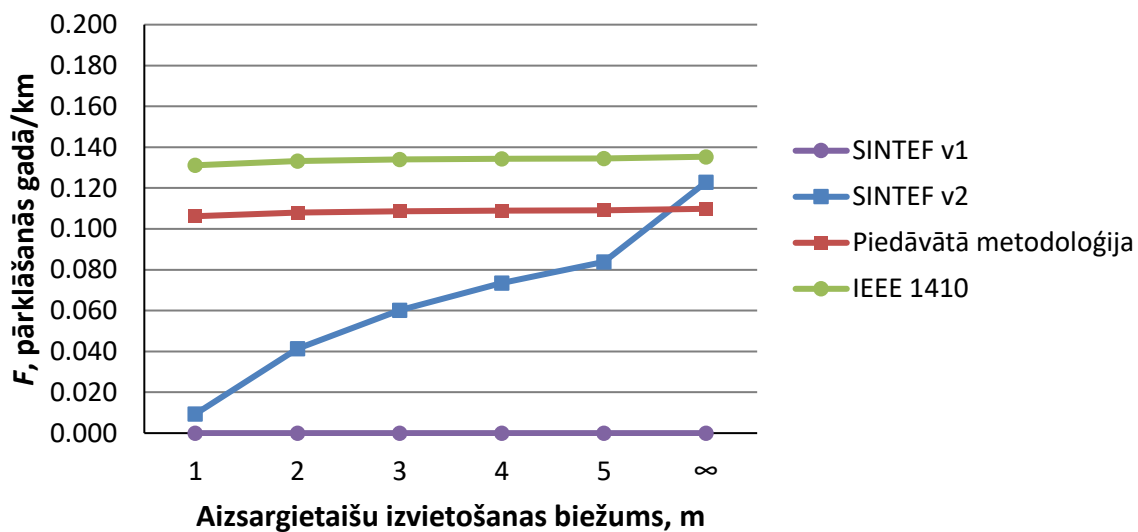
Elektrolīnijas pārklāšanās skaits F , atkarībā no aizsargietaišu izvietojuma biežuma posma veidam Nr. 1, 2 un 3 dots attiecīgi 6.16., 6.17. un 6.18. attēlā.



6.16. att. Posma veida Nr. 1 rezultātu salīdzinājums



6.17. att. Posma veida Nr. 2 rezultātu salīdzinājums



6.18. att. Posma veida Nr. 3 rezultātu salīdzinājums

Analizējot iegūtos rezultātus, redzams, ka:

- posma veidam Nr. 1 ar piedāvāto metodoloģiju iegūtais rezultāts ir par 14 % mazāks kā ar IEEE 1410 metodoloģiju iegūtais rezultāts, un atkarībā no aizsargietaišu izvietojuma biežuma 5,4 līdz 73,1 reizes lielāks kā ar SINTEF metodoloģiju iegūtais rezultāts;
- posma veidam Nr. 2 attiecīgi par 4 % mazāks kā ar IEEE 1410 un 1,5 līdz 19,5 reizes lielāks kā ar SINTEF metodoloģiju iegūtais rezultāts;
- posma veidam Nr. 3 attiecīgi par 19 % mazāks kā ar IEEE 1410 un 1,3 līdz 11,3 reizes lielāks vai gadījumā bez aizsargietais 11 % mazāks rezultāts kā ar SINTEF metodoloģiju iegūtais rezultāts, salīdzinot 2. variantu rezultātus, jo 1. variantā elektrolīnijas pārklāšanās nenotiek.

Ar IEEE 1410 metodoloģiju iegūto rezultātu atšķirība rodas atšķirīgā nasegšanas koeficienta S_f un netiešas zibensizlādes radīta elektrolīnijas pārklāšanās skaita F_p aprēķina metodes dēļ. Piedāvātajā metodoloģijā nasegšanas koeficienta noteikšanai ir izmantota sadales tīklu elektrolīnijām precīzāka zibens uztvērējvirsmas metode, kur zibensizlādes attālums no zemes ir vienāds ar zibensizlādes attālumu no elektrolīnijas (skat. 3.4.2. apakšnodaļu), bet IEEE 1410 zibensizlādes attālums no zemes ir par 10 % mazāks kā zibensizlādes attālums no elektrolīnijas (skat. 3.4.1. apakšnodaļu). Rezultātā piedāvātā metodoloģija posma veidam Nr. 1 dod lielāku S_f vērtību, jo ar IEEE 1410 metodi $S_f = 0$. Posma veidam Nr. 3 apmēram 21 % lielāku S_f vērtību, salīdzinājumā ar IEEE 1410 izmantoto metodi. Šī iemesla dēļ lielāka atšķirība novērojama tieši posma veidu Nr. 1 un 3 rezultātos, bet vismazākā posma veida Nr. 2 rezultātos, kur nasegšanas koeficients $S_f = 0$ pēc abām metodēm. Piedāvātā metodoloģija netiešas zibensizlādes radītas elektrolīnijas pārklāšanās skaita aprēķinam izmanto Ruska vienkāršoto modeli (skat. 4.3.2. apakšnodaļu), bet IEEE 1410 tiek lietotas ar LIOV kodu (skat. 4.3.3. apakšnodaļu) iegūtas vērtības, kas dotas 1.1. attēlā. Rezultātā ar piedāvāto metodoloģiju iegūtais $F_p = 0$ pārklāšanās gadā/km, bet ar IEEE 1410 metodoloģiju $F_p = 0,005$ pārklāšanās gadā/km, ja $CFO_T = 191,7$ kV. Tātad var secināt, ka netiešas zibensizlādes radīta pārklāšanās skaita aprēķinam pietiekoši precīzu rezultātu dod arī vienkāršotais Ruska modelis, kura pielietojumam nav nepieciešamas papildus datorprogrammas.

Ar SINTEF metodoloģiju iegūto rezultātu lielā atšķirība rodas jau no ikgadējā zibens spērienu blīvuma N_g aprēķinot ikgadējo zibens spērienu skaitu elektrolīnijā N , ņemot vērā apkārtējo koku ietekmi. Posma veidam Nr.1 ar piedāvāto metodoloģiju $N_s = 0,149$, bet ar SINTEF metodoloģiju $N_s = 0,026$ zibensizlādes gadā/km, tātad atšķirība ir 5,7 reizes. Posma veidam Nr. 2 šī atšķirība ir 1,6 reizes, bet posma veidam Nr. 3 ar SINTEF 2. variantu rezultātiem – 0,9 reizes. Bez tuvumā esošo koku ietekmes aprēķina atšķirības, attālumam starp aizsargietaisēm SINTEF metodoloģijā ir lielāka ietekme uz pārklāšanās skaitu F , salīdzinot piedāvātās metodoloģijas rezultātus. Šī lielā atšķirība skaidrojama ar neskaidrajiem izejas lielumiem 1.3. attēla nomogrammas iegūšanai, piemēram, elektrolīnijas augstuma h_l , tuvumā esošo koku attāluma s_k , ikgadējā zibens spērienu blīvuma N_g aprēķina formulas (skat. 3.1. tabulu), elektroģeometriskā modeļa zibensizlādes attāluma r_{sd} aprēķina koeficientiem (skat. 3.3. tabulu), elektrolīnijas CFO_T , u.c.

Ar IEEE 1410 un SINTEF metodoloģiju noteikto elektrolīnijas skaitu F , izsakot elektrolīnijas pārklāšanās biežumā ζ , izmantojot (5.3) izteiksmi, un izmantojot piedāvātos ζ robežkriterijus no 5.1. tabulas, iegūstam aizsargietaišu izvietojuma biežumu, kas ir apkopots 6.2. tabulā.

Laidumu skaita starp aizsargietaisēm salīdzinājums

Aizsargietaišu izvietošanas metodoloģija		Posma veids Nr. 1	Posma veids Nr. 2	Posma veids Nr. 3
LEK 015		-	4 – 5	4 – 5
SINTEF		-	4	4
IEEE 1410		2	2	3
Piedāvātā metodoloģija	XLPE 2,3 mm izolācija	3	2	3
	XLPE 3,1 mm izolācija	3	2	4
	HDPE 3,9 mm izolācija	3	3	4

No rezultātiem redzams, ka piedāvātās metodoloģijas rezultāti ir diapazonā starp SINTEF un IEEE 1410 metodoloģiju rezultātiem. SINTEF metodoloģijā aizsargietaišu izvietošanas biežums sakrīt ar LEK 015 doto aizsargietaišu izvietošanas biežumu, kas paredz mazāku izolētā vada aizsardzību, kā tas ir piedāvātajā metodoloģijā, tomēr, izmantojot alternatīvu izolētā vada izolācijas veidu, iespējams palielināt laidumu skaitu starp aizsargietaisēm, nesamazinot elektrolīnijas aizsardzību.

6.3. Sestās nodaļas secinājumi

1. Pētījumā iegūtie rezultāti liecina, ka piedāvātā metodoloģija un izvirzītais ζ kritērijs zibensaizsardzības ietaišu izvietošanas biežuma novērtēšanai efektīvi var tikt izmantots pie jebkuriem zibensizlādes, elektrolīnijas ģeometriskajiem un elektriskajiem parametriem un ģeogrāfiskajiem apstākļiem.
2. Elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ visbūtiskāk ietekmē elektrolīnijas atrašanās vieta jeb ģeogrāfiskie apstākļi, t.i., tuvumā esošo objektu augstums h_k un attālums s_k no elektrolīnijas, negaisa dienu skaits gadā T_d , kā arī grunts pretestība ρ . Zibensizlādes un elektrolīnijas ģeometrisko parametru ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās biežumu un no tā izrietošo aizsargietaišu izvietošanas biežumu ir neliela vai praktiski nekāda. Piedāvātās metodoloģijas algoritmā parametriem, kas visbūtiskāk ietekmē ζ vērtību, noteikšanai ir pievērsta papildus vērība.
3. Nozīmīgs elektrolīnijas parametrs, kas ietekmē aizsargietaišu izvietošanas biežumu, ir elektrolīnijas spriegumizturība CFO, kas, samazinoties zem 175 kV, strauji samazina elektrolīnijas pārklāšanās biežumu, tāpēc tas piedāvātajā metodoloģijā ir ņemts vērā visā elektrolīnijas ekspluatācijas periodā, prognozējot elektrolīnijas nolietošanos.
4. Iegūtie rezultāti pierāda ieviestā kritērija ζ lietderīgumu arī elektrolīnijas novecošanās prognozē un alternatīvu analīzē, jo robežkritēriji saistīti ar elektrolīnijas ekspluatācijas apstākļiem un parametriem, piemēram, vidējo ekspluatācijas ilgumu. Ja ζ pārsniedz vidsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas vidējo ekspluatācijas periodu, kas ir 30 gadi, tad

aizsargietais nav nepieciešams uzstādīt. Ja $\zeta < 30$ gadi, tad aizsargietais piedāvāts izvietot katrā līdz katrā 5. balstā, balstoties uz aizsargietaišu izvietojuma biežuma ietekmi uz netiešas zibensizlādes elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F_p .

5. Izstrādātās metodoloģijas rezultāti salīdzinājumā ar IEEE 1410 metodoloģiju atšķiras par 5 līdz 20 %, atkarībā no tuvumā esošajiem objektiem. Izstrādātā metodoloģija dod sadales tīklu līnijām precīzāku nasegšanas koeficientu S_f , tāpēc posmos, kur tuvumā elektrolīnijas tuvumā atrodas koki vai citi objekti šī atšķirība ir lielāka kā klajā laukā esošai elektrolīnijai. Piedāvātās metodoloģijas iegūtie rezultāti atrodas diapazonā starp IEEE 1410 un SINTEF metodoloģiju rezultātiem. LEK 015 dotais aizsargietaišu izvietojuma biežums sakrīt ar SINTEF metodoloģijas rezultātu.

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

1. Piedāvāta metodoloģija un algoritms zibensaizsardzības ietaišu izvietojanas biežuma noteikšanai, kas bez zibensizlādes radīta elektrolīnijas pārklāšanās skaita F , kas līdz šim ir bijis vienīgais novērtēšanas kritērijs, ņem vērā prognozētā izolēto vadu elektrolīnijas nolietojuma ietekmi uz elektrolīnijas pārklāšanās skaitu un biežumu, kā arī alternatīvu analīzi, izvēloties elektrolīnijas elementus un balstu tipus.
2. Aizsargietaišu izvietojanas biežumu vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnījās visbūtiskāk ietekmē elektrolīnijas CFO , kā arī elektrolīnijas ģeogrāfiskie apstākļi jeb elektrolīnijas atrašanās vieta un tuvumā esošo objektu augstums un attālums no elektrolīnijas. No iegūtajiem rezultātiem redzams, ka tuvumā esošie objekti, nosedzot elektrolīniju, var izmainīt elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ vairāk nekā deviņas reizes, bet negaisa dienu skaits T_d līdz pat divām reizēm, tāpēc parametriem, kas visbūtiskāk ietekmē ζ vērtību, piedāvātās metodoloģijas algoritmā ir pievērsta papildu uzmanība.
3. Apkopjot statistiku par zibensizlādi Latvijas teritorijā laikā posmā no 2006. līdz 2017. gadam, iegūti šādi dati:
 - negatīvas polaritātes zibensizlāde Latvijas teritorijā ir 86 % gadījumos, kas sakrīt ar literatūrā dotajiem lielumiem;
 - vidējā mediānā zibensstrāvas maksimumvērtība negatīvas polaritātes zibensizlādei $I_m = 16,4$ kA, kas ļauj veikt aprēķinus ar Latvijas reģionam atbilstošu zibensstrāvas maksimumvērtību, kas ir nepilnas divas reizes mazāka nekā literatūrā dotā mediānā vērtība, rezultātā ir palielināta aprēķinu precizitāte;
 - negaisa dienu skaits gadā T_d Latvijas teritorijā var svārstīties robežās no četrām līdz 38 negaisa dienām gadā, bet vidējās vērtības atkarība no Latvijas reģiona ir robežās no 15 līdz 23 negaisa dienām gadā. Vidējā T_d vērtība visā Latvijas teritorijā ir 19 negaisa dienas gadā.
4. *EMTP/ATP* datorprogrammā izstrādāts zibensizlādes simulācijas modelis vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnījā, ar kura palīdzību ir novērtēta zibensstrāvas maksimumvērtība I_m , kas ierosina elektrolīnijas pārklāšanos. Ar datorsimulācijas modeli iegūta aizsargietaišu izvietojanas vietas ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanos. No izstrādātā modeļa iegūtajiem rezultātiem redzams, ka barošanas avota pusē uzstādīta aizsargietaisē arī var pasargāt elektrolīniju no zibensizlādes, tomēr elektriskais loks biežāk veidojas slodzes pusē esošajā balstā.
5. Promocijas darbā izstrādātas tuvumā esošo objektu noseģšanas koeficienta S_f vērtību tabulas un līknes Latvijas teritorijas 10 %, 50 % un 90 % varbūtības zibensstrāvas maksimumvērtībām, elektrolīnijas augstumiem h_l no 7 līdz 13 m, septiņiem dažādiem tuvumā esošo objektu augstumiem h_k un to attālumam no elektrolīnijas s_k robežās no 2,5 līdz 80 m. Rezultātā, salīdzinot ar IEEE 1410 metodoloģiju, sadales tīklu līnijām iegūtas precīzākas S_f vērtības.
6. Izstrādāta atsevišķu elektrolīnijas elementu (izolatoru, izolētā vada un izolējošā materiāla) spriegumizturības un zibensaizsardzības ietaišu nostrādes sprieguma datubāzes struktūra, ko iespējams ērti papildināt, lai veiktu alternatīvu analīzi, izvēloties elektrolīnijas elementus.

7. Izstrādātas prognozētā elektrolīnijas spriegumizturības samazinājuma koeficienta k_{CFO} līknes, kas ņem vērā dažādus mehāniskus bojājumus, kas nav saistīti ar elektrolīnijas ekspluatāciju, apkārtējās vides piesārņojuma un elektrolīnijas izolācijas nolietojuma ietekmi uz vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas spriegumizturību.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Accessories for Medium Voltage Distribution Networks – Ensto Overhead. Ensto Sekko Oy, Finland, 2006. 52 p.
2. Agrawal, A. K., Price, H. J., and Gurbaxani, S. H. *Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-22, May 1980. pp. 119-129.
3. Aizsargjoslu likums. Stājas spēkā: 11.03.1997. Publicēts: "Latvijas Vēstnesis", 56/57 (771/772), 25.02.1997.
4. Ametani, A. *Lightning surge analysis by EMTP and Numerical Electromagnetic Analysis Method*. 30th International Conference on Lightning Protection, Calgari, Italy, 2010.
5. Anderson, J. G. *Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, 2nd edition*. Palo Alto, CA, USA, Electric Power Research Institute, 1982. 640 p.
6. Armstrong, H. R., Whitehead, E. R. *Field and analytical studies of transmission line shielding*. IEEE Trans. 1968; PAS-87, issue 1. pp. 270-281.
7. Artigas S. E. S. *The Ionizing Surfaces method: An alternative approach for lightning protection design*. International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, Brazil, 2013. pp. 304-308.
8. AS "Sadales tīkls" Tehniskā politika (apstiprināta 09.05.2018).
9. Ausgrid Network Standard 220. *Overhead Design Manual*. February 2011, 261 p.
10. Baba, Y., Rakov, V. A. *Electromagnetic models of the lightning return stroke*. Journal of geophysical research, vol. 112. 2007.
11. Baba, Y., Rakov, V. A. *Voltages Induced on an Overhead Wire by Lightning Strikes to a Nearby Tall Grounded Object*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 48, no. 1, February 2006. pp. 212-214.
12. Barkāns, J. *Elektrisko sistēmu projektēšana*. Rīga: RTU, 2005. 164 lpp.
13. Borecki, M., Starzyński, J., Krawczyk, Z. *The Comparative Analysis of Selected Overvoltage Protection Measures for Medium Voltage Overhead Lines with Covered Conductors*. Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Koscielisko, Poland, June 2017.
14. Borghetti, A., Nucci, C. A., Paolone, M. *Estimation of the Statistical Distributions of Lightning Current Parameters at Ground Level from the Data Recorded by Instrumented Towers*. IEEE transactions on power delivery, vol. 19, no. 3, July 2004. pp. 1400-1409.
15. Borghetti, A., Nucci, C.A., Paolone, M., Rachidi, F. *Characterization of the Response of an Overhead Line to Lightning Electromagnetic Fields*. Proc of the 25th International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Greece, September 2000. Correction: Cigre WG 33.02 meeting, Bologna, September 2000.
16. Brown, G., Whitehead, E. R. *Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding – II*. IEEE Trans. on PA&S, 1969, pp. 617-626.
17. Brown, R. E. *Electric Power Distribution Reliability*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2009. 504 p.
18. Bulinski, A., Bamji, S., Densley, J., Shimizu, N. *Accelerated aging of XLPE cable insulation*. Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena, Buck Hill Falls, USA, October 1983. pp. 294-300.

19. Cabral, R. J., Gazzana, D. S., Leborgne, R. C., Bretas, A. S., Dias, G. A. D., Telló, M. *Analysis of Distribution Lines Performance Against Lightning Using ATP-EMTP*. International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe. Rome, Italy, 2012.
20. CIGRE WG 33.01. *Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines. Part II: Coupling Models for the Evaluation of the Induced Voltages*. ELECTRA No 162, October 1995. pp. 121-145.
21. CIGRE. *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*. CIGRE Technical Report 063, October 1991.
22. CIGRE. *Guideline for Numerical Electromagnetic Analysis Method and its Application to Surge Phenomena*. CIGRE Technical Report 543. June 2013. 105 p.
23. CIGRE. *Protection of Medium Voltage and Low Voltage Networks against Lightning Part 2: Lightning protection of Medium Voltage Networks*. CIGRE Technical Report 441, December 2010. 38 p.
24. CIGRE. *Protection of MV and LV networks against lightning*. CIGRE Technical Report 287, February 2006.
25. CIRED/CIGRE Working Group 05. *Protection of MV and LV networks against lightning. Part I. Basic information*. CIRED. 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part I, 1997.
26. Cooray, V. *Calculating lightning-induced overvoltages in power lines. A comparison of two coupling models*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume: 36, Issue: 3, August 1994. pp. 179-182.
27. Cooray, V. *Lightning protection*. Power and energy series 58.– London: The institution of engineering and technology, 2010. 1036 p.
28. Cooray, V. *The lightning flash*. Power and energy series 34.– London: The institution of engineering and technology, 2008. 574 p.
29. Cooray, V., De la Rosa, F. *Shapes and amplitudes of the initial peaks of lightning-induced voltage in power lines over finitely conducting earth: theory and comparison with experiment*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-34, no. 1, January 1986. pp. 88-92.
30. CS type composite silicone insulators for all pollution of the atmosphere levels. [skatīts: 13.06.2018]. Piejams: <http://www.aiz.lt/en/production/insulators/composite-silicone-insulators-for-overhead-power-transmission-lines/lk-70-20-iii-lk-70-20-vii>
31. Cummins, K. L., Krider, E. P., Malone, M. D. *The U.S. National Lightning Detection Network™ and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 40, no. 4, November 1998, pp. 465-480.
32. Darveinza, M., Saha, T. K. *The reliability and power quality performance of overhead lines - with reference to the electrical properties of wood and covered conductors*. 7th International Energy Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Adelaide, Australia, 2003. pp. 1661-1668.
33. Darveniza, M. *A practical extension of Rusck's formula for maximum lightning induced voltage that accounts for ground resistivity*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD 22, no. 1, January 2007. pp 605-612.
34. Data Sheet 1HC0075853 E01 AD. *ABB Surge Arrester POLIM-D*. ABB, 2013. 5 p.

35. De la Rosa, F., Valdiviva, R., Pérez, H., Loza, J. *Discussion about the inducing effects of lightning in an experimental power distribution line in Mexico*. IEEE Trans. on PWDR, Vol. 3, No. 3, July 1988. pp. 1080-1089.
36. Diendorfer, G. *Induced voltage on an overhead line to nearby lightning*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-32, no. 4, November 1990. pp. 292-299.
37. Dudurych, I. M., Gallagher, T. J., Corbett, J., Escudero, M. V. *EMTP analysis of the lightning performance of a HV transmission line*. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 150, no. 4, July 2003. pp. 501–506.
38. Eduful, G., Asante, K. N. *In search of electric power reliability in forested terrain with covered conductors: The ECG experience*. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science Vol II, San Francisco, USA, 2012. pp. 1039-1043.
39. Elrodesly, K. *Comparison Between Heidler Function and The Pulse Function for Modelling the Lightning Return-Stroke Current*. Master thesis. Toronto, Ontario, Canada, Ryerson University, 2010. 111 p.
40. EN 62305-1:2011 *Protection against lightning. General principles*, 74 p.
41. IEC 60071-2:2018 *Insulation co-ordination – Part 2: Application guidelines*, 156 p.
42. Eriksson, A. J. *The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, no. 2, July 1987, pp. 859-870.
43. Eriksson, A. J., Meal, D. V., Stringfellow, M. F. *Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, April 1982. pp. 960-968.
44. Forssén, K. *Resilience of Finnish electricity distribution networks against extreme weather conditions*. Master thesis. Aalto University, School of Engineering, 2016. 98 p.
45. Gardner, R. L., Baker L., Baum C. E., Andersh D. J. *Comparison of lightning with public domain HEMP waveforms on the surface of an aircraft*, 6th EMC Symposium, Zurich, 1985, pp. 175-180.
46. Golde, R. H. *The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes to Transmission Lines*. AIEE Transactions, vol. 64, no. 12, 1945. pp. 902-910.
47. Hartono, Z. A., Robiah, I. *The collection surface concept as a reliable method for predicting the lightning strike location*. 25th International Conference on Lightning Protection, September 2000, Rhodes, Greece, pp. 328-333.
48. Hashimoto, Y., Fukui, H., Yano, T., Tsukazaki, M., Sakakiwara, M. *Development of Current Limiting Arcing Horn (MOV type arrester with external gap) for 22kV power distribution line*. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, China, November 2011.
49. Heidler, F., Cavetic, J. M. *A Class of Analytical Functions to Study the Lightning Effects Associated with the Current Front*. European Transaction on Electrical Power. Vol. 12, No. 2, April 2002. pp. 141-150.
50. Heidler, F., Cavetic, J. M., Santic, B. V. *Calculation of Lightning current parameters*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 14, No. 2, April 1999. pp. 399-404.
51. Heidler, F., Zischank, W., Flisowski, Z., Bouquegneau, Ch., Mazzetti, C. *Parameters of lightning current given in IEC 62305 - background, experience and outlook*. 29th International Conference on Lightning Protection. Uppsala, Sweden. 2008 June 23-26.

52. Hileman A. R. *Insulation Coordination for Power Systems*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 1999. 772 p.
53. Hileman A. R. *Weather and Its Effect on Air Insulation Specifications*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, October 1984, pp. 3104-3116.
54. Idone, V. P., Orville, R. E. *Lightning Return Stroke Velocities in the Thunderstorm Research International Program*. Journal of Geophysical Research, vol. 87, June 1982. pp. 4903-4915.
55. IEEE Modelling and Analysis of System Transients Working Group. *Modelling guidelines for fast front transients*. IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 4, January 1996. pp. 493-506.
56. IEEE Standard 1243–1997. *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*. June 1997. 36 p.
57. IEEE Standard 1410–2004. *IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*. July 2004. 43 p.
58. IEEE Standard 1410–2010. *IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*. January 2011. 63 p.
59. IEEE Standard 1862–2014. *IEEE Recommended Practice for Overvoltage and Insulation Coordination of Transmission Systems at 1000 kV AC and Above*. May 2014. 54 p.
60. IEEE Standard 998–2012. *IEEE Guide for direct lightning stroke shielding of substations*. April 2013. 227 p.
61. Jankov, V. *Estimation of Maximal Voltage Induced on an Overhead Line Due to the Nearby Lightning*. IEEE transactions on Power Delivery, Vol 12, No 1, January 1997. pp. 315-324.
62. Jones, R. D. *On the use of tailored return-stroke current representation to simplify the analysis of lightning effect on systems*. IEEE Trans. on EMC, 1977, pp 95-96.
63. Kernn, A., Schelthoff, C., Mathieu, M. *Calculation of interception efficiencies for air-terminations using a dynamic electro-geometrical model*. International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, Brazil, 2011. pp. 25-30.
64. Kizhlo, M., Kanbergs, A. *Research of the Parameter Changes of the Grounding System*. World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, Nanjing, China, September 2009.
65. Kizhlo, M., Kanbergs, A., Kizhlo, M. *Correlation analysis between grounding resistance and seasonal variations of upper soil resistivity of two-year period in Balozhi, Latvia*. International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italy, June 2012. pp. 890-893.
66. Klairuang N., Pobpom W., Hokierti J. *Effects of electric fields generated by direct lightning on ground to underground cables*. 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore, November 2004, pp. 1117-1121 Vol.2.
67. Klutke, G. A., Kiessler, P. C., Wortman, M. A. *A Critical Look at the Bathtub Curve*. IEEE Transactions on Reliability, vol. 52, no. 1, March 2003. pp. 125-129.
68. Krišāns, Z., Skujiņa, V., Staltmanis, I., Timmermanis, K. *Elektroenerģētikas pamatterminu skaidrojošā vārdnīca, 1. daļa*. Rīga, Jumava, 1997. 343 lpp.
69. Kuussaari, M., Mutila, T. *Arc Protection of Covered Conductor Lines in Medium Voltage Networks*. Research report, Fortum Technology, 18 March 1999. 70 p.

70. Lehtonen, M. *Fault rates of different types of medium voltage power lines in different environments*, Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, Kuressaare, Estonia 2010. pp. 197-202.
71. LEK 015. *Vidsprieguma /6, 10, 20 kV/ gaisvadu elektrolīnijas galvenās tehniskās prasības*. Latvijas energostandarts. Trešais izdevums, 2016. 42 lpp.
72. LEK 021. *Izolēto vadu montāža 20 kV gaisvadu līnijās. Vadu montāžas tabulas*. Latvijas energostandarts. Pirmais izdevums, 2001. 45 lpp.
73. LEK 042-1. *Pārspriegumu aizsardzība vidsprieguma elektrotīklos*. Latvijas energostandarts. Pirmais izdevums, 2005. 35 lpp.
74. LEK 048. *Elektroietaišu zemēšana un elektrodrošības pasākumi. Galvenās tehniskās prasības*. Latvijas energostandarts. Otrais izdevums, 2017. 60 lpp.
75. LEK 120. *20 kV gaisvadu elektrolīniju koka balsti. Konstruktijas un materiāli*. Latvijas energostandarts. Otrais izdevums, 2013. 283 lpp.
76. Leskinen, T. *Design of MV and HV Covered Conductor Overhead Lines*. 17th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Barcelona, Spain, May 12-15, 2003.
77. Li, M. B., Su, C. T., Shen, C. L. *The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 32 (4), May 2010. pp. 281-289.
78. Lightning Induced Overvoltage code web page – LIOV. *Introduction*. [skatīts: 03.09.2018]. Piejams: <http://www.liov.ing.unibo.it/introduction.html>
79. Lima, G. S., Gomes, R. M., Filho, R. E. S., De Conti, A., Silveira, F. H., Visacro, S., Souza, W. A. *Influence of XLPE-Covered Cables on the Impulse Withstand Voltage of a Single-Phase Structure used in Compact Distribution Lines*. International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneário Camboriú, Brazil, 28th September – 2nd October 2015. pp. 260-263.
80. Love, E. R. *Improvements on the Lightning Stroke Modelling and Application to Design of EHV and UHV Transmission Lines*. M.Sc. thesis, University of Colorado, 1973.
81. LVS EN 50397-1:2007 *Pārklātie maiņstrāvas gaisvadu līniju vadi un to armatūra nominālajam spriegumam no 1 kV līdz 36 kV (ieskaitot). 1.daļa: Pārklātie vadi*, 22 lpp.
82. LVS EN 50397-3:2010 *Pārklātie maiņstrāvas gaisvadu līniju vadi un to armatūra nominālajam spriegumam no 1 kV līdz 36 kV (ieskaitot). 3. daļa: Lietošanas norādījumi*, 20 lpp.
83. Mäkelä, A., Laurila, T. *Lightning observations in Finland, 2014*. Finnish Meteorological Institute, Report No. 2015:1, Helsinki, 2015.
84. Marti, J. R., *Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations*. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 101, 1982. pp. 147-155.
85. Master, M. J., Uman, M. A., Beasley, W. H., Darveniza, M. *Lightning induced voltages on power lines: Experiment*. IEEE Transactions on Power apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 9, September 1984. pp. 2519-2529.
86. McDermott, T. E., Short, T. A., Anderson, J. G. *Lightning protection of distribution lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994. pp. 138-152.
87. Meyer, W. S., Liu, T. H. *Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. Canadian/American EMTP User Group, 1995. 483 p.

88. Meļņikovs, V. *Elektroapgāde. 1. daļa*. Rīga, Rīgas Valsts tehnikums, 2006. 224 lpp.
89. Mikropoulos, P. N., Tsovilis, T. E. *Statistical Method for the Evaluation of the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 1; February 2013. pp. 202-211.
90. Mikropoulos, P. N., Tsovilis, T. E., Pori, A. S. *Evaluation of Lightning Attachment and Coupling Models for the Estimation of the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines*. International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. October 2014.
91. Mousa, A. M., Srivastava, K. D. *A Revised Electrogeometric Model for the Termination of Lightning Strokes on Grounded Objects*. Proceedings of International Aerospace Conference on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, Apr. 1988, pp. 342-352.
92. Nishimura, F., Cicarelli, L. D., Coelho, M., Trager, B., Soares, M. R. *Covered cable comparative testing: HDPE and XLPE evaluation*. 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, USA, November 2001.
93. Nowbakht, A., Ahrarinouri, M., Mansourisaba, M. *Presenting a new method to estimate the remaining life of aerial bundled cable network*. 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, France, June 2015.
94. Nucci, C. A., Rachidi, F. *Lightning-Induced Overvoltages*. IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session "Distribution Lightning Protection", New Orleans, April 14, 1999.
95. Omidiora, M. A. *Modelling and Experimental Investigation of Lightning Arcs and Overvoltages for Medium Voltage Distribution Lines*. Doctoral Dissertation, Helsinki, Aalto University, 2011. 191 p.
96. Omidiora, M. A., Lehtonen, M. *A Comparative Study on the Shielding Effect of Tree, Concrete Building on Direct Lightning Strokes to Medium Voltage Distribution Line*. North American Power Symposium (NAPS2008), University of Calgary, Canada, September 2008.
97. Omidiora, M. A., Lehtonen, M. *Experimental Performance of Induced Voltage on Power Line due to Lightning Discharge to nearby Tree*. International Symposium on Modern Electric Power Systems (MEPS'10), Wroclaw, Poland, September 2010.
98. Omidiora, M. A., Lehtonen, M., Hyvönen, P. *Influence of rainfall on lightning flashovers from trees to medium voltage bare and covered conductors*. The 8th International Conference 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability, Tartu, Estonia, June 2012.
99. Panosch, W., Schongrundner, K., Kominek, K. *20 kV overhead lines with covered conductors*. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. (IEE Conf. Publ No. 482), Amsterdam, Netherlands, June 2001.
100. Perez, E., Herrera, J., Torres, H. *Sensitivity analysis of induced voltages on distribution lines*. IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, June 2003.
101. Pihler, J., Tičar, I. *Design of Systems of Covered Overhead Conductors by Means of Electric Field Calculation*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005. pp. 807-814.

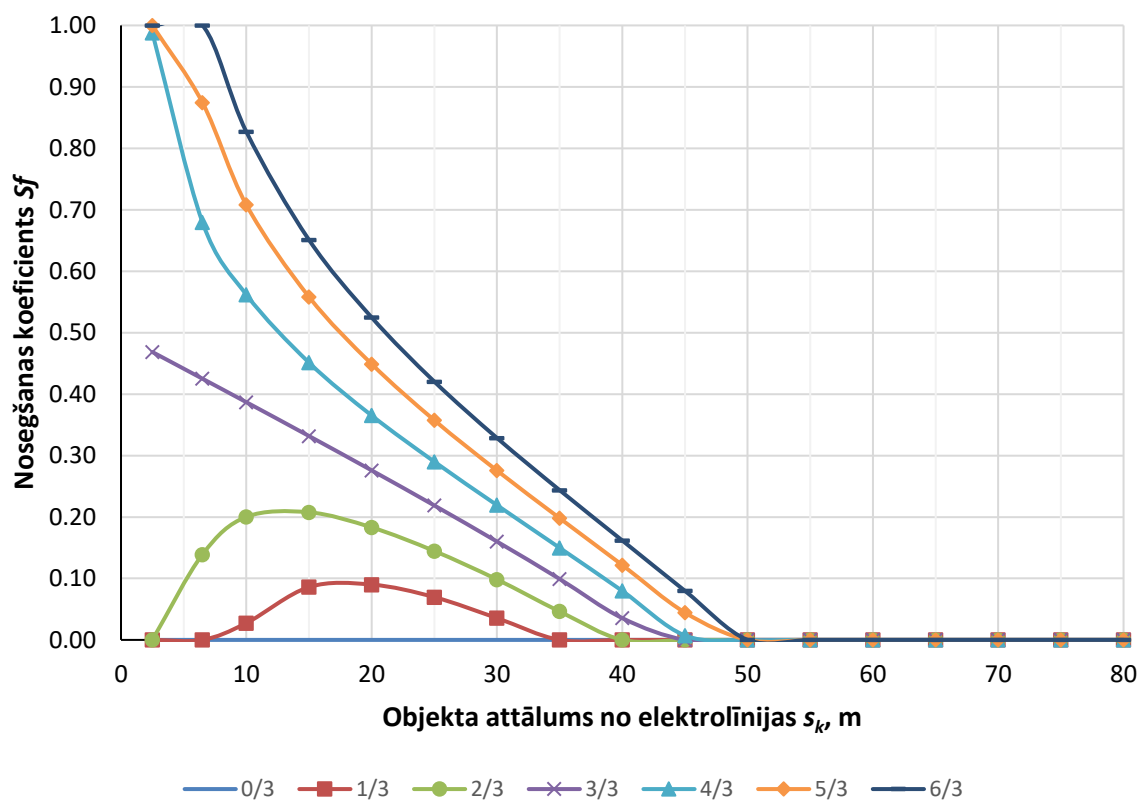
102. Podporkin, G., Pilshikov, V., Sivaev, A., Yarmarkin, M. *Lightning protection of medium voltage overhead lines with covered conductors by antenna-type long flashover arresters*. 17th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Barcelona, Spain, May 12-15, 2003.
103. Popolansky, F. *Frequency distribution of amplitudes of lightning currents*. Electra, no. 22, 1972, pp. 139-147.
104. Prikler, L., Hoidalén, H. K. *ATPDraw Version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista – User's Manual*, Report by NTNU, Norway and SINTEF Energy Research, Budapest, Hungary, November 2009. 270 p.
105. Rachidi, F., Nucci, C. A., Ianoz, M., Mazzetti, C. *Response of Multiconductor Lines to Nearby Lightning Return Stroke Electromagnetic Fields*. IEEE Transactions On PWRD, July 1997. pp. 1404-1411.
106. Rubinstein, M., Tzeng, A. Y., Uman, M. A., Medelius, P. J., Thomson, E. M. *An experimental test of a theory of lightning-induced voltages on an overhead wire*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 31, no. 4, November 1989. pp. 376-383.
107. Rusck, S. *Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low Voltage Networks*. Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm, no. 120, 1958.
108. Short, T. A. *Electric Power Distribution Handbook*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2014. 898 p.
109. Silva, G. C., Piazza, F., Munaro, M. *Field Behavior on Polymer-Covered Overhead Conductors Submitted to Natural Aging on Diverse Weather and Geographic Conditions in Brazil*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, July 2009. pp. 1651-1656.
110. Skomudek, W. *Computer Analysis of Over voltage Hazard due to Lightning Discharges in Medium Voltage Overhead Lines with Covered Conductors*. Journal of Electrical Engineering, Vol. 55, No. 5-6, 2004. pp.161-164.
111. Sļiskis, O. *Elektropārvades līniju būvniecībā izmantojamo metālkonstrukciju zibensizturības novērtējuma metodoloģija*. Promocijas darbs, Rīga, RTU, 2016. 127 lpp.
112. Solutions for overhead line networks. Accessories for up to 45 kV, Ensto, 2015. 108 p.
113. Suzuki, T., Miyake, K., Shindo, T. *Discharge Path Model in Model Test of Lightning Strokes to Tall Mast*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, no.7, 1981. pp. 3553-3562.
114. Timmermanis, K., Rozenkrons, J. *Elektrisko staciju un apakšstaciju elektriskā daļa*. Rīga: Zvaigzne, 1988. 502 lpp.
115. Uman, M. A. *The art and science of lightning protection*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 240 p.
116. Vanzovičs E., Želvis S. *Pārsprieguma aizsardzības un tām izvirzāmās normatīvās prasības*. Rīga: RTU izdevniecība, 2006. 132 lpp.
117. Voldhaug, L., Robertson, C. *MV overhead lines using XLPE covered conductors. Scandinavian experience and NORWEB developments*. IEE Colloquium on Review of Options for Overhead Rural Distribution, London, UK, March 1995.
118. Volland, H. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics. Volume 1*. Boca Raton: CRC Press, 1995. 432 p.

119. Wagner, C. F., Hileman, A. R. *The lightning stroke – II*. AIEE Trans. on PA&S, October 1961, pp. 622-642.
120. Wareing, B. *Wood Pole Overhead Lines*. Power and energy series 48.– London: The institution of engineering and technology, 2005. 336 p.
121. Wei, H., Ba-Lin, X., You-Gang, G. *Analysis of the lightning waveshape*. Radio Science Conference, 2004. Proceedings. Asia-Pacific. 2004 August 24-27.
122. Yamamoto, K., Kawasaki, M., Matsuura, K., Sekikio, S. *Shielding effect of reinforced concrete building on direct stroke to distribution line*. 11th International Symposium on High Voltage Engineering, London, 1999, Vol. 2. pp. 204-207.
123. Yokoyama S., Sato T., Shozo S., Hashimoto Y. *Lightning performance of insulated wires on overhead power distribution lines*. 30th International Conference on Lightning Protection, Calgari, Italy, September 2010.
124. Yokoyama, S. *Lightning Performance of Equipment for Power Distribution Lines*. International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, Brazil, October 2017. pp. 413-422.
125. Young, E. S., Clayton, J. M., Hileman, A. R. *Shielding of Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. S82, 1963. pp. 132-154.
126. Zhu, Z., Lu, S., Gao, B., Yi, T., Chen, B. *Life Cycle Cost Analysis of Three Types of Power Lines in 10 kV Distribution Network*. Inventions. 2016; 1(4):20.
127. Zimackis, V. *Comparison of Commonly Used Mathematical Models for Lightning Return Stroke Current Waveform*. 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues: Proceedings of CYSENI 2016, Lithuania, Kaunas, May 26-27, 2016. pp. 123-130.
128. Zimackis, V., Vitolina, S. *Simulation of Direct Lightning Strike in Medium Voltage Covered Conductor Overhead Line with Arc Protection Device*. 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Proceedings, Latvia, Riga, October 2017.
129. Zimackis, V., Vītoliņa, S. *Advancements in Building Lightning Protection Zone Estimation*. 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG): Proceedings, Riga, Latvia, May 11-13, 2015. pp. 211-214.
130. Буди, К., Боже, Б. *Воздушные линии электропередач. Устройство линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием*. Электрические сети и системы, №1, 2013 г. 40-54 стр.

PIELIKUMI

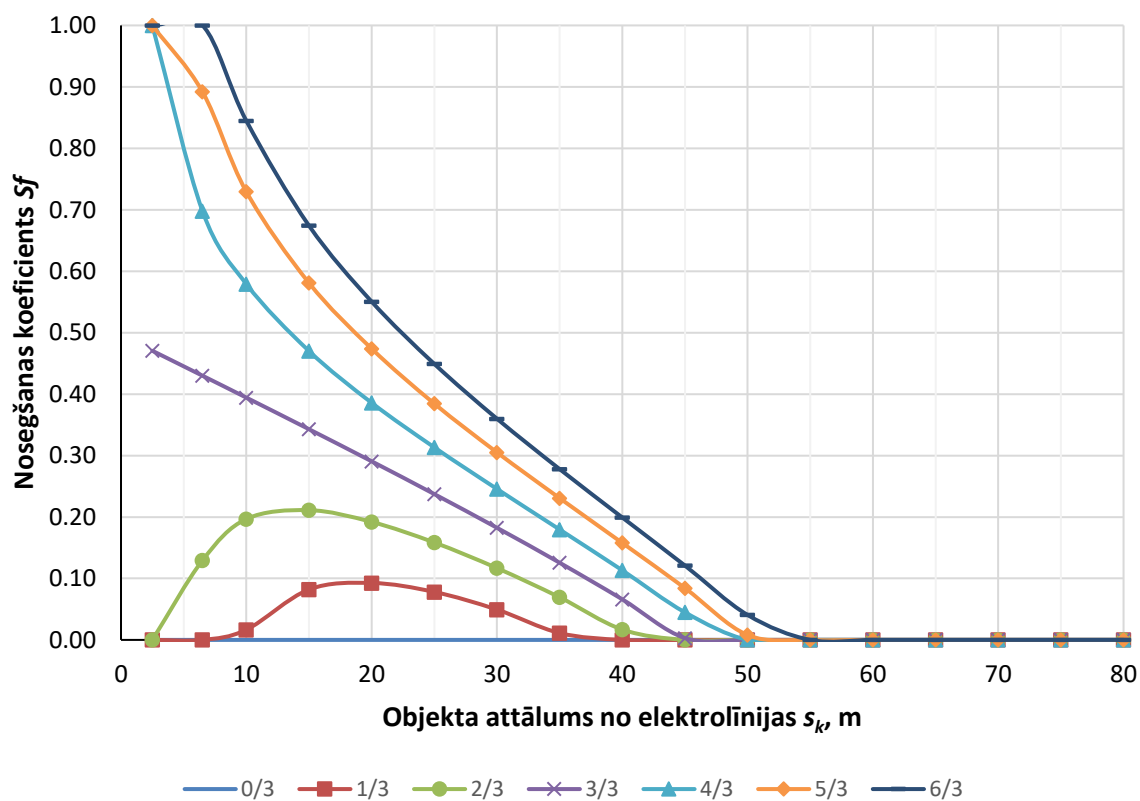
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 7$ m, $I_m = 7,0$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,47	0,99	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,14	0,43	0,68	0,87	1,00
10	0,00	0,03	0,20	0,39	0,56	0,71	0,83
15	0,00	0,09	0,21	0,33	0,45	0,56	0,65
20	0,00	0,09	0,18	0,28	0,37	0,45	0,52
25	0,00	0,07	0,14	0,22	0,29	0,36	0,42
30	0,00	0,04	0,10	0,16	0,22	0,28	0,33
35	0,00	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,24
40	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,12	0,16
45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,08
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



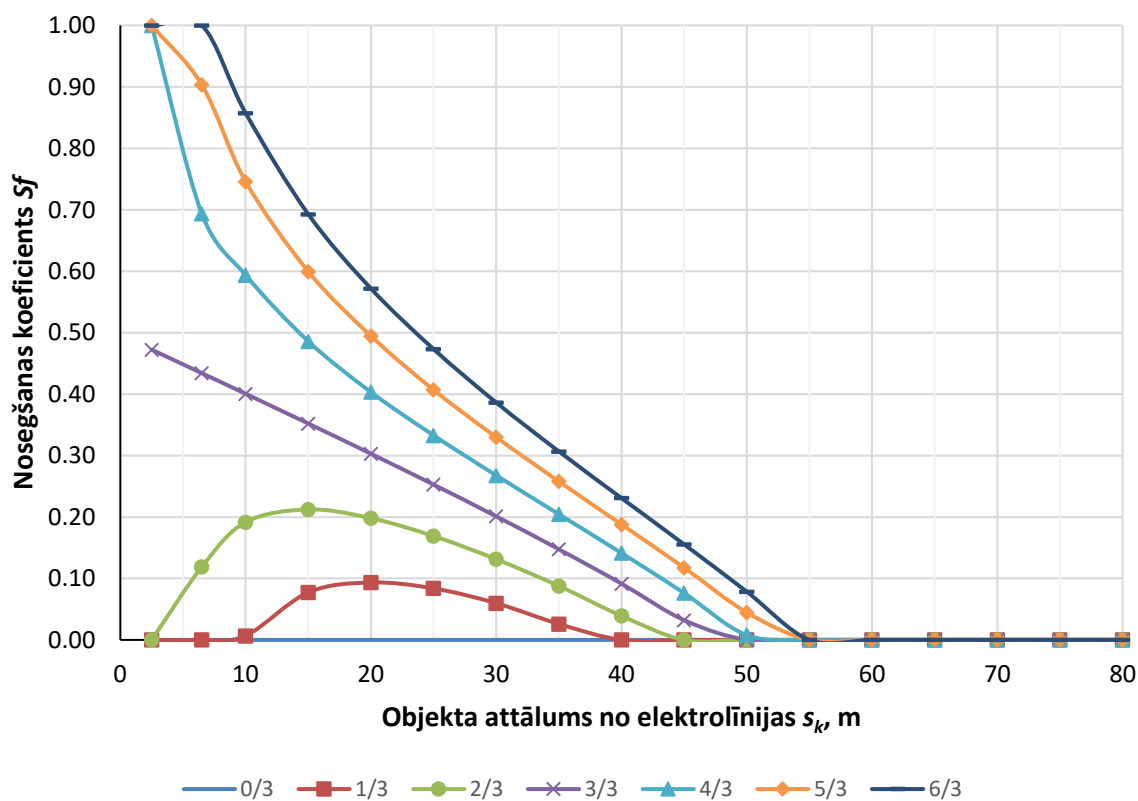
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 8$ m, $I_m = 7,0$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,47	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,13	0,43	0,70	0,89	1,00
10	0,00	0,02	0,20	0,39	0,58	0,73	0,84
15	0,00	0,08	0,21	0,34	0,47	0,58	0,67
20	0,00	0,09	0,19	0,29	0,39	0,47	0,55
25	0,00	0,08	0,16	0,24	0,31	0,38	0,45
30	0,00	0,05	0,12	0,18	0,25	0,31	0,36
35	0,00	0,01	0,07	0,13	0,18	0,23	0,28
40	0,00	0,00	0,02	0,07	0,11	0,16	0,20
45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,12
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04
55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



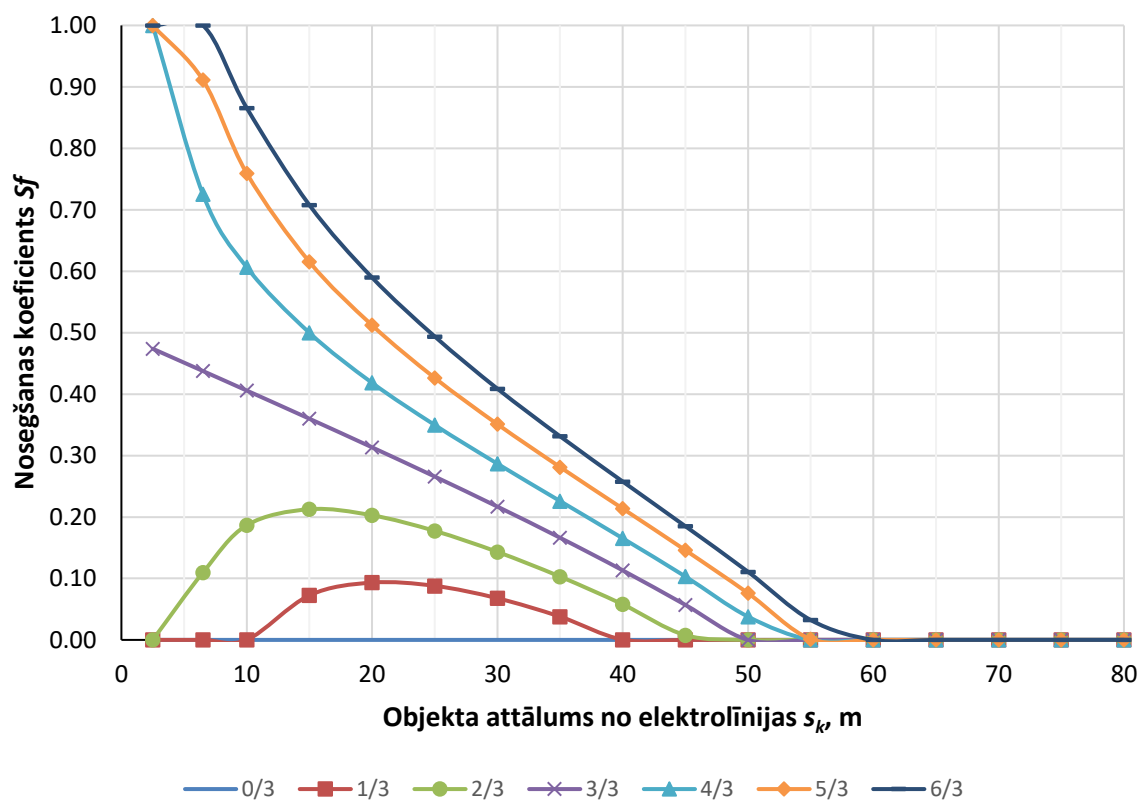
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 9$ m, $I_m = 7,0$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,47	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,12	0,43	0,69	0,90	1,00
10	0,00	0,01	0,19	0,40	0,59	0,75	0,86
15	0,00	0,08	0,21	0,35	0,49	0,60	0,69
20	0,00	0,09	0,20	0,30	0,40	0,49	0,57
25	0,00	0,08	0,17	0,25	0,33	0,41	0,47
30	0,00	0,06	0,13	0,20	0,27	0,33	0,39
35	0,00	0,03	0,09	0,15	0,20	0,26	0,31
40	0,00	0,00	0,04	0,09	0,14	0,19	0,23
45	0,00	0,00	0,00	0,03	0,08	0,12	0,16
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,08
55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



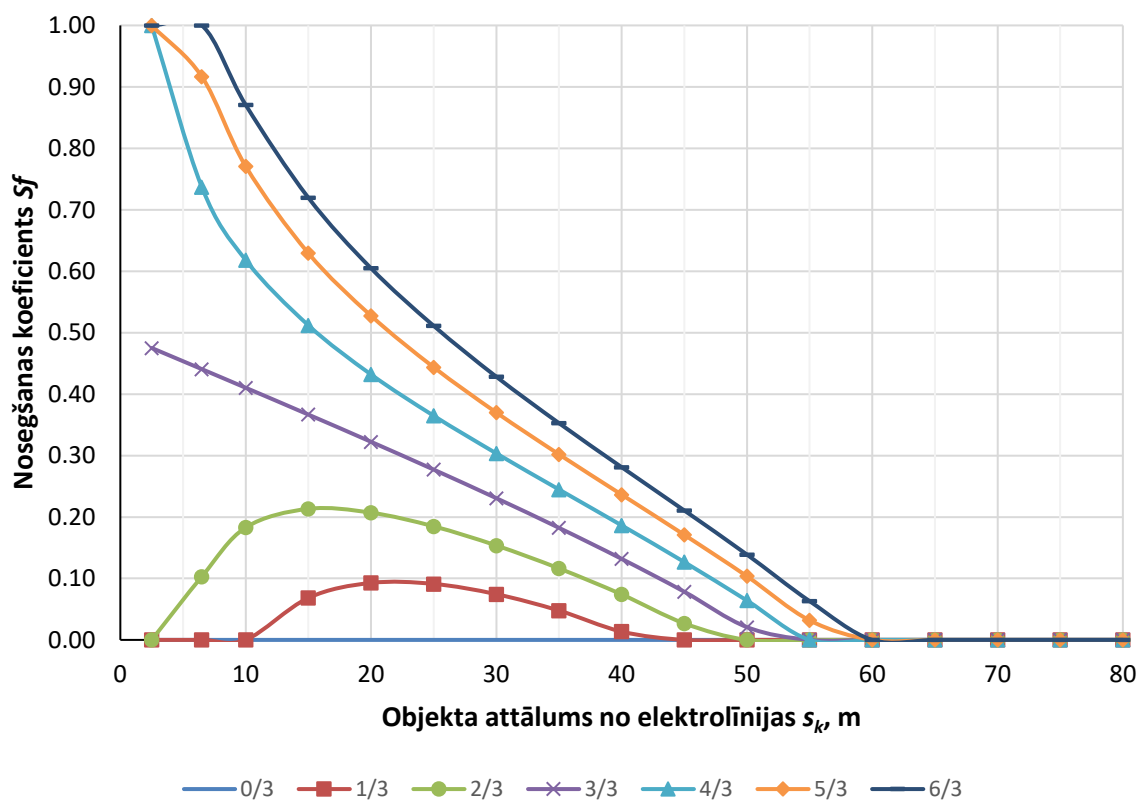
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 10$ m, $I_m = 7,0$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,47	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,11	0,44	0,73	0,91	1,00
10	0,00	0,00	0,19	0,41	0,61	0,76	0,87
15	0,00	0,07	0,21	0,36	0,50	0,62	0,71
20	0,00	0,09	0,20	0,31	0,42	0,51	0,59
25	0,00	0,09	0,18	0,27	0,35	0,43	0,49
30	0,00	0,07	0,14	0,22	0,29	0,35	0,41
35	0,00	0,04	0,10	0,17	0,23	0,28	0,33
40	0,00	0,00	0,06	0,11	0,17	0,21	0,26
45	0,00	0,00	0,01	0,06	0,10	0,15	0,19
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,11
55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



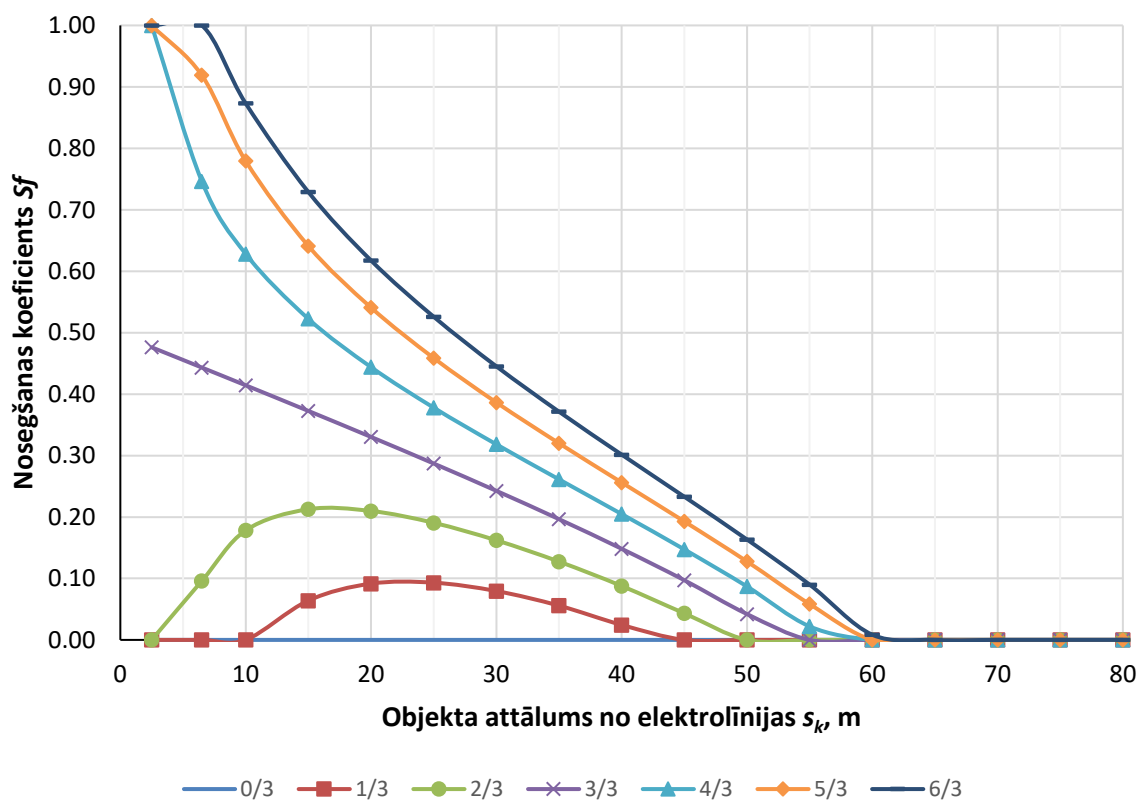
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 11$ m, $I_m = 7,0$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,10	0,44	0,74	0,92	1,00
10	0,00	0,00	0,18	0,41	0,62	0,77	0,87
15	0,00	0,07	0,21	0,37	0,51	0,63	0,72
20	0,00	0,09	0,21	0,32	0,43	0,53	0,60
25	0,00	0,09	0,18	0,28	0,36	0,44	0,51
30	0,00	0,07	0,15	0,23	0,30	0,37	0,43
35	0,00	0,05	0,12	0,18	0,24	0,30	0,35
40	0,00	0,01	0,07	0,13	0,19	0,24	0,28
45	0,00	0,00	0,03	0,08	0,13	0,17	0,21
50	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,10	0,14
55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



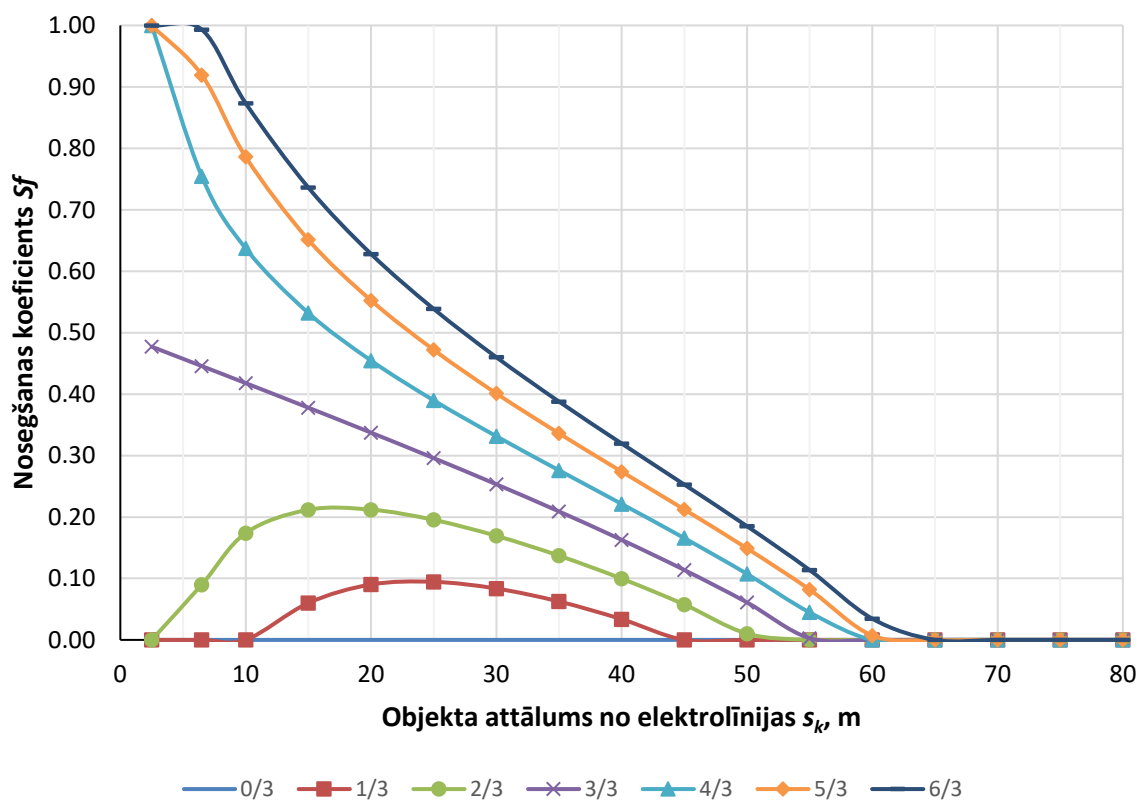
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 12$ m, $I_m = 7,0$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,10	0,44	0,75	0,92	1,00
10	0,00	0,00	0,18	0,41	0,63	0,78	0,87
15	0,00	0,06	0,21	0,37	0,52	0,64	0,73
20	0,00	0,09	0,21	0,33	0,44	0,54	0,62
25	0,00	0,09	0,19	0,29	0,38	0,46	0,53
30	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,39	0,45
35	0,00	0,06	0,13	0,20	0,26	0,32	0,37
40	0,00	0,02	0,09	0,15	0,20	0,26	0,30
45	0,00	0,00	0,04	0,10	0,15	0,19	0,23
50	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09	0,13	0,16
55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,09
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



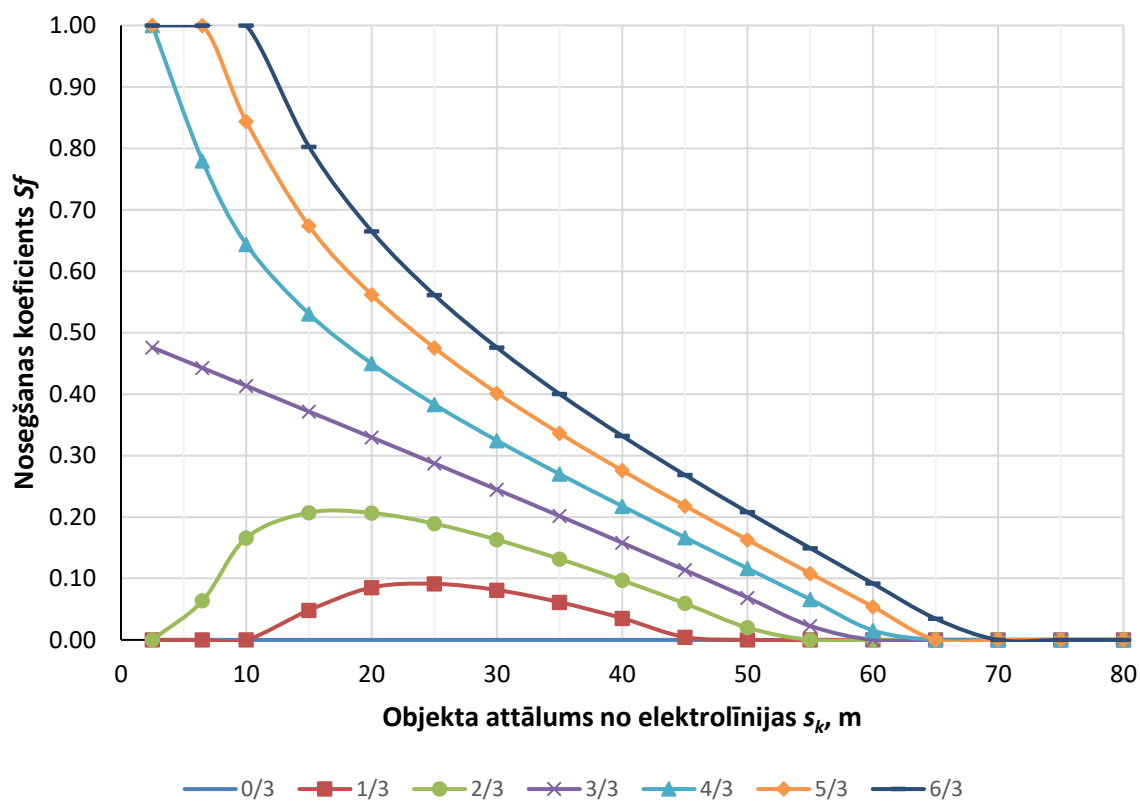
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 13$ m, $I_m = 7,0$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,09	0,45	0,75	0,92	0,99
10	0,00	0,00	0,17	0,42	0,64	0,79	0,87
15	0,00	0,06	0,21	0,38	0,53	0,65	0,74
20	0,00	0,09	0,21	0,34	0,45	0,55	0,63
25	0,00	0,09	0,20	0,30	0,39	0,47	0,54
30	0,00	0,08	0,17	0,25	0,33	0,40	0,46
35	0,00	0,06	0,14	0,21	0,28	0,34	0,39
40	0,00	0,03	0,10	0,16	0,22	0,27	0,32
45	0,00	0,00	0,06	0,11	0,17	0,21	0,25
50	0,00	0,00	0,01	0,06	0,11	0,15	0,19
55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,11
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



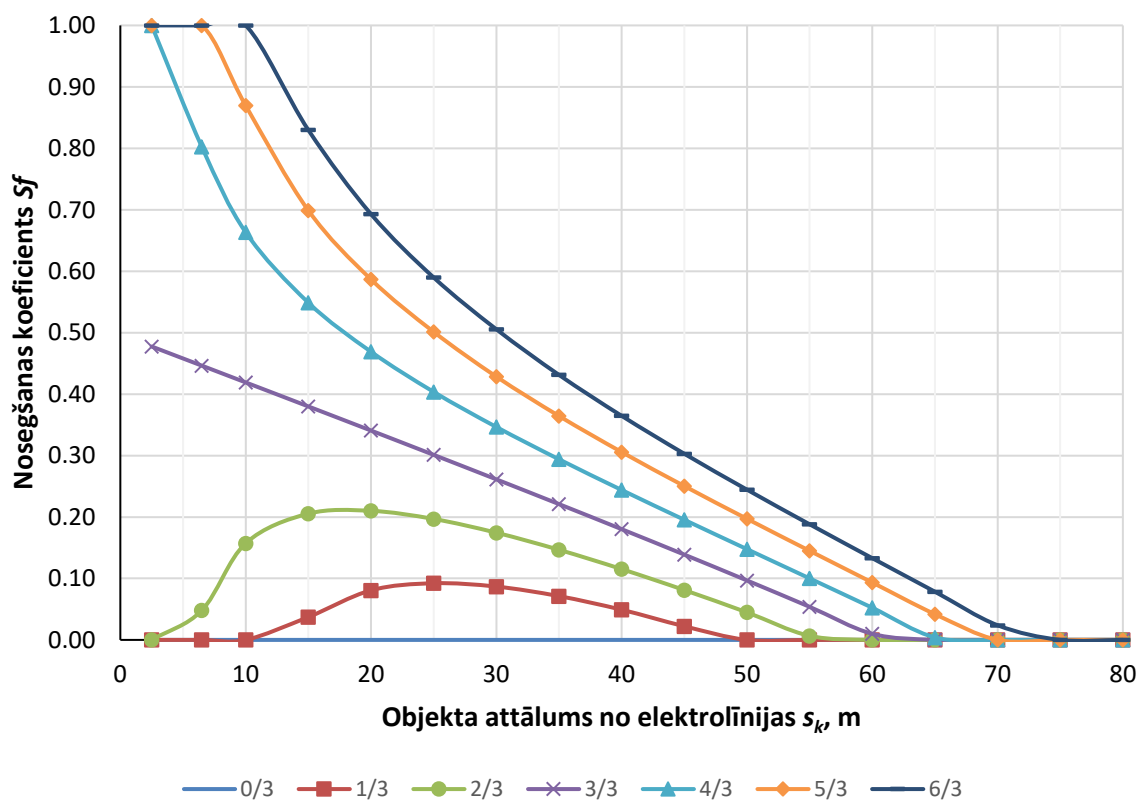
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 7$ m, $I_m = 16,4$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,06	0,44	0,78	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,17	0,41	0,64	0,84	1,00
15	0,00	0,05	0,21	0,37	0,53	0,67	0,80
20	0,00	0,09	0,21	0,33	0,45	0,56	0,67
25	0,00	0,09	0,19	0,29	0,38	0,48	0,56
30	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48
35	0,00	0,06	0,13	0,20	0,27	0,34	0,40
40	0,00	0,04	0,10	0,16	0,22	0,28	0,33
45	0,00	0,00	0,06	0,11	0,17	0,22	0,27
50	0,00	0,00	0,02	0,07	0,12	0,16	0,21
55	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,11	0,15
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,09
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



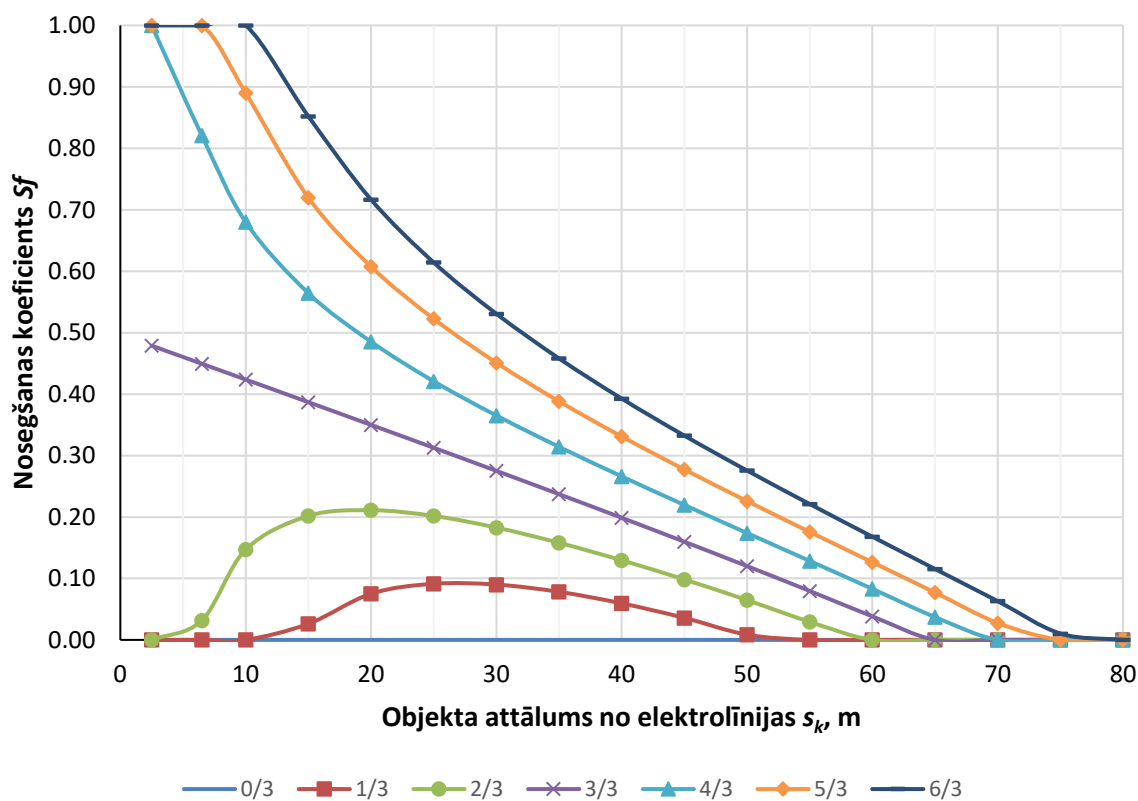
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 8$ m, $I_m = 16,4$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,05	0,45	0,80	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,16	0,42	0,66	0,87	1,00
15	0,00	0,04	0,21	0,38	0,55	0,70	0,83
20	0,00	0,08	0,21	0,34	0,47	0,59	0,69
25	0,00	0,09	0,20	0,30	0,40	0,50	0,59
30	0,00	0,09	0,17	0,26	0,35	0,43	0,51
35	0,00	0,07	0,15	0,22	0,29	0,36	0,43
40	0,00	0,05	0,12	0,18	0,24	0,31	0,36
45	0,00	0,02	0,08	0,14	0,20	0,25	0,30
50	0,00	0,00	0,04	0,10	0,15	0,20	0,24
55	0,00	0,00	0,01	0,05	0,10	0,14	0,19
60	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,09	0,13
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



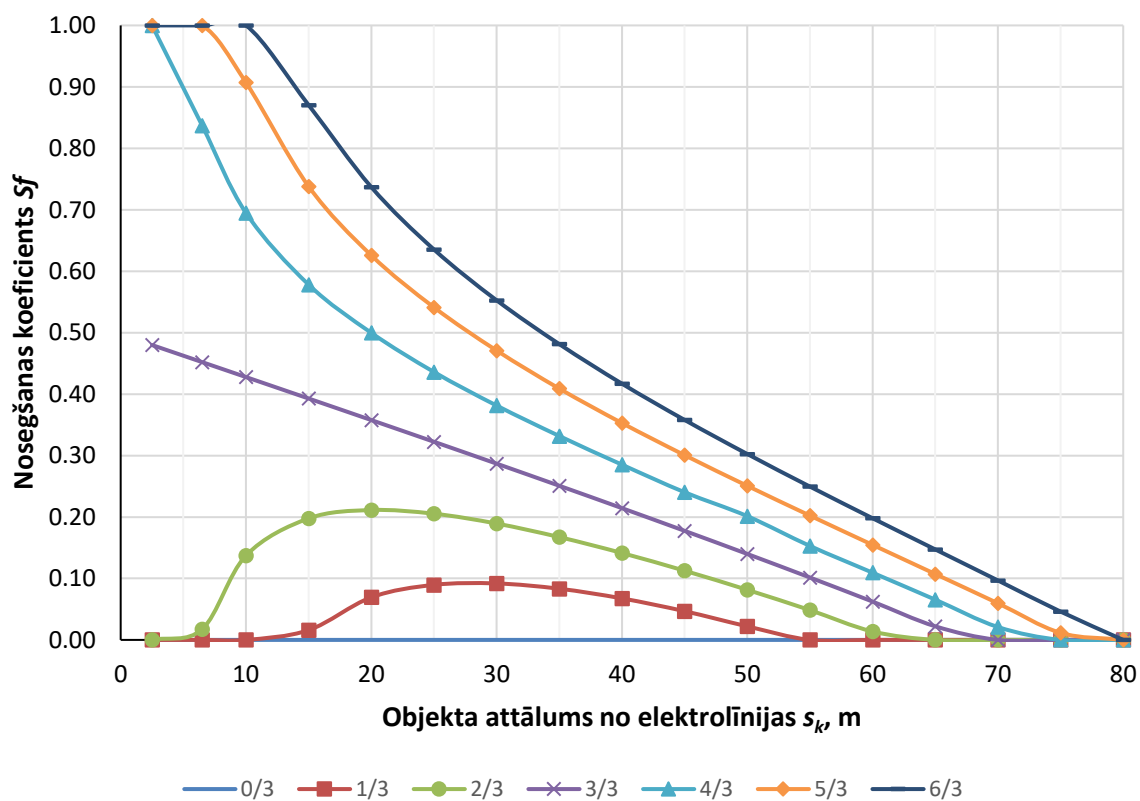
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 9$ m, $I_m = 16,4$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,03	0,45	0,82	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,15	0,42	0,68	0,89	1,00
15	0,00	0,03	0,20	0,39	0,56	0,72	0,85
20	0,00	0,08	0,21	0,35	0,49	0,61	0,72
25	0,00	0,09	0,20	0,31	0,42	0,52	0,61
30	0,00	0,09	0,18	0,28	0,37	0,45	0,53
35	0,00	0,08	0,16	0,24	0,31	0,39	0,46
40	0,00	0,06	0,13	0,20	0,27	0,33	0,39
45	0,00	0,04	0,10	0,16	0,22	0,28	0,33
50	0,00	0,01	0,06	0,12	0,17	0,23	0,28
55	0,00	0,00	0,03	0,08	0,13	0,18	0,22
60	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,13	0,17
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,12
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



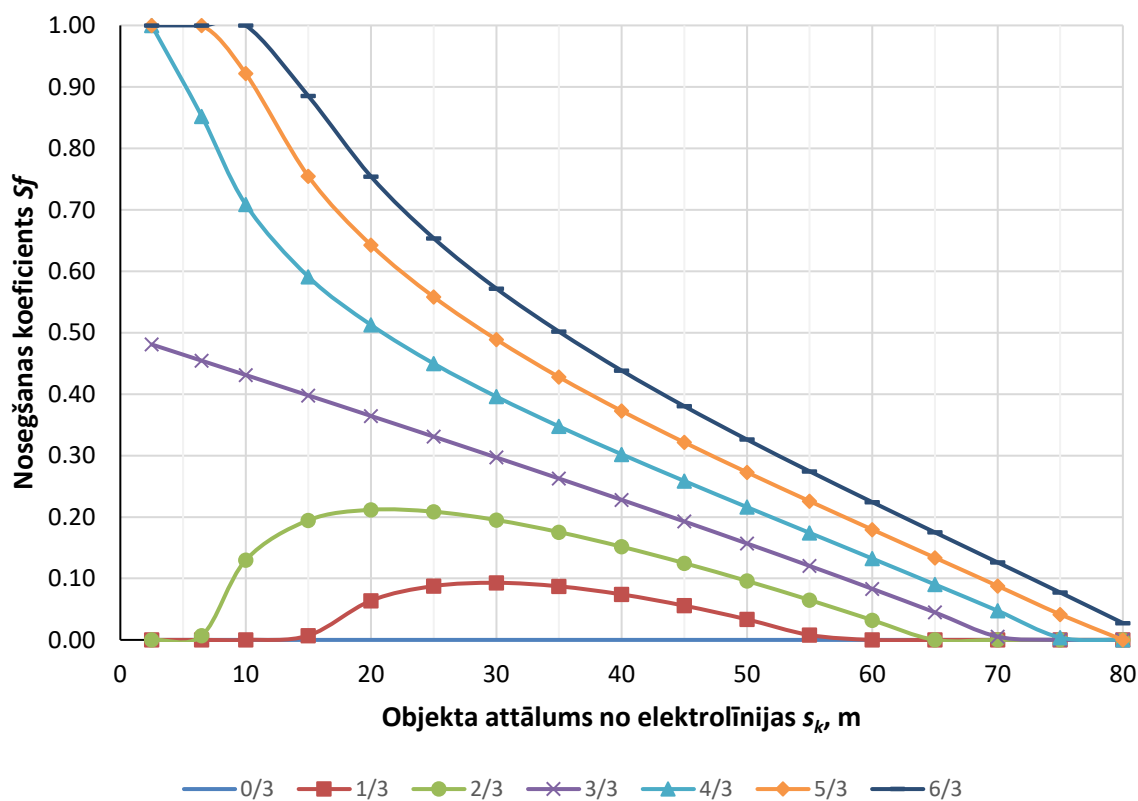
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 10$ m, $I_m = 16,4$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,02	0,45	0,84	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,14	0,43	0,69	0,91	1,00
15	0,00	0,02	0,20	0,39	0,58	0,74	0,87
20	0,00	0,07	0,21	0,36	0,50	0,63	0,74
25	0,00	0,09	0,21	0,32	0,44	0,54	0,64
30	0,00	0,09	0,19	0,29	0,38	0,47	0,55
35	0,00	0,08	0,17	0,25	0,33	0,41	0,48
40	0,00	0,07	0,14	0,21	0,29	0,35	0,42
45	0,00	0,05	0,11	0,18	0,24	0,30	0,36
50	0,00	0,02	0,08	0,14	0,20	0,25	0,30
55	0,00	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
60	0,00	0,00	0,01	0,06	0,11	0,15	0,20
65	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,11	0,15
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,10
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



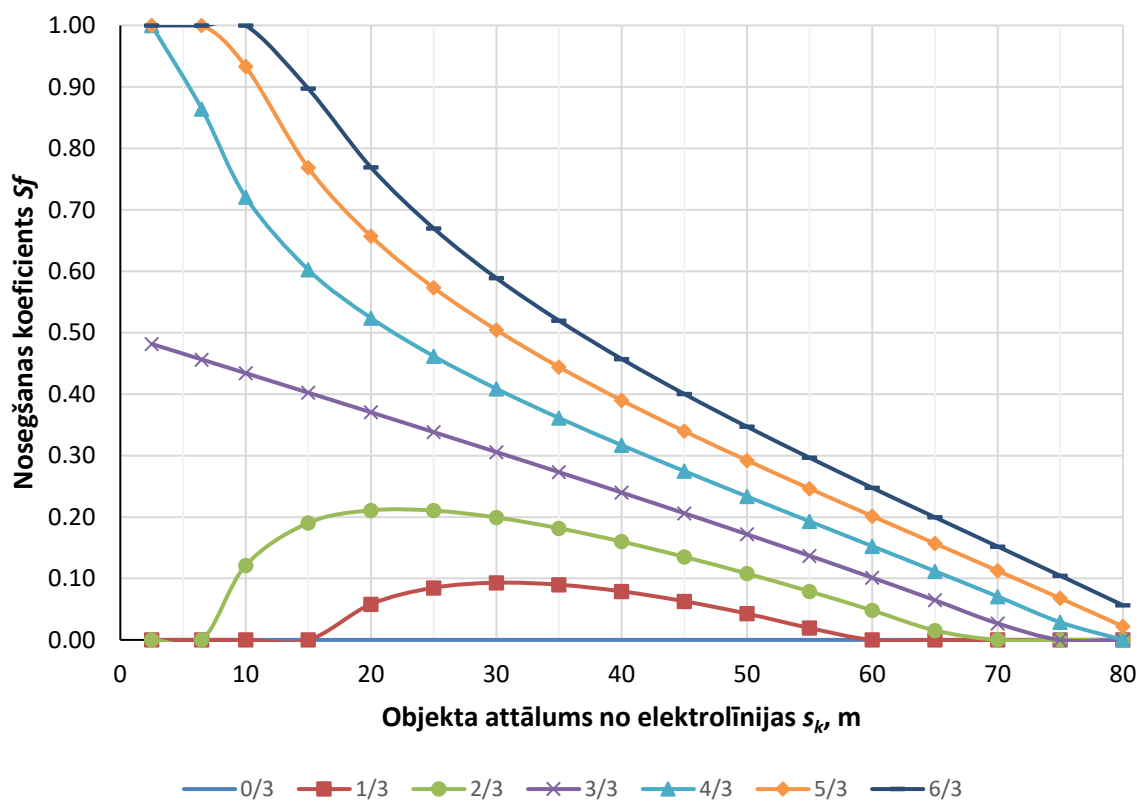
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 11$ m, $I_m = 16,4$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,01	0,45	0,85	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,13	0,43	0,71	0,92	1,00
15	0,00	0,01	0,19	0,40	0,59	0,75	0,89
20	0,00	0,06	0,21	0,36	0,51	0,64	0,75
25	0,00	0,09	0,21	0,33	0,45	0,56	0,65
30	0,00	0,09	0,20	0,30	0,40	0,49	0,57
35	0,00	0,09	0,18	0,26	0,35	0,43	0,50
40	0,00	0,07	0,15	0,23	0,30	0,37	0,44
45	0,00	0,06	0,12	0,19	0,26	0,32	0,38
50	0,00	0,03	0,10	0,16	0,22	0,27	0,33
55	0,00	0,01	0,06	0,12	0,17	0,23	0,27
60	0,00	0,00	0,03	0,08	0,13	0,18	0,22
65	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09	0,13	0,18
70	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,09	0,13
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03



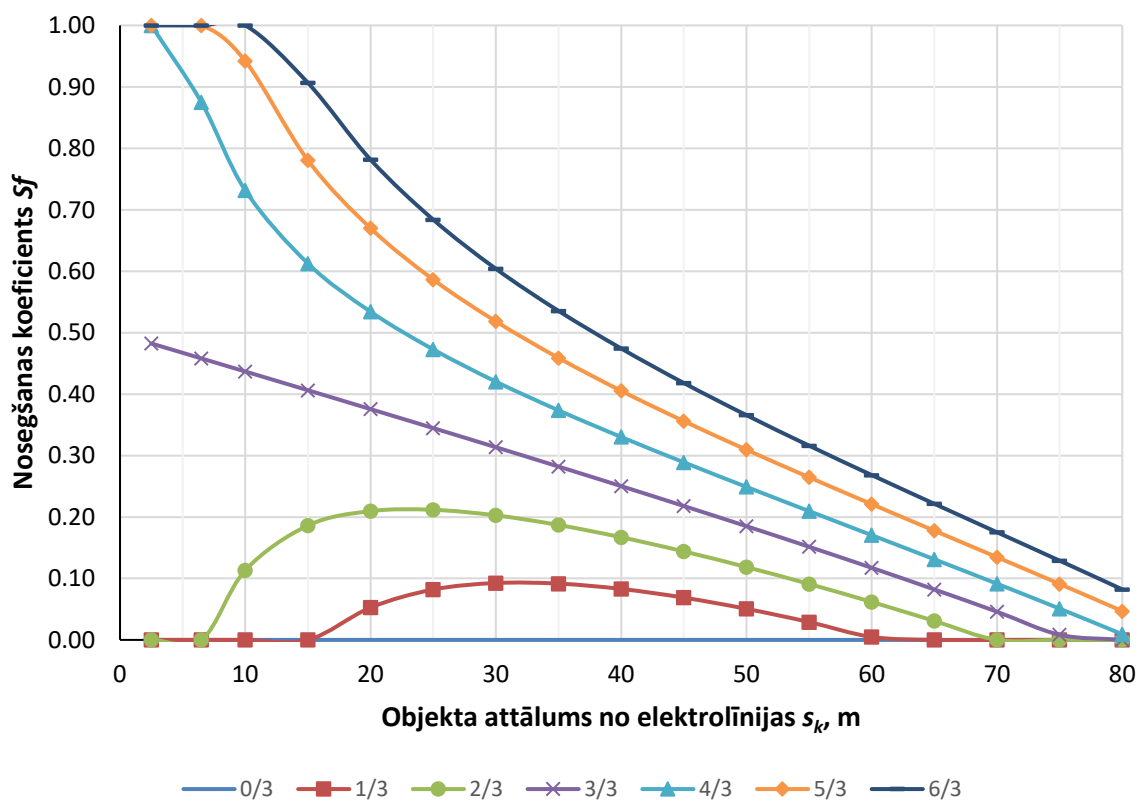
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 12$ m, $I_m = 16,4$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,46	0,86	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,12	0,43	0,72	0,93	1,00
15	0,00	0,00	0,19	0,40	0,60	0,77	0,90
20	0,00	0,06	0,21	0,37	0,52	0,66	0,77
25	0,00	0,08	0,21	0,34	0,46	0,57	0,67
30	0,00	0,09	0,20	0,31	0,41	0,50	0,59
35	0,00	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,52
40	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,39	0,46
45	0,00	0,06	0,14	0,21	0,27	0,34	0,40
50	0,00	0,04	0,11	0,17	0,23	0,29	0,35
55	0,00	0,02	0,08	0,14	0,19	0,25	0,30
60	0,00	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
65	0,00	0,00	0,02	0,06	0,11	0,16	0,20
70	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07	0,11	0,15
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07	0,10
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06



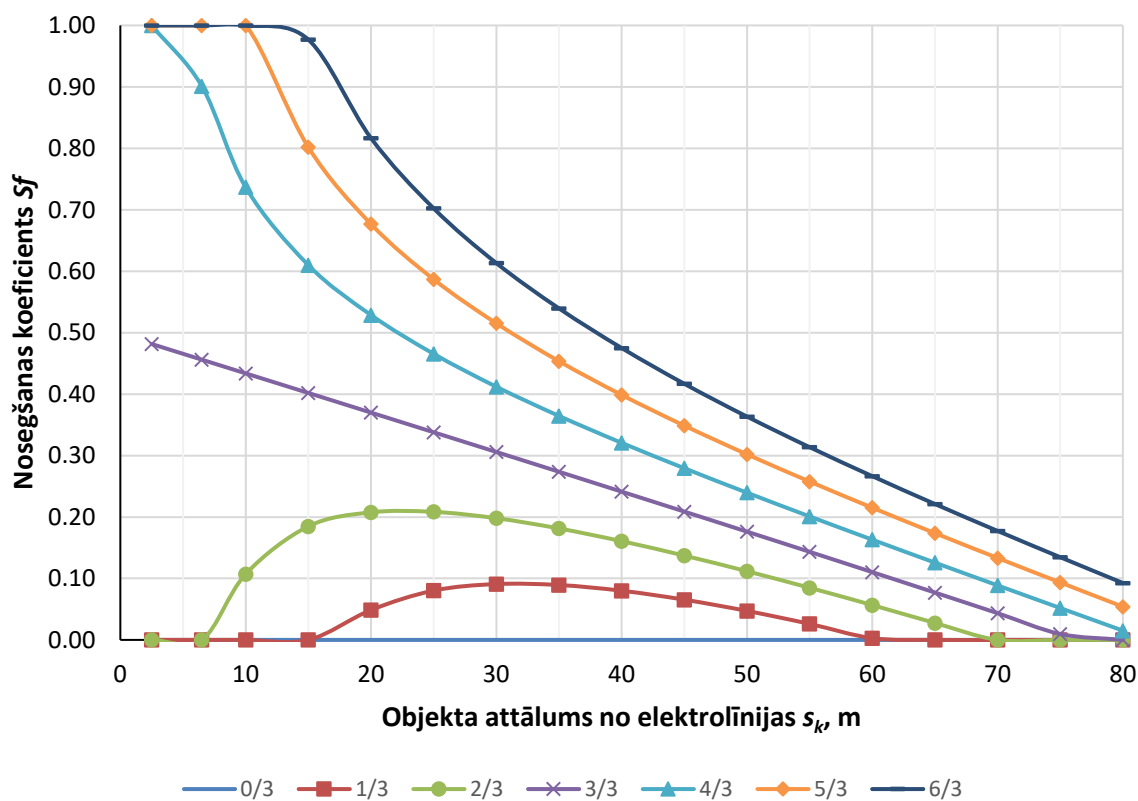
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 13$ m, $I_m = 16,4$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,46	0,87	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,11	0,44	0,73	0,94	1,00
15	0,00	0,00	0,19	0,41	0,61	0,78	0,91
20	0,00	0,05	0,21	0,38	0,53	0,67	0,78
25	0,00	0,08	0,21	0,34	0,47	0,59	0,68
30	0,00	0,09	0,20	0,31	0,42	0,52	0,60
35	0,00	0,09	0,19	0,28	0,37	0,46	0,54
40	0,00	0,08	0,17	0,25	0,33	0,41	0,47
45	0,00	0,07	0,14	0,22	0,29	0,36	0,42
50	0,00	0,05	0,12	0,19	0,25	0,31	0,37
55	0,00	0,03	0,09	0,15	0,21	0,26	0,32
60	0,00	0,00	0,06	0,12	0,17	0,22	0,27
65	0,00	0,00	0,03	0,08	0,13	0,18	0,22
70	0,00	0,00	0,00	0,05	0,09	0,13	0,18
75	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,09	0,13
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,08



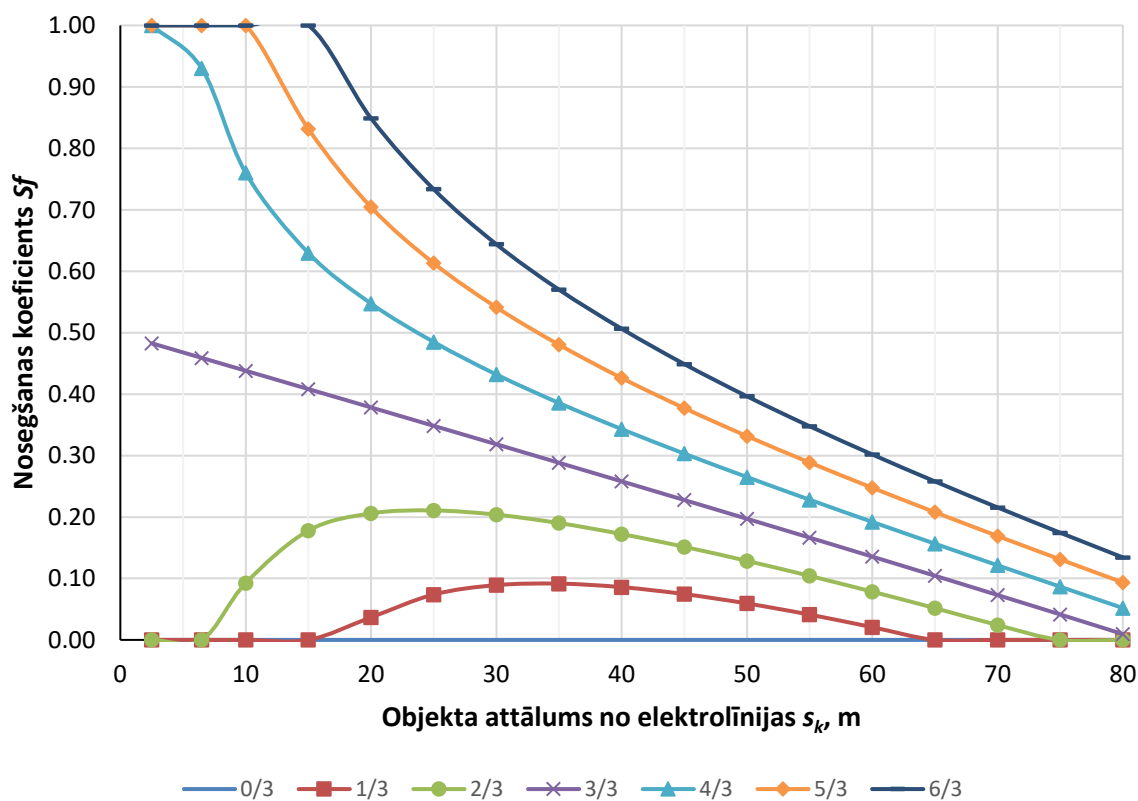
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 7$ m, $I_m = 38,2$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,46	0,90	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,11	0,43	0,74	1,00	1,00
15	0,00	0,00	0,18	0,40	0,61	0,80	0,98
20	0,00	0,05	0,21	0,37	0,53	0,68	0,82
25	0,00	0,08	0,21	0,34	0,47	0,59	0,70
30	0,00	0,09	0,20	0,31	0,41	0,52	0,61
35	0,00	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54
40	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48
45	0,00	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42
50	0,00	0,05	0,11	0,18	0,24	0,30	0,36
55	0,00	0,03	0,08	0,14	0,20	0,26	0,31
60	0,00	0,00	0,06	0,11	0,16	0,22	0,27
65	0,00	0,00	0,03	0,08	0,13	0,17	0,22
70	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09	0,13	0,18
75	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,09	0,13
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,09



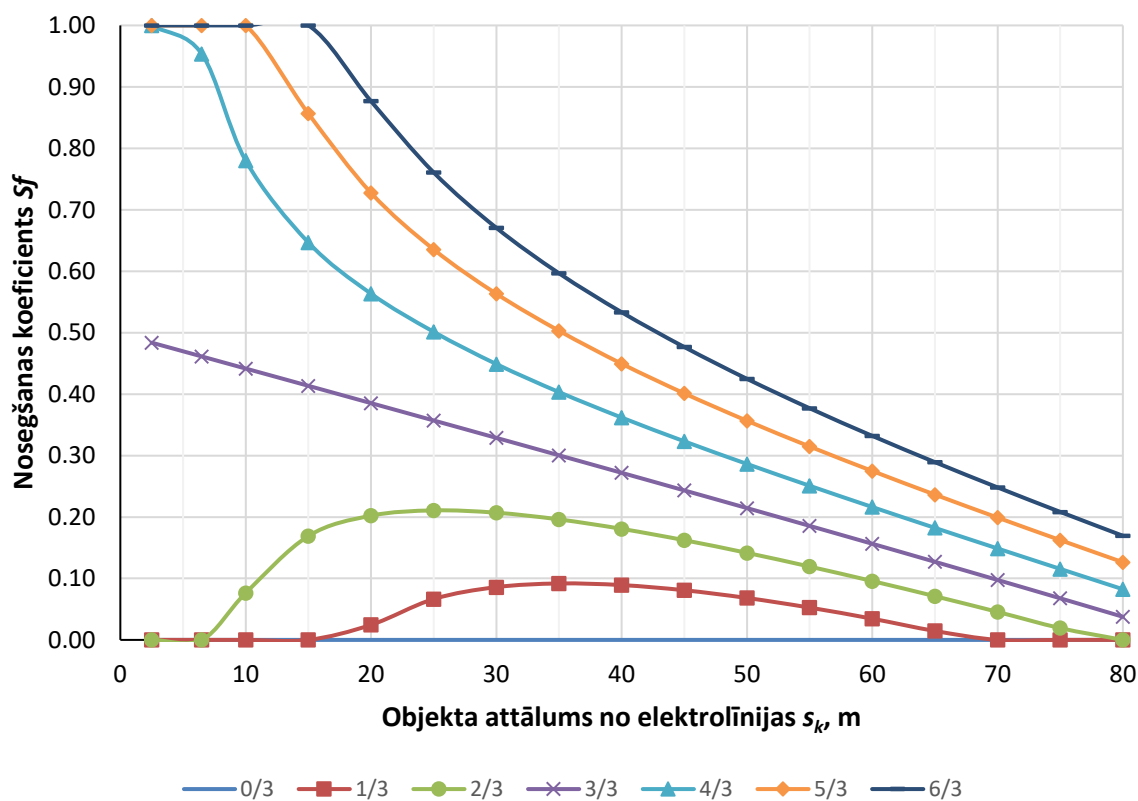
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 8$ m, $I_m = 38,2$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,46	0,93	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,09	0,44	0,76	1,00	1,00
15	0,00	0,00	0,18	0,41	0,63	0,83	1,00
20	0,00	0,04	0,21	0,38	0,55	0,70	0,85
25	0,00	0,07	0,21	0,35	0,48	0,61	0,73
30	0,00	0,09	0,20	0,32	0,43	0,54	0,64
35	0,00	0,09	0,19	0,29	0,39	0,48	0,57
40	0,00	0,09	0,17	0,26	0,34	0,43	0,51
45	0,00	0,07	0,15	0,23	0,30	0,38	0,45
50	0,00	0,06	0,13	0,20	0,27	0,33	0,40
55	0,00	0,04	0,10	0,17	0,23	0,29	0,35
60	0,00	0,02	0,08	0,14	0,19	0,25	0,30
65	0,00	0,00	0,05	0,10	0,16	0,21	0,26
70	0,00	0,00	0,02	0,07	0,12	0,17	0,22
75	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17
80	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,09	0,13



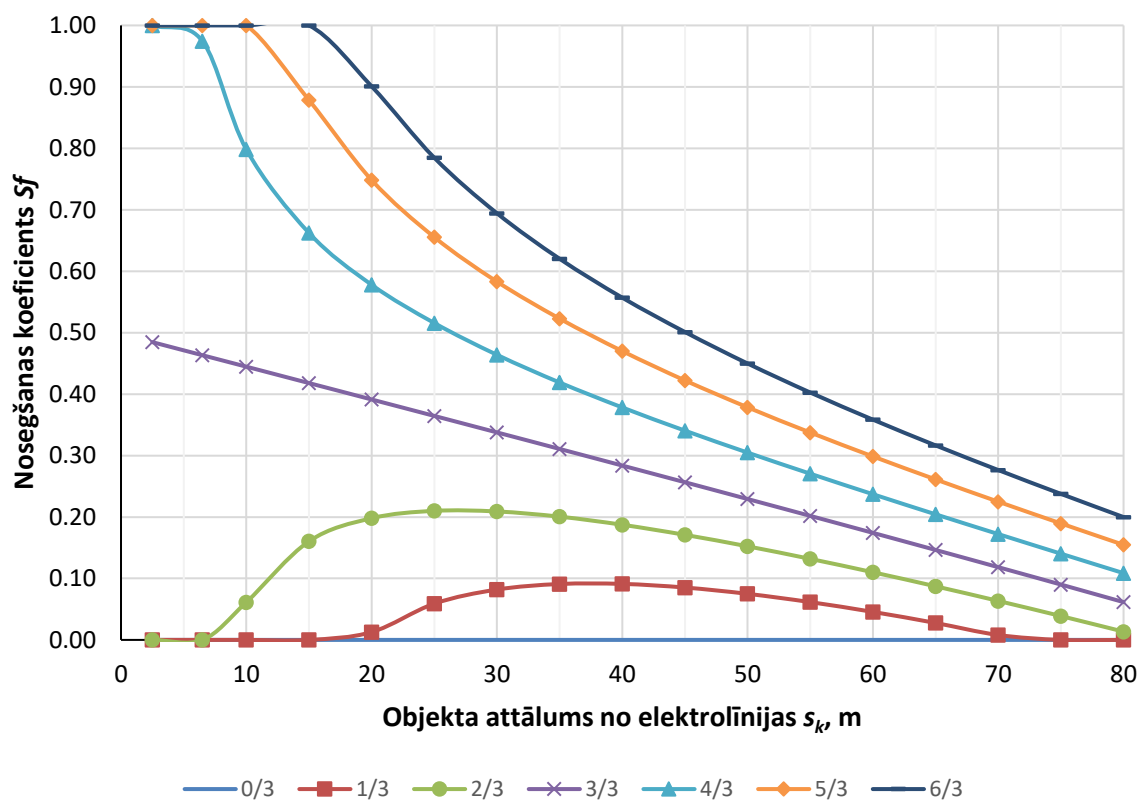
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 9$ m, $I_m = 38,2$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,46	0,95	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,08	0,44	0,78	1,00	1,00
15	0,00	0,00	0,17	0,41	0,65	0,86	1,00
20	0,00	0,02	0,20	0,39	0,56	0,73	0,88
25	0,00	0,07	0,21	0,36	0,50	0,64	0,76
30	0,00	0,09	0,21	0,33	0,45	0,56	0,67
35	0,00	0,09	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
40	0,00	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,53
45	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48
50	0,00	0,07	0,14	0,21	0,29	0,36	0,42
55	0,00	0,05	0,12	0,19	0,25	0,31	0,38
60	0,00	0,03	0,10	0,16	0,22	0,27	0,33
65	0,00	0,01	0,07	0,13	0,18	0,24	0,29
70	0,00	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
75	0,00	0,00	0,02	0,07	0,12	0,16	0,21
80	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,13	0,17



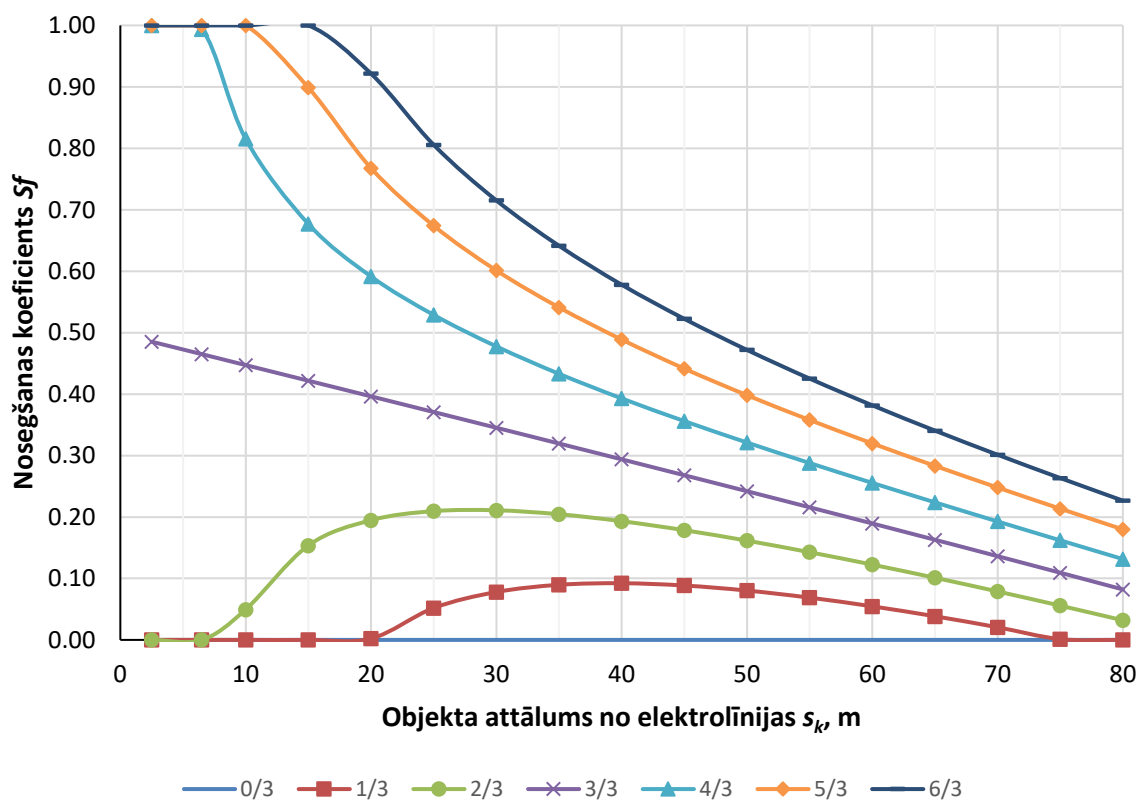
Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 10$ m, $I_m = 38,2$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,46	0,97	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,06	0,44	0,80	1,00	1,00
15	0,00	0,00	0,16	0,42	0,66	0,88	1,00
20	0,00	0,01	0,20	0,39	0,58	0,75	0,90
25	0,00	0,06	0,21	0,36	0,52	0,66	0,78
30	0,00	0,08	0,21	0,34	0,46	0,58	0,69
35	0,00	0,09	0,20	0,31	0,42	0,52	0,62
40	0,00	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56
45	0,00	0,09	0,17	0,26	0,34	0,42	0,50
50	0,00	0,07	0,15	0,23	0,30	0,38	0,45
55	0,00	0,06	0,13	0,20	0,27	0,34	0,40
60	0,00	0,05	0,11	0,17	0,24	0,30	0,36
65	0,00	0,03	0,09	0,15	0,20	0,26	0,32
70	0,00	0,01	0,06	0,12	0,17	0,22	0,28
75	0,00	0,00	0,04	0,09	0,14	0,19	0,24
80	0,00	0,00	0,01	0,06	0,11	0,15	0,20



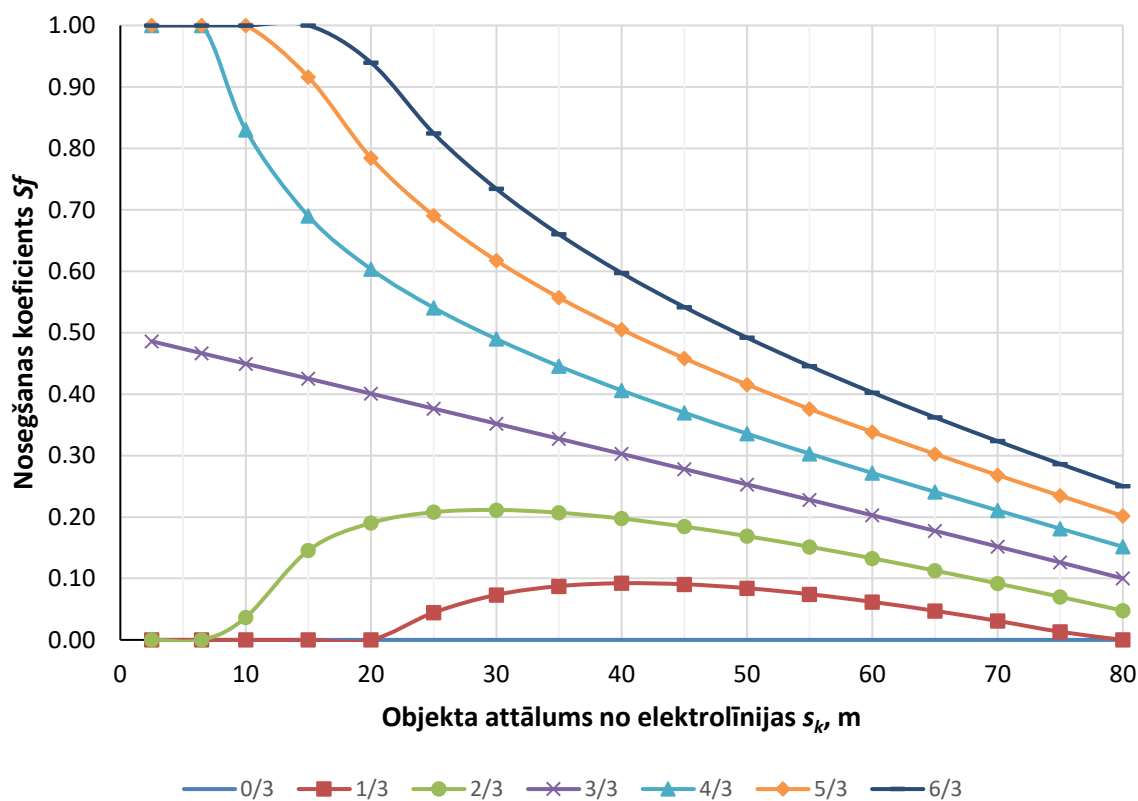
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 11$ m, $I_m = 38,2$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,49	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,46	0,99	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,05	0,45	0,82	1,00	1,00
15	0,00	0,00	0,15	0,42	0,68	0,90	1,00
20	0,00	0,00	0,19	0,40	0,59	0,77	0,92
25	0,00	0,05	0,21	0,37	0,53	0,67	0,81
30	0,00	0,08	0,21	0,35	0,48	0,60	0,72
35	0,00	0,09	0,20	0,32	0,43	0,54	0,64
40	0,00	0,09	0,19	0,29	0,39	0,49	0,58
45	0,00	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,52
50	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,47
55	0,00	0,07	0,14	0,22	0,29	0,36	0,43
60	0,00	0,05	0,12	0,19	0,26	0,32	0,38
65	0,00	0,04	0,10	0,16	0,22	0,28	0,34
70	0,00	0,02	0,08	0,14	0,19	0,25	0,30
75	0,00	0,00	0,06	0,11	0,16	0,21	0,26
80	0,00	0,00	0,03	0,08	0,13	0,18	0,23



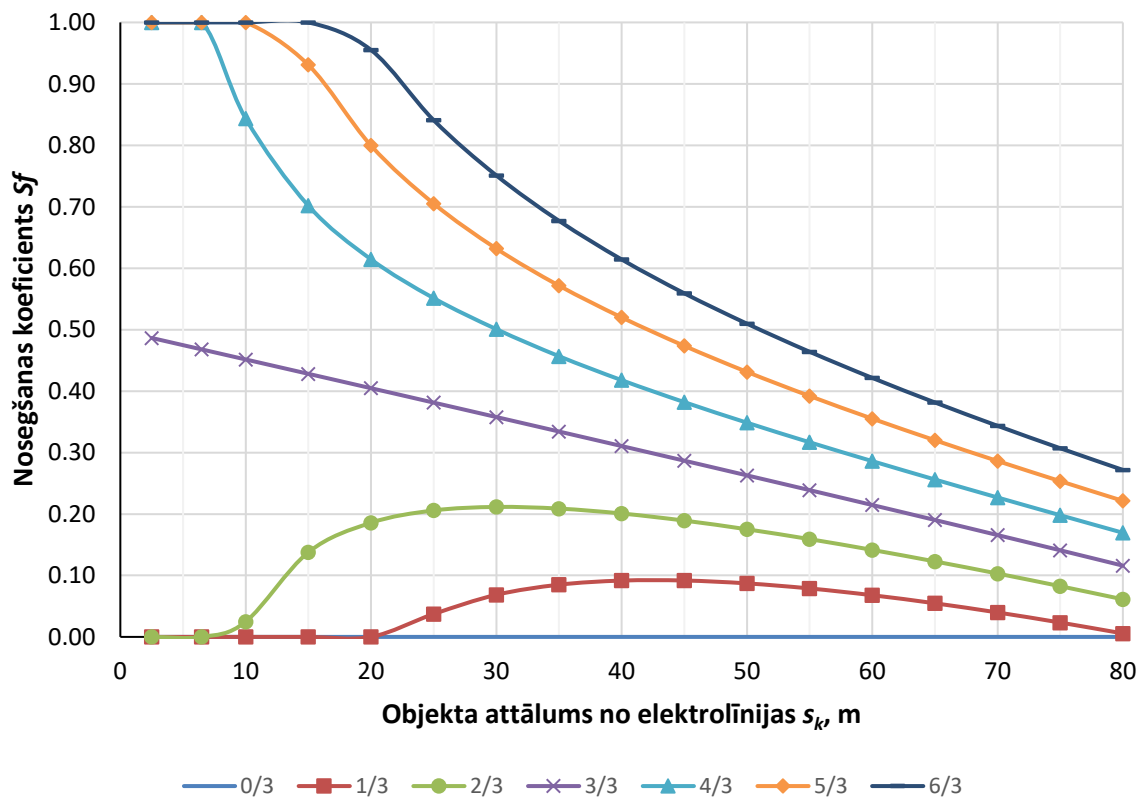
Nosegšanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 12$ m, $I_m = 38,2$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,49	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,47	1,00	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,04	0,45	0,83	1,00	1,00
15	0,00	0,00	0,15	0,43	0,69	0,92	1,00
20	0,00	0,00	0,19	0,40	0,60	0,78	0,94
25	0,00	0,04	0,21	0,38	0,54	0,69	0,82
30	0,00	0,07	0,21	0,35	0,49	0,62	0,73
35	0,00	0,09	0,21	0,33	0,45	0,56	0,66
40	0,00	0,09	0,20	0,30	0,41	0,51	0,60
45	0,00	0,09	0,18	0,28	0,37	0,46	0,54
50	0,00	0,08	0,17	0,25	0,34	0,42	0,49
55	0,00	0,07	0,15	0,23	0,30	0,38	0,45
60	0,00	0,06	0,13	0,20	0,27	0,34	0,40
65	0,00	0,05	0,11	0,18	0,24	0,30	0,36
70	0,00	0,03	0,09	0,15	0,21	0,27	0,32
75	0,00	0,01	0,07	0,13	0,18	0,23	0,29
80	0,00	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25



Nosešanas koeficienta S_f vērtības ($h_l = 13$ m, $I_m = 38,2$ kA)

Objekta attālums no elektrolīnijas, m	Objekta augstums attiecībā pret elektrolīnijas augstumu						
	0/3	1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3
2.5	0,00	0,00	0,00	0,49	1,00	1,00	1,00
6.5	0,00	0,00	0,00	0,47	1,00	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,02	0,45	0,84	1,00	1,00
15	0,00	0,00	0,14	0,43	0,70	0,93	1,00
20	0,00	0,00	0,19	0,40	0,61	0,80	0,96
25	0,00	0,04	0,21	0,38	0,55	0,71	0,84
30	0,00	0,07	0,21	0,36	0,50	0,63	0,75
35	0,00	0,08	0,21	0,33	0,46	0,57	0,68
40	0,00	0,09	0,20	0,31	0,42	0,52	0,61
45	0,00	0,09	0,19	0,29	0,38	0,47	0,56
50	0,00	0,09	0,18	0,26	0,35	0,43	0,51
55	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,39	0,46
60	0,00	0,07	0,14	0,21	0,29	0,36	0,42
65	0,00	0,05	0,12	0,19	0,26	0,32	0,38
70	0,00	0,04	0,10	0,17	0,23	0,29	0,34
75	0,00	0,02	0,08	0,14	0,20	0,25	0,31
80	0,00	0,01	0,06	0,12	0,17	0,22	0,27



Apkārtējās vides piemēri [59]

Piemērs	Apkārtējās vides apraksts	Piesārņojuma pakāpe	Piesārņojuma tips ^a
1	2	3	4
E1	Neliela cilvēku aktivitāte, laba veģetācija un: > 50 km no jebkuras jūras, tuksneša vai atklātas sauszemes; > 10 km attālumā no cilvēka radīta piesārņojuma avota; > 30-50 km attālumā no lielām vai vidējām pilsētām; Vai mazākos attālumos, ja dominējošie vēji nav no piesārņojuma avota puses.	Ļoti niecīga	A
E2	Lauksaimniecības teritorijas ar cilvēku blīvumu no 500 līdz 1000 cilvēki/km ² , un 10-50 km attālumā no lielas vai vidējas pilsētas, jūras, tuksneša vai atklātas sauszemes ^b ; 15-50 km attālumā no lielas vai vidējas pilsētas; 5-10 km attālumā no cilvēka radīta piesārņojuma avota. 1 km attālumā no galvenajiem ceļiem. Rūpniecisko gāzu emisijas intensitāte ir mazāka kā 10 miljoni m ³ /km ² . Sāļa iekšzemes teritorija (sāls saturs < 0,3 %). Mazākos attālumos kā E1, ja dominējošie vēji ir no piesārņojuma avota puses.	Niecīga	A
E3	Lauksaimniecības teritorijas ar cilvēku blīvumu no 1000 līdz 10000 cilvēki/km ² , un 3-10 ^c km attālumā no jūras, tuksneša vai atklātas sauszemes; 1-5 km attālumā no cilvēka radīta piesārņojuma avota; 15-20 km attālumā no lielas vai vidējas pilsētas. 1 km attālumā no galvenajiem ceļiem vai 0,1 km attālumā no reģionālajiem ceļiem. Rūpniecisko gāzu emisijas intensitāte nav lielāka kā 10-30 miljoni m ³ /km ² iekļaujot pilsētrūpniecību.	Vidēja	A

^a Atbilstoši IEC/TS 60815-1:2008.^b Vētras laikā ESDD līmenis tādā attālumā no jūras var sasniegt augstākas vērtības.^c Atkarīgs no krasta līnijas topogrāfijas un vēja intensitātes.

1	2	3	4
	Krasts ar nelielu sāls koncentrāciju vai vidēji sāļa iekšzemes teritorija (sāls saturs 0,3 % - 0,6 %). Mazākos attālumos, ja dominējošie vēji ir no piesārņojuma avota puses un ir regulārs ikmēneša lietus.		
E4	Tālāk no piesārņojuma avotiem kā E3, ja pēc ilgstošiem sausuma piesārņojuma uzkrājošiem periodiem seko migla vai smalks lietus un/vai augstas vadītspējas lietus, ilgstoša migla, kustošs ledus vai sniegs pēc piesārņojuma uzkrājoša perioda E3 platībās un/vai ir augsts NSDD ^d līmenis, 5-10 un vairāk reizes kā ESDD ^e .	Vidēja	A
E5	Dzīvojamie rajoni un transporta mezgli, kur iedzīvotāju blīvums ir lielāks kā 10000 cilvēki/km ² un 3 km attālumā no jūras, tuksneša vai atklātas sauszemes; 0,5-2 km no neatkarīgiem ķīmiskajām vai ar oglēm kurināmām rūpnīcām (1 km attālumā no cilvēka radīta piesārņojuma avota); 0,2 km attālumā no galvenajiem ceļiem un koncentrētas pilsēttrūpniecības. Ļoti sāļās platībās (sāls saturs 0,6-1,0 %).	Smaga	A/B
E6	Lielākā attālumā kā E5, bet ar biezu miglu (vai smalku lietu) pēc ilgstoša (vairākas nedēļas vai mēneši) sausa piesārņojumu uzkrājoša perioda. Ilgstoša migla, kustošs ledus vai sniegs pēc piesārņojuma uzkrājoša perioda E5 platībās un/vai ir augsts NSDD līmenis, 5-10 un vairāk reizes kā ESDD.	Smaga	A
E7	1 km attālumā no krasta un sāļas, tuksnešainas teritorijas ar sāls saturu vairāk kā 1,0 %, ķīmisko un ar oglēm kurināmo rūpnīcu apvidū. 0,5 km attālumā no neatkarīgām rūpnīcām tādā pašā attālumā kā E5 un E6 un ir pakļauti piesārņojumam ar augstu vadītspēju vai blīvi cementa putekļi ar biežu miglu vai smalku lietu vietās, kur ātri uzkrājas smiltis un sāls un notiek regulāra kondensāta veidošanās.	Ļoti smaga	A/B

^d Nešķīstošo nogulšņu blīvums (NSDD, no angļu: *non-soluble deposit density*).^e Ekvivalents sāls nogulšņu blīvums (ESDD, no angļu: *equivalent salt deposit density*).