

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 darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
Sandra VĪTOLIŅA

Zimackis V. Zibensaizsardzības ietaišu izvietojšanas metodoloģija izolēto vadu līnijām vīdsprieguma tīklā. Promocijas darba kopsavilkums.
Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 36 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-14" 2018. gada 8. oktobra lēmumu, protokols Nr. 2018-5(67).

ISBN 978-9934-22-210-8 (print)

ISBN 978-9934-22-211-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 18. decembrī, plkst. 10.00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12 k 1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. habil. sc. ing. Imants Matīss,
Latvijas Zinātņu akadēmija

Dr. sc. ing. Vilnis Krēsliņš,
Latvijas Elektroenerģētiķu un energobūvnieku asociācija

Dr. sc. ing. Saulius Gudžius,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Viesturs Zimackis (paraksts)
Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 64 attēli, 32 tabulas, 22 pielikumi, kopā 135 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 130 nosaukumu.

SATURS

IEVADS	5
1. AIZSARGIETAIŠU IZVIETOŠANA IZOLĒTO VADU LĪNIJĀS	8
2. ZIBENSSTRĀVA UN TĀS MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA	11
3. ZIBENSIZLĀDES PUNKTA NOTEIKŠANA	14
3.1. Zibenizlādes biežums	14
3.2. Zibensizlādes statistika Latvijā	15
3.3. Tuvumā esošo objektu ietekme uz tiešas zibensizlādes skaitu	16
4. PĀRSPRIEGUMI VIDSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJĀS	18
4.1. Tiešas un netiešas zibensizlādes radīti pārspriegumi	18
4.2. Vidsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas izolācijas spriegumizturība	20
4.3. Izolēto vadu nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas CFO	22
5. PIEDĀVĀTAIS ALGORITMS ZIBENSAIZSARDZĪBAS AIZSARGIETAIŠU OPTIMĀLA IZVIETOŠANAS BIEŽUMA NOVĒRTĒŠANAI	24
5.1. Izvirzītie izolēto vadu zibensaizsardzības ietaišu izvietojuma kritēriji	24
5.2. Algoritma struktūra	25
5.3. Izvērstis metodoloģijas skaidrojums un lietojuma piemērs	26
6. PIEDĀVĀTĀS METODOLOĢIJAS VERIFIKĀCIJA	31
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	34
KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀ LITERATŪRA	35

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 vīdsprieguma līnijām ir izolēto vadu izpildījumā. Kailvadu gaisvadu līnijas pārbūvējot par izolēto vadu līnijām, dabas parādību izraisītu 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 aprīkošana 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 izvietojšanas biežumu var noteikt, balstoties uz ekonomisko principu [26]. Tomēr primāri ir jāizvērtē zibensizlādes, apkārtējās vides un elektrolīnijas parametru ietekme uz aizsargietaišu izvietojšanas biežumu un tam sekojošo elektrolīnijas bojājumu skaitu.

Metodoloģijas aizsargietaišu izvietojšanai 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 izvietojšanas 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 izvietojšanas biežuma noteikšanai izolēto vadu līnijām vīdsprieguma 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, nasegšanas 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., Vītoļiņa, 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. Sļiskis, O., Vītoļiņa, 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., Vītoļiņa, 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.

1. AIZSARGIETAISŪ IZVIETOŠANA IZOLĒTO VADU LĪNIJĀS

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. Salīdzinot ar izolētiem vadītājiem, piemēram, kabeļlīniju, šim pārklājumam nav tik labas izolācijas īpašības, tāpēc attiecībā uz elektriskās strāvas triecienu tie jāuztver kā kailvadi [31].

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 tā, ka uzkrītis koks vai koka zars neatslēdz elektrolīniju, kā tas ir kailvadu elektrolīnijas gadījumā, tātad 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 [27].

Vēl viena izolēto vadu priekšrocība ir cilvēku drošība, salīdzinot 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.

Izolēto vadu gaisvadu līnijām, salīdzinot ar kailvadu līnijām, ir jāpievērš pastiprināta uzmanība zibens aizsardzībā. Tiešas vai netiešas zibensizlādes rezultātā elektrolīnijā rodas pārspriegums. Izolēto vadu elektrolīnijās izolācijas dēļ elektriskais loks nespēj pārvietoties pa līnijas vadiem, izdedzina izolācijā caurumu un turpina degt tik ilgi, kamēr tiek bojāts vai pārdedzināts vadītājs. Lai izvairītos no elektriskā loka radītiem bojājumiem, izolēto vadu līnijas ir jāaizsargā ar elektriskā loka aizsargietaisēm. Elektriskā loka aizsargietaisē nodrošina drošu elektriskā loka degšanu, kamēr nostrādā elektrolīnijas aizsardzība un nodzēš elektrisko loku [42], [40].

Standartā EN 50397-3 [32] ir doti trīs elektriskā loka aizsargietaišu tipi: ragizlādnis (turpmāk tekstā *APD*, angļu val.: *arc protection device*), dzirksteļsprauga (turpmāk tekstā *PAD*, angļu val.: *power arc device*) un strāvu ierobežojoša aizsargietaisē (turpmāk tekstā *CLAH*, angļu val.: *current limiting arcing horn*). Vienkāršākā no aizsargietaisēm ir *APD*, kas zibensizlādes radītu elektrisko loku no izolatora un izolētā vada pa komplektā esošo alumīnija stiepli novirza uz *APD*. Lai novērstu izolatora bojāšanos pie mazām īsslēguma strāvām, iespējams uzstādīt *PAD*, kas rada starpfāžu īsslēgumu caur metāla traversu. Ja elektrolīnija nav aprīkota ar ātrdarbīgu automātisku atpakaļieslēgšanas ierīci un ir būtiski nodrošināt nepārtrauktu elektroapgādi, ieteicams uzstādīt *CLAH*, kas sastāv no neliela metālloksīda izlādņa (MO) un dzirksteļspraugas, kas nozīmē, ka pie līnijas pārspriegumiem izlādnis nenostādā un to nav nepieciešams tik bieži mainīt. Elektriskā loka aizsargietaišu salīdzinājums apkopots 1.1. tabulā.

Pārāk reti izvietotas elektriskā loka aizsargietaisē elektrolīnijā nepildīs savu funkciju, savukārt izvietot tās pārāk bieži nav ekonomiski izdevīgi, turklāt pārāk bieži izvietotas

elektriskā loka aizsargietais var radīt problēmas ar elektroapgādes kvalitāti un pakļaut elektriskās strāvas triecienam. Elektriskā loka aizsargietais nav izolētas, tas nozīmē, ka pārlietu bieži uzstādītais aizsargietais var negatīvi ietekmēt izolēto vadu līniju priekšrocības attiecībā pret kailvadu elektrolīnijām. 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. Šīs prasības var ietvert arī papildu informāciju, piemēram, kur šīs ietaises būtu jāuzstāda drošības nolūkos, piemēram, līnijas galā, ceļu pārejās, vietās, kur ir noņemta izolācija, stūra balstos utt. Dažādu valstu norādījumi aizsargietaišu izvietojumam apkopoti 1.2. tabulā.

1.1. tabula

Elektriskā loka aizsargietaišu salīdzinājums

Parametrs	Aizsargietais tips		
	<i>APD</i>	<i>PAD</i>	<i>CLAH</i>
Attālums starp fāzēm, mm	<600	Jebkāds	Jebkāds
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 ar zibensstrāvu
Izolatora tips	Tapizolators	Jebkāds	Jebkāds
Atkarīgs no slodzes virziena	Jā	Nē	Nē
Nepieciešams sazēmēt traversu	Nē	Nē	Jā
Elektroapgādes pārtraukums	ĀAAI	ĀAAI	Nav pārtraukuma

^a ar dubultu 25 mm² alumīnija stiepli.

1.2. tabula

Elektriskā loka aizsargietaišu izvietošanas prasības dažādās valstīs

Valsts	Izvietošanas biežums	Papildu 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: <i>PAD</i> , <i>APD</i>	[28]
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: <i>PAD</i> , <i>APD</i>	[41]
Apvienotā Karaliste	Katrs 2. balsts	Aizsargietais tips: <i>PAD</i> , <i>APD</i>	[42]
Austrālija	Katrs 4. balsts vai 200–250 m.	Vietās, kas pakļautas biežākai zibensizlādei, katrā 2. balstā. Aizsargietais tips: <i>CLAH</i>	[6]
Japāna	Katrā balstā	Aizsargietais tips: <i>CLAH</i>	[42]

Šī iemesla dēļ ir nepieciešama metodoloģija aizsargietaišu izvietošanai, lai nerastos situācijas, kad norādījumus var interpretēt atšķirīgi. Aizsargietais tipu un izvietošanas biežumu var noteikt arī, balstoties uz ekonomisko principu [26], tomēr primāri aizsargietaišu

izvietošanas principi būtu jāizvērtē no elektrolīnijas aizsardzības viedokļa, balstoties uz zibensizlādes, apkārtējās vides un elektrolīnijas parametriem.

IEEE 1410 definētā metodoloģija ir paredzēta izlādņu izvietošanas 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 lietojama izolēto vadu aizsargietaišu izvietošanas biežuma noteikšanai [10].

Ja tieša zibensizlāde notiek laidumā starp balstu bez aizsargietais un balstu ar aizsargietaisi, tad strāvas maksimumvērtību elektrolīnijā I_{ml} , kas nepieciešama, lai notiktu elektrolīnijas pārklāšanās, kad pārsprieguma maksimumvērtība $V = V_{CFO}$ (skat. 4. nodaļu), aprēķina šādi [23]:

$$I_{ml} = \frac{2ct_m(V_{CFO} - V_{IR})}{LZ_s}, \quad (1.1)$$

kur 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); Z_s – elektrolīnijas pārsprieguma viļņa pretestība, Ω ; t_m – lineārais ekvivalents 0–100 % viļņa kāpumlaikam, pirmajai impulsstrāvai pieņem 2 μ s.

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 nākamajā neaizsargātajā balstā, ko var aprēķināt [23]

$$I_{mb} = \frac{V_{CFO} - V_{IR}}{R_0}, \quad (1.2)$$

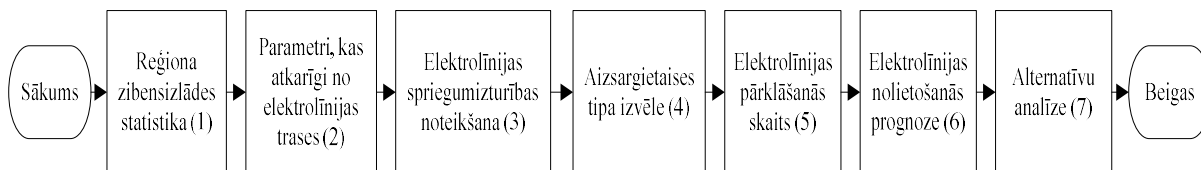
kur R_0 – balsta zemētāja pretestība, Ω . Kad aprēķināta strāvas maksimumvērtība elektrolīnijā, kas nepieciešama, lai notiktu pārklāšanās, izmantojot izteiksmi (3.4), var aprēķināt, kāda ir varbūtība, ka zibensstrāvas maksimumvērtība pārsniegs aprēķināto strāvas maksimumvērtību elektrolīnijā.

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 izvietošanas 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. Metodoloģijā ir ņemti vērā šādi 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 aizsargietais tipa;
- 6) traversa ir saņemta vai nav [26].

Apskatītās elektriskā loka aizsargietaišu izvietošanas biežuma noteikšanas metodoloģijas nav pilnīgas, jo IEEE-1410 piedāvātā metodoloģija tiešā veidā neņem vērā zibensizlādes statistiku konkrētajā reģionā, turklāt netiek parādīts arī tas, kā elektrolīnijai tuvumā esošie objekti ietekmē aizsargietaišu izvietošanas biežumu. 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, tieša zibensizlāde samazinās, savukārt netiešas izlādes ietekme palielinās. Elektrolīnijai tuvumā esošie koki lietus laikā palielina elektrolīnijas pārklāšanās skaitu [37]. Nevienā no abiem modeļiem netiek piedāvāta alternatīvu analīze, piemēram, izmantot citu zibensstrāvas vērtību, citus izolatorus vai balstu tipus, ja iegūtais aizsargietaišu izvietojuma biežums nav apmierinošs, turklāt netiek ņemts vērā arī tas, ka izolēto vadu izolācijas spriegumizturība ar gadiem pasliktinās [8]. Šī iemesla dēļ autora piedāvātajā metodoloģijā tiek apkopoti elektrolīnijas spriegumizturības ietekmējošie faktori un veikta alternatīvu analīze. Piedāvātā metodoloģija sākotnēji izstrādāta Latvijas teritorijai, tās vienkāršotā blokshēma parādīta 1.1. attēlā.



1.1. att. Piedāvātās metodoloģijas vienkāršota blokshēma.

2. ZIBENSSTRĀVA UN TĀS MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

Zibensizlāde ir viena no dabas parādībām, ko 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 izvietojuma vietas un biežumu.

Zibensstrāvas parametri tiek pētīti kopš 20. gs. vidus, un tie lielākoties tiek iegūti no mērījumiem, kas veikti augstos objektos. Zibensstrāva parasti sastāv no vienas vai vairākām komponentēm (pirmās impulsstrāvas, sekojošām impulsstrāvām vai ilgstrāvas) [15].

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.

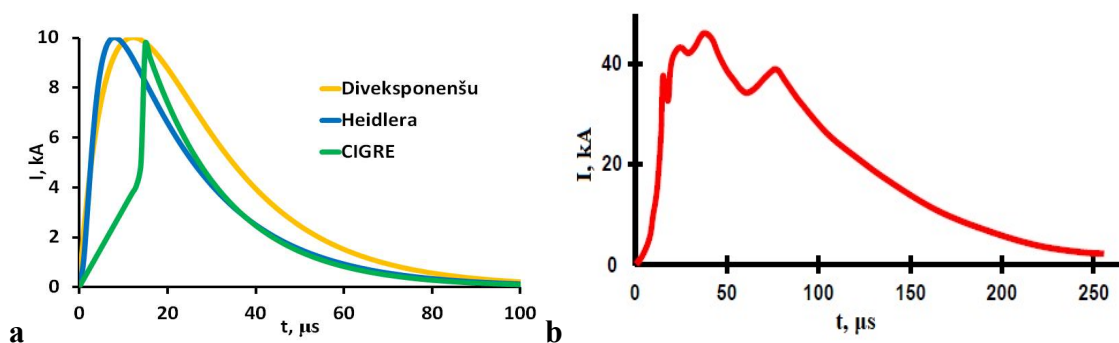
Praksē tiek lietoti vairāki zibensstrāvas matemātiskie modeļi, tomēr, lai tos varētu plašāk izmantot, zibensstrāvas matemātiskajam modelim ir jāizpilda šādas prasības [19]:

- 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.

Pirmā prasība, ko nepieciešams salīdzināt, ir ar matemātisko modeli iegūtā zibensstrāvas impulsa formu ar dabā novēroto. Autora publikācijā [44] zibensstrāvas matemātiskie modeļi tika pārbaudīti, modelējot zibensizlādi vides sprieguma nozares līnijā, kur zibensstrāvas

modelēšanai vēl netika izmantotas izolēto vadu līnijas, lai iegūtos rezultātus varētu salīdzināt ar literatūrā atrodamajiem.

Zibensstrāvas matemātisko modeļu iegūto zibensstrāvas impulsu formu grafiskais salīdzinājums parādīts 2.1. att. a, savukārt 2.1. att. b redzama dabā novērotās pirmās negatīvās zibensizlādes zibensstrāvas impulsa forma.



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

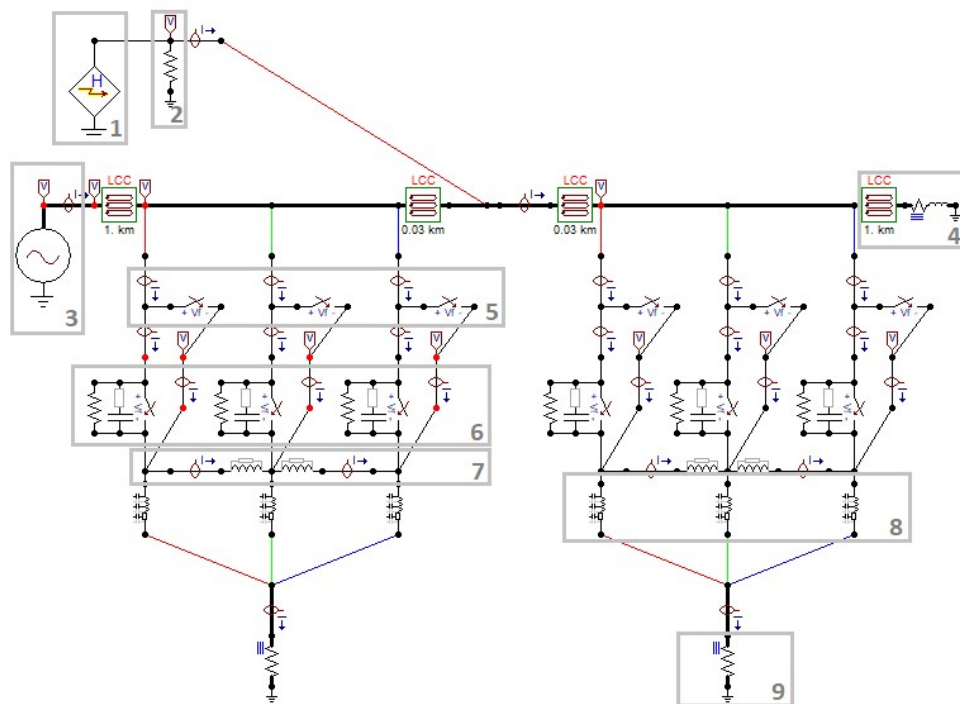
Salīdzinot līknes 2.1. att., redzam, ka neviens no matemātiskajiem modeļiem nespēj pilnīgi attēlot zibensstrāvas impulsu, jo dabā zibensstrāvai nav tik gluda forma. Autora publikācijā [44], salīdzinot zibensstrāvas matemātiskos modeļus vīdsprieguma elektriskajā tīklā, var novērot, ka Heidlēra piedāvātais 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 lietot pie maziem zibensstrāvas impulsa kāpumlaikiem, bet CIGRE modeļa lietojumu apgrūtinā tas, ka zibensstrāvas impulsa forma tiek aprakstīta ar divām izteiksmēm. Arī zibensstrāvas impulsa parametrus nav iespējams precīzi pielāgot zibensstrāvas impulsam, jo to diapazons ir pietiekami plašs. 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.

Ņemot vērā iepriekš minēto, zibensaizsardzības ietaišu simulācijas modelī zibensstrāvas impulsa aprakstīšanai ir lietots Heidlēra matemātiskais modelis.

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 vīdsprieguma kailvadu un izolēto vadu elektrolīnijā, izmantojot EMTP/ATP līniju un kabeļu konstantes bloku LCC (Line/Cable Constant) ar JMarti modeli [33]. 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.

Promocijas darbā izstrādāts arī elektriskā loka aizsargietais un tā darbības simulācijas modelis, kas dots 2.2. attēlā, kur zibensizlāde notiek vīdsprieguma nozares elektrolīnijas laiduma vidū starp diviem balstiem. Ar šo modeli aplūkoti varianti, kad aizsargietais izvietota

abos balstos, aizsargietais nav nevienā balstā, aizsargietais ir balstā, kas atrodas barošanas avota pusē un aizsargietais ir balstā, kas atrodas slodzes pusē.



2.2. att. *EMTP/ATP* modelis zibensizlādes simulācijai videsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas laidumā.

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

Zibensstrāvas impulsa aprakstīšanai, kā iepriekš tika noskaidrots, ir lietots Heidlera strāvas avots (2.2. att. 1). Zibensstrāvas maksimumvērtība $I_m = 3$ kA. Atbilstoši IEC-62305-1 [15] pirmās zibenizlādes aprakstīšanai $\eta = 0,93$, $\tau_1 = 19$ μ s, $\tau_2 = 485$ μ s un $n = 10$. Zibens kanāla pretestība (2.2. att. 2) vienāda ar 400 Ω [4]. Tīkla spriegums (2.2. att. 3) ir vienāds ar 20 kV un 50 Hz frekvenci. Elektrolīnijas slodze (2.2. 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 aizsargietais (2.2. att. 5) ir attēlota kā sprieguma kontroles slēdzis starp izolēto vadu un traversu, iestatītais nostrādes spriegums ir 180 kV. Elektrolīnijas izolators (2.2. 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) [22]. 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 (2.2. att. 7) induktivitāte $L_{ca} = 1$ μ H. Elektrolīnijas balsta pretestība ir aprakstīta ar izkliedētu parametru pretestību, ko *EMTP/ATP* apraksta *LINEZT_1* bloks (2.2. att. 8), kur balsta pretestība $Z_p = 295$ Ω /m, bet balsta zemētāja pretestība (2.2. att. 9) balstiem bez zemējuma ir 1000 Ω [9].

2.3. attēlā dotas strāvu vērtības variantā, kad aizsargietais uzstādīts abos balstos un balsta Nr. 2 strāvas sadalījums uz izolatora un aizsargietais. Kā redzams 2.3. attēlā, lai notiktu elektrolīnijas pārklāšanās, strāvai jāpārsniedz $I_{ml} = 4500$ A. 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. Skaidri redzams

arī tas, ka elektriskais loks ir iededzies uz aizsargietais nevis notikusi elektrolīnijas pārklāšanās, tātad izolētais vads netiek bojāts. Rezultātā iespējams pārbaudīt strāvas vērtības, pie kurām notiek elektrolīnijas pārklāšanās, atbilstoši 1.1. attēla 5. blokā veiktajiem aprēķiniem.



2.3. att. Strāvu vērtības balstos ar aizsargietaisēm abos balstos un strāvas sadalījums uz izolatora un aizsargietais balstā Nr. 2.

3. ZIBENSIZLĀDES PUNKTA NOTEIKŠANA

3.1. Zibenizlādes biežums

Viens no parametriem, kas ietekmē elektrolīniju zibensaizsardzības ietaišu izvietojanas biežumu, ir ikgadējais zibens spērienu blīvums N_g , kas ir zibensizlāžu 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 šādu formulu [23]:

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

Tropiskās joslas apgabalos šī formula dod lielu kļūdu, tāpēc atšķirīgiem apgabalos ieteicams lietot formulas, kas iegūtas no attiecīgā reģiona mērījumiem. Maziem apgabalos vai apgabalos ar mazu negaisa dienu skaitu gadā T_d ir liela standarta novirze, apmēram 50 %, tas nozīmē, lai iegūtu precīzus datus, ir nepieciešami vairāki gadi.

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 [11]

$$N = \frac{K_o N_g (b + 10,5 h_l^{0,75})}{1000}, \quad (3.2)$$

kur K_o – orogrāfiskais koeficients; b – elektrolīnijas platums, m; h_l – vidējais elektrolīnijas augstums, m. Ja orogrāfiskie parametri nav zināmi, orogrāfiskais koeficients tiek pieņemts $K_o = 1,8$. Ievietojot šo vērtību (3.2), iegūstam rezultātu, kas ir pielīdzināms Eriksona [16] piedāvātajai un CIGRE [11] un IEEE [23] rekomendētajai izteiksmei

$$N = \frac{N_g}{1000} (28h^{0.6} + b), \quad (3.3)$$

kur h – augstākā vadītāja augstums elektrolīnijas balstā, m.

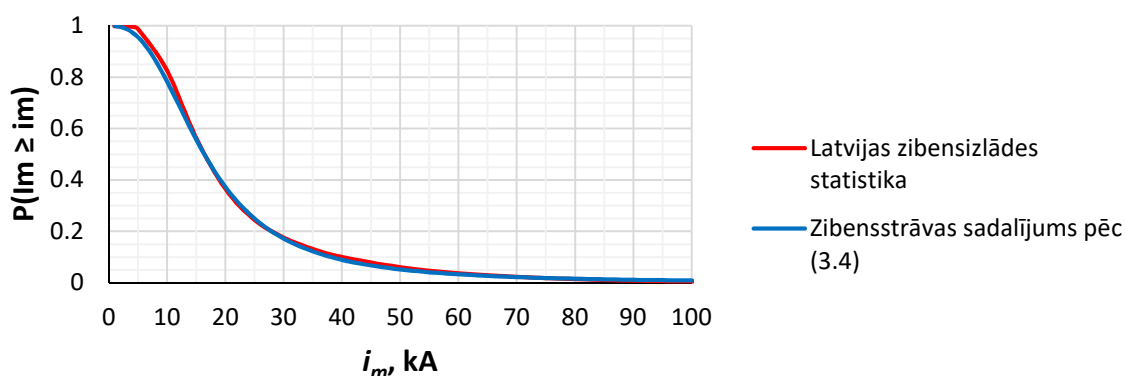
Zibensizlādes ikgadējā zibens spērienu blīvuma un skaita elektrolīnijā aprēķinam metodoloģijas 1. blokā (1.1. att.) ir lietotas attiecīgi (3.1) un (3.3) izteiksmes.

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. No valsts SIA "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs" pētījuma neapstrādātā veidā tika iegūti zibensizlādes dati no zibens sensoriem, kas ietvēra šādu informāciju: izlādes datums, laiks, koordinātes, zibensstrāvas maksimumvērtība, zibens spērienu skaits izlādes laikā, vietas kļūda un izlādes tips (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. Aplūkotajā periodā no 2006. līdz 2017. gadam strāvu diapazons 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 turpmākajā darbā ir izmantota aprēķinos kā 50 % iespējamības strāva.

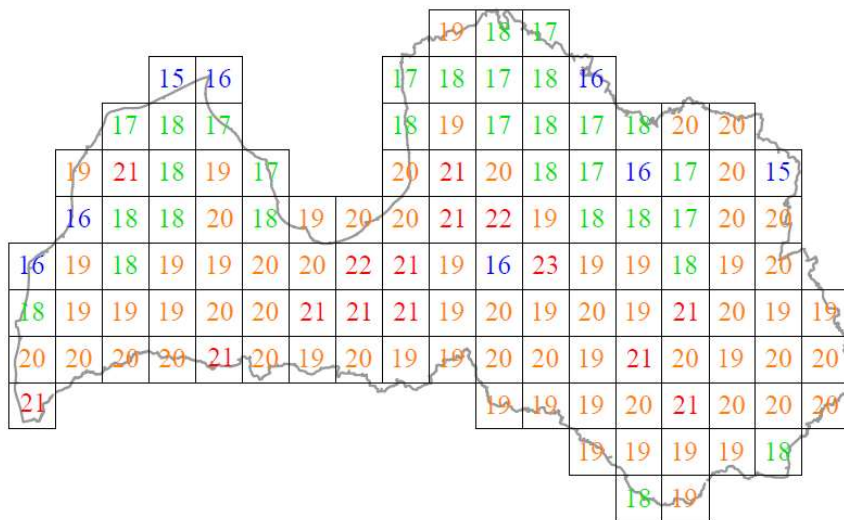
Apkopojot zibensizlādes statistiku, iegūta sadalījuma līkne, kas dota 3.1. attēlā, ko Latvijas teritorijā raksturo [23] izmantotā funkcija

$$P(I_m \geq i_m) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_m}{16,4}\right)^{2,6}}. \quad (3.4)$$



3.1. att. Zibensstrāvas maksimumvērtības sadalījuma līkne Latvijas teritorijā.

Ikgadējā zibens spērienu blīvuma noteikšanai konkrētā Latvijā teritorijā Latvija tika sadalīta 25 km × 25 km laukumos. Katram laukumam tika apkopots negaisa dienu skaits katrā gadā, un tad aprēķināts vidējais negaisa dienu skaits dotajā periodā. Vidējais negaisa dienu skaits gadā T_d Latvijas teritorijā dots 3.2. attēlā.



3.2. att. Vidējais negaisa dienu skaits gadā T_d Latvijas teritorijā (2006.–2017. g.).
Sadalījums laukumos 25 km × 25 km.

3.2. 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. Tuvumā esošo objektu ietekme uz tiešas zibensizlādes skaitu

Atbilstoši IEEE 1410 metodoloģijai elektrolīnijas tuvumā esošo objektu ietekmi uz tiešu zibensizlāžu skaitu aprēķina, izmantojot noseģšanas koeficientu S_f , kas tiek definēts kā elektrolīnijas vienība, kas tiek noseģta ar tuvumā esošo objektu. Zinot koeficientu S_f , var aprēķināt ikgadējo zibens spērienu skaitu elektrolīnijā, kuras tuvumā atrodas citi objekti

$$N_s = N(1 - S_f). \quad (3.5)$$

Ja elektrolīnija atrodas atklātā laukā bez tuvumā esošiem objektiem, 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.

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

$$N_s = N[1 - (S_{f_l} + S_{f_k})]. \quad (3.6)$$

Ja summārā noseģšanas koeficienta vērtība ir lielāka par vienu, noseģšanas koeficientu pieņem vienādu ar vienu [23].

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

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 aplūkoti trīs zibensstrāvas maksimumvērtību iegūti koeficienti, ņemot vērā zibensstrāvas maksimumvērtības sadalījumu Latvijā (3.1. 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 [29] 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, nosegšanas koeficienta S_f vērtība netiek būtiski ietekmēta, atšķirība ir 1–2 % robežās, tāpēc, lai koeficientu lietošanu padarītu praktiskāku, turpmākajos aprēķinos tiek lietots viens elektrolīnijas platums – $b = 0,8$ m, kas atbilst starpbalsta S20.I-HT[29] platumam.

Tuvumā esošo objektu augstumam tiek piedāvātas septiņas 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, nosegšanas koeficients S_f ir mazliet lielāks nekā gadījumā ar atsevišķi stāvošu koku. Tāpēc turpmākajiem aprēķiniem tiek pieņemts, ka elektrolīnijai blakus esošie objekti ir izvietoti paralēli elektrolīnijai vienmērīgā, taisnā līnijā.

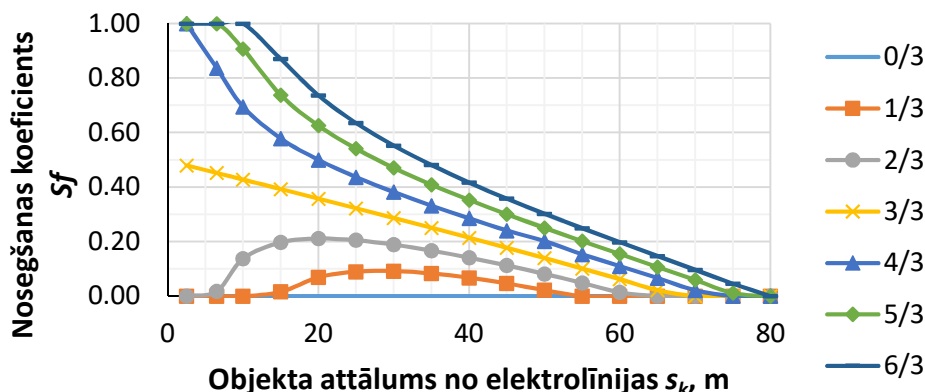
Zibensizlādes attālums r_{sd} tiek pieņemts vienāds gan izlādei uz zemi, gan izlādei elektrolīnijā, jo sadales tīklu līniju augstums, salīdzinot ar pārvades tīklu līnijām, ir neliels. Turpmākajiem aprēķiniem zibensizlādes attālums

$$r_{sd} = 10 I_m^{0,65}. \quad (3.7)$$

Nosegšanas koeficienta S_f noteikšanai tiek lietota zibens uztvērējvirsmas metode [17]. 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 . Kad noteikti loku garumi l_1 un l_2 , iespējams aprēķināt nosegšanas koeficientu

$$S_f = 1 - \frac{l_2}{l_1}. \quad (3.8)$$

Aprēķinātie nasegšanas koeficienti S_f elektrolīnijai ar augstumu $h_l = 10$ m un zibensstrāvas maksimumvērtību $I_m = 16,4$ kA grafiski līkņu veidā doti 3.3. attēlā. Kad iegūtas nasegšanas koeficienta S_f vērtības, izmantojot izteiksmes (3.5) vai (3.6), iespējams aprēķināt ikgadējo zibens spērienu skaits citu objektu nasegtā elektrolīnijā N_s .



3.3. att. Nasegšanas koeficients S_f kā funkcija no objekta attāluma līdz elektrolīnijai s_k ar elektrolīnijas augstumu $h_l = 10$ m un $I_m = 16,4$ kA.

3.3. attēlā redzams, ka, pieaugot objekta augstumam h_k , pieaug arī nasegšanas koeficienta S_f vērtība un, pieaugot objekta attālumam no elektrolīnijas s_k , nasegšanas koeficienta S_f vērtība samazinās. Ja elektrolīnijai blakus esošā objekta augstums ir vienāds ar elektrolīnijas augstumu $h_k = h_l$, nasegšanas 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.

4. PĀRSPRIEGUMI VIDSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJĀS

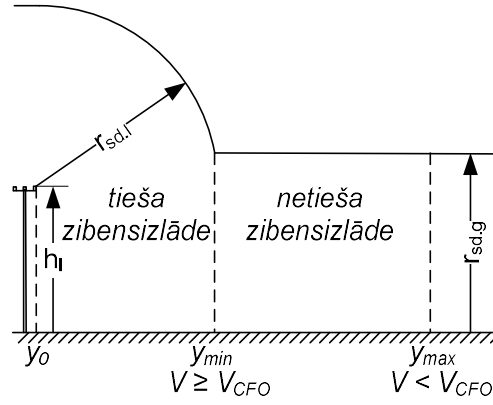
4.1. Tiešas un netiešas zibensizlādes radīti pārspriegumi

Kopējo zibensizlādes inducēto pārspriegumu radīto elektrolīnijas pārklāšanās skaitu elektrolīnijā F var aprēķināt no tiešas un netiešas zibensizlādes radītā pārklāšanās skaita [34]

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

kur 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.

Tiešas zibensizlādes radīto elektrolīnijas izolācijas pārklāšanos var aprēķināt [34]

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

kur

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

kur β – logaritmiskā standarta novirze; $\bar{I}$ – zibensstrāvas maksimumvērtības mediānā vērtība.

Vidsprieguma elektrolīniju salīdzinoši zemās spriegumizturības dēļ var pieņemt, ka integrāļa vērtība (4.2) elektrolīnijām bez izlādņiem ir aptuveni 1, tātad $F_d \approx N$ [34]. No tā izriet, ka tiešas zibensizlādes radīto izolācijas pārklāšanās skaitu klajā laukā var aprēķināt, izmantojot (3.3) formulu, bet elektrolīnijai ar tuvumā esošiem objektiem (3.5) vai (3.6) formulu.

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.

Netiešas zibensizlādes radīto elektrolīnijas pārklāšanās skaitu var aprēķināt [23]

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

Minimālo attālumu $y_{\min}$ no elektrolīnijas, pēc kura elektrolīnijā nenotiek tieša zibensizlāde, var aprēķināt šādi [23]:

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

Zibensizlādes attālumus no elektrolīnijas $r_{sd,l}$ un no zemes $r_{sd,g}$ aprēķina, izmantojot izteiksmi (3.7).

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 μ s) standarta atmosfēras apstākļos [23].

Zviedru inženieris Sūne Rusks (*Sune Rusck*) [39] zibensizlādes un elektrolīnijas savstarpējās mijiedarbības aprakstīšanai vispirms piedāvā kopējo elektrisko lauku uz vadītāja virsmas izteikt atkarībā no skalārā un vektoriālā potenciāla.

Rusks piedāvā arī vienkāršoto formulu aptuvenam elektrolīnijā inducētā pārsprieguma maksimumvērtības aprēķinam [23]

$$U_m = Z_0 \frac{k_v h_l I_m}{y}, \quad (4.6)$$

kur Z_0 – viļņa īpatpretestība, Ω ; k_v – zibensizlādes kustības ātrumu raksturojošs koeficients.

Vienu no Ruska vienkāršotās formulas ierobežojumiem, kas ir ideāla grunts vadītspēja, efektīvi un pietiekami precīzi var novērst, mākslīgi palielinot elektrolīnijas augstumu. Austrāļu zinātnieks Mets Darveniza (*Mat Darveniza*) ierosina elektrolīnijas augstumu h_l izteiksmē (4.6) aizvietot ar efektīvo augstumu h_{ef} , kas palielina elektrolīnijas augstumu, ņemot vērā grunts pretestību ρ [14]

$$h_{ef} = h_l + 0,15\sqrt{\rho}. \quad (4.7)$$

Indiešu zinātnieks Ašoks K. Agravals (*Ashok K. Agrawal*) kopā ar kolēģiem [2] piedāvā zibensizlādes un elektrolīnijas savstarpējās mijiedarbības aprakstīšanai iekļaut Maksvela vienādojumus un rezultātā mijiedarbības vienādojumus izteikt caur izkliedes spriegumu. Agravala modelis tiek izmantots arī plaši lietotās zibensizlādes radīto pārspriegumu (*LIOV – Lightning-induced overvoltage*) [30] 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 lietošanu aprēķinu veikšanai atļauj arī IEEE [23] un *CIGRE*, turklāt abās sistēmās ar *LIOV* kodu iegūtais rezultāts tiek uzskatīts par atsauces lielumu zibensizlādes inducētā pārsprieguma novērtēšanai. Lai izvairītos no sarežģītajiem elektromagnētiskā lauka aprēķiniem, izmantojot multiplās dispersijas analīzi, Maķedonijas zinātnieks Voislavs Jankovs (*Voislav Jankov*) inducētā pārsprieguma maksimumvērtības aprēķinam piedāvā tuvinātu vienādojumu [24].

Agrāk veiktajos salīdzinājumos tika novērots, ka, pieaugot grunts pretestībai, pieaug arī zibensizlādes inducētā pārsprieguma vērtība. Ja grunts īpatpretestība $\rho = 100 \Omega/\text{m}$ un $1000 \Omega/\text{m}$, nobīde attiecīgi ir 13 % un 32 %. Līdzīga kļūda tika konstatēta arī, Ruska vienkāršoto modeli salīdzinot ar Agravala modeli. Ruska vienkāršoto modeli (4.6) ar pietiekami augstu precizitāti var lietot zibensizlādes inducētā pārsprieguma maksimumvērtību aprēķinam, ja elektrolīnijas augstums h_l tiek aizvietots ar efektīvo augstumu h_{ef} atbilstoši izteiksmei (4.7). Metodoloģijā netiešas zibensizlādes inducētā pārsprieguma aprēķinam lieto Ruska vienkāršoto modeli (4.6), elektrolīnijas augstumu h_l aizvietojo ar efektīvo augstumu h_{ef} (4.7).

4.2. Vidsprieguma izolēto vadu elektrolīnijas izolācijas spriegumizturība

Izolācijas izturību var aprakstīt ar vairākām metodēm, tādām kā pamata zibensizlādes impulsa izolācijas līmenis (*BIL*, angļu val.: *basic lightning impulse insulation level*), pamata komutācijas impulsa izolācijas līmenis (*BSL*, angļu val.: *basic switching impulse insulation level*) un kritiskais pārklāšanās spriegums (*CFO*, angļu val.: *critical flashover voltage*) [21].

Piedāvātajā metodoloģijā tiek pieņemts, ka dotās CFO vērtības ir pie standarta atmosfēras apstākļiem un tās netiek koriģētas.

Elektrolīnijas parasti sastāv no vairākiem elementiem, un katram ir sava izolācijas izturība, piemēram, porcelāns, kompozītmateriāli un gaiss. 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 [43]. 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 [23]. Šī metode ņem vērā katra pievienotā elementa izolācijas CFO ieguldījumu kopējai elektrolīnijas izolācijas CFO vērtībai. Otrā pievienotā elementa izolācijas CFO

$$CFO_{add.sec} = 0,45CFO_{ins}, \quad (4.8)$$

kur CFO_{ins} – primārā elementa izolācijas CFO , kV. Trešā un katra nākamā pievienotā elementa izolācijas CFO

$$CFO_{add.third} = 0,2CFO_{ins}, \quad (4.9)$$

bet kopējā elektrolīnijas izolācijas CFO vērtība

$$CFO_T = CFO_{ins} + CFO_{add.sec} + CFO_{add.third} + \dots + CFO_{add.n}. \quad (4.10)$$

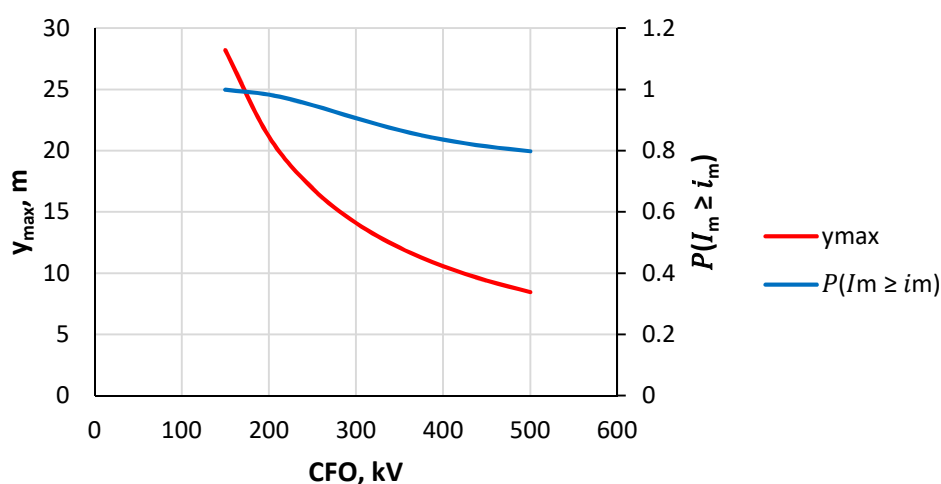
Pievienotā elementa izolācijas CFO metode parasti dod rezultātu ar 20 % precizitāti, precīzākai CFO noteikšanai ir jāveic laboratorijas impulsu testi. Veicot impulsu testus sausos apstākļos, iegūtais rezultāts jāpareizina ar 0,8, lai iegūtu CFO slapjiem apstākļiem [23].

Elektrolīnijai iespējami vairāki izolācijas pārklāšanās ceļi, piemēram, izolētā vada izolācija un izolators vai izolētā vada izolācija un gaiss. Tāpēc svarīgi ir apzināt visus iespējamus pārklāšanās ceļus un turpmākiem aprēķiniem izmantot viszemāko elektrolīnijas CFO vērtību. Dažādu elektrolīnijas elementu CFO lielumi apkopoti 4.1. tabulā, veidojot elektrolīnijas elementu CFO vērtību datubāzi, ko iespējams papildināt.

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 % [35]. Aprēķinātā elektrolīnijas CFO ietekme uz varbūtību (3.4), ka zibensstrāvas maksimumvērtība I_m pārsniegs strāvas maksimumvērtību I_{ml} (1.2), kas rada izolācijas pārklāšanos, dota 4.2. attēlā, pieņemot, ka aizsargietais izvietots katrā 4. elektrolīnijas balstā jeb ik pēc 240 m. 4.2. attēlā redzams arī, ka attālums no elektrolīnijas y_{max} , līdz kuram elektrolīnija pakļauta tiešas un netiešas zibensizlādes radītiem pārspriegumiem, 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 Ω , bet zibensizlādes kustības ātrumu raksturojošais koeficients k_v = 1,29.

Datubāzes struktūra dažādu elektrolīnijas elementu *CFO* minimālās vērtības

Izolatora tips	kV	Izolētā vada izolācija	kV
Tapizolators SDI37 [40]	125	<i>XLPE</i> 2,3 mm [26]	92
Tapizolators SDI30 [40]	125	<i>XLPE</i> 3,1 mm [35]	130
Piekarizolators SDI90.150 [40]	126	<i>HDPE</i> 3,9 mm [35]	221
Piekarizolators SDI90.280 [40]	171	...	
Piekarizolators LK-70/20-III [12]	125		
Piekarizolators LK-70/20-VII [12]	135		
...			
Izolējošais materiāls	kV/m	Elektriskā loka aizsargietais tips	V_{IR} , kV
Gaiss [23]	600	<i>APD</i>	vienāds ar izolatora <i>CFO</i>
Koka balsts [23]	330	<i>PAD</i> (100 mm) [26]	120
...		<i>PAD</i> (150 mm) [26]	180
		<i>CLAH</i> [18]	70
		...	



4.2. att. Elektrolīnijas *CFO* ietekme uz varbūtību, ka I_m pārsniegs vērtību, kas rada pārklāšanos, un uz attālumu y_{max} , līdz kuram elektrolīnija pakļauta zibensizlādes radītiem pārspriegumiem.

4.3. Izolēto vadu nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas *CFO*

Veicot sākotnējos aprēķinus, parasti tiek ņemti vērā jaunu elektrolīnijas elementu raksturlielumi un netiek ņemts vērā, ka elektrolīnijas kalpošanas laiks ir vairāki desmiti gadu, un tas nozīmē, ka laikapstākļu, apkārtējās vides vai kādu citu iemeslu dēļ elektrolīnijas *CFO* var samazināties, kas tiek aplūkots metodoloģijas 6. blokā (1.1. att.).

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 izolāciju [38]. Tāpēc nepieciešams aplūkot galvenos faktorus, kas ietekmē elektrolīnijas CFO samazinājumu:

1. bojāta izolācija;
2. apkārtējās vides piesārņojums;
3. izolācijas novecošanās.

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 nolietošana pat par 50 %, lai gan pirmajos piecos gados ievērojams CFO samazinājums nav redzams.

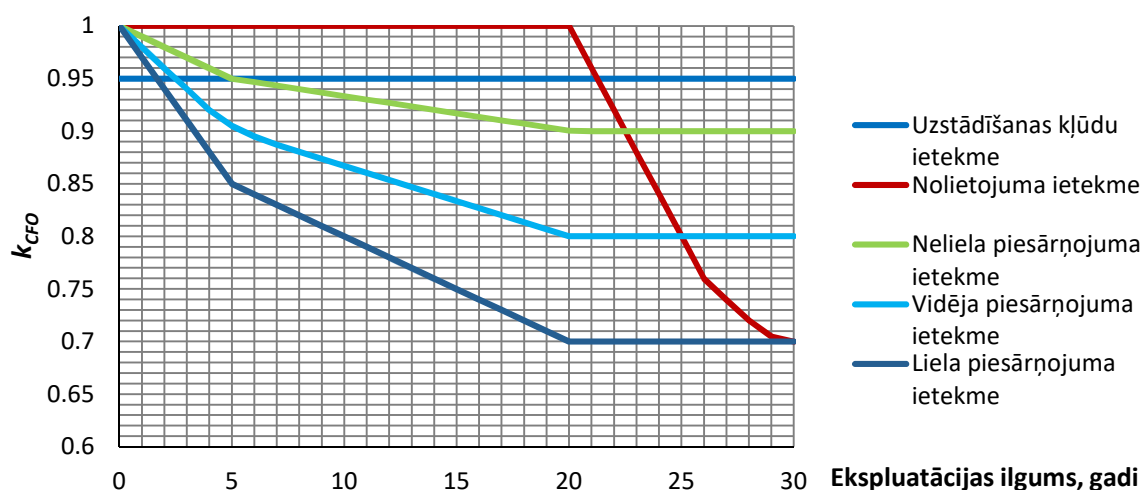
Eksperimentāli ir pierādīts, ka izolēta kabeļa aptuvenais kalpošanas ilgums ir 20–30 gadu [36]. Piedāvātajā metodoloģijā elektrolīnijas nolietojuma prognozei tiek apskatīts 30 gadu ilgs ekspluatācijas periods. Ņemot vērā iepriekš apskatīto faktoru ietekmi uz elektrolīnijas CFO , tiek izmantots vannas līknes princips, lai aplūkotu prognozēto nolietojuma ietekmi uz elektrolīnijas CFO , kas tiek definēts kā prognozētais CFO samazinājuma koeficients k_{CFO} .

Apkārtējās vides piesārņojuma ietekmei piedāvāti trīs varianti atbilstoši promocijas darba pielikumā esošās 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 maksimumu un turpmāk neietekmē izolatoru CFO . Apkārtējās vides piemēram E1 piesārņojuma ietekme uz elektrolīnijas izolatoru CFO netiek ņemta vērā.

Tiek pieņemts, ka dažādi ar ekspluatāciju nesaistīti bojājumi, piemēram, izolēto vadu ražošanas, transportēšanas un montāžas defekti (t. sk. izolācijas bojājumi) samazina izolētā vada CFO par 5 %.

Ņemot vērā agrāk veiktos pētījumus [36], [8], 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 darbā izstrādātās prognozētā CFO samazinājuma koeficienta k_{CFO} vērtības dotas 4.3. attēlā.



4.3. 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 piecu gadu periodam, izmantojot prognozēto elektrolīnijas elementa spriegumizturību

$$CFO_i = k_{CFO} CFO. \quad (4.11)$$

5. PIEDĀVĀTAIS ALGORITMS ZIBENSAIZSARDZĪBAS AIZSARGIETAIŠU OPTIMĀLA IZVIETOŠANAS BIEŽUMA NOVĒRTĒŠANAI

5.1. Izvirzītie izolēto vadu zibensaizsardzības ietaišu izvietojuma kritēriji

Kā minēts 1. nodaļā, notiekot tiešai vai netiešai zibensizlādei, 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 aizsargietaišiem. Esošās metodoloģijas par aizsargietaišu izvietojuma kritēriju izvirza tikai zibensizlādes radītu elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F , tomēr optimālai izvietojuma biežuma novērtēšanai ar to ir nepietiekami.

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

- 1) kopējais zibensizlādes radītais elektrolīnijas pārklāšanās skaits F ;
- 2) elektrolīnijas pārklāšanās biežums $\zeta = 1/F$;
- 3) prognozētā izolēto vadu elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz elektrolīnijas pārklāšanās skaitu un biežumu;
- 4) alternatīvo risinājumu analīze.

Piedāvātajā metodoloģijā elektriskā loka aizsargierīču izvietojuma biežumu ietekmē šādi faktori un aprēķinu parametri:

- 1) aplūkojamā reģiona zibensizlādes 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 zibensizlādes, no kura tiek aprēķināts elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ , kas kalpo par aizsargietaišu izvietojuma biežuma novērtēšanas kritēriju. Metodoloģijā autora piedāvātie ζ robežlielumi aizsargietaišu izvietojuma biežuma novērtēšanai doti 5.1. tabulā.

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 vīdsprieguma līnija montēta kopējos balstos, ietekmi uz aizsargietaišu izvietojuma biežumu.

Aizsargietaišu izvietošanas 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

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_g , strāvas maksimumvērtība elektrolīnijā I_{ml} , strāvas maksimumvērtība elektrolīnijas balstā I_{mb} un netiešas zibensizlādes radīta elektrolīnijas pārklāšanās skaita F_p aprēķinu veikšanai tiek lietotas IEEE 1410 [23] metodoloģijas formulas un Ruska vienkāršotais modelis [39] ar Darveniza ierosināto efektīvo augstumu h_{ef} [14]. Nosešanas koeficienta noteikšanai tiek lietota zibens uztvērējvirsmas metode [17].

5.2. Algoritma struktūra

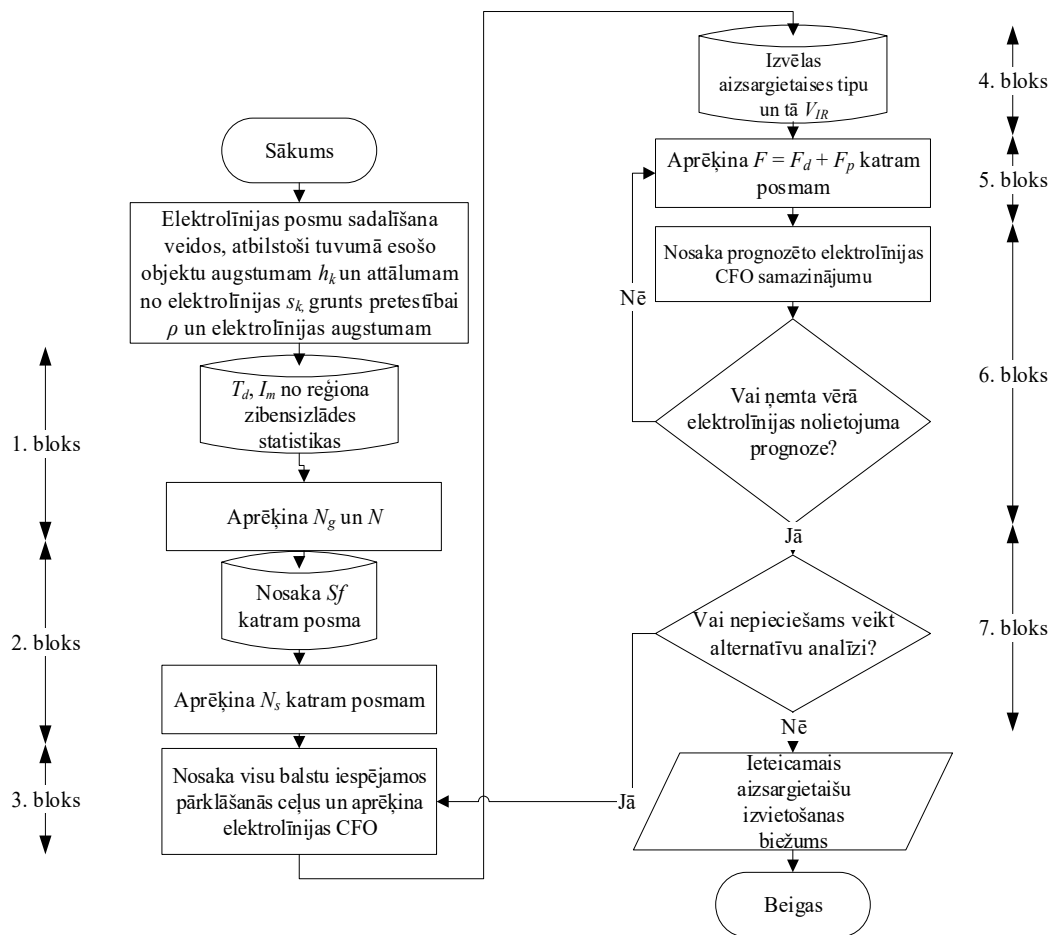
Vienkāršota elektriskā loka aizsargietaišu izvietošanas metodoloģijas blokshēma dota 1.1. attēlā, izvērstā blokshēma – 5.1. attēlā. Algoritms ir iedalīts septiņās daļās, ko var sīkāk iedalīt nemainīgās un mainīgās daļās. Nemainīgās algoritma daļas ir:

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

Mainīgās algoritma daļas ir:

- 1) parametri, kas atkarīgi no elektrolīnijas trases. Nosešanas 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) aizsargietaisē tipa izvēle, mainīgs paliekošais spriegums V_{IR} ;
- 4) aprēķinātais kopējais elektrolīnijas pārklāšanās skaits, ko ietekmē iepriekš 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 .

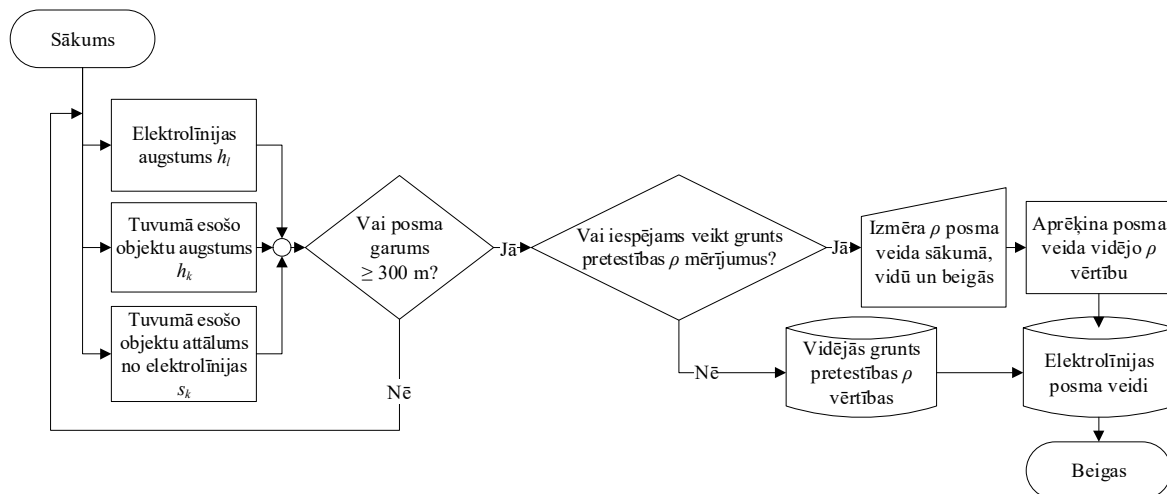


5.1. att. Elektriskā loka aizsargietaišu izvietojanas biežuma novērtēšanas izvērstā blokshēma.

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

5.3. Izvērstā metodoloģijas skaidrojums un lietojuma piemērs

Elektrolīnijas pārbūvējamā posma veidu noteikšanas blokshēma dota 5.2. attēlā.



5.2. att. Pārbūvējamās elektrolīnijas sadalīšanas dažādu veidu posmos blokshēma.

Kad veikti sākotnēji nepieciešamie mērījumi un aprēķini, pārbūvējamo elektrolīnijas posmu iedala posmu veidos. Kopējais iespējamais posmu veidu skaits ir ļoti liels, jo piedāvātajā metodoloģijā doti septiņi dažādi elektrolīnijas augstumi h_l , septiņi 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. Elektrolīņu iedalot 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, to pieskaita pēc posma veida izvēles kritērijiem tuvākajam posma veidam.

Latvijas ikgadējo negaisa dienu kartē (3.2. att.) nosaka ikgadējo negaisa dienu skaitu T_d reģionā, kurā atrodas aplūkojamā elektrolīnija. Tālāk aprēķina ikgadējo zibens spērienu blīvumu N_g , izmantojot (3.1) izteiksmi. Nākamais solis ir katram posma veidam aprēķināt ikgadējo zibens spērienu skaitu elektrolīnijā N , izmantojot (3.3) izteiksmi.

Zinot ikgadējo zibens spērienu skaitu elektrolīnijā N , nepieciešams apskatīt, kā elektrolīnijas trasei tuvumā esošie koki ietekmē šo lielumu. Lai to izdarītu, ir jāatrod nosegšanas koeficients S_f katram no piemēra posmu veidiem, kā arī jāaprēķina ikgadējo zibens spērienu skaits citu objektu nosegtā elektrolīnijā N_s , izmantojot (3.5) vai (3.6) izteiksmi atkarībā no tā, vai objekti atrodas vienā vai abās elektrolīnijas pusēs.

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 4.1. tabulā. Elektrolīnijai tiek kombinēti vairāki izolējošie materiāli, tāpēc ir svarīgi apkopot visus iespējamās pārklāšanās ceļus un turpmākajiem aprēķiniem lietot vismazāko CFO_T vērtību, ko aprēķina, izmantojot (4.8), (4.9) un (4.10) formulas.

Tālāk seko aizsargietais tips izvēle, kur kā primārais izvēles kritērijs kalpo 5.2. tabulā dotās relatīvās izmaksas. Sākotnēji izvēlas lētāko aizsargietaisi, ja tā atbilst 1.1. tabulā dotajiem parametriem, tad no 4.1. tabulā dotās datubāzes nosaka V_{IR} .

5.2. tabula

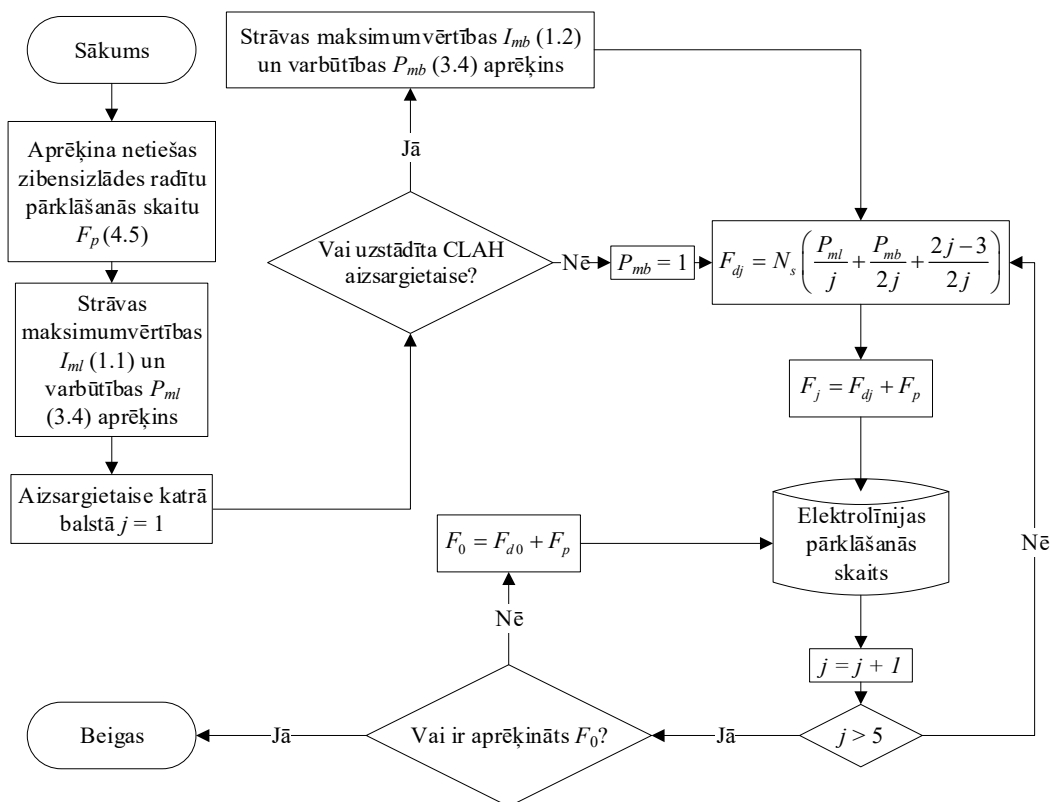
Elektriskā loka aizsargietaišu izmaksas relatīvajās vienībās

Aizsargietais tips	Izbūves relatīvās izmaksas
<i>APD</i>	1,0
<i>PAD</i>	1,4
<i>CLAH</i>	7,3

Elektrolīnijas pārklāšanās skaita F aprēķina blokshēma dota 5.3. attēlā. Aprēķins jāveic katram posma veidam un varbūtējās zibensstrāvas maksimumvērtības lielumam atsevišķi. Tiešas zibensizlādes radīto elektrolīnijas pārklāšanās skaitu F_d aprēķina, katra posma N_s pareizinot ar iegūto strāvas rašanās varbūtību, izmantojot sakarību

$$F_{dj} = N_s \left(\frac{P_{ml}}{j} + \frac{P_{mb}}{2j} + \frac{2j-3}{2j} \right), \quad (5.1)$$

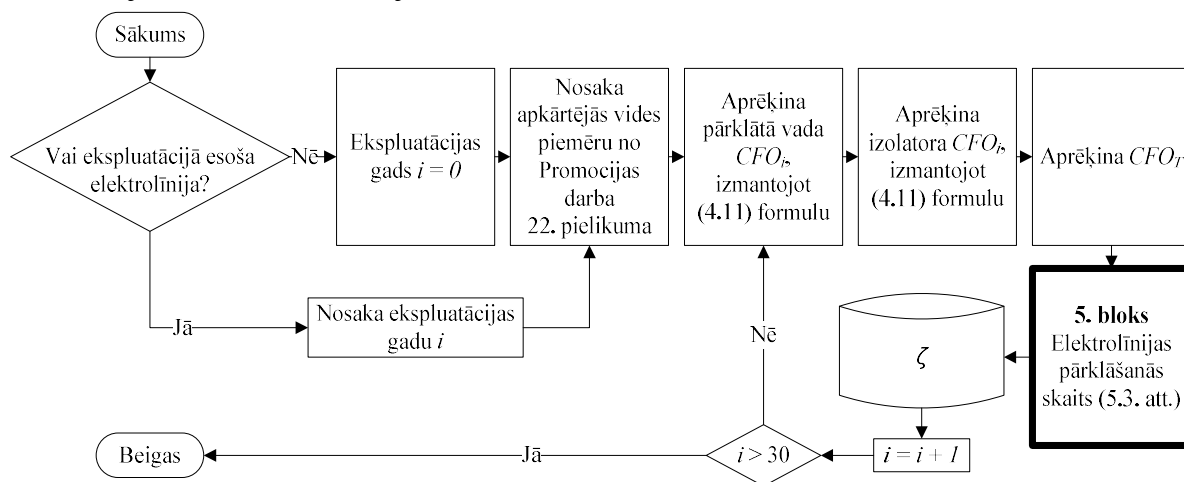
kur P_{ml} – varbūtība, ka zibensstrāvas maksimumvērtība pārsniegs aprēķināto strāvas maksimumvērtību elektrolīnijā; P_{mb} – varbūtība, ka zibensstrāvas maksimumvērtība pārsniegs aprēķināto strāvas maksimumvērtību elektrolīnijas balstā; j – laidumu skaits starp aizsargietaisēm.



5.3. att. Elektrolīnijas pārklāšanās skaita aprēķina blokshēma.

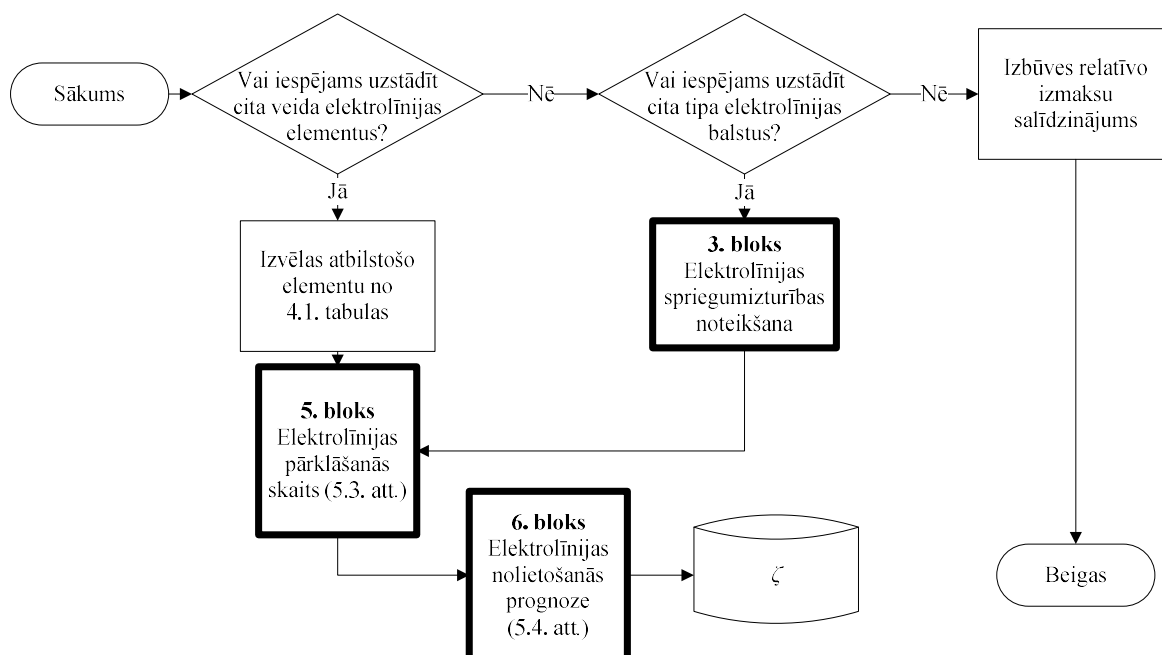
Ar (4.1) formulu tiek aprēķināts kopējais elektrolīnijas pārklāšanās skaits F , no kura iespējams aprēķināt elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ . Tas ir ieviests, lai sasaistītu elektrolīnijas pārklāšanās skaitu ar elektrolīnijas ekspluatācijas ilgumu gados, kas ir pamatā elektrolīnijas nolietojuma prognozei.

Elektrolīnijas ekspluatācijas laikā elektrolīnijas spriegumizturība samazinās. Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekme ir otrais aizsargietaišu izvietošanas biežuma noteikšanas kritērijs. Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekmes uz aizsargietaišu izvietošanas biežumu novērtēšanas blokshēma dota 5.4. attēlā. Elektrolīnijas nolietojuma ietekmi iespējams aplūkot arī ekspluatācijā esošai izolēto vadu līnijai, ja ir zināms tās uzstādīšanas gads un lietoto elektrolīnijas elementu sākotnējais CFO .



5.4. att. Prognozētā elektrolīnijas nolietojuma ietekmes novērtēšanas blokshēma.

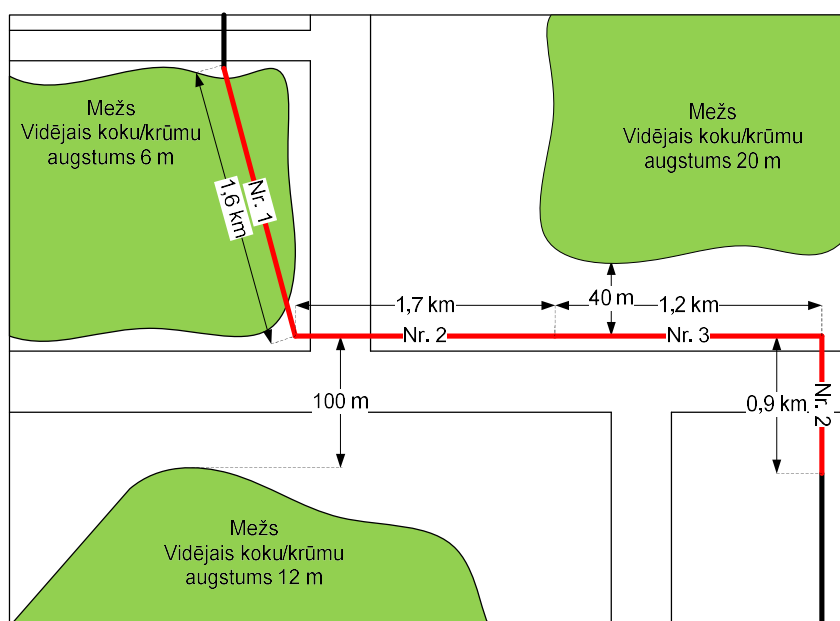
Alternatīvu analīzes, kas ir trešais aizsargietaišu izvietojanas biežuma noteikšanas kritērijs, blokshēma dota 5.5. attēlā.



5.5. att. Alternatīvu analīzes blokshēma.

Aplūkosim piedāvātās metodoloģijas lietojumu ar konkrētu Latvijai tipisku 20 kV gaisvadu līnijas pārbūves posma piemēru (5.6. att.), ko atbilstoši 5.2. attēlā dotajai blokshēmai iespējams iedalīt trīs dažādos posmu veidos:

1. posma veidā $h_l = 8$ m, $h_k = 6$ m, elektrolinija šķērso meža teritoriju, kur nepieciešams veikt trases tīrīšanu atbilstoši Aizsargjoslu likumam [3], kas ir 6,5 m uz katru pusi no elektrolinijas ass, tātad $s_k = 6,5$ m. Kopējais šī veida posma garums ir 2,0 km;
2. posma veidā $h_l = 10$ m, elektrolinija 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. posma veidā $h_l = 10$ m, elektrolinijai vienā pusē $s_k = 40$ m atrodas koki $h_k = 20$ m. Kopējais šī veida posma garums ir 1,8 km.



5.6. att. Pārbūvējamās elektrolinijas posma shematisks attēlojums.

5.3. 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 varbūtība	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

5.4. tabula

Elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz ζ ar 50 % zibensstrāvas maksimumvērtības varbūtību

		Laidumi starp aizsargietaisēm	ζ, gadi/km						
			0	5	10	15	20	25	30
Posma veids	Nr. 1	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 aizsargietais	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	3,7	2,4
	Nr. 2	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 aizsargietais	5,3	5,3	4,9	4,4	4,1	1,8	1,4
	Nr. 3	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 aizsargietais	9,1	9,1	7,9	6,8	6,0	2,2	1,6

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, tāpēc pieņemts, ka visos piemērā dotajos posmu veidos grunts pretestība $\rho = 100 \, \Omega\text{m}$, kas atbilst smilšainai gruntij [25].

Piemērā aplūkotā elektrolīnijas pārbūves posma kopējais elektrolīnijas pārklāšanās skaits F un elektrolīnijas pārklāšanās biežums ζ , neņemot vērā elektrolīnijas novecošanos un alternatīvu analīzi, apkopots 5.3. tabulā.

Nākamais solis ir aprēķināt elektrolīnijas kopējo pārklāšanās skaitu, izmantojot 5.4. attēlā doto blokshēmu un elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ . Aprēķini tiek veikti katram pārbūvējamās elektrolīnijas posma veidam. Elektrolīnijas nolietojuma ietekme uz ζ apkopota 5.4. tabulā.

Ieteicamais aizsargietaišu izvietošanas biežums un ar dažādu zibensstrāvas maksimumvērtības varbūtību iegūto rezultātu, kā arī alternatīvo risinājumu, ja netiek ņemtas vērā to relatīvās izbūves izmaksas, salīdzinājums dots 5.5. tabulā.

5.5. 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 <i>XLPE</i> 3,1 mm	3	2	3**	3	2	4**	3	2	4
Izolētais vads <i>HDPE</i> 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 aizsargietaisies uzstādīšanu katrā balstā.

** pēc 20.–25. ekspluatācijas gada aizsargietaisies ieteicams uzstādīt katrā 2. balstā.

6. PIEDĀVĀTĀS METODOLOĢIJAS VERIFIKĀCIJA

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 vīdsprieguma tīklam tipiskajām vērtībām [35]. 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 šādus mainīgos parametrus, iekavās dots bāzes lielums, ja ietekmes noteikšanai nav dots cits lielums:

- 1) elektrolīnijas augstums ($h_l = 10 \, \text{m}$);
- 2) elektrolīnijas platums ($b = 0,8 \, \text{m}$);
- 3) negaisa dienu skaits gadā ($T_d = 20$ negaisa dienas gadā);

- 4) nasegšanas 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).

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 izvēlēto diapazona sākuma un beigu vērtību.

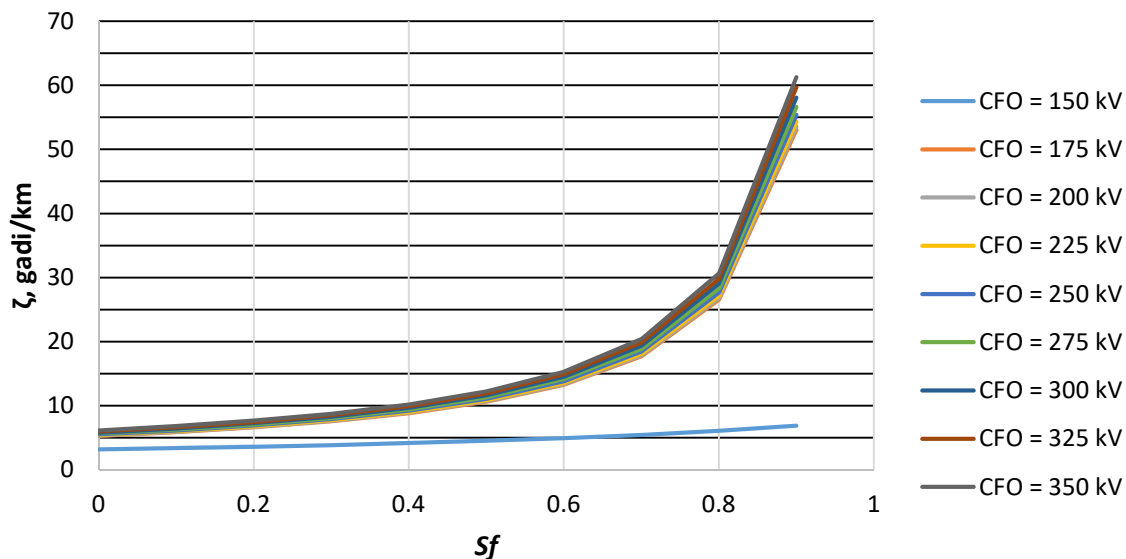
6.1. tabula

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 , Ω m	0 ÷ 1500	62	ρ neietekmē ζ , ja CFO > 250 kV
t_m , μ s	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	$0,3 \cdot 10^8$ ÷ $2,4 \cdot 10^8$	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	

6.1. tabulā redzams, ka elektrolīnijas pārklāšanās biežumu ζ visvairāk ietekmē nasegšanas koeficients S_f (skat. 6.1. att.) un negaisa dienu skaits gadā T_d , bet vismazāk – elektrolīnijas platums b un elektrolīnijas pārsprieguma viļņa pretestība Z_s . Promocijas darba pielikumā dotas S_f vērtības 21 dažādam gadījumam, jo tieši nasegšanas koeficients visbūtiskāk ietekmē tiešas zibensizlādes radītu elektrolīnijas pārklāšanās skaitu.

Atsevišķi parametri ietekmē ζ tikai pie CFO < 200 ÷ 250 kV, kas vēlreiz pierāda, ka izolēto vadu līnijas nolietojšanās dēļ samazināta elektrolīnijas CFO vērtība var būt noteicošais faktors zibensizlādes radītu bojājumu pieaugumam. 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 %.



6.1. att. Elektrolīnijas pārklāšanās biežums atkarībā no nosešanas koeficienta.

Ar IEEE 1410 un *SINTEF* metodoloģiju noteikto elektrolīnijas skaitu F , izsakot elektrolīnijas pārklāšanās biežumā ζ , izmantojot (5.2) izteiksmi un izmantojot piedāvātos ζ robežkritērijus no 5.1. tabulas, iegūstam aizsargietaišu izvietojanas biežumu, kas ir apkopots 6.2. tabulā.

6.2. tabula

Laidumu skaita starp aizsargietaisēm salīdzinājums

Aizsargietaišu izvietojanas metodoloģija		Posma veids Nr. 1	Posma veids Nr. 2	Posma veids Nr. 3
LEK 015		—	4–5	4–5
<i>SINTEF</i>		—	4	4
IEEE 1410		2	2	3
Piedāvātā metodoloģija	<i>XLPE</i> 2,3 mm izolācija	3	2	3
	<i>XLPE</i> 3,1 mm izolācija	3	2	4
	<i>HDPE</i> 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 izvietojanas biežums sakrīt ar LEK 015 doto aizsargietaišu izvietojanas 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.

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

1. Piedāvāta metodoloģija un algoritms zibensaizsardzības ietaišu izvietojuma 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 izvietojuma biežumu vīdsprieguma izolēto vadu elektrolīnijās 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 elektrolīnijā, ar kura palīdzību ir novērtēta zibensstrāvas maksimumvērtība I_m , kas ierosina elektrolīnijas pārklāšanos. Ar datorsimulācijas modeli iegūta aizsargietaišu izvietojuma 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.

KOPSAVILKUMĀ 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. AS "Sadales tīkls" Tehniskā politika (apstiprināta 09.05.2018).
6. Ausgrid Network Standard 220. *Overhead Design Manual*. February 2011, 261 p.
7. Brown, R. E. *Electric Power Distribution Reliability*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2009. 504 p.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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>.
13. 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.
14. 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.
15. EN 62305-1:2011 *Protection against lightning. General principles*, 74 p.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Hileman A. R. *Insulation Coordination for Power Systems*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 1999. 772 p.
22. 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.

23. IEEE Standard 1410–2010. *IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*. January 2011. 63 p.
24. 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.
25. 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.
26. Kuussaari, M., Mutila, T. *Arc Protection of Covered Conductor Lines in Medium Voltage Networks*. Research report, Fortum Technology, 18 March 1999. 70 p.
27. 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.
28. LEK 015. *Vidsprieguma /6, 10, 20 kV/ gaisvadu elektrolīnijas galvenās tehniskās prasības*. Latvijas energostandarts. Trešais izdevums, 2016. 42 lpp.
29. LEK 120. *20 kV gaisvadu elektrolīniju koka balsti. Konstruktijas un materiāli*. Latvijas energostandarts. Otrais izdevums, 2013. 283 lpp.
30. Lightning Induced Overvoltage code web page – LIOV. *Introduction*. [skatīts: 03.09.2018]. Piejams: <http://www.liov.ing.unibo.it/introduction.html>.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Solutions for overhead line networks. Accessories for up to 45 kV, Ensto, 2015. 108 p.
41. 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.
42. Wareing, B. *Wood Pole Overhead Lines*. Power and energy series 48 .– London: The institution of engineering and technology, 2005. 336 p.
43. 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.
44. 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.