

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts
Elektrisko mašīnu un aparātu katedra

Oļegs SLISKIS

Doktora studiju programmas „Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

**ELEKTROPĀRVADES LĪNIJU BŪVNICĪBĀ
IZMANTOJAMO METĀLKONSTRUKCIJU ZIBENSIZTURĪBAS
NOVĒRTĒJUMA METODOLOĢIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
Profesors *Dr. sc. ing.*
K. KETNERS

Profesore *Dr. sc. ing.*
S. VĪTOLIŅA

**RTU Izdevniecība
Rīga 2016**

Sļiskis O. Elektropārvades līniju būvniecībā izmantojamo metālkonstrukciju zibensizturības novērtējuma metodoloģija. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016. – 44 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes “RTU P-14” 2016.gada 20. jūnija lēmumu, protokols Nr. 2016-4(60)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 25. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Dr. habil. sc. ing. Pēteris Šipkovs
LZA Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

Dr. sc.ing. Aleksandrs Mesnajevs
Sogn og Fjordane University College, Faculty of Engineering and Science, Norvēģija

APSTIPRINĀJUMS

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

Oļegs Sļiskis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 59 attēlus un 19 tabulas, kopā 127 lappuses. Literatūras sarakstā ir 154 nosaukumi.

SATURS

Vispārējs darba raksturojums.....	5
Darba aktualitāte	5
Promocijas darba mērķis un atrisinātie uzdevumi	5
Promocijas darba zinātniskā novitāte.....	6
Promocijas darba praktiskā nozīme	6
Pētījuma metodes un līdzekļi	7
Darba aprobācija	7
Autora publikācijas	8
1. Zibensizturības noteikšana EPL projektēšanā	9
2. Zibensstrāvas parametri un matemātiskie modeļi.....	12
3. Zibensstrāvas izplatīšanās procesa modelēšana EPL metālkonstrukcijās	17
4. EPL būvniecībā izmantojamo metālkonstrukciju zibensizturības novērtējuma metodoloģija	23
5. EPL metālkonstrukciju zibensizturības novērtējums, izmantojot piedāvāto metodoloģiju..	34
Promocijas darba galvenie rezultāti un secinājumi.....	41
Kopsavilkumā izmantotās literatūras saraksts	43

VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Jebkura energosistēmas sastāvdaļa ir sarežģītu inženiertehnisko risinājumu kopums. Energobūvniecībā, it īpaši augstsprieguma gaisvadu elektriskajos tīklos, visbiežāk sastopamais elements ir pēc konstruktīvā izpildījuma sarežģīta metālkonstrukcija. Metālkonstrukcijas funkcionālā nozīme enerģētikā ir ļoti daudzveidīga, vienlaikus ekspluatācijas prasības, ievērojot gan mehāniskās slodzes, gan elektroapgādes drošuma līmeni, ir ļoti augstas.

Gan projekta izstrādes stadijā, gan arī elektropārvades līniju (EPL) ekspluatācijas periodā speciālistiem ir jārisina viens no sarežģītākajiem jautājumiem – nepieciešamā zibensizturības līmeņa nodrošināšana. Tiešas zibensizlādes EPL noved pie avārijas atslēgumiem un elektroapgādes traucējumiem, kas izraisa ekonomiskos zaudējumus gan valsts saimniecībā, gan atsevišķos uzņēmumos. Tā 2003. gadā 27. augustā ASV vairāk nekā 200 tūkst. Vašingtonas un tās apkārtnes mājāsaimniecību iedzīvotājiem tika pārtraukta elektroenerģijas piegāde spēcīga negaisa rezultātā. Zibensizlāžu izraisītas elektropārvades līniju atslēgšanās izraisīja Vašingtonas sakaru un transporta infrastruktūras darbības bloķēšanu [17].

EPL zibensizturības pamata rādītājs ir avārijas situāciju, respektīvi, EPL izolējošo konstrukciju neatgriezenisko bojājumu rašanās varbūtības minimizēšana. Izmantojot spēkā esošos normatīvu dokumentus, piemēram, EN50341:2013 vai RD.153-34.3-35.125-99, EPL zibensizturības novērtēšanai jāizmanto tipveida konstrukciju datus ar vidējiem līnijas ģeometriskiem parametriem. Izmantojot statistikas un eksperimentālos datus, starptautiskās pētnieciskās organizācijas un nozares vadošās institūcijas nepārtraukti pārskata un papildina EPL zibensaizsardzības rekomendācijas, arvien biežāk paredzot netipisku tehnisko risinājumu lietošanu [7], [23], [25].

Promocijas darbā ir dota pašreizējās situācijas analīze attiecībā pret EPL reakciju uz tiešo zibensizlāžu noteikšanu. Ir konstatēts, ka lielākai daļai no esošajām metodikām ir nepieciešama sistematizācija, lai tās varētu izmantot praktiskajos inženiertehniskos uzdevumos.

Promocijas darba mērķis un atrisinātie uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju gaisvadu elektropārvades līniju balstu metālkonstrukciju projektēšanas risinājumu izvērtēšanai no zibensizturības viedokļa, ievērojot individuālus metālkonstrukcijas ģeometrijas parametrus, respektīvi, traversu izmērus, mehānisko saišu esamību, izolējošus attālumus no strāvvadošiem līdz iezemētiem elementiem, kā arī nesošo konstrukciju materiālu magnētiskās īpašības.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai atrisināti šādi galvenie uzdevumi:

- 1) pamatojoties uz tehniskās literatūras un elektropārvades līniju projektēšanas prakses izpēti, ir izvērtētas zibensstrāvas matemātisko modeļu datorrealizācijas iespējas;
- 2) identificētas elektromagnētisko procesu analīzes metodes zibensizlāžu iedarbībai uz elektropārvades līnijām;
- 3) sintezēts algoritms EPL metālkonstrukciju zibensizturības noteikšanai, kas promocijas darba ietvaros ir pārbaudīts, izmantojot komerciālu programmatūru, un var tikt izmantots kā bāze jaunas programmatūras radīšanai;
- 4) veikta EPL balstu metālkonstrukciju konstruktīvo parametru ietekmes uz zibensstrāvas izplatīšanās procesu novērtēšana;
- 5) sastādītas fāžu izolācijas caursites varbūtības raksturlīknes EPL metāliskiem balstiem atkarībā no balsta konstruktīvajām īpašībām, zemējuma pretestības R_i un izolējošo konstrukciju parametriem. Iegūtās varbūtību raksturlīknes ir lietotas EPL atslēgumu skaita noteikšanai konkrētam laika periodam.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Promocijas darba ietvaros ir izstrādāta metodoloģija, kas paredzēta EPL nesošo metālkonstrukciju projektu risinājumu izvērtēšanai no zibensizturības viedokļa.

Ir pierādīts, ka, ievērojot konkrētas balstu konstrukcijas individuālos parametrus, tai skaitā nesošās daļas konstruktīvo izpildījumu un lietotos materiālus, traversu gabarītus un to savstarpējo attālumu, fāzes vadu un ekrāntrošu nokari, pēc piedāvātās metodoloģijas var atrast zibensstrāvas izplatīšanās trajektoriju EPL balstā un noteikt no zibensizturības viedokļa kritiskos punktus, kuros iespējama izolējošo attālumu caursite. Izstrādātā metodoloģija piedāvā zibensstrāvas izlādes parametrus izvēlēties pēc varbūtības principa.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Promocijas darbā piedāvātā EPL metālkonstrukciju zibensizturības noteikšanas metodoloģija ļauj aprēķināt EPL atslēgumu skaitu konkrētam laika periodam, kā arī ļauj:

- konstatēt un lokalizēt gan ekspluatācijā esošas, gan jaunbūvējamas EPL nesošo konstrukciju nepilnības no zibensizturības viedokļa, respektīvi, novērtēt izolējošos attālumus starp EPL iezemētiem un strāvvadošiem elementiem, noskaidrot izvēlētās konstrukcijas kritiskos punktus;
- izdarīt secinājumus par kritisko zibensstrāvu parādīšanos atsevišķos balsta apgabalos un tam sekojošo izolējošo konstrukciju caursites varbūtību noteikšanu pie dažādām grunts vadītspējas īpašībām;

- EPL projektēšanas stadijā novērtēt papildus aizsargpasākumu nepieciešamību, tādu kā zemējuma pretestības mākslīgu samazināšanu, izolatoru ar palielinātu izturspriegumu izvēli, izlādņu uzstādīšanas lietderīguma izvērtējumu u. c.

Pētījuma metodes un līdzekļi

Izmantotās teorētiskas metodes: gāzizlādes un strīmeru teorijas elementi, elektromagnētisko viļņu teorija un elektromagnētiskā lauka skaitliskās metodes – daļējo diferenciālvienādojumu risināšanai ar galīgo elementu metodi.

Aprēķinu un rezultātu apstrādei ir izmantota *Microsoft EXCEL* vide, elektromagnētisko viļņu pārejas procesu modelēšanai un analīzei ir izmantota *EMTP/ATP* programmatūra, grafisko datu apstrāde un sagatavošana ir realizēta, izmantojot *Autodesk AutoCAD* un *SolidWorks* programmatūru, bet elektromagnētiskā lauka uzdevumu realizācijai ir izmantota *COMSOL Multiphysics* vide.

Promocijas darba aprobācija

1. „Specification of transmission tower structure for following surge protection simulation”, 16th International Scientific Conference EPE 2015 (ELECTRIC POWER ENGINEERING), Kouty nad Desnou, the Czech Republic, May 20–25, 2015.
2. „Computer Simulation of Lightning Surge Propagation on Power Transmission System Metal Constructions”, CIGRE International Colloquium on Lightning and Power Systems, Lyon, France, May 12–14, 2014.
3. „Computer Analysis of Lightning Surge Propagation on Overhead Transmission Line Towers”, the 54th International Scientific Conference of Riga Technical University. Section of Power and Electrical Engineering, Riga, Latvia, October 14–16, 2013.
4. „Lightning Performance on Transmission Line Towers”, Electrical and Control Technologies (ECT–2012): The 7th International Conference, Kaunas, Lithuania, May 3–4, 2012.
5. „Transmission Line Towers Structure Effect on a. Atmospheric Overvoltages Propagation”, the 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University. Section of Power and Electrical Engineering, Riga, Latvia, October 13–16, 2011.
6. „Application of ATP/EMTP Program for Solving of Some High-Voltage Engineering Problems”, the 51st International Scientific Conference of Riga Technical University. Section of Power and Electrical Engineering, Riga, Latvia, October 14, 2010.

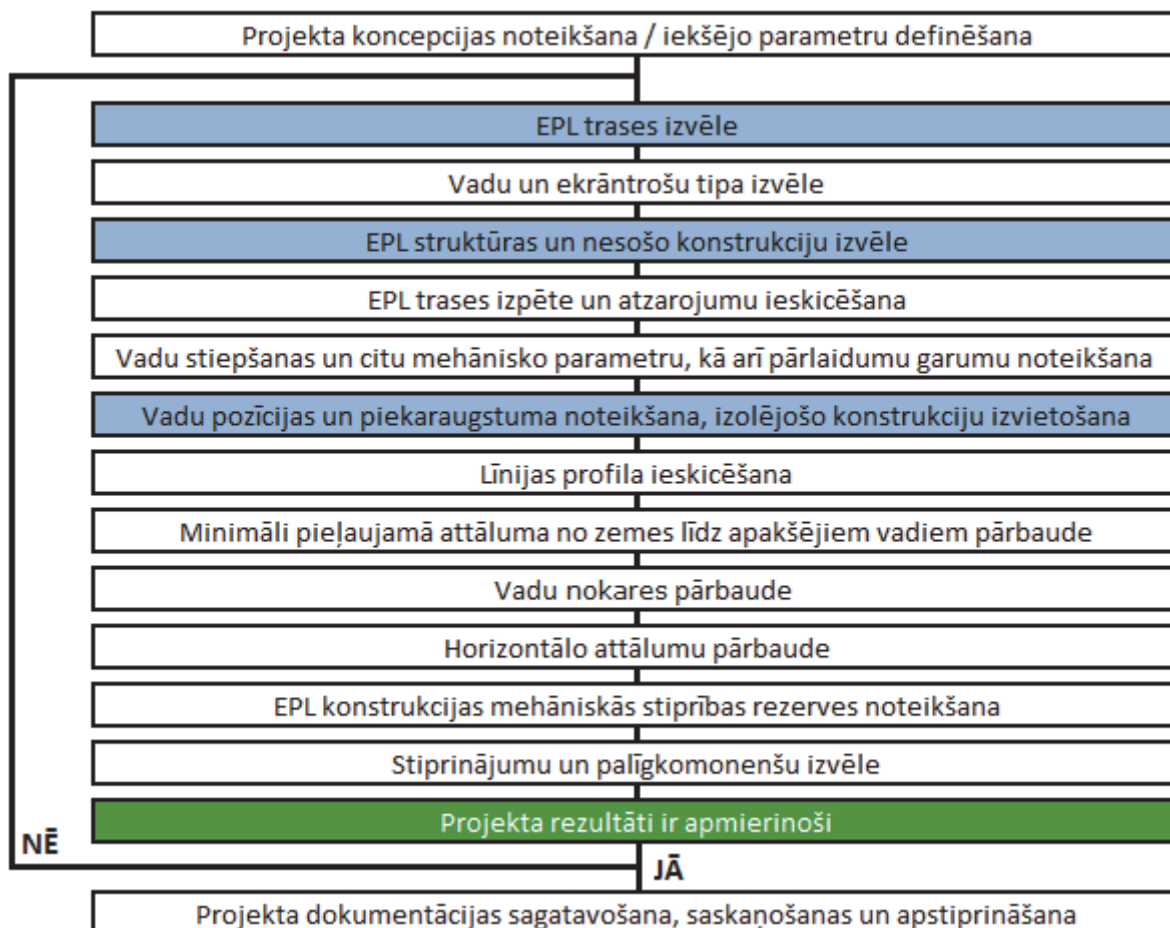
Autora publikācijas

1. O. Sliskis, I. Dvornikovs, K. Ketners, D. Sobolevsky. Specification of transmission tower structure for following surge protection simulation // 16th International Scientific Conference EPE 2015 (ELECTRIC POWER ENGINEERING), Kouty nad Desnou, the Czech Republic, May 20–25, 2015.
2. Dvornikovs, I., Sliskis, O., Ketners, K. Computer Simulation of Lightning Surge Propagation on Power Transmission System Metal Constructions // CIGRE International Colloquium on Lightning and Power Systems, Lyon, France, May 12–14, 2014. *Electronic version*.
3. Dvornikovs, I., Sliskis, O., Ketners, K. Computer Analysis of Lightning Surge Propagation on Overhead Transmission Line Towers // The 54th International Scientific Conference of Riga Technical University: Digest Book and Electronic Proceedings, Latvia, Riga, October 14–16, 2013. Riga: RTU, 2013, P19.1.–P19.4.
4. Sliskis O., Sobolevskis D., Ketners K. Zibens izlādes iedarbība uz gaisvadu līniju metālkonstrukcijām // RTU zinātn. Raksti, 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. – 30. sēj., 2012, 59.–63. lpp.
5. Sliskis O., Dvornikovs I., Ketners K. Lightning Performance on Transmission Line Towers // Electrical and Control Technologies (ECT–2012): The 7th International Conference, Lithuania, Kaunas, May 3–4, 2012,– pp. 157–160.
6. Sliskis O., Miesniece S., Ketners K. Transmission Line Towers Structure Effect on an Atmospheric Overvoltages Propagation // The 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. Section of Power and Electrical Engineering: Abstract Book and Electronic Proceedings, Latvia, Riga, October 13–16, 2011,– pp. 45–45.
7. Sliskis O., Miesniece S., Ketners K., Vanzovičs E. Application of ATP/EMTP Program for Solving of Some High-Voltage Engineering Problems // Abstract Book and Electronic Proceedings, Latvia, Riga, October 11–14, 2010,– pp. 137–140.
8. Sliskis O., Miesniece S., Ketners K., Vanzovičs E. Zibensizlādes raksturīgie parametri pārspriegumaizsardzības skaitliskos uzdevumos // RTU zinātniskie raksti, 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. – 26. sēj., 2010, 46.–49. lpp.

1. ZIBENSIZTURĪBAS NOTEIKŠANA EPL PROJEKTĒŠANĀ

Promocijas darba pirmajā nodaļā pētījuma ietvaros EPL ir apskatīta kā automatizētās projektēšanas objekts. Ir noteikta EPL zibensizturības pārbaudes nepieciešamība, ievērojot tās nesošo metālkonstrukciju īpašības un konstruktīvās atšķirības.

Tipiska EPL projektēšanas algoritma blokshēma ir dota 1.1. attēlā. Projektēšanas procesā iesaistītas darbības var atkārtoties, ja projekta rezultāti neapmierina projekta uzdevumu. Gala rezultātā izstrādātam projektam jāatbilst visiem sākotnēji definētajiem nosacījumiem [2].



1.1. att. EPL projekta izstrādes algoritma vispārīgā blokshēma.

No 1.1. attēlā dotās EPL projekta izstrādes algoritma blokshēmas var izdalīt atsevišķas projektēšanas stadijas, kas ir būtiskas EPL zibensizturības noteikšanā [2]:

- EPL trases izvēle – ideālā gadījumā tai jābūt pēc iespējas īsākai un taisnai, lai minimizētu uzbūves izmaksas; no zibensaizsardzības viedokļa – ietekmē zemējuma pretestību;
- EPL struktūras un nesošo konstrukciju izvēle – no zibensizturības viedokļa atbildīgākā stadija, jāievēro konstrukcijas ģeometrija un mehāniskā izturība;
- izolējošo attālumu un izolējošo konstrukciju stiprināšanas punktu izvēle – nosaka drošus attālumus starp EPL elementiem (fāzes vadiem, nesošām konstrukcijām utt.).

Kad notiek tieša zibensizlāde EPL balstā vai ekrāntrosē, zibensstrāvai plūstot caur metālkonstrukciju un tās pamatiem, uz izolācijas rodas potenciālu starpība. Ja tiek pārsniegta caursites vērtība, notiek izolācijas atpakļpārklāšanās. Balstā inducētais spriegums ir atkarīgs no zemējuma pretestības, līdz ar to tas ir viens no noteicošajiem parametriem, novērtējot EPL zibensizturību [3].

Ir zināms, ka elektromagnētisko pārejas procesu modeļu aprēķini ir fundamentāla prasība, veicot pētījumus veselā virknē enerģētikas sistēmu uzdevumu, piemēram, izvēloties izolatoru vai izlādņu parametrus [5].

Kā var redzēt no 1.1. tabulas [21], gandrīz puse no visām zibensizlādēm EPL pienāk tieši uz balstiem. Vienkāršoti var pieņemt, ka katra šāda izolācijas pārklāšanās EPL pāriet lokizlādē (virkne metodiku norāda, ka loka rašanās varbūtība nedaudz mazāka par viens). Tad zibens izraisīto atslēgumu skaitu EPL atrod no izteiksmes:

$$N_{\text{EPL}} = (D_{\text{tr}}P_{\text{tr}} + D_{\text{bal}}P_{\text{bal}} + D_{\text{v}}P_{\text{v}}) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{EPL}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{n}}}{100}, \quad (1.1)$$

kur P_{tr} , P_{bal} , P_{v} – EPL izolācijas caursites varbūtība (relatīvās vērtībās), ja zibensizlāde notiek attiecīgi ekrāntrosē, balstā vai fāzes vados; D_{tr} , D_{bal} , D_{v} – izlādes sadalījums (r. v.) ekrāntrosē, balstā vai fāzes vados; n – īpatnējais zibensizlāžu skaits EPL; L_{EPL} – EPL garums, km; T_{n} – negaisa stundu skaits gada periodā EPL rajonā.

1.1. tabula

Zibensizlāžu sadalījums EPL elementos

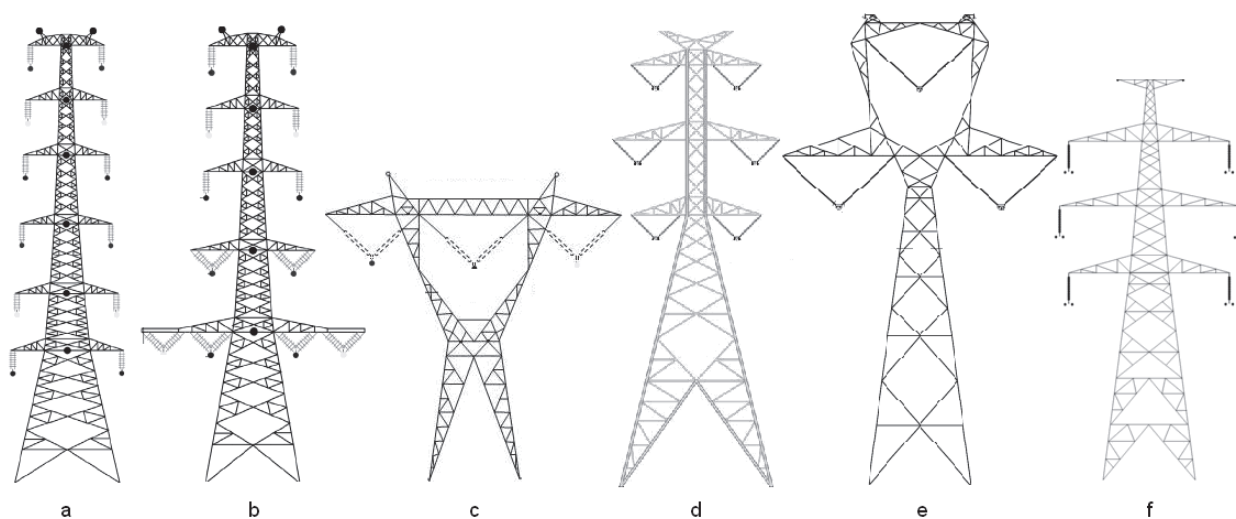
Izlāžu sadalījums D , r. v.	EPL ar ekrāntrosi	EPL bez ekrāntroses
Ekrāntrosēs laiduma garumā, D_{tr}	0,5	0
Balstā, D_{bal}	0,5	0,5
Fāzes vados, D_{v}^* *80 % no zibensizlādēm pienāk uz augšējo fāzi	0,005	0,5
$D_{\text{tr}} + D_{\text{bal}} + D_{\text{v}} = 1$	≈ 1	1

Parasti vienķēžu līnijās ar horizontālo vadu izvietošanu ir labākas zibensizturības īpašības nekā divķēžu līnijās, bet līnijās ar divām ekrāntrosēm atslēgumi, ko izraisa tiešās zibensizlādes, notiek ievērojami retāk nekā līnijās ar vienu ekrāntrosi [25]. 1.2. attēlā ir dotas balstu konstrukcijas, ko izmanto dažāda darba sprieguma 110 kV, 150 kV (Portugāle), 170 kV, 220 kV (Portugāle, KTR), 400 kV un 500 kV (Izraēla) EPL būvniecībā.

Jāatzīmē, ka 1.2. attēlā f tipa balstu konstrukcijas no zibensizturības viedokļa nav drošas, kaut arī tajās konstruktīvi ir paredzēta divu ekrāntrošu ierīkošana. Ekrāntrošu traversu garums nenodrošina pietiekamu attālumu starp tām, kas vienlaikus samazina ekranējošo efektu augšējās un vidējās fāzēs. Neskatoties arī uz šo trūkumu, šī tipa līnijām statistiski ir mazāk atslēgumu, ko izraisa tiešās zibensizlādes nekā divķēžu līnijām ar vienu ekrāntrosi un mazāku aizsarglencī.

EPL balstu konstrukcijas, kas dotas 1.2. attēla *a*, *b* un *d*, nomainīja pirms tam ekspluatācijā esošus un pilnīgi neadaptētus balstus rajoniem ar stipru apledojumu. Ledus nomešanas laikā, tika novērota stipra vadu un ekrāntrošu deģa, ko neizbēgami pavadīja īsslēgumi [25]. Tāpēc jaunajās EPL balstu konstrukcijās vertikālie attālumi starp vadiem un ekrāntrosi(-ēm) tika ievērojami palielināti, kas izraisīja arī kopējo EPL balstu augstuma palielināšanos vidēji par 4,5 m. Jaunās konstrukcijas vienas ekrāntroses vietā paredzēja divas stipri attālinātas ekrāntroses, kas nodrošināja maksimālo aizsargleņķi.

Salīdzinot arī ekspluatācijas datus, ir redzams, ka EPL ar horizontālu vadu izvietojumu kā 1.2. attēla *c* un *e* no zibensizturības viedokļa ir ievērojamākas priekšrocības, pateicoties relatīvi nelielam augstumam un divām savstarpēji attālinātām ekrāntrosēm.



1.2. att. EPL konstrukcijas: a, b un c – ĶTR State Grid Corporation of China, SGCC; d – Izraēlas Israel Electric Corporation, IEC; e, f – Portugāles Energias de Portugal, EDP.

1.2. tabulā ir apkopota statistika [4] par zibensaizsardzības sistēmu veiksmīgu nostrādi 500 kV EPL Ķīnā. No visām reģistrētām zibensizlādēm EPL sekmīgi tika novadītas 129,52 izl. uz 100 km gadā, bet atslēgumu daļa, ko izraisīja izolācijas atpakaļpārklāšanas – 0,59 %. Tādējādi, arī ja zibensizlāde tika novadīta, vienā no 168 gadījumiem notiek EPL atslēgšanās.

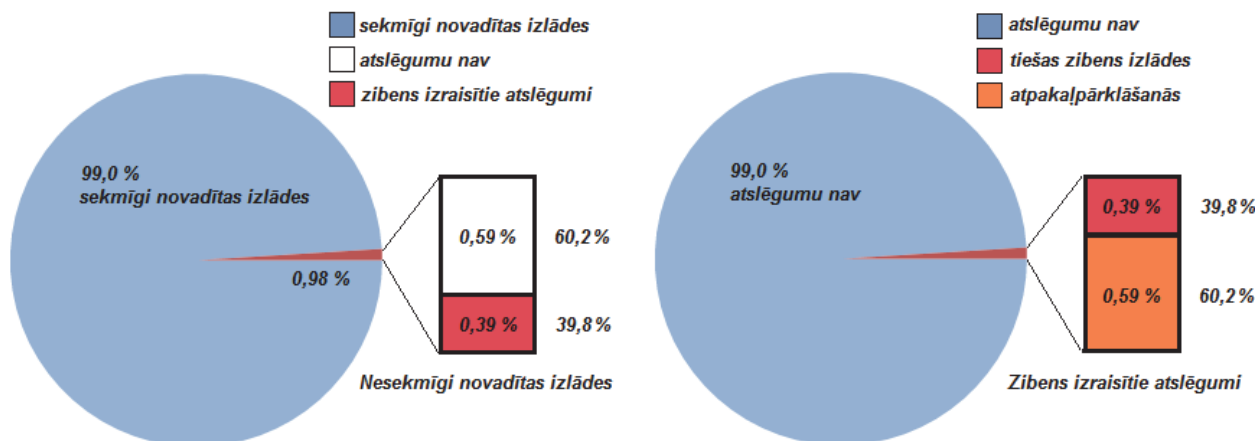
1.2. tabula

EPL zibensaizsardzības sistēmu veiksmīga nostrāde 500 kV līnijās

500 kV EPL	Atslēgumu nav (izl. uz 100km gadā)	Zibens izraisītie atslēgumi (izl. uz 100km gadā)	Zibensizlāžu kopskaits (izl. uz 100km gadā)
Sēkmīga strāvas novadīšana (zibensizlādes EPL bastā vai ekrāntrosē)	128,75 (98,4 %)	0,77: atpakaļpārklāšanas (98,4 %)	129,52 (99,0 %)
Nēsēkmīga strāvas novadīšana (zibensizlādes fāzes vados)	0,77 (0,59 %)	0,51: pārklāšanas (0,39 %)	1,28 (0,98 %)
Zibensizlāžu kopskaits EPL	129,52 (99,0 %)	1,28 (0,98 %)	130,80 (100 %)

Veiksmīga zibensizlāžu novadīšana ir reģistrēta 99,0 % gadījumos, t. i., 101 no 102 zibensizlādēm ir novadīta. Tieša zibensizlāde fāzes vados ir reģistrēta 0,98 % gadījumos

(1 no 102 tiešām zibensizlādes EPL gadījumos). Tiešo zibensizlāžu EPL daļa ir 0,98 %, no tām 0,59 % no reģistrētām zibensizlādēm EPL jeb 60,2 % no tiešām zibensizlādēm EPL neizraisīja tās atslēgšanos. Savukārt 0,39 % no reģistrētām zibensizlādēm jeb 1 gadījums no 256 (kas ir 39,8 % no tiešām zibensizlādēm EPL) bija par EPL atslēgšanas cēloni, kā tas ir parādīts 1.3. attēlā [4].



1.3. att. Novadīto zibensizlāžu un EPL zibensaizsardzības sistēmu nostrādes statistiskie dati.

Normatīvu tehniskās bāzes pamatā, saskaņā ar kuru EPL projektēšanas procesā tiek ņemti vērā arī zibensiedarbības uz EPL aspekti, ir IEEE un CIGRE darba komiteju tehniskās atskaites, piemēram:

- *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*, apstiprināts 1997. gadā,
- *CIGRE Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, kas izstrādāts 1991. gadā (*Working Group 01 of Study Committee 33*).

Tāpat jāatzīmē 1999. gadā izdotie noteikumi RD.153-34.3-35.125-99 *Руководство по защите электрических сетей 6-1150кВ от грозовых и внутренних перенапряжений*, kura izdošanu koordinē Krievijas Federācijas valsts akciju sabiedrība *ЕЭС России*, kurā ir izklāstīta dažāda sprieguma elektrisko tīklu zibensizturības metodika. Tomēr, neskatoties uz minēto dokumentu esamību, nepastāv vienota pieeja, kas metodiski izklāstītu lēmumu pieņemšanas procedūru, novērtējot EPL zibens izraisīto atslēgumu skaitu, ievērojot EPL nesošo metālkonstrukciju īpašības.

2. ZIBENSSTRĀVAS PARAMETRI UN MATEMĀTISKIE MODEĻI

Tā kā nepastāv vienota EPL zibensizturības noteikšanas koncepcija, speciālistiem dažreiz jāvadās no nesistematizētiem statistikas datiem, piemēram, no EPL drošas ekspluatācijas viedokļa ir svarīgs negaisa stundu skaits gadā, tomēr biežāk nākas izmantot zibensizlāžu blīvumu konkrētajam ekspluatācijas rajonam.

Novērojumu statistikas dati 2.1. tabulā [4] rāda, ka novērojumu zonā ar negaisa monitoringa sistēmas *LLS* (no angļu val. *Lightning Location System*) palīdzību superaugsta sprieguma EPL un 500 kV EPL Ķīnā tika konstatēts zibensizlāžu blīvums no 4,4 līdz 6,7 izl./km² gadā. Tajā pat novērojumu periodā tika konstatēti 4,7 un 4,9 atslēgumi gadā uz 100 km atbilstoši superaugstsprieguma EPL un 500 kV EPL.

2.1. tabula

Zibensizlāžu blīvums 500 kV un superaugstsprieguma EPL

	Zibensizlāžu blīvums uz zemi superaugstsprieguma UHV EPL, izl./km ² gadā		Zibensizlāžu blīvums uz zemi 500 kV EPL, izl./km ² gadā	
	Zibens izraisītie atslēgumi	Zibensizlāžu novērojumi	Zibens izraisītie atslēgumi	Zibensizlāžu novērojumi
Sekmīgi novadītas izlādes	Atpakaļpārklāšanās 4,7	Zibensizlādes balstā vai ekrāntosē 6,7	Atpakaļpārklāšanās 4,9	Zibensizlādes balstā vai ekrāntosē 4,4
Nesekmīgi novadītas izlādes	Pārklāšanās 4,7	Tiešas zibensizlādes fāzes vados 5,2	Pārklāšanās 4,9	Tiešas zibensizlādes fāzes vados 4,9

Caur izlādes objektu plūstošās zibensstrāvas amplitūda, tāpat kā zibenslīdera orientēšanas augstums, ir atkarīga no zibenslīdera lādiņa vērtības. EPL zibensizturības uzdevumos aprēķinu pamatparametri ir zibensstrāvas amplitūda I_z un zibensstrāvas stāvums α . Praktiskos aprēķinos zibensstrāvas amplitūdu un stāvumu pieņem kā statistiski neatkarīgas gadījuma vērtības, ko nosaka, piemēram, pēc [4].

Zibensizlādes impulsa frontes τ_1 un viļņa τ_2 garumi arī ir gadījuma vērtības. Primāras izlādes raksturo relatīvi lieli frontes un viļņa garumi, salīdzinot ar sekundārām izlādēm [13]. Frontes stāvums ir tieši saistīts ar frontes garumu, tāpēc ir iespējams apskatīt frontes stāvumu vai tās garumu saskaņā ar zibensstrāvas parametru sadalījuma funkciju (skat. 2.1. att.).

Zibensstrāvas izplatīšanās ātrums ir ekvivalents gaismas ātrumam brīvā telpā [5], [13]. Zibenskanāla pretstību Z_z atsevišķos gadījumos pieņem vienādu 400 Ω [5], tomēr tipiskos aprēķinos, *Cigré*, IEEE, kā arī IEC standartos un tehniskās atskaitēs tās vērtība ir 1 k Ω .

Vistuvāk eksperimentāli noteiktiem zibensstrāvas impulsiem ir analītiskās izteiksmes, kas attēlo zibensstrāvas impulsa formu izlādes kanālā. Visbiežāk ir sastopamais zibensstrāvas impulsa modelis ir t. s. Heidlera funkcija, ko kā zibensstrāvas impulsa formu aprakstošu ir piedāvājis vācu matemātiķis profesors Fridolins Heidlers [6]:

$$I(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} \frac{\left(\frac{t_1}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t_2}{\tau_1}\right)^n}, \text{ kur } \eta = e^{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} n+1 \sqrt{\frac{n\tau_2}{\tau_1}}\right)}, \quad (2.1)$$

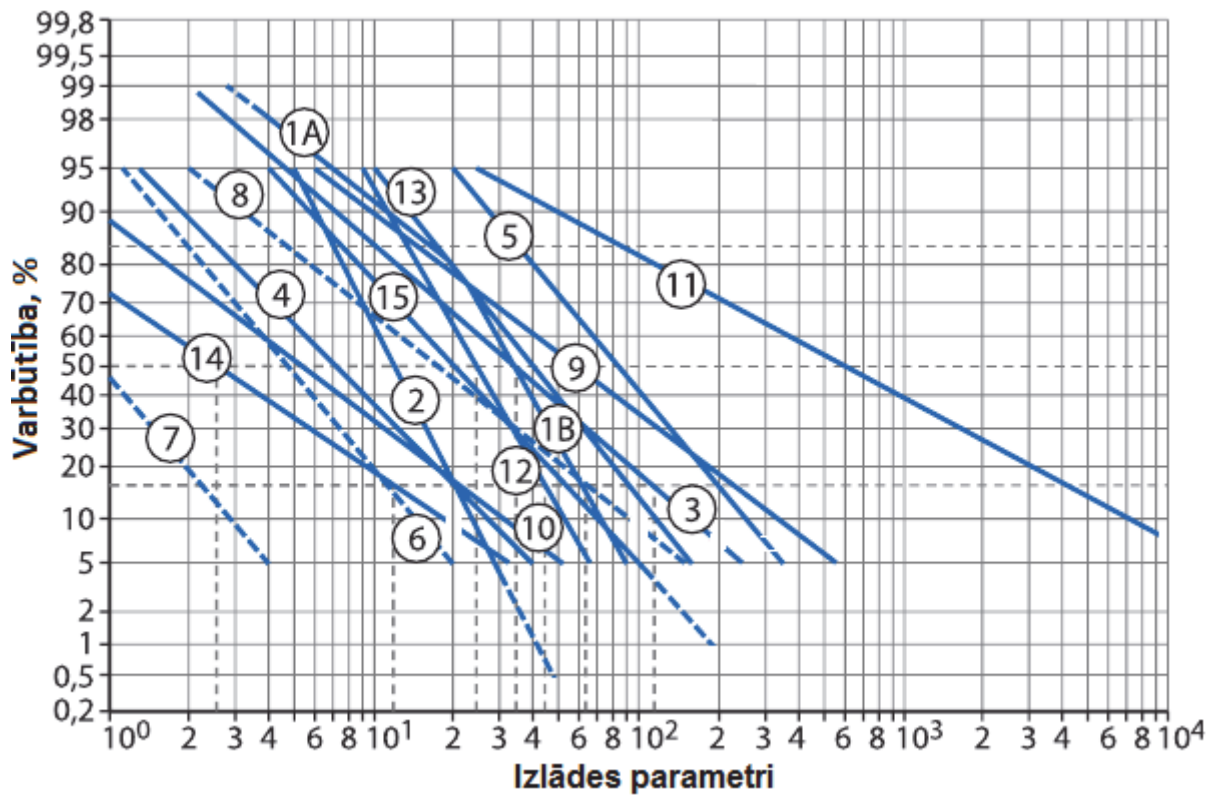
kur $I_{\max}$ – zibensstrāvas stipruma maksimālā vērtība izlādes kanālā,

τ_1 , τ_2 – viļņa pieauguma un rimšanas laika koeficients,

t_1, t_2 – viļņa pieauguma un rimšanas laiks,

n – sekundāro izlāžu skaits,

η – zibensizlādes maksimumstrāvas stipruma labojuma koeficients.



2.1. att. Zibensizlāžu parametri saskaņā ar IEC 62305-1 [13],

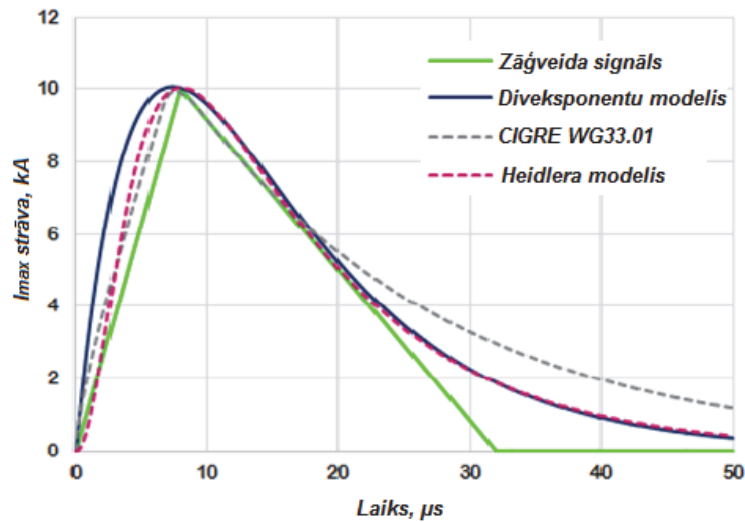
kur zibensstrāvas maksimālā vērtībai I (kA): 1A, B – pirmā izlāde; 2 – sekundārā negatīvā izlāde; 3 – pirmā pozitīvā īsā izlāde ar lādiņu Q (C); 4 – negatīvā izlāde; 5 – pozitīvā izlāde ar impulsa lādiņu Q (C); 6 – pirmā izlāde; 7 – sekundārā negatīvā izlāde; 8 – pirmais pozitīvais īsais impulss ar īpatnējo enerģiju W/R (kJ/Ω); 9 – pirmā izlāde; 10 – sekundārā negatīvā izlāde; 11 – pirmā pozitīvā īsā izlāde ar impulsa stāvumu di/dt_{max} ; 12 – pirmā izlāde; 13 – sekundārā negatīvā izlāde; 14 – pirmā pozitīvā īsā izlāde ar impulsa stāvumu $di/dt_{30\%/90\%}$; 15 – sekundārā negatīvā īsā izlāde.

Heidlera funkcijas atvasinājums pēc laika ir vienāds ar nulle, kas atbilst arī reāliem atpakaļizlādes mērījumiem, turklāt šī funkcija ļauj precīzi regulēt strāvas amplitūdu, jo maksimumstrāvas atvasinājums nav atkarīgs no elektriskā lādiņa lieluma [6].

Grafiski 2.2. attēlā parādīta starpība starp impulsa formu, ko iegūst saskaņā ar Heidlera funkciju un diveksponentu impulsu, ko iegūst pēc (2.2) [6]:

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \left(e^{-(t/\tau_1)/\tau_2} - e^{(t-\tau_1/\tau_2)} \right)^{-1}, \quad (2.2)$$

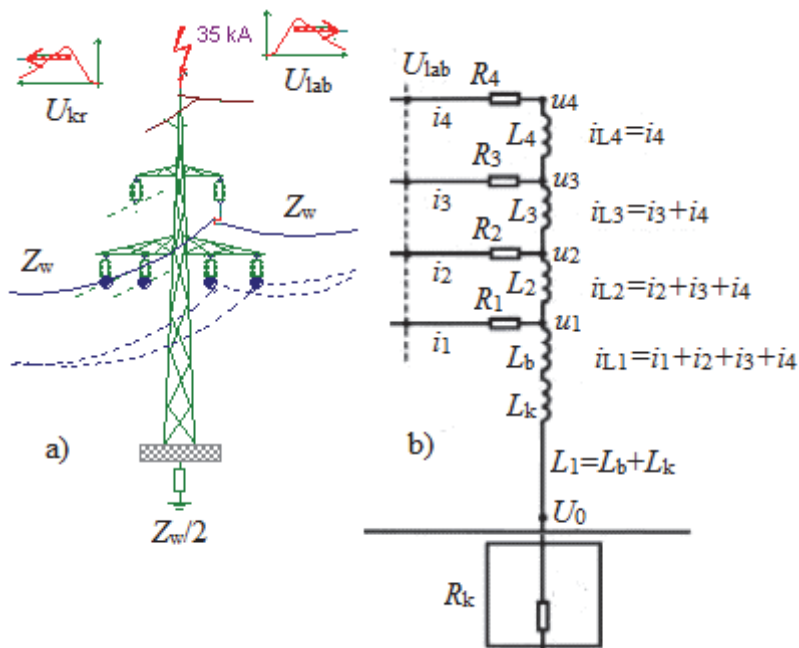
kur I_0 – zibensstrāvas stipruma maksimālā vērtība, η – strāvas maksimumvērtības korekcijas koeficients, τ_1, τ_2 – viļņa pieauguma un rimšanas laika koeficients, kopējā gadījumā $t = \tau_1 \ln(n)$.



2.2. att. Zibensstrāvas impulsa formas saskaņā ar Heidlera un divekspontentu funkcijām [6].

Saskaņā ar [16] zibensstrāvas vērtība ir atkarīga vienīgi no objekta aizsardzības līmeņa, bet tas, kā bija norādīts iepriekš, ir ne visai korekti. Lai precīzāk novērtētu bīstamību, ko var radīt tiešas zibensizlādes EPL, ir nepieciešams apskatīt zibensstrāvas stipruma vērtības atkarību arī no citiem aspektiem, pirmkārt, no objekta konstruktīvām īpašībām un gabarītiem.

Ja zibensizlāde notiek, līdz EPL balstam pa visiem vadiem nonāk atstarotie pārsprieguma viļņi, respektīvi, vektori U_{kr} un U_{lab} (skat. 2.3. att.). Aizvietošanas shēmu var pārveidot kā tīklu ar izkliedētiem parametriem, ko veido aktīvās pretestības, kas ir vienādas ar savstarpējām viļņa pretestībām līnijai bez zudumiem [20]. Tālāk U_{kr} un U_{lab} viļņu vektori summējas, bet tīkla ekvivalentā shēma ir līdzīga 2.3. attēlā dotajai.



2.3. att. EPL balsta aizvietošanas shēma:

a) atstaroto pārsprieguma viļņu izplātīšanas no EPL balsta; b) tīkla ekvivalentā shēma.

Vienādojumu sistēma 2.3. attēlā dotajai aizvietošanas shēmai ir šāda [20]:

$$\begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{d}{dt}(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) + R_k(i_1 + i_2 + i_3 + i_4); \\ u_2 - u_1 &= L_2 \frac{d}{dt}(i_2 + i_3 + i_4); \\ u_3 - u_2 &= L_3 \frac{d}{dt}(i_3 + i_4); \\ u_4 - u_3 &= L_4 \frac{d}{dt}i_4. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Sprieguma pieaugums EPL blakus balstos pārsprieguma viļņa nonākšanas momentā ir atkarīgs no balsta viļņa pretestības Z_{bal} :

$$Z_{\text{bal}} = 60 \ln \left(\text{ctg} \left[0,5 \text{tg}^{-1} \left(\frac{r_{\text{ekv}}}{H} \right) \right] \right), \quad (2.4)$$

kur r_{ekv} – balsta vidējais ekvivalentais rādiuss, bet H – balsta augstums, kas paralēli savienota ar ekrāntroses viļņa pretestību [9].

$$Z_{\text{tr}} = 60 \ln \left(\frac{2h_{\text{vid}}}{r} \right), \quad (2.5)$$

kur h_{vid} – vidējais ekrāntroses piekares augstums, m, bet r – ekrāntroses rādiuss, m [18].

Momentā, kad līdz EPL balstam atnāk no zemētāja atstarotais vilnis ar pretēju zīmi, sprieguma pieaugums balstā palēninās. Momentā, kad spriegums balstā U_0 sasniedz savu maksimālo vērtību, balsta aizvietošanas shēmu veido virknē savienota balsta induktivitāte L_0 un zemētāja impulspretestība ar vidējo vērtību [9]:

$$R_{i_{\text{vid}}} = \exp \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \ln R_i, \quad (2.6)$$

kur n – balstu skaits modelī.

Balsta induktivitāti L_0 tuvināti aprēķina pēc formulas $L_0 \approx L_0^* h_0$, kur h_0 – balsta augstums, bet L_0^* – vidējā induktivitāte uz balsta augstuma vienību: $0,5 \mu\text{H/m}$ – divstatņu metāla balstiem un $1,0 \mu\text{H/m}$ – vienstatņu metāla balstiem. Zibensstrāvas amplitūda blakus balstā ir mazāka nekā zibensstrāvas stiprums I_{max} balstā, kur notiek zibensizlāde, tādēļ ka daļa no strāvas noplūst uz ekrāntrosēm, bet daļa atstarojas uz zibenskanālu. Praktiskajos aprēķinos ievieš zibensstrāvas sazarojuma koeficientu χ , ko atrod no izteiksmes (2.7) [12]:

$$\chi = \frac{Z_{\text{bal}} \left[\frac{Z_{\text{tr}}}{2} \right] R_i}{R_{i_{\text{vid}}}}, \quad (2.7)$$

kur ķēdes elementi Z_{bal} un Z_{tr} ir savienoti paralēli.

Šajā gadījumā vienādojumu (2.1) pārveido:

$$I(t) = \frac{I_s}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}, \text{ kur sazarotā strāva } I_s = \chi I_{\max}. \quad (2.8)$$

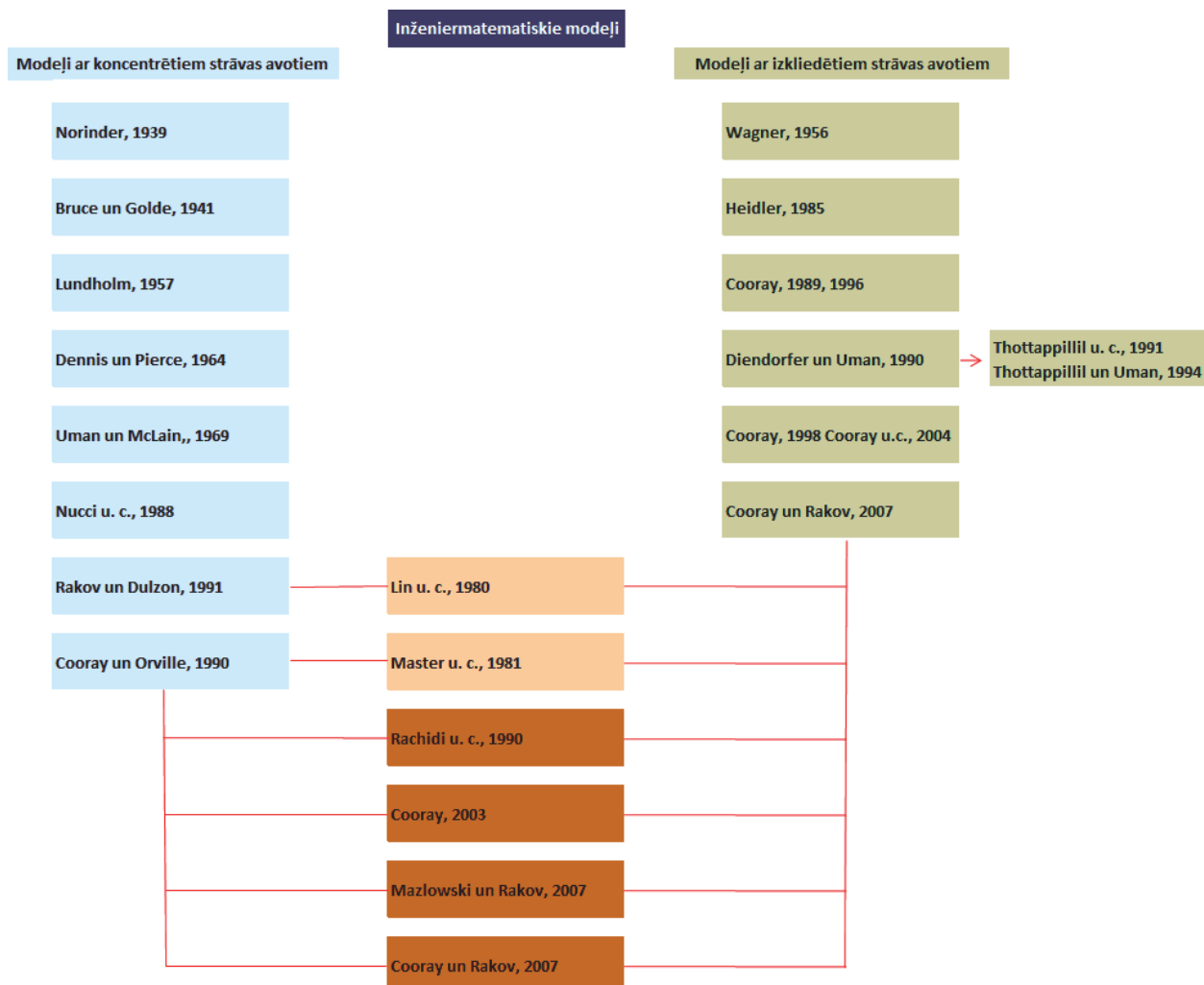
3. ZIBENSSTRĀVAS IZPLATĪŠANĀS PROCESA MODELĒŠANA EPL METĀLKONSTRUKCIJĀS

Dažādu EPL pārspriegumaizsardzības analīzes metožu un programmu līdzekļu izmantošanas iespējas ir atspoguļotas tehniskā literatūrā. Šīs metodes aptver gan datormodelēšanu, gan, piemēram, tādu specifisku metožu kā Montekarlo metodes izmantošanu, analizējot pārsprieguma viļņu izplatīšanos ar veselu virkni stohastisku parametru. Starp lietiskiem programmu līdzekļiem var atzīmēt: *EMTP/ATP*, *PSCAD*, *Matlab SIMULINK* u. c., bez tiem arī efektīvi ir aprobēti, piemēram, mākslīgo neironu tīklu modeļi attiecībā uz sarežģītu procesu sintēzi un analīzi energosistēmās [3], [10].

Zibensizlāžu procesa reprezentācijas un aizvietošanas shēmu sastādīšanas gaita ar inženiermatemātisku modeļu palīdzību ir dota 3.1. attēlā.

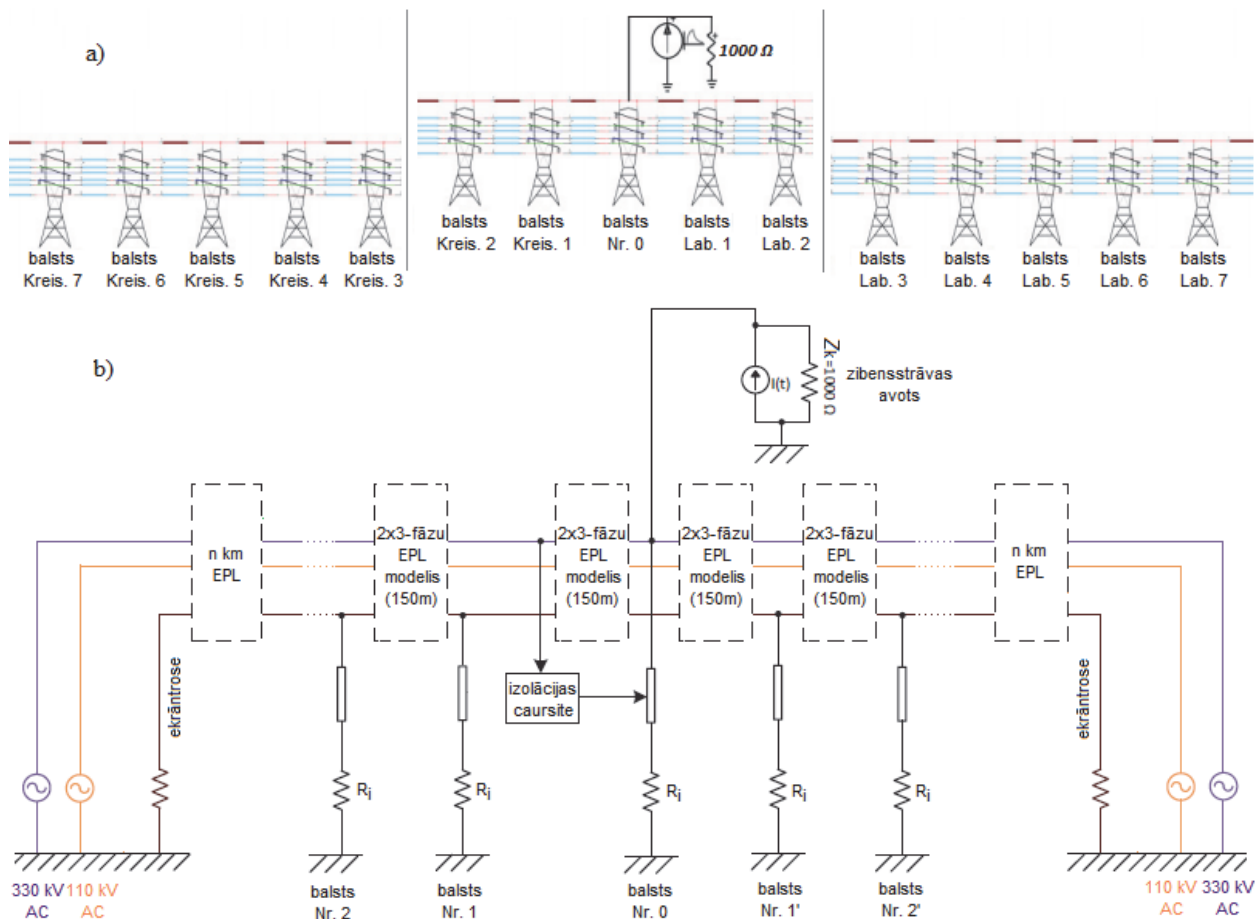
Elektromagnētiskās saites starp koncentrētām un izkliedētām komponentēm aizvieto ar mijinduktivitātēm un savstarpējām kapacitātēm atbilstoši magnētiskam un elektriskam laukam, bet savstarpējās pretestības ievēro vidēs, kur pastāv zudumi. Kopējo objekta modeli veido L , C un R elementu sistēma, kas strukturāli ir sadalīta mazākās elektromagnētiski sasaistītās sekcijās. Katra sekcija ietver koncentrētus un izkliedētus L , C un R parametrus. Modeļa koncentrētie un izkliedētie elementi ievēroti saskaņā ar Kirhofa likumiem tā, lai uzdevuma atrisināšana būtu iespējama laika–frekvenču apgabalos [5].

Aizvietošanas shēmu, kas sastāv tikai no koncentrētiem parametriem, izmantošanu ierobežo plašais uzdevuma atrisināšanai nepieciešamais frekvenču diapazons. Šādu modeļu izmantošana ir ierobežota arī tāpēc, ka koncentrētu elementu sekciju izmēri ir daudzkārt mazāki par minimālo viļņa garumu. Lai izmantotu EPL aizvietošanas shēmas ar izkliedētiem parametriem, obligāti ir jāievēro saite starp strāvvadošo elementu sistēmu un zemi [5].



3.1. att. Zibensizlādes procesa inženiermatemātisko modeļu attīstība.

Jāatzīmē, ka elektrotīklu pamatelementu, izņemot elektromagnētiskos pārejas procesus vados un ekrāntosēs, datormatemātiskas modelēšanas paņēmieni ir aprakstīti nepilnīgi, lai tie būtu lietojami praksē. Literatūrā tiek piedāvāti vienkāršoti EPL balstu un portālu nesošo konstrukciju modeļi, bet tikai sākotnēja detalizēta modeļa analīze ļauj spriest par pieļaujamu vienkāršošanu iespēju. Tipiskas EPL shematiskais attēlojums un modeļa struktūra, kas paredzēta pārspriegumu procesu analīzei un uz kuras pamata tiek realizēti vairākums pētījumu (tostarp *CIGRE* un *IEEE* koordinētie), izmantojot *EMTP* programmrīku, ir dota 3.2. attēla a un b.



3.2. att. Tipiskie vienkāršotie modeļi, pētot zibensizlādes procesus EPL [5]:
a) EPL posms no 16 laidumiem, b) EMTP EPL shematisks attēlojums.

EMTP programmas algoritms paredz vairākus EPL laidumu aizvietošanas modeļus:

- a) Bergerona modelis – modelis ar konstantiem parametriem,
- b) *PI* modelis – īsas, līdz dažiem desmitiem kilometru garas EPL,
- c) *JMarti* – matriču tipa modelis ar elementiem, kas atkarīgi no frekvences,
- d) *Semlyen* – vienkāršots modelis ar elementiem, kas atkarīgi no frekvences.

Bergerona modelis pieļauj apskatīt viļņu izplatīšanās procesus shēmās ar izkliedētiem *LC* parametriem un koncentrētu pretestību. Līdzīgi kā *PI* ekvivalentais modelis, Bergerona modelis ļauj izmantot tikai 50 Hz frekvenci, tāpēc, sastādot aizvietošanas shēmas EMTP zibens radīto procesu izpētei, ieteicams *JMarti* EPL laidumu modelis [5].

Apskatot procesus, kas notiek EPL balstā tiešas zibensizlādes iedarbības gadījumā, obligāti ir jāievēro blakus esošo balstu ietekme uz pārsprieguma viļņu atstarošanu. EPL laidumu parametrus nosaka vadu un ekrāntošu elektriskās īpašības un izvietošanas ģeometrija. *JMarti* EPL laidumu modelis paredz darbības frekvenču diapazonā no $5 \cdot 10^{-2}$ Hz līdz $5 \cdot 10^8$ Hz, ievērojot virsmas efekta ietekmi [1].

Ir pieņemts, ka analizējamo EPL posmu veido modelis no četriem laidumiem un pieciem EPL balstiem. Maksimālo laiku, kas atbilst pārsprieguma viļņa atstarojumam no pirmā blakus

balsta, novērtē kā divkāršu viļņa noskrējienu līdz blakus balstam un atpakaļ, skaitot no izlādes momenta [1].

EPL balstu veido četras sekcijas ar izkļiedētiem parametriem (kas ļauj ievērot viļņa rimšanu un kropļojumus), respektīvi, no zemes līdz apakšējai traversai Z_{3t} , tad vienādas sekcijas no apakšējās līdz vidējai traversai Z_{2t} , no vidējās traversas līdz augšējai Z_{2t} un no augšējās traversas līdz ekrāntrosei Z_{1t} . R un L vērtības nosaka no izteiksmēm [5]:

$$\begin{aligned} R_i &= \Delta R_i h_i, L_i = 2\tau R_i, \\ \Delta R_1 &= \Delta R_2 = \Delta R_3 = 2Z_{1t} \ln \frac{1/\alpha_1}{h - h_4}, \\ \Delta R_4 &= 2Z_{4t} \ln \frac{1/\alpha_1}{h}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

kur $\tau = h/c_0$ – viļņa izplatīšanās laiks gar EPL balstu, $\alpha_1 = 0,89$ – viļņa rimšanas koeficients (gar balstu), bet h – EPL balsta augstums, m.

EPL balsta zemējuma pretestība tiek modelēta kā līnijas pretestība R_i , bet ir arī atļauts aizvietot to ar nelineāru pretestību, kas ir atkarīga no strāvas stipruma. Ar *ETP/AMTP* iegūst, zibensstrāvas sadalījuma raksturlīknes EPL balsta traversās, līdzīgi kā tas parādīts 4.3. attēlā.

EPL nesošo konstrukciju daudzveidība praktiski neļauj izveidot tās universālu aizvietošanas shēmu, ievērojot konstrukcijas elementu, respektīvi, statņu, traversu, pamatnes un atsaišu reaktīvos parametrus.

Zibensstrāvas izplatīšanās trajektorijas noteikšana EPL balstu konstrukcijas elementos var tikt realizēta *COMSOL Multiphysics* programmā. Modelējamā objekta grafiskais modelis nedrīkst saturēt pārrāvumus, visiem konstrukcijas modeli veidojošiem segmentiem jābūt savstarpēji saistītiem. *SolidWorks* un *Autodesk AutoCad 3D* var atzīmēt kā rekomendējamo programmnodrošinājumu objekta grafiskā modeļa sagatavei.

Grafiskā modeļa izveide *COMSOL Multiphysics* un tai līdzīgās programmās tehniski ir ļoti sarežģīts un laikietilpīgs process, tā kā modeļa konstruēšana notiek pēc bāzes punktu koordināšu uzdošanas.

Skalāro elektrisko potenciālu V un magnētiskā potenciāla vektoru $\mathbf{A}$ brīvi izvēlētā konstrukcijas punktā var aprakstīt ar vienādojumiem:

$$-\nabla \left((j\omega\sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r) \mathbf{A} + (\sigma + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r) \nabla V \right) = 0; \quad (3.2)$$

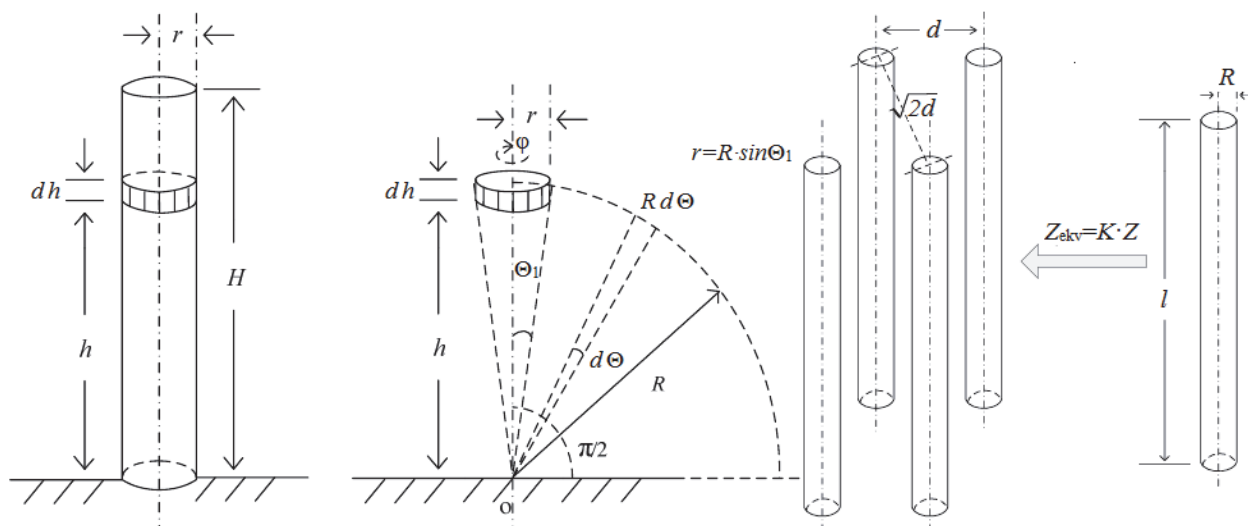
$$(j\omega\sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r) \mathbf{A} + (\sigma + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r) \nabla V + \nabla \times \mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A} = 0, \quad (3.3)$$

kur ω – leņķiskā frekvence, σ – elektriskā vadāmība, ϵ_r – dielektriskā caurlaidība, ϵ_0 – īpatnējā dielektriskā caurlaidība, μ_r – magnētiskā caurlaidība, μ_0 – īpatnējā magnētiskā caurlaidība [5].

Konstrukcijas tērauda elementiem robežnosacījumus nosaka pēc viļņa pretestības, t. i., pēc elementa biezuma. Viļņa pretestības izteiksmi var pārveidot tā, lai tas atbilstu 3.3. attēlam [15]:

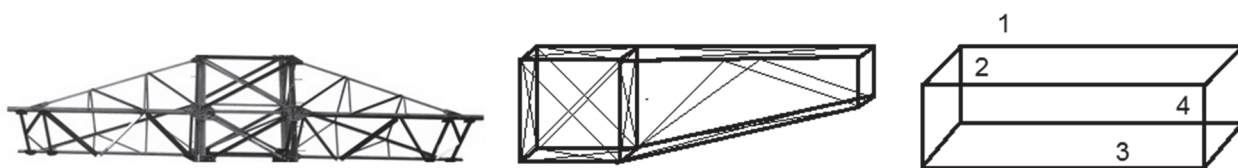
$$Z_e = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2} - h} \right), \quad (3.4)$$

kur μ – magnētiskā konstante, ε – elektriskā konstante, r – konstrukcijas segmenta ekvivalents rādiuss, h – segmenta augstums.



3.3. att. Četrus paralēlu saišu sistēma [15].

Pieņem, ka konstrukcijas apgabalā telpā veido sistēma no četriem paralēliem segmentiem, kas atrodas vienādā attālumā viens no otra. Ievadot koeficientu K , var pāriet no vienības elementa pie segmentu sistēmas, kā tas ir parādīts 3.3. attēlā. Piemēram, EPL balsta traversas ekvivalenta figūru veido četri paralēlie segmenti, bet traversas viļņa pretestību nosaka pēc paralēlu vadītāju ekvivalenta modeļa korelācijas teorijas (skat. 3.4. att.).



3.4. att. EPL balsta traversas ekvivalents modelis.

Sprieguma vērtību sistēmai no n segmentiem atrod no formulas (3.5) [15]:

$$U = ZI, \quad (3.5)$$

kur $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ – segmentu spriegumu vektoru kolonna, $I = [i_1, i_2, \dots, i_n]^T$ – segmentu strāvas stiprumu vērtību kolonna, Z – viļņu pretestību matrica, kas sastāv no segmentu sistēmas viļņa pašpretestības un savstarpējās pretestības.

Segmenta viļņa pretestību apraksta formula (3.6), bet segmentu savstarpējo viļņa pretestību – formula (3.7) [15]:

$$Z_{kk} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln\left(\frac{h_{kk}}{r_k}\right), \quad (3.6)$$

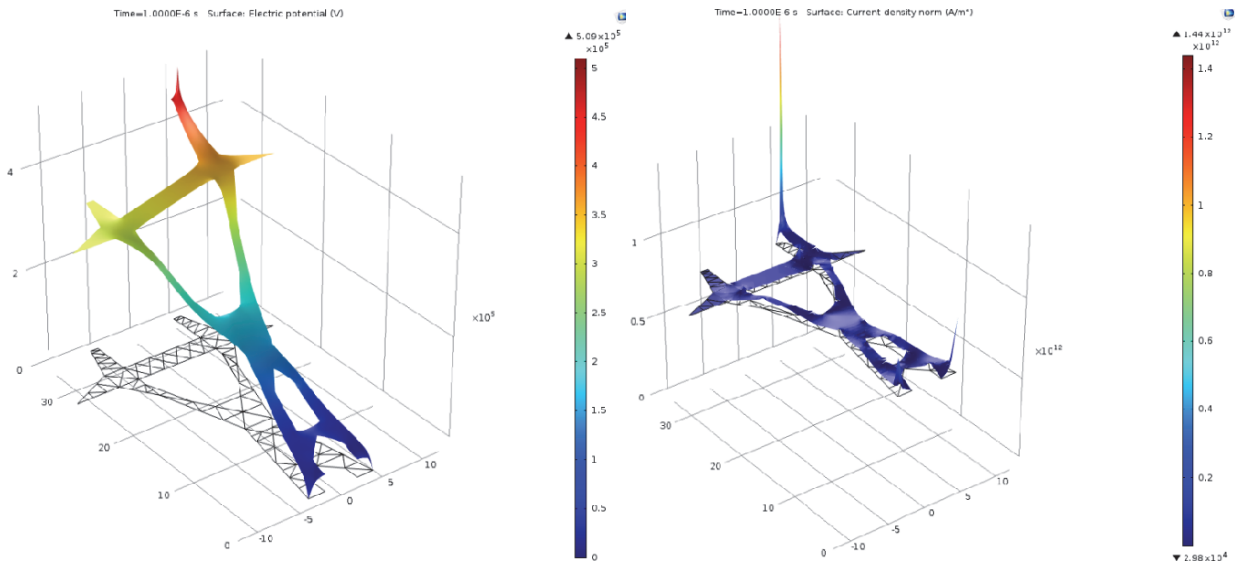
$$Z_{km} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln\left(\frac{h_{km}}{d_{km}}\right), \quad (3.7)$$

kur h_{kk} – vertiālo segmentu garums; h_{km} – horizontālo segmentu garums; d_{km} – attālums starp segmentiem k un m , bet r_k – segmenta ekvivalentais rādiuss.

Sistēmai no četriem paralēliem segmentiem sastāda potenciālu vienādojumu, kur katra segmenta potenciāls ir vienāds ar: $u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u$. Pieņemot, ka kopējā zibensstrāva segmentu sistēmā ir vienāda ar zibensstrāvu katrā segmentā, tad tās vērtība ir: $i_1 = i_2 = i_3 = i_4 = i/4$, kas saskaņā ar [15]:

$$\begin{cases} u_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 + Z_{13}i_3 + Z_{14}i_4 \\ u_2 = Z_{12}i_1 + Z_{22}i_2 + Z_{23}i_3 + Z_{24}i_4 \\ u_3 = Z_{13}i_1 + Z_{23}i_2 + Z_{33}i_3 + Z_{34}i_4 \\ u_4 = Z_{14}i_1 + Z_{24}i_2 + Z_{34}i_3 + Z_{44}i_4 \end{cases}. \quad (3.8)$$

Vides parametrus, respektīvi, īpatnējo vadāmību, dielektrisko un magnētisko caurlaidību, uzdod katrā konstrukcijas segmentā pirms aprēķinu procesa palaišanas. Iepriekš aprakstīto aprēķinu rezultātu piemērs konstrukcijas elektriskā potenciāla noteikšanai zibensizlādes momentā ir dots 3.5. attēlā.



3.5. att. Elektriskā potenciāla vērtības P-1 tipa EPL balstam zibensstrāvas noplūdes sākuma un beigu momentā.

Objekti, kuru izmēri ir mazāki par aprēķinu tīkla soli, tiek modelēti ar speciālu metožu palīdzību. Pie speciālajām metodēm tiek pieskaitīti tā saucamie absorbējošie robežnosacījumi (no angļu val. *Absorbing Boundary Conditions* jeb *ABC*). Šo robežnosacījumu uzdevums ir ignorēt

elektromagnētisko viļņu ietekmi robežās starp divām vidēm, absorbēt tos, kavējot šo viļņu atstarošanas no aprēķinu apgabala robežām.

Zibensstrāvas avots tiek uzdots ar Heidlera funkciju kā neatkarīgs strāvas avots, bet strāvas forma ir impulss ar stāvu fronti. Elektrisko potenciālu EPL balsta virsotnē nosaka kā elektriskā lauka integrāli līdz aprēķinu apgabala robežai. Grunts slānis arī ietilpst aprēķinu apgabalā un tiek modelēts kā bezgalīga vide, elektromagnētiskais lauks norimst tajā absorbējošo robežnosacījumu dēļ un netiek atstarots no aprēķinu apgabala robežām.

4. EPL BŪVNIECĪBĀ IZMANTOJAMO METĀLKONSTRUKCIJU ZIBENSIZTURĪBAS NOVĒRTĒJUMA METODOLOĢIJA

EPL balstu metālkonstrukciju zibensizturības pamatkritērijs, ko nosaka jau projekta izstrādes un lēmumu pieņemšanas stadijā, ir novēršanas princips caursitei no metāliskajiem elementiem (karkasa, traversām un ekrāntrosēm) uz fāzes vadiem.

Par EPL zibensizturību sauc spēju stabili reaģēt uz zibens pārspriegumu iedarbību. Piedāvātās metodoloģijas ietvaros ir izvirzīti šādi zibensizturības novērtēšanas kritēriji:

- 1) EPL balstu izolējošo konstrukciju caursites varbūtība tiešās zibensizlādes gadījumā metāliskajā konstrukcijā;
- 2) bīstamo pārsprieguma viļņu izplatīšanās EPL un izolējošo konstrukciju bojājumu varbūtība blakus balstos;
- 3) avāriju skaits n_b , ko izraisa izolācijas bojājumi, kuru cēlonis ir atmosfēras pārspriegumi.

Lai analizētu minēto bīstamo režīmu attīstības scenārijus un iespējamās sekas, par noteicošajiem aprēķinu parametriem šajā metodoloģijā ir pieņemti:

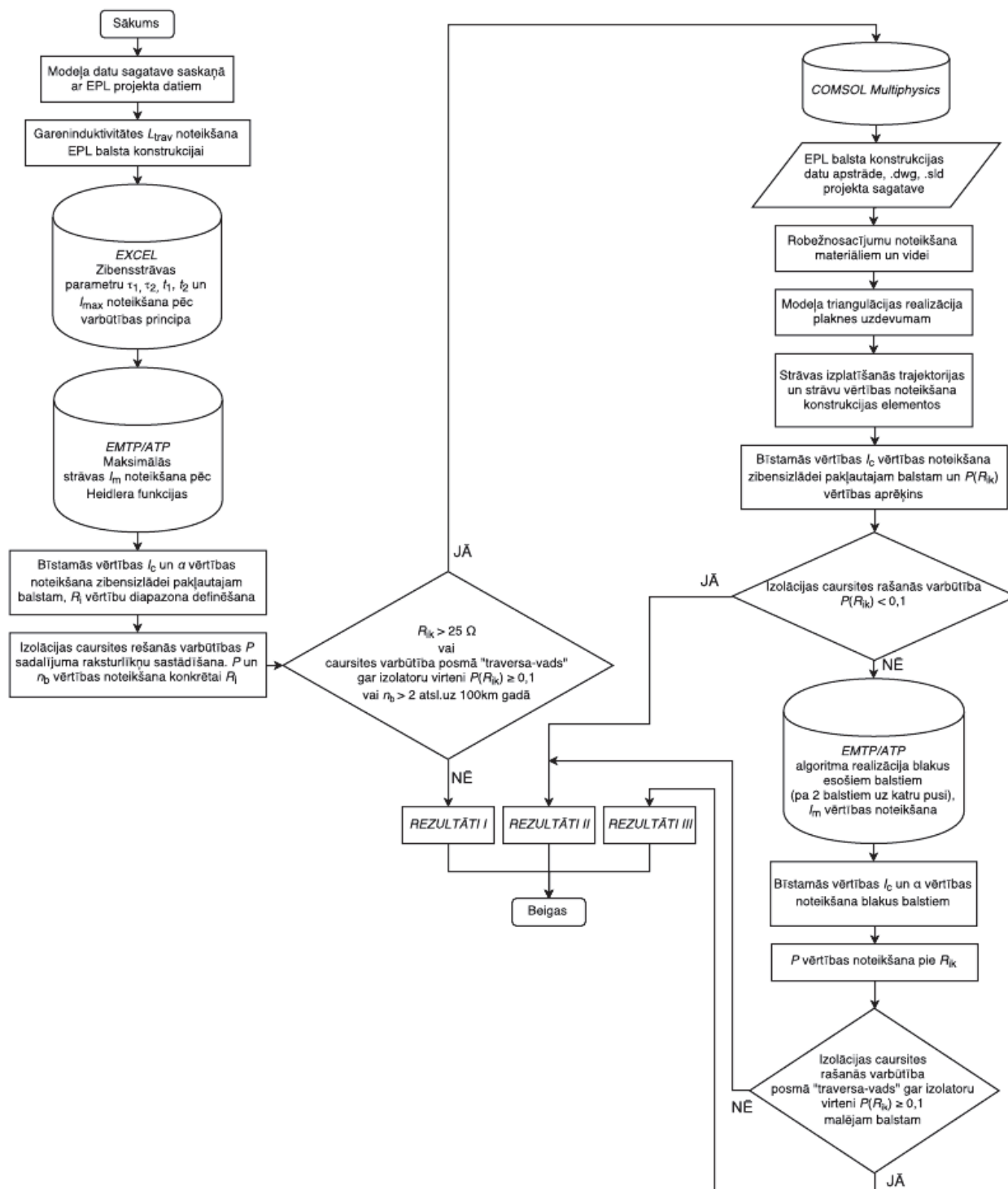
- 1) EPL balstu konstrukciju gabarītmēri;
- 2) balstu nesošo konstrukciju un traversu gareninduktivitāte L ($\mu\text{H}/\text{m}$);
- 3) izlādes attālumi līdz strāvvadošajiem elementiem.

Kā mainīgos parametrus pieņem:

- 1) zemējuma impulspretestības R_i (Ω) diapazonu;
- 2) izolatoru virtenes caursites spriegumu $U_{50\%}$ (kV).

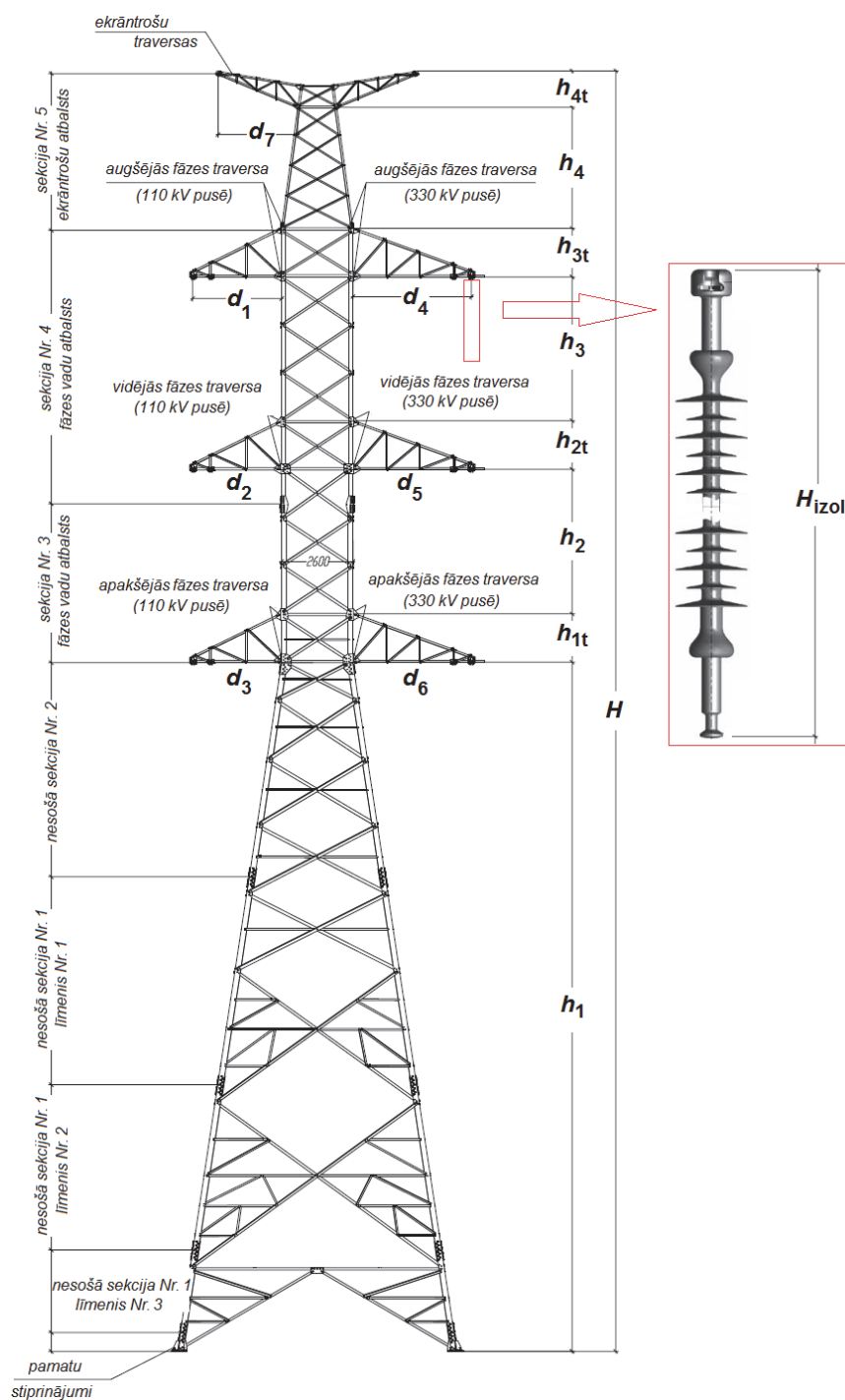
Lai ievērotu tādu parametru kā zibensstrāvas un sprieguma savstarpējo ietekmi starp strāvvadošajiem elementiem un izolējošām konstrukcijām (starpbalstu pārlaidumi), šajā darbā ir izmantots daudzvadu garās līnijas modelis, kas ievēro zemējuma un vadu pretestības frekvenču spektru, kas atbilst zibens režīmam. EPL metālkonstrukciju zibensizturības uzdevuma risināšanas algoritma blokshēma ir dota 4.1. attēlā, un tā ir paredzēta gadījumiem, kad uzdevumā nav minēti atsevišķi nosacījumi, tādi kā vēja slodze, ekrāntrošu vai fāzes vadu apledojuks. Piedāvātā

metodoloģija zibensizturības novērtēšanai domāta EPL taisniem posmiem un nav paredzēta elektrisko staciju un apakšstaciju aizsargpieejām.



4.1. att. EPL metālkonstrukciju zibensizturības noteikšanas algoritms.

Modelī ir ievēroti EPL ģeometriskie izmēri, katrs konstrukcijas segments (EPL balsta sekcijas, traversas u. tml.) ir aizvietots ar induktivitāti. Tādējādi uzdevumu konkrētai situācijai var atrisināt precīzāk, minimizējot tādu faktoru kā „vidējais pārlaidums”, „vidējais piekares augstums” u. tml. ietekmi.



4.2. att. 31T2 LS-25 tipa divķēžu 330/110 kV EPL balsta skice.

Algoritma realizācija sākas ar ieejas datu faila apstrādi. Par ieejas datiem uzskata visus konstruktīvos parametrus un saites, respektīvi, nesošo konstrukciju augstumus līdz katrai fāzes vadu un ekrāntrošu traversai, fāzes vadu un ekrāntrošu traversu garumus, attālumu starp traversām, kas redzamas 4.2. attēlā dotajam piemēram un atbilst 4.1. tabulas datiem, bet 4.2 tabulā doti aprēķiniem izmantotie elektrisko sistēmu nominālie un darba spriegumi.

4.1. tabula

Divķēžu 330/110 kV EPL balsta gareninduktivitātes L ($\mu\text{H/m}$) aprēķinam nepieciešamie izmēri

Parametrs	Apzīmējums	Vērtība	Mērvienība
Balsta augstums	H	46,45	m
Apakšējās fāzes traversas augstums	h_1	25,0	m
Vidējās fāzes traversas augstums	h_2	5,25	m
Augšējās fāzes traversas augstums	h_3	5,25	m
Ekrāntrošu traversas augstums	h_4	4,4	m
Fāzes traversu augstums 110 kV un 330 kV pusē	h_{1t}, h_{2t}, h_{3t}	1,75	m
Ekrāntrošu traversas augstums	h_{4t}	1,2	m
Fāzes traversu garums 110 kV pusē	d_1, d_2, d_3	3,2	m
Fāzes traversu garums 330 kV pusē	d_4, d_5, d_6	4,3	m
Ekrāntrošu traversas garums	d_7	2,69	m
Izolatoru virtenes garums	H_{izol}	3,161	m
Ekrāntroses piekares augstums	h_{tr}	46,45	m
Laiduma garums apskatāmajā posmā	L	350,0	m
Attālums starp divām ekrāntrosēm	$d_{\text{tr-tr}}$	6,38	m
Ekrāntrošu vidējais piekaraugstums laidumā	$h_{\text{vid tr}}$	36,89	m
Ekrāntrošu nokare	h_{tr}	14,34	m

4.2. tabula

EPL nominālie un maksimālie darba spriegumi

	$U_{\text{nom}}, \text{kV}$						
	110	150	220	330	500	750	1150
$U_{\text{darba, max}}, \text{kV}$	126	172	252	363	525	787	1200
$U_{\text{f, max}}, \text{kV}$	72,8	100	146	210	304	455	695

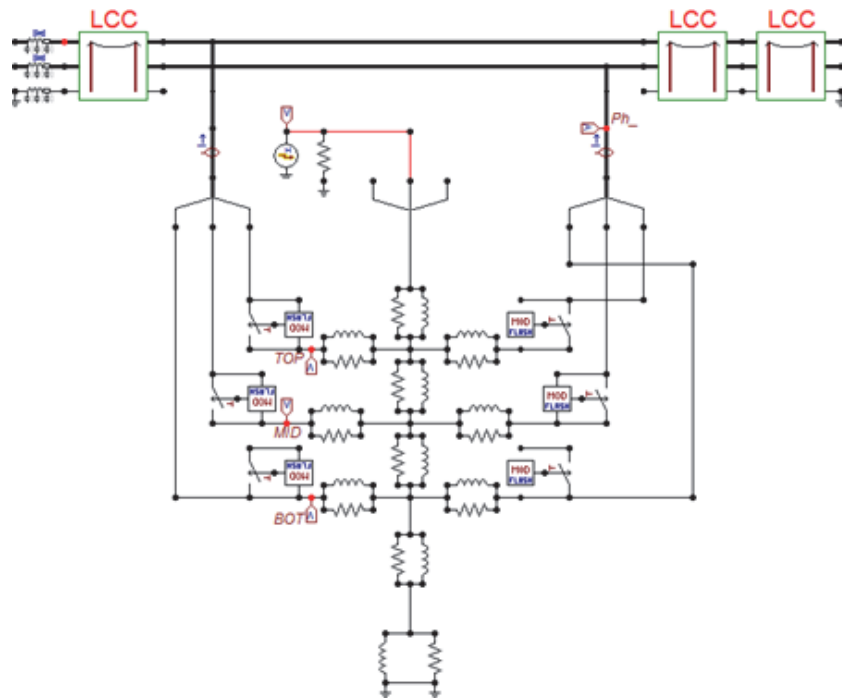
Bez EPL metāliska balsta ģeometriskiem parametriem pie ieejas datiem attiecināmi arī visi zibensizlādes parametri, respektīvi: zibensizlādes maksimumstrāvas stiprums I_{max} , viļņa rimšanas un pieaugšanas laiks t_1 un t_2 , viļņa rimšanas un pieaugšanas koeficients τ_1 un τ_2 , bet sekundāro izlāžu skaits n Baltijas reģionam ir pieņemts vienāds ar divi. Šo datu pirmsapstrādei – izvēlei pēc varbūtības principa statistiski iespējamā diapazonā – promocijas darbā ir izmantota *MS EXCEL* vide. Modelī zibensstrāvas I_z avots iedarbojas uz EPL balsta virsotni. Lai noteiktu $I_z(t)$ amplitūdas vērtību variāciju, *MS EXCEL* aprēķinu failā aizpilda datņu ailes vērtībām:

- I_{max} diapazonā (5–100) kA,
- τ_1 diapazonā (0,1–1,0) 10^{-5} s,
- t_1 diapazonā (0,1–1,0) 10^{-5} s,
- t_2 diapazonā (0,1–1,0) 10^{-5} s.

Zibenskanāla pretestība ir nemainīga un pieņemta $Z_k = 1000 \Omega$, bet viļņa pieaugšanas koeficients pieņemts $\tau_2 = 60 \mu\text{s}$ [7].

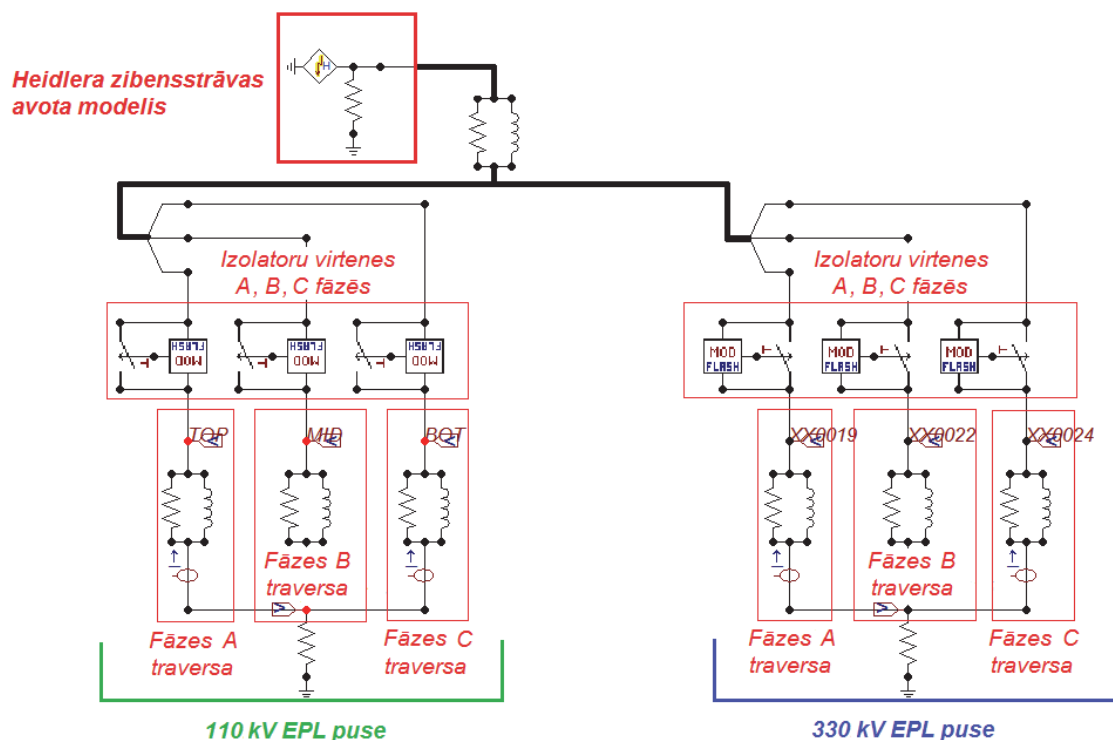
4.3. un 4.4. attēlā dota aizvietošanas shēma zibensstrāvas maksimālās vērtības traversās sadalījuma noteikšanai tiešās zibensizlādes momentā EPL balstiem ar ierīkotu ekrāntrosi.

Definējot EPL strāvvadošo elementu parametrus, respektīvi, fāzes vadu skaitu, to aktīvo pretestību, laiduma garumu, darba frekvenci, *EMTP* izvēlēts *JMarti* līnijas prototips.



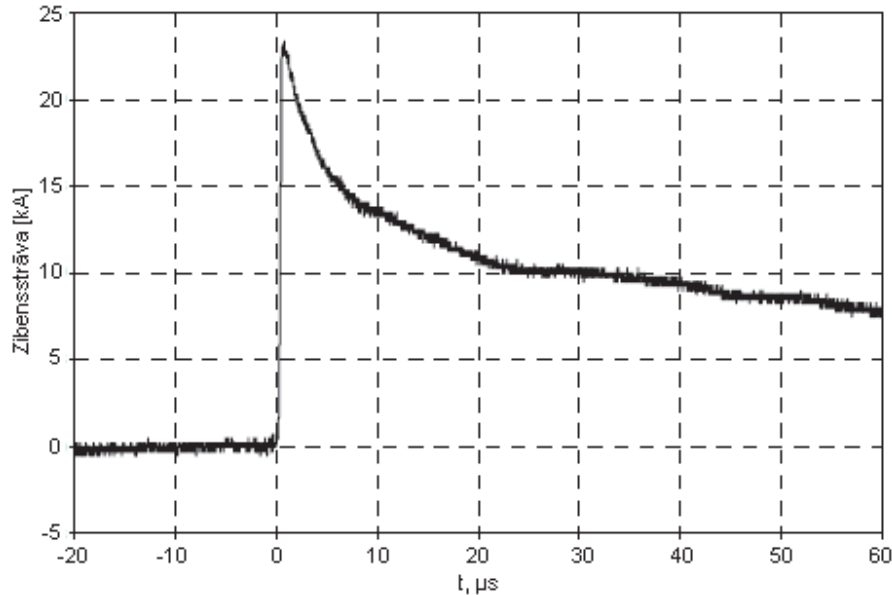
4.3. att. Aizvietošanas shēma zibensstrāvas vērtības noteikšanai EPL balsta traversās.

Kā norādīts *CIGRE* C4.407 darba grupas rekomendācijās [14], zibens impulsstrāvas avota imitācijai piemērotāks ir pretlīdera strāvas avots, kas izraisa strāvas plūšanu augšupejošā izlādes kanālā. Pretlīdera strāvas avots atbilst Heidlerā matemātiskajam modelim, tas ievēro zibenskanāla pretestību un izlādes objekta tiešas saiknes ar pretlīdera strāvas avotu ietekmi.



4.4. att. EMTP aizvietošanas shēmas detalizācija katrai traversai.

EPL balsta traversas no fāzes vadiem ir atdalītas ar izolatoru virtenēm ar konkrētām voltsekunžu raksturlīknēm – *MODEL:Flash* bloks uz aizvietošanas shēmas. *MODEL:Flash* bloks reģistrē sprieguma, kas iedarbojas uz EPL izolāciju, paaugstināšanos atbilstoši voltsekunžu raksturlīknei, bloks arī reģistrē izolācijas caursītes faktu un „savieno” atbilstošo fāzes vadu ar balsta traversu. Bloks aktivizējas tad, kad spriegums uz izolācijas pārsniedz caursītes sprieguma vērtību. 4.5. attēla grafikā ir dotas zibensstrāvas stipruma I_m sadalījuma raksturlīkne EPL balstā.



4.5. att. Zibensstrāvas stipruma I_m sadalījuma raksturlīkne EPL balsta traversās.

Varbūtības sadalījuma funkciju strāvas pietiekamai vērtībai, lai konstatētu caursīti gar izolatoru virteni apgabalam „vads–traversa”, atrod no izteiksmes [25]:

$$P(I_c) = (1 + 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot I_c + 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot I_c^2 + 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot I_c^3)^{-1}, \quad (4.1)$$

kur I_c – strāvas pietiekamā vērtība, lai nodrošinātu līnijas izolācijas caursīti.

Pieņemot konkrēta tipa izolatora (izolatoru virtenes) 50 % caursītes spriegumu $U_{bal-v50\%}$, ko nosaka modeļa izpildījums un EPL izbūves reglamentējošās prasības, atrod zibensstrāvas pietiekamo vērtību, lai konstatētu izolācijas caursīti [27]:

$$I_c = \frac{(U_{bal-v50\%} - \alpha L)}{R_i}, \text{ bet} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{I_m}{\tau_1}, \quad (4.3)$$

kur $U_{bal-v50\%}$ – izolatoru virtenes caursītes spriegums, kV; α – zibensstrāvas stāvums, kA/μs, ko atrod no EMTP aprēķinu rezultātiem; L – balsta gareninduktivitāte (posmā līdz dzirksteļizlādes punktam jeb vada stiprinājuma punktam), μH/m; I_m – zibensstrāvas stipruma maksimālā vērtība.

Tā kā zibensstrāvas frontes garums, ko nosaka elektromagnētiskā viļņa izplatīšanās zibenskanālā, nav atkarīgs no zibenskanāla zemējuma pretestības, samazinās arī zibensstrāvas stāvums [20]:

$$\alpha(R_{\text{ekv}}) = \frac{\alpha(R_{\text{ik}} \approx 0)}{1 + \frac{R_{\text{ik}}}{Z_z}}, \quad (4.4)$$

kur R_{ik} – zemējuma ietaises izmērītā impulspretestība, Ω , Z_z – zibens kanāla pretestība (pieņemts $Z_z = 1000 \Omega$).

Varbūtība dzirksteļizlādei pāriet spēka lokā posmā „traversa–fāzes vads” [26]:

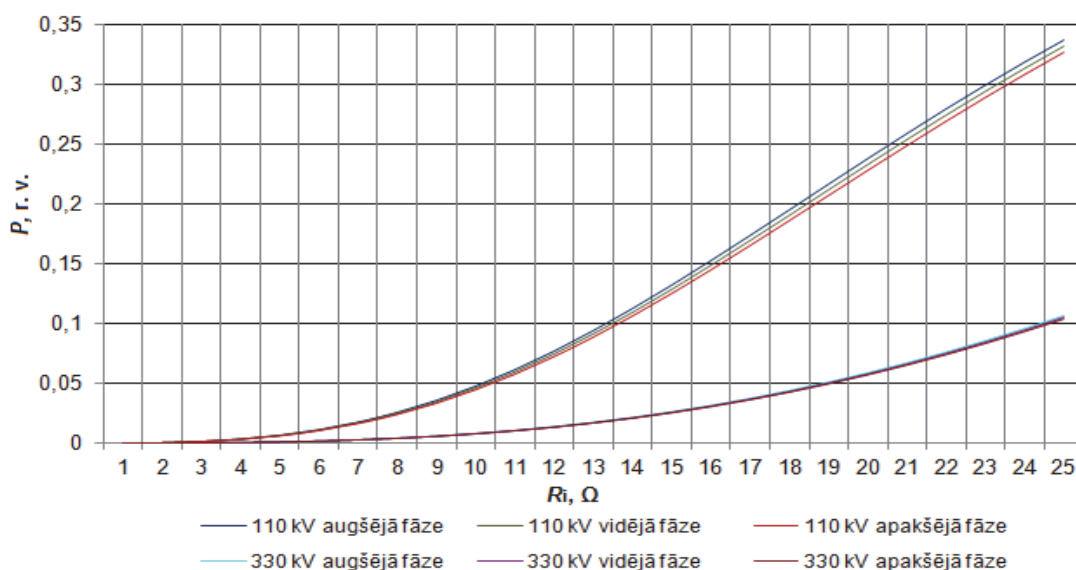
$$\eta_{\text{tr}_v} = (0,92E_{\text{vid}} - 6)10^{-2}, \quad (4.5)$$

bet $E_{\text{vid}} = \frac{U_d}{H_{\text{izol}}}$, kur U_d – EPL maksimāla darba spriegums, kV; H_{izol} – izolatora augstums, m.

Tādējādi caursites varbūtības vērtību posmam „traversa–fāzes vads” atrod no izteiksmes [27]:

$$P_{\text{tr}_v} = \eta_{\text{tr}_v} P_c. \quad (4.6)$$

Gadījumam, kad zibensizlāde notiek balstu konstrukcijas sazemētajos elementos, tika mainīta impulspretestības R_i vērtība, atkārtojot aprēķinus EMTP un izmantojot izteiksmes (4.1)–(4.6), tika iegūtas 4.6. attēlā dotās raksturlīknes.



4.6. att. Fāžu izolācijas caursites varbūtība EPL 31T2 LS-25 tipa divķēžu balstam atkarībā no balsta R_i un H_{izol} vērtībām 330 kV pusē ($H_{\text{izol}} = 3161$ mm, 3FLx-177-3SB10) un 110 kV pusē ($H_{\text{izol}} = 1601$ mm, 3FLx-085-3SB10).

Raksturlīknes 4.6. attēlā demonstrē labi zināmo faktu, ka izolācijas pārklāšanas varbūtības samazināšanai ir nepieciešama balstu zemētājpretestības samazināšana un izolatoru virtenes garuma H_{izol} palielināšana.

Atkarībā no negaisa stundu skaita konkrētajā rajonā proporcionāli mainās izolējošās aparātūras bojājumu skaits. EPL drošas ekspluatācijas nolūkos operatīvajā jeb „avārijas” rezervē

jābūt noteiktam (provizoriski aprēķinātam) izolatoru skaitam, kas savukārt ir atkarīgs no avāriju skaita n_b , ko izraisa izolācijas bojājumi, kuru cēlonis ir atmosfēras pārspriegumi [26]:

$$n_b = N_b P(R_{ik}), \quad (4.7)$$

kur

$$N_b = 4N(h_{tr}/l), \quad (4.8)$$

savukārt n_b – avāriju, ko izraisa izolācijas bojājumi no negaisa pārspriegumiem, skaits; N_b – zibensizlāžu skaits EPL balstā; h_{tr} – ekrāntroses piekares augstums, m; l – EPL laiduma garums apskatāmajā posmā, m; N – kopējais zibensizlāžu skaits uz EPL 100 km, ko atrod no izteiksmes:

$$N = 0,2\rho_0 \left(\frac{d_{tr-tr}}{2} + 5h_{vid-tr} - \frac{2h_{vid-tr}^2}{30} \right), \quad (4.9)$$

kur $\rho_0 = 3$, zibensizlāžu blīvums uz zemi, izl./km² gadā, (Latvijas apstākļos [20]); d_{tr-tr} – attālums starp divām trosēm, m; h_{vid-tr} – ekrāntroses vidējais piekaraugstums, m, ko nosaka pēc formulas:

$$h_{vid-tr} = h_{tr} - \frac{2}{3}f_{tr}, \quad (4.10)$$

kur f_{tr} – ekrāntroses nokare, kas gadījumā, ja:

$$h_{tr-v} > h_{tr} - h_v^{aug.}, \text{ ir vienāda ar } f_{tr} = h_{tr} - h_{min}(h_v^{aug.} - h_v^{apaks.}) - h_{tr-v} \text{ un } f_v = h_v^{apaks.} - h_{min},$$

$$h_{tr-v} \leq h_{tr} - h_v^{aug.}, \text{ ir vienāda } f_{tr} = f_v = h_v^{apaks.} - h_{min},$$

kur h_{tr-v} – attālums starp ekrāntrosi un augšējo fāzes vadu, m; $h_v^{aug.}$ un $h_v^{apaks.}$ – augšējā un apakšējā fāzes vada vidējais piekares augstums, m; h_{min} – minimālais pieļaujamais attālums starp apakšējo fāzes vadu un zemi, m [26].

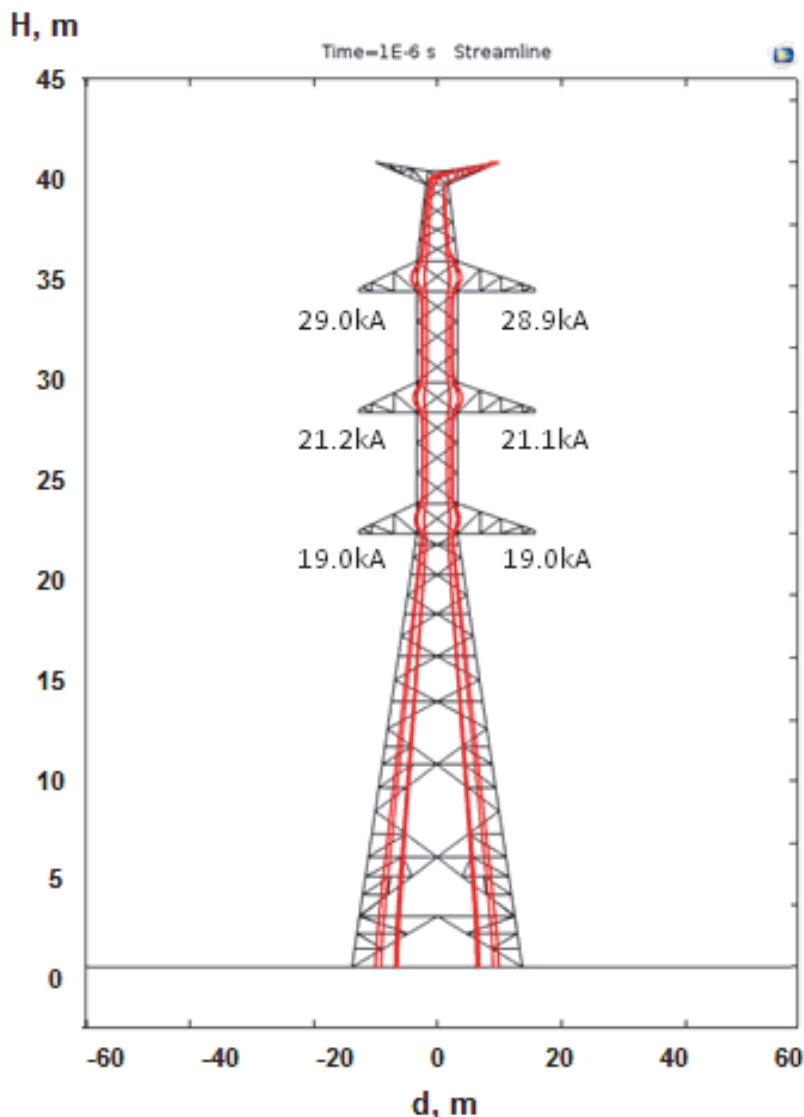
Saskaņā ar (4.7)–(4.10) izteiksmēm n_b vērtība apskatāmajā gadījumā (piem., pie $R_i = 10 \Omega$, 330 kV līnijai) ir 0,25 atslēgumi gadā uz 100 km.

Zibensstrāvas izplatīšanās trajektorijas noteikšanas EPL balstu konstrukcijās uzdevuma risināšana tiek realizēta *COMSOL Multiphysics* datorprogrammatūras vidē. Simulācijas modeļa veidošanu sāk ar *Space Dimension* dialoga palīdzību. Šeit uzdod uzdevuma tipu – 2D (plakanparalēla lauka aprēķini un uzbūve) –, mērvienības un modeļa dziļumu (virzienu, kas perpendikulāri novirzīts šķērsojošam šķēlumam). *COMSOL* aprēķinu datnē tiek uzdots konstrukcijas dziļums. *COMSOL* aprēķina modelis ir uzdots divdimensiju vidē, iegūto balsta pārsprieguma viļņa pretestības rezultātu precizēšanai ir nepieciešams izmantot labojuma koeficientu k_{lab} , ieviešot to kā reizinājuma ar Z_{bal} rezultātu „Geometric Enity Selection” *COMSOL* parametru ievades logā. Gala rezultātā k_{lab} ieviešana nodrošina arī bīstamas strāvas I_c vērtības precizēšanu, bet $P(I_c)$ aprēķinu rezultāti tiek precizēti par 0,9–1,3 % (pie $R_i \leq 25 \Omega$).

Ar *Study Type (Stationary vai Time Depend)* bloka palīdzību uzdod analīzes tipu, modeļa materiālu (metāls, gaiss, grunts) un tā parametrus, tad programmā uzdod robežnosacījumus un konstruē galīgo elementu tīklu. Tāpat kā EMTP blokā, zibensstrāvas I_z avots ir pieslēgts pie EPL

balsta virsotnes, un *COMSOL Multiphysics* apakšblokā „Global Definitions” uzdod elektriskās strāvas avota parametrus. Zibensstrāvas formu uzdod ar impulsu, bet $I_{\max}$, τ_1 , τ_2 , t_1 , t_2 vērtības paliek tādas pašas, kā uzdots *EMTP*. Ar „Settings – Time Dependent” un „Settings – Mesh Settings” funkciju palīdzību nosaka uzdevuma atrisināšanas precizitāti, kas reglamentē pētāmā procesa rezultāta relatīvo kļūdu.

Ar „Results – 2D/3D Plot Group – Streamline Current Density” funkciju palīdzību atrod meklētās strāvas vērtības konstrukcijas elementos un zibensstrāvas noplūšanas trajektoriju EPL balsta metāliskajā konstrukcijā, kā tas parādīts 4.7. attēlā. Šajā attēlā ar sarkanām līnijām atzīmēta zibensstrāvas noplūšanas trajektorija, kur skaitliskie rezultāti norāda zibensstrāvas vērtības traversās. Vispārīgā gadījumā tās var būt uzņemtas jebkurā konstrukcijas punktā, kas savukārt dod iespēju atrast konstrukcijas kritiskās vietas. Tādējādi, kad konstrukcijā plūstošas zibensstrāvas vērtības ir noteiktas, izmantojot izteiksmes (4.1)–(4.3), nosaka izolējošo posmu caursītes varbūtību pie konkrētas R_{ik} vērtības (skat. 4.3. tab.).



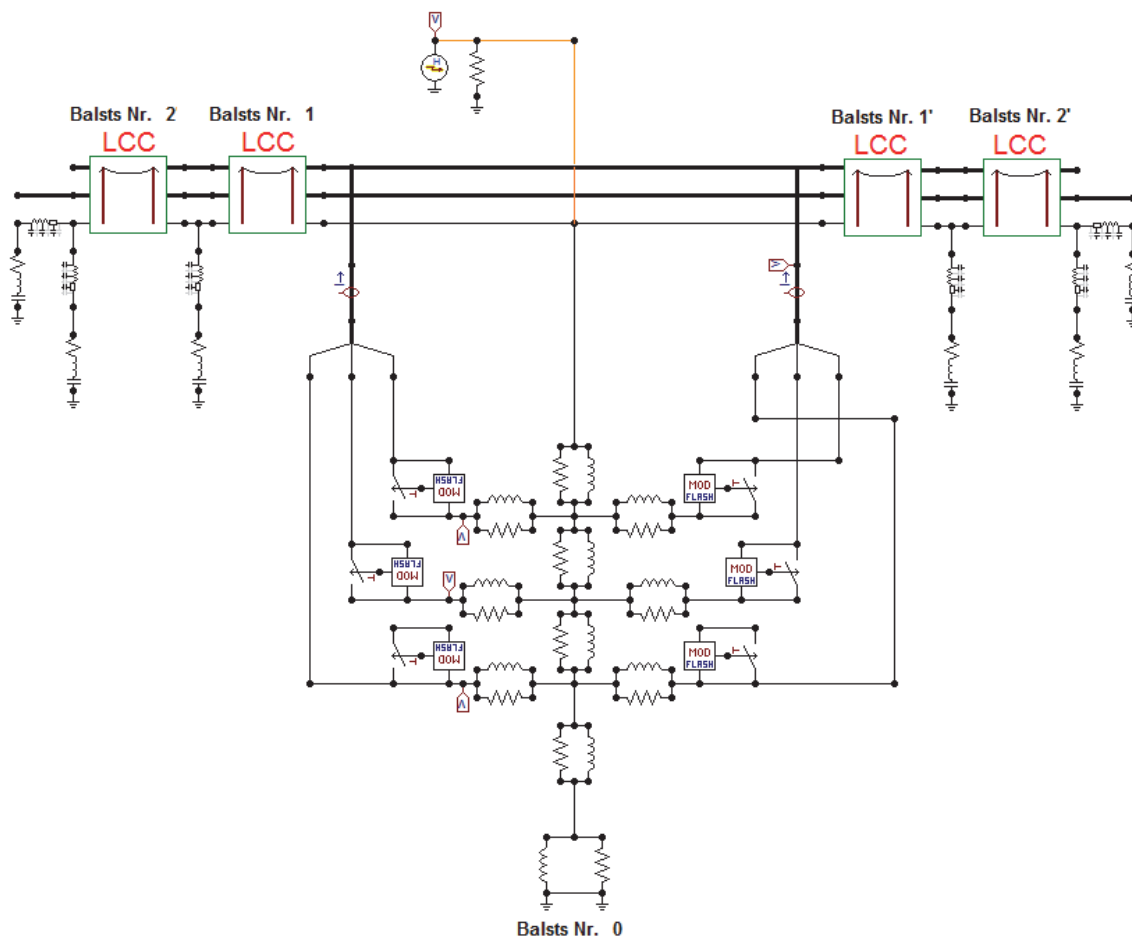
4.7. att. Zibensstrāvas noplūšanas trajektorija EPL metāliska balsta konstrukcijā, ja $R_{ik} = 10 \, \Omega$.

Izolējošo konstrukciju caursites varbūtības aprēķina rezultāti ar *COMSOL Multiphysics*

31T2LS-25 balsts 330 kV puse						
R_{ik}, Ω	$P(I_c)_{augš. trav.}$	$P_{tr_v augš. tr.}$	$P(I_c)_{vid. trav.}$	$P_{tr_v vid. tr.}$	$P(I_c)_{apakš. trav.}$	$P_{tr_v apakš. tr.}$
10	0,0081	0,0080	0,0079	0,0079	0,0078	0,0078
31T2LS-25 balsts 110 kV puse						
R_{ik}, Ω	$P(I_c)_{augš. trav.}$	$P_{tr_v augš. tr.}$	$P(I_c)_{vid. trav.}$	$P_{tr_v vid. tr.}$	$P(I_c)_{apakš. trav.}$	$P_{tr_v apakš. tr.}$
10	0,0720	0,0478	0,0696	0,0462	0,0673	0,0447

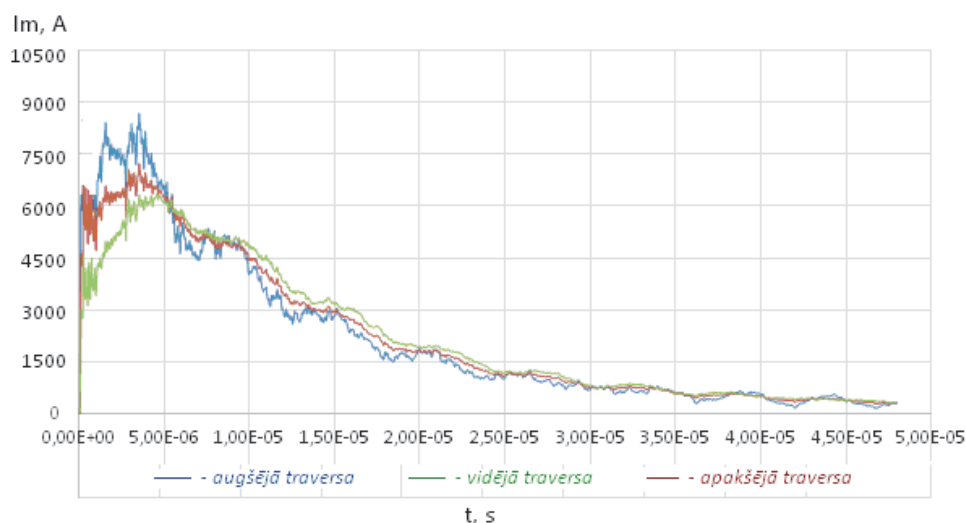
Aprēķinot strāvu vērtības EPL konstrukcijas elementos, *COMSOL Multiphysics* ņemtas vērā diagonāles segmentu mehāniskās saiknes ar nesošās konstrukcijas vertikālajiem segmentiem (atbalstiem), kā rezultātā notiek modeļa konfigurācijas izmaiņas. Mainās arī induktīvo un kapacitīvo komponentu skaitliskās vērtības, rezultātā mainās arī elektriskā un magnētiskā lauka enerģija.

Bīstamo strāvu sadalījuma EPL balsta transversās un izolējošo konstrukciju caursites varbūtības aprēķinus blakus balstiem realizē analogiski, kā norādīts atsevišķa balsta gadījumā, pieņemot, ka zibensstrāva saskaņā ar Heidlera funkciju katra blakus balsta virsotnē atbilst vienādojumam (2.8). 4.8. attēlā dota aizvietošanas shēma pārsprieguma viļņu iedarbības uz blakus balstiem analīzei.



4.8. att. EPL posma aizvietošanas shēma *EMTP/ATP* ar diviem laidumiem uz katru pusi.

Grafikā 4.9. attēlā ir dotas zibensstrāvas I_m sadalījuma raksturlīknes EPL blakus balstu traversās.



4.9. att. Zibensstrāvas I_m sadalījuma raksturlīknes balstā Nr. 2 un Nr. 2', ja to R_i ir vienādas.

Kad zibensstrāvas blakus balstos noteiktas, izmantojot izteiksmes (4.1)–(4.6), nosaka izolējošo posmu caursītes varbūtības pie konkrētas R_{ik} vērtības (skat. 4.4. tab).

4.4. tabula

Izolējošo konstrukciju caursītes varbūtības aprēķina rezultāti blakus balstiem
Nr. 1, Nr. 1', Nr. 2 un Nr. 2' 110 kV un 330 kV EPL

31T2LS-25 balsti Nr. 1; 1' (110 kV puse)						
R_{ik}, Ω	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ augš. tr.}}$	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ vid. tr.}}$	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ vid. tr.}}$
10	0,88	0,0079	0,54	0,0076	0,38	0,0074
31T2LS-25 balsti Nr. 1; 1' (330 kV puse)						
R_{ik}, Ω	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ augš. tr.}}$	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ vid. tr.}}$	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ vid. tr.}}$
10	0,88	0,0077	0,54	0,0075	0,38	0,0074
31T2LS-25 balsti Nr. 2; 2' (110 kV puse)						
R_{ik}, Ω	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ augš. tr.}}$	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ vid. tr.}}$	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ vid. tr.}}$
10	0,41	0,0075	0,31	0,0074	0,37	0,0074
31T2LS-25 balsti Nr. 2; 2' (330 kV puse)						
R_{ik}, Ω	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ augš. tr.}}$	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ vid. tr.}}$	$\alpha = I_m/\tau_1 \text{ (kA}/\mu\text{s)}$	$P_{tr_v \text{ vid. tr.}}$
10	0,41	0,0074	0,31	0,0074	0,37	0,0074

No EPL metālkonstrukciju projektēšanas viedokļa piedāvātajā metodoloģijā vislabvēlīgākā situācija ir tad, kad uzreiz pēc *EMTP* pārbaudes uz izolējošo konstrukciju zibensizturību tiek iegūtas pieļaujamās vērtības (bloks „REZULTĀTI I” algoritma blokshēmā 4.1. att). Šajā gadījumā izmaiņas projektā nav nepieciešamas.

Izmantojot konkrētam konstruktīvajam risinājumam iegūto varbūtības P sadalījuma raksturlīkni pretestības R_i diapazonā no 0 Ω līdz 25 Ω , nosaka P vērtību un aprēķina m_b vērtību konkrētai izmēritai R_{ik} vērtībai, ko iegūst, veicot mērījumus uz objekta. Gadījumos, kad:

- $R_{ik} > 25 \Omega$,

- $P(R_{ik}) > 0,1$,
- $n_b > 2$ atslēgumi uz 100 km gadā,

ir nepieciešama papildu pārbaude ar mērķi noteikt zibensstrāvas izplatīšanās trajektoriju EPL balsta metāliskajā konstrukcijā.

Konkrētam konstruktīvajam risinājumam pie izmērītās pretestības R_{ik} , ar *COMSOL Multiphysics* nosaka P vērtības katram no kritiskajiem punktiem. Gadījumā, ja $P(R_{ik}) < 0,1$, konstatē, ka izvēlētajā EPL balsta metālkonstrukcija atbilst zibensizturības kritērijiem, tomēr pieņem lēmumu par konstruktīvām izmaiņām izolējošās konstrukcijās (bloks „REZULTĀTI II” algoritma blokshēmā), respektīvi:

- izvēlas izolatoru virtenes ar lielāku $U_{50\%}$ vērtību;
- paredz pasākumus R_{ik} vērtības samazināšanai.

Atkārtu aprēķinu, pārbaudot, vai tiek iegūtas pieļaujamās vērtības zibensizturības novērtēšanai (bloks „REZULTĀTI I”). Ja aprēķinu ar *COMSOL Multiphysics* rezultātā iegūtas strāvas vērtības, kuras dod $P(R_{ik}) > 0,1$, algoritma realizāciju veic blakus esošiem balstiem, lai noteiktu zibensstrāvas izplatīšanās radīto bīstamību.

Varbūtības vērtību caursitei gar izolatoru virteni P , apgabalam „traversa–vads” blakus balstiem (diviem balstiem uz katru pusi no balsta, kurā notiek zibensizlāde), nosaka konkrētam konstruktīvajam risinājumam pie izmērītās pretestības R_{ik} . Gadījumā, ja tālāko blakus balstu $P(R_{ik}) < 0,01$, piemēro iepriekš aplūkotos pasākumus (bloks „REZULTĀTI II” algoritma blokshēmā). Gadījumā, ja $P(R_{ik}) > 0,01$, pieņem lēmumu par:

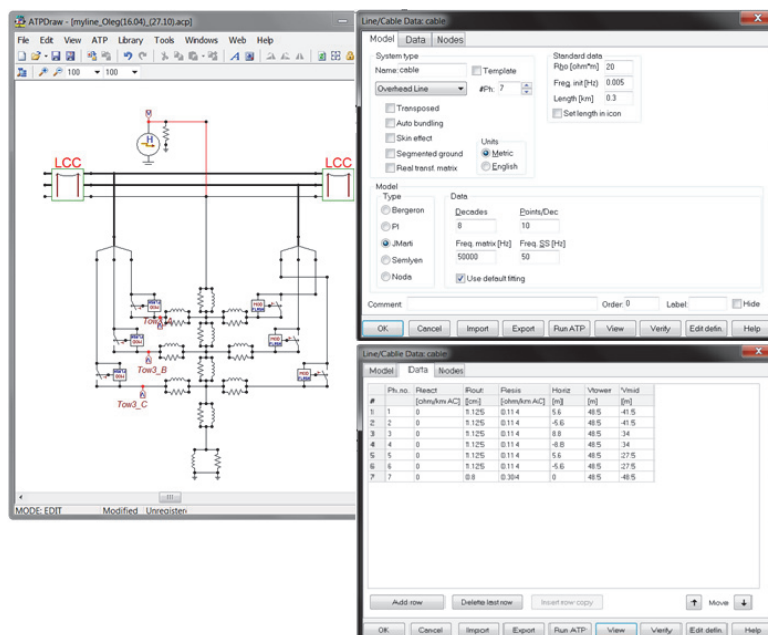
- nepieciešamajām izmaiņām EPL nesošo konstrukciju konfigurācijā, respektīvi, palielina attālumu starp fāžu traversām, augšējo fāzi un ekrāntrosi vai palielina pašu fāžu traversu garumus u. tml.;
- mākslīgi samazināt R_{ik} vērtību blakus balstiem;
- izmantojot pastiprinātu izolāciju, uzstādīt NPI tipa aizsargiekārtas.

Pēc izmaiņu veikšanas projektā aprēķinu atkārtu, pārbaudot, vai tiek iegūtas pieļaujamās vērtības zibensizturības novērtēšanai („REZULTĀTI I”).

5. EPL METĀLKONSTRUKCIJU ZIBENSIZTURĪBAS NOVĒRTĒJUMS, IZMANTOJOT PIEDĀVĀTO METODOLOĢIJU

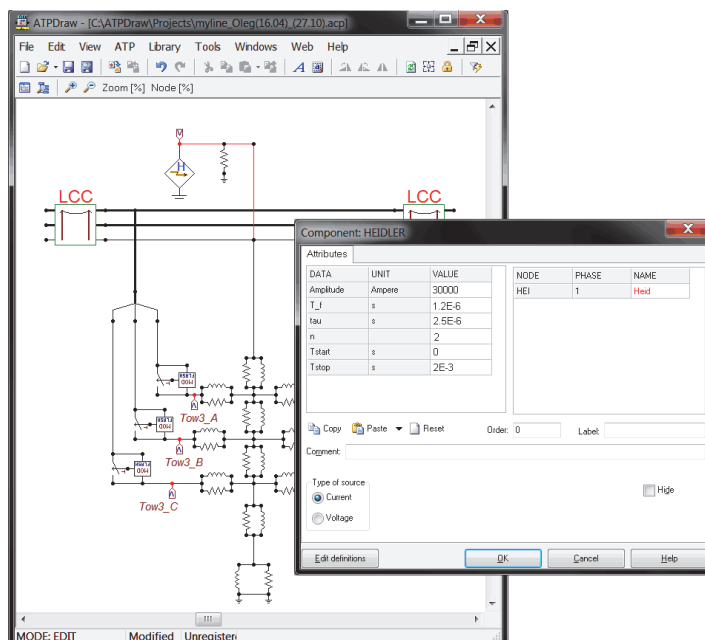
Viens no promocijas darbā apskatītajiem gadījumiem ir EPL, kas ierīkota uz divķēžu balstiem ar vertikālu vadu izvietojumu, kā tas ir parādīts 4.2. attēlā. Uzdevuma atrisināšanu realizē saskaņā ar 4.1. attēlā doto EPL metālkonstrukciju zibensizturības noteikšanas algoritma blokshēmu. EPL apgabala un balsta modeļa aizvietošanas shēmas sastādīšanai izmantota

EMTP/ATP datorprogrammas *LCC* bloks, ievadot shēmas elementu parametrus (skat. 5.1. att.), induktivitāšu aprēķinam izmanto 4.2. tabulas datus.



5.1. att. EPL un balsta ģeometrisku parametru ievade *EMTP/ATP* datorprogrammā.

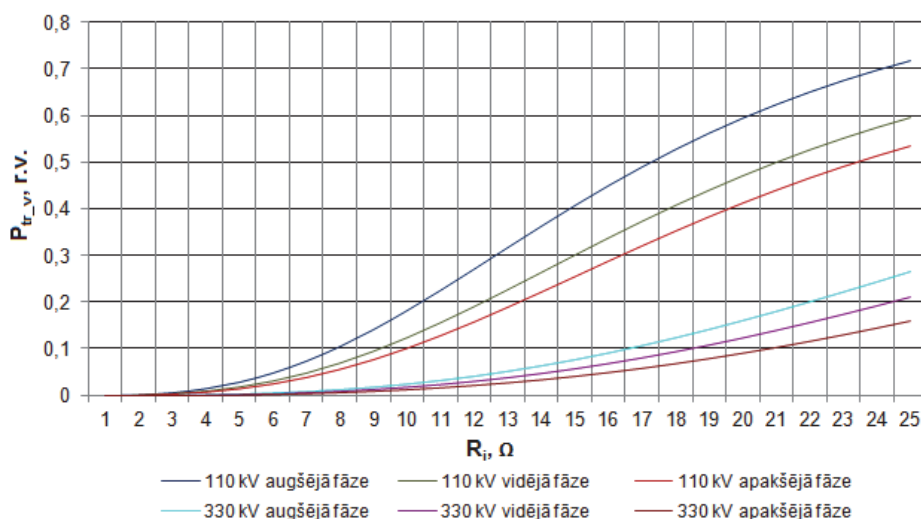
Modelī zibensstrāvas I_z avots ir pieslēgts pie EPL balsta virsotnes, kā tas ir parādīts 5.2. attēlā, uzdodot vērtības $I_{\max}$, τ_1 , t_1 , t_2 .



5.2. att. Zibensstrāvas avota parametru ievade *EMTP/ATP* datorprogrammā.

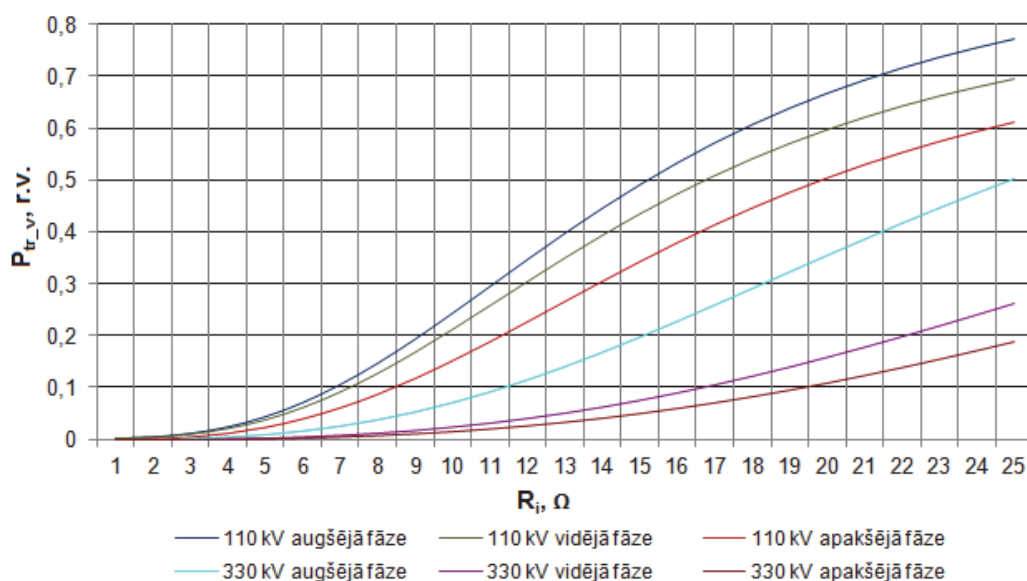
R_i vērtības ir pieņemtas mainīgas diapazonā, bet L un $U_{\text{bal-v50\%}}$ variācija atbilst EPL balsta konkrētam modelim, piemērā izmantotās zibensstrāvas parametru vērtības – $I_{\max} = 30 \text{ kA}$, $t_1 = 1,016 \text{ } \mu\text{s}$, $t_2 = 1,190 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_1 = 2,5 \text{ } \mu\text{s}$ – noteiktas, izmantojot *MS EXCEL* datu masīvu. Pieņemts, $\tau_2 = 60 \text{ } \mu\text{s}$, $n = 2$, kas atbilst zibensizlāžu novērojumu datiem Latvijas apstākļos.

Maksimālās strāvas stipruma I_m vērtības, kas parādās uz EPL balsta, kas pakļauts zibensizlādei, traversām, grafiski attēlotas 4.5. attēlā. Balstu konstrukciju izolācijas caursītes varbūtības P apgabalam „traversa–fāzes vads” aprēķinu rezultāti apkopoti 4.6. attēlā dotajā grafikā. Saskaņā ar (4.9)–(4.12) izteiksmēm, n_b vērtība apskatamajā gadījumā (piem., pie $R_i = 10 \, \Omega$ 330 kV līnijai) sastāda 0,25 atslēgumi gadā uz 100 km.



5.3. att. Fāžu izolācijas caursītes varbūtība EPL 31T2 LS-25 tipa divķēžu balstam atkarībā no R_i un H_{izol} un izolatoru virteņu $U_{50\%}$ vērtībām, pieņemot neatbilstošus izolācijas parametrus.

No 5.3. attēla var redzēt, ka EPL zibensizturība ir nodrošināta pie zemējuma pretestības R_i diapazonā no $1 \, \Omega$ līdz $7 \, \Omega$. Pieņemot, ka zemējuma pretestība $R_i = 10 \, \Omega$, jāveic tehniskie pasākumi EPL nepieciešamās zibensizturības nodrošināšanai, respektīvi, mākslīgi samazināt balsta zemējuma pretestību, mainīt izolatora tipu, palielinot ta izturspriegumu.



5.4. att. Fāžu izolācijas caursītes varbūtība EPL 31T2 LS-25 tipa divķēžu balstam atkarībā no R_i un H_{izol} un izolatoru virteņu $U_{50\%}$ vērtībām, pieņemot $I_m = 50 \, \text{kA}$.

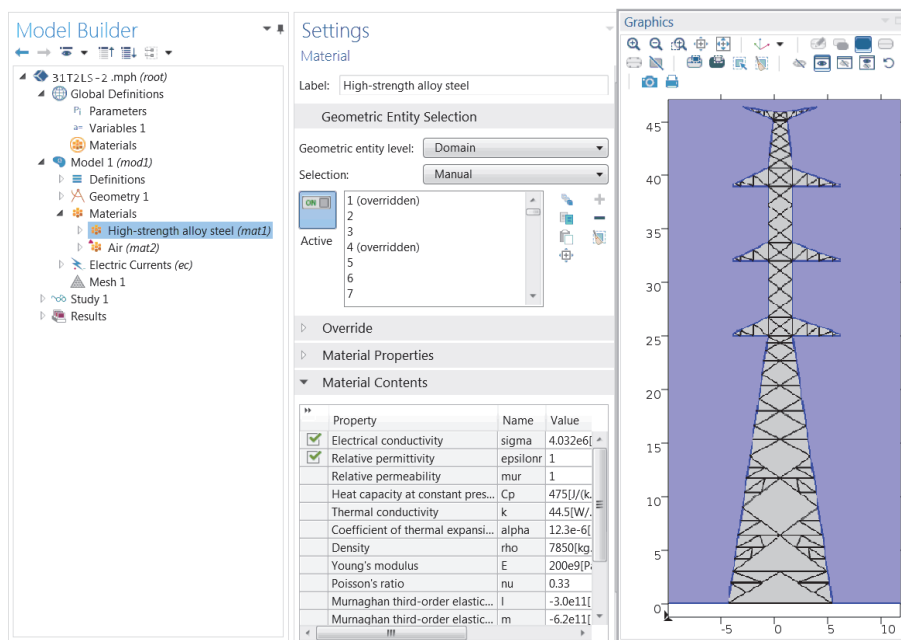
No 5.4. attēla var redzēt, ka EPL zibensizturība ir nodrošināta pie zemējuma pretestības R_i diapazonā no 1 Ω līdz 6 Ω . Pieņemot, ka zemējuma pretestība $R_i = 10 \Omega$, jāveic tehniskie pasākumi EPL nepieciešamās zibensizturības nodrošināšanai. Bez tiem pasākumiem, kas bija minēti iepriekš, rajonos, kur reģistrētas zibensizlādes ar maksimālo strāvas stiprumu virs 35 kA, paredz arī papildu pasākumus, tādus kā papildu ekrāntroses(-šu) uzstādīšanas augstuma palielināšana un traversu garuma samazināšana.

Zibensstrāvas izplatīšanās trajektorijas EPL balsta metālkonstrukcijā uzdevuma atrisināšanai izmantota *COMSOL Multiphysics* programmatūra, darbības veicot šādā secībā:

1) importē .dwg (jeb .sld, iespējamas arī citas grafisko failu izpildes variācijas) *COMSOL Multiphysics* grafiskā uzdevuma sagataves datnē;

2) *COMSOL Multiphysics* automātiski pārbauda importēto modeli uz ģeometrisku konvergenci, brīdinot par konstatētām nepilnībām modeļa izpildījumā, bet, konstatējot principiālas kļūdas modeļa grafiskajā izpildījumā, informē par sintakses kļūdu esamību, apstādinot turpmāko darbību programmā.

Ja sintakses kļūdas nav konstatētas, programmas dialoga logā jāpāriet pie modeļa materiālu īpašību definēšanas, izvēloties EPL balsta 31T2 LS-25 karkasa materiālu – augstās izturības tērauda sakausējumu – ar attiecīgiem elektriskiem un magnētiskiem parametriem, šo pašu procedūru atkārto arī modeļa apkārtējai videi – gaisam – vai arī *COMSOL Multiphysics* pieņem attiecīgos vides parametrus pēc noklusējuma (skat. 5.5. att.);

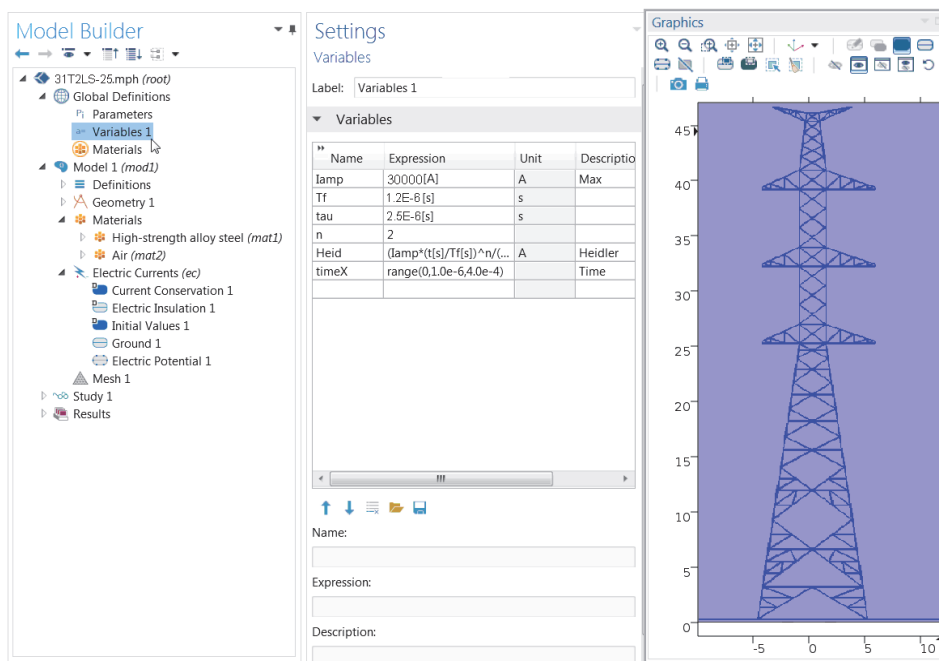


5.5. att. *COMSOL Multiphysics* modeļa materiālu īpašību definēšana 31T2 LS-25 balstam.

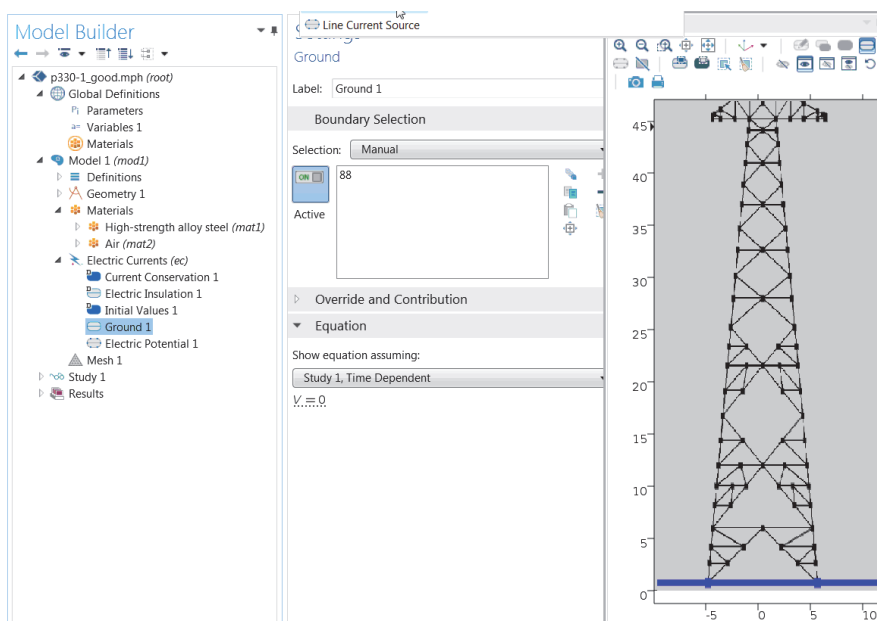
3) līdzīgi kā *EMTP/ATP* uzdevumā, *COMSOL Multiphysics* apakšblokā „Global Definitions” jāuzdod elektriskās strāvas avota parametri, līdzīgi kā iepriekš, zibensstrāvas forma

ir uzdota ar impulsu. Modelī zibensstrāvas I_z avots ir pieslēgts pie EPL balsta virsotnes, kā tas ir parādīts 5.6. attēlā, zibensstrāvas parametri un zibenskanāla pretestības vērtības tiek ievadītas tādas pašas kā *EMTP/ATP* programmā;

4) arī šajā modelī jādefinē zemējuma punkts, nepieciešamības gadījumā pētot pārejas procesus zemētājos; ir iespējams uzdot arī zemētāja konfigurāciju. Programma automātiski sadala modeli elementārajos segmentos – punktos un līnijās –, šajā konkrētajā gadījumā zemējuma punktam atbilst punkts Nr. 88. (skat. 5.7. att.);



5.6. att. Zibensstrāvas avota parametru definēšana.

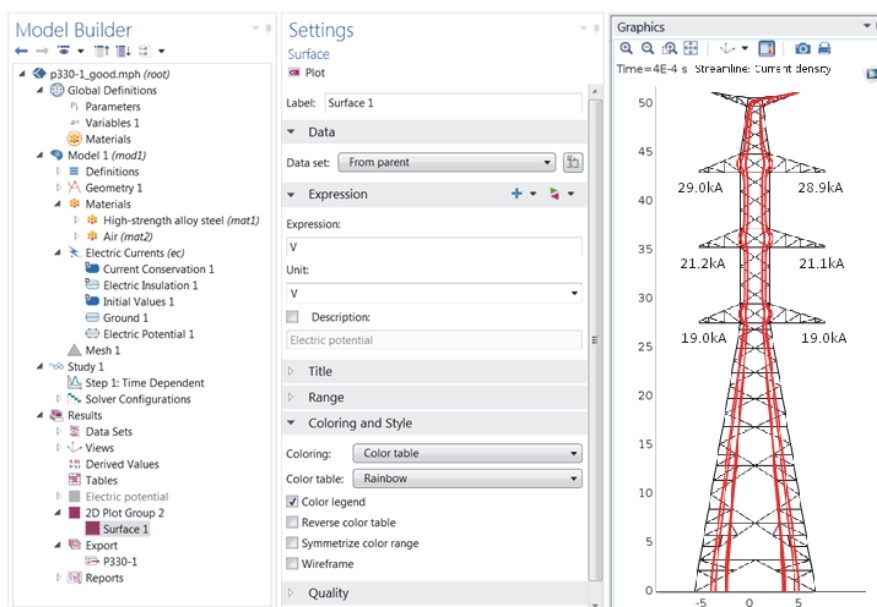


5.7. att. Zemējuma punkts Nr. 88.

5) ar „Results – 2D Plot Group – Streamline Current Density” funkciju palīdzību atrod meklēto zibensstrāvas noplūšanas trajektoriju EPL balsta konstrukcijā (skat. 5.8. att.).

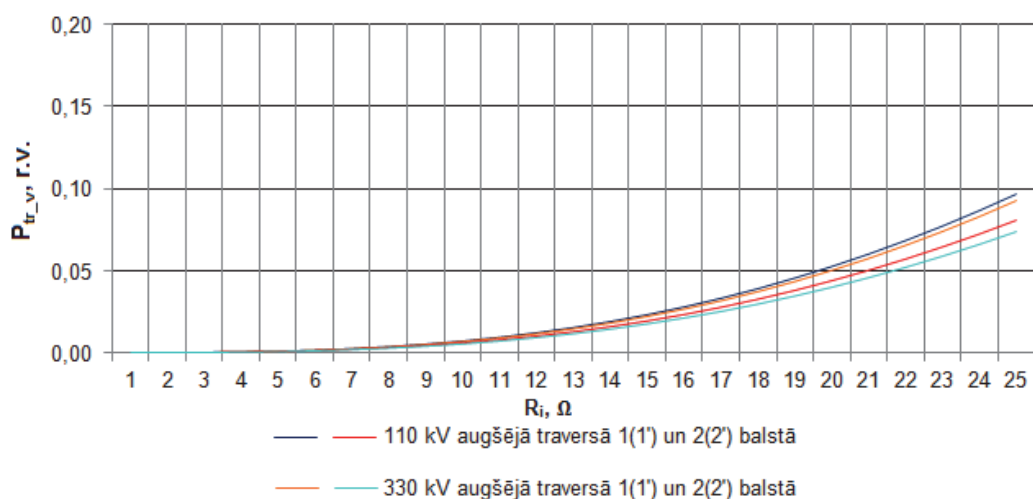
5.8. attēlā ar sarkanām līnijām atzīmēta zibensstrāvas noplūšanas trajektorija, bet skaitliskie rezultāti norāda zibensstrāvas vērtības transversās. Tādējādi, kad konstrukcijā plūstošas zibensstrāvas vērtības ir noteiktas, izmantojot izteiksmes (4.3) un (4.8), nosaka izolējošo posmu caursites varbūtību pie konkrētas R_{ik} vērtības.

Sprieguma pieaugums EPL blakus balstos, kas piedāvātajā metodoloģijā paredz apskatīt divus balstus uz katru pusi no balsta, kurā notiek zibensizlāde, pārsprieguma viļņa nonākšanas momentā ir atkarīgs no balsta viļņa pretestības Z_{bal} . Tādējādi, veicot aprēķinu saskaņā ar vienādojumiem (2.4)–(2.7), rezultātā iegūst Heidlera funkcijas modifikāciju zibensstrāvas impulsam, kas nonāk līdz blakus balstiem, respektīvi, vienādojums (2.8).



5.8. att. Zibensstrāvas noplūšanas trajektorija EPL balstā.

Veicot aprēķinu saskaņā ar *EMTP/ATP* aizvietošanas shēmu, kas dota 4.9. attēlā, iegūst zibensstrāvas izplatīšanas diagrammas EPL posmā tuvākiem balstiem, līdzīgi kā tas ir parādīts 4.10. un 4.11. attēlā. Kad zibensstrāvas blakus balstos noteiktas, nosaka izolējošo posmu caursites varbūtības pie konkrētas R_{ik} vērtības, izmantojot (4.3)–(4.8) izteiksmes, bet fāžu izolācijas caursites varbūtības raksturlīknes ir dotas 5.9. attēlā. Var redzēt, ka blakus balstiem, palielinoties zibensstrāvas izplatīšanās attālumam, caursites varbūtība krasi samazinās un, piemēram, pie $R_i = 10 \, \Omega$, ir mazāka par 0,01.



5.9. att. Fāžu izolācijas caursītes varbūtība EPL 31T2 LS-25 tipa blakus balstiem augšējai traversai.

Ar nolūku konstatēt iegūto rezultātu ticamību, aprēķinot līnijas izolācijas caursītes varbūtību, ir veikts aprēķins, izmantojot EPL metālisko balstu vienīgo gabarītizmēru, respektīvi, balsta augstumu H (kas izteiksmē (4.4) ir ekvivalents balsta gareninduktivitātei L), kas 31T2 LS-25 tipa balstiem ir vienāds ar 46,45 m, un lieto 30 kA lielas zibens impulsstrāvas standarta stāvuma vērtību $\alpha = 10,8 \text{ kA}/\mu\text{s}$, kas atbilst frontes garumam $\tau_1 = 4,5 \mu\text{s}$, kas pieņemtas saskaņā ar [26]. Zibensstrāvas pietiekamo vērtību, lai konstatētu izolācijas caursīti, atrod no (4.4). Tāpat kā iepriekš, ir pieņemts, ka balsta inductivitāte uz garuma vienību jeb gareninduktivitāte $L = 1,0 \mu\text{H}/\text{m}$, kas 31T2 LS-25 tipa balstiem, ir vienāda ar 46,45 $\mu\text{H}/\text{m}$.

Saskaņā ar [26] varbūtību, ka zibensstrāvas amplitūda pārsniegs uzdoto vērtību, nosaka no izteiksmes:

$$P(I_c) = e^{-0,04I_c}, \quad (5.1)$$

bet zibensstrāvas stāvuma gadījumā – no izteiksmes:

$$P(\alpha) = e^{-0,08\alpha}. \quad (5.2)$$

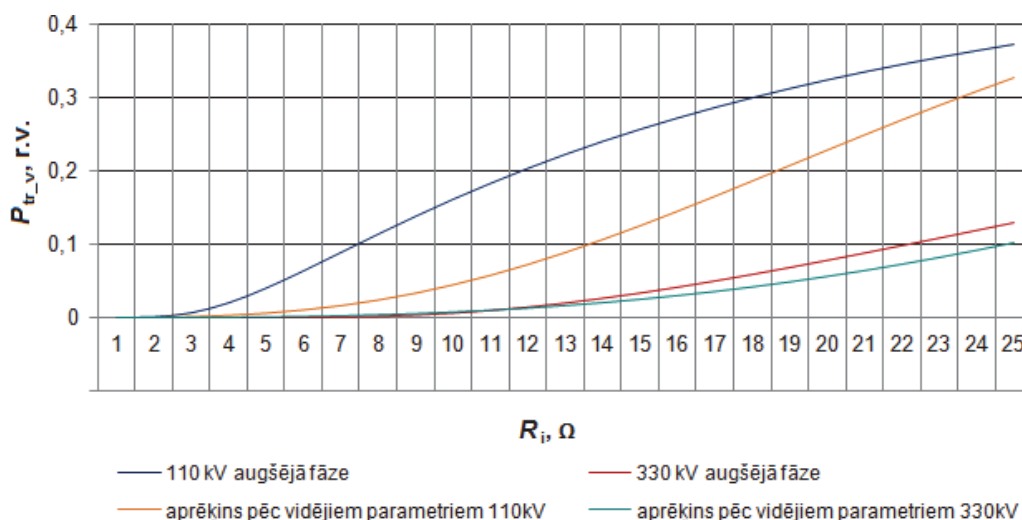
Tā kā pie uzdotas α vērtības tās izmaiņas R_i diapazonā no 1 Ω līdz 25 Ω saskaņā ar (4.6) ir tikai 2,4 %, izolācijas caursītes varbūtību atrod, tapāt kā iepriekš, no (4.7) un (4.8) izteiksmēm, (4.6) neievērojot. Aprēķinu rezultāti doti 5.10. attēlā. Var redzēt, ka, veicot aprēķinu pēc normatīvu [26] rekomendācijām, izolācijas caursītes varbūtības ir zemākas vidēji par 22–28 %, salīdzinot ar rezultātiem, aprēķinātiem pēc piedāvātās metodoloģijas.

Spriežot pēc 5.10. attēlā dotajām izolācijas caursītes varbūtības P_{tr_v} raksturlīkņēm, kas iegūtas 31T2LS-25 tipa EPL divķēžu balstam atkarībā no zemējuma impulspretestības R_i saskaņā ar [24] doto un autora piedāvāto metodiku, var redzēt, ka:

- piemēram, pie $R_i = 13 \Omega$, izolācijas caursītes varbūtības P_{tr_v} vērtība 330 kV EPL atrodas pieļaujamās robežās, t. i., $P_{tr_v} < 0,1$, kas ir skaidrojams ar stiprāku izolāciju,

turpretim 110 kV EPL pie tās pašas R_i vērtības P_{tr_v} vērtība, kas iegūta saskaņā ar [24], ir vismaz divas reizes mazāka nekā pēc piedāvātās metodikas aprēķinātā vērtība. Proti, $R_i = 13 \, \Omega$ Baltijas reģionam un EPL „Kurzemes loks” ir netipisks gadījums;

- pie minimālām impulspretestības $R_i < 5 \, \Omega$ vērtībām pēc abu metodoloģiju iegūtie rezultāti sakrīt, un tie nav pretrunā ar fizikālām īpašībām, kas ir abu metodoloģiju pamatos;
- ideāls iezemējums neapgrūtina zibensstrāvas noplūšanas procesu gruntī un atstarotais vilnis nav spējīgs radīt bīstamību līnijas izolācijai;
- pie $R_i > 25 \, \Omega$ pēc abām metodoloģijām iegūtās raksturlīknes satuvinājās, jo pie netipiski lielām R_i vērtībām EPL balsta konstrukcijas gareninduktivitātes vērtībai samazinās ietekme uz bīstamo I_c strāvu, kuras vērtība būtu pietiekama, lai radītu līnijas izolācijas caursīti.



5.10. att. Fāžu izolācijas caursītes varbūtība EPL 31T2 LS-25 divķēžu balstam atkarībā no R_i .

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE SECINĀJUMI

1. Pamatojoties uz tehniskās literatūras un gaisvadu elektropārvades līniju projektēšanas prakses izpēti, ir izvērtētas zibensstrāvas matemātisko modeļu datorrealizācijas iespējas un konstatēts, ka promocijas darbā veiktie pētījumi par EPL balstu metālkonstrukciju ietekmējošajiem parametriem uz EPL zibensizturību, kas balstīti uz individuālām konstruktīvām īpašībām, līdz šim nav veikti šādā veidā.

2. Piedāvātā EPL metālkonstrukciju zibensizturības pakāpes aprēķinu metodoloģija balstīta uz katras unikālās konstrukcijas ģeometriskiem (fāzes vadu piekares augstuma, pašas metālkonstrukcijas gareninduktivitātes posmā „traversa–zeme” u. c.) un materiālu fizikālajiem parametriem (izolatoru virteņu $U_{50\%}$ vērtības, zemējuma pretestības u. c.), bet tās realizācija ir

iespējama, izmantojot specializētas datorprogrammatūras. Metodika ļauj atklāt konstruktīvās nepilnības konkrētam EPL projektam, respektīvi:

- neatbilstošus izlādes attālumus starvvadošiem un iezemētiem elementiem,
- EPL reakciju uz bīstamu izlādes strāvu iedarbību pie palielinātas zemējuma pretestības,
- nekorekti izvēlētu līnijas izolāciju ar neatbilstošām caursites sprieguma vērtībām.

3. Darbā piedāvātā metodoloģija ļauj atvieglot projekta izstrādes procedūru, nosakot EPL zibensaizsardzības līmeni gadījumos, kad tiek izmantotas netipisku konstrukciju EPL atbalsta elementi vai izpildes materiāli.

4. Konstatēts, ka avārijas situācijas rašanās varbūtība, respektīvi, EPL balstu izolatoru virteņu caursite, ir atkarīga no fāzes vadu piekares augstuma, izolatoru virtenes $U_{50\%}$ vērtības, pašas metālkonstrukcijas gareninduktivitātes posmā „traversa–zeme”, turklāt aprēķinu rezultātu nepārprotami ietekmē arī sastādītā datormodeļa detalizācija. Jāatzīmē, ka piedāvātā metodoloģija nesarežģī projektēšanas procesu ar papildu datu iegūšanu, jo visa nepieciešama informācija ir zināma projekta izstrādes stadijā.

5. Aprēķinu algoritms paredz trīs rezultāta iegūšanas scenārijus, respektīvi:

- kad tiešai zibensizlādei pakļautajam elektropārvades līnijas balstam ir maza izolējošu konstrukciju caursites varbūtība un tai sekojoša līnijas atslēgšanās;
- kad izdarītie aprēķini liecina par nepieciešamību veikt papildu izpēti, nosakot zibensstrāvas izplatīšanās trajektoriju metālkonstrukcijā un kritisko no caursites viedokļa punktu noteikšanu;
- kad situācijas analīze uz viena konkrēta balsta pamata nav pietiekama un elektropārvades līnijas reakcijas izpēte jāpaplašina, apskatot arī zibensstrāvas bīstamo iedarbību uz blakus esošo balstu izolāciju.

Izstrādātā metodoloģija gala rezultātā ļauj vēl projektēšanas stadijas gaitā noteikt projektējamās elektropārvades līnijas zibensizturības līmeni, bet nepieciešamības gadījumā ieplānot pasākumus iespējams arī uz jau ekspluatācijā nodotas līnijas bīstamas situācijas novēršanai.

6. Ir konstatēts, ka sintezētais aprēķinu algoritms ekspluatējamo un jaunbūvējamu EPL metālkonstrukciju zibensizturības noteikšanai, kas promocijas darba ietvaros ir pārbaudīts ar atsevišķo komerciālu programmatūru palīdzību, var tikt izmantots kā bāze jaunas EPL projektanalīzes programmatūras radīšanai.

Kopsavilkumā izmantotās literatūras saraksts

- [1] AMETANI Akihiro, Lightning Surge Analysis by EMTP and Numerical Electromagnetic Analysis Method, 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010, Cagliari, Italy – September 13–17, 2010/ Internets: <http://www.iclp-centre.org/pdf/Invited-Lecture-Ametani-2010.pdf>
- [2] Ausgrid Netwok Standard 220, – Overhead Design Manual February 2011, 261 p.
- [3] Christodoulou C.A., Gonos I.F., Stathopoulos I.A. Lightning performance of high voltage transmission lines protected by surge arresters: a simulation for the Hellenic transmission network// 29th International Conference on Lightning Protection. – Uppsala, 2008.
- [4] Cigre WG C4.410, – Lightning Striking Characteristics To Very High Structures, October 2015, 151 p.
- [5] Cigre WG C4.501, – Guideline for Numerical Electromagnetic. Analysis Method and its Application to Surge Phenomena, June 2013. – 105 p.
- [6] Dib Djalel, Haddouche Ali and Chemam Fayçal. The Return-Stroke of Lightning Current, Source of Electromagnetic Fields (Study, Analysis and Modelling)// American Journal of Applied Sciences 4 (1), 2007, pp. 42–48.
- [7] EN 50341-1:2012. – Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV. General requirements. Common specifications, 258 p.
- [8] EN 62305-1:2011 Protection against lightning. General principles, 74 p.
- [9] Lightning surge response of transmission towers, Chisholm W.A., Chow Y.L., Srivastava K.D. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems// Vol. -PAS-102, No. 9, 1983, pp. 3232–3242.
- [10] Martínez-Velasco Juan A., Castro-Aranda Ferley, EMTP implementation of a Monte Carlo method for lightning performance analysis of transmission lines, Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 16, No. 1, 2008, pp. 169–180.
- [11] Mills Brian, Unrau Dan, Pentelow Laurel and Spring Kelsey Flash Back: A Review of Lightning-related Damage and Disruption in Canada. Draft technical report, September/ Internets.<http://sirc.ca/sites/default/files/content/docs/newsletters/archive/june09/document/Damage.pdf>
- [12] Mota P. C. A., Chaves M. L. R., Camacho J. R. Power line tower lightning surge impedance computation, a comparison of analytical and finite element methods// In: ICREPQ'12 International Conference on Renewable Energies and Power Quality, March 2012./ Internets. – <https://www.researchgate.net/publication/241686359>.
- [13] Piantini Alexandre. Lightning protection of overhead power distribution lines, 29th International Conference on Lightning Protection. – Uppsala: 2008/ Internets. – <http://www.iclp-centre.org/pdf/Invited-Lecture-4.pdf>
- [14] Rakov Vladimir A. Lightning parameters of engineering interest: Application of lightning detection technologies, – Bangkok, Thailand: EGAT, November 7, 2012. – 58 p. presentation.
- [15] Shuai YU , Xiang MI, Qing Yang u. c. Equivalent Multi-Surge Impedance Model of Transmission Line// Przegląd elektrotechniczny, 2012. – pp. 259–263.

- [16] Susana A. B. de Almeida, C. Loureiro, F. P. Maciel Barbosa and Rui Pestana Historical Data Analysis of Lightning and its Relation with the Portuguese Transmission System Outages, 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th to July 2nd, Bucharest, Romania/ Intenets. – <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>
- [17] The blackout history project: Archive / 1977 blackout / Internets: http://blackout.gmu.edu/archive/a_1977.html
- [18] Vanzovičs E., Želvis S. Pārsprieguma aizsardzības un tām izvirzāmās normatīvās prasības // RTU: Rīga 2006, 132 lpp.
- [19] Volpov E., Katz E., Characterization of Local Environmental Data and Lightning caused outages in the IECo Transmission Line Network, IEEE Transactions on Power Delivery/ Internets. – <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>
- [20] Александров Г.Н. Главная стадия разряда молнии: механизм и выходные Характеристики// Журнал технической физики, том 76, вып. 12, 2006. – стр. 101–105.
- [21] Дмитриев М.В., Защита изоляции ВЛ 110-220 кВ от грозových перенапряжений, Журнал «Новости Электротехники», №6(54) 2008. Internets: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/54/01.php>
- [22] Ефимов Б.В., Гумерова Н.И. Моделирование деформации грозových волн в воздушных линиях с учетом совместного влияния конструкции опор, короны на проводах и потерь в земле// Труды Кольского научного центра РАН 4(17). – Апатиты: «Энергетика», 2013. – стр. 13–32.
- [23] Косоруков А.В., Колычев А.В., Гумерова Н.И., Хохлов Г.Г. Расчет грозоупорности воздушных линий электропередачи 110 кВ и выше// III Российская конференция по молниезащите. – Санкт-Петербург, 2012. – стр. 329–338.
- [24] Матвеев М., Кузнецов М., Дутов И. и др. Выбор параметров импульса молнии для защиты микропроцессорной аппаратуры и её цепей, журнал «Новости Электротехники», №4(70) 2011. Internets: <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/70/06.php>.
- [25] Разевиг Д. В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи, – Москва –Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1959. – 216 стр.
- [26] РД.153-34.3-35.125–99. – Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений, 185 стр.
- [27] Юдицкий Д. М. Методика и алгоритмы повышения грозоупорности воздушных линий электропередач и оборудования подстанций. – Казань: КГЭУ, 2014. – 165 стр.