

Zibens izlādes iedarbība uz gaisvadu līniju metālkonstrukcijām

Oļegs Sļiskis,¹ Dmitrijs Soboļevskis², Kārlis Ketners³,¹⁻³ *Riga Technical University*

Kopsavilkums. Šajā rakstā ir sniegts apraksts augstsprieguma gaisvadu līnijas (GVL) zibens izturības datormodelēšanas paņēmienam, izmantojot EMTP datorprogrammas ATP Draw grafisko apakšbloku. Datormodeļa konstruēšanai par pamatu ir izvēlēti U330-2 un P330-2 unificēto 330 kV līniju metāla balstu gabarītmēri un līniju ģeometriskie parametri. Aprēķinu rezultāti rāda, ka gan zibens izlādes vieta GVL, gan līnijas konstruktīvo parametru izvēle ietekmē modelēšanas procesa gaitu un rezultātus, kā arī var redzēt, ka modeļa analogīso uzbūvi var pielietot arī citām režģveida metālkonstrukcijām.

Atslēgas vārdi – gaisvadu līnija, traversa, metālkonstrukcija, zibens izlāde, ATP Draw.

I. IEVADS

Vislielāko zibens izraisīto avāriju skaitu elektropārvades un sadales līnijās iniciē tiešās zibens izlādes ekrāntrosēs un metālisko balstu konstrukcijās, kas savukārt rada momentānu bīstamo pārsprieguma viļņu izplatīšanos kopīgajā elektroapgādes sistēmā (sk. 1. att.). 1. tabulā norādīta GVL zibens izraisīto atslēgumu skaita statistika pēdējo piecu gadu laikā.

I. TABULA

GVL ZIBENS IZRAISĪTIE ATSLĒGUMI

Gads	GVL zibens izraisītie atslēgumi	% no kopīgajiem atslēgumiem
2007	48	19
2008	11	7
2009	26	20
2010	43	21
2011	24	10

Momentāno pārejas procesu modelēšanā elektroapgādes sistēmās izmanto lineārus un nelineārus modeļus. Vairākiem pārejas procesiem piemīt no frekvences atkarīgas īpašības, piemēram, elektriskās koronas nelineāras sprieguma izlādes īpašības, vai izolatoru un ZnO izlādņu atpakaļpārklāšanas procesu īpašības. Zibens izlādes primārās izlādes strāva Baltijas reģiona robežās var sasniegt 35 kA lielu vērtību, bet sekundārās izlādes vērtības atrodas robežās no 10 līdz 15 kA.

Saskaņā ar IEC 62305-1 normatīviem pārsprieguma viļņa formu, ko rada zibens kanāla strāva, empīriskā modeļa aprēķinos iesaka izmantot formulu (1) [1], [2].

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)}{1 + (t/\tau_1)^n} \cdot e^{-t/\tau_2}, \quad (1)$$

kur I_0 – zibens strāvas maksimālā vērtība, η – zibens strāvas vērtībai atbilstošs korekcijas koeficients, bet n – zibens strāvas stāvuma koeficients. Koeficienti τ_1 un τ_2 – frontes pieauguma un norimšanas laika koeficienti. Zibens strāvas pieaugumu var mainīt, izmantojot koeficientus n un τ_1 .

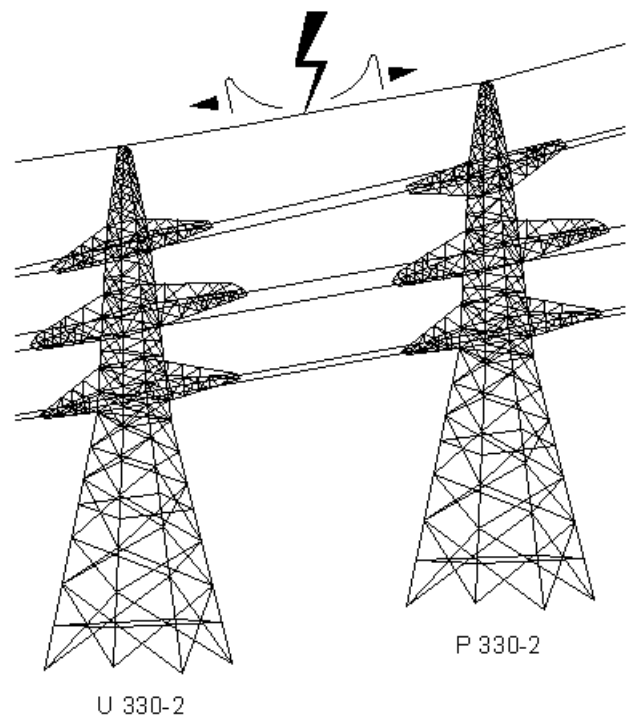
Daļa no zibens izlādēm notiek GVL ekrāntroses laiduma vidējā punktā, bet gadījumā, kad zibens izlāde konstatēta ekrāntrosē tuvu metāliskajam balstam, pieņem, ka zibens izlādei pakļauta GVL balsta konstrukcija. Šajā gadījumā izolācijas spriegums ir vienāds fāžu vada un traversas potenciālu starpībai:

$$u_{izol}(t) = u_f(t) - u_{trav}(t). \quad (2)$$

Traversas potenciāls $u_{trav}(t)$ ir sprieguma kritumu summa uz GVL balsta zemējuma pretestības R_z un uz GVL balsta induktivitātes L_{trav} posmā no traversas līdz zemei [3]:

$$u_{trav}(t) = R_z \cdot i_b(t) + L_{trav} \frac{di_b(t)}{dt}, \quad (3)$$

kur $i_b(t)$ un $di_b(t)/dt$ – GVL balsta strāva un tās atvasinājums.



1. att. Pārsprieguma viļņu izplatīšanās abos virzienos no zibens izlādes vietas.

II. MODELĒŠANAS PROCESS

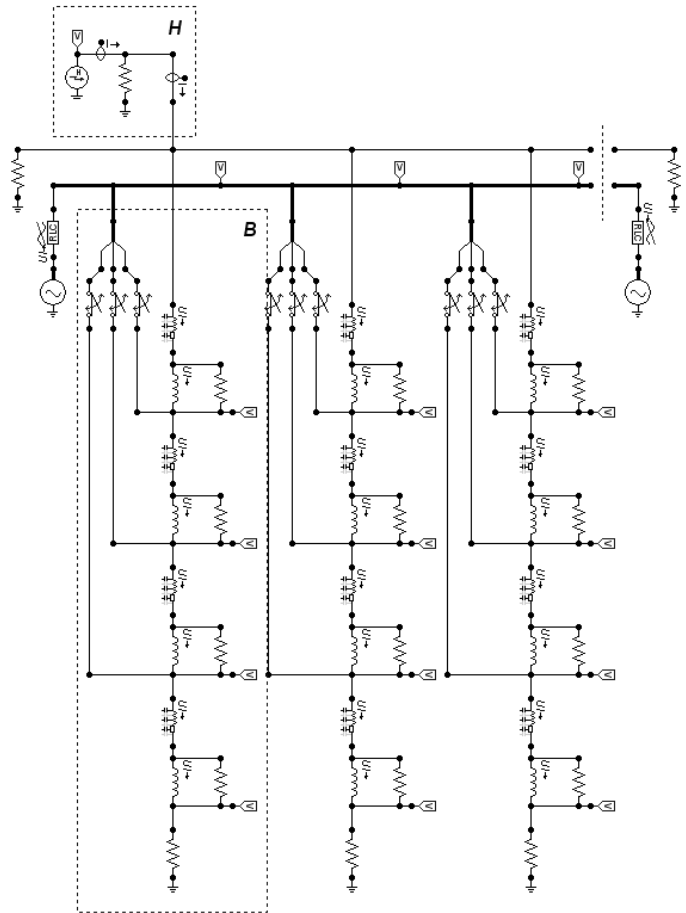
2. tabulā tiek norādīti galvenie U 330-2 un P 330-2 GVL balstu gabarītizmēri [4]. Šo divu tipu GVL balsti atšķiras konstruktīvi, balstu augstuma starpība (ekrāntroses piekares augstuma starpība) $\Delta h_1 = 10$ m, atšķiras arī ekrāntroses un fāzes vadu piekares augstums, kas augšējām fāzēm ir $\Delta h_2 = 12,3$ m, vidējām fāzēm $\Delta h_3 = 11,8$ m un apakšējām fāzēm $\Delta h_4 = 11,6$ m, ar $d_1 \dots d_4$ ir apzīmētas ekrāna troses stiprinājuma vietas un traversu gareniskie izmēri (m).

2. TABULA
GVL ZIBENS IZRAISĪTIE ATSLĒGUMI

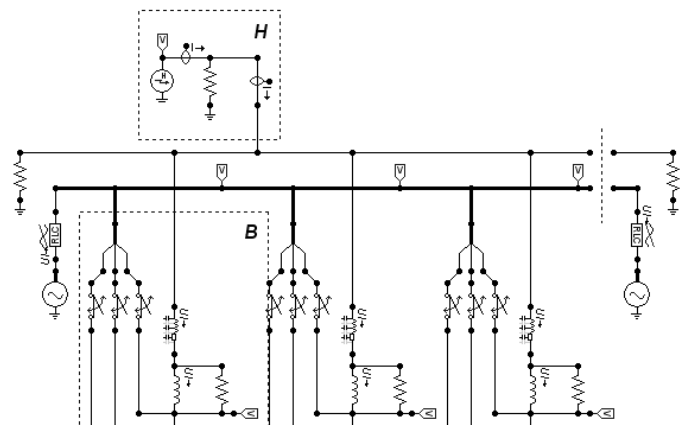
Elements	Dimensija	330kV GVL U 330-2 tipa balsts
Traversas	h_1 [m]	33,5
	h_2 [m]	24,2
	h_3 [m]	17,2
	h_4 [m]	10,7
	d_1 [m]	0
	d_2 [m]	14,2
	d_3 [m]	17,8
Fāzes vadi un ekrāntrose	ekrāntrošu skaits	1
	fāzes vadu izvietojums	vertikāli
		330kV GVL P 330-2 tipa balsts
Traversas	h_1 [m]	43,5
	h_2 [m]	36,5
	h_3 [m]	29,0
	h_4 [m]	22,5
	d_1 [m]	0
	d_2 [m]	9,8
	d_3 [m]	17,6
Fāzes vadi un ekrāntrose	ekrāntrošu skaits	1
	fāzes vadu izvietojums	vertikāli

Redzams, ka modeļa sistēmu veido divu ķēžu 330 kV GVL ar vienu ekrāntrosi aizsargāts posms visa tā garumā, vadu mehāniskajam atbalstam ir izmantoti divu ķēžu starpbalsti un divu ķēžu stūra enkura balsts, attālums starp balstiem ir pieņemts 250 m, līnija atrodas uz līdzena reljefa zemes gabala.

Grafiskajā apakšblokā ATP Draw, modeļa aprēķinu shēmas sastādīšanas stadijā, ārējo zibens strāvas avotu (ko EMTP programmu kompleksa terminoloģijā dēvē par Heidlera avotu, no angļu Heidler source) un attiecīgi zibens izlādes punktu ir iespējams pārvietot visās pētāmajās GVL robežās. ATP Draw aprēķinu shēmā 2. att. un 3. att. ir parādīts kopīgā modeļa fragments, kur zibens strāvas avots ir apzīmēts ar bloku "H", bet GVL balsta modeļa shēma ar ATP Draw aizvietošanas elementiem ir apzīmēta ar bloku "B".



2. att. ATP Draw 330 kV GVL modeļa aizvietošanas shēma ar zibens izlādi GVL balstā.



3. att. ATP Draw 330 kV GVL modeļa aizvietošanas shēmas fragments ar zibens izlādi ekrāntrosē.

Momentā, kad zibens strāvas izlādes impulss sasniedz GVL balstu, pie zibens izlādes ekrāntroses laiduma vidū jeb tiklīdz zibens izlāde notiek tieši uz balsta metālkonstrukcijas, nākas saskarties ar balsta viļņa pretestību Z_b . Zibens strāva pa zemētārvadiem noplūst zemē, bet tajā laikā tūdaļ pat uz balsta virsotnes rodas pārspriegums ar u_v vērtību, ko var aprēķināt saskaņā ar formulu (4) [5]:

$$u_v = i(t) \cdot Z_b . \quad (4)$$

Zibens strāvas kanāla pretestību uz ATP Draw aprēķinu shēmas attēlo zibens strāvas avotam paralēli pieslēgta pretestība. GVL balsta modelis veido shēmu ar izkļiedētiem parametriem, ņemot vērā balsta pretestību, kas ir dažādu konstruktīvo elementu ekvivalents un zemētāja pretestības vērtības. Metālkonstrukcijas ir savienotas ar grunti, ar zemētājvadiem vai ar veselu zemētājvadu sistēmu, ko veido shēma ar koncentrētiem R-L-C elementiem.

Katras (augšējā / vidējā / apakšējā) traversas induktivitāte ir atšķirīga pēc vērtības, ko skaitliski var aprēķināt saskaņā ar formulu (5), kur h_{trav} ir augstums no konkrētās traversas līdz zemei, bet L_b ir balsta induktivitāte, kas atrodas robežās no 0,5 līdz 1,0 $\mu\text{H/m}$ [3], [6], [7]:

$$L_{trav} = h_{trav} \cdot L_b . \quad (5)$$

P 330-2 un U 330-2 GVL balstu induktivitātes līmenis, ņemot vērā zibens izlādes vietu, ir norādīts 3. un 4. tabulā.

3. TABULA

GVL BALSTU INDUKTIVITĀTES LĪMENIS, PIE ZIBENS IZLĀDES EKRĀNTROSE

	P 330-2	U 330-2
balsta augšējā traversa [$\mu\text{H/m}$]	27,4	18,2
balsta vidējā traversa [$\mu\text{H/m}$]	21,8	12,9
balsta apakšējā traversa [$\mu\text{H/m}$]	16,9	8,0

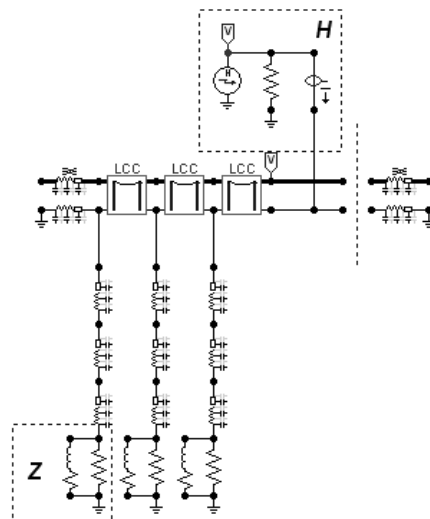
4. TABULA

GVL BALSTU INDUKTIVITĀTES LĪMENIS, PIE ZIBENS IZLĀDES BALSTĀ

	P 330-2	U 330-2
balsta augšēja traversa [$\mu\text{H/m}$]	20,1	13,3
balsta vidēja traversa [$\mu\text{H/m}$]	16,0	9,5
balsta apakšējā traversa [$\mu\text{H/m}$]	12,4	5,9

Pieņemot, ka balsta zemējuma pretestība $R_z = 10 \Omega$ un zibens impulsa strāvas vērtība ir 35 kA, iegūst sprieguma vērtību, kas ir 350 kV, pat ievērojot sprieguma kritumu uz balsta konstrukcijas induktivitāti, izolācijas pārklāšanās risks var saglabāties līdz pat GVL ar 330 kV nominālo spriegumu.

Tādiem aprēķiniem kā GVL balsta zemējuma pretestības ietekme uz pārsprieguma viļņu atstarošanas procesiem, ATP Draw modulis ļauj konstruēt balstu aizvietošanas shēmas bez traversas papildus induktivitātes ievērošanas, kā tas norādīts 4. att., kur blokā "H" ir parādīts zibens strāvas avots, bet ar bloku "Z" ir apzīmēta balsta zemējuma ietaise.

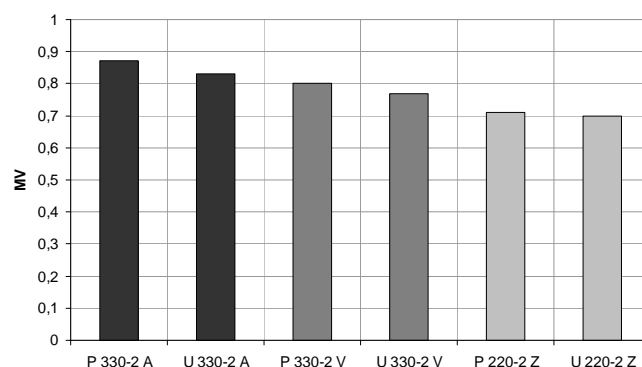


4. att. ATP Draw GVL modeļa vienkāršotās aizvietošanas shēmas fragments ar zibens izlādi ekrāntrosē.

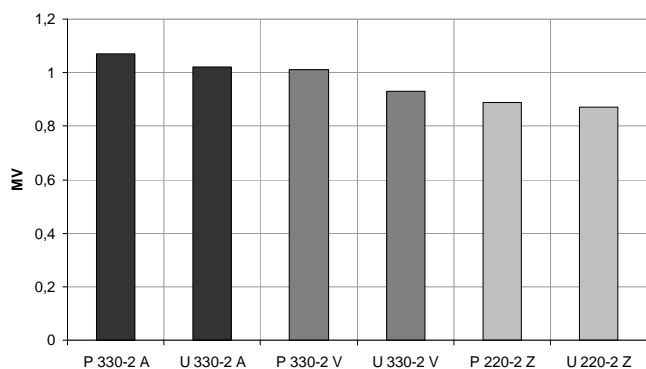
III. MODELĒŠANAS REZULTĀTI

Modelēšanas procesa skaitliskie rezultāti ir attiecināti uz 35 kA zibens strāvu, pie zibens izlādes ekrāntrosē un GVL balstā. 5. un 6. att. diagrammās norādītas pārsprieguma vērtību starpības uz P 330-2 un U 330-2 balstu dažāda augstuma traversām. Uzstādītais pārejas procesa reģistrēšanas laiks ir 3 μs .

Zibens izlāde ekrāntrosē posmā starp diviem P 330-2 divķēžu balstiem rada 0,87 MV amplitūdu augšējā traversā, 0,8 MV vidējā traversā un 0,71 MV apakšējā traversā, posmā starp P 330-2 un U 330-2 divu ķēžu balstiem 0,83 MV amplitūdu augšējā, 0,77 MV vidējā un 0,7 MV apakšējā traversā. Attiecīgi zibens izlāde P 330-2 divu ķēžu balstā rada 1,07 MV amplitūdu augšējā traversā, 1,01 MV vidējā traversā un 0,89 MV apakšējā traversā, bet tiešā zibens izlāde U 330-2 divu ķēžu balstā rada 1,02 MV amplitūdu augšējā, 0,93 MV vidējā un 0,87 MV apakšējā traversā.



5. att. Inducētā sprieguma vērtība uz P 330-2 un U 330-2 GVL balstu traversām (A – augšēja, V – vidēja, Z – apakšējā) pie zibens izlādes ekrāntrosē.



6. att. Inducētā sprieguma vērtība uz P 330-2 un U 330-2 GVL balstu traversām (A – augšēja, V – vidēja, Z – apakšējā) pie zibens izlādes balstā.

5. tabulā ir norādīti aprēķinu rezultāti P 330-2 un U 330-2 GVL balstu traversām.

5. TABULA
APRĒĶINU REZULTĀTI

GVL balsts	I_z	Spriegums uz augšējās/vidējās/apakšējās traversas
		a) pie zibens izlādes ekrāntrosē b) pie zibens izlādes GVL balstā
	[kA]	[kV]
P 330-2	35	a) 870 / 800 / 710 b) 1070 / 1010 / 890
U 330-2	35	a) 830 / 770 / 700 b) 1020 / 930 / 870

IV. SECINĀJUMI

Šajā publikācijā ir parādīta atmosfēras pārsprieguma izplatīšanās mehānisma analīze GVL metālkonstrukcijās, izmantojot EMTP programmas ATP Draw apakšbloku. Modelēšanas pamata paņēmienus, tajā skaitā metālkonstrukciju elementu modeļus, var pielietot arī citu režģveida metālisko objektu, piemēram, metālisko pilonu, portālu vai metāla karkasu zibensaizsardzības analīzei. Katra šī elementa konstruktīvās īpašības tieši ietekmē pārsprieguma līmeni dažādos konstrukcijas punktos.

Redzams, ka zibens izlādes vietas izmaiņas rada atšķirību sprieguma vērtībās dažādos objekta posmos.

Skaitliskie rezultāti parāda, cik lielas ir mērāmo parametru izmaiņas dažādu konstrukciju objektiem: P 330-2 un U 330-2 GVL balstiem, pie zibens izlādēm ekrāntrosē un GVL balstā. Tātad P 330-2 GVL balstiem šī starpība ir 160 kV un 180 kV starp augšējo un apakšējo traversu, attiecīgi pie zibens izlādes ekrāna trosē vai GVL balstā, bet U 330-2 GVL balstiem šīs vērtības ir 130 kV un 150 kV.

LITERĀTŪRAS SARAKSTS

- [1] J. Bajorek, M. Korzeniowski, G. Maslowski, R. Ziemba, Transmission line overvoltages caused by standard lightning surges: XVII-th International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 25-26, 2008, Vilnius, Lithuania.

- [2] O. Sliskis, I. Dvornikovs, K. Ketners, Lightning Performance on Transmission Line Towers: The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies, May 3-4, 2012, Kaunas, Lithuania.
- [3] М. В. Дмитриев. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ, Санкт – Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. [E-book] Available: www.opnzu.ru.
- [4] A. Vanags, E. Enģelis. Elektrisko tīklu projektēšana. Metodiskie norādījumi kursa projektu izstrādei. RTU Izdevniecība, Rīga, 2006, 117 lpp.
- [5] Hsiao Sheng-Jen, Chen Jiann-Fuh, Effect of Coupling Ground Wires to Improve Lightning Induced Over-voltage for 69 kV Transmission Line of Taipower System, 2008.
- [6] C. J. Coelho Teixeira, A. Machado e Moura, Study of the Backflashover Phenomena in Overhead Transmission Lines using the EMTP: 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, 2006 Venezuela.
- [7] E. Y. Pramono, D. Hamdani, R. Zoro, Modeling of Extra High Voltage 500 kV Transmission Lines using Electromagnetic Transient Program. Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics Institut Teknologi Bandung, June 17-19, 2007, Indonesia, pp. 794-797.



Olegs Sliskis was born in Riga in 1985. Received the Dipl. - Ing. bachelor degree in power and electrical engineering and master degree in Power and Electrical Engineering from the Riga Technical University in 2007 and 2009, respectively.

From 2006 until 2008 he was employed as electrical equipment engineer – inspector, but from 2008 as electrical system designer at the private power companies. Since 2011 he is traction equipment constructor in Riga Electrical Machine Building Work. From 2009 RTU doctoral department student.

General scientific activities: Overvoltage in power system research, lightning discharge parameters in High – Voltage Engineering problems. E-mail: olegs.sliskis@rtu.lv



Dmitrijs Sobolevskis was born in Riga, Latvia in March 29, 1985. He received Dipl. – Ing. Bachelor degree and master degree in Power and Electrical Engineering from the Riga Technical University in 2007 and 2009 respectively.

Since 2006 till 2009 he was employed as an electrician at Engineering and construction company “SZMA-RIGA” LTD. Since 2009 he is an engineer-electrician in engineering company JSC “Siltumelektroprojekts”. Since 2009 he is doctoral department student of Riga Technical university.

General scientific activities: Latvian energy system modeling and optimization. E-mail: Dmitrijs.Sobolevskis@rtu.lv



Karlis Ketners was born in Kiev in 1939. Received the Dipl. - Ing. degree in electrical engineering and candidate of science degree from the Leningrad Electrical Engineering Institute in 1962 and 1971, respectively. From 1992 Dr. sc. ing. degree from the Riga Technical University.

From 1970 until 1971 he was employed as assistant, from 1971 until 1973 as master teacher, from 1973 as docent and from 2003 as professor in Riga Technical University (until 1990 RPI).

General scientific activities: electrical machines, mathematical simulation in electromechanic, transients in electrical machines.

Olegs Sliskis, Dmitrijs Sobolevskis, Karlis Ketners. Lightning Discharge Effects on Overhead Lines Metal Constructions

The intention of this paper is to present lightning induced atmospheric overvoltage waves propagation in overhead high voltage transmission lines metal constructive elements. The paper presents a calculation results of selected high voltage lines P 330-2 and U330-2 metal towers structure effect and lightning discharge point effect on transmission line on atmospheric overvoltages propagation, simulated on ATP Draw graphical interface of EMTP program. Computer simulation results shows, that the constructive parameters of high voltage line metal construction elements (transmission tower, gantries, ground wire etc.), together with variation of lightning strike point (on ground wire middle point or directly on metal tower) may detailed simulation process of lightning discharge and affected simulation results. Quantitatively, for operating in Latvia high voltage transmission lines, the difference between tower different metal parts can be up to 160 kV for P 330-2 towers, when lightning strike registered on ground wire middle point and 180 kV, when lightning strike registered on metal tower construction. In case of U 330-2 towers, these values are 130 kV, when lightning strike registered on ground wire middle point and 150 kV, when lightning strike registered on metal tower construction. The critical value of lightning current of 35 kA (on Heidler source), has a significant effect on the simulation results of the degree of power lines protection from lightning overvoltages.

The detailed simulation of transmission line metal construction elements and lightning discharge point variation enables to understand a reaction of power system to lightning overvoltage wave propagation. The simulation model consists of the information about each constructive element of the transmission power line.

Олег Слискис, Дмитрий Соболевский, Карлис Кетнерс. Воздействие разряда молнии на металлоконструкции воздушных линий электропередачи

В статье изложено описание процесса распространения волн перенапряжения, вызванного разрядом молнии, в различных конструктивных элементах воздушной высоковольтной линии электропередачи. В статье предоставлены результаты вычислений для металлических опор типа P 330-2 и U 330-2, а именно, влияние конструктивных параметров опоры и места разряда молнии на распространение волн перенапряжения. Для расчетов использовался графический модуль ATP Draw программы EMTP. Результаты компьютерного моделирования, показывают, что детализированное построение модели, с учетом конструктивных параметров элементов металлоконструкций линии электропередачи (опоры, траверсы, экранирующие тросы и др.), одновременно с изменением места разряда молнии (в середине пролета экранирующего троса или непосредственно на опоре) может существенно увеличить точность результатов моделирования. Численная разница в уровне напряжения на траверсах для линий электропередачи, эксплуатируемых в Латвии, может составить 160 кВ для опор типа P 330-2, при разряде молнии в середину пролета экранирующего троса и 180 кВ при попадании молнии в опору линии электропередачи. Для опор типа U 330-2 эти значения составляют 130 кВ и 150 кВ соответственно. Выбранное максимальное значение тока молнии в 35 кА (для источника Хейдлера) имеет определяющее влияние на результаты исчисления степени защиты линий электропередачи от поражения молнией.

Детальное построение модели металлических элементов линии электропередачи, а также изменение места разряда молнии, позволяет точно проследить за ходом процесса распространения волн атмосферного перенапряжения в электрической сети. Расчетная модель содержит информацию о каждом конструктивном элементе линии электропередачи.