

Proračun elektromagnetnih prelaznih procesa u elektroenergetskim mrežama

Nacrt verzija 1.3

Milan Savić i saradnici

Oktober 2025

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Katedra za Elektroenergetske sisteme

Autor: Milan Savić
profesor Elektrotehničkog fakulteta penziji

Beograd 2025

Predgovor

Ovaj rukopis nastao je na osnovu predavanja na redovnim studijama iz predmeta Tehnika visokog napona 1 (prenaponi i koordinacija izolacije u elektroenergetskim mrežama), manjim delom Tehnika visokog napona 2 (izolacija u tehnici visokog napona, visokonaponski ispitni uređaji za laboratorije za visoki napon i visokonaponska merenja), predmeta Visokonaponska oprema (fizika sklopnih operacija u elektroenergetskim mrežama), predavanja na magistarskim, kasnije master studijama i predavanja na doktorskim studijama iz predmeta Prelazni procesi u elektroenergetskim sistemima.

Rukopis je takođe rezultat sopstvenog razvoja računarskih programa za proračun sklopnih i atmosferskih prenapona od 1974, kao specijalizovanih softvera, u doba kada su ovakvi proračuni bili na početku razvoja. U međuvremenu su razvijani u svetu različiti akademski i komercijalni programi za rešavanje prelaznih režima u različitim oblastima elektrotehnike. Neki od tih programa su korišćeni za rešavanje problema iz prakse koji su opisani u ovom rukopisu. Program "Grom" za proračun atmosferskih prenapona i procenu rizika kvara izolacije u statističkom pristupu koordinacije izolacije i "Komut" za proračun sklopnih prenapona su razvijani na Fakultetu i korišćeni za sopstvene potrebe i edukaciju studenata.

Za rešavanje praktičnih problema i studija koji su opisani u primerima, pored sopstvenih programa razvijenih na Fakultetu, korišćeni su programi "AtpDraw" kao grafički predprocesor programa EMTP-atp (Elektromagnetic Transient Program -Alternative Transient Program) [26], zatim "MatLab" [29] sa alatom "SimPowerSystems" i drugim alatima, kao i program "DigSilent PowerFactory" (Digital Simulation and Network Calculation), [114]. Za rad sa ovim programima se danas studenti Energetskog odseka obučavaju na računarskim vežbama paralelno sa laboratorijskim vežbama.

Rukopis je podeljen na dva dela. Prvi deo čine teorijska objašnjenja modelovanja pojedinih elemenata elektroenergetskih sistema, parametri atmosferskih pražnjenja i njihovo modelovanje, kao i objašnjenja primenjenih računskih metoda za simulaciju prelaznih režima. Drugi deo čine odabrani primeri iz prakse u kojima su rešavani problemi za različite naručioce.

Zahvaljujući primeni računarskih programa, kao i eksperimentalnim istraživanjima,

urađen je veći broj studija, projekata i ekspertiza za domaće i inostrane naručioce. Istraživanja su rađena najviše u oblasti koordinacije izolacije i izboru prenaponske zaštite. Pored toga, rađena su istraživanja u razvojne svrhe, kao i ekspertize u slučajevima havarija.

Namena ovoga rukopisa je da pomogne studentima i inženjerima da sagledaju načine rešavanja konkretnih inženjerskih problema korišćenjem numeričkih simulacija prelaznih režima. Osim toga, rukopis može da pomogne razumevanju nekih principa modelovanja koji se koriste kod savremenih programa za modelovanje prelaznih procesa.

Doprinos u ovoj oblasti dao je veći broj diplomaca, studenata magistarskih studija, kasnije master studija i doktoranata.

Ovom prilikom želim da zahvalim svima koji su pomogli razvoju ove oblasti kroz svoje studentske ili završne radove, kao i kolegama sa kojima sam sarađivao na rešavanju različitih praktičnih problema.

Doprinos praktičnim rezultatima u realizaciji projekata i studija koji su navedeni u primerima, kao i naučnim istraživanjima čiji su rezultati opisani u rukopisu i citirani u referencama, dale su sledeće kolege:

- Dr. Tomislav Rajić, docent na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Jovan Mikulović, redovni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Mladen Banjanin, vanredni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Istočnom Sarajevu.
- Dr. Mileta Žarković, vanredni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Zlatan Stojković redovni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Eksperimentalna istraživanja koja su opisana, izvršena su zahvaljujući velikom znanju i veštini Ratka Kovačića, dipl. ing, spoljašnjeg saradnika.

Posebno zahvaljujem kolegama Tomislavu Rajiću, docentu na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu i Mladenu Banjaninu, vanrednom prof. na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu, na veoma korisnim savetima i primedbama.

Molim čitaoce koji imaju pitanja ili sugestije da se obrate autoru na email adresu: savic_ms@eunet.rs ili savic_ms@etf.rs.

Autor, Beograd 2025

Deo I

Teorijski opis metoda i modela

Poglavlje 1

Proračuni prelaznih procesa

Danas je razvijen veliki broj različitih programa za proračune brzih elektromagnetnih prelaznih procesa u električnim mrežama, a neki su specijalizovani za elektroenergetske mreže.

Svi prelazni procesi u elektroenergetskim mrežama se mogu podeliti na tri grupe:

1. Veoma brzi elektromagnetni prelazni režimi usled atmosferskih pražnjenja,
2. Prelazni režimi nastali radom sklopnih aparata, koji se mogu po frekvencijama podeliti na dve podgrupe:
 - Ultra brzi prelazni režimi u oklopljenim i gasom SF₆ izolovanim postrojenjima (GIS) usled operacija rastavljača, sa frekvencijama i preko 100 MHz,
 - Sklopni prenaponi u mrežama usled rada prekidača, sa frekvencijama od nekoliko stotina do 10 MHz.
3. Spori elektromehanički prelazni režimi, koji neće biti predmet ovog rukopisa.

Po načinu modelovanja svi elementi se mogu podeliti u dve grupe:

- Elementi predstavljeni raspoređenim parametrima,
- Elementi predstavljeni koncentrisanim parametrima.

Pri rešavanju prelaznih procesa usled atmosferskih prenapona se se mogu svi elementi predstaviti sa raspoređenim parametrima, stim što se neki elementi koji su po

svojoj prirodi sa koncentrisanim parametrima ekvivalentiraju kratkim vodovima. Takav je slučaj sa indukivitetima i kapacitetima. Koncentrisani omski otpori se ekvivalentiraju beskonačno dugim vodovima.

Pri proračunu sklopnih prenapona se mogu elementi koji su po svojoj prirodi sa raspoređenim parametrima ekvivalentirati koncentrisanim parametrima. Na primer vodovi se mogu ekvivalentirati sa više Π ili Γ četvorokrajnika, mada se time gubi na tačnosti. Stoga je dobro koristiti modele vodova kao elemente sa raspoređenim parametrima, a ostale elemente sa koncentrisanim parametrima.

Prilikom modelovanja prelaznih procesa u elektroenergetskim mrežama nailazi se na problem nelinearnih elemenata. Postoje dve vrste nelinearnosti, ilustrovane sa tipičnim primerima:

- Amplitudno nelinearni elementi
 1. nelinearni otpornici odvodnika prenapona.
 2. Pojava korone na vodovima.
 3. Nelinearna karakteristika magnećenja transformatora,
- Frekvencijski zavisni nelinearni elementi (kod nadzemnih vodova frekvencijski zavistan povratni put kroz zemlju, kao i površinski efekat kod faznih provodnika nadzemnih vodova i kablova).

Pored nelinearnosti bitna je nestacionarnost elemenata. Pod nestacionarnošću se podrazumeva promena karakteristika nekog elementa u toku vremena. Jedan od elemenata koji je nestacionaran je prekidač, koji u toku vremena menja položaj svojih kontakata.

U ovom rukopisu će biti date osnovne koncepcije proračuna atmosferskih prenapona, sa posebnim naglaskom na statistički prilaz koordinaciji izolacije vodova i postrojenja.

U slučaju proračuna atmosferskih prenapona se po pravilu koriste jednopolne šeme. Kod modelovanja nadzemnih vodova se modeluje najviši fazni provodnik i zaštitno uže iznad njega. Na primer, ako razmatramo slučaj udara groma u zaštitno uže ispred postrojenja, tada povratni preskok nastaje prema najvišem faznom provodniku, a u slučaju horizontalnog rasporeda provodnika preskok nastaje na fazi koja je najbliža metalnoj konstrukciji stuba. U slučaju sredjenaponskih ili niskonaponskih vodova može se pretpostaviti da dolazi do preskoka na mestu udara između faza. Nadalje se prostiranje talasa događa po toj fazi ka objektu koji se analizira. To znači da nema potrebe da se analiziraju procesi na drugim fazama.

Jedini izuzetak je statistička analiza broja preskoka na visokonaponskim vodovima kod koje želimo da napravimo razliku između broja jednopolnih kvarova koje isključuje

sistem brzog automatskom ponovnog uključenja (APU) i višefaznih kvarova koje prekidač isključuje trolejno i čeka naredbu za ponovno uključenje.

Takođe će biti dati osnovni principi proračuna sklopnih prenapona, koji su zajednički za većinu programa koji se danas koriste. U rukopisu su dati generalni principi metoda proračuna, koji olakšavaju razumevanje rada pojedinih programa.

Sadržaj

I	Teorijski opis metoda i modela	2
1	Proračuni prelaznih procesa	3
2	Mreže sa koncentrisanim parametrima	7
3	Mreže sa raspoređenim parametrima	38
4	Trofazna transformacija	123
5	Mešovite mreže	145
6	Parametri atmosferskih pražnjenja	173
7	Modelovanje elemenata	190
8	Rizik kvara usled atmosferskih prenapona	302
9	Indukovani prenaponi	364
10	Šeme za proračun atmosferskih prenapona	381
11	Analiza ugroženosti trofaznih vodova	386

12 Energija oslobođena u odvodniku prenapona	395
II Primeri proračuna prelaznih procesa	402
A Zaštitno uže na vodovima srednjeg napona	403
B Udar u gromobransku instalaciju objekta	409
C Zaštita stubnih transformatorskih stanica	429
D Zaštita transformatora pri HE	441
E Prenaponi pri intermitentnom zemljospoju	449
F Prenaponska zaštita objekata niskog napona	462
G Kvarovi usled upotrebe Is Limitera	483
H Požar usled indukovanih prenapona	496
I Uticaj jonizacije tla	504
J Analiza proboja u postrojenju elektrofiltra	517
K Zaštita instalacija u tunelima	528
L Modelovanje udarnog naponskog generatora	559
M Razvoj delila za udarne napone	571

Bibliografija

- [1] Working group IEEE: Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Tran. on Power App. and Systems, **Vol.PAS-104**, No.4, April 1985, pp. 919-927.
- [2] A.Dolginov: Tehnika visokog napona u elektroenergetici; Energija, Moskva, 1968. (Knjiga na ruskom)
- [3] L.V.Bewelly: Traveling Waves on Transmission Systems; John Wiley & Sons, New York, Chapman & Hall, London 1951.
- [4] R.Anderson, A.Errikson: Lightning Parameters for Engineering Applications, Electra No 69, CIGRE 1980, pp. 65-102.
- [5] G. W. Brown: Joint Frequency distribution of Stroke Current Rates of Rise and Crest Magnitude to Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, no. 1, January/February 1978, pp. 53-58.
- [6] CIGRE Working Group 33.07: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, CIGRE Technical Brochure No. 63, 1991.
- [7] M. S. Savić: Engineering Method for High-Voltage Substations Lightning Performance Estimation, Proc.IEE, Vol.136, Pt.C, No.4, July 1989, pp. 222-229.
- [8] CIGRE Working Group 33.07: Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation, No. 72, Paris 1992.
- [9] Zahira Annane, Abdehafid Bayadi, Kejie Huang: Distortion Phenomena on Transmission Lines Using Corona Modeling ATP/EMTP, Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.25, No. 2, April 2018.
- [10] T.Hara, O.Yamamoto, M.Hayashi, S.Matsumura: Empirical Formulas of Surge Impedance for Transmission Tower, 19 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Interlaken, Switzerland 1990, ref. br.3.7
- [11] Koordinacija izolacije-Deo 1: Definicije, principi i pravila, SRBS IEC 60071-1, izdato 2020.

- [12] Koordinacija izolacije-Deo 2: Uputstvo za primenu, Insulation co-ordination - Part 2: Application guidelines, SRBS IEC 60071-2, izdanje 2019 (na engleskom).
- [13] IEC TR 60071-4: Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks, First edition, June 2004.
- [14] SRPS EN 60060-1:2012: High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, Edition 21.6.2012. (na engleskom).
- [15] SRPS EN IEC 62305-1: Zaštita od atmosferskog pražnjenja -Deo 1: Opšti principi, od 2016, identičan EN 62305-1 od 2011.
- [16] SRPS EN IEC 62305-2: Zaštita od atmosferskog pražnjenja Ů Deo 2: Upravljanje rizikom, od 2017, identičan EN 62305-2 od 2012.
- [17] SRPS EN IEC 62305-3: Zaštita od atmosferskog pražnjenja Ů Deo 3: Fizicko oštećenje objekata i opasnost po život, od 09.11.2018, identičan sa IEC 62305-3.
- [18] Protection against LEMP in Telecommunication Centres, ITU-T Telecommunication Standardization Sector of ITU, Series K: Protection Against Interference, Recommendation K.40 October 1996.
- [19] Dino Lovrić, Slavko Vujević i Tonči Modrić: On the estimation of Heidler function parameters for reproduction of various standardized and recorded lightning current waveshapes, EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, (Euro. Trans. Electr. Power - ETEP) (2011) Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/etep.669.
- [20] F. Heidler, J. Cvetić: A Class of Analytical Functions to Study the Lightning Effects Associated With the Current Front, ETEP Vol. 12, No. 2, March/April 2002.
- [21] Khaled Elrodessly, Ali M. Hussein: Modelling the Lightning Return-Stroke Current Using Heidler Function, 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010, (Cagliari, Italy - September 13th -17th, 2010)
- [22] Mladen S. Banjanin i Milan S. Savić: Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice, INTERNATIONAL TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS, Int. Trans. Electr. Energ. Syst. (2015). Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/etep.2069
- [23] M.S. Savić, A.M. Savić: Substation Lightning Performance Estimation Due to Strikes Into Connected Overhead Lines, IEEE Transaction on Power Delivery, VOL. 30, No. 4., August 2015, pp. 1752-1760.
- [24] H.Dommel: Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks, IEEE Trans. on Power App. and Systems, **Vol. PAS-90**, 1971, p.p2561-2567.

- [25] A.Greenwood: Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore 1991.
- [26] Canadian-American EMTP User Group: ATP Rule Book, distributed by the European EMTP -ATP Users Group Association, 2011.
- [27] Tsu-huei Liu, W. Scott Meyer: Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory book, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, USA, Public domen distributed 1987.
- [28] A.Ametani: Modified travelling-wave techniques to solve electrical transients on lumped and distributed constant circuits; Proc.IEE, **Vol120(4)**,1973, pp.497–503.
- [29] Z. Stojković: Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici - programski alati, Izdavač: Elektrotehnički fakultet, Beograd, Akademska misao, Beograd, 2003
- [30] Laboratorijska ispitivanja izolacije vodova 400 kV, Elaborat br.1689, Energoinvest - IRCE, Institut za Energetiku, Sarajevo 1987 god.
- [31] S. Rusck: Effect of Non-Standard Surge Voltages on Insulation, CIGRE paper 403, Paris, 1958.
- [32] R.O. Caldwell and M. Darveniza: Experimental and Analytical Studies of the Effects of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 92, pp.1420 - 1428, 1973.
- [33] M.Darveniza, A.Vlastos: The Generalized Integration Method for Predicting Impulse Volt-Time Characteristics for non-Standard Wave Shapes - a Theoretical Basis, IEEE Transaction on Electrical Insulation , **Vol.23**, No.3, June 1988.
- [34] A. Ancajima, A. Carrus, E. Cinieri, C. Mazzetti: Optimal selection of disruptive effect models parameters for the reproduction of MV insulators volt-time characteristics under standard and non standard lightning impulses, Power Tech 2007, July 1 - 5, 2007, Lausanne Switzerland, Paper ID: 175,
- [35] G. Gallet, G. Leroy, R. Lacey, I. Kromer: General Expression for Positive Switching Impulse Strength Valid up to Extra Long Air Gaps, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, no. 6, November/December 1975, pp. 1989-1993.
- [36] M. Banjanin, M.S.Savić: Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice, International Transaction on Electrical Energy Systems, ITEE Copyright John Wiley & Sons, Ltd. 2015, DOI: 10.1002/etep.2069
- [37] ASEA: Zinc oxide (ZnO) arresters type XAP, Application guide; Information LB 220-1-1E, Edition 3 1982-01.

- [38] Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, IEC 60099-4:2014.
- [39] K. Berger, R. Anderson, H. Kröninger: Parameters of Lightning Flashes; Electra, No 41, Paris, July 1975, pp. 23–33.
- [40] R. Anderson, A. Eriksson: A Summary of Lightning Parameters for Engineering Applications; CIGRE, referat 33.06,
- [41] Cigre Brochure 069, Working Group 33.01 Cigre: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, 1991.
- [42] Working Group C4.40 - CIGRE: Lightning Parameters for Engineering Applications, CIGRE Publication 549, August 2013,
- [43] Milan Savić, Zlatan Stojković: Tehnika visokog napona - Atmosferski prenaponi, Monografija, II dopunjeno i izmenjeno izdanje, izdavač Elektrotehnicki fakultet u Beogradu i Akademska misao, Beograd, oktobar 2001.
- [44] Milan Savic: Visokonaponski rasklopni aparati, Elektrotehnicki fakultet, Beograd, Akademska misao, Beograd, 2004.
- [45] E. Slameka: Interruption of small inductive currents; Chapter 1,2 Electra No 75, March 1981.
- [46] B. Belin: Uvod u teoriju sklopnih aparata; Školska knjiga, Zagreb 1978.
- [47] Lightning Protection Guide, Published by Dehn + Söhne, 2nd updated edition, Neumarkt, Germany, 2007.
- [48] Jovan Nahman i Vladica Mijailović: Razvodna postrojenja, Stručna knjižara, drugo izdanje 2017.
- [49] ABB Surge arrester datasheet MWK, Edited Switzerland Ltd./PTHA 3210.2006-04E
- [50] High-voltage surge arresters Product guide, Siemens AG Energy Sector. Published by and copyright ©2014.
- [51] Andrew R. Hileman: Insulation Coordination for Power Systems, Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York, 1999.
- [52] H.R. Armstrong, E. Whitehead: Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding; IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, **VOL.PAS-87**, No.1, January 1968, pp. 270–281.
- [53] G.W. Brown, E. Whitehead: Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding: Part II; IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, **VOL.PAS-87**, No.1, January 1968, pp. 617–626.

- [54] M. O. Goni and A. Ametani: Analysis and Estimation of Surge Impedance of Tower, ACES Journal, VOL. 24. No.1 February 2009.
- [55] A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, M. Aurélio O. Schroeder: Revision, Extension, and Validation of Jordan's Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors, IEEE Trans on Electromagnetic Compability VOL. 48. No. 3, August 2006.
- [56] C.Menemenlis, Zhu Tong Chun: Wave propagation on nonuniform lines, IEEE Trans. on Power App. and Systems, **Vol. PAS-101**, No.4, April 1982.
- [57] Stojkovic Z., Savic M.S: A practical method for determining the lightning resistance of high-voltage power lines taking into account the impulse characteristics of the grounding systems, Electrical technology Russia, No.1, 1999, pp. 112-124.
- [58] Stojkovic Z., Savic M.S., Geric Lj.: Lokalni efekat udarnih karakteristika uzemljivaca, Elektroprivreda, Br.3, 2000, str. 20-28.
- [59] Carson J: Wave propagation in overhead wires with ground return, Bell System Technical Journal, **Vol. 5**, October 1926.
- [60] Khuong D. Tran; J. ROBERT: New Digital Simulation for Ground-Mode Switching Surge Response of EHV Transmission Systems, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, **VOL. PAS-88**, No. 5, May 1969.
- [61] L. M. Wedepohl: Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems. Proc. IEE, Vol. 110, No. 12, December 1963..
- [62] L. M. Wedepohl: Wave propagation in nonhomogeneous multiconductor
- [63] M.C. Perc, Robert Hazel: Effect of Earth Resistivity on modal parameters of an EHV horizontal line at PLC frequencies, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-92, Issue: 6, Nov. 1973) .
- [64] Khuong D. Tran, J. ROBERT: Digital Simulation and Analysis of Surges on Polyphase Transmission Lines with Earth Return, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems **Vol: PAS-91**, Issue: 2, March 1972)
- [65] W.Chisholm, Y.Chow, Srivstava: Lightning surge response of transmission towers, IEEE Trans. on Power App. and Systems, **Vol. PAS-102**, No.9, Sept.1983.
- [66] A.J.Eriksson: An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis; IEEE Transaction on Power Delivery, **Vol.PWRD-2**, No.3, July 1987, pp. 871-886.
- [67] IEEE Std 1410-1997: IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, Approved 26 June 1997 IEEE Standards Board.

- [68] R.B.Anderson: Lightning performance criteria for electric power systems; IEE Proceedings, **Vol 132**, Pt.C, Br.6, Novembar 1985.
- [69] D.Razevig: Tehnika visokog napona; Energija, Moskva 1976. (Knjiga na ruskom)
- [70] A.J.Erikson: The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines; IEEE Trans. on Power Delivery, **Vol PWRD-2**, No.3, July 1987, pp. 859–867.
- [71] G.Clark, D.Cook: A Basic Course in Statistics: izdavač Edvard Arnold, London, 1978.
- [72] E. D. Sunde: Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Dover Publications, New York, 1968.
- [73] J. Nahman: Digital Calculation of Earthing Systems in Nonuniform Soil, Archiv fur Elektrotechnik, Vol.62, 1980, pp.19–24.
- [74] J. Nahman, D. Salamon: Earthing System Modelling by Element Aggregation, Proc.IEE, Pt.C, No.1, Vol.133, 1986, pp. 54–58.
- [75] J. Nahman: A Numerical Method for Evaluation of Mutual Earth Resistances of Thin Cylindrical Straight Conductors, (in Serbo-Croatian), Elektrotehnika, Vol.27, 1984, No.1-2, pp. 27–32.
- [76] J. Nahman: D. Salamon, Programski paket za proračun otpora rasprostiranja, raspodele potencijala i napona dodira i koraka na nekom pravcu u okolini uzemljivača u jednoslojnom i dvoslojnom tlu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1987.
- [77] R. Velasquez, D. Mukhedkar: Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103, No.6, June 1984, pp. 1314–1322.
- [78] J. Surutka: Elektromagnetika, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1986.
- [79] A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos: Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.PWRD-2, No.4, Oct. 1987, pp. 1073–1081.
- [80] E. Ja Rjabkova: Uzemljivači u postrojenjima visokog napona, Energija, Moskva, 1978, (na ruskom).
- [81] J.Nahman: Metode analize pouzdanosti elektroenergetskih sistema, Naučna knjiga, Beograd 1992.
- [82] P.Chowduri, E.T.Gross: Voltages Surges Induced on Overhead Line by Lightning Strokes, Proc. IEE, **Vol.114**, No.12, Dec.1967.
- [83] M. Savić: Primena srednjenaponskih vodova sa zaštitom od atmosferskih prenapona pomoću iskrišta sa ograničenjem struje pomoću nelinearnih otpornika, 3. Savetovanje JUKO CIRED, Vrnjačka Banja, Oktobar 2002, R-2.3.

- [84] J. He, J. Hu, S. Chen, R. Zeng: Influence of Series Gap Structures on Lightning Impulse Characteristics of 110 kV Line Metal-Oxide Surge Arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 2. 23, No. 2, pp. 703-709, April 2008.
- [85] S. Gu, W. Chen, J. He, H. Shen, S. Zhang: Development of Surge Arresters With Series Gap Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, pp. 2191-2198, October 2007.
- [86] P. Bubov, D. Udovčić, L. Klingbeil: First Type Tests of Externally Gapped Line Arresters (EGLAs) for 132 kV and for 400 kV OHL according to new IEC 60099-8, CIGRE C4 International Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, May 13-16, 2012, Paper 35.
- [87] Working Group C4.301: Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines, CIGRE report, Paris, December 2010.
- [88] Surge arresters - Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (EGLA) for overhead transmission and distribution lines of a.c. systems above 1 kV (IEC 60099-8:2011)
- [89] High voltage surge arresters Buyer's guide, ABB High Voltage Products Surge Arresters, SE-771 80 Ludvika, Sweden, 2019.
- [90] S. Gu, W. Chen, J. He, H. Shen, S. Zhang: Development of Surge Arresters With Series Gap Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, pp. 2191-2198, October 2007
- [91] Tarasiewicz, F. Rimmer, A. S. Morched: Transmission Line Arrester Energy, Cost and Risk of Failure Analysis for Partially Shielded Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 919-924, July 2000 [12]
- [92] L. C. Zanetta, Jr: Evaluation of Line Surge Arrester Failure Rate for Multipulse Lightning Stresses, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp 796-801, July 2003
- [93] K. Mischishita, M. Ishii, Y. Hongo: Flashover Rate of Distribution Line Due to Indirect Negative Lightning Return Strokes, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, pp 472-479, January 2009.
- [94] T. E. McDermott, T. A. Short, J. G. Anderson: Lightning Protection of Distribution Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp 138-152, January 1994
- [95] R. Shariatinasab, B. Vahidi, S. H. Hosseini, A. Ametani: Probabilistic Evaluation of Optimal Location of Surge Arresters on EHV and UHV Networks Due to Switching and Lightning Surges, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp 1903-1911, October 2009.

- [96] S. Sadovic, R. Joulie, S. Tartier, E. Brocard: Use of Line Surge Arresters for The Improvement of The Lightning Performance of 63 kV and 90 kV Shielded and Unshielded Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 3, July 1997.
- [97] P.Chowduri, E.T.Gross: Voltages Induced on Overhead Multiconductor Line by Lightning Strokes, *Proc. IEE*, **Vol.116**, No.4, April.1969, pp. 561–565.
- [98] M.K.Haldar, A.C.Liew: Alternative Solution for the Chowduri-Gross model of Lightning-induced Voltages on Power Lines, *Proc. IEE*, **Vol.135**, Pt.C, No.4, April.1988, pp. 324–329.
- [99] Milan S. Savic: Medium Voltage Distribution Systems Lightning Performance Estimation, *IEEE trans. on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, July 2003, DOI 10.1109/TPWRD.2003.813860.
- [100] B.Stein, M.T.Correia de Barros: A Line Model for the Calculation of Lightning Induced Voltages, Ninth Power System Computer Conference, cascais, Portugal, September 1987, pp. 402–406.
- [101] A. Porrino, I. Alexandri, N. Clement, G.S. Finlay, T. Henriksen, J. Hoeffelman, M. Ishii i drugi: "Protection of MV and LV network against lightning: Part I basic information," 14 International Conference CIRED 1997, June 2-5, 1997, Conf. Publication No 438, <https://doi.org/10.1049/cp:19970490>.
- [102] Vesna Javor, Leonid Stoimenov, Nikola Džakoviković, Nikola Dinkić, Dario Javor, Hans-Dieter Betz: LINETGIS Analysis of Lightning Flash Density in Serbia Based on Ten Years Data, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 15, No. 2, June 2018, pp. 201-211, DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE1802201J>.
- [103] G. Anderson and D. Klugmann: A European lightning density analysis using 5 years of ATDnet data, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, No 14, pp. 815–829, 2014, doi:10.5194/nhess-14-815-2014.
- [104] Andrew R. Hileman, Pierre R. Leblanc, Gordon W. Brown: Estimating the Switching-Surge Performance of Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power App. and Systems*, Volume: PAS-89 Issue: 7, pp. 1455 - 1469.
- [105] Jeong-Boo Kim, Eung-Bo Shim, and Jeong-Woon Shim: Switching Overvoltage Analysis and Air Clearance Design on the KEPCO 765 kV Double Circuit Transmission System, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 15, NO. 1, JANUARY 2000, pp.381-386.
- [106] D.A.Woodford;L.M. Wedepohl: Transmission line energization with breaker pre-strike: *IEEE WESCANEX 97 Communications, Power and Computing. Conference Proceedings*, 22-23 May 1997.

- [107] J.Martinez E.Camm: Comparison of Statistical Switching Results Using Gaussian, Uniform and Systematic Switching Approaches, Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 884-889.
- [108] Patricia Mestas, Maria Cristina Tavares: Relevant Parameters in a Statistical Analysis - Application to Transmission-Line Energization, IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 29, Issue: 6, December 2014), pp. 2605 - 2613.
- [109] Priključci na niskonaponsku mrežu i električne instalacije u zgradama, EPS Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd,2. izdanje 1998.
- [110] Katalog niskonaponskih kablova
<https://www.bahra-electric/downloads/Low Voltage.pdf>
- [111] ETI B DOO Beograd: Katalog niskonaponskih osigurača
<https://www.etib.rs/pdf-katalozi-sr/zgrade-i-industrija/nv-nh-niskonaponski-osiguraci>
- [112] Miomir Kostić: Teorija i praksa projektovanja električnih instalacija, Izdavač Akademski misao, Beograd.
- [113] Is Limiter, The world fastest limiting and switching device, ABB AG, Calor Emag Medium Voltage Products,www.abb.com/mediumvoltage Calor Emag Medium Voltage Products
- [114] Integrated Power System Analysis Software DIgSILENT PowerFactory 15, User Manual. Online Edition, DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany, December 2013.
- [115] Insulation Coordination Study "QATOFIN LLDPE & LDPE3 PLANT", SELECTY, Italy, Client QATAR VINIL COMPANY, September 2015, Interni izveštaj
- [116] T. Rajić, M. Savić, M. Mrvić, A. Mihajlović, "Uticaj rada Is limitera na pojavu prenapona u industrijskoj mreži", 34 Savetovanje Cigre Crbija 2019, Zlatibor, Srbija.
- [117] T. Rajić, M. Savić, "Modelovanje rasklopnog uređaja Is limiter", 34 Savetovanje Cigre Crbija, Zlatibor, Srbija
- [118] M. Vatrenjak, "Elektrofiltri industrijskih gasova" Automatika (1979) 1-2, pp. 76-78.
- [119] J. Sesartić, J. Božićević, "Sistemski pristup modeliranju procesa elektrostatičkog filtriranja", Automatika 23 (1982) 3-4, pp. 103-105.
- [120] Mladen Banjanin, Milan S Savić: Experimental registration and numerical simulation of the transient overvoltages caused by single phase intermittent arc earth fault in 35 kV network with isolated neutral, IEEE Transaction on Power Delivery, VOL. 37, Issue 3, June 2022.