

УДК 621.316.93

DOI: 10.15587/2312-8372.2017.92244

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОГО ОБМЕЖУВАЧА ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ВПЛИВІ РІЗНИХ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ

Троценко Є. О., Бржезицький В. О., Маслюченко І. М.

1. Вступ

Обмежувач перенапруг нелінійний (або ОПН) є одним з основних захисних апаратів, що використовується в електричних мережах для захисту від комутаційних та грозових перенапруг. Завдяки високонелінійним резисторам на основі оксидно-цинкових матеріалів, застосування ОПН дозволило домогтися більш глибокого обмеження перенапруг у порівнянні з вентильними розрядниками на основі карборунда. Найбільше значення напруги, яка виникає між выводами ОПН при протіканні крізь нього розрядного струму певної форми та амплітуди має назву залишкової напруги і є однією з найважливіших характеристик ОПН. Залишкова напруга залежить як від амплітуди, так і від форми імпульса розрядного струму [1]. При фіксованій амплітуді імпульса розрядного струму залишова напруга ОПН тим більша, чим більш крутий фронт має імпульс струму, що протікає крізь ОПН. Ці та інші властивості ОПН стають важливими при розгляді питань координації ізоляції та розрахунках грозозахисту підстанцій [2]. Для розрахунків в програмах схемотехнічного моделювання існують різні моделі ОПН, як прості, що складаються з одного нелінійного елемента, так і складні, що складаються з декількох лінійних та нелінійних елементів. Модель ОПН повинна відтворювати у віртуальному експерименті поведінку реального апарата і тому потребує дослідження впливу імпульсів струму різної форми та амплітуди.

2. Об'єкт досліджень та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження виступає динамічна модель ОПН, реалізована в демонстраційній версії програми Micro-Cap 11 компанії Spectrum Software та запропонована в [3]. Тривалість перехідних процесів при грозових та комутаційних перенапругах лежить у мікросекундному діапазоні. До сих пір при моделюванні ОПН недостатньо досліджено вплив струмів, характерних, як для грозових, так і комутаційних перенапруг. Дослідити модель ОПН у вказаному вище діапазоні можна шляхом порівняння результатів комп'ютерного моделювання з даними, наведеними в каталогах ОПН. Як правило виробники вказують декілька значень залишкової напруги: при комутаційному імпульсному струмі формою 30/60 мкс або 45/90 мкс, при грозовому імпульсному струмі формою 8/20 мкс, а також при крутому імпульсі формою 1/(2...20) мкс, що можуть бути використані при дослідженні.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є визначення в програмі схемотехнічного моделювання Micro-Cap залишкової напруги при протіканні в моделі ОПН розрядних імпульсів струму різної форми та амплітуди. Це дозволить оцінити похибку моделі ОПН окремо при обмеженні як комутаційних, так і грозових перенапруг.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

1. Вибір моделі ОПН для дослідження в середовищі програми Micro-Cap.
2. Визначення в середовищі програми Micro-Cap залишкової напруги на ОПН при протіканні крізь нього комутаційних розрядних струмів формою 45/90 мкс, грозових розрядних струмів формою 8/20 мкс та крутого імпульсу струму формою 1/20 мкс.
3. Порівняння між собою значень залишкової напруги, отриманих при моделюванні із відповідними значеннями, наведеними в каталогах ОПН.

4. Аналіз літературних даних

Моделі ОПН, яка б відображала динамічний характер його вольт-амперної характеристики не існувало до 1992 року, коли така модель була представлена робочою групою IEEE (від англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers) в роботі [4]. Після того було запропоновано ще три схеми заміщення ОПН [5–7], відповідно в 1999, 2001 та 2004 роках, які фактично є різними варіантами удосконалення моделі ОПН, що запропонована в [4]. Ці чотири схеми використовуються і дотепер, оскільки дозволяють моделювати вольт-амперну характеристику ОПН в усьому діапазоні струмів, що протікають крізь ОПН при обмеженні як грозових, так і комутаційних перенапруг.

Найбільш широкого поширення, у порівнянні з іншими, отримала модель ОПН [5], яка складається з двох нелінійних резисторів, що з'єднуються один з одним за допомогою двох індуктивних та одного резистивного елемента. Перевагою даної моделі є те, що її параметри визначаються тільки на основі даних, наведених в каталогах фірм-виробників ОПН [5] і на відміну від моделі [4] не потребують ітераційного уточнення.

Програми схемотехнічного моделювання постійно удосконалюються, тому при дослідженні перенапруг в тій або іншій програмі знову звертаються до існуючих моделей ОПН та проводять їх дослідження. В роботі [3] вперше показано як реалізувати модель ОПН [5] в середовищі демонстраційної версії програми Micro-Cap. В роботах [4, 8] при дослідженні моделей ОПН використано два різних імпульса струму; в [9] – три; в [6, 10, 11] – чотири; в [5] – п'ять; в [12] – вісім. В даній роботі, як буде показано далі, досліджено вплив десяти різних імпульсів струму.

5. Матеріали та методи досліджень

Для вирішення поставлених завдань було використано методи схемотехнічного та імітаційного моделювання на персональному комп'ютері. Основними матеріалами досліджень є електричні схеми для визначення залишкової напруги на ОПН.

6. Результати досліджень

Дане дослідження є продовженням роботи по моделюванню ОПН в програмі Micro-Cap [3]. Основні схеми дослідження зображені на рис. 1 і відображають два рівнозначні способи моделювання ОПН за допомогою демонстраційної версії програми Micro-Cap [3].

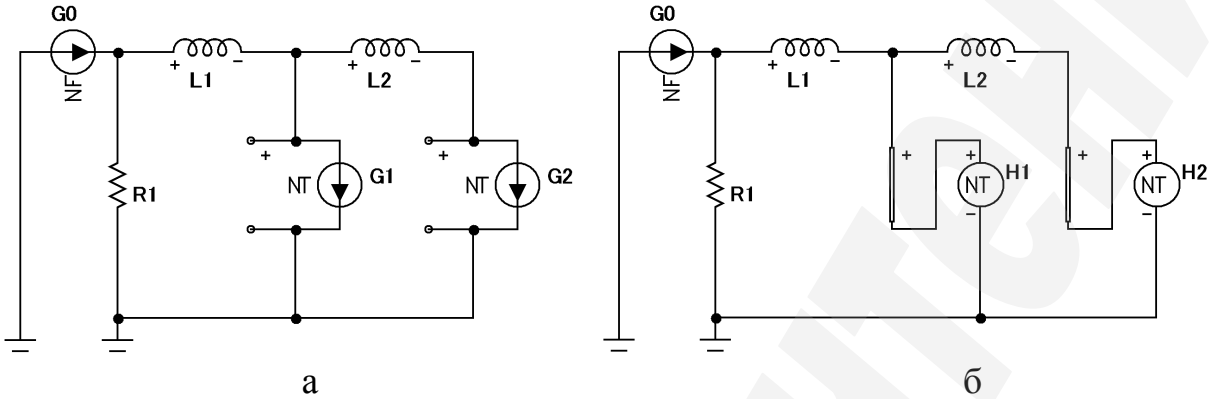


Рис. 1. Моделювання ОПН в Micro-Cap з використанням:

а – джерел струму, що керуються напругою (NTIofV); б – джерел напруги, що керуються струмом (NTVofI)

На рис. 1: R_1 , L_1 та L_2 – лінійні, а G_1 , G_2 , H_1 та H_2 – нелінійні елементи моделі ОПН. Опір R_1 приймають рівним 1000 МОм, а індуктивності L_1 та L_2 згідно з [5] розраховують за формулами (1) та (2).

$$L_1 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/20} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n, \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/20} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n, \quad (2)$$

де V_n – клас напруги ОПН, кВ; $V_{r1/20}$ – залишкова напруга (кВ) при крутому імпульсі струму амплітудою 10 кА та формою 1/20 мкс; $V_{r8/20}$ – залишкова напруга (кВ) при грозовому імпульсі струму амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс. Формули (1) та (2) дають значення індуктивностей в мкГн [5].

Функціональне джерело струму G_0 на рис. 1 моделює імпульс розрядного струму, що протікає крізь ОПН. Для опису імпульсу струму формою 45/90 мкс було використано вираз (3), формою 8/20 мкс – вираз (4), формою 1/20 мкс – відповідно, вираз (5).

$$i(t) = \begin{cases} I_m \cdot \sin(3,491 \cdot 10^4 t), & t \in [0, t_1), \\ I_m \cdot \sin(2,327 \cdot 10^4 t + 0,524), & t \in [t_1, t_2), \\ 0, & t \in [t_2, \infty), \end{cases} \quad (3)$$

де $t_1 = 45 \cdot 10^{-6}$ с, $t_2 = 1,125 \cdot 10^{-4}$ с.

$$i(t) = 2,18 \cdot I_m \cdot e^{-6,5 \cdot 10^4 t} \cdot \sin(1,07 \cdot 10^5 t), \quad (4)$$

$$i(t) = 1,078 \cdot I_m \cdot (e^{-3,8 \cdot 10^4 t} - e^{-2,69 \cdot 10^6 t}), \quad (5)$$

де I_m – амплітуда імпульсу, А.

Для того, щоб в дослідженнях можна було використовувати імпульси негативної полярності, або струми, що приймають як позитивні, так і негативні значення (наприклад, такі як (4)), нелінійні елементи в моделі ОПН на рис. 1 згідно з [3, 5] та у відповідності із синтаксисом Micro-Cap [13] необхідно задати, так, як вказано в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Значення нелінійних елементів у моделі ОПН на рис. 1, а

G_1	G_2
({-1.277*Vr820}, -20e3)	({-1.091*Vr820}, -20e3)
({-1.195*Vr820}, -10e3)	({-1.009*Vr820}, -10e3)
({-1.108*Vr820}, -3e3)	({-0.922*Vr820}, -3e3)
({-1.052*Vr820}, -1e3)	({-0.866*Vr820}, -1e3)
({-0.974*Vr820}, -1e2)	({-0.788*Vr820}, -1e2)
({-0.810*Vr820}, -2e-3)	({-0.623*Vr820}, -2e-3)
(0,0)	(0,0)
({0.810*Vr820}, 2e-3)	({0.623*Vr820}, 2e-3)
({0.974*Vr820}, 1e2)	({0.788*Vr820}, 1e2)
({1.052*Vr820}, 1e3)	({0.866*Vr820}, 1e3)
({1.108*Vr820}, 3e3)	({0.922*Vr820}, 3e3)
({1.195*Vr820}, 10e3)	({1.009*Vr820}, 10e3)
({1.277*Vr820}, 20e3)	({1.091*Vr820}, 20e3)

Таблиця 2

Значення нелінійних елементів у моделі ОПН на рис. 1, б

H_1	H_2
(-20e3, {-1.277*Vr820})	(-20e3, {-1.091*Vr820})
(-10e3, {-1.195*Vr820})	(-10e3, {-1.009*Vr820})
(-3e3, {-1.108*Vr820})	(-3e3, {-0.922*Vr820})
(-1e3, {-1.052*Vr820})	(-1e3, {-0.866*Vr820})
(-1e2, {-0.974*Vr820})	(-1e2, {-0.788*Vr820})
(-2e-3, {-0.810*Vr820})	(-2e-3, {-0.623*Vr820})
(0,0)	(0,0)
(2e-3, {0.810*Vr820})	(2e-3, {0.623*Vr820})
(1e2, {0.974*Vr820})	(1e2, {0.788*Vr820})
(1e3, {1.052*Vr820})	(1e3, {0.866*Vr820})
(3e3, {1.108*Vr820})	(3e3, {0.922*Vr820})
(10e3, {1.195*Vr820})	(10e3, {1.009*Vr820})
(20e3, {1.277*Vr820})	(20e3, {1.091*Vr820})

В табл. 1 і 2 символічна змінна «Vr820» дорівнює залишковій напрузі $V_{r8/20}$ (В) при хвилі струму амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс з каталогу фірми-виробника ОПН, що моделюється. Це значення зручно задавати директивною «.DEFINE» безпосередньо на полі схеми у вільному місці [3, 13].

Результати дослідження типового ОПН з номінальною напругою 108 кВ при впливі різних імпульсів струму в Місго-Сар наведено в табл. 3. Дослідження властивостей ОПН певного виробника або декількох виробників не є метою даної роботи, тому в табл. 3 обраний ОПН представлений під умовним позначенням «ОПН-108». Провівши розрахунок за формулами (1) і (2), отримуємо, що в моделі даного ОПН $L_1 = 0,947$ мкГн, а $L_2 = 2,842$ мкГн.

Таблиця 3

Залишкова напруга на «ОПН-108» при різних імпульсах струму

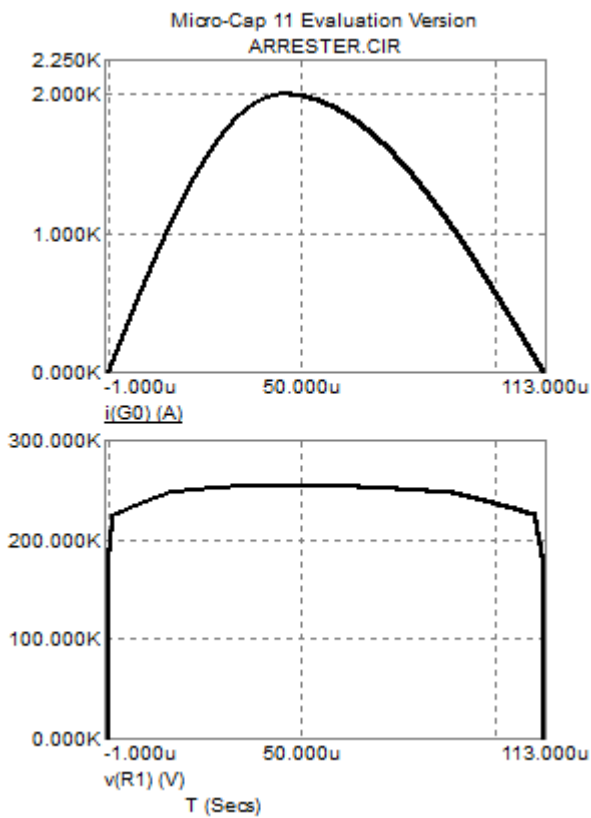
№	Струм (амплітуда, форма)	Максимальна залишкова напруга, кВ		Відносна похибка, %
		каталог	моделювання	
1	0,25 кА, 45/90 мкс	206,0	228,29	+10,82
2	0,5 кА, 45/90 мкс	214,0	234,29	+9,48
3	1,0 кА, 45/90 мкс	223,0	246,02	+10,32
4	2,0 кА, 45/90 мкс	236,0	254,39	+7,79
5	1,5 кА, 8/20 мкс	241,0	250,56	+3,97
6	3,0 кА, 8/20 мкс	254,0	262,45	+3,33
7	5,0 кА, 8/20 мкс	263,0	269,78	+2,58
8	10,0 кА, 8/20 мкс	285,0	286,33	+0,47
9	20,0 кА, 8/20 мкс	316,0	307,69	-2,63
10	10,0 кА, 1/20 мкс	315,0	319,11	+1,30

Відносна похибка моделювання в табл. 3 була обчислена за формулою:

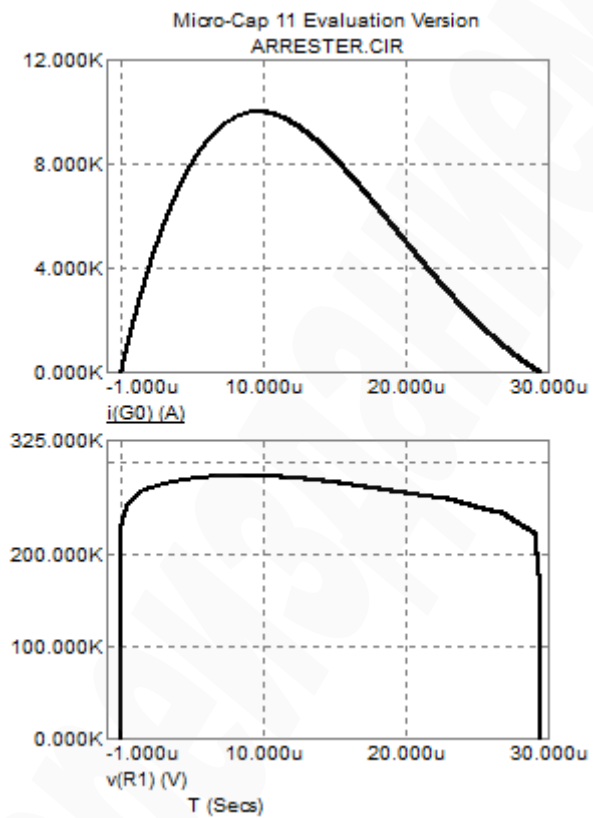
$$\xi = \frac{V'_{rT_1/T_2} - V_{rT_1/T_2}}{V_{rT_1/T_2}} \cdot 100, \% \quad (6)$$

В формулі (6) V'_{rT_1/T_2} – значення залишкової напруги при протіканні крізь ОПН імпульсу струму формою T_1/T_2 , отримані при схемотехнічному моделюванні; V_{rT_1/T_2} – відповідні значення з каталогу ОПН.

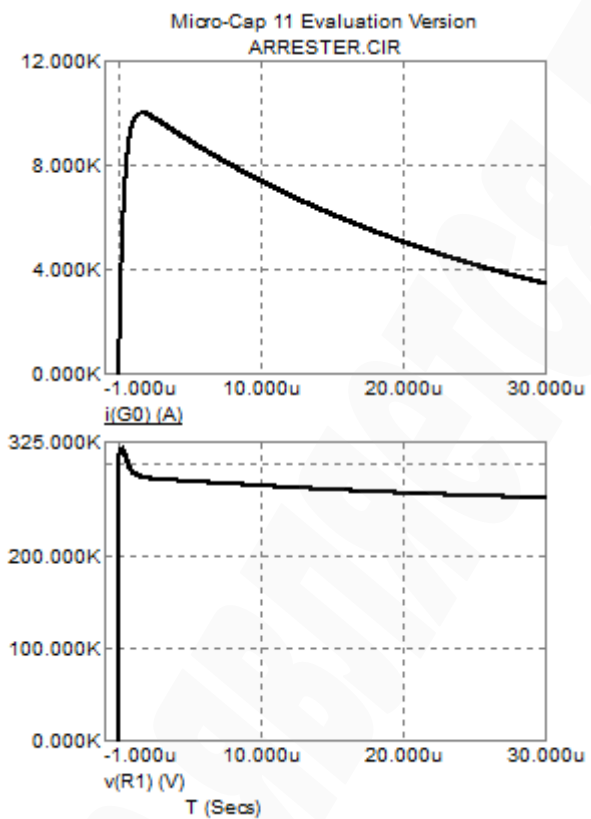
На рис. 2 показано характерні криві струму та напруги, отримані при моделюванні. Криві, що відповідають дослідом № 1–3 з табл. 3 за своєю формою подібні кривим на рис. 2, а і тому тут не наводяться. В свою чергу, криві, що відповідають дослідом № 5–7 та № 9 з табл. 3 за своєю формою подібні кривим на рис. 2, б і тому тут також не наводяться.



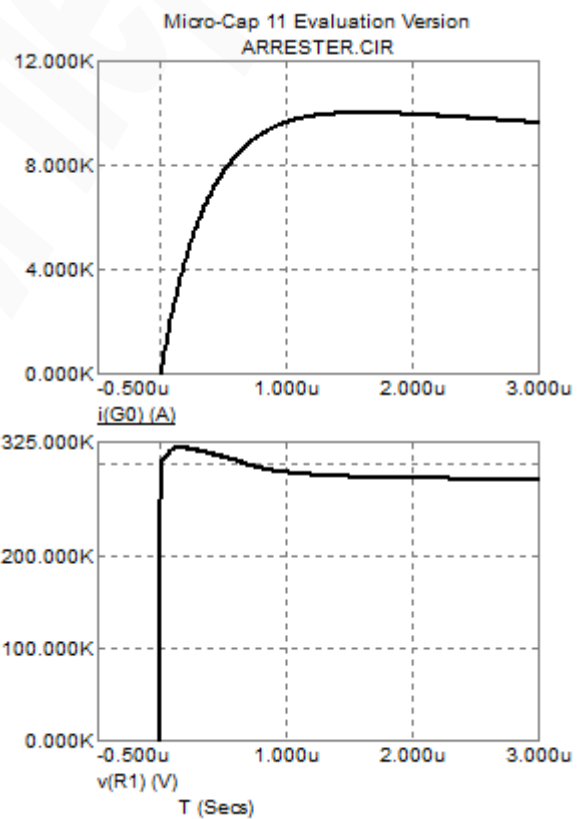
а



б



в



г

Рис. 2. Залишкова напруга (внизу) при протіканні крізь ОПН різних імпульсних струмів (вгорі): а – комутаційного імпульса 2,0 кА, 45/90 мкс; б – грозового імпульса 10,0 кА, 8/20 мкс; в – крутого імпульса 10,0 кА, 1/20 мкс; г – крутого імпульса 10,0 кА, 1/20 мкс (збільшено область фронту імпульсу)

На рис. 2 видно, що максимум залишкової напруги на моделі ОПН завжди досягається на фронті імпульса, як і має бути в реальних застосуваннях ОПН. Сплеск на графіку залишкової напруги (рис. 2, в, рис. 2, г) пояснюється тим, що при крутих фронтах хвиль суттєво зростають індуктивні опори $L_1 \cdot di/dt$ та $L_2 \cdot di/dt$ в моделі ОПН (рис. 1).

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Модель ОПН, реалізована в програмі Micro-Cap дозволяє з високою точністю визначити залишкову напругу на ОПН при протіканні розрядних імпульсів з тривалістю фронту декілька одиниць мікросекунд, які є характерними для грозових перенапруг. Це дасть можливість достовірно розраховувати грозові перенапруги, які призводять до ушкодження ізоляції і тим самим спричиняють значний економічний збиток.

При комутаційних перенапругах похибка моделі ОПН дозволяє її застосування тільки для приблизної оцінки амплітуди та характеру розвитку перехідного процесу в часі. Це слабке місце може призвести до завищення значень небезпечних комутаційних перенапруг, і тим самим до переоцінювання рівня небезпеки, яка виникає в реальних умовах.

Модель ОПН дозволяє розраховувати перехідні процеси при протіканні струмів блискавки, що складаються з декількох послідовних імпульсів, які можуть становити значну небезпеку для ОПН.

Запропоновану модель не слід використовувати в задачах розрахунку квазістаціонарних перенапруг, оскільки ОПН не призначені для обмеження такого виду перенапруг внаслідок недостатньої енергоємності варисторів.

8. Висновки

1. Для дослідження в програмі Micro-Cap обрано одну з найпоширеніших динамічних моделей ОПН, запропоновану в [5]. Причому опорною точкою для визначення характеристик нелінійних елементів моделі є напруга на ОПН при хвилі 8/20 мкс з амплітудою 10 кА.

2. За допомогою програми Micro-Cap визначено залишкову напругу на ОПН при протіканні крізь нього стандартизованих імпульсів струму, що відповідають струмам при грозових та комутаційних перенапругах.

3. Проведено порівняння значень максимальної залишкової напруги, отриманих при моделюванні зі значеннями, вказаними виробником ОПН. Співставлення результатів показало, що, як при грозових імпульсах струму, так і при імпульсі з крутим фронтом, найменша похибка має місце при струмах з амплітудою, рівною опорному значенню 10 кА. Зі зменшенням амплітуди хвилі грозового струму від 10,0 кА до 1,5 кА відносна похибка збільшується, але не перевищує 4%. При комутаційних імпульсах струму найменша відносна похибка має місце при імпульсі з найбільшою амплітудою 2,0 кА, і не перевищує 8%. Зі зниженням амплітуди комутаційного імпульса струму до 0,25 кА відносна похибка збільшується до приблизно 10%. Результати проведеного дослідження можуть бути використані при уточненні показників захищеності підстанцій від різних перенапруг.

Література

1. Brzhezitsky, V. Approximation of volt-ampere characteristics of metal-oxide surge arresters [Text] / V. Brzhezitsky, I. Masluchenko, Ye. Trotsenko, D. Krysenko // Scientific Works of National University of Food Technologies. – 2015. – Vol. 21, № 1. – P. 169–176.
2. Johnnerfelt, B. Coordination of arrester and disconnecter characteristics for optimized application of line arresters [Text] / B. Johnnerfelt, Y. K. Tong, C. Sutton, J. L. de Franco // 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA). – 2013. – P. 113–117. doi:[10.1109/sipda.2013.6729205](https://doi.org/10.1109/sipda.2013.6729205)
3. Trotsenko, Ye. Surge arrester modeling using Micro-Cap [Text] / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2016. – № 6/1 (32). – P. 26–30. doi:[10.15587/2312-8372.2016.86137](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86137)
4. Modeling of metal oxide surge arresters [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, № 1. – P. 302–309. doi:[10.1109/61.108922](https://doi.org/10.1109/61.108922)
5. Pinceti, P. A simplified model for zinc oxide surge arresters [Text] / P. Pinceti, M. Giannetoni // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, № 2 – P. 393–398. doi:[10.1109/61.754079](https://doi.org/10.1109/61.754079)
6. Fernandez, F. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations [Text] / F. Fernandez, R. Diaz // IPST'2001 International conference on power system transients. – 2001. – P. 144.1–144.5.
7. Magro, M. C. Validation of ZnO Surge Arresters Model for Overvoltage Studies [Text] / M. C. Magro, M. Giannetoni, P. Pinceti // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 1692–1695. doi:[10.1109/tpwrd.2004.832354](https://doi.org/10.1109/tpwrd.2004.832354)
8. Meister, A. Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies [Text] / A. Meister, R. A. Shayani, M. A. G. de Oliveira // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2011. – Vol. 3, № 11. – P. 35–45. doi:[10.4314/ijest.v3i11.4s](https://doi.org/10.4314/ijest.v3i11.4s)
9. Vita, V. Comparison of metal-oxide surge arresters circuit models and implementation on high-voltage transmission lines of the Hellenic network [Text] / V. Vita, A. D. Mitropoulou, L. Ekonomou, S. Panetsos, I. A. Stathopoulos // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2010. – Vol. 4, № 7. – P. 846–853. doi:[10.1049/iet-gtd.2009.0424](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0424)
10. Peppas, G. D. Surge arresters models for fast transients [Text] / G. D. Peppas, I. A. Naxakis, C. T. Vitsas, E. C. Pyrgioti // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – 2012. – P. 1–6. doi:[10.1109/iclp.2012.6344285](https://doi.org/10.1109/iclp.2012.6344285)
11. Saengsirwan, T. Lightning arrester modeling using ATP-EMTP [Text] / T. Saengsirwan, W. Thipprasert // 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004. – 2004. – P. 377–380. doi:[10.1109/tencon.2004.1414786](https://doi.org/10.1109/tencon.2004.1414786)
12. Miguel, P. M. Comparison of Surge Arrester Models [Text] / P. M. Miguel // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2014. – Vol. 29, № 1. – P. 21–28. doi:[10.1109/tpwrd.2013.2279835](https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2279835)
13. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual [Electronic resources]. – Sunnyvale, CA: Spectrum Software, 2014. – 1040 p. Available at: \www/URL: <http://www.spectrum-soft.com/down/rm11.pdf>