

в умовах польоту і керувати роботою БПС відповідно до виявлених показників.

Література

1. Дрон-почтальон Drone.UA и Новая Почта в галерее инноваций HUB 4.0 [Электронный ресурс] // Drone.UA. — 15.05.2016. — Режим доступа: \www/URL: http://drone.ua/delivery-drone/
2. Красномоєв, П. «Укрпочта» провела тестову доставку посылки с помощью израильского дрона [Электронный ресурс] / П. Красномоєв // AIN.ua. — 01.06.2016. — Режим доступа: \www/URL: http://ain.ua/2016/06/01/652147/
3. Багоцкий, В. С. Химические источники тока [Текст] / В. С. Багоцкий, А. М. Скудин. — М.: Энергоиздат, 1981. — 360 с.
4. Ефимов, О. Н. Новые материалы для литиевых аккумуляторов [Текст] / О. Н. Ефимов, Д. Г. Белов, Г. П. Белов и др. // Машиностроитель. — 1995. — № 3. — С. 24–28.
5. Потупчик, С. Литий-полимерные (Li-Pol) аккумуляторы [Электронный ресурс] / С. Потупчик // RCDesign. — 06.05.2009. — Режим доступа: \www/URL: http://www.rcdesign.ru/articles/engines/lipol/. — 10.05.2016.
6. Скудин, А. М. Современное состояние и перспективы развития и исследований литиевых аккумуляторов [Текст] / А. М. Скудин, О. Н. Ефимов, О. В. Ярмоленко // Успехи химии. — 2002. — Т. 71, № 4. — С. 378–398.
7. Вайлов, А. М. Автоматизация контроля и обслуживания аккумуляторных батарей [Текст] / А. М. Вайлов, Ф. И. Эйгель. — М.: Связь, 1985. — 156 с.
8. Lin, C.-H. A Li-Ion Battery Charger With Smooth Control Circuit and Built-In Resistance Compensator for Achieving Stable and Fast Charging [Text] / C.-H. Lin, C.-Y. Hsieh, K.-H. Chen // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. — 2010. — Vol. 57, № 2. — P. 506–517. doi:10.1109/tcsi.2009.2023830
9. Chen, J.-J. A High-Efficiency Multimode Li-Ion Battery Charger With Variable Current Source and Controlling Previous-Stage Supply Voltage [Text] / J.-J. Chen, F.-C. Yang, C.-C. Lai, Y.-S. Hwang, R.-G. Lee // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2009. — Vol. 56, № 7. — P. 2469–2478. doi:10.1109/tie.2009.2018435
10. Hwang, Y.-S. New Li-Ion Battery Charger Based on Charge-Pump Techniques [Text] / Y.-S. Hwang, S.-C. Wang, F.-C. Yang, J.-J. Chen, W.-T. Lee // Processing of International Conference on Communications, Circuits and Systems. — 2006. — Vol. 4. — P. 2259–2262. doi:10.1109/icccas.2006.285128
11. Solero, L. Design of Multiple-Input Power Converter for Hybrid Vehicles [Text] / L. Solero, A. Lidozzi, J. A. Pomilio // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2005. — Vol. 20, № 5. — P. 1007–1016. doi:10.1109/tpel.2005.854020

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА РАЗРЯДА АККУМУЛЯТОРА

Обоснована необходимость использования дополнительной системы контроля и управления для аккумуляторов на основе лития, в частности литий-полимерных. Предложена элементная база с возможностью встраивания или отдельного размещения элементов от корпуса литий-полимерных аккумуляторных батарей. Приведены схема построения ограничителя разряда аккумулятора для источника бесперебойного питания и схема индикатора заряда аккумуляторной батареи на операционных усилителях, как одни из вариантов построения схем контроля и управления литий-полимерных аккумуляторных батарей.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, химический источник тока, система контроля, индикатор уровня заряда.

Щербань Анастасія Павлівна, аспірант, кафедра інформаційно-вимірювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна, e-mail: tkach_anastasiya@bk.ru.

Ларін Віталій Юрійович, доктор технічних наук, професор, кафедра інформаційно-вимірювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Щербань Анастасія Павлівна, аспірант, кафедра інформаційно-вимірювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Ларін Віталій Юрійович, доктор технічних наук, професор, кафедра інформаційно-вимірювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Shcherban Anastasia, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: tkach_anastasiya@bk.ru.

Larin Vitaliy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

УДК 621.316.93

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.86137

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

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ОБМЕЖУВАЧА ПЕРЕНАПРУГ В MICRO-CAP

Приведені результати схематичного моделювання нелінійного обмежувача перенапруг за допомогою демонстраційної версії Micro-Cap. Описані два способи моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг. В першому використовується модель функціонального джерела струму, що керується напругою, а в другому використовується модель джерела напруги, що керується струмом. Визначено залишкову напругу на захисному апараті при протіканні крізь нього стандартного струму блискавки. Отримані моделі можуть бути використані в розрахунках грозозахисту електрообладнання.

Ключові слова: схематичне моделювання, нелінійний обмежувач перенапруг, залишкова напруга, грозозахист.

1. Вступ

На даний час нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) стали основними засобами захисту ізоляції обладнання

електричних станцій, підстанцій та мереж напругою 6–750 кВ змінного струму від перенапруг, майже повністю заміняючи собою вентиляльні розрядники. Разом з тим, ефективність використання ОПН в мережах різних

класів напруги суттєво залежить від правильного вибору характеристик апарата [1]. Крім того, розрахувати перехідний процес на ізоляції електрообладнання станції або підстанції, що захищена тими або іншими ОПН при грозових перенапругах без використання програм схмотехнічного моделювання практично неможливо. Тому практично відразу після появи ОПН на ринку почалися пошуки шляхів моделювання динамічних властивостей вольт-амперних характеристик ОПН на персональних комп'ютерах [2]. Без адекватної моделі ОПН, з урахуванням складності перехідних процесів, що відбуваються при близьких або дальніх ударах блискавки, коректно розрахувати рівні грозових перенапруг на ізоляції електрообладнання неможливо.

2. Об'єкт досліджень та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження виступає модель металоксидного нелінійного обмежувача перенапруг, яка відображає динамічні властивості його вольт-амперної характеристики. Для реалізації моделі нелінійного обмежувача перенапруг в конкретній програмі схмотехнічного моделювання необхідно детально висвітлити процес моделювання в обраній програмі. Коректно реалізована модель має відтворювати у віртуальному експерименті поведінку реального апарата. Вольт-амперна характеристика нелінійного обмежувача перенапруг залежить від часу наростання імпульсу струму, що протікає крізь ОПН, до свого максимального значення. На даний час питанню власне практичної реалізації схеми заміщення ОПН в тій або іншій програмі схмотехнічного моделювання, як правило, приділяють значно менше уваги ніж порівнянню результатів комп'ютерного моделювання з даними, наведеними в каталогах ОПН.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розвиток способів моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг в програмах схмотехнічного моделювання для подальшого розрахунку грозових перенапруг на ізоляції електрообладнання.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

1. Визначити способи моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг в середовищі програми Micro-Cap.
2. Порівняти між собою значення залишкової напруги, наведеної в каталогах нелінійних обмежувачів перенапруг зі значеннями, отриманими при моделюванні запропонованими способами.

4. Аналіз літературних даних

В ряді публікацій було запропоновано декілька схем заміщення ОПН [2–5], проведено їх аналіз та порівняння [6–9]. Схеми заміщення ОПН, які отримали за останні роки найбільшого поширення, зображені на рис. 1. Зокрема, на рис. 1 R_1 , R_2 , L_1 , L_2 , C_1 — це лінійні параметри, а X_1 , X_2 — нелінійні параметри схеми заміщення ОПН.

Схема, зображена на рис. 1, а [3] є базовою схемою заміщення ОПН, всі інші поширені на даний час схеми є різними варіантами її удосконалення [4, 5]. Ця схема потребує ітераційної процедури для розрахунку своїх параметрів [3]. Згідно з [4] ця схема може бути спро-

щена і приведена до вигляду, показано на рис. 1, б. Параметри схеми на рис. 1, б визначаються тільки на основі даних, наведених в каталогах фірм-виробників ОПН і не потребують ітераційного уточнення [4]. Зокрема, схема на рис. 1, б потребує знання лише трьох значень з каталогу: клас напруги ОПН; залишкова напруга при хвилі струму амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс; залишкова напруга при хвилі струму 10 кА та крутому імпульсі формою $1/T_2$ мкс, наприклад, 1/5 мкс або 1/20 мкс. Тривалість часу до напівспаду (T_2) крутого імпульсу в каталогах ОПН різних фірм виробників має різні значення. Але ця обставина не настільки важлива, оскільки максимум напруги на ОПН досягається на фронті імпульсу.

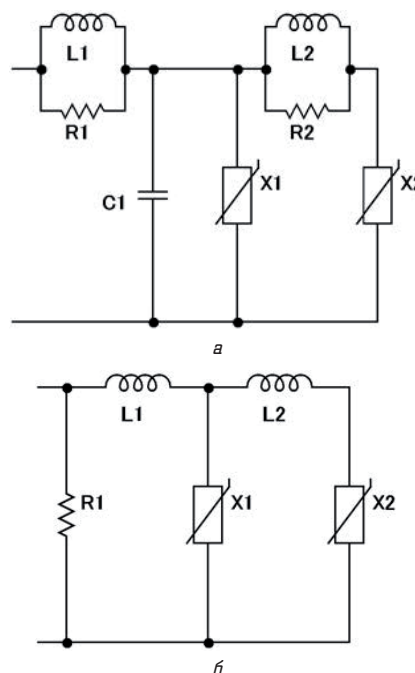


Рис. 1. Схеми заміщення ОПН: а — рекомендована в [3]; б — спрощена, рекомендована в [4]

На даний час відомі роботи, в яких моделювання ОПН виконується переважним чином в таких програмах, як PSCAD [6], SPICE, EMTP [10], ATP-EMTP [11]. Разом з тим широкому загалу практично не відомі роботи з моделювання ОПН в такій програмі схмотехнічного моделювання, як Micro-Cap.

Схема заміщення, зображена на рис. 1, а на даний час застосовується все рідше і тому тут детально розглядатися не буде. Натомість, схема, зображена на рис. 1, б підтвердила свою високу ефективність при моделюванні ОПН класом напруги 20–120 кВ [4, 5, 7]. Тому вона може бути обрана як базова схема для реалізації в програмі Micro-Cap. Великою перевагою зазначеної схеми є те, що вона не прив'язана до будь-яких фізичних характеристик ОПН, а потребує тільки знання електричних характеристик, що наведені в каталогах [4, 5].

5. Матеріали та методи досліджень

Для вирішення поставлених завдань було використано методи схмотехнічного та імітаційного моделювання на персональному комп'ютері. Основними матеріалами досліджень є електричні схеми заміщення ОПН.

6. Результати досліджень

Індуктивності L_1 та L_2 в схемі на рис. 1, б мають бути розраховані за формулами [4]:

$$L_1 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/T_2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n, \tag{1}$$

$$L_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/T_2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n, \tag{2}$$

де V_n — клас напруги ОПН, кВ; V_{r1/T_2} — залишкова напруга (кВ) при хвилі струму 10 кА та крутому імпульсі формою $1/T_2$, мкс; $V_{r8/20}$ — залишкова напруга (кВ) при хвилі струму амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс. Формули (1) та (2) дають значення індуктивностей в мкГн [4]. Опір R_1 в схемі на рис. 1, б згідно з [4] приймають рівним 1 МОм.

Для моделювання нелінійних параметрів схеми заміщення ОПН X_1 та X_2 в демонстраційній версії Micro-Cap можна використати модель джерела струму, що керується напругою (рис. 2, а) або модель джерела напруги, що керується струмом (рис. 2, б).

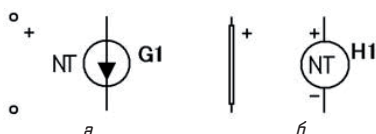


Рис. 2. Функціональні джерела, що задаються таблицею своїх значень:
а — G_1 — джерело струму, що керується напругою (NTIofV);
б — H_1 — джерело напруги, що керується струмом (NTVofI)

Безпосередньо при моделюванні джерела необхідно з'єднати так, як це показано на рис. 3. Надалі будемо співставляти ці схеми дослідження. Саме дослідження полягало у визначенні на моделі залишкової напруги на ОПН при протіканні крізь нього грозового імпульсу амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс та порівнянні отриманого значення із вказаним у каталозі ОПН.

В обох схемах на рис. 2 G_0 — це функціональне джерело струму, що моделює стандартний струм блискавки. В дослідженні було використано дві форми опису імпульсу амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс: хвиля струму, що характеризується не нульовим значенням похідної по часу в початковий момент часу (3) й така, що навпаки характеризується нульовим значенням похідної по часу в початковий момент часу (4).

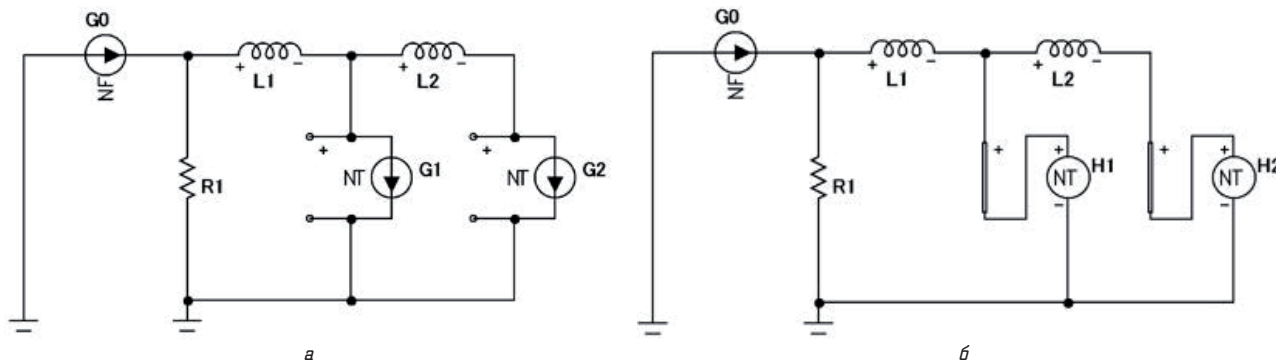


Рис. 3. Моделювання ОПН в Micro-Cap: а — використовуються джерела струму, що керуються напругою (NTIofV); б — використовуються джерела напруги, що керується струмом (NTVofI)

$$i(t) = 4 \cdot 10000 \cdot (e^{-0,866 \cdot 10^5 t} - e^{-1,732 \cdot 10^5 t}), \tag{3}$$

$$i(t) = 10000 \cdot 0,01243 \cdot 10^{18} \cdot t^3 \cdot e^{-\frac{t}{3,911 \cdot 10^{-6}}}. \tag{4}$$

Згідно з синтаксисом Micro-Cap [12] струм (3) описується виразом:

$$\ll 4 * 10000 * (\exp(-0.866e5 * t) - \exp(-1.732e5 * t)) \gg,$$

а струм (4), відповідно, виразом:

$$\ll 10e3 * 0.01243e18 * t^3 * \exp(-t/3.911e-6) \gg.$$

Значення нелінійних параметрів схеми заміщення ОПН для рис. 1, б згідно з [4] та у відповідності із синтаксисом Micro-Cap [12] необхідно задати, так, як показано в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Значення нелінійних параметрів схеми заміщення ОПН на рис. 3, а

G_1	G_2
(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 параметрів схеми заміщення ОПН на рис. 3, б

H_1	H_2
(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, 2 «Vr820» — символічна змінна, що відповідає $V_{r8/20}$ — залишковій напрузі при хвилі струму амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс з каталогу ОПН (необхідно підставляти у вольтах). Значення змінної можна задати директивою .DEFINE. Наприклад, «.DEFINE Vr820 255e3» відповідає значенню $V_{r8/20} = 255$ кВ.

Порівняння між собою значень залишкової напруги, наведеної в каталогах ОПН зі значеннями, отриманими при моделюванні ОПН запропонованими способами можна бачити в табл. 3. Зокрема порівнювались між собою: стовпці 4 і 5; стовпці 4 і 6; стовпці 5 і 6. Необхідно зазначити, що моделювання за обома схемами на рис. 3 дає практично однакові результати. Порівняння між собою характеристик ОПН різних фірм-виробників не є метою даної роботи. Тому в табл. 3 зразки ОПН представлені під умовними позначеннями, без зазначення виробника.

Таблиця 3

Результати моделювання ОПН

ОПН	Номінальна напруга ОПН, кВ (каталог)	Залишкова напруга (кВ) на ОПН при струмі:			
		10 кА, 1/20 мкс (каталог)	10 кА, 8/20 мкс (каталог)	струм (3) (моделювання)	струм (4) (моделювання)
Тип 1	12,0	45,2	40,9	41,08	41,08
Тип 2	18,0	60,4	54,6	54,85	54,86
Тип 3	30,0	92,5	83,6	83,99	84,02
Тип 4	36,0	114,0	103,0	103,48	103,51
Тип 5	60,0	176,0	159,0	159,77	159,82
Тип 6	96,0	282,0	255,0	256,22	256,30
Тип 7	120,0	343,0	310,0	311,51	311,62
Тип 8	138,0	403,0	365,0	366,73	366,85
Тип 9	180,0	480,0	446,0	447,93	447,99
Тип 10	258,0	709,0	650,0	652,95	653,13

Стовпці 2–4 табл. 3 використовуються для розрахунку індуктивностей за формулами (5) і (6). В свою чергу формули (5) і (6), отримані, відповідно, з формул (1) і (2).

$$L_1 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/20} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n, \quad (5)$$

$$L_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/20} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n. \quad (6)$$

Результати моделювання показують, що різниця між значеннями залишкової напруги, наведеної в каталогах ОПН та значеннями, отриманими при моделюванні, становить приблизно 0,5 % (згідно з табл. 3, стовпці 4, 5 і 6). Також видно, що незалежно від того має хвиля струму ненульову похідну по часу в початковий момент часу або ні, на максимальне значення залишкової напруги на ОПН це не впливає. Таке дослідження необхідно було провести, оскільки реальні осцилограми розряду блискавки характеризуються нульовим значенням похідної по часу в початковий момент часу.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Модель металоксидного нелінійного обмежувача перенапруг, яка відображає динамічні властивості його вольт-амперної характеристики, з високою точністю може бути реалізована навіть в демонстраційній версії Micro-Cap, яка знаходиться у вільному доступі.

Без доопрацювання запропонована модель в представленому вигляді не підходить для імітації роботи

нелінійного обмежувача перенапруг із зовнішнім іскровим проміжком.

Запропонована модель дозволить розрахувати енергію перенапруг, яка розсіюється у вигляді тепла в нелінійному обмежувачі перенапруг та в колі його заземлення при виникненні різних перенапруг.

Завжди існують ризики хибного використання моделей або використання не за призначенням. Тому запропоновану модель не слід використовувати для дослідження квазістаціонарних перенапруг.

8. Висновки

1. Визначено, що в середовищі програми Micro-Cap моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг можна виконати двома способами. При першому способу для моделювання нелінійних елементів схеми заміщення нелінійного обмежувача перенапруг використовується модель джерела струму, що керується напругою (NTIofV), а при другому способу – модель джерела напруги, що керується струмом (NTVofI).

2. Проведено порівняння значень залишкової напруги, отриманих на моделях нелінійних обмежувачів перенапруг зі значеннями залишкової напруги, вказаними у каталогах при протіканні крізь нелінійний обмежувач перенапруг стандартного грозового імпульсу амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс. В результаті встановлено, що різниця між значеннями залишкової напруги, наведеної в каталогах нелінійних обмежувачів перенапруг, та значеннями, отриманими на представлених в роботі моделях, становить приблизно 0,5 %.

Література

- Бржезицький, В. О. Апроксимація вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних [Текст] / В. О. Бржезицький, І. М. Маслюченко, Є. О. Троценко, Д. С. Крищенко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 169–176.
- Allen, G. Y. R. Modeling of Current-Limiting Surge Arresters [Text] / G. Y. R. Allen, J. Andersen, D. Bacvarov, C. Ballentine, F. Berg, R. Black, A. Fakheri, F. Fisher, D. Hedman, R. Jones, J. Koepfinger, D. Melvold, W. Niebuhr, K. Stump, E. Taylor, E. Yasuda // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. PAS-100, № 8. – P. 4033–4040. doi:10.1109/tpas.1981.316998
- Modeling of metal oxide surge arresters [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, № 1. – P. 302–309. doi:10.1109/61.108922
- 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
- 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/tpwr.2004.832354
- 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. Panetos, I. A. Stathopoulos // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2010. – Vol. 4, № 7. – P. 846–853. doi:10.1049/iet-gtd.2009.0424
- Borisov, E. A. Mathematical models of metal-oxide surge arresters and estimation of their effect on calculated value of limited overvoltages [Text] / E. A. Borisov, A. A. Beznosov, K. P. Kadamskaya // Proceedings of 6th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS-2002). – 2002. – P. 434–438. doi:10.1109/korus.2002.1028058

8. Kim, I. Study of ZnO arrester model for steep front wave [Text] / I. Kim, T. Funabashi, H. Sasaki, T. Hagiwara, M. Kobayashi // IEEE Transactions on Power Delivery. — 1996. — Vol. 11, № 2. — P. 834–841. doi:10.1109/61.489341
9. 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
10. Montanes Bellosta, L. C. Simulation of surges on power lines using SPICE and EMTP: a comparative study [Text] / L. C. Montanes Bellosta, M. A. Garcia Garcia, A. Llombart Estopinan, M. Sanz Badia, M. Garcia-Gracia // MELECON '98. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference. Proceedings. — 1998. — P. 202–206. doi:10.1109/melcon.1998.692371
11. Saengsuwan, T. Lightning arrester modeling using ATP-EMTP [Text] / T. Saengsuwan, W. Thipprasert // 2004 IEEE Region 10 Conference (TENCON 2004). — 2004. — P. 377–380. doi:10.1109/tencon.2004.1414786
12. Амелина, М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 [Текст] / М. А. Амелина, С. А. Амелин. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 464 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В MICRO-CAP

Приведены результаты схемотехнического моделирования нелинейного ограничителя перенапряжений с помощью демонстрационной версии Micro-Cap. Описаны два способа моделирования нелинейных ограничителей перенапряжений. В первом используется модель функционального источника тока, управляемого напряжением, а во втором используется модель источника напряжения, управляемого током. Определено остающееся напряжение на защитном аппарате при протекании через него стандартного тока молнии. Полученные модели могут быть использованы в расчетах молниезащиты электрооборудования.

Ключевые слова: схемотехническое моделирование, нелинейный ограничитель перенапряжений, остающееся напряжение, молниезащита.

Троценко Євгеній Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки та електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Бржезицький Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор, кафедра техніки та електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна, e-mail: v.brzhezitsky@kpi.ua.

Маслюченко Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки та електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Троценко Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Бржезицкий Владимир Александрович, доктор технических наук, професор, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Маслюченко Игорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Trotsenko Yevgeniy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Brzhezitsky Volodymyr, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: v.brzhezitsky@kpi.ua.

Masluchenko Igor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine