УДК 621.316.933

APPROXIMATION OF VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS

V. Brzhezitsky, I. Masluchenko, Ye. Trotsenko, D. Krysenko
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

Key words:
Metal-oxide surge arrester
Switching overvoltages
Lightning overvoltages
Volt-ampere characteristic
Approximation

Article history:
Received 27.09.2014
Received in revised form 30.10.2014
Accepted 14.11.2014

Corresponding author:
V. Brzhezitsky
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

In this article the questions of approximation of volt-ampere characteristics of metal-oxide surge arresters in operating conditions are observed. One common expression is offered for analytical presentation of volt-ampere characteristics of metal-oxide surge arresters. For a nonlinear regressive analysis was used passport data of metal-oxide surge arresters, intended for installation in the 110—750 kV electric networks of Ukraine. The proposed analytical expression gives possibility to unify further calculation of protective levels of metal-oxide surge arresters under the presence of switching overvoltages and lightning overvoltages.

АПРОКСИМАЦІЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНИХ

В.О. Бржезицький, І.М. Маслюченко, Є.О. Троценко, Д.С. Крисенко
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

У статті розглянуто питання апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних у робочих режимах. Для аналітичного представлення вольт-амперних характеристик обмежувачів перенапруг нелінійних запропоновано один загальний вираз. Для нелінійного регресійного аналізу використано паспортні дані обмежувачів перенапруг нелінійних, призначених для встановлення в електричних мережах України класів напруги 110—750 кВ. Отриманий аналітичний вираз надає можливість уніфікації розрахунків захисних рівнів обмежувачів перенапруг нелінійних при дії комутаційних і грозових перенапруг.

Ключові слова: *обмежувач перенапруг нелінійний, комутаційні перенапруги, грозові перенапруги, вольт-амперна характеристика, апроксимація.*

Вступ. Розрахунок перенапруг і перехідних процесів в електричних системах та мережах потребує детального опису елементів, які входять до їх

складу. До таких елементів відносяться і обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН), робота яких базується на специфічному виді вольт-амперної характеристики. Важливим параметром вольт-амперної характеристики ОПН є коефіцієнт нелінійності матеріалу їх варисторів, значення якого змінюється залежно від струму, що протікає через варистор. На даний час існують лише спрощені моделі вольт-амперної характеристики ОПН, в яких замість загальної моделі робочої області (комутаційних і грозових перенапруг) представлені дві окремі області (окремо область комутаційних та область грозових перенапруг) з різними коефіцієнтами нелінійності. Такий підхід не дозволяє проводити розрахунки та дослідження перенапруг у всьому діапазоні імпульсних струмів ОПН.

Актуальність дослідження: завдяки проведеному дослідженню досягнуто принципово нового результату — обмеження перенапруг в електричних мережах на основі багатоваріантних оптимізаційних розрахунків рівнів перенапруг для конкретних ділянок реальних електричних мереж.

Метою роботи є знаходження єдиної аналітичної апроксимації вольт-амперних характеристик ОПН для області комутаційних і грозових перенапруг.

Методи дослідження. У загальновідомому представленні вольт-амперна характеристика ОПН визначається виразом:

$$U(I) = A \cdot I^{\alpha}, \qquad (1)$$

де α — коефіцієнт нелінійності матеріалу варисторів; A — стала, яка залежить від матеріалу та розмірів зразка варистора.

Нагадаємо, що в типовій вольт-амперній характеристиці варистора ОПН для всього діапазону значень струму в нормальних робочих режимах і в режимах обмеження перенапруг різного типу виділяють три ділянки, які відповідають характерним областям значень цієї характеристики [1]. Перша ділянка (в області струмів $I < 10^{-6}$ А) визначає роботу ОПН при тривалих робочих напругах промислової частоти та характеризується відносно великим коєфіцієнтом нелінійності ($\alpha \geq 0{,}1$), суттєвою залежністю вольт-амперної характеристики від температури й фактично ємнісним струмом, що протікає через варистори. Друга та третя ділянки визначають режим роботи ОПН при комутаційних (а також квазістаціонарних перенапругах) і грозових перенапругах. Для цих робочих ділянок (з діапазоном струмів $I = 10^{-4}$—10^{4} А) характерні значно менші значення коефіцієнта нелінійності ($\alpha = 0{,}015$—$0{,}04$), незначна залежність вольт-амперної характеристики від температури, яка фактично визначається температурою оточуючого середовища й активним струмом, що протікає через варистори.

У зв'язку з цим коефіцієнт нелінійності α можна охарактеризувати залежністю від струму, що протікає через варистор. Наприклад, коефіцієнт нелінійності α в діапазоні малих робочих струмів знаходиться в діапазоні $\alpha = 0{,}02$—$0{,}03$, а в діапазоні великих робочих струмів 3 в діапазоні $\alpha = 0{,}03$—$0{,}1$. Усереднені значення α в залежності від струму I наведені в табл. 1.

Таблиця 1. **Усереднені значення коефіцієнта нелінійності α металоокисних варисторів,** згідно з [1]

I, А	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100	500	1500
α	0,02				0,03	0,04	0,06		0,1

Для подальшого розвитку теорії перехідних процесів і досліджень перенапруг існує необхідність у такому аналітичному представленні вольт-амперної характеристики ОПН, який був би загальним для двох останніх із зазначених вище ділянок — області комутаційних і грозових перенапруг.

Розглянемо певну вибірку ОПН зарубіжного виробництва з максимальною напругою обладнання 123, 245, 362, 550 та 800 кВ, призначених для встановлення в електричних мережах України класів напруги, відповідно, 110, 220, 330, 500 та 750 кВ [2, 3]. Залежність максимальної залишкової напруги *U* від максимального значення струму *I* для цих ОПН наведена в табл. 2—6. Зазначимо, що перші три рядки табл. 2—6 відповідають комутаційним імпульсам струму форми 30/60 мкс, а останні три — грозовим імпульсам струму форми 8/20 мкс. Також зазначимо, що в табл. 2—6 авторами використано таке умовне позначення ОПН: ОПН-*XXX*-*Y*, де *XXX* — максимальна робоча напруга обладнання, кВ; *Y* — порядковий номер ОПН, що розглядається.

Таблиця 2. **Вхідні паспортні дані для апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 123 кВ**

I, А	*U*, кВ				
	ОПН-123-1	ОПН-123-2	ОПН-123-3	ОПН-123-4	ОПН-123-5
500	177	184	208	196	220
1000	181	189	216	201	229
2000	190	198	227	211	240
5000	208	216	251	230	266
10000	221	230	270	245	286
20000	245	255	302	272	320

Таблиця 3. **Вхідні паспортні дані для апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 245 кВ**

I, А	*U*, кВ				
	ОПН-245-1	ОПН-245-2	ОПН-245-3	ОПН-245-4	ОПН-245-5
500	392	354	369	365	404
1000	407	362	378	374	420
2000	428	380	396	392	441
5000	473	415	433	424	488
10000	509	442	461	451	525
20000	570	491	512	496	588

Таблиця 4. **Вхідні паспортні дані для апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 362 кВ**

I, А	*U*, кВ				
	ОПН-362-1	ОПН-362-2	ОПН-362-3	ОПН-362-4	ОПН-362-5
1	2	3	4	5	6
500	530	526	553	548	662
1000	543	539	567	562	679

Продовження табл. 4

1	2	3	4	5	6
2000	569	565	594	589	712
5000	622	610	650	636	778
10000	662	649	691	677	828
20000	735	714	767	745	919

Таблиця 5. **Вхідні паспортні дані для апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 550 кВ**

I, А	*U*, кВ				
	ОПН-550-1	ОПН-550-2	ОПН-550-3	ОПН-550-4	ОПН-550-5
500	747	742	753	748	792
1000	774	759	780	765	821
2000	802	786	808	792	850
5000	865	839	872	846	918
10000	911	883	918	890	966
20000	993	954	1001	961	1053

Таблиця 6. **Вхідні паспортні дані для апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 800 кВ**

I, А	*U*, кВ			
	ОПН-800-1	ОПН-800-2	ОПН-800-3	ОПН-800-4
500	1068	1101	1118	1147
1000	1093	1127	1145	1174
2000	1131	1167	1185	1215
5000	1207	1245	1264	1297
10000	1271	1311	1331	1365
20000	1373	1416	1437	1474

Аналіз найбільш поширених апроксимуючих функцій зв'язку [4] показав, що жодна з них не дає високої точності (максимальна відносна похибка може досягати 5 % в діапазоні струмів I = 500—20000 А. Подальший аналіз показав, що зв'язок між I (А) та U (кВ), як для грозових імпульсів струму форми 8/20 так і для комутаційних форми 30/60 мкс, може бути представлений залежністю:

$$U(I) = a + b \cdot (\lg(I))^k . \qquad (2)$$

Значення параметрів a, b і k, є індивідуальними для кожного типу ОПН та мають бути визначені статистично. Основна складність полягає в тому, що рівняння (2) не може бути приведене до лінійного виду, а отже, використання загальновідомого методу найменших квадратів суттєво ускладнюється.

Проведені дослідження показали, що дана задача може бути вирішена із застосуванням так званого «методу середніх» [4], потрібного для формування системи нелінійних рівнянь, яку необхідно вирішити чисельними методами.

Результати і обговорення. Згідно з «методом середніх», параметри емпіричної формули визначають з однієї умови — умови рівності нулю суми всіх відхилень спостережуваної величини від середнього значення [4]. В

даній задачі маємо три невідомих параметри *a, b* і *k*, отже необхідно скласти систему з трьох рівнянь. Для отримання необхідної кількості рівнянь потрібно обрати із загальної кількості пар спостережень (I_i, U_i) третину (або приблизно третину, якщо кількість пар спостережень не кратна трьом) і суму їх відхилень прирівняти нулю. Потім необхідно прирівняти нулю суму відхилень, відповідно, другої та третьої третин даних. Таким чином буде отримана система рівнянь:

$$\begin{cases} \sum\limits_{i=1}^{m_1}\left(a+b\cdot\left(\lg(I_i)\right)^k-U_i\right)=0 \\ \sum\limits_{i=m_1+1}^{m_2}\left(a+b\cdot\left(\lg(I_i)\right)^k-U_i\right)=0 \\ \sum\limits_{i=m_2+1}^{n}\left(a+b\cdot\left(\lg(I_i)\right)^k-U_i\right)=0 \end{cases}. \tag{3}$$

Після всіх перетворень системи рівнянь (3) отримуємо систему:

$$\begin{cases} a\cdot m_1+b\cdot\sum\limits_{i=1}^{m_1}\left(\lg(I_i)\right)^k=\sum\limits_{i=1}^{m_1}U_i \\ a\cdot(m_2-m_1)+b\cdot\sum\limits_{i=m_1+1}^{m_2}\left(\lg(I_i)\right)^k=\sum\limits_{i=m_1+1}^{m_2}U_i \\ a\cdot(n-m_2)+b\cdot\sum\limits_{i=m_2+1}^{n}\left(\lg(I_i)\right)^k=\sum\limits_{i=m_2+1}^{n}U_i \end{cases}. \tag{4}$$

Для даних з табл. 2—6: $m_1 = 2$, $m_2 = 4$, $n = 6$.

Далі для кожного типу ОПН з табл. 2—6 система нелінійних рівнянь була вирішена за допомогою метода Ньютона-Рафсона [4, 5]. Оскільки алгоритм вирішення систем нелінійних рівнянь за цим методом неодноразово висвітлений в літературі [4, 5], наводити його в даній статті не варто. Отримані для кожного типу ОПН параметри *a, b* і *k* зведемо в табл. 7—11. Також для кожного типу ОПН було розраховано максимальне абсолютне значення відносної похибки запропонованої апроксимації на інтервалі I = 500—20000 А за формулою:

$$\delta=\left|\frac{U^*-U}{U}\cdot 100\right|, \tag{5}$$

де U^* — значення максимальної залишкової напруги (кВ), розраховане за формулою (2); U — паспортне значення максимальної залишкової напруги, кВ. Результати проведених розрахунків максимального абсолютного значення відносної похибки апроксимації також занесені в табл. 7—11.

Таблиця 7. **Результати апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 123 кВ**

№ з/п	Умовне позначення ОПН	Параметр *a* у формулі (2)	Параметр *b* у формулі (2)	Параметр *k* у формулі (2)	Максимальна відносна похибка δ, %
1	2	3	4	5	6

Продовження табл. 7

1	2	3	4	5	6
1	ОПН-123-1	163,394465	0,233081	3,998896	0,892
2	ОПН-123-2	171,114047	0,205385	4,105179	0,846
3	ОПН-123-3	191,953962	0,259253	4,135126	0,739
4	ОПН-123-4	181,899557	0,225080	4,090424	0,904
5	ОПН-123-5	203,679817	0,256765	4,180088	0,718

Таблиця 8. **Результати апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 245 кВ**

№ з/п	Умовне позначення ОПН	Параметр *a* у формулі (2)	Параметр *b* у формулі (2)	Параметр *k* у формулі (2)	Максимальна відносна похибка δ, %
1	ОПН-245-1	361,831278	0,479808	4,149519	0,777
2	ОПН-245-2	328,885331	0,368611	4,155249	0,885
3	ОПН-245-3	343,608393	0,366456	4,185704	0,860
4	ОПН-245-4	339,507910	0,445882	4,003286	0,704
5	ОПН-245-5	373,556310	0,477420	4,173502	0,764

Таблиця 9. **Результати апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 362 кВ**

№ з/п	Умовне позначення ОПН	Параметр *a* у формулі (2)	Параметр *b* у формулі (2)	Параметр *k* у формулі (2)	Максимальна відносна похибка δ, %
1	ОПН-362-1	492,956857	0,553350	4,151712	0,872
2	ОПН-362-2	490,066059	0,613577	4,029557	0,726
3	ОПН-362-3	513,133739	0,638734	4,085537	0,902
4	ОПН-362-4	510,852723	0,629452	4,042840	0,717
5	ОПН-362-5	614,118290	0,771062	4,082289	0,889

Таблиця 10. **Результати апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 550 кВ**

№ з/п	Умовне позначення ОПН	Параметр *a* у формулі (2)	Параметр *b* у формулі (2)	Параметр *k* у формулі (2)	Максимальна відносна похибка δ, %
1	ОПН-550-1	697,556507	1,243824	3,733893	0,740
2	ОПН-550-2	702,699986	0,689728	4,031530	0,471
3	ОПН-550-3	703,345687	1,236132	3,742933	0,755
4	ОПН-550-4	707,974767	0,714488	4,012406	0,456
5	ОПН-550-5	739,316965	1,347231	3,719994	0,751

Таблиця 11. **Результати апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при максимальній напрузі обладнання 800 кВ**

№ з/п	Умовне позначення ОПН	Параметр *a* у формулі (2)	Параметр *b* у формулі (2)	Параметр *k* у формулі (2)	Максимальна відносна похибка δ, %
1	2	3	4	5	6
1	ОПН-800-1	1013,845314	0,898860	4,095555	0,436

Продовження табл. 11

1	2	3	4	5	6
2	ОПН-800-2	1043,269859	1,012368	4,039190	0,450
3	ОПН-800-3	1060,272621	1,008346	4,049585	0,434
4	ОПН-800-4	1087,086751	1,050453	4,039477	0,449

Висновки

Виконана задача наближеного аналітичного представлення вольт-амперних характеристик обмежувачів перенапруг нелінійних єдиним виразом для можливості подальшої уніфікації розрахунків захисних рівнів ОПН при дії комутаційних і грозових перенапруг.

Проведені розрахунки показали, що для ОПН, призначених для встановлення в електричних мережах України класів напруги 110—750 кВ, максимальна відносна похибка запропонованої апроксимації вольт-амперної характеристики не перевищує 1 % в інтервалі нормованих струмів комутаційних і грозових перенапруг.

Література

1. *Аронов М.А.* Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ / М.А. Аронов. — М.: «Знак», 2001. — 232 с.

2. *Бржезицкий В. А., Онищенко В. А., Троценко Е. А., Юхименко М. А.* Разработка методических указаний по выбору ограничителей перенапряжений для электрических сетей 110-750 кВ / Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 6.

3. *СОУ-Н* ЕЕ 40.12-00100227-47:2011 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 110-750 кВ. Настанова щодо вибору та застосування. Затверджено Міненерговугілля України. Наказ № 136 від 19.05.2011. Розроблено: НТУУ «КПІ» (кафедра техніки і електрофізики високих напруг) / В. Бржезицький, Д. Крисенко. — Київ: ДП «НЕК» «Укренерго», 2011. — 44 с.

4. *Львовский Е.Н.* Статистические методы построения эмпирических формул: [учеб. пособие для вузов] / Е.Н. Львовский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988. — 239 с.

5. *Chapra S.C., Canale R.P.* Numerical methods for engineers. Sixth edition. — New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. — 968 p.

АППРОКСИМАЦИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ

В.А. Бржезицкий, И.Н. Маслюченко, Е.А. Троценко, Д.С. Крысенко
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

В статье рассмотрены вопросы аппроксимации вольт-амперной характеристики ограничителей перенапряжений нелинейных в рабочих режимах. Для

аналитического представления вольт-амперных характеристик ограничителей перенапряжений нелинейных предложено одно общее выражение. Для нелинейного регрессионного анализа использованы паспортные данные ограничителей перенапряжений нелинейных, предназначенных для установления в электрических сетях Украины классов напряжения 110—750 кВ. Полученное аналитическое выражение предоставляет возможность унификации расчётов защитных уровней ограничителей перенапряжений нелинейных при воздействии коммутационных и грозовых перенапряжений.

Ключевые слова: *ограничитель перенапряжений нелинейный, коммутационные перенапряжения, грозовые перенапряжения, вольт-амперная характеристика, аппроксимация.*