

2. Крамаренко В.П. Токсикологічна хімія. К.: Вища школа, 1995.- 423с.
3. Швайкова М. Д. Токсикологическая химия. М.: Медицина, 1975. - 377 с.
4. Химическая энциклопедия. Т. 4. М.:Изд.-во «Большая Российская энциклопедия», 1998.- С. 303.
5. Мудра І. Г., Денисюк О. Б., Москв'як Н.В. Гігієнічна оцінка впливу атмосферних забруднень на стан здоров'я населення Львівської області. Зб. наук. праць «Актуальні проблеми профілактичної медицини» вип. 6. Дрогобич: Коло, 2004. –С. 45-46.
6. Токсикологическая химия. Учебник для вузов (под ред. Т.В. Плетеневой). – М.: ГЭОТАР – Медиа, 2005.-512 с.
7. Справочник. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Справ. Изд. В 2-х книгах. – М.: Химия, 1990.
8. Откідач Д.М., Методика оцінки вибухонебезпечних об'єктів: Зб. наук. праць «Пожезна безпека» ЛДУ БЖД, УкрНДІПБ МНС України, 2006.– №9.– С. 173-178.
9. Щербина О.М., Михалічко Б.М., Безека Р.Ю. Аналітичне виявлення Плюмбу й Барію в довіллі у післяпожежний період: Зб. наук. праць «Пожезна безпека» ЛДУ БЖД, УкрНДІПБ МНС України, 2006.– №9. – С. 170-173.

УДК 621.316.933

В.І.Гудим, д.т.н., Р.І.Стасьо, С.Б.Ярмуш (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності), В.Г.Процюк (Західна електроенергетична система)

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГИ

В роботі розглянуто застосування обмежувачів перенапруг нелінійних та один з підходів апроксимації їх вольт-амперних характеристик, адекватне відтворення яких дозволяє отримати достовірні результати під час математичного моделювання електричних процесів в захищених ОПН від перенапруг електроустановках.

Вступ. Серед надзвичайних ситуацій техногенного характеру можна виділити перебої електропостачання міст та населених пунктів, викликані пошкодженням ізоляції кабельних ліній, силових трансформаторів, вимикачів та іншого силового електрообладнання спричинені перенапругами грозового та комутаційного походження.

Перенапруги, зумовлені грозовими розрядами, багатократно перевищують рівні номінальних напруг і характеризуються великою крутизною фронту хвилі. Вони особливо небезпечні для трансформаторів, реакторів, конденсаторів та кабельних ліній, ізоляція котрих після пробиття хвилею перенапруги не відновлюється.

Пошкодження ізоляції електромагнітних і комутаційних апаратів спричиняється й комутаційними процесами силового електрообладнання, особливо вимиканням струмів у контурах зі значними індуктивностями. Комутаційні перенапруги виникають внаслідок раптових змін схеми чи параметрів мережі. Типовими комутаціями є планові і аварійні вимикання і вмикання ліній, трансформаторів та інших елементів електромережі, під час яких виникають перехідні процеси. Внаслідок високої добротності контурів, які складаються з індуктивностей і ємностей проводів лінії або обмоток трансформаторів та реакторів, перехідні процеси під час комутацій мають коливний затяжний характер і можуть призвести до виникання значних перенапруг, особливо при ненульових початкових умовах [3].

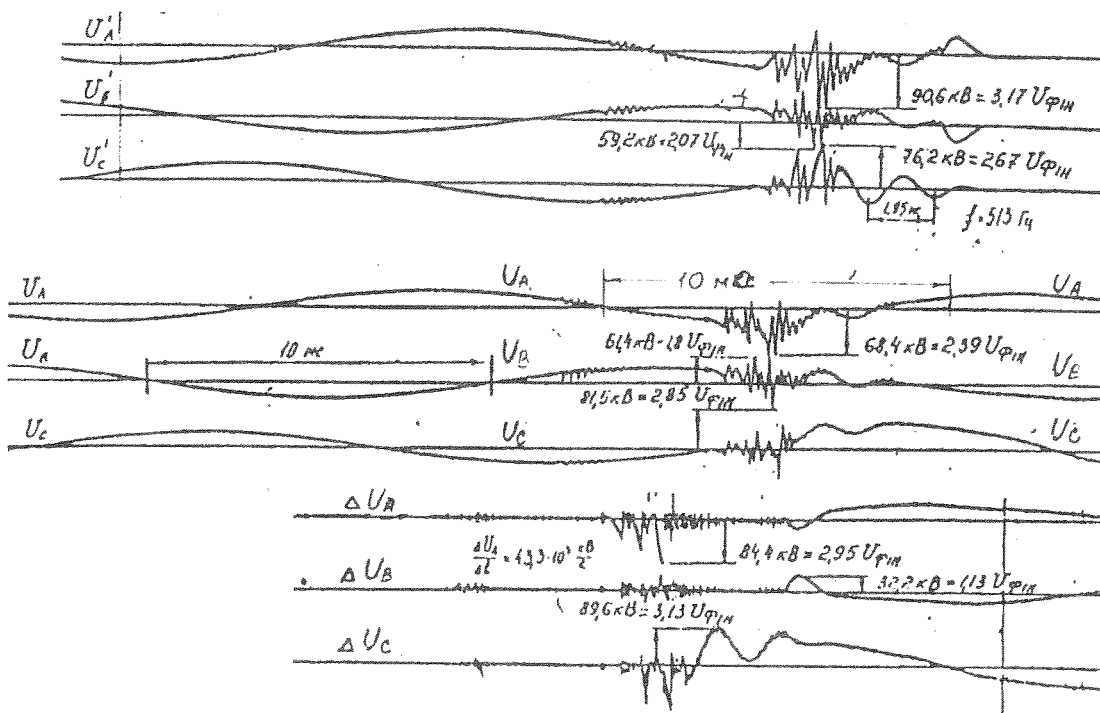


Рис. 1. Осцилограми процесів вимикання ненавантаженого пічного трансформатора.

Наочним прикладом є процес вимикання пічного трансформаторного агрегату дугової печі змінного трифазного струму місткістю 100 тон, осцилограми, якого наведені на рис. 1

Вимикання здійснювалося в експериментальних цілях з метою визначення граничних значень перенапруг та розроблення заходів захисту силового електрообладнання [2]. Як видно із осцилограми амплітуда викиду напруги перевищує номінальне амплітудне значення у 3,2 рази, що є небезпечним для ізоляції жил кабелів, вимикачів, перемикаючих пристроїв автотрансформаторів тощо.

Постановка задачі. Подібні комутації пічних трансформаторних агрегатів на металургійних заводах відбуваються десятки разів за добу. Рідше відбувається вимикання силових трансформаторів в енергосистемах, однак ці вимикання можуть супроводжуватись ще більшими кратностями перенапруг, пошкоджуючи силове електрообладнання та залишаючи на тривалий час без електроенергії споживачів різної категорії, не кажучи про можливі значні фінансові збитки через пошкодження електрообладнання та обсяги ремонтно-відновлювальних робіт. Для захисту електрообладнання електроустановок від грозових та комутаційних перенапруг застосовують різні технічні засоби, зокрема іскрові проміжки, вентильні та трубчасті розрядники та інші. Недолік перелічених елементів захисту в тому, що в них присутній іскровий проміжок, а іскри, що виникають між проміжками, є потужним джерелом запалювання. На напругу спрацювання цих елементів дуже вагомий вплив мають умови зовнішнього середовища, що вносять великий розкид параметрів вольт-амперних характеристик цих апаратів, а це, в свою чергу, істотно погіршує їх захисні властивості.

Для більш глибокого обмеження комутаційних та грозових перенапруг останнім часом застосовують вентильні розрядники та обмежувачі перенапруг нелінійні (надалі ОПН). Боротьба з перенапругами грозового походження ведеться двома способами, зокрема застосуванням грозозахистів та розрядників і ОПН [4, 5]. Ефективність використання кожного з пристроїв залежить від врахування їх захисних можливостей. ОПН надійніше захищають електрообладнання і мають менші розкиди параметрів, зокрема напруг спрацювання, що визначається вольт-амперними характеристиками глибоко-нелінійних

оксидно-цинкових варисторів. Перевага ОПН над вентиляними розрядниками полягає ще в тому, що ОПН не мають послідовних іскрових проміжків, тому їх можна встановлювати у місцях, де є небезпека від іскрових розрядів. Вони виготовлені на основі металооксидних резисторів (варисторів) з оксиду-цинку ZnO з малими додатками інших окислів і металів. Варистори на основі оксиду-цинку мають різко нелінійну вольт-амперну характеристику, що при зростанні густини струму від 10^{-5} А/см² до 10^2 А/см² призводить до збільшення напруги на варисторі приблизно в два рази. Високий ступінь нелінійності дозволив в ОПН використовувати варистори в режимі постійного приєднання до діючих електроустановок, які знаходяться під напругою. При цьому струм через обмежувач складає доли міліампера.

Конструктивно ОПН виконаний як герметичний монолітний виріб, надійно захищений від зовнішніх впливів. Колонка варисторів міститься між металевими електродами і спремонується в оболонку (корпус) зі спеціального атмосферостійкого полімерного матеріалу, який забезпечує необхідні механічні та ізоляційні властивості обмежувача перенапруг.

Однак застосування ОПН для захисту силового електрообладнання від перенапруг вимагає детальної перевірки з погляду подальшого перебігу електромагнітних процесів, який супроводжуються насиченням резисторів ОПН та їх взаємовпливу на реакторно-конденсаторне обладнання, тобто електромагнітної сумісності. Крім того важливо оцінити температурні режими ОПН після кількаразових спрацювань. Такі перевірочні дослідження можна виконати експериментальним шляхом, але значно ефективніше досягнути мети методами математичного моделювання, оскільки експериментальні дослідження можуть викликати пошкодження ОПН.

Розв'язання задачі. Багаточисельні експерименти, виконанні спеціалістами різних країн, у тому числі й України, дозволили отримати важливу інформацію для виготовлення і подальшого вдосконалення ОПН. Детальні вольт-амперні характеристики окремих варисторів, котрі є елементами блоків ОПН, показують, що значення напруг насичення характеризуються значним розкидом навіть у межах одного блоку [6]. Загальна вольт-амперна характеристика ОПН визначається температурним станом варисторів, контактними переходами між ними, частковими ємностями не лише між окремими варисторами, а й відносно корпусу ОПН, і т.п.

В результаті великої кількості вимірювань [3], виконаних на випробувальному стенді для 17 штук ОПН 35 кВ, отримана усереднена вольт-амперна характеристика в межах одиниць ампер, яка наведена на рис.2

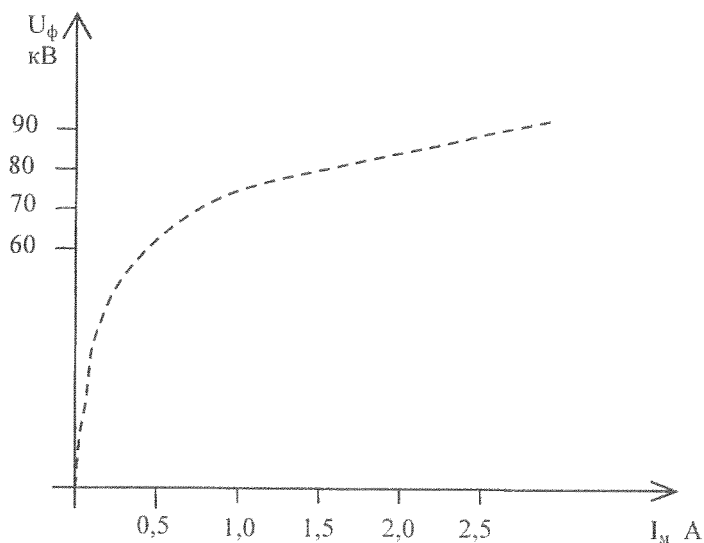


Рис.2. Вольт-амперна характеристика обмежувача перенапруг при малих значеннях струму

Слід відзначити, що під час вимірювань, ОПН не випробовувались у зонах глибоких насичень через можливість їх пошкодження. Аналіз отриманих результатів показує, що найбільший розкид параметрів вольт-амперних характеристик має місце у початковій зоні насичення зокрема для одного і того ж струму напруга ОПН відрізняється на $\pm 12\%$. Після насичення для всіх взірців і зразкових вимірювань розкид напруги для однакових значень струмів не перевищував $3\%-4\%$. Таким чином можна припускати, що спрацювання ОПН може відбутись в широкому діапазоні напруг, що в загальному випадку викличе різноманітну плинність електромагнітних процесів, як в ОПН так і в комплексі силового електрообладнання, котре захищається цим ОПН від перенапруг [3, 4, 5].

Під час спрацювання ОПН їх струми можуть досягати сотень а то й тисяч ампер, однак отримати характеристики в цьому діапазоні експериментальним шляхом є неможливо.

У зв'язку з цим на основі узагальнених статистичних даних в ході експлуатації діючих електроустановок отримано значення напруг і струмів ОПН на весь очікуваний діапазон їх значень із врахуванням залишкової напруги на ОПН для великих значень струмів.

Враховуючи близькість характеристик ОПН для досліджень доцільно використовувати усереднену вольт-амперну характеристику у відносних значеннях.

З метою забезпечення ефективного математичного моделювання нелінійних алгебро-диференціальних рівнянь, які описують нелінійну вольт-амперну характеристику ОПН доцільно апроксимувати гладкими функціями або їх сукупністю [7], тому використаємо для цієї мети систему рівнянь у вигляді поліномів різних порядків, які описують характеристику на відповідних інтервалах напруг і струмів (рис. 3).

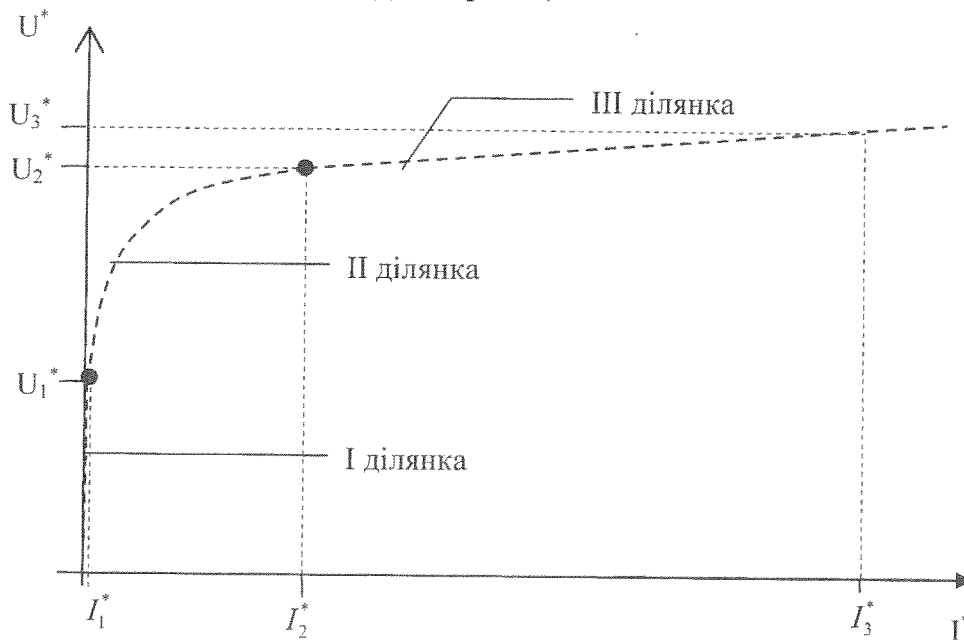


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика обмежувача перенапруг на інтервалі повної зміни струму та напруги спрацювання

Враховуючи можливість формування математичних моделей досліджуваних електротехнічних об'єктів, які містять ОПН, в різних координатах, наприклад, у контурних, вузлових чи контурно-вузлових, доцільно характеристику описати у вигляді залежності напруги від струму та струму від напруги. У першому випадку отримаємо динамічний опір ОПН після диференціювання апроксимованої функції за струмом, а у другому випадку диференціюючи апроксимовану функцію характеристики ОПН за напругою отримаємо динамічну провідність.

Для моделі систем електропостачання у контурних чи контурно-вузлових координатах сформуємо математичну модель ОПН у вигляді залежності напруги від струму.

У даному випадку апроксимовані характеристики на окремих ділянках записується у вигляді рівнянь :

$$\left. \begin{aligned} u^* &= z_1 i^* && \text{для ділянки I} && 0 \leq i^* \leq I_1^*, \text{ та } && 0 \leq u^* \leq U_1^* \\ u^* &= z_2 + z_3 i^* + z_4 i^{*k} && \text{для ділянки II} && I_1^* < i^* \leq I_2^*, \text{ та } && U_1^* < u^* \leq U_2^* \\ u^* &= z_5 + z_6 i^* && \text{для ділянки III} && i^* > I_2^*, && \text{ та } && u^* > U_2^* \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для визначення коефіцієнтів апроксимації z_1, \dots, z_6 необхідно записати систему рівнянь на основі крайових умов апроксимованих функцій та їх похідних.

Запишемо дану систему рівнянь на основі умов спряження функцій окремих ділянок характеристики.

Порядок системи рівнянь залежить від кількості невідомих системи (1). У даному випадку показник k степеня полінома можна підібрати, або вважати невідомим, тоді система рівнянь міститиме додаткове рівняння

$$\left. \begin{aligned} U_1^* &= u_1^*(I_1^*) \\ u_1^*(I_1^*) &= u_2^*(I_1^*) \\ \frac{du_1^*(I_1^*)}{di} &= \frac{du_2^*(I_1^*)}{di} \\ u_2^*(I_2^*) &= u_3^*(I_2^*) \\ \frac{du_2^*(I_2^*)}{di} &= \frac{du_3^*(I_2^*)}{di} \\ U_2^* - U_3^* &= u_3^*(I_2^* - I_3^*) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для наших умов показник k степеня приймаємо відомим, тому для визначення шести z_1, \dots, z_6 невідомих коефіцієнтів запишемо на основі системи (2) систему рівнянь у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} U_1^* &= z_1 I_1^* \\ z_1 I_1^* &= z_2 + z_3 I_1^* + z_4 I_1^{*k} \\ z_1 &= z_3 + k \cdot z_4 I_1^{*k-1} \\ z_2 + z_3 I_2^* + z_4 I_2^{*k} &= z_5 + z_6 I_2^* \\ z_3 + k \cdot z_4 I_2^{*k-1} &= z_6 \\ U_3^* - U_2^* &= z_5 + z_6 (I_3^* - I_2^*) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Система рівнянь (3) сформована на основі рівності граничних умов в точках стику окремих ділянок характеристики, тобто в точках U_1^* та U_2^* (рис.3) у матрично-векторній формі система набере вигляду:

$$\begin{pmatrix} I_1^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I_1^* & 1 & I_1^* & I_1^{*k} & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & k \cdot I_1^{*k-1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & I_2^* & I_2^{*k} & -1 & -I_2^* \\ 0 & 0 & 1 & k \cdot I_2^{*k-1} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & (I_3^* - I_2^*) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_3^* - U_2^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

Приймаємо для обмежувача напругу 35 кВ, $U_n^* = 1$, яка відповідає напрузі в іменованих одиницях $U_m = 100$ кВ та $I_n^* = 1$, що відповідає струму в іменованих одиницях $I_m = 1$ А.

Решта точок координат вибираємо відносно цих значень, тобто спряження окремих ділянок характеристики здійснюємо у точках стику для напруги $U_m = 72$ кВ, що відповідають $U_1^* = 0,720$, а струм у цій точці – $I_m = 0,001$ А, тобто $I_1^* = 10^{-3}$. Наступні точки спряження

відповідають напрузі 160 кВ тобто $U_2^* = 1,60$ та $I_2^* = 500$ і $U_3^* = 1,92$, та $U_m = 192$ кВ тобто $I_m = 5000$ А, а $I_3^* = 5000$.

Підставивши значення струмів і напруг на границях окремих інтервалів, які наведені вище, отримаємо значення коефіцієнтів апроксимуючих функцій z_1, \dots, z_6 . Після підставлення яких у систему (1) отримаємо вольт-амперну характеристику ОПН (рис. 4)

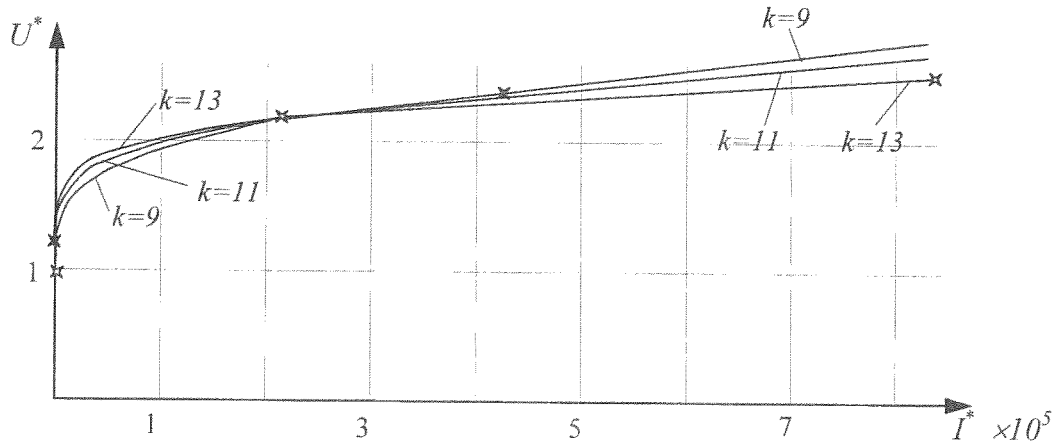


Рис. 4. Апроксимовані вольт-амперні характеристики ОПН для РТ-3/3

Підставивши значення струмів і напруг на границях окремих інтервалів, які наведені вище, отримаємо значення коефіцієнтів апроксимуючих функцій z_1, \dots, z_6 . Після підставлення яких у систему (1) отримаємо вольт-амперну характеристику ОПН (рис. 4)

Апроксимована характеристика проходить через всі задані точки характеристики, що свідчить про задовільну апроксимацію.

У другому випадку характеристика ОПН описується системою рівнянь у вигляді залежності струму від напруги. Для апроксимації ампер-вольтної характеристики розділимо її на кілька ділянок, згідно із заданими в паспорті точками цієї характеристики і опишемо кожен ділянку поліномами відповідних порядків [4].

У загальному випадку система рівнянь записується системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= y_1 u && \text{для ділянки I} && 0 < i \leq I_1, \quad \text{та} && 0 \leq u \leq U_1 \\ i_2 &= y_2 + y_3 u + y_4 u^k && \text{для ділянки II} && I_1 < i \leq I_2, \quad \text{та} && U_1 < u \leq U_2 \\ i_3 &= y_5 + y_6 u && \text{для ділянки III} && I_2 < i \leq I_3, \quad \text{та} && U_2 < u \leq U_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Рівняння (5) містять шість невідомих коефіцієнтів, для визначення яких необхідно, використовуючи граничні умови, записати систему рівнянь наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} I_1^* &= i_1^*(U_1^*) \\ i_1^*(U_1^*) &= i_2^*(U_1^*) \\ \frac{di_1^*(U_1^*)}{du} &= \frac{di_2^*(U_1^*)}{du} \\ i_2^*(U_2^*) &= i_3^*(U_2^*) \\ \frac{di_2^*(U_2^*)}{du} &= \frac{di_3^*(U_2^*)}{du} \\ I_3^* &= i_3^*(U_3^*) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де $I_1^*, I_2^*, I_3^*, U_1^*, U_2^*, U_3^*$ - точки вольт-амперної характеристики, подані у відносних одиницях

Підставивши значення напруг і струмів у токах стиків функцій у рівняння (6) отримаємо систему алгебричних рівнянь з невідомими y_1, \dots, y_6 , які у матричній формі мають вигляд:

$$\begin{pmatrix} U_1^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -U_1^* & 1 & U_1 & U_1^{*k} & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & kU_1^{*k-1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & U_2 & U_2^k & -1 & -U_2^* \\ 0 & 0 & 1 & kU_2^{*k-1} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & U_3^* \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_3^* \end{pmatrix} \quad (7)$$

Для забезпечення адекватності апроксимованої характеристики необхідно встановити показник k , значення якого остаточно уточнюються на основі методу найменших квадратів. Враховуючи різку зміну характеристики на початковому етапі спрацювання ОПН та її симетрію відносно початку системи координат, а також досвід апроксимації характеристик ОПН показник степеня k повинен бути непарним і не меншим 9-ти. Для підтвердження вказаних допущень використовуючи систему алгебричних рівнянь (7) розраховано коефіцієнти апроксимації для, виражених у відносних одиницях, точок вольт-амперної характеристики ОПН-РТ/TEL-3/3. На основі виконаних розрахунків побудовано апроксимовану характеристику, наведену на рис. 5 з показником $k=13$.

Використовуючи вище викладену апроксимацію, проведено ряд розрахунків для ОПН-ів різних класів напруг, які показали, що у відносних одиницях точки вольт-амперної характеристики ОПН однієї серії з різною номінальною напругою збігаються. Тому при моделюванні можна використовувати одну усереднену характеристику у відносних одиницях, яка в перерахунку через іменовані величини дозволяє отримати реальні значення напруг та струмів конкретного ОПН.

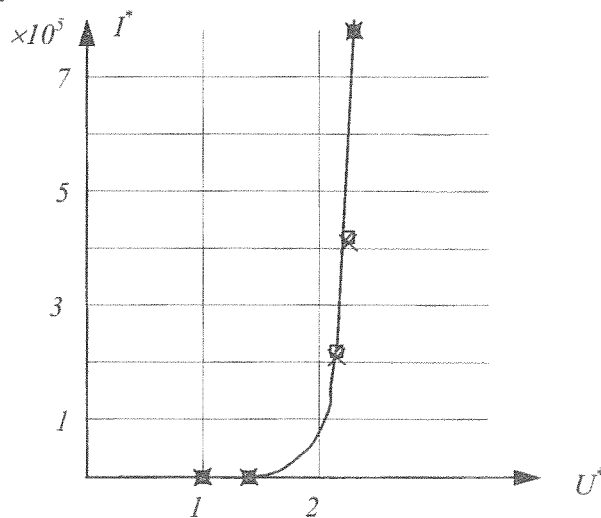


Рис. 5. Апроксимована ампер-вольтна характеристики ОПН серії РТ

Якщо апроксимацію вольт-амперних характеристик ОПН $u = f(i)$ доцільно використовувати у математичних моделях сформованих у контурних координатах де використовується динамічний опір ОПН, то апроксимацію ампер-вольтних характеристик $i = f(u)$ оптимально використовувати там, де використовується динамічна провідність ОПН, наприклад коли математична модель формується у вузлових координатах.

Висновки: Використання ОПН забезпечить надійний захист електрообладнання від перенапруг, які є причиною пошкоджень та можливих загорянь ізоляції електромагнітних апаратів та пристроїв.

Змодельовані динамічні характеристики ОПН сформовані на основі кусково-аналітичних функцій співпадають з характеристиками, отриманими шляхом експериментальних

вимірювань. Це дозволяє отримати адекватні результати під час математичного моделювання електромагнітних процесів в електроустановках, які захищаються ОПН.

Математичні моделі динамічних характеристик ОПН є універсальними в тому розумінні, що сформовані на основі відносних значень струмів та напруг ОПН дозволяють здійснювати моделювання ОПН для будь-яких класів напруг після перерахунку цих характеристик в іменовані одиниці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. *Правила устройства электроустановок/ Минэнерго СССР. 6-е изд. Перераб и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986.- 648с.:ил.*
2. *Испытания высоковольтного оборудования дуговых печей ДСП-100НЗА в режимах коммутаций: Технический отчёт (Центрэнергочермет.-1981.- Арх. №18666. – 142с.*
3. *Дослідження умов роботи апаратів глибокого обмеження перенапруг в районах з підвищеною забрудненістю оточуючого середовища та розробка обмежувачів перенапруг ОПН-6-10 кВ та брудостійкого ОПН-110кВ.- Технічна інформація з НДР тема №5773, Державний університет «Львівська політехніка», Львів-1994р.*
4. *Перенапряжения в электрических сетях. Проблемы и опыт эксплуатации. Рекомендации к применению нелинейных ограничителей перенапряжений.—Севастополь: Предприятие «Таврида Электрик», 2000.—60с.*
5. *Методичні вказівки з вибору обмежувачів перенапруг нелінійних виробництва підприємства «Таврида Електрик» для електричних мереж 6 – 35 кВ // Київ 2001.*
6. *Экспериментальное исследование на сетевом стенде тепловых и электрических процессов в резисторах и увлажнённом слое загрязнения на крышке при пяти конфигурациях ОПН. Отчёт по НИР № гос. рег. 01860041403. г. Львов-1988.-21с.*
7. *Аппроксимация характеристик намагничивание электромагнитных аппаратов // Гудим В.И., Лисяк Г.Н, Шелепеть Т.М., Чепурный Я.Я. Вестник ЛПИ „Электроэнергетические и электромеханические системы”, №204, 1986, с. 16-19. Изд-во Вища школа.*

УДК 678.675'126:746.222:746.523

*А.Б.Тарнавський, к.т.н., доц., Ю.Е.Павлюк, к.т.н., О.Ф.Бабаджанова, к.т.н., доц.
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТЕРМОПЛАСТІВ З ПОЛІМЕРНИМ МОДИФІКАТОРОМ

В статті наведено результати досліджень теплофізичних властивостей сумішей термопласт - полівінілпіролідон. Виявлено вплив термічної обробки готових виробів на їх теплостійкість.

Постановка проблеми. Сучасні досягнення в галузі створення нових сумішей термопластичних полімерів дають змогу регулювати експлуатаційні та технологічні властивості полімерних матеріалів та одержати вироби з цінними сорбційними, теплофізичними та фізико-механічними характеристиками, а деколи і зі специфічними властивостями. За допомогою кількісної зміни вмісту інгредієнтів суміші експлуатаційні властивості виробів на їх основі легко піддаються зміні в потрібному напрямку. Проте слід відзначити, що в деяких випадках внаслідок покращення одних експлуатаційних властивостей матеріалу можуть погіршуватися інші [1, 2], серед яких важливе місце