УДК 621.316.001

В. М. Кутін, д. т. н., проф.; О. Є. Рубаненко, к. т. н., доц.; С. В. Мисенко

ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Викладено результати аналізу впровадження елегазових вимикачів на підприємствах Південно-Західної енергетичної системи (ПЗ ЕС) та вдосконалення методів і засобів технічного діагностування високовольтних вимикачів.

Ключові слова: *високовольтний вимикач, упровадження, діагностування.*

Вступ

Надійність електроенергетичних систем (ЕЕС) значною мірою залежить від методів і засобів локалізації та ліквідації аварій, відновлення нормального режиму роботи. До таких засобів, поряд з іншими видами обладнання, належать і високовольтні вимикачі (ВВ), одним із призначень яких є відключення пошкодженого обладнання та локалізація струмів коротких замикань.

В енергосистемах України в експлуатації перебуває значна кількість вимикачів, які пропрацювали понад 25 років, що перевищує їхній паспортний ресурс. На сьогодні перед підприємствами енергетичної галузі стоїть завдання забезпечити надійну експлуатацію такого застарілого обладнання. Виконання цього завдання передбачає декілька шляхів, наприклад, відомий шлях планових та позапланових ремонтів застарілого обладнання. Інший шлях – це заміна застарілого обладнання новим.

Особливості вибору високовольтних вимикачів

Проте задача вибору нового вимикача є досить непростою. Існує велика кількість різних типів, конструкцій та виробників вимикачів (рис. 1), що ускладнює їхній вибір, особливо в умовах відсутності досвіду експлуатації. Наприклад, на сьогодні виготовляють елегазові вимикачі на напругу 35 кВ, а вакуумні – на напругу 110 кВ, але досвід експлуатації таких вимикачів значно менший, ніж оливних та повітряних або елегазових на клас напруги 110 кВ, а вакуумних на клас напруги 35 кВ.

Також приймаючи виважене рішення щодо типу та виробника нового ВВ, що встановлюють замість застарілого, потрібно враховувати не лише основні характеристики застарілого та нового вимикачів (наприклад, номінальну напругу, найбільшу робочу напругу, номінальний струм, номінальний струм вимкнення, вимоги до електричної міцності та комутаційної здатності, наскрізний струм короткого замикання, ресурс за механічною стійкістю циклів при B-t-O, вимоги до конструкції, виготовлення та матеріалів, технічні характеристики приводів, кількість електромагнітів вмикання та вимикання, комплектність поставки, вимоги до надійності [1]), а й особливості їхнього використання за місцем експлуатації (наприклад, можливість вимкнення струму збудження, враховуючи пусковий струм з малою обмежувальною напругою без формування небезпечних перенапруг, сейсмостійкість району встановлення, значення кліматичних чинників та інші).

Також варто враховувати періодичність та інтенсивність виконання операцій вмикання та вимикання, що важливо під час вибору генераторного чи лінійного вимикачів, тому що ресурс за механічною стійкістю у вакуумного вимикача більший, ніж у елегазового. На класи напруги 6 – 35 кВ на прийняття рішення під час вибору ВВ впливають вартісні показники, тому що споживачами таких вимикачів є невеликі компанії, у яких на вищезгадані класи напруги встановлена набагато більша кількість вимикачів, ніж на високі (110 кВ).

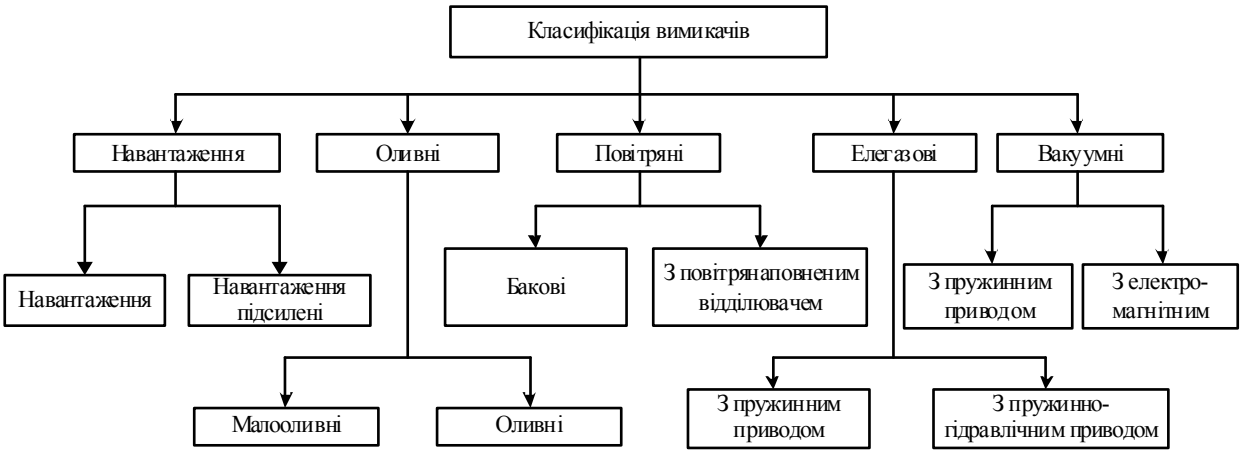

Рис. 1. Класифікація вимикачів

Дослідження зміни вартості вимикачів та їхніх ремонтів під час експлуатації

Проведені дослідження (табл. 1, табл. 2, табл. 3) дозволили побудувати (рис. 2) залежності вартості (В) нових повітряних та елегазових високовольтних вимикачів, упроваджених в ПЗЕС, від року виготовлення (Т), а також залежності витрат на проведення їхніх ремонтів під час експлуатації від року експлуатації. Для зменшення впливу інфляційних процесів на вартість вимикачів і ремонтів упродовж досліджуваного періоду цю вартість визначають щодо відношення до вартості електроенергії, яку продають обласні енергопостачальні компанії для споживачів І категорії за виразом (1). Початок координат відповідає 1985 року.

$$B_{в.о.} = \frac{B_{в.}}{B_{ел.}}, \tag{1}$$

де $B_{в.}$ – вартість вимикача, $B_{ел.}$ – вартість електроенергії для споживачів першої категорії.

Таблиця 1

Результати досліджень вартості елегазових вимикачів (за роками)

Рік	2008	2009	2010	2011	2012
Вартість елегазового вимикача 110 кВ, грн	181546	212850	232306	275104	326505
Вартість електроенергії, грн	0,4046	0,5231	0,5678	0,6896	0,8377
Відносна вартість елегазового вимикача 110 кВ	$4{,}4\cdot10^6$	$4{,}2\cdot10^6$	$4{,}1\cdot10^6$	$4{,}0\cdot10^6$	$3{,}9\cdot10^6$

Дослідження зміни вартості повітряних вимикачів показали (табл. 2): вартість повітряного вимикача типу ВВШ-110 у 1985 р. становила 32 000, 0 рубл., у 1994 р. – 98 400,0 рубл., 2000 р. – 4 150 000,0 рубл. [5, 6, 7].

Таблиця 2

Результати досліджень вартості повітряних вимикачів (за роками)

Рік	1985	1994	2000
Вартість повітряного вимикача 110 кВ, в.о	$3{,}0\cdot10^6$	$2{,}6\cdot10^6$	$2{,}0\cdot10^6$

Крива 1 та 4 (рис. 2), відповідно, показує залежність зміни відносних вартостей нового повітряного та елегазового вимикача (ЕВ) від року виготовлення. Ці залежності описують виразом (2):

$$B = \frac{B_{в.о.}}{T_{р.}}, \qquad (2)$$

де $B_{в.о.}$ – вартість вимикача у відносних одиницях, $T_{р.}$ – підзвітний рік.

Крива 2 (рис. 2) відображає закономірність зміни відносної вартості повітряного вимикача (ПВ) під час експлуатації з урахуванням витрат на проведення поточних та капітальних ремонтів як самих вимикачів, так і обладнання для підготовки стислого повітря. Крива 3 (рис. 2) показує залежність зростання вартості елегазового вимикача під час експлуатації з урахуванням зростання сумарних витрат на проведення технічного обслуговування та витрат на закупівлю обладнання для роботи з елегазом.

Таблиця 3

Результати досліджень вартості проведення капітальних ремонтів (КР) за роками

Рік	2008	2009	2010	2011	2012
Вартість виконання КР В-110 кВ, грн	19000	26200	22400	27200	27300
Вартість виконання КР обладнання для підготовки стислого повітря, грн	36000	37000	38000	41000	42400

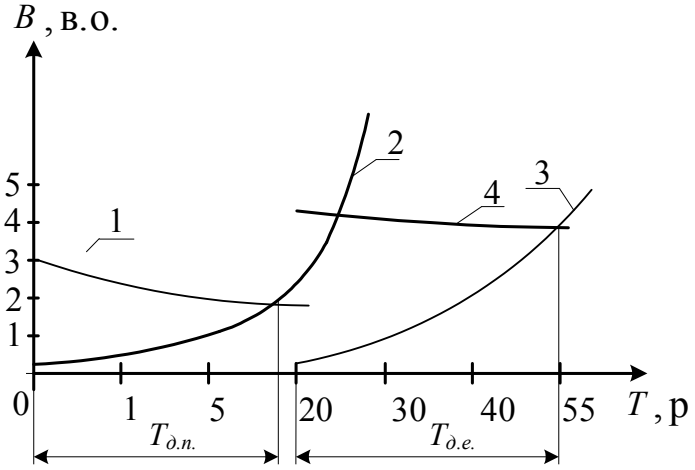

Рис. 2. Залежність зміни вартості повітряних та елегазових вимикачів під час експлуатації

Аналіз отриманих залежностей дозволив виявити тенденції зростання відносної вартості ремонтів та спадання відносної вартості нових вимикачів. Точки перетину кривих 1 і 2, 3 і 4 свідчать про недоцільність продовження експлуатації повітряного та елегазового вимикача відповідно, якщо кошти, які витрачають на виконання капітальних та поточних ремонтів, перевищують вартість нового вимикача, що зумовлено зменшенням вартості вимикачів за рахунок удосконалення виробництва раніше розроблених конструкцій. З рис. 2 видно, що прогнозований доцільний термін експлуатації елегазових вимикачів ($T_{д.е.}$) перевищує цей показник для повітряних вимикачів $T_{д.п.}$, і тому виправдано встановлювати нові елегазові вимикачі.

Одними з найперспективніших високовольтних вимикачів є елегазові, у яких дуга гаситься більш ефективно порівняно зі стисненим повітрям чи оливою. З огляду на проблеми з продовженням терміну експлуатації оливних та повітряних вимикачів, останніми роками інтенсивно ведеться робота з їхньої заміні на елегазові. На сьогодні парк елегазових вимикачів значно поповнився великою кількістю закордонних вимикачів різних конструкцій і виробників.

Математична модель заміни повітряних та оливних вимикачів в ПЗ ЕС

Дослідження заміни застарілих вимикачів у Південно-Західній електроенергетичній системі наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Результати досліджень упровадження елегазових вимикачів

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рік	1998	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Кількість, шт	2	2	6	3	2	1	5	15	3	8	7	7

Динаміка заміни (кількість замінених вимикачів за один рік *N*, шт.) оливних та повітряних вимикачів напругою 110 – 750 кВ на елегазові в Південно-Західній електроенергетичній системі (підзвітний рік – *T*, р.) зображена на рис. 3.

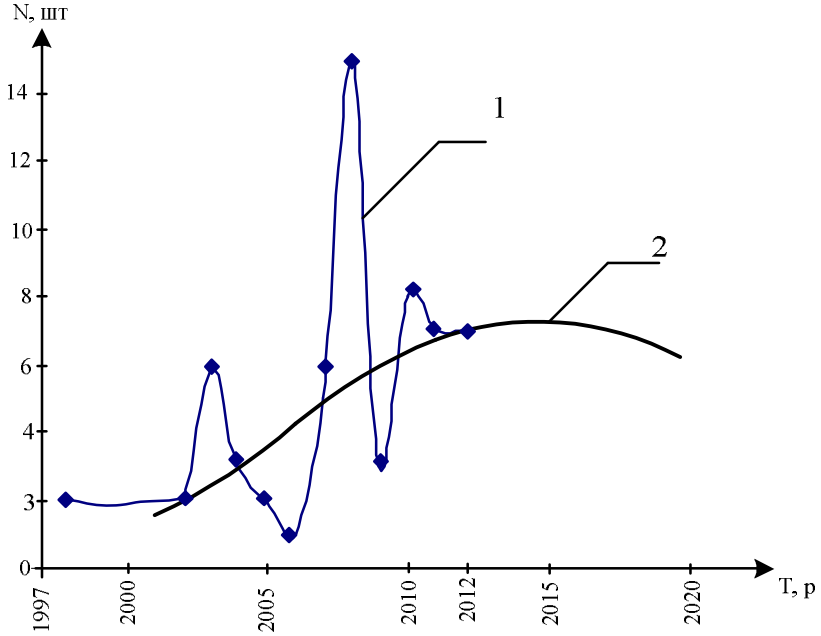

Рис. 3. Залежність кількості встановлених вимикачів від року монтажу чи введення в експлуатацію в ПЗ ЕС

На рис. 3 показані: 1 – залежність кількості замінюваних повітряних та оливних вимикачів напругою 110 – 750 кВ на елегазові від року заміни з 1998 року до 2012 рік включно, 2 – залежність прогнозованої кількості замінюваних повітряних та малооливних вимикачів напругою 110 – 750 кВ на елегазові від року заміни з 1998 року до 2017 рік включно з урахуванням контракту компанії АВВ та ДП НЕК Укренерго, побудована за математичною моделлю процесу впровадження високовольтних вимикачів в ПЗ ЕС (3), яка була отримана за допомогою програмного забезпечення «Curve Expert».

$$N = \frac{k}{a_1 + a_2 \cdot k + a_3 \cdot k^{0,5}} = \frac{k}{47977475 + 23878{,}229 \cdot k - 2140663{,}7 \cdot \sqrt{k}}, \qquad (3)$$

де N – кількість вимикачів, k – рік установлення, коефіцієнти: a_1= 47977475 (рік), a_2=23878,229 (в.о.), a_3=2149663,7 (рік^{0,5}).

На сьогодні на підстанціях ПЗЕС установлено 54 елегазових вимикачів таких типів, як: ABB, AREVA, Siemens, Alstom. Процес заміни застарілих вимикачів на нові, елегазові, розпочався в 1998 р., тому в деяких з них уже закінчується паспортний термін експлуатації до проведення поточних ремонтів. Також у ПЗЕС є елегазові вимикачі, які введені в експлуатацію менше року тому. Досвіду експлуатації як тих елегазових вимикачів, які

відпрацювали свій паспортний ресурс до першого капітального ремонту, так і вимикачів нових конструкцій, щойно введених в експлуатацію, небагато. Тому актуальним є завдання моніторингу технічного стану елегазових вимикачів у процесі їхньої експлуатації.

Накопичений досвід експлуатації оливних, повітряних, елегазових і вакуумних вимикачів свідчить про те, що їхні відмови в більшості випадків пов'язані із пошкодженням приводів та дугогасильних камер [2]. Тому потрібно вдосконалювати наявні засоби технічного діагностування для виявлення на ранній стадії пошкоджень для різних типів вимикачів [3].

В ОАО «НТЦ Элетроэнергетики» був проведений аналіз причин відмов високовольтних вимикачів [1]. Так, у період з 1997 – 2007 роки було зафіксовано 62 відмови елегазових вимикачів (по Росії). Найбільша кількість відмов пов'язана з несправністю блоків відключення. Серед цих пошкоджень мали місце 7 відмов обігрівального пристрою вимикачів типу Siemens, три відмови вимикачів ABB LTB з причини пошкодження пристроїв сигналізації тиску, замикання вторинних кіл привода PLK-222, несправності обігрівальних пристроїв, одна з причини деформації латунних штовхачів супроводжувальних блок-контактів (СБК) та інші види пошкоджень. Також було зафіксовано обрив склоепоксидної тяги на вимикачі 110 кВ, спалення електромагнітів вимкнення.

Так, наприклад, у 2006 році було зафіксовано відмови (блокування кіл управління) елегазових бакових вимикачів 110 – 500 кВ виробництва ABB і AREVA з причини недостатньої потужності й низької надійності обігріваючих приладів баків, недоліків системи контролю тиску (густини) елегазу за температури навколишнього середовища – 41 ^{0}С і нижче.

Удосконалення діагностування високовольтних вимикачів

Одним із шляхів підвищення якості діагностування ВВ є вдосконалення наявних методів та засобів діагностування, які реалізовують ці методи і широко використовують можливості мікропроцесорних елементів, систем та комплексів. Наприклад, досить інформативним параметром високовольтних вимикачів, який контролюють сучасні мікропроцесорні системи діагностування є швидкісні характеристики.

На елегазових вимикачах швидкісні характеристики можна визначити, наприклад, за допомогою сенсорів кутового ДП21 та лінійного ДП11 переміщення. Проте визначення швидкісних характеристик для елегазових вимикачів різних підприємств-виробників обмежено конструктивними особливостями місць розташування цих або подібних до них сенсорів. Тому актуальним постає завдання вдосконалення методів і засобів контролю швидкісних характеристик для елегазових вимикачів в умовах експлуатації.

Як один із шляхів його розв'язання запропоновано контролювати струм тестового сигналу високої частоти (3), який протікає між контактами вимикача (рис. 4).

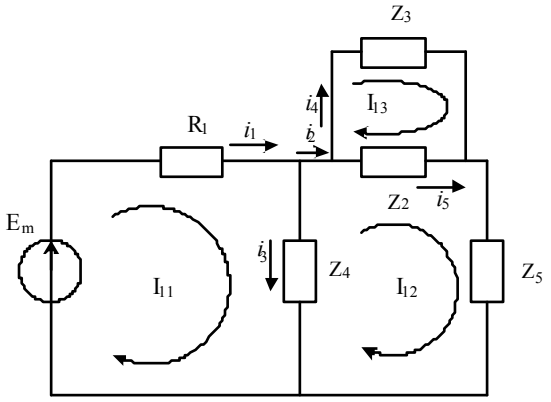

Рис. 4. Заступна схема вузла вимикача

Електрорушійна сила (е.р.с.) джерела тестового сигналу:

$$E(t)=E_m \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

де ω − кутова швидкість, t − час, E_m − амплітудне значення е.р.с. джерела живлення.

Відповідно до рис. 3, за методом контурних струмів складаємо систему рівнянь (4)

$$\begin{cases} i_1(t)=i_2(t)+i_3(t) \\ i_2(t)=i_3(t)+i_4(t) \\ I_{11}(t)\cdot(z_1+z_4)-I_{12}(t)\cdot z_4=E(t) \\ -I_{11}(t)\cdot z_4+I_{12}(t)(z_4+z_2+z_5)=0 \\ -I_{12}(t)\cdot z_2+I_{13}(t)(z_2+z_3)=0 \end{cases}, \quad (4)$$

де i_1, i_2, i_3, i_4 − струми у вітках, а I_{11}, I_{12}, I_{13} − струми в контурах. Операторним методом визначено струм тестового сигналу, який протікає через активний опір R_1 сенсора

$$i(t) = \frac{U}{\frac{A \cdot B}{C} + R_1}, \quad (5)$$

де U − напруга джерела тестового сигналу, $A=\left(\frac{R_2 \cdot R_3}{R_2+R_3-i\cdot\omega\cdot R_2\cdot R_3\cdot(C_2+C_3)}+\frac{R_5}{1-i\cdot\omega\cdot R_5\cdot C_5}\right)$,

$B=\left(\frac{R_4}{1-i\cdot\omega\cdot R_4\cdot C_4}\right)$, $C=\left(\frac{R_2 \cdot R_3}{R_2+R_3-i\cdot\omega\cdot R_2\cdot R_3\cdot(C_2+C_3)}+\frac{R_5}{1-i\cdot\omega\cdot R_5\cdot C_5}\right)+\left(\frac{R_4}{1-i\cdot\omega\cdot R_4\cdot C_4}\right)$, R_1 − активний опір сенсора, приєднаний послідовно до джерела тестового сигналу, Z_2 − повний опір між контактами дугогасильної камери, який складається з ємнісного X_2 (опір ємності C_2) та активного R_2 (опір ізоляції між контактами) опорів, Z_3 − повний опір контактів відносно фарфорової ізоляції для повітряного та елегазового вимикачів, який складається з ємнісного X_3 (опір ємності C_3) та активного R_3 (послідовно з'єднані два активних опори та послідовно з'єднані два ємнісні опори) опорів, Z_4 та Z_5 − повні опори рухомого та нерухомого контактів відносно заземлених частин вимикача, які складаються з ємнісних X_4, X_5 (опір ємностей C_4, C_5) та активних R_4 , R_5 (R_4, C_4 − опір та ємність ізоляції рухомого контакту відносно заземлених частин вимикача; R_5, C_5 − опір та ємність ізоляції нерухомого контакту відносно заземлених частин вимикача) опорів.

Урахування величини цього струму на різних частотах дозволяє підвищити точність контролю стану приводу вимикача та дугогасильної камери [4].

Висновки

На сьогодні в експлуатації багато ВВ, які відпрацювали понад 25 років і потребують заміни. Підприємства-виробники пропонують велику кількість нових моделей ВВ, але в Україні малий досвід експлуатації цих моделей. Це ускладнює їх вибір під час заміни.

З метою підвищення надійності експлуатації нових моделей вимикачів потрібно вдосконалювати наявні методи та засоби їх діагностування. Перспективним є вдосконалення методу контролю швидкісних характеристик шляхом контролю струму тестового сигналу, що проходить між контактами вимикача під час його вмикання або вимикання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Нормативний документ мінпаливенерго України. Норми випробування електрообладнання. СОУ-Н ЕЕ 20.302: Київ. 2007. – 271 с.

2. Тимашова Л. В. Анализ повреждаемости выключателей 110-750 кВ / Л. В. Тимашова, И. Л. Шлейфман, И. А. Назаров / Материалы V международной научно-техническай конференции «Высоковольтное коммутационное оборудование». Москва, 2009. – 200 с.

3. Кутин В. М. Диагностирование электрооборудования электрических систем: Учеб. Пособие / В. М. Кутин, В. И. Брейтбурд. – К.: УМК ВО, 1991. – 104 с.

4. Кутін В. М. Вдосконалення методів діагностування високовольтних вимикачів / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 109 – 113.

5. Справочник по проектированию электрических сетей / под. ред. Д. Л. Файбисовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.

6. Справочник по проектированию электрических сетей / под. ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.

7. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков / Учеб. Пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

Кутін Василь Михайлович − д. т. н., професор кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598377.

Рубаненко Олександр Євгенійович − к. т. н., доцент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598377 e-mail:. Rubanenko@bk.ru.

Вінницький національний технічний університет.

Мисенко Сергій Васильович − інженер, Південно-Західна електроенергетична система, служба підстанцій, інженер служби підстанцій, тел.: (0432) – 634951, e-mail: Sergey_Mysenko@ukr.net.