

О. Є. Рубаненко<sup>1</sup>  
Ю. Г. Ведміцький<sup>1</sup>  
С. В. Мисенко<sup>2</sup>

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет;

<sup>2</sup>Південно-Західна електроенергетична система

*Обґрунтовано необхідність вдосконалення методів та засобів технічного діагностування високовольтних вимикачів для підвищення їх надійності в умовах експлуатації. Описано спосіб отримання швидкісних характеристик високовольтних вимикачів без використання сенсорів кутового та лінійного переміщення.*

**Ключові слова:** високовольтний вимикач, швидкісна характеристика, діагностування, сенсор, математична модель.

### Вступ

Забезпечення надійності і стійкості роботи об'єднаної електроенергетичної системи в цілому пов'язане із якістю управління її електричними режимами. В електроустановках і системах передачі струму високої напруги основними комутаційними апаратами автоматичної дії, за допомогою яких виконуються будь-які зміни в колах струму у всіх можливих в певній точці системи режимах роботи, є високовольтні вимикачі. Їх основною задачею є локалізація аварійних ситуацій у разі пошкоджень високовольтного обладнання [1].

Накопичений досвід експлуатації високовольтних вимикачів свідчить про наявність їх відмов [2], які в більшості випадків пов'язані з пошкодженням приводів та дугогасильних камер. Найбільш зручною і інформативною формою представлення технічного стану конструктивних елементів приводів та дугогасильних камер є графічна. Порівнюючи отримані поточні графіки залежностей швидкості руху рухомих ланок приводних механізмів з попередніми графіками – легко встановити динаміку зміни технічного стану того чи іншого конструктивного елементу вимикача. В наш час відбувається заміна застарілих масляних та повітряних вимикачів на нові елегазові. Однак, враховуючи велику кількість типів та виробників елегазових вимикачів, які експлуатуються в Україні виникає проблема визначення їх швидкісних характеристик зумовлена відсутністю універсальних пристроїв, що дозволяють підключати сенсори кутового та лінійного переміщення до рухомих ланок вимикачів різних типів і виробників, тобто — різних конструкцій. Отже актуальною постає задача розробки нового методу визначення технічного стану високовольтних елегазових вимикачів, який би не мав обмежень викликаних конструктивними особливостями вимикачів та дозволяв би контролювати не лише механічні (швидкісні та часові) параметри вимикача, а і інші, наприклад якість елегазу, опір ізоляції апаратних вв'єдів тощо.

Тому потрібно вдосконалювати існуючі засоби технічного діагностування для виявлення дефектів елегазових вимикачів різних типів, виробників, конструкцій на ранній стадії розвитку пошкоджень.

### Розробка нового методу діагностування

З метою розробки нового методу діагностування побудовано заступну схему дугогасильної камери елегазового вимикача рис. 1.

На схемі (рис. 1а) показані:  $e$  — напруга джерела тестового сигналу,  $R_1$  — активний опір сенсора, приєднано послідовно до джерела тестового сигналу; опір ємності  $C_{2t_i}$  та активний опір  $R_{2t_i}$  між контактами дугогасильної камери, які змінюють свої значення під час операції увімкнення або

вимкнення вимикача,  $i$  — порядковий номер для моменту часу  $t_i$ ; ємнісні  $C_3, C_4$  та активні  $R_3, R_4$  опори відповідно рухомого та нерухомого контактів відносно заземлених частин вимикача.

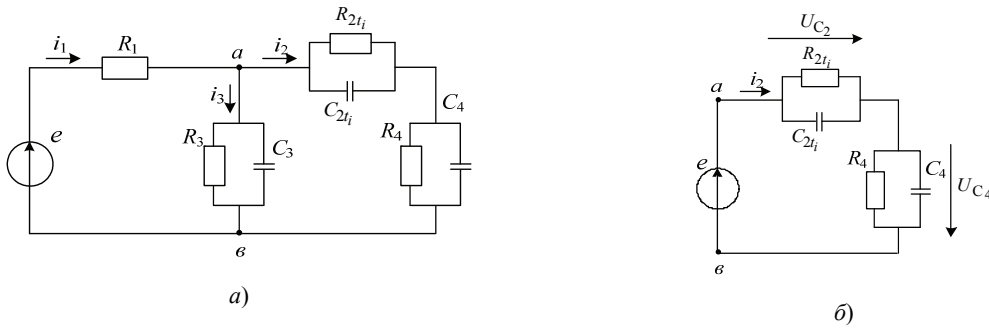


Рис. 1. Заступна схема дугогасильної камери елегазового вимикача

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

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \phi_e), \quad (1)$$

де  $\omega$  — кутова швидкість;  $t$  — час;  $E_m$  — е. р. с. тестового сигналу.

Для схеми (рис. 1а) можна скласти систему рівнянь (2)

$$\begin{cases} i_1(t) = i_2(t) + i_3(t); \\ U_{ae} + U_{R_1} = e; \\ U_{ae} + i_2(t)(z_2 + z_4) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Враховуючи, те що  $R_1$  набагато менший за значенням ніж опори  $Z_3$  та  $Z_4$ , то  $U_{ae} \gg U_{R_1}$  і можна допустити, що  $U_{ae} \approx e$ , тоді заступну схему рис. 1а можна спростити (див. рис. 1б).

Використовуючи спрощену заступну схему знайдемо струм  $i_2$

$$i_2 = U_{C_2} \frac{dC_2}{dt} + C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} + \frac{U_{C_2}}{R_2}. \quad (3)$$

Складемо систему рівнянь

$$\begin{cases} U_{C_2} + U_{C_4} \approx e = E_m \sin(\omega t + \phi_e); \\ U_{C_2} \frac{dC_2}{dt} + C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} + \frac{U_{C_2}}{R_2} - C_4 \frac{dU_{C_4}}{dt} - \frac{U_{C_4}}{R_4} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4), визначивши з першого рівняння значення  $U_{C_4}$  та підставивши в друге, отримаємо диференціальне рівняння (ДР)

$$(C_2 + C_4) \frac{dU_{C_2}}{dt} + \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{dC_2}{dt} \right) U_{C_2} = C_4 \frac{de}{dt} + \frac{e}{R_4}. \quad (5)$$

Введемо коефіцієнти  $a_1, a_0$  та еквівалентний струм в рівняння (6), отримаємо:

$$a_1(t) \frac{dU_{C_2}}{dt} + a_0(t) U_{C_2} = I_{\text{екв}}(t). \quad (6)$$

де  $a_1(t) = C_{2t_i} + C_4$ , відповідає (рис. 2а);  $a_0(t) = \frac{1}{R_{2t_i}} + \frac{1}{R_4} + \frac{dC_{2t_i}}{dt} \approx \frac{1}{R_{2t_i}}$ , відповідає (рис. 2а);

$I_{\text{екв}}(t) = C_4 \frac{de}{dt} + \frac{e}{R_4}$ , відповідає (рис. 2б).

З урахуванням введених позначень покажемо такі заступні схеми:

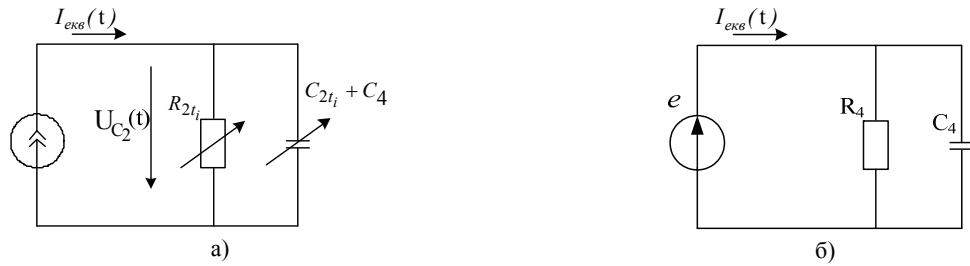


Рис. 2. Заступні схеми: а — для кола, яке враховує активний та ємнісний опори між контактами вимикача; б — для кола, яке враховує активний та ємнісний опори нерухомого контакту відносно заземлених частин вимикача

Використовуючи заступну схему (рис 2б), обчислимо комплексне та миттєве значення еквівалентного струму

$$\underline{I}_{\text{екв}} = \underline{E} \left( \frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) = \underline{E} \frac{1 + j\omega C_4 R_4}{R_4}; \quad (7)$$

$$I_{\text{екв}}(t) = \frac{E_m}{R_4} \sqrt{1 + (\omega C_4 R_4)^2} \sin [\omega t + \psi_e + \text{arctg}(\omega C_4 R_4)]. \quad (8)$$

Виконаємо точний розв'язок лінійного ДР (5) зі змінними, явно залежними від часу коефіцієнтами  $a_1(t)$  та  $a_0(t)$

$$a_1 \cdot \frac{dU_{C_2}}{dt} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} + a_0 \cdot U_{C_2} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} = I_{\text{екв}}(t) e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt}. \quad (9)$$

Поділимо ліву і праву частину рівняння (9) на  $a_1(t)$

$$\frac{dU_{C_2}}{dt} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} + \frac{a_0}{a_1} \cdot U_{C_2} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} = \frac{I_{\text{екв}}}{a_1} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt}. \quad (10)$$

Винесемо за дужки  $U_{C_2} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt}$

$$\frac{d}{dt} \left( U_{C_2} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} \right) = \frac{I_{\text{екв}}}{a_1} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt}. \quad (11)$$

Знайдемо інтеграл від рівняння (11)

$$U_{C_2} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} = \int \left( \frac{I_{\text{екв}}}{a_1} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} \right) dt + A. \quad (12)$$

Після виконаних математичних перетворень знайдемо амплітудне значення  $U_{C_2}$

$$U_{C_2} = e^{-\int \frac{a_0}{a_1} dt} \left( \int \left( \frac{I_{\text{екв}}}{a_1} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} \right) dt + A \right) = e^{-\int \frac{a_0}{a_1} dt} \cdot \int \left( \frac{I_{\text{екв}}}{a_1} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} \right) dt + A \cdot e^{-\int \frac{a_0}{a_1} dt}. \quad (13)$$

Тобто

$$U_{C_2}(t) = U_{C_2\text{вим}}(t) + U_{C_2\text{в}}(t), \quad (14)$$

де  $U_{C_2\text{вим}}(t) = e^{-\int \frac{a_0}{a_1} dt} \int \left( \frac{I_{\text{екв}}}{a_1} e^{\int \frac{a_0}{a_1} dt} \right) dt$  — вимушена складова напруги;  $U_{C_2\text{в}}(t) = A e^{-\int \frac{a_0}{a_1} dt}$  — вільна складова напруги;  $A$  — стала інтегрування, яка визначається з початкової умови  $U_{C_2}(0) = 0$ .

Знайдемо наближені розв'язки ДР (6) для елегазового вимикача фірми ABB типу LTB145D1/B.

Залежність зміни ємності під час операції вимкнення та увімкнення, та активного опору під час операції вимкнення та увімкнення від часу визначається за виразами [3]

$$C_{2\text{вимк.}}(t) = (75,576 \cdot e^{-0,201t} + 10,624) \cdot 10^{-12}; \quad (15)$$

$$C_{2\text{увімк.}}(t) = (4,1 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0,594t} + 11,071) \cdot 10^{-12}; \quad (16)$$

$$R_{2\text{вимк.}}(t) = \left[ \frac{0,358 + 1,58t}{1 + 0,169t - 0,0006t^2} \right] \cdot 10^9; \quad (17)$$

$$R_{2\text{увімк.}}(t) = (8,7 + 0,271t + 0,0191t) \cdot 10^9. \quad (18)$$

На рис. 3, як приклад, зображено зміну ємності та активного опору від часу під час операції вимкнення вимикача.

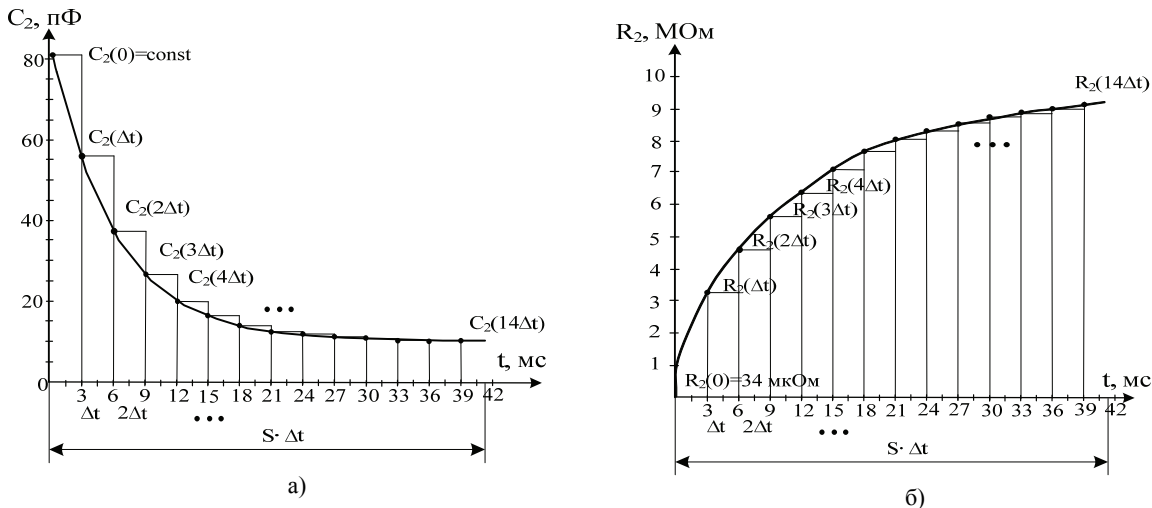


Рис. 3. Характеристики вимикача:

а — зміна ємності від часу; б — зміна активного опору від часу

Час руху РКС у дослідженні характеристик поділимо на  $n = 14$  рівних часових проміжків  $\Delta t$  ( $\Delta t = \frac{S \cdot \Delta}{n}$ )

$$k \cdot \Delta t \leq t < (k+1) \cdot \Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (19)$$

Визначимо значення напруги  $U_{C_2}(t)$

$$U_{C_2}^{(k)}(t) = U_{C_{2\text{вим.}}}^{(k)}(t) + U_{C_{2\text{в.}}}^{(k)}(t). \quad (20)$$

Знайдемо значення  $U_{C_{2\text{вим.}}}^{(k)}$ , використовуючи (рис. 2а) та рівняння (5):

$$U_{C_{2\text{вим.}}}^{(k)} = \frac{I_{\text{екв}}}{\frac{1}{R_2^{(k)}} + \omega \cdot (C_2^{(k)} + C_4)} = \frac{I_{\text{екв}} \cdot R_2^{(k)}}{1 + j\omega \cdot (C_2^{(k)} + C_4) R_2^{(k)}} = \frac{E}{R_4} \frac{1 + j\omega C_4 R_4}{1 + j\omega \cdot (C_2^{(k)} + C_4) R_2^{(k)}}. \quad (21)$$

Визначимо миттєве значення напруги  $U_{C_{2\text{пр}}}^{(k)}(t)$

$$U_{C_{2\text{пр}}}^{(k)}(t) = E_m \frac{R_2^{(k)}}{R_4} \frac{\sqrt{1 + (\omega C_4 R_4)^2}}{\sqrt{1 + [\omega (C_2^{(k)} + C_4) R_2^{(k)}]^2}} \sin \left[ \omega t + \psi_e + \arctg(\omega C_4 R_4) - \arctg(\omega (C_2^{(k)} + C_4) R_2^{(k)}) \right], \quad (22)$$

$$\text{де } R_2^{(k)} = R_2 \cdot (k \cdot \Delta t); C_2^{(k)} = C_2 \cdot (k \cdot \Delta t); \quad \left( \frac{dC_2^{(k)}}{dt} = \frac{dC_2(t)}{dt} \right); \quad t = k \cdot \Delta t.$$

Використовуючи рівняння (6) та початкові умови  $U_{C_2}(0) = 0$ , визначимо коефіцієнт  $p$ :

$$a_1^{(k)} \cdot p + a_0^{(k)} = 0; \quad (23)$$

$$p^{(k)} = -\frac{a_0^{(k)}}{a_1^{(k)}} = -\frac{1}{(C_2^{(k)} + C_4)R_2^{(k)}}. \quad (24)$$

Враховуючи рівняння (22), знайдемо миттєве значення  $U_{C_2B}^{(k)}(t)$ :

$$U_{C_2B}^{(k)}(t) = A^{(k)} e^{p^{(k)} \cdot (t - k \cdot \Delta t)} = A^{(k)} e^{-\frac{t - k \cdot \Delta t}{(C_2^{(k)} + C_4)R_2^{(k)}}}. \quad (25)$$

Знайдемо значення коефіцієнта  $A$  з рівняння

$$U_{C_2}^{(k)}(t) = U_{C_{2np}}^{(k)}(t) + A^{(k)} e^{-\frac{t - k \cdot \Delta t}{(C_2^{(k)} + C_4)R_2^{(k)}}}. \quad (26)$$

Враховуючи початкові умови для часового проміжку  $k \cdot \Delta t \leq t < (k + 1) \cdot \Delta t$ ,

$$U_{C_2}^{(k)}(k \cdot \Delta t) = U_{C_2}^{(k-1)}(k \cdot \Delta t); \quad (27)$$

$$A^{(k)} = U_{C_2}^{(k-1)}(k \cdot \Delta t) - U_{C_{2np}}^{(k)}(k \cdot \Delta t). \quad (28)$$

З урахуванням початкових умов  $\Delta t = \frac{S \cdot \Delta}{n} \gg S \cdot \tau^{(k)}$  (навіть у випадку  $n \approx 300$ ),  $\tau^{(k)}$  — стала часу кола на  $k$ -му інтервалі визначається, мс:

$$\tau^{(k)} = (C_2(k \cdot \Delta t) + C_4)R_2(k \cdot \Delta t). \quad (29)$$

Якщо  $n = 300$ , то  $\Delta t = 1,5 \cdot 10^{-4}$  с.

Це означає що всі вільні складові  $U_{C_2B}^{(k)}(t)$  є швидкоплинними: вони зникають значно раніше (від початку  $k$ -го часового проміжку) ніж цей проміжок закінчується, тобто далі залишається тільки вимушена складова  $U_{C_{2np}}^{(k)}(t)$ . Графічно зміну сталої в часі показано на рис. 4

Тому

$$A^{(k)} \approx U_{C_{2np}}^{(k-1)}(k \cdot \Delta t) - U_{C_{2np}}^{(k)}(k \cdot \Delta t). \quad (30)$$

Визначимо  $U_{C_2}(t)$

$$\begin{aligned} U_{C_2}(t) &= \sum_{k=0}^n \left\{ U_{C_2}^{(k)}(t) [l(t - k\Delta t) - l(t - (k+1) \cdot \Delta t)] \right\} = \\ &= \sum_{k=0}^n \left\{ U_{C_{2np}}^{(k)}(t) [l(t - k\Delta t) - l(t - (k+1) \cdot \Delta t)] \right\} + \sum_{k=0}^n \left\{ U_{C_{2B}}^{(k)}(t) [l(t - k \cdot \Delta t) - l(t - (k+1) \cdot \Delta t)] \right\}, \end{aligned} \quad (31)$$

де  $l(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t > 0 \end{cases}$  функція Хевісайда.

Враховуючи припущення  $U_{ав} \approx e$ , визначимо амплітудне  $I_3$  та миттєве  $i_3(t)$  значення струму, використовуючи заступну схему рис. 5.

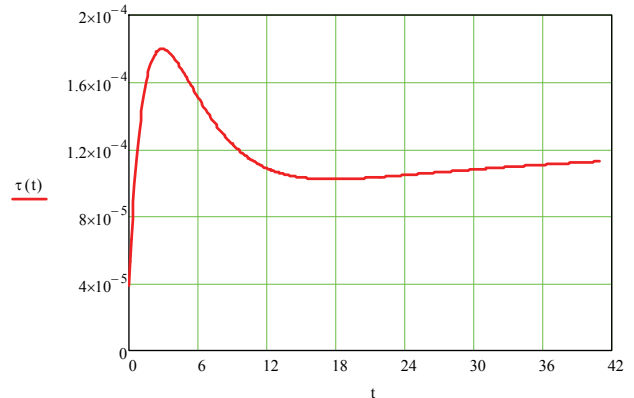
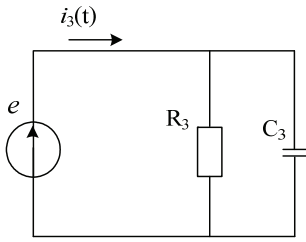


Рис. 4. Залежність вільної складової напруги від часу



$$\underline{I}_3 = E \left( \frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \right) = E \frac{1 + j\omega C_3 R_3}{R_3}; \quad (32)$$

$$i_3(t) = \frac{E_m}{R_3} \cdot \sqrt{1 + (\omega C_3 R_3)^2} \sin [\omega t + \psi_e + \arctg(\omega C_3 R_3)]. \quad (33)$$

За першим законом Кірхгофа, використовуючи заступну схему рис. 5, визначимо струм  $i_1(t)$ :

Рис. 5. Спрощена заступна схема дугогасильної камери

$$i_1(t) = i_2(t) + i_3(t) = C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} + U_{C_2} \frac{dC_2}{dt} + \frac{U_{C_2}}{R_2} + \frac{E_m}{R_3} \sqrt{1 + (\omega C_3 R_3)^2} \sin [\omega t + \psi_e + \arctg(\omega C_3 R_3)]. \quad (34)$$

Знайдемо значення падіння напруги на сенсорі  $R_1$

$$U_{R_1}(t) = R_1 i_1(t) = R_1 \left( C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} + U_{C_2} \frac{dC_2}{dt} + \frac{U_{C_2}}{R_2} + \frac{E_m}{R_3} \sqrt{1 + (\omega C_3 R_3)^2} \sin [\omega t + \psi_e + \arctg(\omega C_3 R_3)] \right). \quad (35)$$

Як виявляє попередній аналіз перехідного процесу в заданому колі вільні складові на всіх часових проміжках є не тільки швидкоплинними, але і маловпливовими (незначними), що дозволяє в рівнянні (14), знехтувати другою складовою і подавати перехідний процес виключно вимушеними складовими. Це пояснюється низькою швидкістю зміни  $C_{2t_i}$  та  $R_{2t_i}$  у часі порівняно зі швидкістю перебігу перехідних процесів, викликаних такою зміною параметрів за граничного переходу, коли  $n \rightarrow \infty$ , а  $t \rightarrow 0$ . Такий підхід дозволяє для аналізу перехідного процесу безпосередньо скористатися базовими положеннями символічного методу (методу комплексних амплітуд) [4].

Заступна схема електричних параметрів ДГК показана рис. 6.

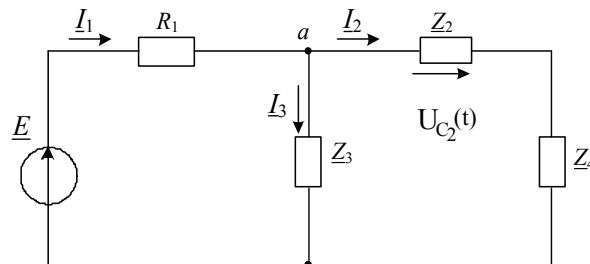


Рис. 6. Заступна схема заміщення ДГК елегазового вимикача:  $\underline{I}_1$ ;  $\underline{I}_2$ ;  $\underline{I}_3$ ;  $\underline{U}_{C_2}$  — комплексні амплітуди струмів та напруг, амплітудні значення та початкові фази яких явно залежать від часу,  $\underline{Z}_{2t_i}$  — комплексний опір, який також є функцією часу

Визначено комплексні опори в колі рис. 6:

$$\underline{Z}_{2t_i} = \frac{R_{2t_i}}{1 + j\omega C_{2t_i} R_{2t_i}}; \quad (36)$$

$$\underline{Z}_3 = \frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3}; \quad (37)$$

$$\underline{Z}_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}. \quad (38)$$

де  $R_{2t_i}$  — активний опір між контактами вимикача в момент часу  $t_i$ ;  $C_{2t_i}$  — ємнісний опір між контактами вимикача в момент часу  $t_i$ .

Використовуючи правила паралельно-последовного перетворення, визначимо повний опір кола

$$\underline{Z}_{\text{вх}i_1} = R_1 + \frac{Z_3 \left[ \underline{Z}_{2i_1} + \underline{Z}_4 \right]}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{2i_1} + \underline{Z}_4} = R_1 + \frac{\frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3} \left[ \frac{R_{2i_1}}{1 + j\omega C_{2i_1} R_{2i_1}} + \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \right]}{\frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3} + \frac{R_{2i_1}}{1 + j\omega C_{2i_1} R_{2i_1}} + \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}}. \quad (39)$$

За законом Ома знайдемо амплітудне  $\underline{I}_{1i_1}$  та миттєве  $i_1(t)$  значення струму

$$\underline{I}_{1i_1} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{\text{вх}i_1}} = \frac{\underline{E}}{R_1 + \frac{\frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3} \left[ \frac{R_{2i_1}}{1 + j\omega C_{2i_1} R_{2i_1}} + \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \right]}{\frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3} + \frac{R_{2i_1}}{1 + j\omega C_{2i_1} R_{2i_1}} + \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}}}; \quad (40)$$

$$i_1(t) = \left| \underline{I}_{1i_1}(t) \right| \cdot \sin(\omega t + \arg(\underline{I}_{1i_1}(t))). \quad (41)$$

Визначимо амплітудне  $\underline{U}_{\text{ав}}(t)$  та миттєве  $U_{\text{ав}}(t)$  значення падіння напруги

$$\underline{U}_{\text{ав}}(t) = \underline{I}_1(t) \cdot \frac{Z_3 \cdot \left[ \underline{Z}_{2i_1} + \underline{Z}_4 \right]}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{2i_1} + \underline{Z}_4} \approx E(t); \quad (42)$$

$$U_{\text{ав}}(t) = \left| \underline{U}_{\text{ав}}(t) \right| \sin(\omega t + \arg(\underline{U}_{\text{ав}}(t))). \quad (43)$$

Вираз (42) є математичною моделлю струму тестового сигналу, в якому  $\underline{Z}_{2i_1}$  змінюється відповідно до рівнянь (36)—(38) в залежності від операції, яку виконує вимикач.

Величина тестового сигналу у вигляді струму під час виконання технологічних операцій в певні моменти часу залежить від значення ємності між рухомим та нерухомим контактами. Ємність в свою чергу залежить від стану дугогасного середовища та відстані між рухомим та нерухомим контактами. На стан дугогасного середовища впливають різні домішки які утворюються під час дугогасіння та волога, яка може потрапити під час виконання заповнення вимикача елегазом та при втраті герметичності ДГК. На положення РКС в певні моменти часу впливає швидкість її переміщення, яка залежить від різних сил, таких як пружні сили пружин увімкнення та вимкнення, тертя в спряжених частинах привода, маси, інерції, тертя в контактах та інші.

Оскільки основною складовою яка впливає на значення струму тестового сигналу є ємність між контактами то характер зміни струму тестового сигналу буде подібний до характеру зміни швидкості руху рухомого контакту.

Як один із шляхів її вирішення, запропоновано контролювати струм тестового сигналу високої частоти, який протікає між контактами вимикача під час операції вмикання або вимикання. Для контролю струму тестового сигналу послідовно до контактів вимикача приєднують резистивний сенсор та високочастотний генератор. Паралельно сенсору за допомогою коаксіальних кабелів приєднують мікропроцесорний реєструючий прилад. В коло подається сигнал частотою 100 кГц та напругою 12 В. Подається сигнал на електромагніт вмикання або вимикання. Під час вмикання або вимикання вимикача мікропроцесорний реєструючий прилад запам'ятовує значення падіння напруги на сенсорі, кількість яких залежить від налаштувань та можливостей реєструючого приладу. З використанням програмних мікропроцесорного реєструючого приладу визначають позитивні амплітудні значення реєстрованої напруги та будують графік її залежності від часу. Використовуючи параметри резистивного сенсору та графік залежності позитивних амплітудних значень реєстрованої напруги будують графік залежності струму високочастотного сигналу, який протікає через сенсор від часу.

За формулою (43) знаходимо залежність швидкості зміни струму високочастотного сигналу від часу:

$$V_{I_n} \approx \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta I_n}{\Delta t_n} = \frac{I_n - I_{n+1}}{t_{n+1} - t_n}, \quad (44)$$

де  $n$  — порядковий номер виміру, а  $n = f(t)$ ,  $I_n$  — значення струму в момент часу  $t_n$ .

Використовуючи формулу (44) та особливості конструкції вимикача визначають залежності швидкості руху рухомого контакту від часу

$$V_k(t_n) = k_4 \cdot V_{I_n}, \quad (45)$$

де  $V_k(t)$  — швидкість руху рухомого контакту,  $k_4$  — коефіцієнт, який враховує особливості конструкції вимикача,  $V_{I_n}$  — швидкість зміни струму, який протікає через резистивний сенсор. Порівнюючи отриманий графік залежності швидкості руху рухомого контакту від часу зі зразковим графіком, отриманим під час його випробувань в справному стані на підприємстві-виробнику вимикача або еталонним, та графіком типових дефектів для вимикачів такої ж конструкції визначають можливий дефект вимикача. Аналізуючи базу даних типових дефектів, роблять висновок про технічний стан привідного механізму вимикача, дугогасильної камери та дугогасного середовища, про можливість подальшої експлуатації.

Таким чином, використовуючи запропонований спосіб, забезпечується визначення технічного стану високовольтного вимикача, а саме отримання залежності швидкості руху рухомого контакту вимикача від часу без використання сенсорів кутового та лінійного переміщення, визначення технічного стану привідного механізму, головних контактів та дугогасного середовища вимикача, без використання при цьому приладів для визначення хімічного аналізу дугогасного середовища.

### Висновки

Показано можливість визначення залежності швидкості руху рухомого контакту від часу без використання датчиків кутового та лінійного переміщення, і, як наслідок, можливість визначення технічного стану привідного механізму, дугогасильної камери та дугогасного середовища не використовуючи при цьому прилади для визначення хімічного аналізу дугогасного середовища.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимашова Л. В. Анализ повреждаемости выключателей 110—50 кВ / Л. В. Тимашова, И. Л. Шлейфман, И. А. Назаров / Высоковольтное коммутационное оборудование : V Международная научно-техническая конференция : материалы. — Москва, 2009.
2. Лежнюк П. Д. Розширення можливостей мікропроцесорних пристроїв контролю характеристик вимикачів / П. Д. Лежнюк, О. С. Рубаненко, Ю. В. Антонюк // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — 2004. — № 2 (25). — С. 119—121.
3. Кутін В. М. Вдосконалення методів діагностування високовольтних вимикачів / В. М. Кутін, О. С. Рубаненко, С. В. Мисенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 1. — С 112—113.
4. Аракелян В. Г. Элегазовое электротехническое оборудование. Технические требования к производству для обеспечения качества элегаза в оборудовании и меры обеспечения санитарно-гигиенической и экологической безопасности / В. Г. Аракелян // РД-16.066-05. — 2004 г.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 8.04.2016

**Рубаненко Олександр Євгенійович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: rubanenko@bk.ru;

**Ведміцький Юрій Григорович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця;

**Мисенко Сергій Васильович** — канд. техн. наук, заступник начальника служби підстанцій, e-mail: sergey\_mysenko@ukr.net .

Південно-Західна електроенергетична система, м. Вінниця



**O. Ye. Rubanenko<sup>1</sup>**  
**Yu. H. Vedmitskyi<sup>1</sup>**  
**S. V. Mysenko<sup>2</sup>**

## **Improving Working Methods of Technical Condition of High-Voltage Switches**

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University;

<sup>2</sup>South-western Electric Power System

*There has been substantiated the necessity of improvement of methods and means of technical diagnostics of high-voltage circuit breakers to increase their reliability in the field. There has been described the method for producing high-speed characteristics of the high-voltage circuit without using sensors angular and linear movement.*

**Keywords:** high voltage switch, speed characteristics, diagnosis, sensor, mathematical model.

**Rubanenko Oleksandr Ye.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Electrical Plants and Systems, e-mail: rubanenko@bk.ru;

**Vedmitskyi Yuri H.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measurements;

**Mysenko Sergii V.** — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Chief of Service Stations, e-mail: sergey\_mysenko@ukr.net

**A. E. Рубаненко<sup>1</sup>**  
**Ю. Г. Ведмицкий<sup>1</sup>**  
**С. В. Мисенко<sup>2</sup>**

## **Усовершенствование методов определения технического состояния высоковольтных выключателей**

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет;

<sup>2</sup>Юго-Западная энергетическая система

*Обосновывается необходимость усовершенствования методов и способов технического диагностирования высоковольтных выключателей для повышения их надежности в условиях эксплуатации. Описан способ получения скоростных характеристик высоковольтных выключателей без использования сенсоров углового и линейного перемещения.*

**Ключевые слова:** высоковольтный выключатель, скоростная характеристика, диагностирование, сенсор, математическая модель.

**Рубаненко Александр Евгениевич** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических станций и систем, e-mail: rubanenko@bk.ru;

**Ведмицкий Юрий Григорьевич** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теоретической электротехники и электрических измерений;

**Мисенко Сергей Васильевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника службы подстанций, e-mail: sergey\_mysenko@ukr.net