

## АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В КОАКСІАЛЬНОМУ КАБЕЛІ ПРИ КОНТРОЛІ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ МЕТОДОМ ПОВЕРНЕНОЇ НАПРУГИ

© Грабчук Б.Л., Михайлів В.І., 2007

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Приведений аналіз перехідних процесів, що протікають в коаксіальному кабелі з двошаровою ізоляцією на різних стадіях контролю стану ізоляції методом поверненої напруги. Встановлено часові залежності поверненої напруги, напруг на шарах ізоляції та напруженості поля в них. Досліджено залежності максимального значення поверненої напруги і часу, протягом якого воно досягається, від питомої провідності одного з шарів ізоляції. Отримані результати можуть бути використані для контролю стану ізоляції кабелів**

Надійність і економічні показники роботи систем електропостачання підприємств нафтової і газової промисловості, як і електроенергетичної системи в цілому, в значній степені залежать від надійності ізоляції обладнання, яка забезпечується комплексом профілактичних заходів. Зокрема, проводять різні вимірювання та випробування, кожне з яких пристосоване для виявлення дефектів певного типу [1-5].

Погіршення якості комбінованої ізоляції, поширеної у високовольтній техніці, у більшості випадків відбувається шляхом більш або менш однорідної зміни властивостей одного (чи кількох) шарів ізоляції, тоді як характеристики інших шарів залишаються практично незмінними. Це призводить до своєрідного характеру зміни властивостей ізоляції. Одним з методів виявлення зміни стану ізоляції в такому випадку може служити вимірювання поверненої напруги, при якому неоднорідна ізоляція витримується протягом певного часу при постійній напрузі, щоб у ній накопичився заряд абсорбції. Далі вона від'єднується від джерела напруги і електроди на дуже малий проміжок часу замикаються накоротко, після чого розмикаються. При цьому на ізоляції виникає напруга, яку називають поверненою. В [2] розглядається цей метод з використанням моделі у вигляді плоского конденсатора.

Метою такої роботи є аналіз електромагнітних процесів у коаксіальному кабелі з двошаровим діелектриком на різних стадіях випробування за методом поверненої напруги та використання отриманих результатів для контролю стану ізоляції.

Розглянемо електромагнітні процеси, що протікають в кабелі при контролі ізоляції за методом поверненої напруги на моделі у вигляді коаксіального кабелю з двошаровим діелектриком

(рис.1), довжина якого є набагато меншою від довжини електромагнітної хвилі. Нехай відносні діелектричні проникності першого і другого шарів діелектрика відповідно  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$ , а їх питомі електричні провідності  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$ . Схема заміщення кабелю наведена на рис.2.

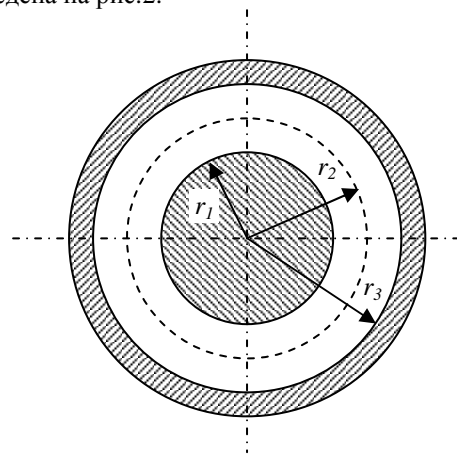


Рис. 1. Поперечний переріз кабелю

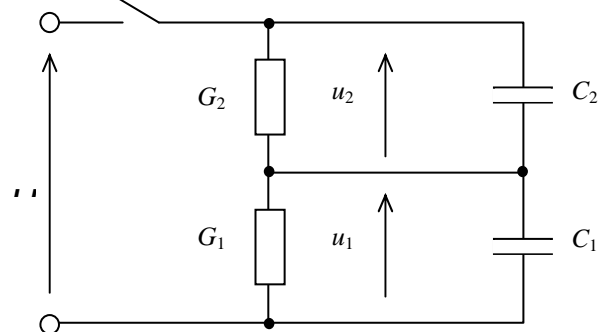


Рис. 2. Схема заміщення увімкнення кабелю на постійну напругу

При увімкненні кабеля на джерело постійної напруги  $U$  (рис. 2) протікає перехідний процес, що складається з двох стадій. Після замикання контактів настає перша дуже короткочасна стадія, під час якої через конденсатори протікають великі струми, які обмежуються опорами з'єднуючих проводів. Перша стадія протікає практично миттєво і після її закінчення напруги на шарах ізоляції визначаються лише їх ємностями [2,6]:

$$U_{10} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U = \frac{\epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} U}{\epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}; \quad (1)$$

$$U_{20} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U = \frac{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} U}{\epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}. \quad (2)$$

Напруженості електричного поля в шарах ізоляції на початку другої стадії будуть такими:

$$E_{10} = \frac{\epsilon_2 U}{r(\epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2})}; \quad (3)$$

$$E_{20} = \frac{\epsilon_1 U}{r(\epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2})}. \quad (4)$$

Протягом другої стадії перехідного процесу напруга шарів ізоляції відносно повільно змінюється до значень  $U_{1K}$ ,  $U_{2K}$ , які визначаються провідностями шарів і розраховуються так:

$$U_{1K} = \frac{G_2}{G_1 + G_2} U = \frac{\gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1} U}{\gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}; \quad (5)$$

$$U_{2K} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} U = \frac{\gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2} U}{\gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}. \quad (6)$$

Напруженості електричного поля в шарах ізоляції

$$E_{1K} = \frac{\gamma_2 U}{r(\gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2})}; \quad (7)$$

$$E_{2K} = \frac{\gamma_1 U}{r(\gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2})}. \quad (8)$$

При цьому на границі діелектриків нагромаджується вільний заряд абсорбції,

зумовлений міграційною поляризацією. Значення цього заряду на одиницю довжини кабеля в кінці другої стадії буде таким:

$$q_{ab} = C_1 U_{1K} - C_2 U_{2K} = \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_1\gamma_2 - \epsilon_2\gamma_1)U}{\gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}. \quad (9)$$

Звідси видно, що у випадку неоднорідної ізоляції, тобто за умови  $\gamma_2\epsilon_1 \neq \gamma_1\epsilon_2$  або  $\frac{\gamma_1}{\epsilon_1} \neq \frac{\gamma_2}{\epsilon_2}$

заряд абсорбції відмінний від нуля. Наведені співвідношення виражають умову неоднорідності ізоляції. Ступінь неоднорідності ізоляції можна охарактеризувати коефіцієнтом неоднорідності:

$$K_H = \frac{\gamma_2\epsilon_1}{\gamma_1\epsilon_2}. \quad (10)$$

Комбінована ізоляція кабелів навіть у нормальному стані є, як правило, неоднорідною. Під дією зовнішніх факторів, чи внаслідок процесів старіння, коли різні діелектрики неоднаково змінюють свої властивості, ступінь неоднорідності може зростати, що призведе до збільшення заряду абсорбції.

Під час перехідного процесу напруги і напруженості поля змінюються за законами

$$\begin{aligned} u_1 &= U_{1K} + (U_{10} - U_{1K})e^{-t/\tau}; \\ u_2 &= U_{2K} + (U_{20} - U_{2K})e^{-t/\tau}; \\ E_1 &= E_{1K} + (E_{10} - E_{1K})e^{-t/\tau}; \\ E_2 &= E_{2K} + (E_{20} - E_{2K})e^{-t/\tau}, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $\tau$  – стала часу, яка визначається так:

$$\tau = \frac{\epsilon_0(\epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2})}{\gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}. \quad (12)$$

Після цього кабель від'єднується від джерела напруги і на дуже короткий проміжок часу  $\Delta t$  замикається накоротко (рис. 3), внаслідок чого обидва шари ізоляції являються увімкненими паралельно. Перехідний процес як і в попередньому випадку складається з двох стадій, тривалість яких різко відрізняється. Перемикання контактів з положення 1 в положення 2 призводить до протікання великих струмів, значення яких обмежується опорами кола закорочення  $R_3$ . В результаті напруга на конденсаторах практично миттєво вирівнюється до значення  $U_c$ . Стала часу кола на першій стадії перехідного процесу  $\tau_{12} = (C_1 + C_2)R_3$ , а на другій стадії

$$\tau_{22} = \frac{C_1 + C_2}{G_1 + G_2} = (C_1 + C_2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{і } \epsilon \text{ на багато}$$

порядків більшою. Оскільки проміжок  $\Delta t$  вибирають таким, щоб  $\tau_{12} < \Delta t \ll \tau_{22}$ , то за час  $\Delta t$  заряд абсорбції істотно не зміниться.

Напруга  $U_c$  на шарах ізоляції

$$U_c = \frac{q_{аб}}{C_1 + C_2} = \frac{(\epsilon_1 \gamma_2 - \epsilon_2 \gamma_1) \ln \frac{r_2}{r_1} \ln \frac{r_3}{r_2} U}{(\gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1})(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1})}. \quad (13)$$

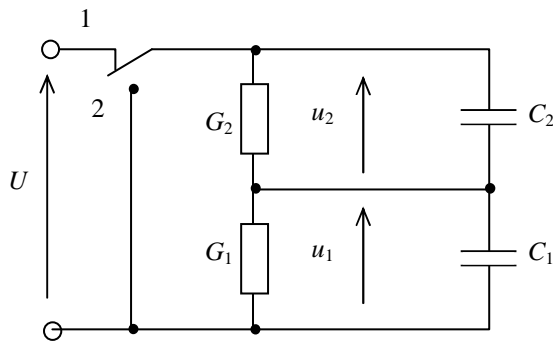


Рис. 3. Схема заміщення короткого замикання кабеля

Після миттєвого замикання виводи кабеля розмикаються (рис.4) і кожний конденсатор розряджається через опір своєї ізоляції. При цьому напруги на шарах ізоляції змінюються в часі так:

$$u'_1 = U_c e^{\alpha_1 t} = U_c e^{-\frac{t}{\tau_1}}; \quad u'_2 = U_c e^{\alpha_2 t} = U_c e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (14)$$

$$\text{де } \alpha_1 = -\frac{\gamma_1}{\epsilon_0 \epsilon_1}, \quad \alpha_2 = -\frac{\gamma_2}{\epsilon_0 \epsilon_2}.$$

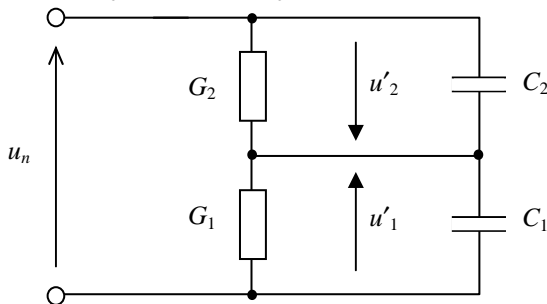


Рис. 4. Схема заміщення при розімкненні виводів кабеля

Повернена напруга на виводах кабеля  $u_n$  буде такою:

$$u_n = u'_1 - u'_2 = \frac{(\epsilon_1 \gamma_2 - \epsilon_2 \gamma_1)}{(\gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1})} \times \frac{\ln \frac{r_2}{r_1} \ln \frac{r_3}{r_2}}{r_1 r_2} U (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}). \quad (15)$$

Часова залежність поверненої напруги при  $\gamma_2 = 10\gamma_1$  наведена на рис. 5.

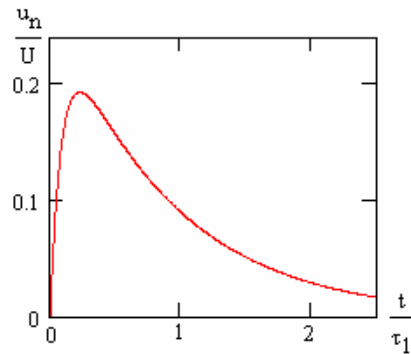


Рис. 5. Зміна в часі поверненої напруги •

Визначимо час  $t_m$  після розмикання виводів кабеля, через який повернена напруга досягає максимуму:

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} = U_c (\alpha_1 e^{\alpha_1 t_m} - \alpha_2 e^{\alpha_2 t_m}) = 0,$$

$$\text{звідки } t_m = \frac{\ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{\ln K_H}{\alpha_1 (1 - K_H)}. \quad (16)$$

Максимальне значення поверненої напруги буде таким:

$$U_m = U_c (\alpha_1 e^{\alpha_1 t_m} - \alpha_2 e^{\alpha_2 t_m}) = U_c (e^{\frac{\ln K_H}{1 - K_H}} - e^{-\frac{K_H \ln K_H}{1 - K_H}}).$$

При збільшенні коефіцієнта неоднорідності ізоляції внаслідок старіння чи дії зовнішніх факторів максимальне значення поверненої напруги зростає, а час його досягнення зменшується. Отже, повернена напруга несе інформацію про ступінь неоднорідності ізоляції. За зміною форми і значення цієї напруги можна контролювати стан неоднорідної ізоляції кабеля при зміні діелектричних властивостей окремих шарів. На рис. 6 наведені залежності  $U_m = f(\gamma_2)$  і  $t_m = f(\gamma_2)$  для випадку, коли в результаті зволоження чи дії інших факторів зростає питома провідність  $\gamma_2$  другого шару ізоляції, а інші параметри залишаються практично незмінними. Критерій неприпустимого погіршення стану ізоляції

кабелів встановлюються на основі експериментальних досліджень.

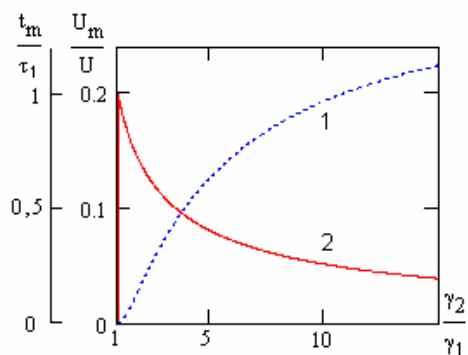


Рис. 6. Залежність максимального значення поверненої напруги і часу його досягнення від питомої провідності  $\gamma_2$

Таким чином проведено аналіз електромагнітних процесів в коаксіальному кабелі з двошаровою ізоляцією на різних стадіях контролю ізоляції методом поверненої напруги. Показано, що повернена напруга залежить від коефіцієнта

неоднорідності ізоляції. Форма і значення поверненої напруги є інформативними параметрами, які можуть бути використані для контролю стану неоднорідної ізоляції кабелів.

1. Богатенков И.М., Бочаров Ю. Н., Гуменова Н.И, Иманов Г. М., Под ред. Кучинского Г. С. *Техника высоких напряжений* – СПб.: Энергоатомиздат, 2003. – 608 с.
2. *Техника высоких напряжений. Под ред. Разевига Д. В.* – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
3. Ларина Э. Т. *Силовые кабели и кабельные линии.* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.
4. Сви П. М. *Контроль изоляции оборудования высокого напряжения.* – М.: Энергия, 1988. – 126 с.
5. *Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения.* М. Бейер, В. Бек и др. Пер. с нем. Под ред. В. П. Ларионова. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 555 с.
6. Бессонов Л. А. *Теоретические основы электротехники.* – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.