

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 КВ

Утегулов Б.Б.

Аннотация

В практике эксплуатации электрических сетей требуется производить контроль состояния изоляции. Так как своевременный контроль состояния изоляции приводит к обеспечению ресурсосбережения и повышение уровня электробезопасности собственных нужд напряжением 6 кВ электрических станций.

В работе предлагается способ определения параметров изоляции в симметричной сети напряжением выше 1000 В собственных нужд электростанций, основанный на измерении величин модулей напряжения нулевой последовательности и напряжения фазы относительно земли до и после подключения активной дополнительной проводимости между этой фазой электрической сети и землей.

Проведены исследования разработанного способа определения параметров изоляции в симметричной сети напряжением выше 1000 В собственных нужд электростанций на достоверность. Где при применении способа определения параметров изоляции в симметричной сети напряжением 6 кВ собственных нужд электростанций, на основе анализа погрешностей для каждой конкретной сети подбирается величина активной дополнительной проводимости, таким образом, чтобы обеспечить требуемую удовлетворительную точность при определении. Анализ погрешности показал, что разработанный способ обеспечивает удовлетворительную точность при определении параметров изоляции в действующих электроустановках напряжением 6 кВ собственных нужд тепловых электростанций.

Ключевые слова: ток, напряжение, нейтраль, сеть, проводимость.

Для обеспечения роста уровня электробезопасности необходимо знать состояние электроустановок под рабочим напряжением. Следует отметить, что активная проводимость характеризует изоляционные свойства диэлектрика, емкостная

проводимость соответственно характеризует емкость сети, то есть количество подключенных электроприемников, и протяженность воздушных и кабельных линий, а полная проводимость характеризует величину тока однофазного

замыкания на землю. Поэтому в практике эксплуатации электроустановок необходимо знать активную, емкостную и полную проводимости изоляции фаз электрической сети относительно земли. Это позволит правильно выбрать стратегию разработки организационных и технических мероприятий по повышению уровня электробезопасности в сетях собственных нужд напряжением 6 кВ тепловых электростанций [1 – 6].

Для повышения уровня электробезопасности в сетях напряжением выше 1000 В следует разработать способ определения параметров изоляции под рабочим напряжением. Разработанный способ должен быть простым, безопасным и обеспечивать удовлетворительную точность при определении искомых величин.

Для разработки способа определения параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В используем известные из теоретических основ электротехники математические зависимости, описывающие трехфазную электрическую сеть и

- активная проводимость изоляции сети

$$g = \frac{\omega C}{\sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_0^2}} - 1 \times g_0, \quad (1)$$

- емкостная проводимость изоляции сети

ее круговую диаграмму.

Разработан способ определения параметров изоляции в симметричной сети напряжением 6 кВ собственных нужд электростанций, основанный на подключении активной дополнительной проводимости между фазой электрической сети и землей и измерении величины модуля напряжения фазы относительно земли, до и после подключения активной дополнительной проводимости и измерении величин модулей напряжения нулевой последовательности и напряжения фазы относительно земли при подключенной активной дополнительной проводимости между этой фазой и землей.

По измеренным величинам модулей U_{ϕ} , $U_{\phi 0}$ – напряжения фазы относительно земли до и после подключения активной дополнительной проводимости величине U_0 – напряжения нулевой последовательности, а также с учетом величины g_0 – активной дополнительной проводимости производится определение параметров изоляции по новым математическим уравнениям:

$$b = \frac{U_{\phi} U_{\phi 0} g_0}{U_0 \sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_0^2}}. \quad (2)$$

Полная проводимость изоляции определяется как геометрическая сумма между активной и емкостной проводимостей изоляции сети.

Одним из важных приоритетов разработанных методов является точность определения искомых величин. При косвенном определении параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью ставятся жесткие требования относительно обеспечения достоверности значений искомых величин.

Произведен анализ погрешности разработанного способа определения параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью, основанный на измерении величины модуля напряжения фазы относительно земли до и после подключения между ней и землей активной дополнительной проводимости.

При определении параметров в сети с изолированной нейтралью, по результатам измерений величины модуля напряжения фазы относительно земли до и после подключения между ней и землей активной дополнительной проводимости с учетом величины активной дополнительной проводимости, возникает необходимость в установлении методической погрешности полученных математических зависимостей.

На основе анализа

погрешности разрабатываются практические рекомендации, которые обеспечивают:

- нормальную работу электроприемников при производстве измерений;
- удовлетворительную точность разработанного метода определения параметров в сети с изолированной нейтралью, с достижением безопасности производства работ в электроустановках, а также с обеспечением простоты и удобства измерений.

На точность определения параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В влияет величина тангенса угла диэлектрических потерь.

При анализе погрешности разработанного метода определения параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В определяется отношение относительной методической погрешности к погрешности измерительных приборов, измеряющих величины модулей напряжений и величину активного сопротивления, которое используется в качестве дополнительной проводимости.

Анализ погрешности разработанного метода определения параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В

производится с использованием основных положений теории ошибок и теоретических основ электротехники.

Относительная среднеквадратичная погрешность

для активной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В определяется из математической зависимости (1):

$$g = \frac{C}{e} \frac{U_{\phi}}{\sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_o^2}} - 1 \times g_o,$$

где U_{ϕ} , $U_{\phi 0}$, U_o , g_o – величины, определяющие активную проводимость изоляции в симметричной сети, получаемые прямым измерением.

Относительная среднеквадратичная погрешность способа определения активной проводимости изоляции в симметричной сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В определяется из выражения [7 – 11]:

$$e_g = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{\frac{\partial g}{\partial U_{\phi}}}{g}^2 (DU_{\phi})^2 + \frac{\frac{\partial g}{\partial U_{\phi 0}}}{g}^2 (DU_{\phi 0})^2 + \frac{\frac{\partial g}{\partial U_o}}{g}^2 (DU_o)^2 + \frac{\frac{\partial g}{\partial g_o}}{g}^2 (Dg_o)^2}, \quad (3)$$

где $\frac{\partial g}{\partial U_{\phi}}$; $\frac{\partial g}{\partial U_{\phi 0}}$; $\frac{\partial g}{\partial U_o}$; $\frac{\partial g}{\partial g_o}$; – частные производные функции $g = f(U_{\phi}; U_{\phi 0}; U_o; g_o)$.

Определяем частные производные функции $g = f(U_{\phi}; U_{\phi 0}; U_o; g_o)$ по переменным U_{ϕ} ; $U_{\phi 0}$; U_o ; g_o :

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial U_{\phi}} &= \frac{g_o}{\sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_o^2}}; \\ \frac{\partial g}{\partial U_{\phi 0}} &= - \frac{U_{\phi} U_{\phi 0} g_o}{\sqrt{(U_{\phi 0}^2 + U_o^2)^3}}; \\ \frac{\partial g}{\partial U_o} &= - \frac{U_{\phi} U_o g_o}{\sqrt{(U_{\phi 0}^2 + U_o^2)^3}}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial g}{\partial g_o} = \frac{U_\phi - \sqrt{U_{\phi o}^2 + U_o^2}}{\sqrt{U_{\phi o}^2 + U_o^2}}.$$

Здесь DU_ϕ ; $DU_{\phi o}$; DU_o ; Dg_o – абсолютные погрешности прямых измерений величин U_ϕ ; $U_{\phi o}$; U_o ; g_o , которые определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} DU_\phi &= U_\phi DU_{\phi^*}; \\ DU_{\phi o} &= U_{\phi o} DU_{\phi o^*}; \\ DU_o &= U_o DU_{o^*}; \\ Dg_o &= g_o Dg_{o^*}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения погрешности измерительных приборов принимаем, что $DU_{\phi^*} = DU_{\phi o^*} = DU_{o^*} = Dg_{o^*} = D$,

где DU_{ϕ^*} ; $DU_{\phi o^*}$; DU_{o^*} – относительная погрешность измерительных цепей напряжений;

Dg_{o^*} – относительная погрешность измерительного прибора, измеряющего величину дополнительной проводимости, которая подключается между одной из фаз электроустановки и землей.

Решая уравнение (3), подставив в него значения частных производных уравнения (4) и значения частных абсолютных погрешностей (5), при этом полагая, что $DU_* = \Delta R_*^{-1} = \Delta$, получаем математическую зависимость определения случайной относительной среднеквадратичной погрешности для активной проводимости изоляции сети напряжением выше 1000 В:

$$e_g = \frac{DU_\phi}{U_\phi - \sqrt{U_{\phi o}^2 + U_o^2}} \sqrt{2 + \frac{U_{\phi o}^4 + U_o^4}{(U_{\phi o}^2 + U_o^2)^2} - \frac{2\sqrt{U_{\phi o}^2 + U_o^2}}{U_\phi} + \frac{U_{\phi o}^2 + U_o^2}{U_\phi^2}}. \quad (6)$$

Полученное уравнение (6) выразим в относительных единицах и произведем ее исследование в среде Mathcad:

$$e_g = \frac{DU_\phi}{1 - \sqrt{U_{\phi o^*}^2 + U_{o^*}^2}} \sqrt{2 + \frac{U_{\phi o^*}^4 + U_{o^*}^4}{(U_{\phi o^*}^2 + U_{o^*}^2)^2} - 2\sqrt{U_{\phi o^*}^2 + U_{o^*}^2} + U_{\phi o^*}^2 + U_{o^*}^2}, \quad (7)$$

$$\text{где } U_{\phi o^*} = \frac{U_{\phi o}}{U_\phi}, \quad U_{o^*} = \frac{U_o}{U_\phi}.$$

Определяем случайную относительную среднеквадратичную погрешность для емкостной проводимости изоляции сети напряжением выше 1000 В, по полученной математической зависимости (2):

$$b = \frac{U_{\phi} U_{\phi 0} g_0}{U_0 \sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_0^2}},$$

где U_{ϕ} ; $U_{\phi 0}$; U_0 ; g_0 – величины, определяющие емкостную проводимость изоляции в симметричной сети, получаемые прямым измерением:

$$e_b = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\partial b}{\partial U_{\phi}}^2 (DU_{\phi})^2 + \frac{\partial b}{\partial U_{\phi 0}}^2 (DU_{\phi 0})^2 + \frac{\partial b}{\partial U_0}^2 (DU_0)^2 + \frac{\partial b}{\partial g_0}^2 (Dg_0)^2}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial b}{\partial U_{\phi}}$; $\frac{\partial b}{\partial U_{\phi 0}}$; $\frac{\partial b}{\partial U_0}$; $\frac{\partial b}{\partial g_0}$; – частные производные функции $b = f(U_{\phi}; U_{\phi 0}; U_0; g_0)$.

Определяем частные производные функции $b = f(U_{\phi}; U_{\phi 0}; U_0; g_0)$ по переменным U_{ϕ} ; $U_{\phi 0}$; U_0 ; g_0 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial b}{\partial U_{\phi}} &= \frac{g_0}{U_0} \sqrt{\frac{U_{\phi 0}^2}{U_{\phi 0}^2 + U_0^2}}; \\ \frac{\partial b}{\partial U_{\phi 0}} &= \frac{U_{\phi} g_0}{(U_{\phi 0}^2 + U_0^2) \sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_0^2}}; \\ \frac{\partial b}{\partial U_0} &= - \frac{U_{\phi} U_{\phi 0} g_0 (U_{\phi 0}^2 + 2U_0^2)}{U_0^2 (U_{\phi 0}^2 + U_0^2) \sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_0^2}}; \\ \frac{\partial b}{\partial g_0} &= \frac{U_{\phi}}{U_0} \sqrt{\frac{U_{\phi 0}^2}{U_{\phi 0}^2 + U_0^2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь DU_{ϕ} ; $DU_{\phi 0}$; DU_0 ; Dg_0 – абсолютные погрешности прямых измерений величин U_{ϕ} ; $U_{\phi 0}$; U_0 ; g_0 , которые определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
DU_{\phi} &= U_{\phi} DU_{\phi}^*; \\
DU_{\phi_0} &= U_{\phi_0} DU_{\phi_0}^*; \\
DU_o &= U_o DU_o^*; \\
Dg_o &= g_o Dg_o^*.
\end{aligned}
\tag{10}$$

Для определения погрешности измерительных приборов принимаем, что $DU_{\phi}^* = DU_{\phi_0}^* = DU_o^* = Dg_o^* = D$,

где DU_{ϕ}^* ; $DU_{\phi_0}^*$; DU_o^* – относительная погрешность измерительных цепей напряжений;

Dg_o^* – относительная погрешность измерительного прибора, измеряющего величину дополнительной проводимости, которая подключается между одной из фаз электроустановки и землей.

Решая уравнение (8) подставив в него значения частных производных уравнения (9) и значения частных абсолютных погрешностей (10), при этом полагая, что $DU_* = \Delta R_*^{-1} = \Delta$, получаем математическую зависимость определения случайной относительной среднеквадратичной погрешности для емкостной проводимости изоляции сети напряжением выше 1000 В:

$$e_b = D \sqrt{4 + \frac{U_o^2 + 2U_o^4 - U_{\phi_0}^4}{(U_{\phi_0}^2 + U_o^2)^2}}.
\tag{11}$$

Полученное уравнение (11) выразим в относительных единицах и произведем ее исследование в среде Mathcad:

$$e_b = D \sqrt{4 + \frac{U_*^2 + 2U_*^4 - 1}{(1 + U_*^2)^2}},
\tag{12}$$

где $U_* = \frac{U_o}{U_{\phi_0}}$.

Случайная относительная среднеквадратичная погрешность способа определения полной проводимости изоляции в симметричной сети напряжением 6 кВ определяется по формуле Пифагора и может быть представлена в виде:

$$e_y = \frac{y_*}{D} = \frac{1}{y} \sqrt{\frac{\partial y}{\partial g}^2 Dg^2 + \frac{\partial y}{\partial b}^2 Db^2},
\tag{13}$$

или

$$e_y = \frac{y^*}{D} = \frac{\sqrt{(1 - \operatorname{tg}^2 d)^2 \frac{aDg}{cD\varnothing} \ddot{o}^2 + \frac{aDb}{cD\varnothing} \ddot{o}^2}}{\operatorname{tg}^2 d}. \quad (14)$$

Решая совместно уравнения (14), (6) и (11), определяем случайную относительную среднеквадратичную погрешность полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В, выраженную через напряжение фазы относительно земли до и после подключения между ней и землей активной дополнительной проводимости:

$$e_y = \frac{y}{D} = \frac{\sqrt{(1 - \operatorname{tg}^2 d)^2 * \left[\frac{U_\phi}{1 - \sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_o^2}} \sqrt{2 + \frac{U_{\phi 0}^4 + U_o^4}{(U_{\phi 0}^2 + U_o^2)^2} - \frac{2\sqrt{U_{\phi 0}^2 + U_o^2}}{U_\phi} + \frac{U_{\phi 0}^2 + U_o^2}{U_\phi^2}} \ddot{o}^2 + \frac{U_o^2 + 2U_o^4 - U_{\phi 0}^4}{(U_{\phi 0}^2 + U_o^2)^2} \ddot{o}^2 \right]}}{\operatorname{tg}^2 d}. \quad (15)$$

Полученное уравнение (15) выразим в относительных единицах:

$$e_y = \frac{y}{D} = \frac{\sqrt{(1 - \operatorname{tg}^2 d)^2 * \left[\frac{1}{1 - \sqrt{U_{\phi 0}^{*2} + U_o^{*2}}} \sqrt{2 + \frac{U_{\phi 0}^{*4} + U_o^{*4}}{(U_{\phi 0}^{*2} + U_o^{*2})^2} - \frac{2\sqrt{U_{\phi 0}^{*2} + U_o^{*2}}}{1} + \frac{U_{\phi 0}^{*2} + U_o^{*2}}{1}} \ddot{o}^2 + \frac{U_o^{*2} + 2U_o^{*4} - U_{\phi 0}^{*4}}{(U_{\phi 0}^{*2} + U_o^{*2})^2} \ddot{o}^2 \right]}}{\operatorname{tg}^2 d}, \quad (16)$$

$$\text{где } U_{\phi 0}^* = \frac{U_{\phi 0}}{U_\phi}, \quad U_o^* = \frac{U_o}{U_\phi}.$$

На основе полученных результатов случайных относительных среднеквадратичных погрешностей определения активной, емкостной и полной проводимостей изоляции в симметричной сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В, находящейся под рабочим напряжением, строим зависимости:

$$e_g = \frac{D_g}{D} = f(U_{\phi o^*}; U_{o^*});$$

$$e_b = \frac{D_y}{D} = f(U_*);$$

$$e_y = \frac{D_b}{D} = f(U_{\phi o^*}; U_{o^*}; \text{tg}\delta),$$

представленные на рис. 1, рис. 2 и рис. 3.

Полученные математические зависимости относительных среднеквадратичных погрешностей, активной – e_g , емкостной – e_b и полной – e_y проводимостей изоляции фаз электрической сети с изолированной нейтралью, представленные в графическом исполнении (на рис. 1., рис. 2., рис. 3), показывают, что величина активной дополнительной проводимости g_o , которая вводится между фазой электрической сети и землей, влияет на изменение погрешности в зависимости от достоверности искомых величин.

Анализ погрешности показывает, что с целью обеспечения требуемой точности для каждой конкретной сети подбирается величина активной дополнительной проводимости.

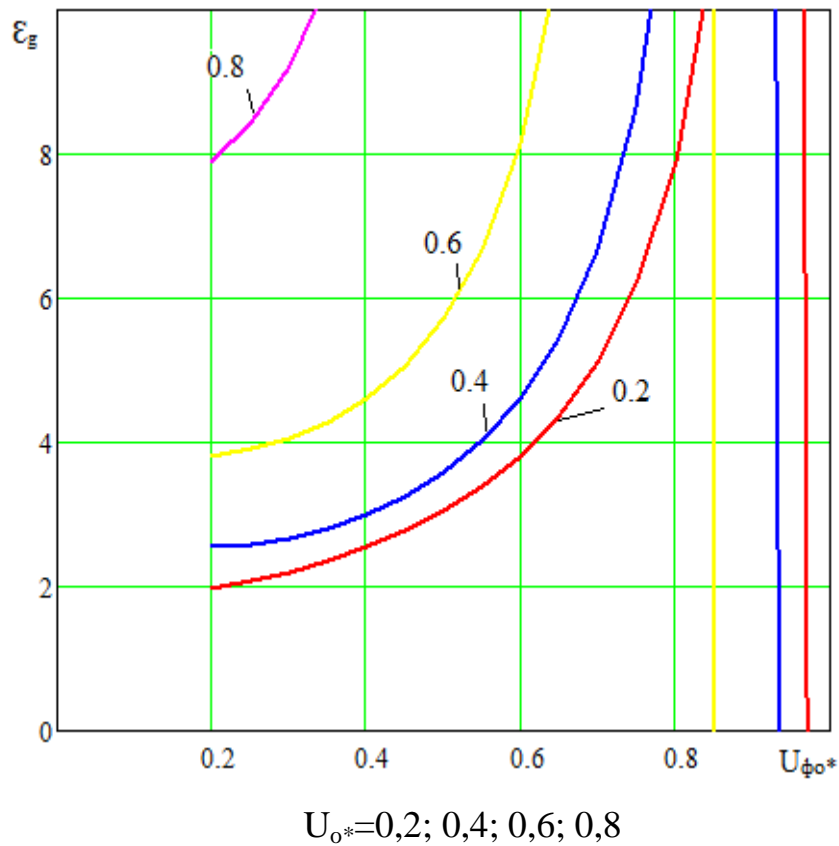


Рисунок 1 – Относительные среднеквадратичные погрешности определения активной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В

Исследования графической иллюстрации рис. 1, показывает, что при определении активной проводимости изоляции фаз электрической сети относительно земли подбирается, такая активная дополнительная проводимость g_0 ,

чтобы $U_{\phi_0^*} = 0,2 - 0,7$, для значений $U_{0^*} = 0,2; 0,4; 0,6$, тогда погрешность не будет, превышает 10 % при использовании измерительных приборов кл. точности 1.0.

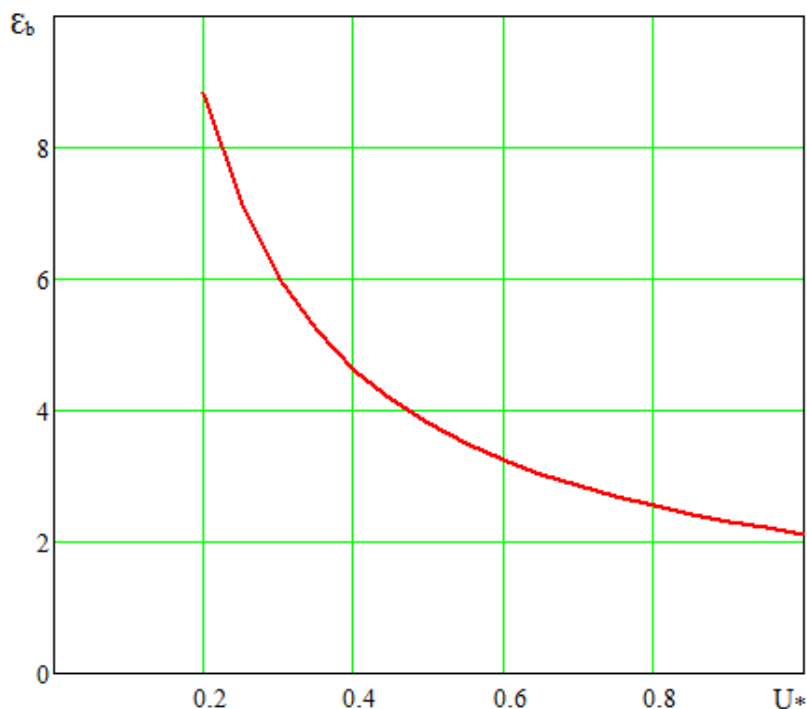
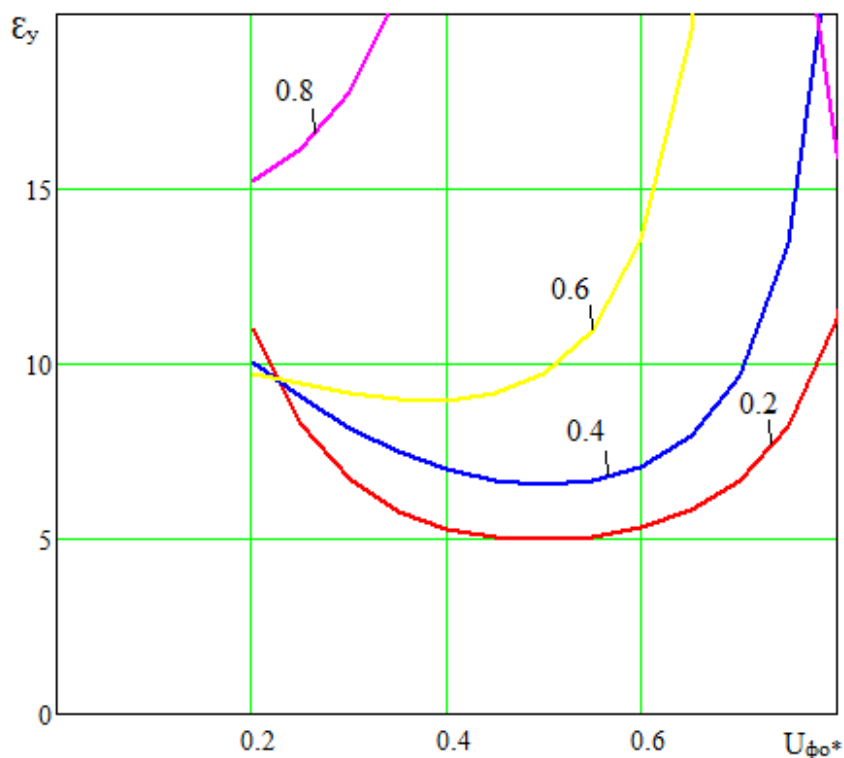


Рисунок 2 – Относительные среднеквадратичные погрешности определения емкостной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В



$$U_{o^*}=0,2; 0,4; 0,6; 0,8$$

Рисунок 3 – Относительные среднеквадратичные погрешности определения полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В

При определении емкостной проводимости изоляции фаз электрической сети относительно земли, на основе графической иллюстрации рис. 2, производим подбор активной дополнительной проводимости g_o таким образом, чтобы $U_{o^*} = 0,2 - 0,8$ для обеспечения погрешности до 10 %, при использовании измерительных приборов с кл. точности 1,0.

При определении полной проводимости изоляции фаз электрической сети относительно земли подбираем, такую активную дополнительную проводимость g_o , что бы при изменений фазных напряжений в относительных единицах в пределах $U_{\phi o^*} = 0,2 - 0,5$, при тангенса угла диэлектрических

потерь $\text{tg}\delta = 0,8$, для значений $U_{o^*} = 0,2; 0,4$ и $0,6$, погрешность не превышает 10 % при использовании измерительных приборов кл. точности 1,0, согласно рис. 3.

Анализ графиков также показывает, что при использовании приборов с классом точности 0,5 погрешности определения активной, емкостной и полной проводимостей не превышают 5 %.

На основе вышеизложенного следует, что разработанный способ обеспечивает удовлетворительную точность при определении параметров изоляции в трехфазной симметричной электрической сети с изолированной нейтралью, а также простоту и безопасность производства работ в действующих

электроустановках напряжением 6 кВ собственных нужд тепловых электростанций.

Список литературы

1 Гордон Г.Ю., Вайнштейн Л.И. Электротравматизм и его предупреждение. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

2 Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. Учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов. – М.: Энергия, 1979. – 407 с.

3 Серов В.И., Щуцкий В.И., Ягудаев Б.М. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий. – М.: Наука, 1985. – 136 с.

4 Щуцкий В.И., Чеботаев Н.И., Утегулов Б.Б. Повышение безаварийности и уровня электробезопасности электроустановок 6 кВ угольных разрезов // Известия вузов. Горный журнал. 1983. № 10. С. 84-90.

5 Щуцкий В.И., Чеботаев Н.И., Бойко Ф.К., Утегулов Б.Б. Состояние изоляции и тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6 кВ карьеров производственного объединения “Экибастузуголь” // Известия вузов. Горный журнал. 1982. № 5. – С. 95-97.

6 Электробезопасность в горнодобывающей промышленности // Л.В. Гладилин, В.И. Щуцкий, Ю.Г. Бацежев, Н.И. Чеботаев. – М.: Недра., 1977. – 327 с.

7 Утегулов Б.Б. Метод определения параметров изоляции трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью // Научные труды II – международного симпозиума “Математические методы в электроэнергетике”. – ПНР, – Закопане, 1988. – С. 139-146.

8 Гладилин Л.В., Утегулов Б.Б. Анализ погрешности метода определения параметров изоляции в трехфазных электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В // Известия вузов. Горный журнал. 1980. №8. – С. 94-97.

9 Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. – 3-е изд., испр. и доп. – Л.: Наука, 1968. – 97 с.

10 Utegulov, B., Utegulov, A., Begentayev, M., Zhumazhanov, S., Zhakipov, N., «Method for determining parameters of isolation network voltage up to 1000 V in mining enterprises» Source of the Document Proceedings of the IASTED International Conference on Power and Energy Systems and Applications, PESA 2011.

11 Utegulov, B., Utegulov, A., Begentayev, M., Zhakipov, N., Sadvakasov, T., «Method for determining the insulation in asymmetric networks with voltage up to 1000 V in mining enterprises» Source of the Document Proceedings of the IASTED International Conference on Power and Energy Systems and Applications, PESA 2011.

Summary

In operation of electrical networks practice it is required to make the control of insulation condition. Since timely monitoring of insulation condition leads to ensure resource saving and improving the electrical safety of own needs of 6 kV power stations.

The paper proposes a method for determining the insulation parameters in symmetrical network of voltage above 1000 V of power plants' own needs, based on the measurement values of modules of zero-sequence voltage and phase-to-earth voltage before and after connection of additional active conductivity between this phase of the electrical network and earth.

The researches of the developed method of determining the insulation parameters in symmetrical network of voltage above 1000 V of power plants own needs on the reliability were conducted. Where in the application of the method for determining the insulation parameters in symmetric networks with voltage of 6 kV of power plants' own needs, based on the analysis of errors for each specific network the magnitude of the additional active conductivity is selected, thus to provide the required satisfactory accuracy in the determination. The error analysis showed that the developed method provides satisfactory accuracy in determining the insulation parameters in an existing electrical installation with voltage 6 kV of own needs of thermal power plants.