

# Метод непрерывного определения комплексных проводимостей изоляции в рабочих режимах электрических присоединений 6–10 кВ

ГРЕБЧЕНКО Н.В.

*Предложен метод оперативной оценки состояния изоляции электрических присоединений 6–10 кВ, основанный на непрерывном расчете комплексных проводимостей изоляции фаз по результатам периодического измерения мгновенных значений фазных токов и напряжений фаз по отношению к земле. Параметры изоляции определяются в результате решения системы линейных алгебраических уравнений итерационными методами. Метод контроля может использоваться на электрических присоединениях любого типа и не требует дополнительной установки измерительных трансформаторов.*

**Ключевые слова:** электрическое присоединение, комплексная проводимость, электрическая изоляция, рабочий режим, метод расчета

Своевременность выявления дефектов изоляции электрооборудования обеспечивается только в результате непрерывного контроля параметров изоляции. Во многих случаях возникновение дефектов изоляции или ухудшение ее состояния (старение, увлажнение, загрязнение) вызывает снижение активного сопротивления изоляции. При этом достаточно часто изменяется не только активная проводимость, но и емкостная [1]. Поэтому наиболее полно состояние изоляции характеризуется ее комплексной проводимостью.

Известные методы определения комплексной проводимости изоляции имеют недостатки, которые не позволяют их применять для непрерывного контроля, а также они не пригодны для присоединений кабель—двигатель и кабель—трансформатор. Например, способы определения параметров изоляции фаз сети относительно земли основаны на создании временной несимметрии путем подключения емкости между одной из фаз и землей [2, 3]. Для реализации этих способов необходимо отключение присоединения на время выполнения измерений. В [4] предложен способ определения проводимости изоляции по отношению к земле по результатам измерения текущих значений режимных параметров в начале и конце линии. Способ применим для транзитных линий. При его применении на присоединениях типа ка-

*A method of online assessment of the condition of the insulation of 6-10 kV connections is proposed. According to the method proposed, complex admittances of phase insulation are calculated continuously from periodic measurements of instantaneous phase currents and phase-to-ground voltages. The parameters of the insulation are determined from a solution of a system of linear algebraic equations using iteration methods. The proposed method of monitoring can be used for electrical connections of any type, and it does not need additional instrument transformers to be installed.*

**Key words:** electrical connection, complex admittance, electrical insulation, working operating conditions, calculation method

бель—двигатель или кабель—трансформатор может контролироваться состояние изоляции только кабеля. Но и в этом случае требуется дополнительная установка измерительных трансформаторов напряжения или отключение присоединения для выполнения измерений.

В статье рассматривается метод непрерывного определения комплексных проводимостей изоляции присоединений нагрузки, в основу которого положено решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Коэффициенты уравнений периодически определяются по результатам непрерывного измерения мгновенных значений фазных токов и напряжений фаз присоединения относительно земли. Предлагаемый метод может применяться на линиях и присоединениях любого типа, не требует создания специальных условий для измерений или дополнительной установки измерительных трансформаторов [5].

Для исследования предложенного способа определения параметров изоляции в рабочих режимах разработана математическая модель узла электрической системы с двигателями (УЭСД). Основу модели составляет схема замещения сети с изолированной нейтралью при замыкании фазы обмотки электродвигателя на корпус [6].

При моделировании активные и емкостные поперечные проводимости электродвигателей и

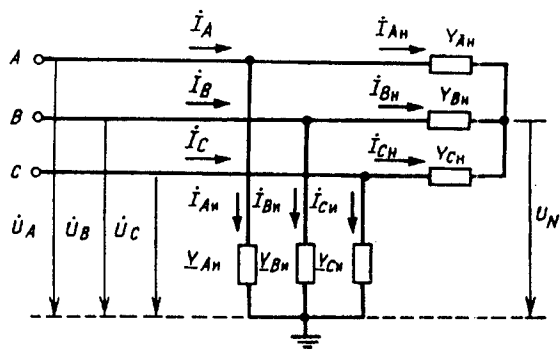


Рис. 1. Схема замещения электрического присоединения сети с изолированной нейтралью

трансформаторов принято рассматривать сосредоточенными на выводах их обмоток (основные допущения), а дефекты изоляции присоединения моделируются изменением значений комплексных проводимостей изоляции фаз.

В соответствии со схемой замещения присоединения (рис. 1) соотношение для векторов фазных токов присоединения  $\dot{I}_A, \dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  в нормальном режиме работы в матричной форме записи:

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{I}}_н + \dot{\mathbf{I}}_н = \underline{\mathbf{Y}}_{н.д} \dot{\mathbf{U}} + \underline{\mathbf{Y}}_{н.д} (\dot{\mathbf{U}} - \dot{U}_N)$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{Aн} \\ \dot{I}_{Bн} \\ \dot{I}_{Cн} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{I}_{Aн} \\ \dot{I}_{Bн} \\ \dot{I}_{Cн} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{Aн} & & \\ & \underline{Y}_{Bн} & \\ & & \underline{Y}_{Cн} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Y}_{Aн} & & \\ & \underline{Y}_{Bн} & \\ & & \underline{Y}_{Cн} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A - \dot{U}_N \\ \dot{U}_B - \dot{U}_N \\ \dot{U}_C - \dot{U}_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\dot{I}_{Aн}, \dot{I}_{Bн}, \dot{I}_{Cн}$  – векторы токов фаз нагрузки присоединения;  $\dot{I}_{Aн}, \dot{I}_{Bн}, \dot{I}_{Cн}$  – векторы токов через изоляцию фаз присоединения;  $\underline{Y}_{Aн}, \underline{Y}_{Bн}, \underline{Y}_{Cн}$  – поперечные комплексные проводимости изоляции фаз по отношению к земле (диагональная матрица  $\underline{\mathbf{Y}}_{н.д}$ );  $\underline{Y}_{Aн}, \underline{Y}_{Bн}, \underline{Y}_{Cн}$  – продольные фазные комплексные проводимости нагрузки присоединения (диагональная матрица  $\underline{\mathbf{Y}}_{н.д}$ );  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – векторы напряжений фаз присоединения по отношению к земле;  $\dot{U}_N$  – напряжение нейтрали присоединения по отношению к земле:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_{Aн} + \dot{U}_B \underline{Y}_{Bн} + \dot{U}_C \underline{Y}_{Cн}}{\underline{Y}_{Aн} + \underline{Y}_{Bн} + \underline{Y}_{Cн}}.$$

Продольные и поперечные комплексные проводимости кабельной или воздушной линии при-

соединения учитываются в соответствующих проводимостях нагрузки присоединения.

Из соотношения (1) найдем векторы фазных токов присоединения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{U}_A \underline{Y}_{Aн} + (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \underline{Y}_{Aн}; \\ \dot{I}_B &= \dot{U}_B \underline{Y}_{Bн} + (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \underline{Y}_{Bн}; \\ \dot{I}_C &= \dot{U}_C \underline{Y}_{Cн} + (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \underline{Y}_{Cн}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для полученной системы уравнений (2) в рабочих режимах могут непрерывно определяться векторы фазных токов  $\dot{I}_A, \dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$ , напряжений фаз по отношению к земле  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  и вектор напряжения нейтрали присоединения по отношению к земле  $\dot{U}_N$ . В уравнениях (2) неизвестными являются  $\underline{Y}_{Aн}, \underline{Y}_{Bн}, \underline{Y}_{Cн}$  и  $\underline{Y}_{Aн}, \underline{Y}_{Bн}, \underline{Y}_{Cн}$ . Задача состоит в определении комплексных проводимостей изоляции фаз. В трех уравнениях имеются шесть неизвестных, поэтому систему уравнений в таком виде решить нельзя. Для решения системы она либо должна быть дополнена новыми уравнениями, либо часть неизвестных исключена из уравнений (2). При этом чтобы не усложнять решение основной задачи, определение продольных проводимостей нагрузки присоединения и их использование в расчетах по возможности нужно исключить.

Если  $\underline{Y}_{Aн}, \underline{Y}_{Bн}, \underline{Y}_{Cн}$  известны, то параметры изоляции фаз определяются из (2) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Y}_{Aн} &= \frac{1}{\dot{U}_A} [\dot{I}_A - (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \underline{Y}_{Aн}]; \\ \underline{Y}_{Bн} &= \frac{1}{\dot{U}_B} [\dot{I}_B - (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \underline{Y}_{Bн}]; \\ \underline{Y}_{Cн} &= \frac{1}{\dot{U}_C} [\dot{I}_C - (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \underline{Y}_{Cн}]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Следует отметить, что на результаты определения параметров изоляции по выражениям (3) большое влияние оказывает точность определения параметров фаз нагрузки. При этом несимметрия продольных проводимостей нагрузки не влияет на результаты расчета комплексных проводимостей изоляции фаз. Однако определение параметров фаз нагрузки присоединения не всегда возможно или вызывает некоторые затруднения.

Рассмотрим способы решения системы уравнений в зависимости от соотношения между значениями поперечных комплексных проводимостей изоляции фаз, а также соотношения между значениями продольных комплексных проводи-

мостей фаз присоединения.

В первую очередь представляет интерес случай «полной» симметрии, который имеет место только теоретически и на первый взгляд может показаться наиболее простым. При равенстве между собой комплексных проводимостей изоляции фаз и фазных комплексных продольных проводимостей нагрузки присоединения, а также при симметричной системе векторов напряжений фаз относительно земли число неизвестных уменьшается до двух, но система уравнений (2) имеет множество решений. Уравнения (2) принимают вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{U}_A \underline{Y}_{Аи} + \dot{U}_A \underline{Y}_{Ан}; \\ \dot{I}_B &= \dot{U}_B \underline{Y}_{Вн} + \dot{U}_B \underline{Y}_{Вн}; \\ \dot{I}_C &= \dot{U}_C \underline{Y}_{Сн} + \dot{U}_C \underline{Y}_{Сн}. \end{aligned}$$

Из полученных уравнений могут быть найдены только суммы проводимостей изоляции фазы и фазы нагрузки присоединения. В этом случае для нахождения проводимости изоляции необходимо предварительно определить проводимость фазы нагрузки присоединения.

И все-таки даже при неизвестных параметрах нагрузки, но симметрии продольных и поперечных проводимостей присоединения практически всегда могут быть найдены проводимости изоляции фаз. Это возможно благодаря тому, что, как правило, в электрически связанной сети всегда имеется некоторое отличие проводимостей изоляции фаз, а следовательно, нет симметрии напряжений фаз относительно земли. Благодаря этому имеется напряжение смещения нейтрали присоединения, которое в этом случае определяется в соответствии с выражением:

$$\dot{U}_N = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C).$$

Рассмотрим более подробно случай, когда комплексные продольные проводимости всех фаз нагрузки равны:  $\underline{Y}_{Аи} = \underline{Y}_{Вн} = \underline{Y}_{Сн}$ . Реально это условие может не выполняться, но это не оказывает существенного влияния на метод из-за отсутствия электрической связи нулевой точки присоединения с землей.

При  $\underline{Y}_{Аи} = \underline{Y}_{Вн} = \underline{Y}_{Сн}$  выполним очевидные преобразования системы уравнений (2), благодаря которым из этих уравнений исключаются комплексные продольные проводимости фаз нагрузки. Получаем систему трех линейных уравнений относительно трех неизвестных комплексных проводимостей изоляции фаз:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A(\dot{U}_B - \dot{U}_N)\underline{Y}_{Аи} - \dot{U}_B(\dot{U}_A - \dot{U}_N)\underline{Y}_{Вн} &= \\ = \dot{I}_A(\dot{U}_B - \dot{U}_N) - \dot{I}_B(\dot{U}_A - \dot{U}_N); \\ \dot{U}_B(\dot{U}_C - \dot{U}_N)\underline{Y}_{Вн} - \dot{U}_C(\dot{U}_B - \dot{U}_N)\underline{Y}_{Сн} &= \\ = \dot{I}_B(\dot{U}_C - \dot{U}_N) - \dot{I}_C(\dot{U}_B - \dot{U}_N); \\ \dot{U}_A(\dot{U}_C - \dot{U}_N)\underline{Y}_{Аи} - \dot{U}_C(\dot{U}_A - \dot{U}_N)\underline{Y}_{Сн} &= \\ = \dot{I}_A(\dot{U}_C - \dot{U}_N) - \dot{I}_C(\dot{U}_A - \dot{U}_N). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решение полученной системы линейных алгебраических уравнений точными методами (например Гаусса) при изменении входных параметров в реальных диапазонах неприемлемо из-за получения очень низкой точности.

Решение этой системы уравнений целесообразно выполнять с помощью итерационных методов. Для оценки предложенного способа использован метод Зейделя. При его применении сходимость расчета достигается, если матрица коэффициентов имеет доминирующую диагональ, т.е. сумма диагональных элементов матрицы коэффициентов превышает сумму остальных коэффициентов [7]. Выполнение этого условия может обеспечиваться путем перестановки уравнений. Как видно, матрица коэффициентов системы уравнений (4) имеет нулевые коэффициенты, которые не должны входить в диагональ матрицы, а потому имеется только два варианта взаимного расположения уравнений.

В случае равенства поперечных комплексных проводимостей во всех трех фазах система уравнений не имеет решения, а поэтому определить проводимости изоляции невозможно. Если сопротивления изоляции в фазах отличаются не менее чем на 0,05 Ом, то система уравнений имеет решение.

В частном случае в нормальном состоянии  $\underline{Y}_{Аи} = \underline{Y}_{Вн} = \underline{Y}_{Сн}$ . Кроме того, допустим, что при возникновении дефекта изоляции происходит изменение проводимости только одной фазы. Например, дефект изоляции возник в фазе В, тогда  $\underline{Y}_{Аи} = \underline{Y}_{Сн}$ , что учтем в последнем уравнении из (4), откуда

$$\underline{Y}_{Аи} = \frac{\dot{I}_A(\dot{U}_C - \dot{U}_N) - \dot{I}_C(\dot{U}_A - \dot{U}_N)}{\dot{U}_A(\dot{U}_C - \dot{U}_N) - \dot{U}_C(\dot{U}_A - \dot{U}_N)}. \quad (5)$$

Тогда значение проводимости изоляции фазы В с дефектом определим подстановкой найденного значения  $\underline{Y}_{Аи}$  в первое или второе уравнение из (4).

Соотношение (5) можно записать в несколько другом виде. Для этого просуммируем левые и правые части уравнений (2). В результате получим:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{U}_A \underline{Y}_{Aи} + \dot{U}_B \underline{Y}_{Bи} + \dot{U}_C \underline{Y}_{Cи} = 3\dot{I}_0, \quad (6)$$

где  $\dot{I}_0$  – вектор тока нулевой последовательности.

Учтем (6) в (5) и получим [5]:

$$\underline{Y}_{Aи} = \frac{\dot{I}_A(\dot{U}_B - \dot{U}_N) - (\dot{I}_B - 3\dot{I}_0)(\dot{U}_A - \dot{U}_N)}{\dot{U}_N(\dot{U}_A - \dot{U}_C)}. \quad (7)$$

Из (6) найдем:

$$\underline{Y}_{Bи} = \frac{1}{\dot{U}_B} (3\dot{I}_0 - \dot{U}_A \underline{Y}_{Aи} - \dot{U}_C \underline{Y}_{Cи}). \quad (8)$$

Аналогично получают выражения, подобные (5), (7) и (8), если принять  $\underline{Y}_{Aи} = \underline{Y}_{Bи}$  и подставить в первое уравнение из (4), т.е. дефект изоляции возник в фазе *C*, или принять  $\underline{Y}_{Bи} = \underline{Y}_{Cи}$  и подставить во второе уравнение (4), т.е. дефект изоляции возник в фазе *A*. Автоматический выбор необходимой группы аналитических выражений для расчета проводимостей изоляции фаз выполняется в зависимости от угла между вектором  $3\dot{I}_0$  и вектором линейного напряжения, например  $\dot{U}_{AB}$ . Диапазоны значений указанного угла при возникновении дефектов в изоляции соответствующих фаз задаются на основании результатов предварительных расчетов.

Определение комплексных проводимостей упрощенным методом в соответствии с соотношениями (7), (8) и равенством  $\underline{Y}_{Aи} = \underline{Y}_{Cи}$  позволяет значительно сократить время по сравнению с определением этих проводимостей путем решения системы уравнений (4) итерационными методами. Кроме того, эти упрощенные соотношения могут быть использованы для определения начальных приближений для решения системы уравнений итерационными методами.

При отсутствии на присоединении трансформатора тока в одной из фаз, например в фазе *B*, ток этой фазы определяется из соотношения (6):

$$\dot{I}_B = 3\dot{I}_0 - \dot{I}_A - \dot{I}_C.$$

Для измерения тока нулевой последовательности используется кабельный трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП), который установлен на присоединении. Для измерения токов, имеющих малое значение, в дополнительно намотанную на ТТНП обмотку от постороннего специального источника подается переменный ток [8, 9]. Благодаря этому обеспечивается переход на более крутой участок характеристики намагничивания магнитопровода ТТНП. Требуемое совпадение фаз тока через изоляцию и дополнительного тока обеспечивается периодически за счет того, что частота дополнительного тока выбрана ниже частоты сети [9].

Непрерывное определение векторов токов и напряжений на основании измерений не менее двух мгновенных значений через заданный промежуток времени  $\Delta t$  выполняется на основании того, что эти напряжения и токи изменяются по синусоидальному закону. Например, два мгновенных значения напряжения, измеренные в моменты времени  $t_1$  и  $t_1 + \Delta t$ , равны соответственно:

$$u_1 = U_M \sin \omega t_1 \quad \text{и} \quad u_2 = U_M \sin \omega (t_1 + \Delta t),$$

где  $U_M$  – максимальное значение напряжения.

Вектор напряжения определяется как

$$\dot{U} = \frac{u_2 \cos \omega \Delta t - u_1}{\sin \omega \Delta t} + ju_2. \quad (9)$$

Такие соотношения можно получить на основании алгоритма двух выборок [10].

Оценка эффективности предложенного метода определения комплексных проводимостей изоляции проведена на математической модели УЭСД. Для нахождения фазных токов и напряжений фаз по отношению к земле использован метод узловых потенциалов. Рассчитанные мгновенные значения токов и напряжений принимались в качестве исходных для расчета проводимостей изоляции, т.е. как полученные в результате измерений в рабочих режимах присоединений. Затем рассчитываются векторы токов и напряжений по выражению (9) и определяются комплексные проводимости изоляции фаз путем решения системы уравнений (4). Полученные значения комплексных проводимостей сравнивались с соответствующими значениями, которые использовались в качестве исходных в математической модели УЭСД.

На основании анализа результатов вычислительных экспериментов, выполненных на математической модели, установлено, что точность определения комплексных проводимостей в значительной степени зависит от правильного выбора начальных приближений, отличия проводимостей изоляции между разными фазами, значения тока и точности определения параметров нагрузки, а также от значения комплексной проводимости, которая соответствует возникшему дефекту изоляции.

Анализ результатов моделирования показал, что методическая погрешность определения активной составляющей проводимости изоляции по предлагаемому методу зависит в основном от следующих факторов:

значения отношения активной составляющей сопротивления изоляции фазы с дефектом  $R_{и,д}$  к активному сопротивлению фазы с нормальной изоляцией  $R_{и}$ ;

значения рабочего тока присоединения; погрешности определения продольных комплексных проводимостей нагрузки присоединения, при этом погрешность определения проводимости изоляции одной из фаз вообще не оказывает влияния на расчет проводимости изоляции фазы с дефектом, что также следует из выражений (4).

Например для присоединения циркуляционного насоса ( $P_{\text{ном}}=1000$  кВт,  $U_{\text{ном}}=6$  кВ) энергоблока мощностью 300 МВт при рабочем токе 100 А погрешность определения активной составляющей проводимости изоляции с дефектом может быть оценена в соответствии с выражением:

$$\Delta G = 1500 \frac{R_{\text{и.д}}}{R_{\text{и}}} \Delta G_{\text{н}}, \% \quad (10)$$

где  $\Delta G_{\text{н}}$  – погрешность определения активной составляющей проводимости фазы нагрузки (или отклонение активной составляющей проводимости фазы нагрузки от симметричного значения  $G_{\text{Ан}} = G_{\text{Вн}} = G_{\text{Сн}}$ ), %.

Некоторые значения погрешности определения активной составляющей проводимости изоляции, рассчитанные по выражению (10), приведены в таблице.

Погрешность определения проводимости нагрузки $\Delta G_{\text{н}}$ , %	Погрешность определения активной составляющей проводимости изоляции $\Delta G$ (%) при $R_{\text{и}} = 1$ МОм при различном $R_{\text{и.д}}$ , Ом			
	200000	100000	50000	10000
0,1	30,0	15,0	7,5	1,5
0,5	150,0	75,0	37,5	7,5

Анализ данных таблицы показывает, что снижение активного сопротивления изоляции фазы в 5 раз и более определяется достаточно точно, если погрешность определения активной составляющей проводимости фазы нагрузки не превышала 0,1%. При большей погрешности  $\Delta G_{\text{н}}$  приемлемая точность определения проводимости изоляции достигается при более значительных снижениях сопротивления изоляции.

Расчеты на математической модели УЭСД показали, что при равных продольных проводимостях трех фаз нагрузки погрешность определения комплексных проводимостей изоляции путем решения системы уравнений практически равна нулю при изменении активного сопротивления изоляции фазы А от 1 Ом до 1 МОм. При этом емкостная проводимость не изменялась.

При упрощенном методе существенно влияет на точность расчетов различие сопротивлений фаз без дефекта изоляции. Даже при отличии в 1 кОм

погрешность может оказаться недопустимой.

На рис. 2 приведены результаты расчетов на математической модели секции 6 кВ собственных нужд энергоблока 300 МВт. Моделирование дефектов изоляции выполнялось на присоединении багерного насоса ( $P_{\text{н}}=250$  кВт,  $U_{\text{н}}=6$  кВ) без нагрузки двигателя путем дискретного изменения активного сопротивления изоляции в фазе А от 1 МОм до 1000 Ом. При этом погрешность определения комплексной проводимости изоляции в фазе В практически не изменяется во всем диапазоне  $R_{\text{Ан}}$  и не превышает 5%.

При реально вероятных диапазонах изменения проводимостей максимальная погрешность метода не превышает 12% (рис. 2, кривая 1). Основной причиной возникновения погрешности в данном случае является использованный алгоритм определения векторов токов по результатам измерения их мгновенных значений.

Практически такие же погрешности, как и приведенные на рис. 2 (кривые 2, 3), получены при расчетах проводимостей в рабочем режиме двигателя и погрешности измерительного канала тока 0,01%.

Экспериментальные исследования с применением предложенного метода проведены в системе собственных нужд 6 кВ энергоблока 300 МВт. Двигатель мощностью 500 кВт привода конденсатного насоса типа АОВ2-14-41-4УЗ испытуемого присоединения подключен к секции 1Б собственных нужд 6 кВ кабелем сечением 95 мм<sup>2</sup> и длиной 70 м. Дефект изоляции фазы А был создан подключением активного сопротивления между выводом обмотки статора фазы А электродвигателя и землей. По результатам цифрового осциллографирования процесса подачи напряжения на секцию определены векторы токов и

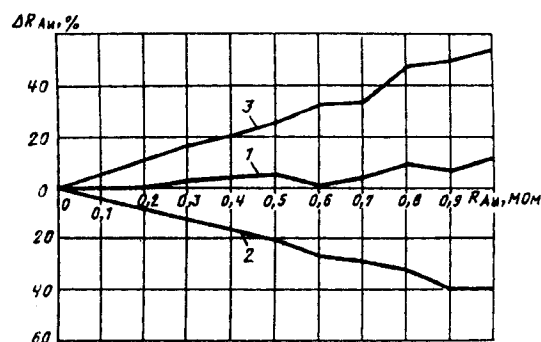


Рис. 2. Погрешность определения комплексной проводимости изоляции фазы А при решении системы уравнений (4): 1 – при отсутствии погрешности измерительных каналов тока; 2, 3 – при наличии погрешности 0,05% и –0,05% измерительного канала тока фазы А соответственно

напряжений. По полученным значениям векторов в соответствии с методом определения комплексных проводимостей изоляции выполнены расчеты параметров изоляции присоединения. В результате расчетов получено, что активное сопротивление изоляции фазы *A* равно 147,8 кОм (к фазе *A* подключалось активное сопротивление 110 кОм, т.е. ошибка определения сопротивления составила 34,4%), а активные сопротивления изоляции фаз *B* и *C* равны 2,44 МОм.

При практической реализации метода оценки качества изоляции необходимо устранение погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения с помощью специальных алгоритмов, например рассмотренного в [11]. Анализ и расчеты показывают, что при использовании 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и программного устранения погрешностей измерительных трансформаторов тока [11] обеспечивается точность всего канала измерения тока не менее 0,02%.

Критические значения активного сопротивления изоляции, при достижении которых формируется сигнал о недопустимом снижении сопротивления или выполняется отключение присоединения, определены в соответствии с данными, приведенными в [12, 13]. В [12] указано, что коэффициент успокоения сети при загрязнении и увлажнении изоляции возрастает с 2–6 до 10%. Такому изменению соответствует уменьшение активного сопротивления в 2 раза. Таким образом, при исходном нормальном активном сопротивлении изоляции в 1 МОм и его уменьшении до 0,5 МОм (погрешность метода не более 25%, рис. 2) необходимо формировать сигнал о недопустимом снижении качества изоляции. В [13] приведены значительно меньшие критические значения активного сопротивления изоляции — от 15 до 40 кОм (погрешность метода менее 4%, рис. 2).

Наряду со значением комплексного сопротивления информативным фактором для оценки состояния изоляции является степень изменения сопротивления изоляции во времени [13]. Для реализации такого контроля весьма целесообразным является применение предложенного метода непрерывного определения комплексной проводимости изоляции фаз. При этом для преобразования аналоговых сигналов в цифровые необходимо использовать АЦП, имеющие не менее 12 разрядов. Такая система может быть реализована в составе защитно-диагностирующей автоматики

на промышленном компьютере [14].

**Вывод.** Предложенная математическая модель узла электрической системы с двигателями учитывает продольные и поперечные комплексные проводимости присоединений нагрузки 6–10 кВ и позволяет выполнять моделирование дефектов изоляции в различных рабочих режимах присоединения. Комплексные проводимости изоляции электродвигателей и трансформаторов учитываются сосредоточенными на выводах их обмоток. Дефекты изоляции моделируются путем изменения значений комплексных проводимостей изоляции фазы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Пат. 2136011 RU. Способ определения активной и емкостной составляющих сопротивления изоляции фаз сети относительно земли / К.В. Лапченков, А.И. Сидоров. — БИ, 1999, № 24.
3. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Сидоров А.И., Хусаннова Н.А. Определение проводимости изоляции по отношению к земле для сетей напряжением 6–35 кВ с изолированной нейтралью. — Электричество, 2001, № 5.
5. Пат. 51177 А (Україна). Спосіб безперервного визначення комплексної провідності ізоляції фаз відносно землі електричного приєднання навантаження / Н.В. Гребченко, В.Н. Гребченко, 2002, Бюл. № 11.
6. Корогодский В.И., Кузнецов С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Петров А.В., Алексеев В.Е., Ваулин А.С. и др. Вычислительная техника и программирование. — М.: Высшая школа, 1990.
8. Пат. 34689 (Україна). Пристрій автоматичного контролю ізоляції електричної мережі змінного струму / М.В. Гребченко, 2003, Бюл. № 2.
9. Пат. 47151 А (Україна). Пристрій безперервного автоматичного контролю ізоляції електричного обладнання змінного струму / М.В. Гребченко, 2002, Бюл. № 6.
10. Шнейерсон Э.М. Дистанционные защиты. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
11. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В., Нуайми Абдела-ли. Программное восстановление первичного тока электромагнитных трансформаторов тока. — Техническая электродинамика (спец. вып.), 1998.
12. Лихачев Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. — М.: Энергия, 1971.
13. Кутин В.М., Кобылянский А.В. Диагностика поврежденной изоляции распределительных сетей выше 1000 В с изолированной нейтралью. — Промышленная энергетика, 1984, № 7.
14. Гребченко Н.В., Сивокобыленко В.Ф., Кулеба В.В., Егоров А.В. Система защитно-диагностирующей автоматики узла двигательной нагрузки как нижний уровень информационно-управляющей системы подстанций и ТЭС. — Энергетика и электрификация, 2001, № 5.

[14.08.03]

*Автор: Гребченко Николай Васильевич окончил энергетический факультет Донецкого политехнического института в 1974 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию «Совершенствование быстросействующего АВР в системах электроснабжения с синхронными двигателями» в Новосибирском электротехническом институте. Доцент кафедры «Электрические станции» Донецкого национального технического университета.*