

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ПРИСОЕДИНЕНИЯ 6-10 кВ ОТ НАЛИЧИЯ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Гребченко Н.В.

Донецкий государственный технический университет

The research of the operative variable dependences on the various types of the insulation defects is carried out. The active and capacitive conductivity changes occurring in the insulation during its aging are examined.

Анализ статистики повреждаемости электрооборудования показывает, что значительная доля коротких замыканий (к.з.) связана с возникновением дефектов изоляции в сети 6-10 кВ. Поэтому своевременное выявление и устранение этих дефектов позволит предотвратить значительную часть повреждений. Однако для оценки степени деградации изоляции необходимо выполнение на работающем оборудовании непрерывного автоматического контроля, обеспечивающего выявление дефектов на ранней стадии развития. Только в этом случае может быть получен ожидаемый эффект и повышение надежности работы электроустановок. Для реализации непрерывного контроля требуется разработка специальных методов и средств контроля. Статья посвящена разработке одного из таких методов, который основан на использовании только имеющихся в эксплуатации датчиков информации - измерительных трансформаторов тока нулевой последовательности.

Обычно при диагностировании электрооборудования без его отключения выполняется контроль диэлектрических характеристик изоляции, интенсивности частичных разрядов и при использовании масла в каком-нибудь оборудовании анализируется его состав [1]. Качество изоляции оценивается изменением ее диэлектрических характеристик (активной и реактивной проводимости и $tg\delta$). Эти изменения приводят к увеличению токов нулевой последовательности, для измерения которых в эксплуатации обычно имеются стационарные трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП). Применение ТТНП позволяет отстроиться и практически не учитывать рабочие токи электрооборудования.

Распределение электроэнергии среди объектов непосредственного ее потребления (электродвигатели, осветительные приборы, преобразователи частоты и т.д.) выполняется кабельными или воздушными линиями 6-10 кВ. Между линиями и этими объектами потребления коммутационные аппараты обычно не устанавливаются. Поэтому управление, контроль и защита объектов выполняется как одного объекта - присоединения. Как правило, измерительные трансформаторы тока (фазные и нулевой последовательности) устанавливаются только в начале линии со стороны источника питания. На самих же объектах трансформаторы тока обычно отсутствуют. Для управления и защиты используются измерительные трансформаторы напряжения секций 6-10 кВ и в редких случаях предусматриваются трансформаторы напряжения, подключаемые к выводам обмотки статора мощных электродвигателей. Учитывая эту сложившуюся ситуацию, для выполнения непрерывной диагностики целесообразно использовать эти же измерительные трансформаторы тока и напряжения. В этом случае в зону диагностирования будет входить все присоединение, т.е. линия и объект электропотребления. В связи с этим необходимо выполнить исследования, подтверждающие, что при таком ограниченном количестве датчиков тока и напряжения, которые изначально не предназначались для их использования в задачах диагностирования, можно не только выявлять возникновение дефектов изоляции, но и определять их место.

Комплекс эксплуатационных воздействий на изоляцию (нагрев, загрязнение, увлажнение, вибрация и т.д.) приводит к ухудшению ее состояния и в первую очередь к ухудшению ее диэлектрических характеристик. В схемах замещения изоляция обычно представляется в виде различных комбинаций последовательных и параллельных соединений емкостей и активных сопротивлений. Поэтому изменения характеристик изоляции моделируются путем снижения величины емкости фазы по отношению к земле или другим элементам или путем увеличения активной проводимости изоляции. Очевидно, что различные дефекты изоляции приводят к различным отклонениям величины соответствующих емкостей и активных сопротивлений. Существует также зависимость указанных величин от места или объема дефекта изоляции.

Чтобы оценить какое влияние на величину и фазу токов нулевой последовательности оказывают параметры изоляции кабеля и двигателя различных присоединений 6 кВ собственных нужд блока 300 МВт, выполнены ориентировочные расчеты. Некоторые результаты этих расчетов приведены в таблице. Определение емкости фазы двигателя выполнено в соответствии с [2], а кабелей - в соответствии с [3]. Полученные данные показывают, что для присоединений двигателей мощностью до 2000 кВт частичная емкость фазы кабеля на оболочку значительно больше, чем емкость фазы двигателя. Для присоединений более мощных двигателей емкостная проводимость изоляции кабеля соизмерима или даже ниже, чем емкостная проводимость изоляции двигателя. В соответствии с этими данными можно сделать очевидный вывод о том, что одинаковый по изменению емкости дефект изоляции в кабеле или в двигателе приведет к различным изменениям амплитуды и фазы тока нулевой последовательности присоединения.

Таблица. Значения емкости фазы элементов некоторых присоединений 6 кВ собственных нужд блока 300 МВт

Наименование присоединения	Длина кабеля, км	Мощность двигателя, кВт	Емкость фазы, мкФ	
			жилы кабеля на оболочку	обмотки статора двигателя
Бустерный насос	0,2	630	0,05	0,01
Мельница	0,14	2000	0,036	0,032
Конденсатный насос	0,06	500	0,015	0,008
Питательный электронасос	0,085	8000	0,076	0,128
Дымосос рециркуляции газов	0,19	630	0,049	0,01
Мельничный вентилятор	0,17	1250	0,044	0,02
Дымосос	0,3	1700	0,077	0,027

Высоковольтные кабели являются достаточно герметичными конструкциями, поэтому следует считать, что повышение активной проводимости их изоляции возможно только в местах нарушения герметичности. Ввиду меньшей герметичности двигателей 6-10 кВ, а также с учетом того, что они работают обычно в агрессивных средах, следует ожидать более частым и значительным повышением активной проводимости их изоляции, чем реактивной проводимости.

Рассмотрим некоторые, наиболее характерные, пути развития дефектов изоляции кабелей. В процессе эксплуатации кабелей с вязкой пропиткой возможно образование пустот вследствие многократных циклов нагрева и охлаждения кабеля. Маслоканифольный компаунд имеет температурный коэффициент объемного расширения $8 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$, т.е. больше, чем металлическая оболочка кабеля ($9 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$). Поэтому нагрев приводит к растрескиванию металлической оболочки. Затем при последующем остывании кабеля вследствие большой остаточной деформации металлической оболочки в толще изоляции образуются места с пониженным содержанием пропитывающего состава. Кроме того, процесс охлаждения кабеля идет от оболочки к жиле, что может приводить к образованию пустот вблизи жил [4].

Для оценки влияния содержания пропитывающей жидкости на величину емкости кабеля $C_{\text{кв}}$ рассмотрим емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\bar{\delta}} \cdot S}{d} \quad (1.1)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; $\epsilon_{\bar{\delta}}$ – диэлектрическая проницаемость бумажной изоляции; S – площадь обкладок конденсатора; d – толщина бумаги между обкладками конденсатора.

Из (1.1) следует, что при неизменных геометрических размерах конденсатора (S и d) величина его емкости зависит только от диэлектрической проницаемости бумажной изоляции $\epsilon_{\bar{\delta}}$. С другой стороны при неизменной проницаемости $\epsilon_{\bar{\delta}}$ выражение (1.1) также позволяет выполнить ориентировочную оценку изменения величины емкости кабеля от степени его деформации.

Допустим, что в процессе длительной эксплуатации произошло полное вытеснение пропитывающей жидкости из слоя изолирующей бумаги кабеля и ее замещение воздухом. Диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги $\epsilon_{\bar{\delta}}$ определяется по выражению [4]

$$\epsilon_{\bar{\delta}} = \frac{\epsilon_{\kappa} \cdot \epsilon_{\text{ж}}}{\epsilon_{\text{ж}} + a(\epsilon_{\kappa} - \epsilon_{\text{ж}})} \quad (1.2)$$

где ϵ_{κ} – диэлектрическая проницаемость клетчатки, $\epsilon_{\kappa} = (5-7) \epsilon_0$; $\epsilon_{\text{ж}}$ – диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости, для кабельного масла $\epsilon_{\text{ж}} = 2,2 \epsilon_0$; $a = 1 - \gamma_{\bar{\delta}} / \gamma_{\kappa}$ – относительный объем пор бумаги, $a = 0,2-0,3$; $\gamma_{\bar{\delta}}$, γ_{κ} – соответственно плотность бумаги и клетчатки.

Для указанных максимальных значений a и ϵ_{κ} диэлектрическая проницаемость бумаги, пропитанной кабельным маслом в соответствии с (1.2) составляет $4,87 \epsilon_0$.

Чтобы учесть предельно возможное ухудшение изоляции кабеля подставим в выражение (1.2) вместо диэлектрической проницаемости кабельного масла, значение диэлектрической проницаемости воздуха $\epsilon_k = \epsilon_0$, в результате чего получим новое значение диэлектрической проницаемости бумаги $\epsilon_k = 3,18 \epsilon_0$. Следовательно, при замещении кабельного масла в бумаге воздухом емкость кабеля снизится в $4,87/3,18 = 1,53$ раза.

Емкость одножильного экранированного кабеля или кабеля с отдельно оцинкованными круглыми жилами определяется по выражению [3]

$$C = \frac{0,024 \cdot \epsilon}{\lg \frac{R}{r}} \quad (1.3)$$

где r – радиус токопроводящей жилы, включающей толщину экрана из металлизированной или полупроводящей бумаги, мм; R – радиус по изоляции, мм.

Сопоставление выражений (1.1) и (1.3) показывает, что выполнение оценки влияния на величину емкости кабеля изменения диэлектрической проницаемости бумажной изоляции по выражению (1.3) дает такой же результат, как и по выражению (1.1).

Выражение (1.3) отражает некоторые конструктивные особенности кабеля и поэтому позволяет определить зависимость величины емкости кабеля от степени остаточной деформации оболочки, возникающей вследствие «теплого дыхания». Примем, что после большого количества циклов нагрева-охлаждения маслоканифольного компаунда за счет остаточной деформации оболочка кабеля достигает такого размера, что при очередном нагреве она уже не расширяется. Тогда в выражении (1.3) радиус токопроводящей жилы можно принять прежним, а новое значение радиуса по изоляции R' определить в соответствии с выражением

$$R' = R(1 + \alpha \cdot \Delta t), \quad (1.4)$$

где α – коэффициент линейного расширения определяется по известному коэффициенту объемного расширения β из соотношения

$$1 + \beta \cdot \Delta t = (1 + \alpha \cdot \Delta t)^3, \quad (1.5)$$

Δt – изменение температуры кабеля при его нагревании.

Из (1.3) и (1.4) относительное изменение величины емкости кабеля при максимально-возможной остаточной деформации оболочки кабеля

$$\frac{C'}{C} = \frac{\lg \frac{R}{r}}{\lg \frac{R(1 + \alpha \cdot \Delta t)}{r}} \quad (1.6)$$

Полученное выражение (1.6) показывает, что относительное изменение величины емкости зависит не только от максимального значения температуры кабеля, но и от диаметра кабеля и толщины бумажной изоляции. Например, при $R=0,011$ м, $r=0,01$ м и $\Delta t=100^\circ$ из (1.6) если $\alpha \approx \frac{1}{3}\beta$, получим $C'/C = 1,29$.

Для кабелей одинакового сечения 6 и 10 кВ с пропитанной бумажной изоляцией (соответственно толщина изоляции 2,95 и 4 мм [5]) выполнены расчеты относительного изменения емкости кабеля при различных термических деформациях, определяемых температурой перегрева. За максимальные температуры перегрева приняты допустимые температуры нагрева кабелей при прохождении тока к.з. при расчете нагрева по выдержке основной защиты [3]. Результаты приведены на рисунке 1. Анализ полученных результатов показывает, что при одновременном учете термической деформации оболочки кабеля и замещении пропитывающей жидкости емкость кабеля снизится до 0,47 от начальной емкости. Следует отметить, что это значение несколько завышено из-за принятого допущения о полном замещении пропитывающей жидкости и деформации оболочки по всей длине кабеля. Полученное значение можно считать предельно возможным.

Исследование зависимости токов нулевой последовательности от различных дефектов изоляции выполнено по программе расчета, алгоритм которого изложен ниже. На рисунке 2 приведена схема замещения трехфазной сети, в которой источник питания представлен фазными э.д.с. соответственно E_A, E_B, E_C и комплексными сопротивлениями фаз источника $Z_{AИ}, Z_{BИ}, Z_{CИ}$, присоединение с нормальной изоляцией (неповрежденное) – комплексными сопротивлениями изоляции фаз $Z_{АН}, Z_{БН}, Z_{СН}$, эквивалентная часть сети – комплексными эквивалентными сопротивлениями изоляции фаз $Z_{АЭ}, Z_{БЭ}, Z_{СЭ}$, присоединение с дефектной изоляцией (поврежденное) – комплексными сопротивлениями изоляции фаз $Z_{АП}, Z_{БП}, Z_{СП}$.

Применим метод узловых потенциалов. Потенциал земли примем равным нулю. Тогда уравнение для определения потенциалов узлов схемы:

$$\varphi = [q^{(y)}]^{-1} \cdot J^{(y)}$$

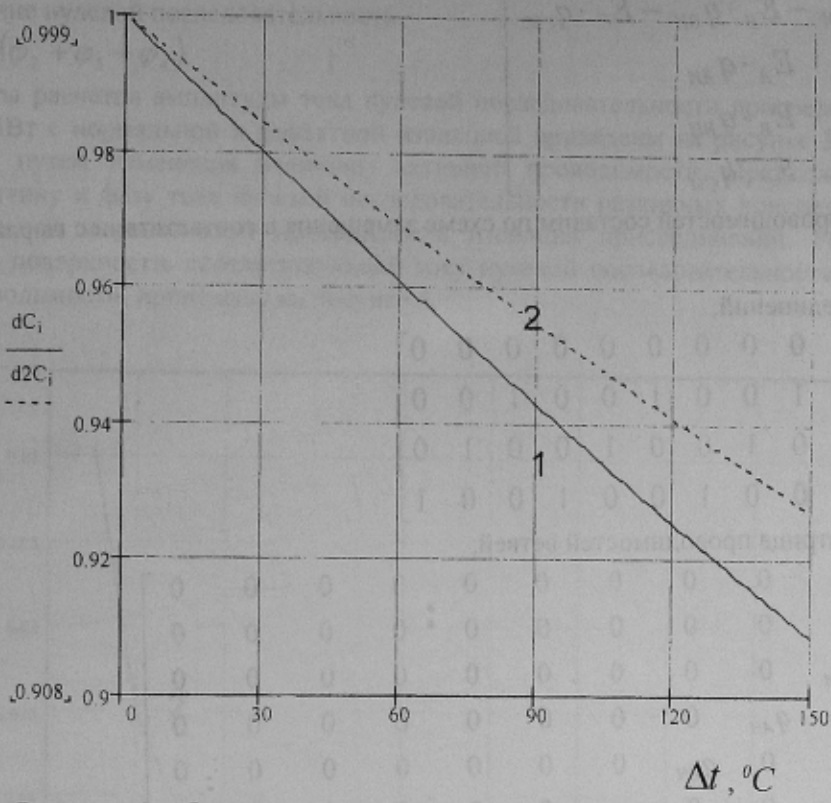


Рисунок 1- Относительное изменение величины рабочей емкости фазы кабеля в зависимости от максимальной температуры систематического перегрева кабеля
1 – кабель 6 кВ, 2 – кабель 10 кВ

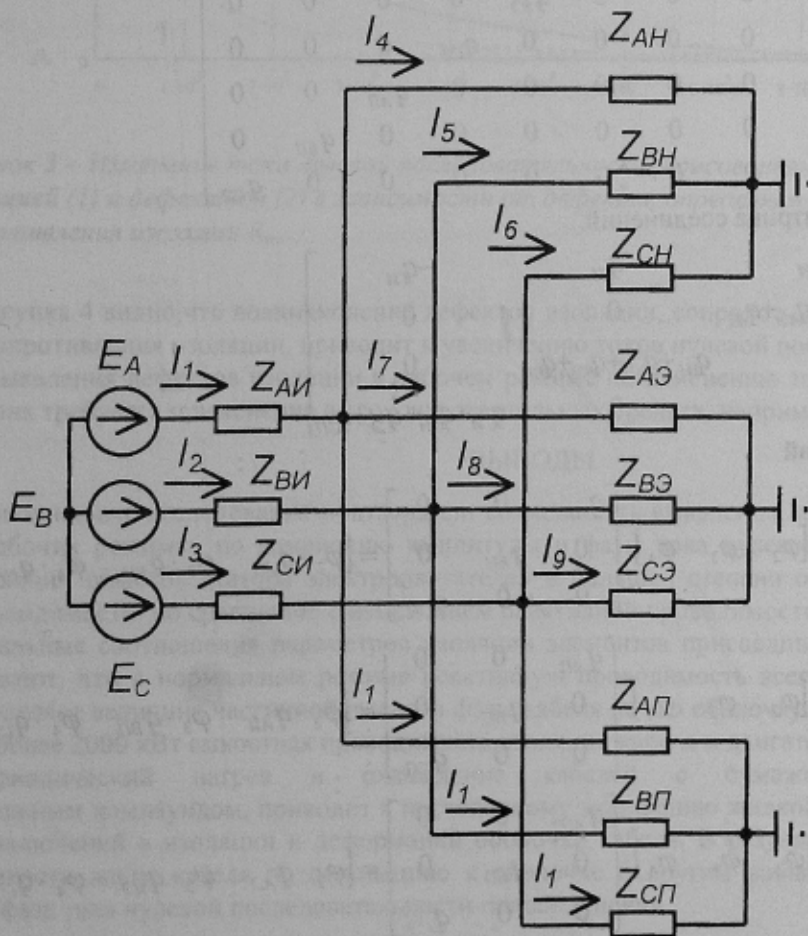


Рисунок 2 – Схема замещения изоляции трехфазной сети

где $[q^{(y)}]^{-1}$ - матрица, обратная квадратной матрице узловых проводимостей схемы $q^{(y)}$;

$J^{(y)}$ – матрица-столбец узловых токов

$$J^{(y)} = \begin{bmatrix} -E_A \cdot q_{AH} - E_B \cdot q_{BH} - E_C \cdot q_{CH} \\ E_A \cdot q_{AH} \\ E_B \cdot q_{BH} \\ E_C \cdot q_{CH} \end{bmatrix}$$

Матрицу узловых проводимостей составим по схеме замещения в соответствии с выражением:

$$q^{(y)} = A \cdot q \cdot A^T$$

где A – матрица соединений;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

q – диагональная матрица проводимостей ветвей;

$$q = \begin{bmatrix} q_{AH} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{BH} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{CH} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{AH} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{BH} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{CH} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{AЭ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{BЭ} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{CЭ} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{AP} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{BP} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{CP} \end{bmatrix}$$

A^T – транспонированная матрица соединений.

$$q^{(y)} = \begin{bmatrix} q_{AH} + q_{BH} + q_{CH} & -q_{AH} & -q_{BH} & -q_{CH} \\ -q_{AH} & q_{AH} + q_{AH} + q_{AЭ} + q_{AP} & 0 & 0 \\ -q_{BH} & 0 & q_{BH} + q_{BH} + q_{BЭ} + q_{BP} & 0 \\ -q_{CH} & 0 & 0 & q_{CH} + q_{CH} + q_{CЭ} + q_{CP} \end{bmatrix}$$

Фазные токи присоединений

$$J_H^T = \begin{bmatrix} J_{AH} \\ J_{BH} \\ J_{CH} \end{bmatrix}^T = \varphi^T \cdot q_H = [\varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4] \cdot \begin{bmatrix} q_{AH} & 0 & 0 \\ 0 & q_{BH} & 0 \\ 0 & 0 & q_{CH} \end{bmatrix} = [\varphi_2 \cdot q_{AH} \quad \varphi_3 \cdot q_{BH} \quad \varphi_4 \cdot q_{CH}]$$

$$J_P^T = \begin{bmatrix} J_{AP} \\ J_{BP} \\ J_{CP} \end{bmatrix}^T = \varphi^T \cdot q_P = [\varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4] \cdot \begin{bmatrix} q_{AP} & 0 & 0 \\ 0 & q_{BP} & 0 \\ 0 & 0 & q_{CP} \end{bmatrix} = [\varphi_2 \cdot q_{AP} \quad \varphi_3 \cdot q_{BP} \quad \varphi_4 \cdot q_{CP}]$$

$$J_{Э}^T = \begin{bmatrix} J_{AЭ} \\ J_{BЭ} \\ J_{CЭ} \end{bmatrix}^T = \varphi^T \cdot q_{Э} = [\varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4] \cdot \begin{bmatrix} q_{AЭ} & 0 & 0 \\ 0 & q_{BЭ} & 0 \\ 0 & 0 & q_{CЭ} \end{bmatrix} = [\varphi_2 \cdot q_{AЭ} \quad \varphi_3 \cdot q_{BЭ} \quad \varphi_4 \cdot q_{CЭ}]$$

Здесь φ – матрица узловых потенциалов, но без первой строки φ_1 .

Ток нулевой последовательности присоединения с неповрежденной изоляцией

$$I_{0H} = 1/3(\varphi_2 \cdot q_{AH} + \varphi_3 \cdot q_{BH} + \varphi_4 \cdot q_{CH})$$

Ток нулевой последовательности присоединения с поврежденной изоляцией

$$I_{0П} = 1/3(\varphi_2 \cdot q_{АП} + \varphi_3 \cdot q_{ВП} + \varphi_4 \cdot q_{СП})$$

Напряжение нулевой последовательности

$$U_0 = 1/3(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)$$

Результаты расчетов амплитуды тока нулевой последовательности присоединений собственных нужд 6 кВ блока 300 МВт с нормальной и дефектной изоляцией приведены на рисунке 3. Степень дефекта изоляции моделировалась путем изменения величины активной проводимости. Предложенный алгоритм позволяет определять величину и фазу тока нулевой последовательности различных присоединений при одновременном изменении активной и реактивной проводимости изоляции присоединений. Результаты одного из таких расчетов в виде поверхности, соответствующей току нулевой последовательности при изменении активной и реактивной проводимости, приведены на рисунке 4.

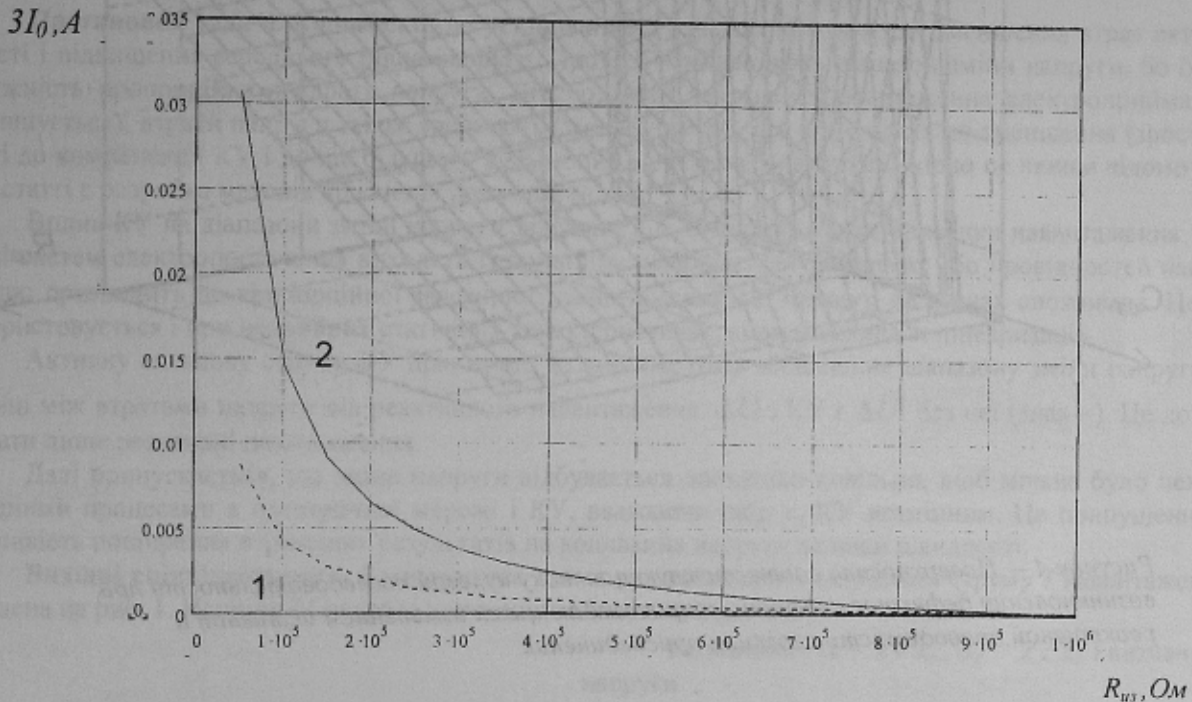


Рисунок 3 – Изменение тока нулевой последовательности присоединений с нормальной изоляцией (1) и дефектной (2) в зависимости от дефекта, определяемого величиной активного сопротивления изоляции $R_{из}$

Из рисунка 4 видно, что возникновение дефектов изоляции, сопровождающихся снижением емкости или активного сопротивления изоляции, приводит к увеличению токов нулевой последовательности.

Для выявления дефектов изоляции в рабочем режиме по изменению токов нулевой последовательности присоединения требуется применение высокочувствительных средств, например [6].

ВЫВОДЫ

1. Выполненные исследования подтвердили возможность выявления дефектов изоляции присоединений 6-10 кВ в рабочих режимах по изменению амплитуды и фазы тока нулевой последовательности. При этом дефекты изоляции обмоток статора электродвигателей в большей степени оказывают влияние на изменение активной проводимости по сравнению с изменением реактивной проводимости присоединения.

2. Реальные соотношения параметров изоляции элементов присоединений 6-10 кВ собственных нужд ТЭС показывают, что в нормальном режиме реактивную проводимость всего присоединения в большинстве случаев определяет величина частичной емкости фазы кабеля на его оболочку. У присоединений с двигателями мощностью более 2000 кВт емкостная проводимость изоляции кабеля и двигателя соизмеримы.

3. Периодический нагрев и охлаждение кабелей с бумажной изоляцией, пропитанной маслоканифольным компаундом, приводит к постепенному замещению жидкой пропитки воздухом, появлению воздушных включений в изоляции и деформации оболочки кабеля. В результате этого происходит снижение величины емкости жилы кабеля по отношению к оболочке и другим жилам, а, следовательно, изменяется амплитуда и фаза тока нулевой последовательности присоединения.

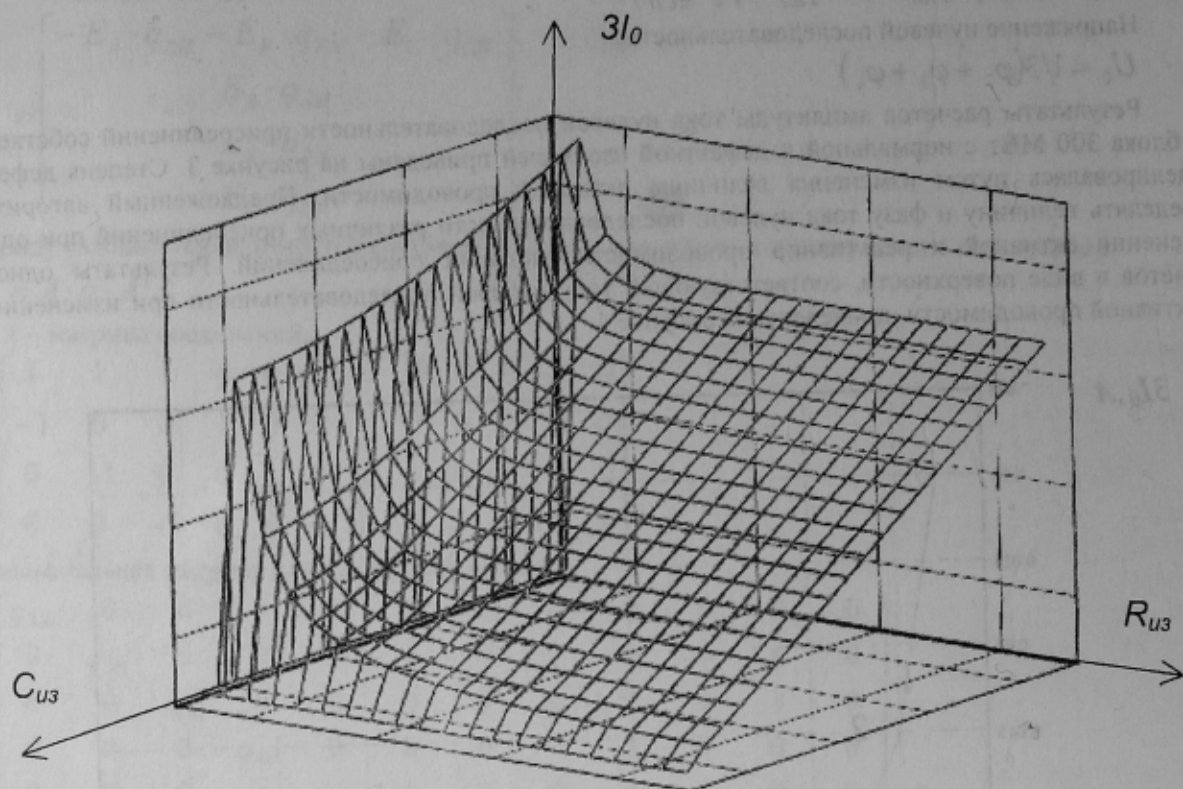


Рисунок 4 – Поверхность, соответствующая току нулевой последовательности при возникновении дефектов изоляции, сопровождающихся изменением активной и реактивной проводимости изоляции присоединения

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутин В.М., Брейтбурд В.И. Диагностирование электрооборудования электрических систем: Учеб. пособие. – К.: УМК ВО, 1991. – 104 с.
2. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ.- М.: Энергоатомиздат, 1987.- 248 с.
3. Электротехнический справочник. Т.1. Под общ. ред. П.Г.Грудинского и др. Изд. 5-е. – М.- Энергия.- 1974. С.-776.
4. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 368 с.
5. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И.Яковлева; Под ред.Н.И.Белоруссова. - М. – Энергоатомиздат, 1987. – С.-536.
6. Декларацийний патент України. Пристрій автоматичного контролю ізоляції електричної мережі змінного струму / Гребченко М.В. – Реєстраційний номер 99020851. Дата прийняття рішення 19.02.2001.