

УДК 621.315.3: 621.316.99

**М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович****МЕТОД АМПЛИТУДНОГО И ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ИМПУЛЬСОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ**

*Работа посвящена разработке метода мониторинга и прогнозирования неисправностей в силовых кабельных линиях (СКЛ). Обосновано использование метода контроля состояния изоляции СКЛ, основанного на контроле уровня и фазового распределения частичных разрядов. Представлено математическое описание, алгоритм работы и модель метода диагностики силовых кабелей. Основой работы является алгоритм, использующий значения амплитуды вектора тока нулевой последовательности присоединения с повреждением и угла между этим вектором и вектором междуфазного напряжения для известного режима распределительной сети. Он позволяет определять расстояние до места дефекта изоляции и значение сопротивления этого дефекта.*

*Частичные разряды; мониторинг; дефект изоляции; алгоритм.*

**M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich****METHOD OF PEAK AND PHASE DISTRIBUTION OF IMPULSES  
OF PARTIAL DISCHARGES IN PROBLEMS OF ISOLATION CABLE LINES  
RESEARCH**

*The work is devoted to elaboration of a method of monitoring and forecasting of malfunctions in power cable lines (PCL). Usage of a quality monitoring of a condition of isolation PCL based on control of level and phase distribution of partial categories is proved. On the basis of the spent review and classification of existing systems of isolation defects definition in PCL the mathematical description and algorithm of work and model of a power cables diagnostic method were made. A work basis is the algorithm using values of amplitude of a vector of a current of zero sequence of joining with damage and a corner between this vector and a vector of the interphase voltage for a known mode of a distributive network.*

*Partial categories; monitoring; defect of isolation; algorithm.*

Для повышения надежности функционирования электрических систем требуется организация контроля изоляции СКЛ с возможностью прогнозирования развитие дефекта на ранней стадии, к тому же непрерывно, под рабочим напряжением и в процессе реальных условий эксплуатации [1, 3].

Существуют следующие методы контроля изоляции (рис. 1), позволяющие выявлять дефект силового кабеля и определять место его нахождения напряжением до 35 кВ включительно: измерения характеристик частичных разрядов; измерения и анализа возвратного напряжения; измерения тока релаксации в кабелях с изоляцией из полиэтилена; измерения диэлектрических характеристик изоляции.

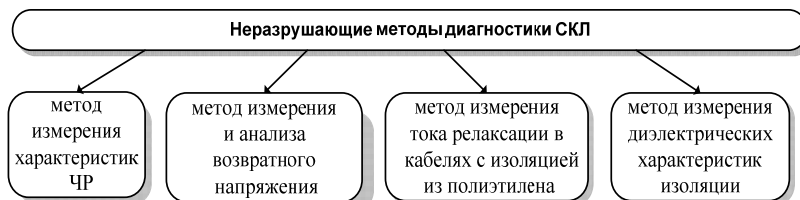


Рис. 1. Методы неразрушающего контроля кабельной изоляции

Перспективным методом можно считать метод контроля тока нулевой последовательности (ТНП) [2]. Метод решает вопрос нахождения дефекта после произошедшего пробоя изоляции, что порождает необходимость модернизации метода до возможности прогнозирования пробоя с выявлением расстояния до него и фазы, в которой развивается дефект.

Для анализа и расчетов несимметричных режимов в трехфазных цепях применяется метод симметричных составляющих [3] (рис. 2).

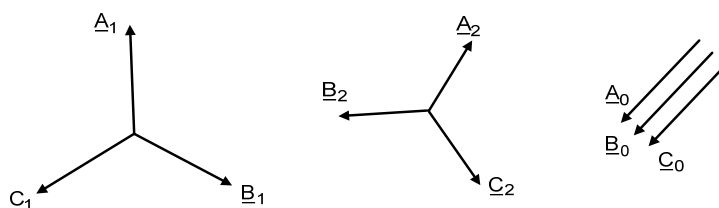


Рис. 2. Векторная диаграмма симметричных составляющих системы прямой, обратной и нулевой последовательности

Разложение несимметричной системы выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{A} = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} = \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0 = a^2\dot{A}_1 + a\dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{C} = \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0 = a\dot{A}_1 + a^2\dot{A}_2 + \dot{A}_0. \end{cases} \quad (1)$$

Для этих трех систем можно записать уравнения, с помощью фазного множителя, так с учетом  $1 + a^2 + a = 0$  найдем, что

$$\dot{A}_0 = \frac{1}{3}(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}). \quad (2)$$

Умножая второе уравнение системы (1) на  $a$  и третье уравнение на  $a^2$  затем складывая уравнения полученной систем, находим, что

$$\dot{A}_1 = \frac{1}{3}(\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}). \quad (3)$$

Умножая второе уравнение системы (1) на  $a^2$  и третье уравнение на  $a$  и затем складывая уравнения полученной систем, получаем:

$$\dot{A}_2 = \frac{1}{3}(\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}). \quad (4)$$

Анализ процессов, протекающих в цепи, начинают с составления системы расчётных уравнений и преобразования ее к виду, удобному для анализа [3].

Для аналитического представления уравнений по методу узловых напряжений (МУН) применяют матрицу соединений (инциденций). Узловая матрица инциденций устанавливает связь между независимыми узлами и ветвями схемы. Число строк такой матрицы равно числу независимых узлов, а число столбцов – числу ветвей. При расчёте цепи методом МУН поступают следующим образом:

1. Выбирают базисный узел и направления токов ветвей.
2. Составляют первую матрицу инциденций.
3. Составляют матрицу  $\underline{Y}_b$  проводимостей ветвей.
4. Определяют матрицу  $\underline{Y}_y$  узловых проводимостей.
5. Составляют матрицы  $\underline{\dot{E}}$  правило знаков то же, что и при использовании обобщённого контурного уравнения.
6. Решают уравнение следующего вида:

$$\dot{U}_y = \underline{Y}_y^{-1} \cdot M \cdot (-\underline{Y}_b \cdot \dot{E}) \quad (5)$$

7. Вычисление комплексных действующих значений токов ветвей:

$$\dot{I}_B = \underline{Y}_b (M^T \cdot U_y + \dot{E}). \quad (6)$$

8. Вычисление комплексных действующих значений напряжений ветвей:

$$U_b = M^T \cdot U_y + \dot{E}. \quad (7)$$

9. Составляем уравнения баланса мощностей. Полная комплексная мощность источников электрической энергии:

$$S_{ист} = \dot{E}^T \cdot I_B. \quad (8)$$

Полная комплексная мощность приемников электрической энергии:

$$S_{пр} = Y_b^{-1}(\dot{I}_B)^T I_B. \quad (9)$$

Рассмотрим присоединение нагрузки, схема замещения которого приведена на рис. 3 [3]. На схеме замещения (рис. 3) приняты следующие обозначения:  $I_{1c}, I_{2c}, I_{3c}$  – токи через поперечные проводимости фаз сети на землю;  $I_1, I_2, I_3$  – токи через продольные проводимости фаз нагрузки присоединения;  $I_0$  – ТНП, который проходит через место дефекта изоляции.

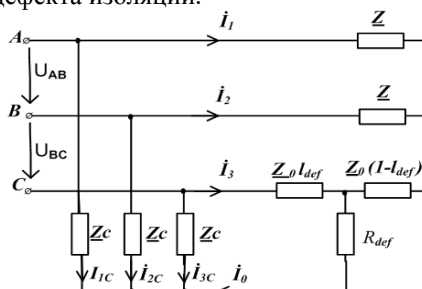


Рис. 3. Схема замещения присоединения нагрузки при появлении локального дефекта изоляции

Вектор ТНП зависит от расстояния до места дефекта  $l_{\text{деф}}$  и сопротивления в месте дефекта  $R_{\text{ДЕФ}}$  [1]. Значение  $X_C$  зависит от режима (конфигурации) сети, а поэтому учитывается реальное значение  $X_C$ . Рабочий режим присоединения в случае возникновения дефекта изоляции с сопротивлением  $R_{\text{ДЕФ}}$  в одной из фаз описывается системой уравнений по методу узловых напряжений в матричной форме:

$$\begin{cases} \left( \frac{2}{Z_1} + \frac{1}{Z_1 - Z_0 \cdot L} \right) \cdot U_1 - \frac{U_2}{Z_1 - Z_0 \cdot L} = \frac{E_{ab}}{Z_1} \\ \frac{-U_1}{Z_1 - Z_0 \cdot L} + \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{Z_0 \cdot L} + \frac{1}{Z_1 - Z_0 \cdot L} \right) \cdot U_2 - \frac{U_3}{R} = \frac{-E_{bc}}{Z_0 \cdot L} \\ \frac{-U_2}{R} + \left( \frac{1}{R} + \frac{3}{Z_C} \right) \cdot U_3 = \frac{E_a}{Z_C} - \frac{E_{bc}}{Z_C} \\ I_0 = \frac{(U_2 - U_3)}{R} \end{cases} \quad (10)$$

После преобразования системы уравнений (10) получим:

$$I_0 = \frac{E_{ab} \cdot Z_1 + 2E_{bc} \cdot Z_1 - E_{ab} \cdot L \cdot Z_0 - 2E_{bc} \cdot L \cdot Z_0}{3 \cdot Z_1 \cdot L \cdot Z_0 - 2 \cdot L^2 \cdot Z_0^2 + 3 \cdot R \cdot Z_1 + Z_1 \cdot Z_C} \quad (11)$$

После преобразования и распределения ТНП по фазам получим:

$$\begin{cases} \dot{I}_0 = \frac{(1 - l_{\text{деф}}) \dot{U}_{e j 0}}{X_C + l_{\text{деф}}(3 - 2l_{\text{деф}}) \cdot Z + 3R_{\text{деф}}}, \text{ для фазы } A \\ \dot{I}_0 = \frac{(1 - l_{\text{деф}}) \dot{U}_{e j 120}}{X_C + l_{\text{деф}}(3 - 2l_{\text{деф}}) \cdot Z + 3R_{\text{деф}}}, \text{ для фазы } B \\ \dot{I}_0 = \frac{(1 - l_{\text{деф}}) \dot{U}_{e -j 120}}{X_C + l_{\text{деф}}(3 - 2l_{\text{деф}}) \cdot Z + 3R_{\text{деф}}}, \text{ для фазы } C \end{cases} \quad (12)$$

Разрабатываемый алгоритм использует значение амплитуды вектора ТНП присоединения с повреждением и угла между этим вектором и вектором междуфазного напряжения для известного режима распределительной сети.

Диапазоны изменения угла между вектором ТНП и вектором линейного напряжения в зависимости от того, в какой из фаз присоединения возник дефект изоляции [2] в сетях с изолированной нейтралью, приведены на рис. 4.

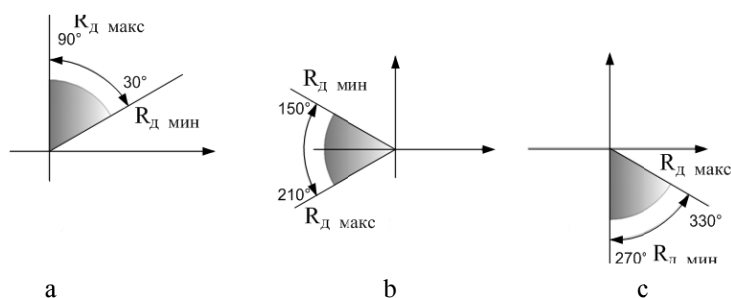


Рис. 4. Угловые зоны работы фазочувствительного блока для фиксации дефектов изоляции: а – фаза «С»; б – фаза «В»; с – фаза «А»

Представлено характерное изображение, отображающее суть метода и трехфазная плоскость (рис. 5,а), на которой каждое измерение вектора ТНП представлено в виде точки, отражающей положение конца вектора. Пунктирные окружности на этой плоскости отражают величину амплитуды вектора ТНП, выраженную в процентах от номинального значения. Из рис. 5 видно, что все измеренные значения векторов ТНП располагаются по случайному распределению в угловой зоне, шириной 180 градусов. Центр этой зоны смещен относительно центра трехфазной плоскости. Величина такого смещения обусловлено точкой, в которой проводилась балансировка векторов токов фаз.

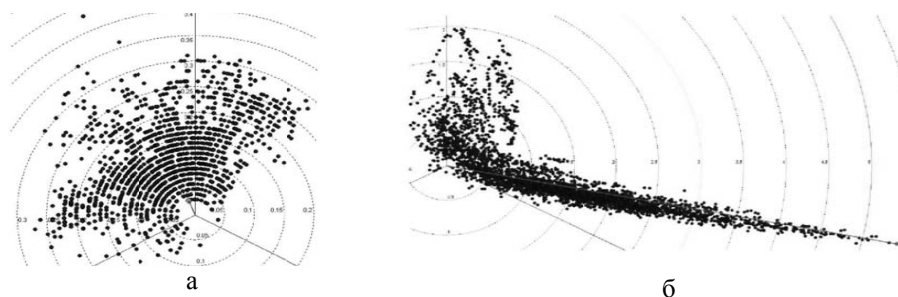


Рис. 5. Траектория движения вектора ТНП на трехфазной плоскости: а – нормальное состояние изоляции; б – развитие дефекта в одной из фаз (фаза А)

Анализируя приведенную информацию можно заключить, что контролируемая изоляция находится в хорошем состоянии и не требует проведения дополнительных измерительных и ремонтных работ. Анализ рисунка (см. рис. 5,б) явно выражает «направленность» движения вектора ТНП, что означает наличие проблем в одной из фаз. Такая картина распределения измеренных фазовых параметров вектора ТНП, свидетельствует о наличии развивающихся проблем в изоляции ввода фазы «А».

Алгоритм работы системы (рис. 6) разработан на основании [3] в цикле опроса датчиков ТНП каждого присоединения выполняется проверка соответствия текущих параметров режиму возникновения замыкания фазы на землю или дефекта изоляции в одной из фаз.

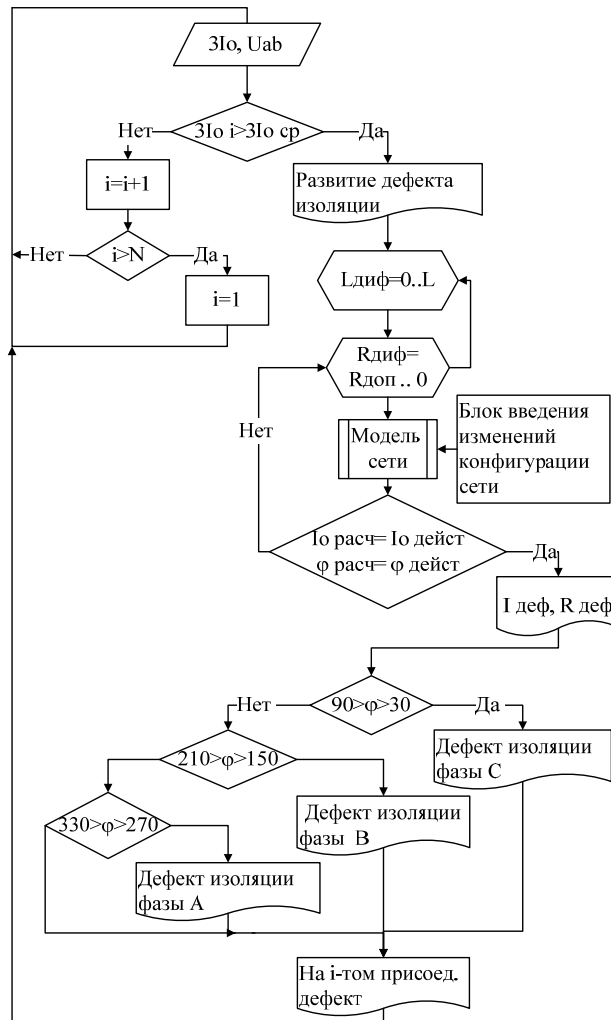


Рис. 6. Алгоритм работы централизованной системы автоматики при обнаружении дефекта изоляции

Действительное значение амплитуды ТНП  $i$ -го присоединения определяется путем вычитания дополнительного тока из вторичного тока трансформатора тока и учета реальных параметров трансформатора тока [4].

Графическое изображение зависимости вектора ТНП от расстояния до места дефекта изоляции (рис. 7) представлено красными линиями [3]. Вдоль этих кривых сопротивление дефекта постоянно. На графике приняты значения сопротивления дефекта изоляции от 10 до 10000 Ом с шагом 10 Ом. Наибольшее значение тока по амплитуде получается при минимальном сопротивлении (в данном случае 10 Ом), а наименьшее – при максимальном сопротивлении, зависимость представлена синими линиями. Вдоль этих кривых расстояние до места дефекта изоляции постоянно. На графике (рис. 7) приняты значения расстояний в относительных единицах соответственно слева направо 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05; 0,01. При появлении дефекта изоляции в фазе С диаграмма будет выглядеть как появление точки (в реальных условиях облако точек в этой области).

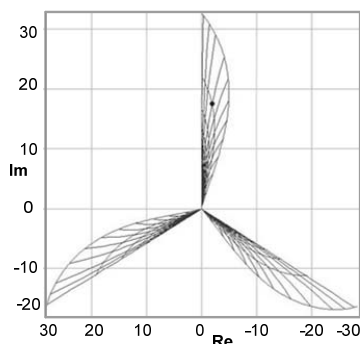


Рис. 7. Дефект в изоляции (на фазе C)

Описанная система диагностики кабельной линии, позволяет не только определять образовавшийся дефект изоляции, но и проследить развитие этих дефектов и определять предполагаемое место и фазу этого дефекта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Полуянович Н.К.* Разработка алгоритма релейной защиты распределительной сети на основе математической модели // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 240-245.
2. *Гребченко Н.В., Сидоренко А.А.* Интеллектуальная система для определения места и степени локальных дефектов изоляции в сети с изолированной нейтралью. Доклад представлен на XVII научно-технической конференции "Релейная защита и автоматика энергосистем 2006" Москва - 16-19 мая 2006 г.
3. *Шевченко В.А., Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Математическое описание метода мониторинга и прогнозирования неисправностей в силовых кабельных линиях. Статьи участников 4-ой Всер. науч.-техн. интернет-конф. «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике», 1-31 октября 2010 г.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

**Дубяго Мрина Николаевна** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: w\_m88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А; тел.: 88634651012, 89508519304; кафедра электротехники и мехатроники; магистрантка.

**Полуянович Николай Константинович** – e-mail: nik1-58@mail.ru; тел.: 88634610422, 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники; доцент.

**Dubyago Marina Nikolaevna** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: w\_m88@mail.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phones: +78634651012, +79508519304; the department of electrical engineering and mechatronics; master.

**Poluyanovich Nikolay Konstantinovich** – e-mail: nik1-58@mail.ru; phones: +78634610421, +79185693365; the department of electrical engineering and mechatronics; associate professor.