

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЕКТОРА ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ

Гребченко Н.В., Сидоренко А.А., Бельчев И.В.

Донецкий национальный технический университет

gvn@dgtu.donetsk.ua

Results of ground fault experimental investigations on cable-motor connection physical model have been given. Technique of regime parameters processing represented in digital format has been proposed

Введение.

Существенного сокращения времени отыскания и устранения повреждений кабельных линий можно достичь путем применения методов определения места дефекта изоляции в рабочих режимах и повышения их точности. Большинство таких методов основано на измерении тока нулевой последовательности или на математическом моделировании режимов работы при возникновении замыкания на землю. В настоящее время используются математические модели в основном без учета параметров нагрузки, а режимы замыкания на землю с учетом токов нагрузки недостаточно исследованы. Поэтому разработка математических моделей, которые позволяют выполнять расчеты рабочих режимов с учетом замыкания на землю или режимов при возникновении локальных дефектов изоляции, является актуальной. Для проверки адекватности таких моделей необходимо получение экспериментальных данных.

Известно, что в первичном и вторичном токах трансформатора тока нулевой последовательности кроме основной гармоники содержатся высшие гармоники и высокочастотные случайные составляющие, помехи и наводки [1]. Использование сигнала в таком виде в точных методах неприемлемо, а поэтому требуется разработка метода для выделения основной гармоники. В [1] рассматривается сглаживание данных без потери информации об основной гармонической составляющей сигнала, которое выполнялось методами регрессионного анализа и преобразования Фурье. Авторы пришли к выводу, что оба метода дают практически одинаковые результаты. В тоже время метод регрессионного анализа более точен, но значительно уступает преобразованию Фурье в скорости вычислений.

Целью проведения экспериментальных исследований является получение экспериментальных данных для оценки адекватности математических моделей, оценка влияния величины ёмкости фаз контролируемого присоединения по отношению к земле на зависимость вектора тока нулевой последовательности от удаленности точки замыкания и величины сопротивления дефекта изоляции $3\dot{I}_0=f(Z_{\text{деф}}, L_{\text{деф}})$, проверка точности алгоритма автоматического определения параметров дефекта изоляции $Z_{\text{деф}}$ и $L_{\text{деф}}$.

Основные результаты работы.

Исследования проводились на физической модели узла сети, состоящей из источника питания (разделительный трансформатор 0,4/0,22 кВ) и присоединения кабель-электродвигатель [2]. Для моделирования дефектов изоляции выполнялось включение резистора между соответствующей отпайкой фазы кабеля и землей. Величина резистора принималась равной величине сопротивления $Z_{\text{деф}}$ дефекта изоляции. На фазе А кабеля имеется четыре отпайки, которые отстоят друг от друга на одинаковом расстоянии (общая длина кабеля – 50 метров, сечение кабеля – 70 мм²). Внешняя сеть моделировалась путем включения конденсаторов емкостью 5 или 10,0 мкФ между каждой фазой и землей.

Для осциллографирования параметров режима использовалась плата типа L-154, встроенная в персональный компьютер. На входы платы подводились параметры режима после устройства согласования. Аналоговые сигналы преобразовывались 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

При выполнении исследований проведено две серии опытов, которые отличались величиной емкости сети: 5 и 10 мкФ. В каждой серии опытов выполнялось замыкание на землю последовательно в шести точках и режимы осциллографировались.

При проведении экспериментальных исследований зависимости вектора тока нулевой последовательности $3\dot{I}_0$ от параметров дефекта изоляции присоединения кабель – ЭД наибольшую трудность представляло обеспечение точности измерения векторов тока нулевой последовательности и напряжения. Поэтому для снижения влияния различных внешних факторов на результаты, при постановке экспериментов и дальнейшей обработке результатов, создавались наиболее благоприятные условия (выбор масштаба тока $3\dot{I}_0$ таким, чтобы максимально использовать динамический диапазон АЦП) и считалось что, поскольку изменение амплитуды и фазы $3\dot{I}_0$ происходит в небольшом диапазоне, то величина погрешности во всех опытах одинакова. Следовательно точность относительных изменений амплитуды и фазы Ψ тока можно считать достаточно высокой.

Для обеспечения требуемой точности определения параметров дефектов изоляции было учтено, что необходимо выполнять не только меры по снижению влияния помех на измерительные цепи, но и цифровую фильтрацию и выделение первой (основной) гармоники токов и напряжений.

Подобная задача решалась путём полиномиальной регрессии при передаче информации по каналам связи для исключения случайной компоненты, отражающей влияние помех [3]. Основным методом для этого использовался метод наименьших квадратов.

Реализация полиномиальной регрессии в методе выявления дефектов изоляции основана на допущении о синусоидальности токов и напряжений, а процесс принят установившимся. Поэтому для всех токов и напряжений аппроксимирующая кривая записана в общем виде: $Y_{расч}(t) = Y_{макс} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \psi)$, где $Y_{макс}$ – амплитуда тока (напряжения); f – частота; ψ – фаза тока (напряжения).

Для определения аналитических выражений, которые описывают исследуемые параметры режима, по результатам каждого опыта организован процесс определения значений $Y_{макс}$, f и ψ в виде вложенных циклов. В качестве исходных данных использовались последовательности чисел $Y(n)$, формируемых на выходе АЦП через равные промежутки времени преобразования Δt_{np} при подаче на его вход соответствующего тока или напряжения (n – номер измерения).

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены осциллограммы соответственно междуфазного напряжения и тока нулевой последовательности. Из рис. 2 видно, что форма тока нулевой последовательности в результате преобразований существенно изменяется, а для напряжения исходная форма очень близка к синусоидальной. Поэтому для тока его замена аналитическим выражением приводит к существенной коррекции формы.

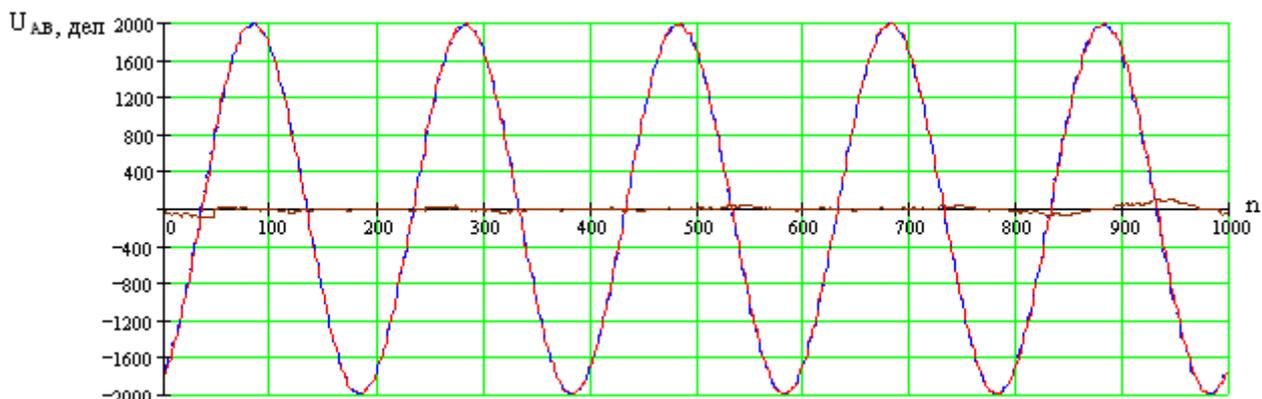


Рисунок 1 – Осциллограмма междуфазного напряжения U_{AB}

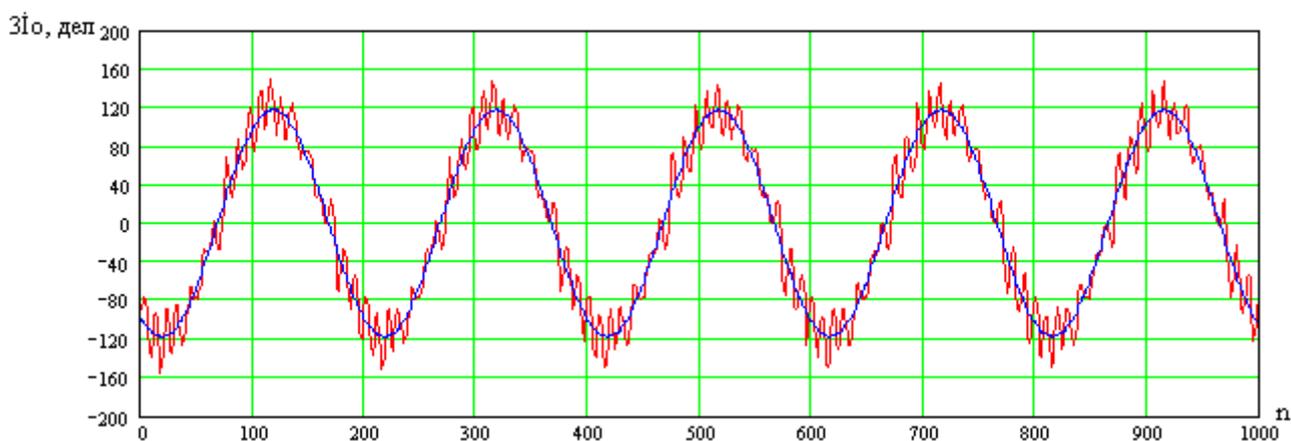


Рисунок 2 – Осциллограмма тока нулевой последовательности

Определение аналитических выражений, т.е. аппроксимация исходных последовательностей заключалось в нахождении таких значений $Y_{макс}$, f и ψ , при которых $\sum_{i=1}^N [Y_{изм\ i}(t) - Y_{расч\ i}(t)]^2 \rightarrow \min$, где N – количество точек измерений входных параметров, соответствующих промежутку времени, который выбран для аппроксимации.

Результаты обработки экспериментальных данных, по изложенному выше методу, представлены в таблицах 1 и 2. По этим же данным построены графики на рис.3-6.

Таблица 1 – Результаты обработки экспериментальных данных при емкости сети 5 мкФ

Точка замыкания	Линейное напряжение U_{AB} , дел. АЦП	Ток нулевой последовательности $3\dot{I}_0$, дел. АЦП
1	$1981,75 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 0,22985]$	$119,88 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 1,3455)$
2	$1979,05 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 1,29485]$	$118,98 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 2,397)$
3	$1975,75 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 4,105985]$	$119,74 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 5,207)$
4	$1985,5 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 1,03945]$	$118,6 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 2,12195)$
5	$1979,2 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 4,01]$	$120,48 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 5,188)$
6	$1971,5 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 5,62655]$	$119,54 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 0,4405)$

Примечание. $\Delta t = 4,6 \cdot 10^{-5}$ с – временная задержка между преобразованиями тока и напряжения с помощью одного АЦП

Таблица 2 – Результаты обработки экспериментальных данных при емкости сети 10 мкФ

Точка замыкания	Линейное напряжение U_{AB} , дел. АЦП	Ток нулевой последовательности $3\dot{I}_0$, дел. АЦП
1	$1993 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 0,5468]$	$265 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 1,745)$
2	$2018,25 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 4,53915]$	$261,83 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 5,7342)$
3	$2001,85 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 0,3351]$	$263,43 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 1,531)$
4	$1989,7 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 2,17166]$	$263,14 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 3,3685)$
5	$1995,1 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 3,6555]$	$264,37 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 4,85244)$
6	$1999,5 \cdot \sin[314,159 \cdot (t - \Delta t) - 3,1455]$	$264,64 \cdot \sin(314,159 \cdot t - 4,35)$

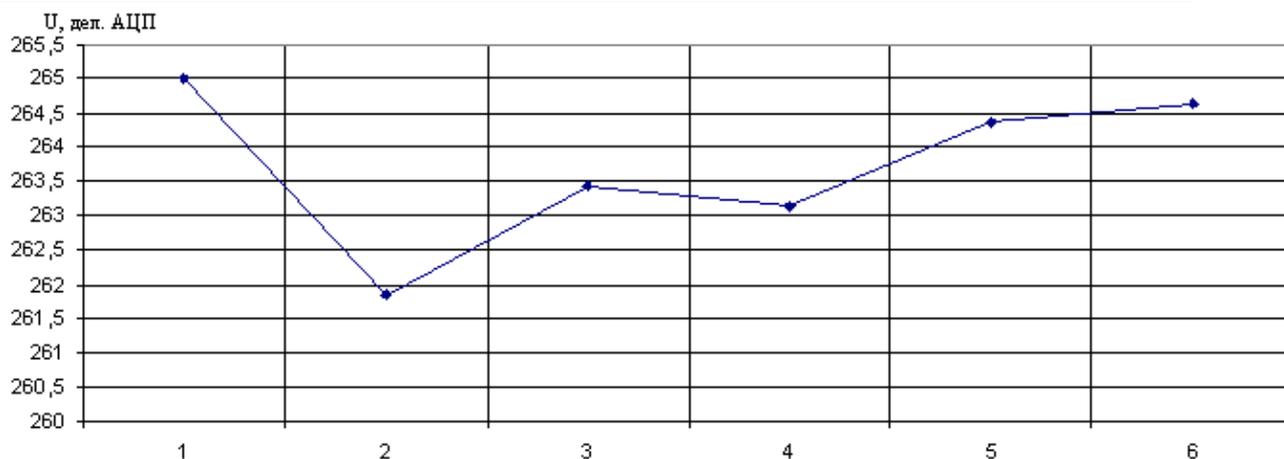


Рисунок 3 – Изменение амплитуды вектора тока нулевой последовательности при перемещении точки замыкания на землю (емкость сети 10 мкФ)

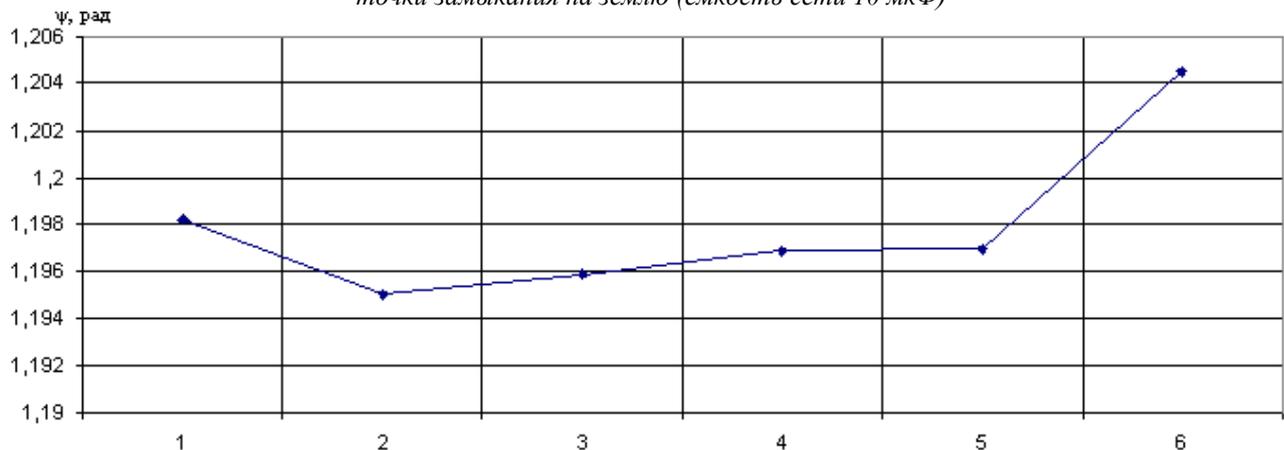


Рисунок 4 – Изменение фазы вектора тока нулевой последовательности по отношению к фазе вектора межфазного напряжения при перемещении точки замыкания на землю (емкость сети 10 мкФ)

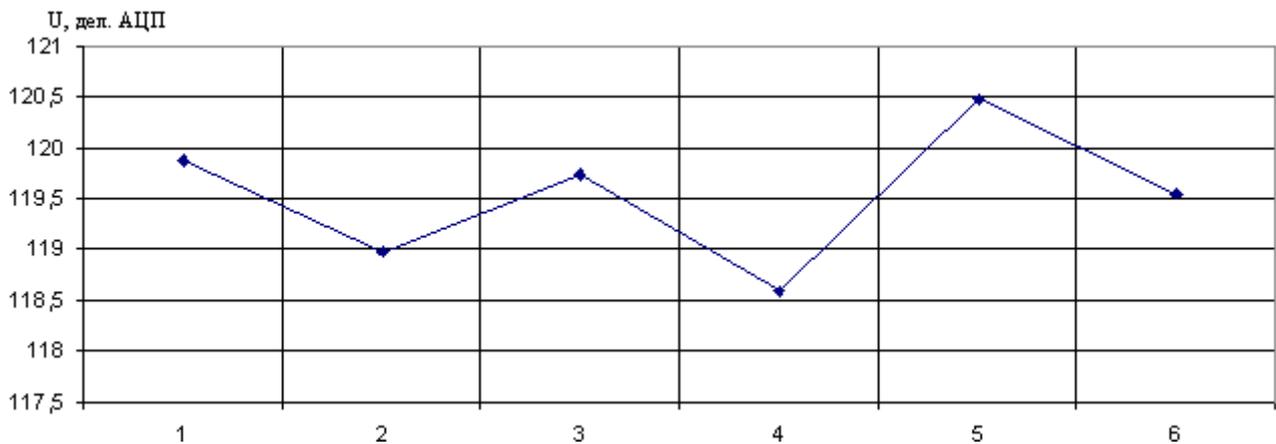


Рисунок 5 – Изменение амплитуды вектора тока нулевой при перемещении точки замыкания на землю (емкость сети 5 мкФ)

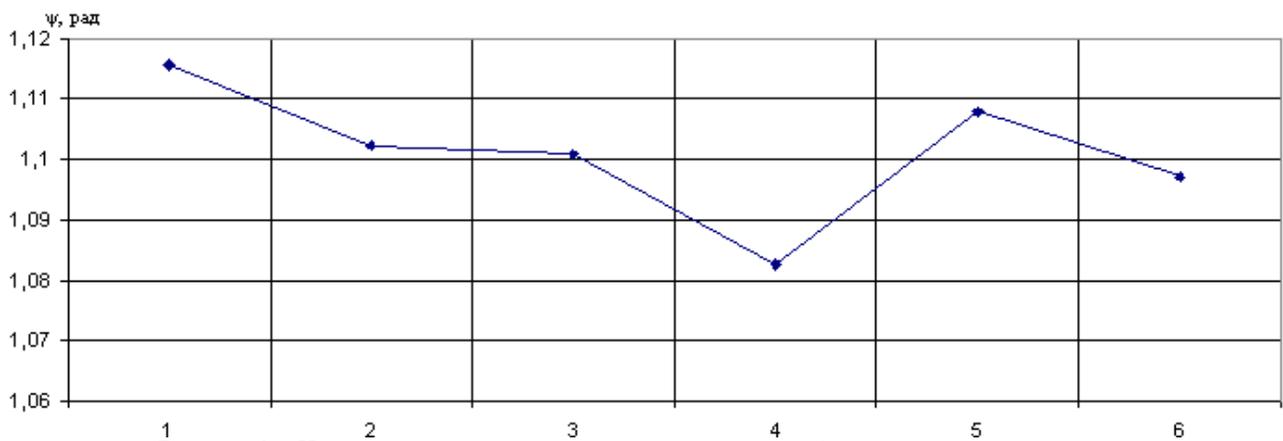


Рисунок 6 – Изменение фазы вектора тока нулевой последовательности по отношению к фазе вектора межфазного напряжения при перемещении точки замыкания на землю (емкость сети 5 мкФ)

Выводы.

1. Анализ результатов экспериментов показал, что амплитуда и фаза вектора тока нулевой последовательности зависят от расстояния до места дефекта (замыкания на землю) изоляции кабеля. Предварительные расчёты показали хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных.

2. Сравнение экспериментальных данных с данными, которые получены путем расчета на математической модели, показали, что они качественно совпадают.

3. Описанная методика аппроксимации экспериментальных данных (сглаживания данных) и выделения основной гармоники может быть рекомендована для использования в соответствующих микропроцессорных защитах от замыканий на землю.

Литература.

1. Гусенков А.В. Измерительный орган микропроцессорной защиты от однофазных замыканий на землю с функцией коррекции погрешностей трансформаторов тока нулевой последовательности для сетей 6-10 кВ. - Релейная защита и автоматика энергосистем. – 2006. Сборник докладов. Москва, ВВЦ, 16-19 мая 2006, с. 39-45.

2. Гребченко Н.В., Сидоренко А.А. Определение места возникновения локальных дефектов изоляции в рабочих режимах узла сети с изолированной нейтралью // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006.- Ч.8. - С.17-19

3. Вычислительная техника и программирование / А.В.Петров, В.Е.Алексеев, А.С.Ваулин и др. – М.: Высш. шк., 1990.- 479 с.