

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ 6-35 КВ

*Л.И. Сарин, А.И. Шалин, М.В. Ильиных,
А.Б. Пичхадзе (ООО «ПНП Болид», г. Новосибирск)
А.А. Михель (ОАО «Газпром», г. Москва)*

Введение

В некоторых случаях длина воздушных ЛЭП напряжением 10 кВ достигает 100 км и более, причём проходят они по районам, передвижение по которым сильно затруднено. Это относится, например, к линиям электрохимзащиты газо- и нефтепроводов, проложенных в северных регионах России. На этих ЛЭП довольно часто происходят однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Поиск места ОЗЗ в таких условиях затягивается на много дней и связан с большими трудозатратами. В течение всего этого времени соответствующая электрическая сеть либо постоянно, либо периодически работает в режиме однофазного замыкания на землю, что может оказаться необходимым для определения места повреждения (ОМП). Такой режим работы приводит к повышенной аварийности, переходу ОЗЗ в междуфазные или многоместные замыкания на землю. Особенно страдают при этом двигатели, фазная изоляция которых рассчитана на меньшие перенапряжения, чем у остальных элементов сети.

Существенно упростить процесс поиска места ОЗЗ могли бы средства дистанционного определения места повреждения, но в настоящее время нет приборов, которые эффективно решали бы поставленную задачу применительно к воздушным ЛЭП, хотя и имеются достаточно многочисленные публикации на эту тему (например, [1, 2, 3, 4]). Выявление места ОЗЗ на такой линии традиционно выполняется топографическим методом путём обхода трассы с использованием переносных приборов и визуального осмотра.

Всё сказанное выдвигает в качестве первоочередных актуальную задачу – разработать методы и средства дистанционного определения места однофазного замыкания на землю на воздушных ЛЭП 6-35 кВ. Решению этой задачи и посвящены исследования, основные результаты которых описаны в настоящей статье. В качестве метода решения принят «параметрический», основанный на использовании параметров сигналов переходных процессов, протекающих в сети при возникновении ОЗЗ.

Натурные эксперименты

По снятым в процессе проведения натурных экспериментов осциллограммам процессов ОЗЗ можно определить параметры переходного процесса, которые несут информацию о расстоянии до места повреждения. Наиболее информативные из них могут послужить основой способа определения расстояния до места ОЗЗ.

Проведение моделирования переходных процессов ОЗЗ в исследуемой сети на компьютере помогает выявить зависимости выделенных параметров от таких факторов как режим работы сети, переходное сопротивление в месте замыкания и т.д. Это позволяет без сложных дорогостоящих экспериментов ответить на многие вопросы, которые возникают в процессе разработки системы ОМП.

В качестве объекта рассмотрена линия питания электрохимзащиты ВЛ ЭХЗ «ЮГ» - 10 кВ протяжённостью 78 километров, отходящая от секции шин *IIIa* подстанции КС-7 «Демьянская» ООО «Сургутгазпром» (рис.1). ВЛ электрохимзащиты газопровода относится к той категории распределительных сетей, которые не представляется возможным оставить без питания на длительное время. Существующие в настоящее время

топографические методы поиска мест однофазных замыканий на землю в этой линии в совокупности с труднопроходимой трассой создают острую необходимость в разработке для данной линии (и других ВЛ среднего класса напряжения) дистанционных методов, которые могли бы использоваться на практике.

Питание секций шин 10 кВ (см. рис.1) осуществляется от трансформатора с расщеплённой обмоткой типа ТРДЦН-63000кВА, 110/10/10 кВ. На вводах 10 кВ от силовых трансформаторов установлены ТН в двух фазах типа ЗНОЛ 0,8-10УЗ. На секциях шин 10 кВ - ТН типа НАМИ-10.

От секций шин 10 кВ осуществляется питание синхронных двигателей СТД-12500 компрессоров, трансформаторов собственных нужд 10 кВ, трансформаторных подстанций компрессорного цеха (КЦ), АВО газа, бытовых потребителей, ВЛ электрохимзащиты (ВЛ ЭХЗ "Юг").

Каждый синхронный двигатель подключен к шинам через реактор РБУ-10-1000-0,56, кабели ААШВ 3×3×240 длиной 130-185 м.

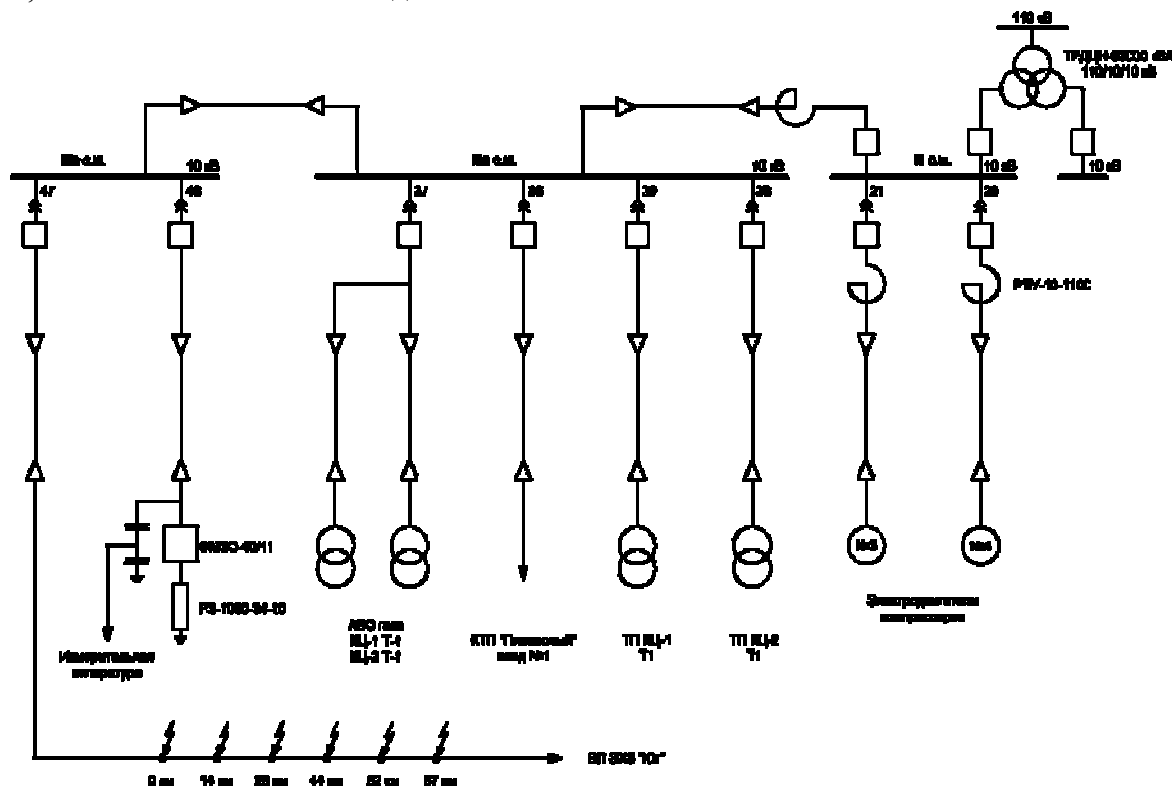


Рис.1. Схема сети 10 кВ компрессорной станции с отходящей ВЛ ЭХЗ «Юг»

Ёмкостный ток однофазного замыкания на землю секций III и IIIа сети 10 кВ КС-7 определяется в основном ёмкостью двигателей, питающих трансформаторов, кабелей распреустройства, а также ёмкостью протяженной ВЛ ЭХЗ. Его расчётная величина составляет 6,3 А.

1. Экспериментальные исследования переходных процессов ОЗЗ ВЛ ЭХЗ «Юг»

Эксперименты проводились при резистивном заземлении нейтрали сети. Для создания нейтральной точки использовался присоединённый к шинам IIIа фильтр нулевой последовательности типа ФМЗО-40/11. К нейтральной точке ФМЗО подключался резистор типа РЗ с номиналом 1000 Ом.

Организация искусственного ОЗЗ ВЛ ЭХЗ на разном удалении от ПС осуществлялась соединением с "землей" одной из фаз находящейся под напряжением линии через специальный искровой промежуток. Схема подключения измерительной аппаратуры представлена на рис.2. При этом осциллографовались следующие сигналы:

- ток через заземляющий резистор (с датчика Холла: точность преобразования $\pm 0,3\%$; частотный диапазон - $0 \div 150$ кГц, на рис.2 – ДХ);
- токи фаз А и С (с трансформаторов тока типа ТЛ класса точности 3 и частотной полосой пропускания не менее 1 кГц, на рис.2 – ТТ);
- ток нулевой последовательности (с трансформатора тока типа ТЗЛМ, на рис.2 – ТТНП);
- напряжение $3U_0$ (с дополнительной вторичной обмотки трансформатора напряжения, соединённой по схеме открытого треугольника, на схеме – ТН);
- фазные напряжения (с делителей напряжения рассчитанных на максимальное напряжение 100 кВ, номинальный диапазон рабочих частот – $20 \div 1 \cdot 10^6$ Гц, на схеме – ДН (рис.3)).

Во время проведения опытов ОЗЗ все присоединения секций шин III и IIIа за исключением электродвигателей находились в работе. Электродвигатели были отключены. В нормальном режиме работы сети к секции III подключен один электродвигатель.

Некоторые осциллограммы переходных кривых напряжения повреждённой фазы и тока через резистор, полученные при проведении ОЗЗ вдоль трассы ВЛ ЭХЗ «Юг», представлены на рис.4-6.

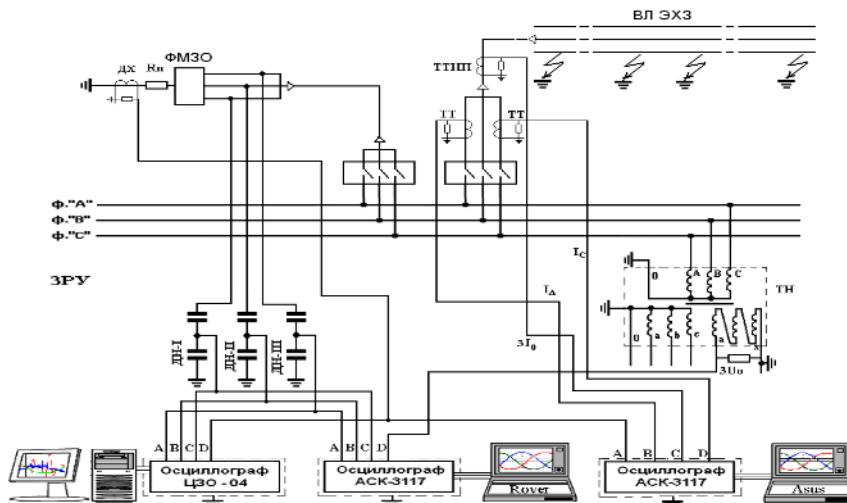


Рис.2. Схема подключения измерительной аппаратуры



Рис.3. Внешний вид делителей напряжения

Вдоль трассы ВЛ ЭХЗ имеются опоры (точки проведения опытов искусственного ОЗЗ), переходное сопротивление земли в месте установки которых значительно превышает величину 20 Ом (в соответствии с рекомендациями ПУЭ) и достигало значений порядка 150 Ом.

Необходимо отметить, во-первых, что в некоторых случаях, например в переходных кривых ОЗЗ на 57 километре ВЛ свободная колебательная составляющая, обусловленная образованием контуров L-C при «соединении» фазы с землёй, не наблюдается (по-видимому, из-за влияния высокого переходного сопротивления земли в данной точке трассы).

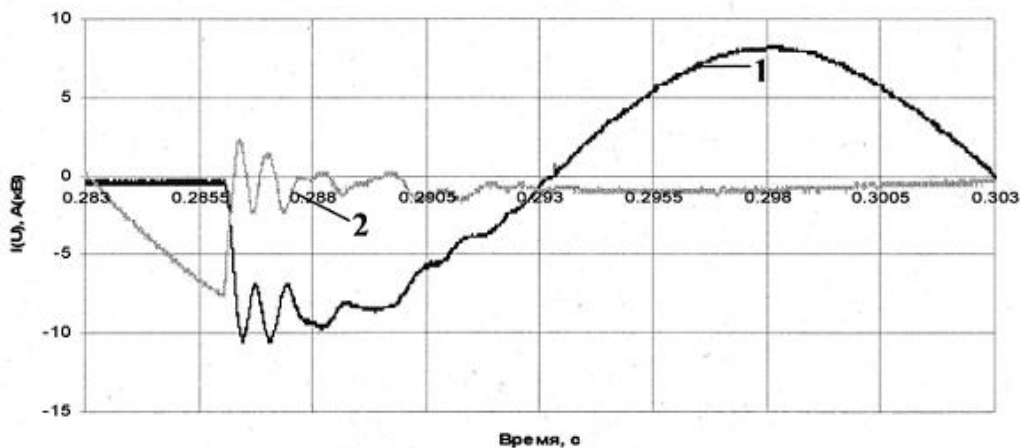


Рис.4 Экспериментальные кривые тока через резистор (1) и напряжения повреждённой фазы (2) процесса ОЗЗ на 14 км трассы ВЛ

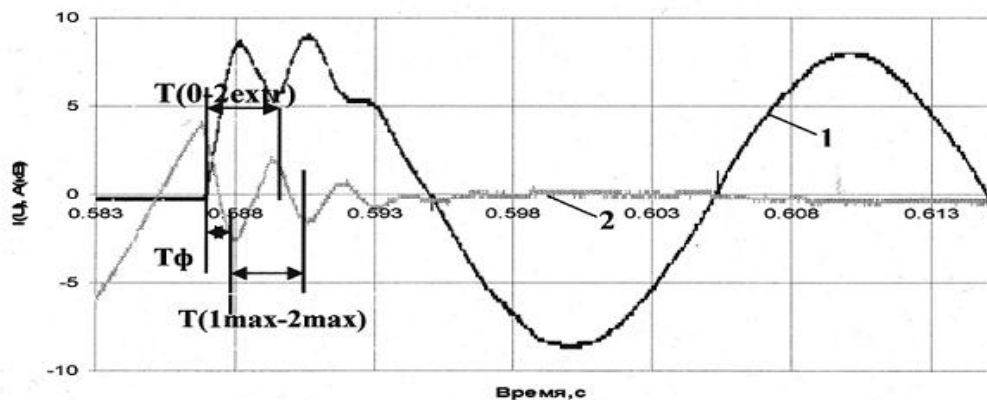


Рис.5. Экспериментальные кривые тока через резистор (1) и напряжения повреждённой фазы (2) процесса ОЗЗ на 44 км трассы ВЛ

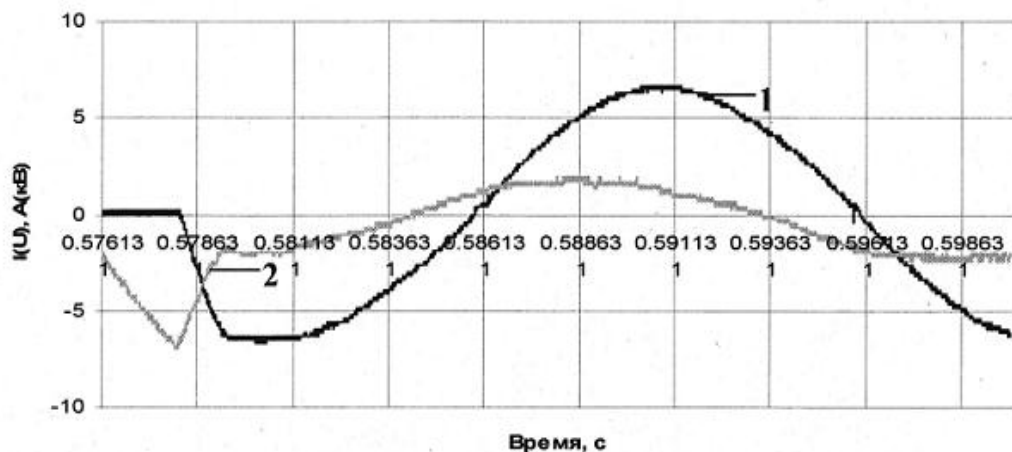


Рис.6. Экспериментальные кривые тока через резистор (1) и напряжения повреждённой фазы (2) процесса ОЗЗ на 57 км трассы ВЛ

Переходные кривые при замыканиях на землю через большое переходное сопротивление содержат только апериодическую составляющую, что делает невозможным использование методов ОМП, основанных на частотном анализе сигналов процесса ОЗЗ (частотно-параметрических методов, описанных, например, в [1]).

Во-вторых, в остальных экспериментальных точках на ВЛ (600 метров за кабельным вводом, 14, 28, 44, 52 километры) полученные осциллограммы процессов ОЗЗ содержат переходную составляющую, основная частота колебаний которой не превышает 1 кГц и меняется с изменением расстояния до места повреждения. Заметной по величине высокочастотной составляющей, описанной в [1, 2, 3], и вызванной процессом разряда ёмкости повреждённой фазы, в проведённых нами экспериментах отмечено не было. Данный факт, по-видимому, указывает на то, что высокочастотная составляющая разряда ёмкости повреждённой фазы не может быть использована для построения алгоритма ОМП.

В одном из экспериментов на первой опоре после кабельной вставки имитировалось падение провода на обледеневшую землю (опыт проводился в ноябре). При включении линии под напряжение выяснилось, что напряжение нулевой последовательности имело исчезающе малое значение, и фиксирующая аппаратура на подстанции не запустилась. Следовательно, при повреждениях такого рода не будет срабатывать защита линии от замыканий на землю, не запустится соответствующая сигнализация «земля в сети» на подстанции и не сработают приборы, предназначенные для фиксации места однофазного замыкания на землю.

2. Параметры, определяющие расстояние до места повреждения

Анализ переходных кривых тока через резистор и напряжения повреждённой фазы (рис.4-6) помог выделить ряд параметров, содержащих информацию о расстоянии до места однофазного повреждения. Наибольшая точность индикации места ОЗЗ (минимальная «зона обхода» при поиске повреждённого участка трассы) может ожидаться при выполнении двух основных условий:

- разброс значений параметра в одной и той же точке замыкания на землю, который может быть обусловлен погрешностью измерительной аппаратуры (трансформаторов тока и напряжения, делителей напряжения, осциллографов и т.д.), различным сопротивлением заземления, характеристиками дуги, точностью обработки осциллограмм должен быть минимальным;
- «градуировочная кривая», связывающая замеренный параметр с расстоянием до места ОЗЗ в рассматриваемом режиме эксплуатации имела как можно больший угол наклона к оси расстояний (рис.7).

В результате были выбраны следующие наиболее информативные параметры сигналов I_R (ток через резистор) и $U_{нов}$ (напряжение повреждённой фазы) (рис.5):

$T\Phi$ - время, пропорциональное длительности фронта, определяемое по переходной кривой от начала переходного процесса до достижения первого максимального значения;

$T(0-2extr)$ - время от начала переходного процесса до достижения переходной кривой второго экстремума колебательного процесса;

$T(1max-2max)$ - время от первого максимального значения переходной кривой до второго максимума.

Использование всех трёх параметров для определения расстояния до повреждённого участка фазы при ОЗЗ не во всех случаях возможно. В соответствии с рис.6 можно выделить некоторые точки ВЛ (например, 57 км) с отсутствием двух последних параметров (кроме $T\Phi$).

Длительность фронта можно измерить в каждой из полученных в процессе экспериментов кривых, что даёт возможность использовать данный параметр переходного процесса для ОМП. В качестве источника сигнала для определения $T\Phi$, а далее - и расстояния до точки повреждения целесообразно принять ток через резистор. Разбросы

параметра $T\Phi$ кривых I_R и $U_{повр}$ оказались соизмеримы, характеристики $T\Phi = f(L_{33})$ сопоставимы, но с точки зрения реализации данного метода на практике, организация съёма сигнала I_R при наличии установленного заземляющего резистора требует меньших вложений и технически проще выполнима.

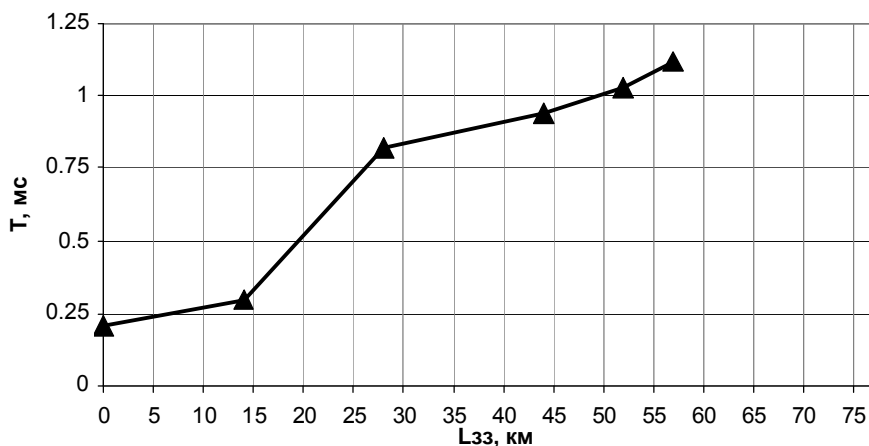


Рис. 7. Кривая $T\Phi = f(L_{33})$, построенная по результатам обработки осциллограмм I_R

Проведённое в пакете PSpice моделирование переходных процессов однофазных замыканий на землю в различных точках трассы ВЛ, при различном составе включенного на шины оборудования, варьировании переходного сопротивления земли помогло выявить следующее:

- разбросы $T\Phi$ тока через резистор при изменении сопротивления земли в одной точке замыкания в широких пределах, не превышают 10% в любом режиме работы сети. Это даёт возможность считать, что изменение факторов, влияющих на величину сопротивления заземления (дождь или сухая погода, зима или лето) будет оказывать слабое влияние на замер величины $T\Phi$;
- зависимости $T\Phi = f(L_{33})$ заметно расходятся при изменении состава оборудования (рис. 8), подключённого к сборным шинам (в частности, при включениях и отключениях двигателей компрессоров). Например, при включении одного двигателя компрессора из числа подключённых к секций шин III и III^а, значение измеряемого параметра $T\Phi$ увеличится примерно на 10-15% по отношению к замеренному в эксперименте случаю, когда двигатели были отключены, т.е. кривая $T\Phi = f(L_{33})$ поднимется на эту величину. Отсюда ясно, что при определении по замеренному значению $T\Phi$ расстояния до места ОЗЗ необходимо использовать ту градуировочную кривую $T\Phi = f(L_{33})$, которая соответствует текущему рабочему режиму;
- с удалением точки замыкания от места регистрации сигнала значение $T\Phi$ растёт с разной скоростью: вначале быстро, что даёт возможность достаточно точно определить расстояние до места ОЗЗ, а после 15 километра – медленнее, что снижает точность ОМП.

На рис. 9 приведена переходная кривая тока через резистор, полученная в результате моделирования процесса ОЗЗ на 57 км трассы ВЛ ЭХЗ. Сравнив её с изображённой на рис. 6, убеждаемся в достаточно высокой точности совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными. Значение длительности фронта экспериментальной кривой I_R составляет 1,11 мс.

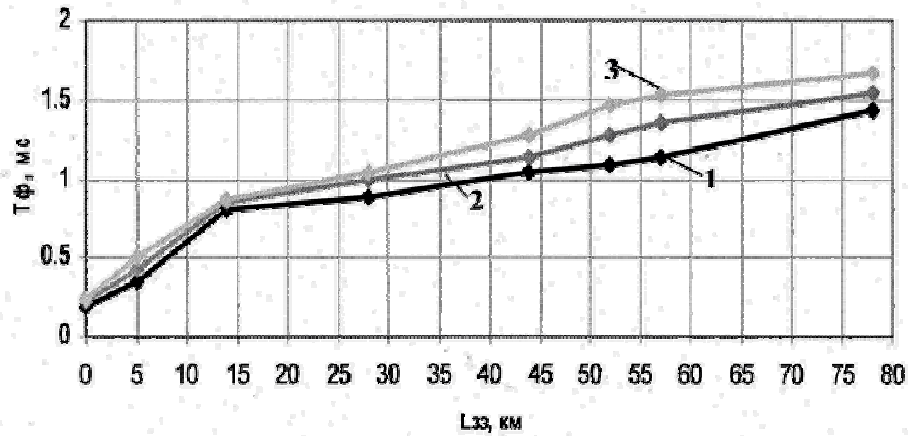


Рис.8 Кривые $T\Phi = f(L_{33})$ сигнала I_R , построенные по результатам моделирования ОЗЗ: (1) – при работе сети с отключенными электродвигателями, (2) – включен один двигатель (нормальный режим работы сети), (3) – в работе оба двигателя.

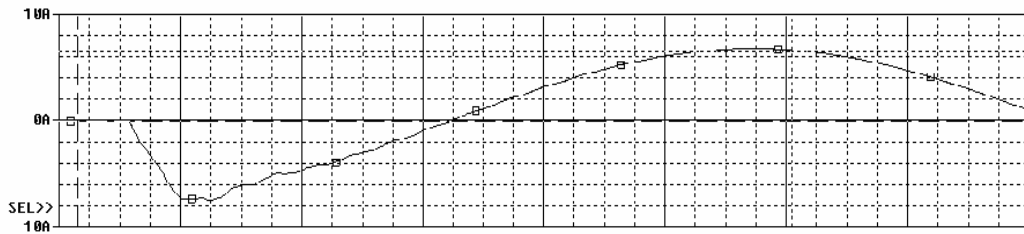


Рис.9. Осциллограмма I_R , полученной в ходе моделирования процесса ОЗЗ, точка замыкания – 57 км, сопротивление земли $R_{зем} = 150$ Ом, электродвигатели секции III отключены. Масштаб по времени: 0.5 мс/дел. Значения $T\Phi$: 1,129 мс.

3. Метод определения расстояния до места ОЗЗ

Основу метода составляет определение $T\Phi$ переходной кривой тока через заземляющий высокоомный резистор I_R . Если ОЗЗ произошло на обслуживаемой ВЛ ЭХЗ (это видно по срабатыванию защиты от ОЗЗ на этой линии), дежурный персонал по кривой $T\Phi = f(L_{33})$ для текущего режима эксплуатации подстанции определяет расстояние до места ОЗЗ.

Реальная точка ОЗЗ находится в пределах зоны обхода, которая имеет тенденцию к росту с удалением точки замыкания на землю от шин ЗРУ подстанции. Если не учитывать эксплуатационные предаварийные режимы работы исследуемой сети (состав включенного на шины оборудования) величина данной зоны может достигать 25 км при длине ВЛ ЭХЗ «Юг» 78 км. При использовании метода необходим обязательный учёт предаварийного режима работы сети. Любое изменение реактивных параметров (например, включение-отключение электродвигателя) приводит к сдвигу и изменению кривой $T\Phi = f(L_{33})$. Используя кривую $T\Phi = f(L_{33})$, соответствующую реальному режиму, величину зоны обхода можно уменьшить примерно до 15% длины ВЛ.

В тех точках трассы ВЛ, где в переходной кривой тока через резистор есть возможность выделить свободную колебательную составляющую процесса ОЗЗ, рационально использовать помимо $T\Phi = f(L_{33})$ аналогичные зависимости для других выделенных параметров. Расстояние до места повреждения сформируется как среднее из определённых по «градуировочным кривым», соответственно, уменьшится и зона обхода.

По описанным выше принципам разработан и изготовлен макет опытного устройства для определения расстояния до места повреждения на ВЛ при однофазном

замыкании на землю. Источник сигнала для определения $T\Phi$ - кривая тока через заземляющий высокоомный резистор.

Описанный выше дистанционный метод определения места замыкания на землю ВЛ не даёт высокой точности. Он помогает лишь сузить границы поиска места повреждения, что говорит о целесообразности применения данного метода в комплексе с другими, известными и достаточно исследованными. Например, широко применимый для ВЛ метод секционирования на участки разъединителями (лучше с автоматическим приводом).

Для совершенствования алгоритма определения расстояния до места повреждения необходимо проведение дальнейших экспериментов, а, главное, - достаточно продолжительная опытная эксплуатация разработанного устройства в реальных условиях эксплуатации с анализом её результатов.

Выводы

1. Для ВЛ напряжением 6-35 кВ получен дистанционный метод локации однофазного места замыкания на землю по параметрам переходного процесса. Этот метод применим для любых видов ОЗЗ (как самоустраняющихся, так и переходящих в устойчивое замыкание), за исключением падения провода на обледеневший грунт.
2. Рассмотренный выше метод целесообразно дополнять другими известными способами локации мест однофазных замыканий на землю (как дистанционными, так и топографическими) с целью минимизации зоны обхода.
3. При падении оборвавшегося провода на землю возможны случаи, когда переходное сопротивление в месте ОЗЗ имеет настолько большое значение, что напряжение нулевой последовательности на подстанции не превышает нескольких процентов номинального, однофазное замыкание на землю не фиксируется по напряжению $3U_0$ на секции шин и соответствующая аппаратура не запускается. При повреждениях такого рода эффективность метода не гарантирована.
4. Разработан и изготовлен макет опытного устройства для определения расстояния до места повреждения на ВЛ при однофазном замыкании на землю. Источник сигнала для определения $T\Phi$ - кривая тока через заземляющий высокоомный резистор.

Литература

1. Технический отчёт ОАО «Транснефтьналадка». Разработка измерительного комплекса для определения мест однофазных замыканий на землю на ВЛ-10 кВ и технических мероприятий по его внедрению. Шифр работы: 03.4.6.9.054. Инв.№452. – 41 с.
2. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением//Электричество.-2005.-№6. – С.9-18.
3. Качесов В.Е., Лавров В.Ю., Черепанов А.Б. Параметрический метод определения расстояния до места повреждения в распределительных сетях // Электрические станции. 2003. - № 8. С.37-43.
4. Патент РФ №2222026 (от11.01.2002г.). Способ определения расстояния до места однофазного замыкания в распределительных сетях//Качесов В.Е.,2004.
5. Патент РФ №2159445 (от23.08.1996г.). Способ определения местонахождения однофазного замыкания на землю в сети распределения мощности//Рейо Рантанен, Янне Суонтауста.,1997
6. *Шальт Г.М.* Определение мест повреждения в электрических сетях. -М.: Энергоатомиздат,1982
6. Научно-технический отчёт ООО «ПНП Болид» по договору №23-2005. Разработка и изготовление системы мониторинга распределительной сети 6-35 кВ с изолированной нейтралью. Новосибирск, 2006.