



Д. А. Семёнов



А. В. Диомидов

Определение места возникновения замыканий на землю в воздушных сетях 6 – 35 кВ волновым методом двусторонних измерений

СЕМЁНОВ Д. А., Новосибирский государственный технический университет 630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
ДИОМИДОВ А. В., ООО «Болид» 630015, г. Новосибирск, Электрозаводской пр., 1
nio_bolid@mail.ru

Рассмотрен волновой метод двусторонних измерений для определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю в сетях напряжением 6 – 35 кВ от шин питающей подстанции. Предложены алгоритм определения отсчетов времени срабатывания измерительных комплектов, необходимых для локализации места повреждения (ОМП), и техническое решение для его реализации. На компьютерной модели выполнена проверка работоспособности алгоритма ОМП для различных режимов заземления нейтрали, а также при различном переходном сопротивлении и разной удалённости однофазного замыкания от измерительных комплектов в распределительной сети.

Ключевые слова: определение места повреждения, однофазное замыкание на землю, волновой метод, воздушные линии, режим заземления нейтрали, MATLAB, Simulink.

В настоящее время актуальной является задача минимизации последствий от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ. Одно из ключевых направлений её решения — улучшение условий оперативного выявления повреждённой линии и определения места однофазного повреждения.

Известно, что релейная защита от ОЗЗ в большинстве случаев реагирует на сигнал. Быстрое и селективное отключение повреждённого присоединения особенно в воздушных сетях практически не реализуется в силу объективных причин: малых токов замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, отсутствия автоматических пунктов секционирования для перевода питания потребителя, отсутствия датчиков тока нулевой последовательности. Кроме того, удержание ОЗЗ на время его локализации (в том числе с поочерёдным отключением присоединений на питающей подстанции) остаётся традиционной практикой, что приводит к длительному воздействию на изоляцию линейного напряжения и перенапряжений при дуговых замыканиях на изоляцию, т. е. ускоряет её старение и может спровоцировать переход ОЗЗ в междуфазное повреждение с выходом оборудования из строя. При дистанционном определении места возникновения ОЗЗ затраты на его локализацию сокращаются, нормальный режим эксплуатации мо-

жет быть восстановлен быстрее. Это, в свою очередь, положительно отражается на показателях надёжности, так как снижаются интенсивность старения изоляции, вероятность развития аварии и трудозатраты на поиск места повреждения.

Дистанционное определение места повреждения (ОМП) линии при замыкании на землю в распределительной сети может быть реализовано на основе анализа параметров аварийного режима с помощью одного из двух основных методов расчёта: расстояния до места повреждения на основе изменения сопротивления линии или фиксации электромагнитных волн тока и напряжения, которые распространяются по линии от места ОЗЗ.

Метод определения места повреждения

В качестве метода определения места повреждения воздушных линий (ВЛ) в настоящем исследовании рассматривается волновой метод двусторонних измерений. Метод основан на регистрации на каждом конце контролируемого участка параметров переходного процесса, который протекает в линии электропередачи (ЛЭП) при возникновении замыкания на землю.

В настоящее время существуют устройства для ОМП, действие которых основано на волновом методе двусторонних замеров, а сам метод неодно-

кратно описан. В данной статье также рассмотрен волновой метод двусторонних замеров и механизм возникновения алгоритмической погрешности при его использовании. Задача определения момента времени прихода электромагнитных волн в каждый из концов контролируемого участка требует надёжного и простого алгоритма выделения этого момента времени.

Согласно теории распространения электрических сигналов по ЛЭП, существует несколько конфигураций распространения сигнала по линии, имеваемых модами [1].

При возникновении в сети ОЗЗ по повреждённой линии распространяется сигнал нулевой последовательности, передний фронт которого, как показано в [2], состоит из двух составляющих: первая, распространяющаяся с большой скоростью по межфазному каналу, и вторая, распространяющаяся с большой дисперсией по нулевому каналу [2].

Для реализации предлагаемого метода ОМП следует использовать параметры «первой составляющей» нулевой моды сигнала напряжения нулевой последовательности (НП). Регистрация сигнала напряжения НП проводится на каждом конце линии. При этом необходимо, чтобы измерительные комплекты (ИК) вели синхронный точный счёт времени.

Техническое решение для реализации метода ОМП

Для реализации предложенного способа определения места возникновения ОЗЗ, необходимо использовать измерительные, аппаратные и программные средства, которые должны:

1. Измерять фазные значения напряжения сети на каждом конце контролируемой линии.
2. Измерять фазные значения токов контролируемой линии.
3. Формировать сигнал напряжения НП на основе измеренных фазных напряжений.
4. Формировать сигнал тока НП на основе измеренных фазных токов.
5. Проводить запись сигналов с высокой частотой дискретизации (более 20 МГц).
6. Проводить точный синхронный отсчёт времени на каждом конце контролируемой линии и на шинах питающей подстанции.

Учитывая требования, предъявляемые к комплексу ОМП, включающему в себя измерительные комплекты (ИК) и вычислительный сервер (терминал), который обрабатывает информацию, полученную от ИК, предлагается ис-

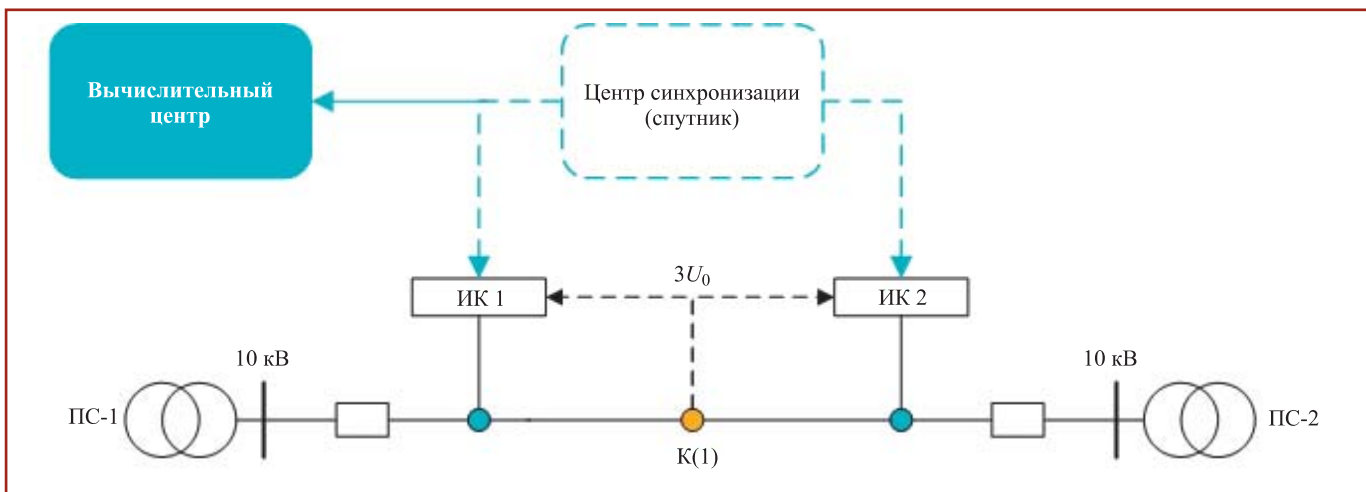


Рис. 1. Схема сети с ОЗЗ и местами установки приборов

пользовать следующие технические решения:

- делители напряжения, монтируемые на каждом из концов контролируемой ВЛ, для измерения фазных напряжений;

- датчики Роговского, монтируемые на каждом из концов контролируемой ВЛ, для измерения фазных токов;

- технологию синхронизации терминала ОМП и ИК, установленных по концам контролируемого участка, с применением системы GPS для точного синхронного отсчёта времени в каждом ИК. Каждый ИК связывается со спутником, который будет отправлять метку времени в каждый элемент комплекса ОМП. Технология синхронного счёта времени обладает явным преимуществом: в отличие от варианта использования кварцевого счётчика ошибка отсчёта времени не накапливается в процессе работы счётчика.

На рис. 1 показаны места установки ИК 1 и ИК 2 на каждом из концов линии, место однофазного замыкания точка К(1). Пунктиром обозначены пути передачи сигналов между элементами комплекса ОМП.

Суть метода заключается в следующем: после возникновения ОЗЗ (точка К1) происходит фиксация первых полуволн напряжения НП и выделяется первый максимум этой полуволны в каждом из ИК (ИК 1 и ИК 2), затем происходит математическая обработка полученной информации в вычислительном центре (терминал ОМП), в ходе которой рассчитывается расстояние от шин питающей подстанции до места замыкания. Сигналы напряжения для каждого из ИК записываются с измерительных выходов высоковольтных делителей напряжения ДН-1 и ДН-2 соответственно.

Алгоритм работы программы ОМП

Для того, чтобы определить, на каком расстоянии от питающей подстанции произошло замыкание на землю, необходимо получить информацию о сигнале напряжения НП. Отмечено, что сигнал напряжения НП содержит две составляющие, первая из которых распространяется со скоростью, близкой к скорости света. Для расчёта расстояния при известной скорости распространения сигнала, необходимо определить время его появления в каждом из ИК 1 и 2.

Имея информацию о том, когда волна напряжения достигает каждого из ИК 1 и 2, расстояние до места замыкания можно определить по формулам:

$$\Delta t = |t_1 - t_2|; \quad (1)$$

$$T = t + t + \Delta t; \quad (2)$$

$$t = \frac{T - \Delta t}{2}; \quad (3)$$

$$L_1 = t_1 v_p; \quad (4)$$

$$L_2 = t_2 v_p. \quad (5)$$

где t_1 и t_2 — время срабатывания логической части ИК 1 и 2 соответственно, Δt — разница во времени между моментами срабатывания ИК, T — время прохождения сигнала по всей длине контролируемой линии, v_p — скорость распространения сигнала по всей длине контролируемой линии, L_1 и L_2 — расстояние от места установки измерительных комплексов 1 и 2 соответственно до места ОЗЗ. Параметры T , v_p — определяются экспериментальным путём во время наладки комплекса ОМП.

Определение моментов времени срабатывания логической части каждого ИК имеет особенности, которые за-

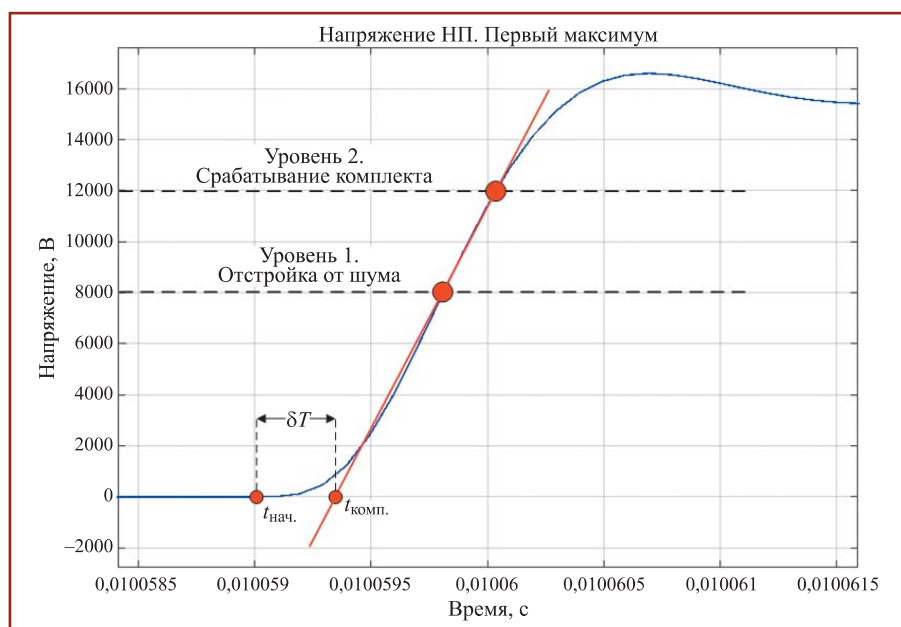


Рис. 2. Иллюстрация работы программы ОМП для предложенного алгоритма ОМП

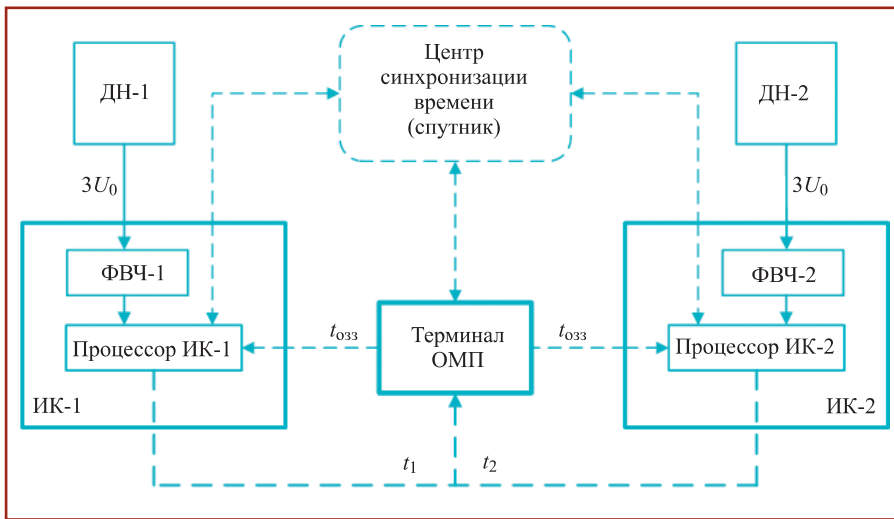


Рис. 3. Схема обмена данными между элементами комплекса ОМП

Таблица 1

Переходное сопротивление в месте замыкания, Ом	Расстояние от точки замыкания до шин питающей подстанции, км					
	Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3	
№ комплекта	1	2	1	2	1	2
0,01	19,914	0,185	14,968	5,130	10,049	
100	19,915	0,183	14,971	5,127	10,049	
1000	19,907	0,191	14,974	5,125	10,049	
Фактическое расстояние, км	20	0	15	5	10	

ложены в алгоритм программной обработки входных сигналов, а именно, необходимость осуществления отстройки от шумов (собственные шумы применяемого аналого-цифрового преобразователя и помехи в измеряемом сигнале) и установка порогов срабатывания комплекта.

Входной сигнал обрабатывается в следующем порядке:

1. Проверяется превышение входным сигналом уровня отстройки от шума (уровень 1, рис. 2).
2. Определяется уровень срабатывания комплекта (уровень 2, рис. 2).
3. Через точки пересечения линией сигнала порогов срабатывания (уровней 1 и 2 соответственно) строится прямая.
4. Определяется точка пересечения прямой с осью времени. Таким образом определяется отметка времени срабатывания каждого ИК, которое используется в дальнейших расчетах.

На рис. 2 изображены входной сигнал напряжения НП (первая составляющая нулевой моды), а также показано, каким образом появляется погрешность измерений δT данного способа поиска времени начала события $t_{нач}$ для

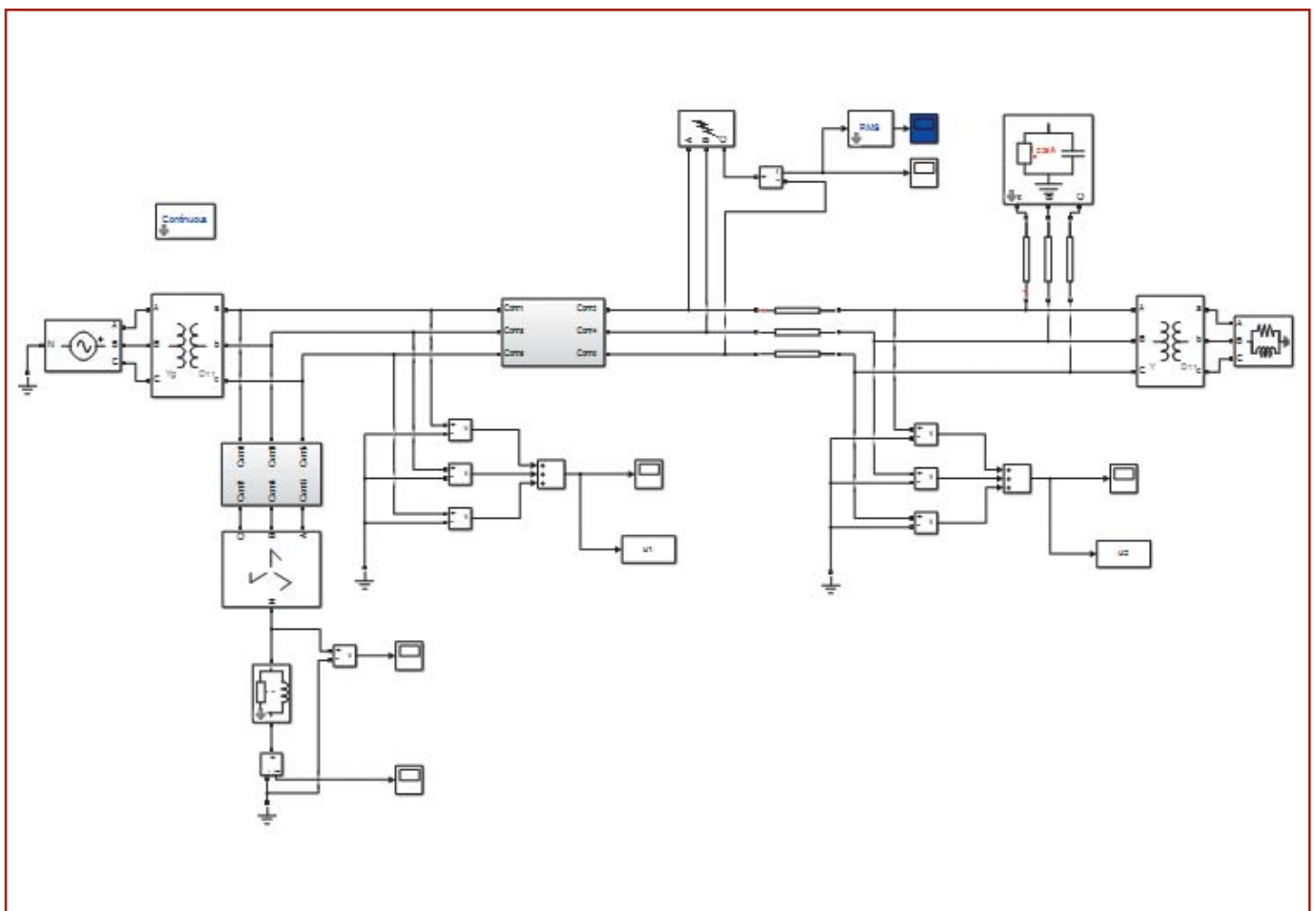


Рис. 4. Модель участка исследуемой электрической сети

Таблица 2

Режим заземления нейтрали	$R_{пер}, \text{ Ом}$		
	0,01	100	1000
6 кВ			
L	14,98/5,13	14,97/5,13	14,98/5,11
R	14,95/5,15	14,98/5,12	14,92/5,12
R + L	14,93/5,17	14,98/5,13	14,97/5,13
10 кВ			
L	14,94/5,16	14,94/5,15	14,97/5,12
R	14,93/5,14	14,94/5,15	14,97/5,12
R + L	14,93/5,16	14,95/5,14	14,98/5,12
35 кВ			
L	15,78/4,32	15,79/4,30	15,79/4,31
R	15,78/4,31	15,78/4,32	15,79/4,3
R + L	15,77/4,32	15,78/4,32	15,79/4,29

ИК. Помехи и шумы в сигнале на рисунке не указаны для упрощения.

Датчики Роговского используются для того, чтобы сформировать разрешающий сигнал на начало работы ИК и подтвердить наличие ОЗЗ в контролируемой сети.

Окончательно для реализации предложенного алгоритма ОМП необходимо обеспечить выполнение комплексом ОМП следующих функций:

1. Синхронизацию отсчётов времени между всеми элементами комплекса ОМП.

2. Запись сигналов тока и напряжения на каждом конце контролируемой линии.

3. Фильтрацию высших частот сигналов напряжения.

4. Фиксацию наличия ОЗЗ в сети по сигналу от датчиков Роговского в составе ИК.

5. Обработку терминалом ОМП моментов срабатывания ИК.

На рис. 3 представлена подробная схема обмена данными между элементами комплекса ОМП.

Математическое моделирование

Для проверки метода ОМП при ОЗЗ для тестовой схемы разработана математическая модель участка ВЛ напряжением 10 кВ протяжённостью 20 км, выполненной проводом марки АС-75 на опорах П10 – 3 в программном комплексе MATLAB – использована программная среда Simulink вычислительного комплекса и её библиотека SimPowerSystems. Общий вид модели Simulink приведён на рис. 4.

Заранее опытным путём определяется скорость распространения сигнала

и время прохождения сигнала по контролируемой линии. Для этого искусственно проводится замыкание на землю на одном из концов контролируемого участка. В представленной модели данные параметры имеют следующие значения:

• скорость распространения сигнала — $v = 2,487 \cdot 10^5 \text{ км/с}$;

• время прохождения сигнала — $T = 8,039 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

При замыкании на землю на расстоянии 5 км от шин ПС-1 и 15 км от шин ПС-2 при переходном сопротивлении в месте замыкания 0,01 Ом получены результаты:

– удалённость ОЗЗ от шин ПС-1 $L_1 = 5,099 \text{ км}$;

– удалённость ОЗЗ от шин ПС-2 $L_2 = 14,895 \text{ км}$.

Затем для разных значений переходного сопротивления и точек замыкания, удалённых на 5, 10, 15, 20 км от ИК 1, проведены расчёты расстояния от каждого ИК до места замыкания, результаты которых представлены в табл. 1.

Также описанный метод ОМП был применён к сетям 6 и 35 кВ при разных режимах заземления нейтрали. Расчёт проводился для однородных линий 6 и 35 кВ с режимами заземления нейтрали: компенсированная (L), резистивная (R), комбинированная ($L + R$); замыкание проводилось в точке, удалённой на 15 км от ПС-1 и на 5 км от ПС-2 при переходных сопротивлениях в месте замыкания 0,01, 100, 1000 Ом. Результаты расчёта расстояния от шин каждого ИК до места замыкания при варьировании переходного сопротивления в точке замыкания для разных режимов зазем-

ления нейтрали приведены в табл. 2. Результаты расчёта приведены в табл. 2 в следующем виде: расстояние от ИК 1 / ИК 2 до места замыкания.

Заключение

Исходя из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

• ошибка метода ОМП не зависит от удалённости ОЗЗ от каждого из измерительных комплектов, а также от режима заземления нейтрали и величины переходного сопротивления в месте замыкания;

• для реализации комплекса ОМП в воздушной распределительной сети необходимо провести калибровку измерительных комплектов каждого контролируемого присоединения в целях определения скорости и времени прохождения электромагнитной волны по всей длине контролируемого участка;

• если линия неоднородна, то калибровка измерительных комплектов должна проводиться с учётом деления линии на однородные участки;

• параметры, определяемые в ходе калибровки измерительных комплектов, строго индивидуальны для каждого присоединения;

• измерительные комплекты и терминал ОМП должны вести точный синхронный счёт времени;

• для передачи данных между измерительными комплектами необходимо организовать каналы передачи информации;

• реализация предложенного алгоритма позволит значительно сократить затраты на поиск места ОЗЗ и снизить количество аварий в контролируемой сети, вызванных переходом ОЗЗ в КЗ;

• появляется возможность вести мониторинг состояния контролируемой сети на основе информации о токах и напряжениях в различных узлах сети, измерения которых синхронизировано по времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарин Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. — М.: Энергия, 1973. — 272 с.

2. Хузяцев Р. Г. Исследование скорости распространения сигналов переходных процессов по воздушным линиям электропередачи. <http://bit.ly/2ox7RLq>.