РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ

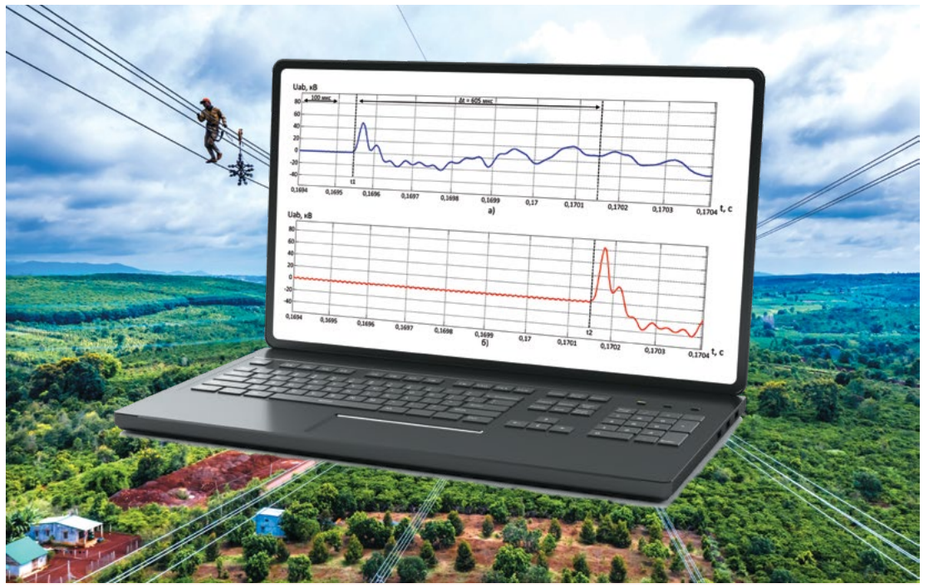
АВТОРЫ:

В.Ф. ЛАЧУГИН, Д.Т.Н.,
Д.И. ПАНФИЛОВ, Д.Т.Н.,
С.Г. ПОПОВ, К.Т.Н.,
П.С. ПЛАТОНОВ,
В.Г. АЛЕКСЕЕВ, К.Т.Н.,
«НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Н.Г. КЛЮШКИН,
«РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

А.Н. ПОДШИВАЛИН, К.Т.Н.,
ООО «РЕЛЕМАТИКА»

Переход от индивидуальных устройств определения места повреждения ВЛ волновым методом с двумя терминалами для каждой ВЛ, к системе определения места повреждения ВЛ двусторонних измерений с терминалами, подключенными к трансформаторам напряжения шин подстанции, позволяет определить места повреждения на любой из ВЛ, примыкающей к данной системе шин, одним устройством, что ведет к сокращению общего числа устройств определения места повреждения в электрической сети.



Быстрая и точная локализация места повреждения воздушной линии обеспечивает существенное сокращение времени восстановления работоспособности ВЛ

ВВЕДЕНИЕ

Точная локализация места короткого замыкания (КЗ) на воздушных линиях (ВЛ) является важным фактором, обеспечивающим существенное сокращение времени восстановления работоспособности ВЛ после ее аварийного отключения. Существуют различные методы определения места повреждения (ОМП), однако волновой метод (ВОМП), основанный на измерении времени распространения электромагнитных волн по ВЛ от места повреждения до каждого из концов ВЛ, позволяет достичь наиболее высокой точности [1]. Метод двухсторонних измерений выгодно отличается от остальных методов тем, что в нем используется информация от исходных волн, возникших в месте КЗ, еще не искаженная отраженными волнами от узловых точек сети.

Расстояние l от места повреждения до одного из концов ВЛ длиной L при использовании этого метода определяется по выражению [1]:

$$l = \frac{L}{2} - \frac{t_2 - t_1}{2}\nu = \frac{L}{2} - \frac{\Delta t}{2}\nu, \qquad (1)$$

где t_1 и t_2 — текущие значения времени прихода фронта электромагнитной волны соответственно к одному и к другому концу ВЛ;

ν — скорость распространения электромагнитной волны.

Положительные результаты эксплуатации микропроцессорных устройств мониторинга токов и напряжений переходного процесса на ВЛ 110 кВ Пугачевская — Акбулакская (филиал ОАО «МРСК Волги» — «Оренбургэнерго») с синхронизацией измеряемых параметров режима [2] стали основанием для последующей разработки в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского (АО «ЭНИН») многофункционального устройства ЭНИС [3–5], выполняющего функции ОМП, регистрации параметров аварийных процессов и измерения показателей качества электроэнергии на ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения.
В этом устройстве осуществлялась обработка мгновенных значений напряжений и токов каждой фазы ЛЭП, синхронизируемых во времени с помощью глобальной системы

СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ ТЕРМИНАЛОВ ОМП ЭНИС К ВТОРИЧНЫМ ЦЕПЯМ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ, ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И СИСТЕМАМ СВЯЗИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

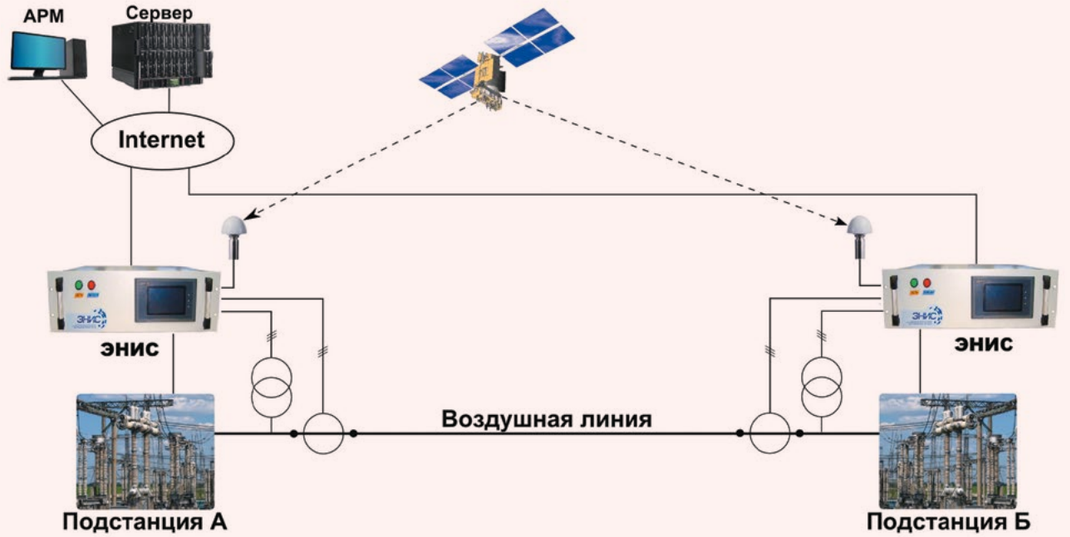


Рис. 1

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЭНИС

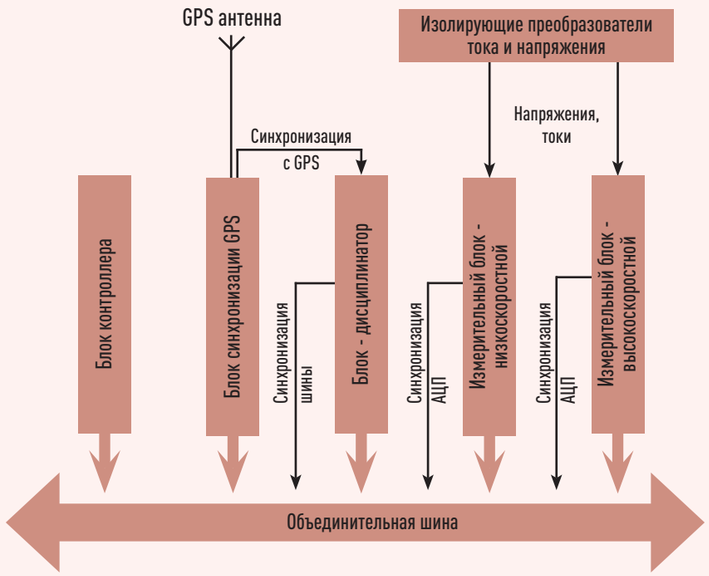


Рис. 2

позиционирования GPS/GLONASS, которые преобразовывались в токи и напряжения независимых волновых каналов [6]. Для фиксации времени прихода фронта волны был использован метод математической статистики, позволяющий рассчитывать коэффициенты эксцесса для сигналов электромагнитных волн в междуфазных волновых каналах.

Для повышения чувствительности в устройстве контролировалось время прихода напряжения падающей волны от места КЗ. Выделение аварийных составляющих выполнялось на основе вычисления разности мгновенных значений токов, а также разности мгновенных значений напряжений, сдвинутых по времени на период промышленной частоты. Функционирование устройства на поврежденной ВЛ разрешалось только после срабатывания селективной релейной защиты этой ВЛ. Схема подключения внешних связей ЭНИС по концам ВЛ показана на рис. 1, структурная схема — на рис. 2, а рис. 3 иллюстрирует внешний вид опытно-промышленного образца ЭНИС.

Образцы устройства ЭНИС в 2012 г. были введены в опытную эксплуатацию на ВЛ 220 кВ Тамбовская 500 — Давыдовская 1.

По цепям измерения устройства были подключены к вторичным цепям трансформаторов тока (ТТ) ВЛ 220 кВ Тамбовская 500 — Давыдовская 1 и вторичным цепям трансформаторов напряжения (ТН) системы шин 220 кВ. После успешного завершения разработки и испытаний были изготовлены опытно-промышленные образцы устройства ЭНИС, в июне 2015 г. введенные в эксплуатацию на ВЛ 220 кВ Парская — Сасово длиной 73,6 км [5]. На ВЛ 220 кВ Парская — Сасово 3 сентября 2015 г. произошло КЗ фазы В на землю. Следы повреждения были обнаружены на гирлянде изоляторов опоры, расположенной на расстоянии 44,9 км от ПС «Парская». Расстояние до места повреждения, вычисленное устройством ЭНИС, составило 44,85 км. При этом погрешность устройства ЭНИС не превысила 50 м, что вполне удовлетворяло требованиям эксплуатации.

Следует отметить, что устройство ЭНИС при этом КЗ продемонстрировало наиболее высокую точность ОМП по сравнению с другими средствами ОМП, применяемыми на данной ВЛ.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ВОМП

В 2017 г. «НТЦ Россети ФСК ЕЭС», АО «ЭНИН» и ООО «Релематика» приступили к совместной разработке системы ВОМП, использующей контроль напряжения на шинах нескольких подстанций (ПС), к которым подключены контролируемые ВЛ, без контроля токов [7, 8]. Технико-экономические преимущества разработки заключаются в том, что переход с индивидуальных устройств ВОМП двусторонних измерений (с двумя устройствами-терминалами, устанавливаемыми по концам каждой защищаемой линии) на систему ВОМП двусторонних измерений с числом устройств, подключенных к ТН шин ПС, приводит к уменьшению общего числа устройств ОМП, решающих одну и ту же задачу. Для оценки эффективности разрабатываемой системы ВОМП по сравнению с индивидуальными устройствами ВОМП двусторонних измерений можно использовать следующее расчетное соотношение:

$$\delta = 2n - k,$$

где n — число ВЛ, контролируемых системой ОМП;

k — число узлов, к которым примыкают ВЛ, контролируемые системой ОМП.

Из этого соотношения следует, что в системе ВОМП с увеличением числа ВЛ потребуется меньшее число терминалов ОМП в сети (рис. 4) по сравнению с традиционной установкой двух терминалов ОМП для каждой ВЛ.

Для определения наиболее неблагоприятных условий ОМП, исходя из обеспечения необходимой чувствительности контролируемых сигналов, пилотные объекты для размещения опытных терминалов системы ВОМП выбирались из числа ПС с шинами напряжением 220–750 кВ с наибольшим количеством отходящих ВЛ. Это, с одной стороны, позволяет оценить экономическую выгоду перехода на систему ВОМП, а с другой стороны, дает возможность определить наиболее жесткие условия по уровню контролируемых сигналов в связи с тем, что сигнал напряжения переходного процесса в точке

ВНЕШНИЙ ВИД ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОБРАЗЦА ЭНИС

Рис. 3

контроля на шинах ПС уменьшается с увеличением количества отходящих ВЛ из-за снижения Z_n — эквивалентного сопротивления элементов сети, подключенных к шинам, в связи с ростом общего числа параллельно подключенных к шинам неповрежденных ВЛ, что выражается формулой:

$$u_2 = u_{пад}\left(\frac{2Z_n}{Z_n + Z_{c1}}\right),$$

$$Z_n = Z_{c2} \| Z_{c3} \ldots \| Z_{cn} \| \left(Z_{mp1} \| Z_{mp2} \ldots \| Z_{mpn} + Z_{сист.}\right),$$

где u_2 — напряжение на фронте напряжения волны, формируемое после достижения электромагнитной волной системы шин ПС;

$u_{пад}$ — напряжение падающей электромагнитной волны;

ПУНКТЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ТЕРМИНАЛОВ СИСТЕМЫ ВОМП ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СИГНАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ПС 1 – ПС 4

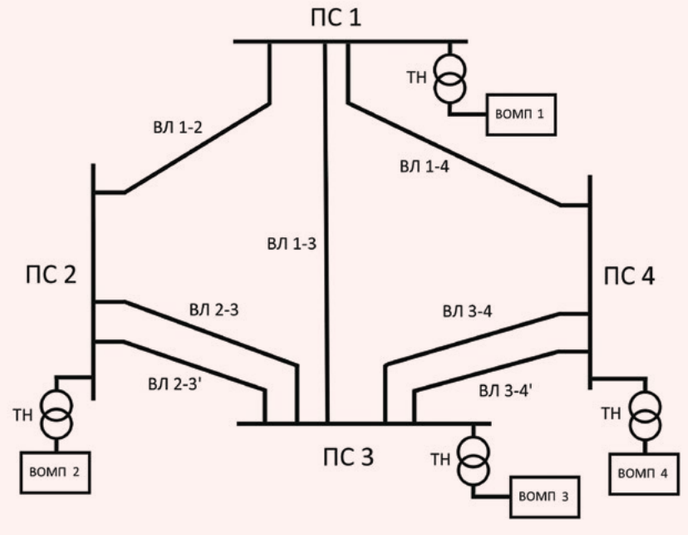


Рис. 4

Z_{c1} — волновое сопротивление поврежденной ВЛ. В качестве пилотных объектов были выбраны ПС «Восточная» (16 отходящих ВЛ 330 кВ, емкостные ТН), «Выборгская» (4 отходящие ВЛ 330 кВ, емкостные ТН) и «Каменногорская» (2 отходящие ВЛ 330 кВ, индуктивные ТН) МЭС Северо-Запада. Причем число ВЛ, подключенных к шинам 330 кВ ПС «Восточная», являлось наибольшим по сравнению с другими объектами, расположенными в электрических сетях России.

Алгоритм системы ВОМП с контролем напряжения включает (рис. 5):

- измерение напряжения фаз ВЛ с помощью ТН, установленных на шинах ПС;
- выделение аварийных и волновых (модальных) составляющих указанных напряжений;
- определение (фиксация) времени прихода фронта напряжения составляющих на каждый из концов ВЛ;
- синхронизацию этих измерений;
- обмен метками времени прихода фронта напряжения на каждый из концов ВЛ;
- пуск процесса расчета расстояния до места КЗ после срабатывания селективной защиты ВЛ;
- расчет места повреждения по формуле (1).

БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА СИСТЕМЫ ВОМП

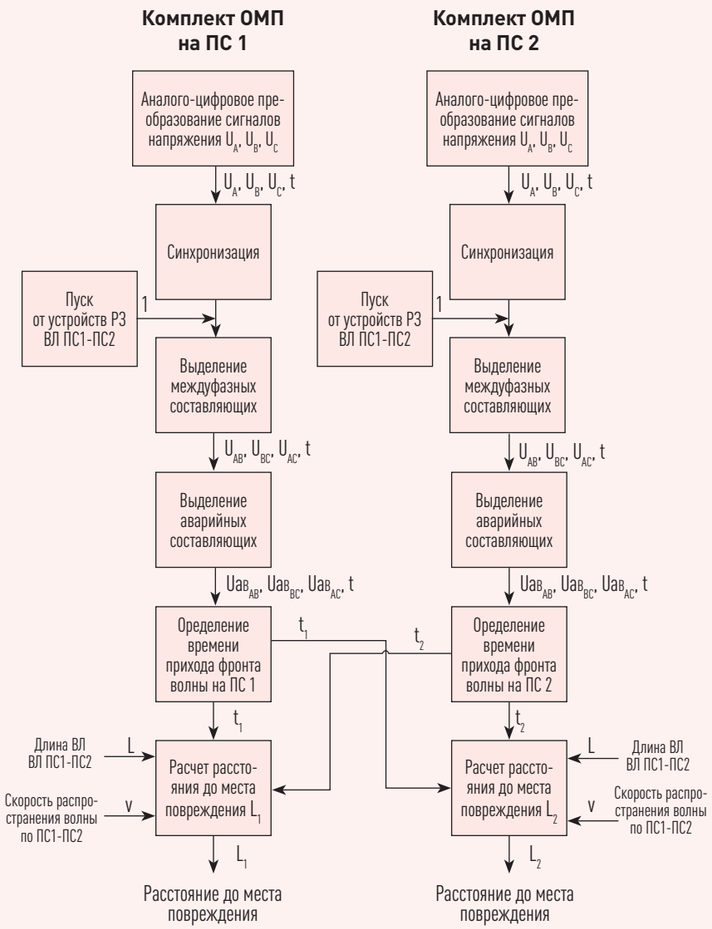


Рис. 5

Отстройка напряжения контролируемого сигнала от напряжения, предшествующего КЗ, осуществляется, как и в ЭНИС, с помощью выделения аварийных составляющих [3, 4] путем непрерывного вычитания мгновенных значений контролируемого напряжения, сдвинутых относительно текущего времени на период промышленной частоты.

Скорость распространения междуфазных составляющих близка к скорости света, а составляющих нулевого канала — ниже и существенно зависит от спектра контролируемого сигнала. Поэтому для повышения точности ОМП в контролируемом сигнале используются линейные напряжения ($u_A - u_B$), ($u_B - u_C$), ($u_C - u_A$).

Для фиксации времени прихода фронта волны с помощью методов математической статистики был применен расчет коэффициента эксцесса при обработке результатов измерения аварийных напряжений в междуфазных волновых каналах [6], формируемых в структуре линейных напряжений ($u_A - u_B$) и ($u_B - u_C$).

В процессе измерения контролируемых сигналов каждый терминал ВОМП непрерывно фиксирует в кольцевых буферах значения напряжения, а также метки времени, соответствующие этим значениям [3–5]. Частота фиксации составляет 1 МГц, что соответствует интервалу дискретизации, равному 1 мкс. Коэффициент эксцесса, являющийся мерой остроты пика распределения случайной величины, рассчитывается по выражению

$$K_E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3,$$

где μ_4 и σ — четвертый и второй центральные моменты статистического распределения соответственно, определяемые следующим образом:

$$\mu_4 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^4,$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2,$$

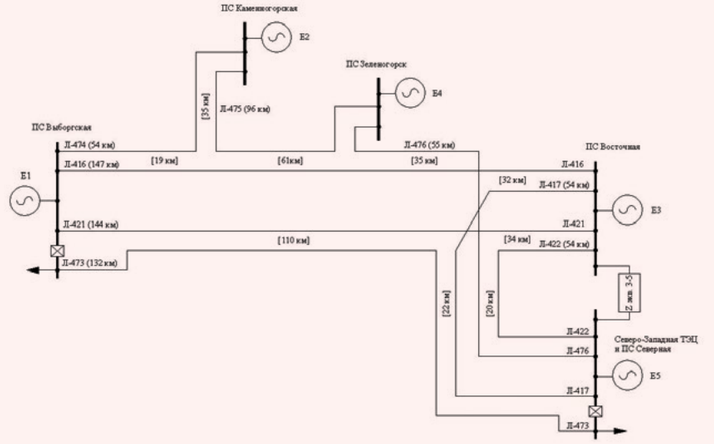
где x_i — исследуемый сигнал;

n — число точек;

$\bar{x}$ — среднее арифметическое значение.

Чувствительность коэффициента эксцесса к отклонению распределения функции от закона нормального распределения очень высока, что позволяет повысить достоверность определения фронта волны. В отсутствие переходного процесса измеряемый сигнал подчиняется закону нормального распределения, и, следовательно, значение коэффициента эксцесса находится на уровне нуля. При возникновении повреждения ВЛ коэффициент эксцесса резко возрастает. По сигналу о срабатывании релейной защиты, используемому для пуска системы ОМП, на терминалах каждого конца ВЛ заполнение кольцевого буфера останавливается и производится вычисление коэффициента эксцесса функции линейных напряжений на скользящем интервале 0,8 мс

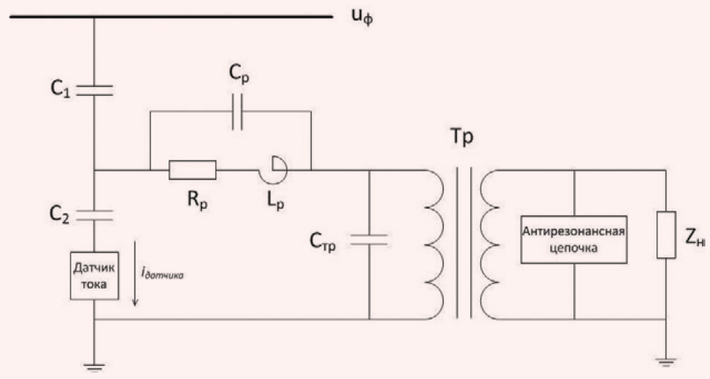
УЧАСТОК СЕТИ МЭС СЕВЕРО-ЗАПАДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ВЫЗВАННЫХ КЗ



Примечание: в круглых скобках — длины линий, в квадратных скобках — длины участков линий на общих опорах.

Рис. 6

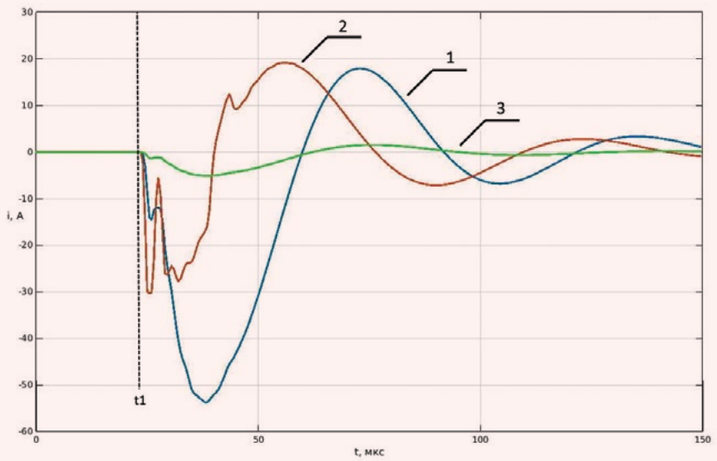
СХЕМА ЕМКОСТНОГО ТН С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ДАТЧИКОМ ТОКА



Обозначения: C_1, C_2 — емкости делителя напряжения; $C_р$, $R_р$, $L_р$ — емкость, активное сопротивление и индуктивность компенсирующего реактора; $T_р$ — понижающий трансформатор; $C_{тр}$ — входная емкость понижающего трансформатора; $Z_н$ — полное сопротивление нагрузки.

Рис. 7

РАЗНОСТЬ СИГНАЛОВ ТОКА ФАЗ А И В В ЦЕПИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЕМКОСТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ ТН ПРИ КЗ В ФАЗЕ А (МОДЕЛЬ РИС. 5; ПС «ВЫБОРГСКАЯ»; ВЛ Л-416; L_1 = 60 КМ; R_K = 10 ОМ; φ_{UA} = 90°)



Обозначения: 1 — идеальный датчик; 2 — датчик RFCT-4.2; 3 — датчик ДТУ-03И.

Рис. 8

по всем значениям, записанным в буфере. При превышении этим коэффициентом порогового значения фиксируется соответствующая метка времени по каналу от системы GPS/GLONASS, и дальнейший анализ записанных в буфере значений прекращается.

Полученная метка времени принимается как время прихода волны напряжения на шины ПС. Терминалы, установленные по концам линии, по каналу связи обмениваются значениями меток времени, после чего расстояние до места повреждения вычисляется по формуле (1). Размер кольцевого буфера позволяет сохранять полученную информацию в интервале 400 мс.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ ВОМП

Для исследования эффективности функционирования алгоритма системы ВОМП с помощью математического моделирования в программном комплексе PSCAD была создана модель части сети 330 кВ, на которой предполагалась установка терминалов ВОМП (рис. 6). В модели учтены элементы сети, непосредственно влияющие на волновые процессы при КЗ (ВЛ, емкостные ТН, конденсаторы связи (КС) и высокочастотные (ВЧ) заградители). Шаг расчета при моделировании составлял 0,5 мкс, длительность рассчитываемого процесса — 120 мс. При проведении расчетов варьировались расстояние до места повреждения, виды КЗ и величина сопротивления в месте КЗ.

Параметры ВЛ были представлены в виде частотно-зависимых моделей в программном комплексе PSCAD/EMTDC, в наибольшей степени учитывающих характер развития контролируемых процессов. Матрицы сопротивлений ВЛ вычислялись в соответствии с особенностями расположения на двухцепных опорах расщепленных на два провода АС-300/39 фаз ВЛ и троса АС-70/72. Остальная часть сети 330 кВ и сети других классов напряжения введены в модель в виде эквивалентных электродвижущих сил (ЭДС) и сопротивлений прямой и нулевой последовательности в соответствии с данными, предоставленными МЭС Северо-Запада.

Из-за высоких расчетных погрешностей ВОМП при использовании результатов измерения во вторичных цепях емкостных ТН, характеризуемых узким спектром частот вблизи 50 Гц, информация о волновых процессах на шинах 330 кВ ПС 400 кВ «Выборгская» и ПС 330 кВ «Восточная» фиксировалась с помощью включаемых между выводом нижнего плеча емкостного делителя и землей (рис. 7) дополнительных датчиков тока ДТУ-03 И и RFCT-4.2.

На шинах 330 кВ ПС 330 кВ «Каменногорская», оснащенных электромагнитными ТН, частотный диапазон которых охватывает гораздо более высокие частоты, передача информации о волновых процессах осуществляется непосредственно с вторичной обмотки ТН [2–5].

Как показали испытания, датчик ДТУ-03 И может рассматриваться как ТТ, нагруженный на активное сопротивление. Датчик имеет практически неизменную амплитудно-частотную характеристику в диапазоне частот от 100 Гц до сотен килогерц. Датчик RFCT-4.2, напротив, имеет нелинейную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) со слабой передачей токов частот ниже 40 кГц.

Моделирование работы системы ВОМП проводилось в два этапа. На первом этапе в программном комплексе PSCAD/EMTDC для ВЛ на участке сети 330 кВ, приведенном на рис. 6, определялись входные сигналы напряжений на шинах 330 кВ ПС при различном расположении точек КЗ на ВЛ при конкретных видах КЗ. На втором этапе полученные значения сигналов с использованием программного комплекса Matlab/Simulink вводились в модель устройства ВОМП и определялись результаты расчета расстояния до места повреждения и соответствующие погрешности.

Результаты расчетов контролируемых сигналов, полученных с вторичной обмотки емкостного ТН, приведены на рис. 8 и 9. На ПС 330 кВ «Выборгская» и ПС 330 кВ «Восточная», помимо вторичной цепи ТН 330 кВ, источниками информации являлись сигналы напряжения, пропорциональные току в цепи заземления емкостного делителя ТН 330 кВ, полученные с датчиков RFCT-4.2 и ДТУ-03 И [7, 9].

Из анализа осциллограмм рис. 8 следует, что датчик RFCT-4.2 обладает достаточной чувствительностью, но вносит изменение в форму сигнала из-за наличия нелинейного ограничивающего сопротивления. ДТУ-03 И не вносит искажения в форму измеряемого сигнала, но на порядок уменьшает его значение аналогично сигналу во вторичных цепях емкостного ТН (см. рис. 9).

Значения погрешности ВОМП приведены на рис. 10.

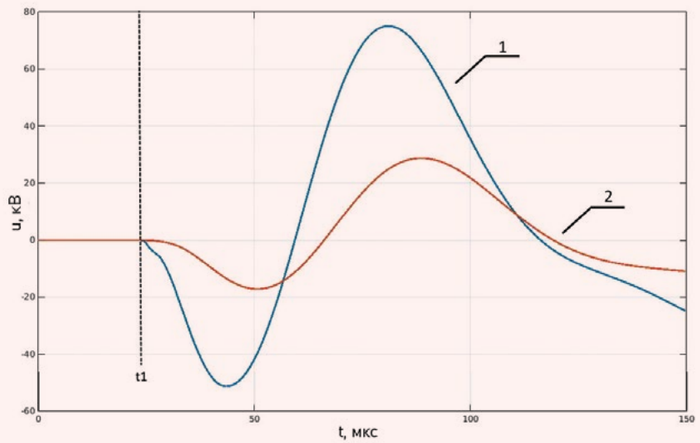
Таким образом, использование напряжения вторичной обмотки емкостного ТН для системы ВОМП приводит к существенному увеличению погрешности определения расстояния. В то же время использование непосредственно сигнала тока в цепи заземления делителя емкостного ТН дает меньшую погрешность, чем сигнал напряжения, полученный с помощью численного интегрирования этого тока.

Результаты расчетов показали: на многоцепных ВЛ система ВОМП может иметь зону повышенной погрешности при КЗ вблизи конца более длинной ВЛ при отличающихся по длине цепях параллельно соединенных ВЛ из-за того, что фронт напряжения волны может достичь узла сети с ТН по более короткому пути вдоль неповрежденной ВЛ. Также для пилотных объектов сети 330 кВ МЭС Северо-Запада определено, что абсолютная погрешность ОМП на расстоянии более 0,5 км от начала ВЛ не превышает среднюю длину пролета ВЛ 330 кВ.

ПОЛИГОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ВОМП

Для более полной проверки эффективности функционирования алгоритма системы ВОМП были проведены ее полигонные испытания [10] путем:

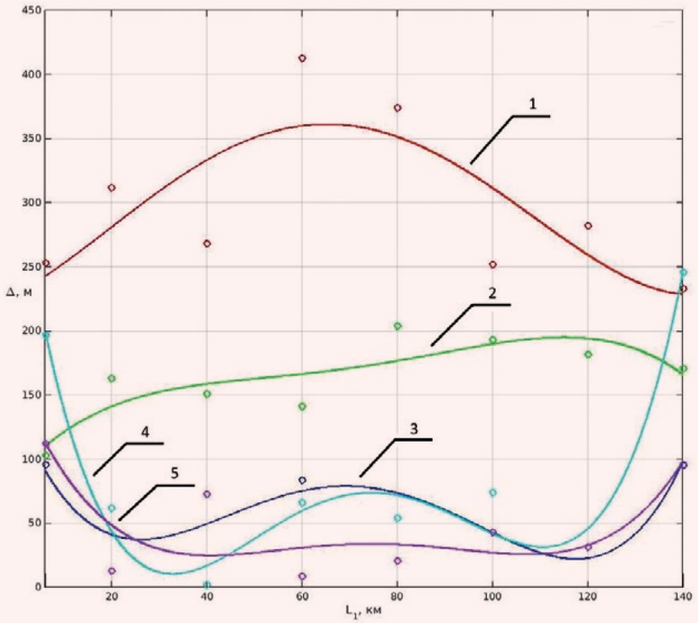
АВАРИЙНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ МЕЖДУФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КЗ В ФАЗЕ А (МОДЕЛЬ РИС. 5; ПС «ВЫБОРГСКАЯ»; ВЛ Л-416; L_1 = 50 КМ; R_K = 10 ОМ; φ_{UA} = 90°)



Обозначения: 1 — сигнал напряжения, полученный интегрированием тока датчика; 2 — напряжение с вторичной обмотки емкостного ТН.

Рис. 9

ЗАВИСИМОСТЬ ПОГРЕШНОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА КЗ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ



Обозначения: 1 — вторичная обмотка емкостного ТН; 2 — напряжение как интеграл емкостного тока;
3 — ток в цепи заземления делителя ТН; 4 — ток в цепи заземления делителя ТН, измеренный датчиком RFCT-4.2;
5 — ток в цепи заземления делителя ТН, измеренный датчиком ДТУ-03И.

Рис. 10

- создания специализированного стенда, обеспечивающего преобразование данных, полученных на основе математической модели сети, в аналоговую форму для подведения информационных сигналов к испытываемым устройствам и соответствующего программного обеспечения;
- расчета на основе математической модели напряжений по концам ВЛ при разных видах КЗ, фазовых углах и сопротивлениях в месте КЗ, а также формирования дискретных сигналов, предназначенных для пуска системы ВОМП при имитации срабатывания релейной защиты ВЛ;
- преобразования дискретных расчетных данных в аналоговую форму;
- передачи аналоговых данных и пусковых сигналов в терминалы TOP 300 ВОМП;
- фиксации результатов определения расстояния до места КЗ с дисплеев терминалов ВОМП, сравнения с данными о расстоянии, введенными в математическую модель сети, и определения погрешности выявления места повреждения.

Программа испытаний включала проверку возможности пуска этих терминалов как непосредственно дискретным сигналом, так и посредством GOOSE-сообщений.

Программа полигонных испытаний предусматривала проверку функционирования системы ВОМП при КЗ на ВЛ 330 кВ Выборгская — Каменногорская (длина 54 км), ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 1 (длина 147 км) и ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 2 (длина 144 км) с использованием расчетной модели сети (см. рис. 6). При расчетах варьировались:

- вид повреждения — однофазные и двухфазные КЗ на землю, а также двухфазные и трехфазные КЗ;
- место КЗ — расстояние (в км) от ПС 400 кВ «Выборгская» с шагом около 12% от длины соответствующей ВЛ, включая две точки КЗ, находящиеся в 2 км от шин ПС;
- фазовые углы напряжения, предшествовавшего КЗ в фазе А, принятые равными 90° и 18°;
- переходные сопротивления в месте однофазного КЗ на землю, равные 1, 10 и 50 Ом, и в месте междуфазного КЗ, равные 1 Ом.

Результаты расчета напряжений на шинах ПС в системе PSCAD формировались в табличной форме в функции времени с шагом 0,5 мкс, т. е. в два раза меньше шага дискретизации в системе ВОМП с учетом дискретных сигналов, условно соответствующих моменту срабатывания устройств релейной защиты ВЛ, используемых для пуска устройств ОМП. Временной интервал для каждого расчета составлял 720 мс, что на 320 мс превышало длительность интервала, для которого проводится анализ процессов в терминалах ВОМП.

Всего выполнено 204 расчета по числу опытов, из них по 80 расчетов при КЗ на ВЛ 330 кВ Выборгская — Каменногорская и ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 1 и 44 расчета при КЗ на ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 2. В качестве примера на рис. 11 приведены осциллограммы напряжения на выходе датчиков емкостных ТН на шинах 330 кВ ПС 400 кВ «Выборгская» и ПС 330 кВ «Восточная» при однофазном КЗ на ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 1 через переходное сопротивление 10 Ом с фазовым углом возникновения КЗ, равным 90°, в 18 км от ПС 400 кВ «Выборгская». Из осциллограммы следует, что фронт напряжения волны от места КЗ достиг сборных шин 330 кВ ПС 400 кВ «Выборгская» через 60 мкс (t_1), а сборных шин 330 кВ ПС 330 кВ «Восточная» через 430 мкс (t_2) от момента возникновения КЗ (0,085 с), при принятой скорости распространения волны в системе PSCAD, равной 300 м/мкс.

Структурная схема (рис. 12) специализированного испытательного стенда включала:

- персональный компьютер (ПК1) с установленным программным обеспечением (ПО) для управления терминалами ВОМП (АРМ ВОМП), для управления генератором сигналов произвольной формы (ГСПФ) (ПО ArbStudio) и испытательной установкой Omicron (ПО Test Universe). На ПК1 также была загружена база файлов тестовых сигналов, содержащих массивы мгновенных значений напряжений в местах установки терминалов ВОМП для различных видов и мест КЗ в моделируемой сети;
- ГСПФ ArbStudio 1104 (G1 и G2);
- согласующие усилители напряжения (AV1 — AV3);
- терминалы TOP 300 ВОМП (PD1 и PD2);
- линию связи между терминалами ВОМП с использованием витой пары (канал передачи «метки времени»);

ОСЦИЛЛОГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ДАТЧИКОВ RFCT-4.2

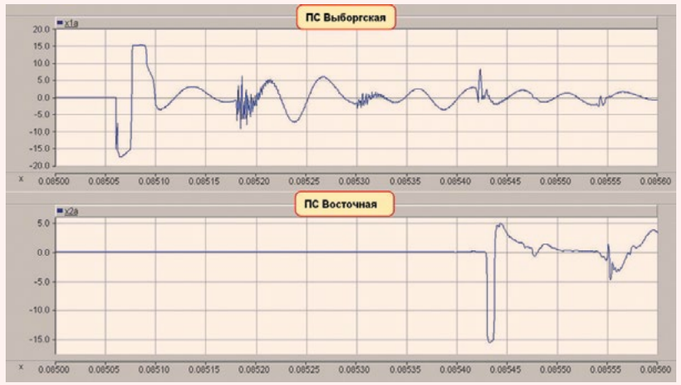


Рис. 11

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ВОМП

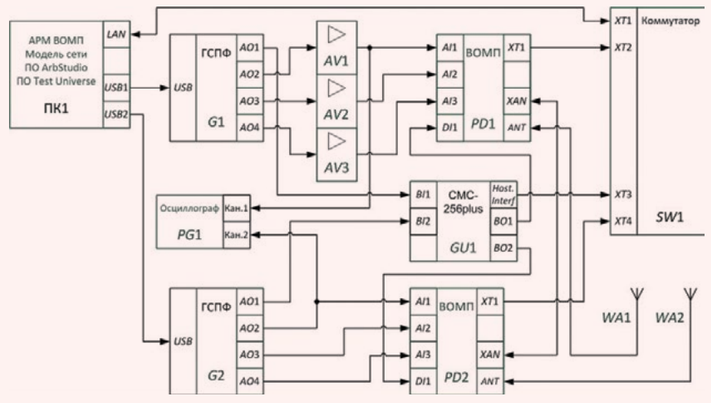


Рис. 12

ГИСТОГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОГРЕШНОСТИ ВЛ 330 КВ ВЫБОРГСКАЯ — ВОСТОЧНАЯ 1, ВЛ 330 КВ ВЫБОРГСКАЯ — ВОСТОЧНАЯ 2 И ВЛ 330 КВ ВЫБОРГСКАЯ — КАМЕННОГОРСКАЯ

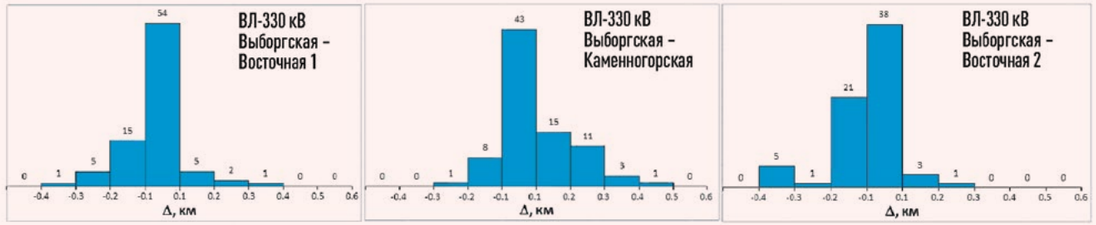


Рис. 13

- активные антенны с приемниками GPS/ГЛОНАСС (WA1, WA2);
- Ethernet-коммутатор D-Link DGS-1005D (SW1);
- цифровой осциллограф GDS-73252 (PG1);
- испытательную установку Omicron CMC-256plus (GU1).

ПО «Микра» (АРМ ВОМП) позволяет конфигурировать и контролировать терминалы стенда ВОМП, подключенные к ПК через Ethernet-коммутатор (SW1). ПО ArbStudio предназначено для управления генераторами сигналов произвольной формы G1, G2, а ПО Test Universe — для управления испытательной установкой Omicron CMC-256plus, которая используется для моделирования пусковых сигналов терминалов ВОМП в виде сигналов «сухой контакт» и GOOSE-сообщений. Моделируемые ГСПФ дискретные сигналы подаются на дискретные входы CMC-256plus, получив которые испытательная установка выдает с заданной задержкой GOOSE-сообщения. Связь CMC-256plus, терминалов ВОМП PD1 и PD2 осуществлялась с использованием Ethernet-коммутатора (SW1).

Генераторы сигналов произвольной формы, подключенные к ПК1 через интерфейс USB, позволяют преобразовать цифровые массивы мгновенных значений напряжений, полученных на основе модели сети при различных КЗ, в соответствующие аналоговые сигналы. Для этого используются три выхода ГСПФ G1, подключенные через усилители AV1 — AV3 к аналоговым входам терминала ВОМП PD1, и три выхода ГСПФ G2, подключенные к аналоговым входам терминала ВОМП PD2. Один канал каждого генератора сигналов произвольной формы используется для моделирования дискретного сигнала срабатывания защиты, который подключен к дискретному входу Omicron CMC-256plus, при получении которого выдается дискретный сигнал на соответствующий дискретный вход каждого терминала ВОМП.

Усилители напряжения используются для согласования уровней выходных сигналов ГСПФ и входных сигналов терминалов системы ВОМП при моделировании аналоговых сигналов от ТН. При моделировании аналоговых сигналов от датчиков тока усилители напряжения не использовались — соответствующие выходы ГСПФ G1 подключались напрямую к входам терминала PD1 ВОМП. Двухканальный осциллограф PG1 применялся в ходе проведения испытаний для контроля моделируемых величин напряжений фазы А по концам контролируемой ВЛ.

Параметры терминала PD1 соответствуют параметрам терминала, устанавливаемого на ПС 400 кВ «Выборгская». Параметры терминала PD2 задаются в зависимости от того, на какой ВЛ моделируются повреждения. При КЗ на ВЛ 330 кВ Выборгская — Каменногорская задаются параметры терминала на ПС «Каменногорская», при КЗ на ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 1 и ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 2 — параметры терминала ПС 330 кВ «Восточная».

Канал связи, по которому терминалы обмениваются метками времени и служебными сообщениями, выполняется с помощью коммутационного шнура (патч-корда), подключенного к Ethernet-портам XAN терминалов. Система синхронизации терминалов ВОМП представляет

собой две активные антенны WA1, WA2 с приемниками спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС. Сетевой коммутатор SW1 служит для построения Ethernet-сети терминалов PD1 и PD2, испытательной установки CMC-256plus, ПК1 с установленным ПО АРМ системы ВОМП, ArbStudio и Omicron Test Universe.

Погрешности определения расстояния до места повреждения зависят не только от погрешностей функционирования терминалов, но и от погрешностей параметров математической модели и специализированного стенда.

При выбранной для модели частоте дискретизации 2 МГц и заданном расстоянии до места КЗ максимальная погрешность определения прихода фронта волны на ПС ($\Delta t_{\text{мод.макс.}}$) соответствует 0,5 мкс, т. е. интервалу дискретизации. Если предположить, что плотность вероятности времени прихода волны внутри интервала дискретизации распределена равномерно, то средняя погрешность по времени прихода волны ($\Delta t_{\text{мод.ср.}}$) составляет половину интервала дискретизации 0,25 мкс. Временная погрешность, вносимая стендом, определяется задержкой в преобразовании данных в аналоговую форму, а также временной задержкой усилителей. Поскольку частотные характеристики генераторов сигналов произвольной формы и усилителей имеют верхнюю границу порядка десятков и сотен мегагерц, то временными погрешностями стенда для проводимых испытаний можно пренебречь.

Следовательно временная погрешность терминалов системы ВОМП в первом приближении может рассматриваться как погрешность, определяемая только шагом дискретизации при преобразовании аналоговых входных сигналов. При частоте дискретизации 1 МГц максимальная погрешность ($\Delta t_{\text{терм.макс.}}$) составит 1 мкс, а средняя ($\Delta t_{\text{терм.ср.}}$) — 0,5 мкс. Ожидаемые максимальная и средняя погрешности ОМП при этом будут равны:

$$\Delta l_{\text{макс}} = \nu \cdot \rightleftarrows \left(\Delta t_{\text{мод.макс}} + \Delta t_{\text{терм.макс}} \right) =$$

$$= 3 \cdot 10^5 \cdot (0{,}5 + 1) \cdot 10^{-6} = 0{,}45 \text{ км},$$

$$\Delta l_{ср} = \nu \cdot \sqrt{\Delta t^2_{\text{мод.ср}} + \Delta t^2_{\text{терм.ср}}} =$$

$$= 3 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{0{,}25^2 + 0{,}5^2} \cdot$$

$$\cdot 10^{-6} \approx 0{,}168 \text{ км}.$$

Результаты полигонных испытаний системы ВОМП, включающей два устройства ТОР 300 ВОМП, приведены ниже. В качестве критерия успешности испытания принималось значение абсолютной погрешности измерения расстояния до места повреждения (Δl), не превышавшее 0,3 км.

Для ВЛ 330 кВ Выборгская — Каменногорская (144 км) абсолютная погрешность не превысила 0,3 км во всех 44 опытах, а для ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 1 — в 79 опытах из 80. Более высокое значение погрешности — 0,34 км — для ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная зафиксировано при двухфазном КЗ на расстоянии 129 км от ПС 400 кВ «Выборгская» при переходном сопротивлении в месте КЗ, равном 1 Ом, и фазовом угле возникновения КЗ 90°.

На линии ВЛ 330 кВ Выборгская — Каменногорская абсолютная погрешность определения расстояния до места КЗ не превысила 0,3 км в 77 опытах из 80. Более высокие значения абсолютной погрешности, равные 0,32, 0,34 и 0,36 км, были зафиксированы соответственно:

- при однофазном КЗ на землю на расстоянии 14 км от ПС 400 кВ «Выборгская» при переходном сопротивлении в месте КЗ, равном 50 Ом, и фазовом угле возникновения КЗ 18°;
- при однофазном КЗ на расстоянии 47 км от ПС 400 кВ «Выборгская» при переходном сопротивлении

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ ВОМП НА КВЛ 220 КВ ТОММОТ — МАЙЯ 1

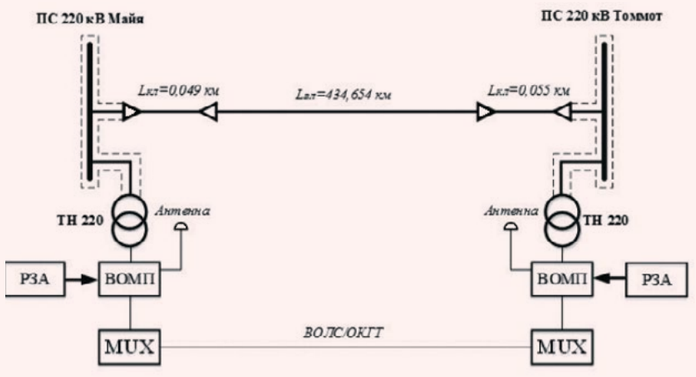


Рис. 14

ОПЫТ № 1 — ОДНОФАЗНОЕ КЗ ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ОПОРУ

Рис. 15

в месте КЗ, равном 10 Ом, и фазовом угле возникновения КЗ 18°;

– при двухфазном КЗ вблизи шин ПС 330 кВ «Каменногорская» при переходном сопротивлении в месте КЗ, равном 1 Ом, и фазовом угле возникновения КЗ в фазе А, равном 90°.

Для опыта КЗ на линии ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 1, осциллограмма которого была представлена на рис. 11, системой ВОМП было определено расстояние до места КЗ, равное 18,19 км со стороны ПС 400 кВ «Выборгская» и 128,81 км со стороны ПС 330 кВ «Восточная». Абсолютная погрешность Δl составила 0,19 км.

На рис. 13 представлены гистограммы распределения абсолютных значений погрешности с указанием количества опытов, в котором погрешности попадали в тот или иной временной интервал. Из гистограмм следует, что в большинстве опытов абсолютное значение погрешности не превысило ±0,1 км.

Среднее и максимальное значения модуля погрешности, зарегистрированные при испытаниях, близки к теоретически ожидаемым значениям, рассчитываемым по формуле (2).

Результаты полигонных испытаний показали, что погрешности определения расстояния до места повреждения практически не зависят от вида КЗ и изменения величины переходного сопротивления в месте однофазного замыкания на землю от 0 до 50 Ом.

Проведенные опыты при разных видах КЗ на ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 1 на расстояниях от места КЗ до шин ПС 400 кВ «Выборгская» или ПС 330 кВ «Восточная» порядка 1,5 км и менее подтвердили данные о том, что погрешности измерения расстояния до места КЗ при разных

ОПЫТ № 1 — ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ МЕЖДУФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ UA – UB НА А) ПС «ТОММОТ»; Б) ПС «МАЙЯ»

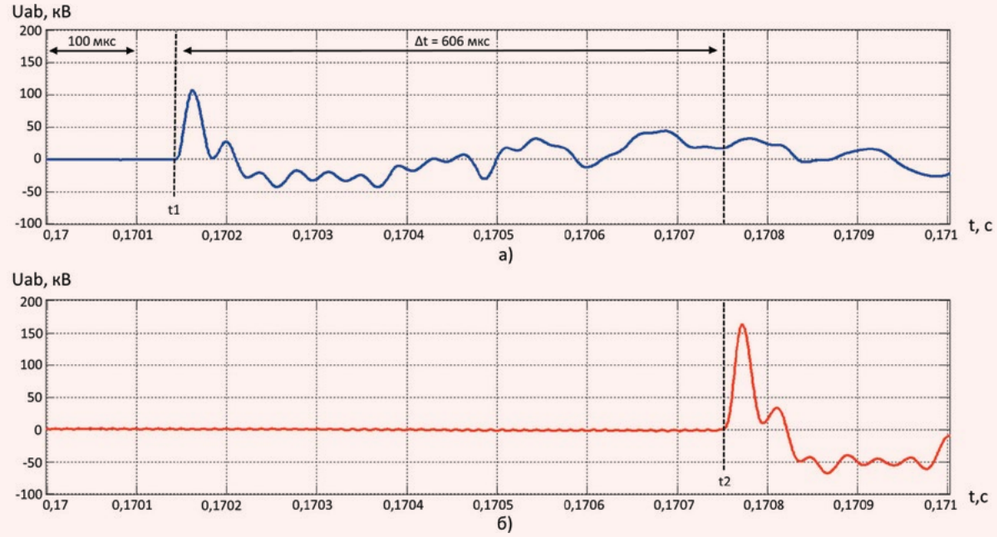


Рис. 16

длинах параллельных цепей ВЛ могут существенно возрастать.

При КЗ в непосредственной близости от шин 330 кВ этих ПС погрешности ОМП могут достигать 1,2–1,65 км из-за наличия параллельной ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 2, на 3 км меньшей длины по сравнению с ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная, вследствие чего фронт волны напряжения может достигать шин ПС по более короткой ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 2 за меньшее время, чем фронт волны по поврежденной ВЛ 330 кВ Выборгская — Восточная 1. Таким образом, более короткая параллельная цепь становится причиной повышенных погрешностей ВОМП при близких КЗ на расстоянии меньшем, чем половина разности длин параллельных ВЛ.

ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ВОМП ПРИ ОПЫТАХ КЗ НА КВЛ 220 КВ ТОММОТ — МАЙЯ

В соответствии с распоряжением филиала ПАО «Россети ФСК ЕЭС» — МЭС Востока «О подготовке к проведению опыта КЗ на КВЛ 220 кВ Томмот — Майя» 6 и 7 сентября 2021 г. на кабельно-воздушной линии (КВЛ) 220 кВ Томмот — Майя 1 филиала ПАО «Россети ФСК ЕЭС» — МЭС Востока (Амурское ПМЭС) с применением опытов КЗ проведены натурные испытания терминалов ТОР 300 ВОМП системы ВОМП для проверки их точности функционирования.

Воздушная часть КВЛ 220 кВ Томмот — Майя 1 длиной 434,654 км, согласно паспортным данным, выполнена проводом АС 300/39 и частично проводом АС 500/336 (от опоры № 49 до опоры № 52). Подключение воздушной части КВЛ к распределительному устройству 220 кВ с элегазовой изоляцией ПС 220 кВ «Томмот» и ПС 220 кВ «Майя» осуществляется через кабельные вставки длиной несколько десятков метров. Воздушная часть ЛЭП транспонирована с использованием шести транспозиционных опор (№ 119, 365, 568, 819, 1068 и 1287).

Терминалы устройств определяли место повреждения на КВЛ 220 кВ Томмот — Майя 1 волновым методом на основе двусторонних измерений напряжения на шинах ПС, к которым подключена данная КВЛ. Терминалы были расположены на релейных щитах ПС 220 кВ «Томмот» и ПС 220 кВ «Майя» и подключались

ОПЫТ № 2 — ОДНОФАЗНОЕ КЗ В СЕРЕДИНЕ ПРОЛЕТА

Рис. 17

по цепям измерения к вторичным фазным обмоткам электромагнитных трансформаторов напряжения, первичные обмотки которых подключены к сборным шинам 220 кВ этих ПС, по цепям синхронизации измерений к антеннам спутниковой навигационной системы GPS/ГЛОНАСС, по цепям передачи меток двусторонних измерений к системе передачи информации по ЛЭП (ВОЛС) и по цепям пуска от защит (РЗА) к исполнительным органам («сухим» контактам и каналу передачи GOOSE-сообщений) дифференциальной защиты ЛЭП (рис. 14).

Результаты ОМП отображались на экране терминала и передавались в службу релейной защиты, автоматики и АСУ ТП филиала ПАО «Россети ФСК ЕЭС» — МЭС Востока (Амурское ПМЭС). Полученные результаты ОМП терминалов ТОР 300 ВОМП устройств системы ВОМП сравнивались с показаниями устройств ИМФ-3 Р, находящихся в промышленной эксплуатации на этой КВЛ и осуществляющих ОМП методом односторонних измерений по параметрам аварийного режима.

Выполнено два опыта (рис. 15–18) однофазных КЗ на землю — через металлическую опору № 375 (см. рис. 15) и в середине пролета между опорой № 374 и опорой № 375 (см. рис. 17) КВЛ 220 кВ Томмот — Майя 1 через установленную под первой цепью КВЛ специально срубленную сосну при сохранении транзита по КВЛ 220 кВ Томмот — Майя 2. Осциллограммы высокочастотных составляющих междуфазного напряжения, измеряемого с электромагнитных ТН шин 220 кВ ПС «Томмот» и шин 220 кВ ПС «Майя» при опытах однофазных КЗ, приведены на рис. 16 и 18.

Полученные результаты ОМП терминалов ТОР 300 ВОМП при однофазном КЗ на землю через металлическую опору № 375 показали следующее:

- терминал ТОР 300 ВОМП, установленный на ПС «Томмот», при паспортном расстоянии от места КЗ до места установки устройств ОМП, равном 127,08 км, зафиксировал расстояние, равное 126,51 км, а терминал устройства ИМФ-3 Р — 122,1 км;

- терминал ТОР 300 ВОМП, установленный на ПС «Майя», при паспортном расстоянии от места КЗ до места установки устройств ОМП КВЛ 220 кВ Томмот — Майя 1, равном 307,574 км, зафиксировал расстояние, равное 308,2 км, а терминал устройства ИМФ-3 Р — 327,1 км.

Следовательно, погрешность системы ВОМП со стороны ПС «Томмот» составила 0,57 км и со стороны ПС 220 кВ «Майя» — 0,626 км, а погрешность устройства ИМФ-3 Р — соответственно 4,98 и 19,526 км.

Полученные результаты терминалов ОМП ТОР 300 ВОМП при опыте КЗ в середине пролета между опорами № 374 и № 375 показали следующее:

- терминал ТОР 300 ВОМП, установленный на ПС «Томмот», при паспортном расстоянии от места КЗ до места установки устройств ОМП КВЛ 220 кВ Томмот — Майя 1, равном 126,928 км, зафиксировал расстояние, равное 126,66 км, а терминал устройства ИМФ-3 Р — 130,2 км;

- терминал ТОР 300 ВОМП, установленный на ПС 220 кВ «Майя», при паспортном расстоянии от места КЗ до места установки устройств ОМП КВЛ 220 кВ Томмот — Майя 1, равном 307,726 км, зафиксировал расстояние, равное 308,04 км, а терминал устройства ИМФ-3 Р — 328,2 км.

Следовательно, погрешность системы ВОМП со стороны ПС «Томмот» составила 0,268 км и со стороны ПС «Майя» — 0,314 км, а погрешность устройства ИМФ-3 Р — соответственно 3,272 и 20,16 км.

Следует отметить, что погрешность системы ВОМП практически находилась в пределах длины одного пролета (0,3 км) КВЛ 220 кВ при опыте КЗ в середине пролета КВЛ 220 кВ Томмот — Майя. Большая погрешность при опыте КЗ на опору может быть связана с несоответствием паспортных данных фактическим расстояниям до точек проведения опытов на КВЛ, поскольку сумма расстояний по концам КВЛ, зафиксированных терминалами ТОР 300 ВОМП в обоих опытах, составила одну и ту же величину, равную 434,7 км, практически не отличающейся в условиях эксплуатации от 434,654 км, паспортной длины КВЛ 220 кВ Томмот — Майя.

ОПЫТ № 2 — ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ МЕЖДУФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ UA – UB НА: А) ПС «ТОММОТ»; Б) ПС «МАЙЯ 1»

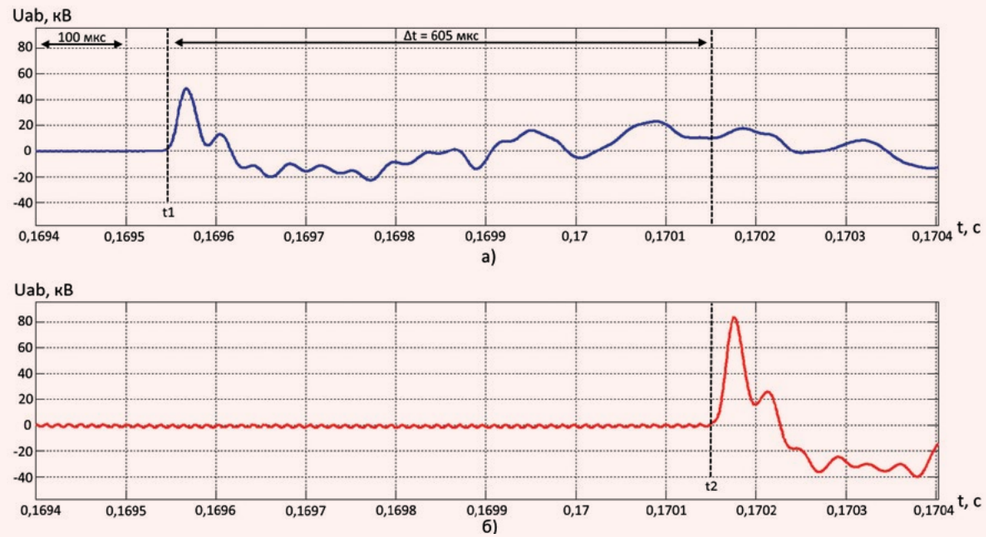


Рис. 18

ИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВЛ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ И ВЫШЕ, СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ «РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Определение мест повреждения (ОМП) воздушных линий (ВЛ) напряжением 110 кВ и выше с помощью фиксирующих приборов (индикаторов), регистраторов аварийных событий, микропроцессорных устройств РЗА стало неотъемлемой частью технического обслуживания электрических сетей. Эффективность поиска мест повреждения ВЛ при неустойчивых коротких замыканиях (КЗ) составила около 40 % проверенных при обходе ВЛ с таким повреждением.

Классификация методов определения мест повреждения ВЛ.

Существующие методы ОМП ВЛ 110 кВ и выше подразделяются на:

1. Методы, основанные на фиксации (записи) параметров аварийного режима (токов и напряжений);

2. Методы, основанные на измерении временных интервалов при распространении электромагнитных волн (импульсов) по ВЛ (локационные и волновые).

Методы расчета мест повреждения по параметрам аварийного режима, в свою очередь, разделяются на:

- ОМП при помощи расчетных формул на основе измерений токов и напряжений (нулевой и обратной последовательностей);

- Программные способы расчета.

ВЫВОДЫ

1. Переход от индивидуальных устройств ВОМП с двумя терминалами для каждой ВЛ, подключенными к ТТ по концам ВЛ, к системе ВОМП двусторонних измерений с терминалами, подключенными к ТН шин ПС, позволяет осуществлять ОМП на любой из ВЛ, примыкающей к данной системе шин, одним устройством, что ведет к сокращению общего числа устройств ОМП в электрической сети.

2. Алгоритм работы системы ВОМП предусматривает измерение междуфазного напряжения на шинах ПС с применением установленных на этих шинах ТН, выделение аварийных и волновых составляющих указанных напряжений, синхронную фиксацию времени прихода фронта напряжения указанных составляющих на каждом из концов поврежденной ВЛ и вычисление расстояния до места повреждения на основе статистического метода.

3. При моделировании переходных процессов при повреждениях на ВЛ 330 кВ и полигонных испытаниях устройств ТОР-300, реализующих алгоритм системы ВОМП ВЛ, погрешность ОМП не превысила длину пролета ВЛ. Исключение составили КЗ вблизи шин ПС на двухцепных ВЛ с существенным различием длины этих цепей.

4. Результаты натурных испытаний с использованием опытов КЗ на линии 220 кВ Томмот — Майя подтвердили высокую точность разработанных устройств системы ВОМП, реагирующих на параметры фронта волны, распространяющейся по линии от места КЗ, напряжение которой измеряется с помощью ТН, установленных на шинах ПС, к которым подключены данные линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982.
2. Краснышов С.В., Манжелий М.И., Лачугин В.Ф., Сидорук С.В., Джангиров В.А., Бояркин И.Е. Опыт использования регистраторов синхронизированных измерений токов и напряжений на ВЛ 110 кВ//Электрические станции. 2010. № 9. С. 42–47.
3. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н., Образцов С.А., Рывкин А.А., Шимина А.О. Многофункциональное устройство регистрации процессов, контроля качества электроэнергии и определения места повреждения на линиях электропередачи//Электрические станции. 2013. № 8. С. 29–36.
4. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н. Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа данных//Известия РАН. Энергетика. 2013. № 6. С. 137–146.
5. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н., Платонов П.С. Определение мест повреждений воздушных линий высокого напряжения с использованием спутниковой связи. Волновой метод двусторонних синхронизированных измерений//Энергия единой сети. 2017. № 2 (31). С. 30–41.
6. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Лачугин В.Ф., Платонов П.С., Алексеев В.Г., Вазюлин М.В., Митрофанов Н.Н., Попов С.Г., Арутюнов С.А., Клюшкин Н.Г., Шеметов А.С. Система волнового определения места повреждения, подключенная к трансформаторам напряжения системы шин//Электрические станции. 2021. № 1. С. 21–30.
8. Патент РФ на изобретение № 2739433. МПК G 01 R 31/08. Способ определения места повреждения на линии электропередачи/Лачугин В.Ф., Платонов П.С., Иванов С.В., Исмуков Г.Н., Подшивалин А.Н., Алексеев В.Г., Вазюлин М.В., Митрофанов Н.Н., Попов С.Г., Шеметов А.С. Заявл. 16.07.2020; опубл. 24.12.2020.
9. Бутымов А.С., Гайворонский А.С., Пуртов А.В. Система мониторинга грозовых разрядов и определения мест повреждений воздушных линий//Энергия единой сети. 2012. № 4. С. 44–47.
10. Лачугин В.Ф., Платонов П.С., Алексеев В.Г., Вазюлин М.В., Митрофанов Н.Н., Попов С.Г., Исмуков Г.Н., Подшивалин А.Н., Арутюнов С.А., Клюшкин Н.Г., Шеметов А.С. Полигонные испытания системы волнового определения места повреждения на воздушных линиях//Электрические станции. 2021. № 8. С. 34–40.

РОССЕТИ ФСК ЕЭС

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА: ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ

МЕДИАКИТ 2022

УЧРЕДИТЕЛЬ: ПАО «ФСК ЕЭС» ИЗДАТЕЛЬ: «НТЦ Россети ФСК ЕЭС»

+ 7 (495) 118-43-65

editor@энергия-единой-сети.рф

УМНЫЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ

СЕТЕВЫЕ КОМПАНИИ РОССЕТИ ЛИЧНО В РУКИ ФСК ЕЭС ПРОИЗВОДИТЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ИНЖЕНЕРЫ РУКОВОДИТЕЛИ СПЕЦИАЛИСТЫ МИНЭНЕРГО МЕНЕДЖЕРЫ НИИ МРСК ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ВУЗЫ РАН ЭНЕРГОХОЛДИНГИ ЦЕЛЕВАЯ РАССЫЛКА МОЛОДЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ СТУДЕНТЫ ПМЭС ГЛАВНЫЕ ИНЖЕНЕРЫ ПРОЕКТИРОВЩИКИ ПОСТАВЩИКИ ОБОРУДОВАНИЯ МЭС

реклама

WWW.ЭНЕРГИЯ-ЕДИНОЙ-СЕТИ.РФ