УДК 621.311

КОНЦЕПЦИЯ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОЛИНИЙ С ДРЕВОВИДНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ НА БАЗЕ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМОДЕМА»

А.Н. Закиров, С.А. Калабанов, А.В. Карпов, Р.И. Шагиев

В статье описывается концепция и разработка системы мониторинга и диагностики распределительных электросетей со сложной топологией на основе «интеллектуального электромодема». В качестве метода диагностики был выбран локационный импульсный метод с реализацией усреднений, дифференциального анализа и цифровой фильтрации. Мониторинг осуществляется с помощью стека протоколов физического и канального уровней, использующий узкополосную FSK модуляцию.

Ключевые слова: распределительные сети, локационный метод, локатор, электромодем, FSK модуляция.

Введение

Большую часть повреждений воздушных линий составляют короткие замыкания и обрывы проводов [1]. При этом определение места повреждения (ОМП) и восстановление поврежденных участков электролиний сети являются наиболее сложными и длительными операциями. Короткие замыкания и обрывы приводят к значительным потерям электроэнергии.

Предлагается система непрерывного мониторинга и диагностики на основе «интеллектуального электромодема», позволяющей в кратчайшие сроки обнаруживать и определять местоположения повреждений электроэнергетических сетей.

Описание системы

На рисунке 1 представлена блок-схема «интеллектуального электромодема».

Электромодем состоит из двух основных модулей: модуля мониторинга и модуля локации, а также блока согласования с электрической линией и блока управления, который осуществляет координацию основных модулей и взаимодействие электромодема с компьютером и прочей периферией.

Система строится с помощью электромодемов двух типов. Электромодем первого типа имеет в своем составе оба модуля и устанавливается в начале линии на подстанции. На концах линии устанавливаются модемы второго типа, имеющие в своем составе только блок мониторинга. Электромодем, установленный на подстанции, является центральным устройством в сети. Он выполняет диагностику электролинии методом локационного зондирования (блок локации) [2], а также мониторинг линии посредством обмена данными с удаленными модемами, используя специальный стек протоколов физического и канального уровней.

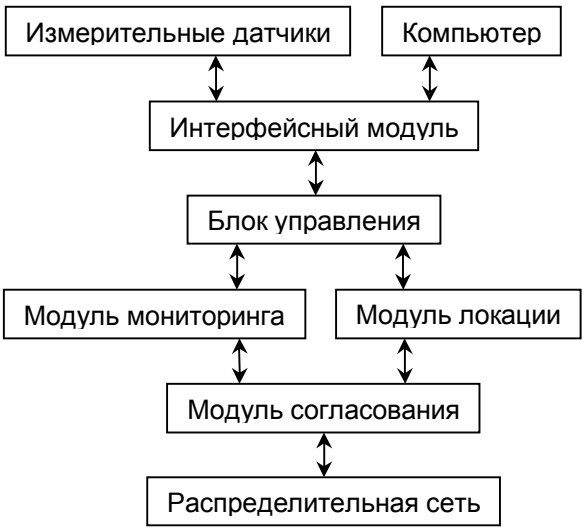

Рисунок 1 – Блок-схема «интеллектуального электромодема»

Подключение электромодемов к линии осуществляется по схеме «фаза – земля» через фильтр присоединения и конденсатор связи [3].

Наличие в электромодеме отдельного блока мониторинга позволяет избавиться от недостатков метода локационного зондирования, связанных с древовидной топологией распределительных электролиний (невозможность определения, в каком именно ответвлении произошло повреждение).

Модуль мониторинга

Модуль мониторинга построен на DSC-контроллере Motorola, на котором реализован протокол передачи данных канального уровня, реализующий функции мониторинга. Данный модуль оснащается интерфейсами для связи с компьютером (терминалом) и переда-

чи на него информации о состоянии электросети. Сигнальный контроллер развязан с линией с помощью оптической развязки, преимущество которой в небольших размерах по сравнению с традиционной трансформаторной развязкой. Блок-схема модуля мониторинга представлена на рисунке 2.

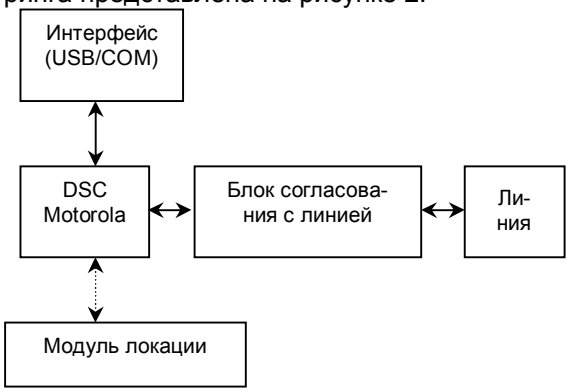

Рисунок 2 – Блок-схема модуля мониторинга «интеллектуального электромодема»

Определенное количество электромодемов, распределенных по электросети и связанных между собой, образуют своеобразную информационную сеть. Информацией в такой сети будут координаты локализованного участка. Изложенная идея положена в основу сетевого мониторинга. Основное назначение сетевого мониторинга – локализация поврежденных участков в диагностируемой электросети.

Мониторинг электросети подразумевает постоянный опрос периферийных электромодемов, расположенных на отпайках древовидной сети. Данная функция не осуществима без наличия адресов у периферии и соответствующей логики адресации в сети. Мониторинг электросетей является низкоскоростным приложением, в котором важнейший элемент – достоверность принятой информации. Древовидная топология распределительных сетей означает, что между двумя электромодемами в сети будет иметься только одна физическая связь (отсутствуют кольцевые связи). Система будет функционировать по принципу «master-slave», при которой только одно устройство (master) может инициировать передачу. Другие устройства (slaves) передают запрашиваемые master-устройством данные. Эти обстоятельства подразумевают достаточность уже имеющегося механизма адресации на уровне кадра HDLC, который был взят за основу протокола канального уровня.

Протокол физического уровня использует узкополосную FSK-модуляцию с рабочей полосой частот 10 кГц.

Модуль локации

Модуль локации разработан на базе программируемой логики, а именно на базе ПЛИС Altera Cyclone II.

Использование ПЛИС продиктовано высокой гибкостью данных микросхем и легкостью наращивания функционала устройства. На ПЛИС реализуется быстрая аппаратная цифровая обработка сигналов (цифровая фильтрация от помех). При реализации режекторного КИХ фильтра с порядком, равным 1024, подавляющий частоты от 850 до 900 кГц (полоса частот оборудования телемеханики на линии 110 кВ «Рыбная Слобода – Камская»), ослабление сигнала помехи достигает 40 дБ. При этом задержка, вносимая фильтром, равна всего 20 мкс при работе на частоте 50 МГц.

Большое число вводов/выводов ПЛИС обеспечивают возможность подключения разнообразной периферии с произвольными интерфейсами. В разработанном модуле напрямую к микросхеме подключаются: внешняя память (оперативная и энергонезависимая), внешняя индикация и кнопки управления, интерфейсы USB, RS-485, карточка microSD, логический выход. Всего задействовано около 90% пользовательских портов ввода/вывода. Наличие на кристаллах ПЛИС Altera Cyclone II блоков памяти, способных работать в двухпортовом режиме с высокой тактовой частотой [4], позволяет записывать и одновременно считывать данные с быстродействующего АЦП без привлечения дополнительных буферизирующих микросхем, использование которых необходимо при отсутствии встроенной высокоскоростной памяти (как в случае применения обычных микроконтроллеров). Также возможность независимой реализации отдельных структурных блоков позволяет выполнять обработку данных в параллельном режиме.

Блок-схема модуля локации показана на рисунке 3. Логика работы устройства реализована на синтезированном процессоре Nios II. Процессор имеет оперативную память SDRAM объемом 16 Мб. Имеется и энергонезависимая FLASH-память объемом 2 Мб, которая используется для хранения параметров устройства и эталонных рефлектограмм. Модуль имеет контроллер и соответствующий слот для microSD-карточек, где хранятся текущие рефлектограммы и журнал о состоянии линии.

На базе логики ПЛИС были реализованы блоки формирователя зондирующих импульсов и приемника отраженного сигнала, которые подключаются к процессорному ядру в виде отдельного контроллера через внутрен-

нюю шину. При этом работа этих блоков осуществляется параллельно с работой процессора, и на их функционирование не тратится дополнительное процессорное время.

По команде запуска формирователь зондирующих импульсов генерирует прямоугольный импульс или пачку импульсов с заданной длительностью. Сгенерированные импульсы усиливаются выходным усилителем до 12 В, либо до 24 В, в зависимости от напряжения питания. При этом длительности фронтов и спадов усиленных импульсов не превышают 5 нс.

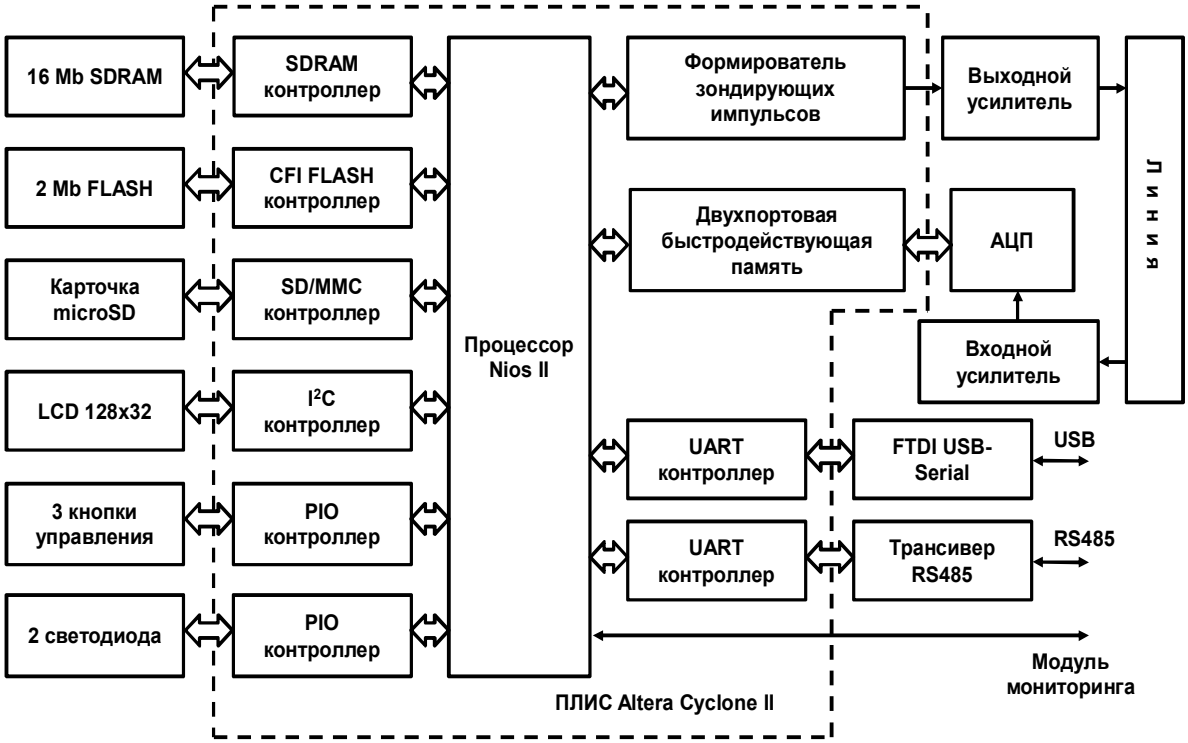

Рисунок 3 – Блок-схема модуля локации «интеллектуального электромодема»

Отраженный сигнал проходит через входной усилитель и подается на быстродействующий АЦП с частотой дискретизации 50 МГц, на выходе которого формируются восьми-битные отсчеты сигнала. Цифровые данные записываются в реальном времени в двухпортовую память, реализованную на регистрах ПЛИС. Размер памяти выбран достаточным для хранения отсчетов рефлектограммы линии длиной до 50 км с частотой выборки 50 МГц.

Обработка полученных данных заключается в цифровой фильтрации сигнала, усреднении данных по нескольким выборкам и реализации дифференциального анализа. По результатам обработки выдается сигнал об обнаружении повреждения или о рабочем состоянии электролинии.

Алгоритм дифференциального анализа можно описать последовательностью нескольких шагов: создание эталонной рефлектограммы и определение уровня шума в линии, усреднение текущих рефлектограмм, обнаружение отраженного от места повреждения импульса.

Создание эталонной рефлектограммы и определение уровня шума в линии осуществляется следующим образом:

1. Накапливается n штук рефлектограмм $P_i(k)$, и создается эталонная рефлектограмма $P_Э(k)$ по формуле:

$$P_Э(k) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i(k), \quad k=1..p \qquad (1)$$

2. Определяется уровень шума $\sigma(q)$ для каждого окна q, для этого:

а. вычисляется усредненная текущая рефлектограмма $P_Т(k)$:

$$P_Т(k) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i(k), \quad k=1..p \qquad (2)$$

б. подсчитывается отклонение рефлектограммы $P_Т(k)$ от эталонной $P_Э(k)$ для каждого номера окна q:

$$\sigma^2(q) = \frac{1}{w-1} \sum_{k=(q-1)w+1}^{(q-1)w+w} [P_Т(k) - P_Э(k)]^2 , \quad (3)$$

где w – длина окна, на котором вычисляется уровень шума.

Для обнаружения точки повреждения для каждого окна подсчитывается значение отклонения усредненной текущей рефлектограммы от эталонной, и сравнивается с уровнем шума на данном окне $\sigma(q)$. При превышении отклонения в заданное число раз над уровнем шума $\sigma(q)$ – выявляется участок линии, на котором произошло повреждение. Порог отклонения вычисляется автоматически по результатам анализа уровня шума на линии либо задается вручную.

Испытания системы

Были проведены лабораторные и натурные испытания устройств, которые подтвердили их работоспособность. Натурные испытания проводились на подстанциях «Рыбная Слобода» и «Кутлу-Букаш» на территории республики Татарстан. На подстанции «Рыбная Слобода» на линии 110 кВ, протяженностью около 30 км, было создано искусственное короткое замыкание примерно в середине линии (17800 м). Рассматривались вариации с включенной и отключенной высокочастотной сигнализацией, с коротким замыканием (КЗ) и без КЗ на участке 17,8 км. Испытания проводились на отключенной линии. КЗ производилось выездной бригадой по команде из подстанции. Разработанная система в автоматическом режиме в течение 10 секунд обнаружила данное замыкание, сообщила об аварии в виде сигнализации и выдала расстояние до места повреждение, которое в точности совпало с реальным расстоянием до КЗ. Полученная рефлектограмма отражения показана на рисунке 4. На подстанции «Кутлу-Букаш» испытывалась линия 110 кВ, протяженностью 40 км.

Данные испытания подтвердили работоспособность системы.

Выводы

В результате проделанной работы была выдвинута концепция и разработана система мониторинга и диагностики распределительных электросетей на базе «интеллектуального электромодема».

Достигнутые характеристики блока локации: амплитуда зондирующих импульсов 12–24 В; длительность зондирующих импульсов 0,04–20 мкс; количество усреднений до 10000; диапазон измеряемых расстояний до 50 км; интерфейсы USB, RS-485, логический выход; внешняя память microSD для хранения рефлектограмм и журнала состояния линии. Достигнутые характеристики блока мониторинга: скорость передачи данных 9 кБод; модуляция узкополосная FSK; рабочая полоса частот 10 кГц; максимальная выходная мощность сигнала 20 Вт; протокол HDLC; интерфейсы USB, RS-485, логический выход.

Разработанные устройства прошли лабораторные и натурные испытания.

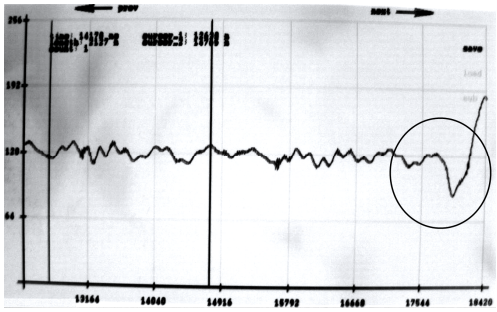

Рисунок 4 – Зарегистрированное отражение от замыкания на линии «Рыбная Слобода»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минуллин, Р.Г. Локационная диагностика воздушных линий электропередачи. / Р.Г. Минуллин, И.Ш. Фардиев. – Казань.: КГЭУ, 2008.– 203 с.
2. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждений линий электропередачи импульсным методом. / Г.М. Шалыт. – М.: Энергия, 1968. – 216 с.
3. Микуцкий, Г.В. Высокочастотная связь по линиям электропередачи. / Г.В. Микуцкий, В.С. Скитальцев. – М.: Энергия, 1977. – 440 с.
4. Cyclone II Device Handbook [Electronic resource] / Altera Corporation – Mode of Access: http://www.altera.com/literature/hb/cyc2/cyc2_cii5v1.pdf

*Инженер **А.Н. Закиров** – zakirov@yandex.ru; к.ф.м.н. **С.А. Калабанов** – kazansergei@mail.ru; д.ф.м.н., проф. **А.В. Карпов** – Arkadi.Karpov@ksu.ru; магистрант **Р.И. Шагиев** – r3ntil@gmail.com - Казанский федеральный университет, Институт Физики, кафедра радиофизики.*