

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

А. В. Поляков, Т. Д. Прокопенкова

*Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by*

Представлены характерные особенности и преимущества использования инновационных оптоволоконных технологий в области геофизических исследований и мониторинга нефтяных, газовых и нагнетательных скважин. Разработана структура автоматизированной квазираспределенной волоконно-оптической системы измерения температуры рециркуляционного типа с использованием технологии спектрального мультиплексирования.

Ключевые слова: геофизические исследования скважин; оптоволокно; квазираспределенный датчик температуры.

AUTOMATED OPTOELECTRONIC MEASURING SYSTEM

A. V. Polyakov, T. D. Prokopenkova

*Belarusian State University
Minsk, Belarus*

The features and advantages in applying fiber optical innovative procedures in the area of wire-line surveys and monitoring of oil, gas and injection well operation are illustrated. The structure of the automated quasidistributed fiber-optical temperature measurement recirculation system with using of spectral multiplexing technology is proposed.

Keywords: wire-line well survey; fiber optics; quasidistributed temperature sensor.

Оптоволоконные технологии (ОВТ) уже давно используются в различных областях техники, составляя основу не только средств передачи информации, но разнообразных устройств измерения и контроля. В последнее десятилетие ОВТ все интенсивнее проникают в нефтяную и газовую промышленность. На основе ОВТ разработаны различные измерительные системы, которые, обладая высокой точностью, превосходят электронные устройства того же назначения в части стабильности и термостойкости. Измерительные элементы (сенсоры) таких систем не подвержены влиянию магнитных и электрических полей и стойки по отношению к вибрации и ударам. В данной работе рассмотрена возможность использования в «интеллектуальных скважинах» именно таких волоконных распределенных систем, где сам световод является чувствительным элементом.

Для одновременного измерения температуры в нескольких требуемых точках контролируемого объекта нами разработана структура квазираспределенного волоконно-оптического датчика температуры (ВОДТ) со спектральным разделением каналов. Принцип функционирования данного ВОДТ основан на зависимости времени задержки распространения оптического импульса в волоконном световоде (ВС) от температуры. Рост температуры световода приводит к увеличению его геометрической длины L (продольной деформации), изменению показателя преломления n и, соответственно, изменению частоты рециркуляции. Одновременно с продольной деформацией ВС происходит изменение его диаметра (уменьшение при растяжении и увеличение при сжатии), т. е. возникает поперечная деформация. Этим объясняется эффект фотоупругости, который также приводит к изменению показателя преломления.

Сущность функционирования волоконно-оптического датчика, схема которого представлена на рис. 1, заключается в организации рециркуляции одиночных оптических импульсов с периодической регенерацией одновременно на нескольких длинах волн. Устройство работает следующим образом. По сигналу с блока управления, обработки и отображения данных (БУО) блок регенерации (БРГ) генерирует стандартные по амплитуде, длительности и форме начальные импульсы и запускает процесс циркуляции. Данные импульсы тока накачки после усиления модулятором тока (МТ) поступают на входы линейки излучателей, представляющие полупроводниковые инжекционные лазеры (ИЛ), генерирующие излучение на различных длинах волн. Для уменьшения задержки между импульсом тока накачки и излучением инжекционного лазера последние смещаются в предпороговую область постоянной составляющей тока накачки. Импульсы оптического излучения на разных длинах волн от инжекционных лазеров объединяются в один световод мультиплексором (MUX) и через направленный ответвитель (НО) вводятся в волоконный световод (ВС), разделенный на секции дихроичными зеркалами (ДЗ). Дихроичные зеркала настроены таким образом, что отражают излучение на определенной длине волны и пропускают все остальные, при этом излучение на последней длине волны просто отражается от зеркального отражателя (О). Отраженное излучение после некоторой задержки τ_0 , определяемой оптической длиной оптоволоконной секции, с помощью НО направляется на демультиплексор (DEMUX), который пространственно разделяет спектральные каналы, а затем регистрируется линейкой фотоприемников (ФП). Сигнал с фотоприемников поступает на пороговые устройства (компараторы) (ПУ), на выходе которых в момент пересечения сигналом порогового уровня формируются импульсы, управляющие блоком регенерации, который снова формирует стандартные по амплитуде, длительности и форме импульсы. Таким образом, цикл рециркуляции замыкается. Рециркулирующий импульс от требуемой волоконно-оптической секции по сигналу с БУО выбирается коммутатором (К) и регистрируется частотомером (ЧМ). Полученная после фиксированного времени измерения усредненная частота рециркуляции с частотомера передается в БУО, где по заданному алгоритму производится преобразование частоты рециркуляции в измеряемую температуру.

Чувствительный элемент ВОДТ представляет собой отрезки кварцевых многомодовых волоконных световодов. Принцип измерения основан на том, что воздействие температуры приводит к изменению оптической длины волокна за счет изменения геометрической длины и показателя преломления волоконного световода. Это служит причиной изменения времени распространения оптического импульса по ВС, что влечет за собой изменение частоты рециркуляции, которое регистрируется достаточно просто и с высокой точностью. На каждом цикле рециркуляции осуществляется так

называемая $2R$ -регенерация (re-amplification + re-shaping), т. е. происходит восстановление информационного импульса по форме, амплитуде и длительности, что позволяет поддерживать процесс рециркуляции неограниченно долго. Информационным параметром является временное положение циркулирующего импульса. При этом длина волны излучения каждого лазера соответствует спектральной полосе отражения определенного дихроичного зеркала. БУО через БРГ может управлять числом рециркуляционных информационных каналов, запуская либо все из них, либо только те, которые соответствуют необходимым волоконным секциям. Различные длины волн и спектрально-селективные элементы используются для того, чтобы не только измерять температуру, но и локализовать пространственный отрезок, на котором эта температура действует. Измерения осуществляются на основе последовательного отслеживания изменения разности частот рециркуляции на соседних участках на соседних длинах волн: $\Delta f_n(\theta) = f(\lambda_{n-1}) - f(\lambda_n)$.

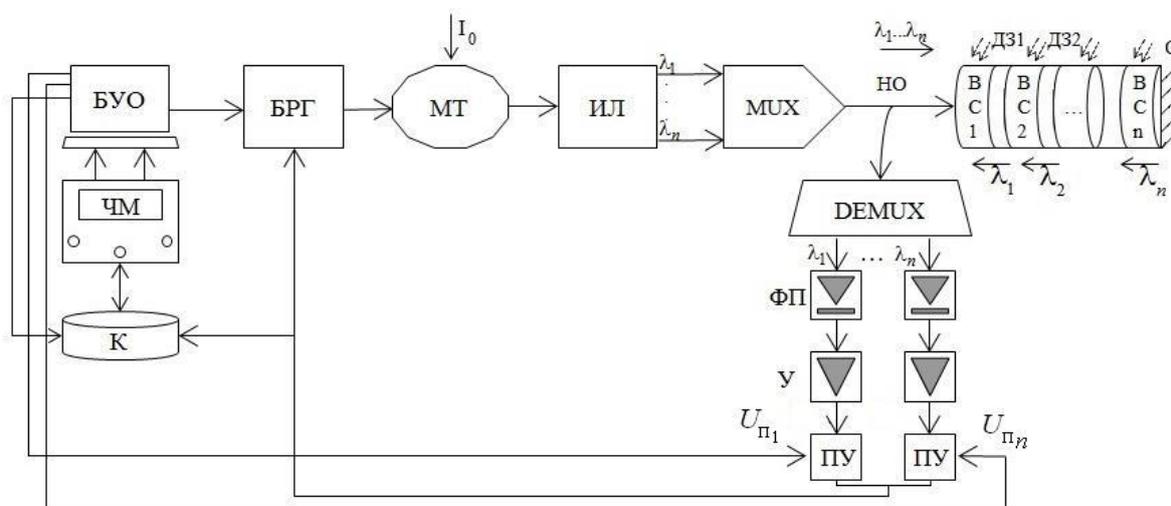


Рис. 1. Схема квазираспределенного ВОДТ рециркуляционного типа: БУО – блок управления, обработки и отображения информации; БРГ – блок регенерации; МТ – модулятор тока; ИЛ – линейка инжекционных лазеров; MUX – мультиплексор; НО – направленный ответвитель; ВС – волоконный световод; ДЗ – дихроичное зеркало; О – отражатель; DEMUX – демуплексор; ФП – линейка фотоприемников; ПУ – пороговое устройство; К – коммутатор; ЧМ – частотомер

В качестве двухканального частотомера предлагается использовать электронно-счетные частотомеры Agilent Technologies 53132A с высокими техническими характеристиками и производительностью, которые обеспечивают быстрые и точные измерения частоты. Измерения производятся при разрешении 12 разрядов при времени 1 с в диапазоне частот до 225 МГц. Нормированное разрешение при измерении временного интервала оставляет 150 пс. Стандартные виды измерений включают измерение частоты, периода, отношения частот, временного интервала, длительности импульса, длительности фронта/среза, фазы, коэффициента заполнения периода, суммы событий и пикового значения напряжения. Такие частотомеры имеют интуитивно понятный интерфейс пользователя и одноклавишный доступ к наиболее часто используемым функциям, поэтому точные измерения выполняются быстро и просто. Для анализа данных одновременно с выполнением новых замеров используется техника цифровой обработки сигналов в реальном времени – это повышает производительность процесса

измерений. Также частотомеры имеют встроенные функции статистической и математической обработки, что позволяет масштабировать результаты измерений и одновременно измерять и отслеживать среднее, минимальное, максимальное значения и среднеквадратическое отклонение. Автоматизированные допусковые испытания позволяют устанавливать верхний и нижний пределы для любого результата измерения. Аналоговая форма представления данных на экране позволяет визуально оценить, выходят ли результаты измерения за пределы допусков или нет. Для применения в системах, управляемых компьютером, каждый частотомер имеет стандартный интерфейс GPIB и программное обеспечение IntuiLink с возможностью программирования на языке SCPI при скорости передачи данных до 200 полностью сформатированных результатов измерения в секунду. Стандартный интерфейс RS-232 используется только в режиме вывода данных и обеспечивает поддержку принтера или передачу данных в компьютер с помощью программы эмуляции терминала.

Программный пакет Agilent IntuiLink обеспечивает легкий доступ к данным частотомера со стороны компьютера. Частотомер накапливает точные результаты измерения частотных и временных параметров сигналов. Программный пакет IntuiLink позволяет сделать эти данные доступными для их обработки на ПК. При этом пользователь работает в хорошо знакомой среде, используя прикладные компьютерные программы, такие как Microsoft Excel или Microsoft Word для анализа, интерпретации, отображения, печати и документирования данных, полученных от частотомера. Имеется также автономный программный пакет BanchLink Meter, который обеспечивает гибкость конфигурирования и запуска испытательных процедур от компьютера, делая сбор данных более удобным.

Пакет BanchLink Meter позволяет:

- конфигурировать процедуры испытаний, устанавливая виды измерений, число отсчетов, скорость измерения и др.;
- выбирать режим отображения данных в форме ленточной диаграммы в реальном времени, гистограммы, цифрового отсчета и таблицы;
- масштабировать данные измерений;
- копировать собранные данные в другие программы.

При длительности импульсов на входе ЧМ 4,5–10 нс диапазон входных напряжений должен составлять 100 мВ – 10 В. Если длину всего ВС, составляющего 2 км, разделить ДЗ на 10 участков по 200 м, частота рециркуляции будет изменяться в диапазоне 50–500 кГц. Для данных частот вклад опорного генератора в погрешность измерений при использовании термостатированного источника средней стабильности составляет 4×10^{-7} , а общая погрешность измерений не превышает 10^{-6} при времени измерения 1 с.

БУО выполняет несколько функций. Во-первых, с использованием специально написанной программы разность частот, поступающих с двух выходов частотомера, преобразуется в измеряемую температуру, которая затем наряду с выбранной секцией измерений отображается на дисплее. Кроме того, на дисплее в реальном времени прорисовывается график изменения температуры в зависимости от времени. Во-вторых, с помощью управляющих сигналов, поступающих с БУО на коммутатор, происходит выбор участка оптоволоконного чувствительного элемента, с которого снимаются измерения температуры. В-третьих, для каждого порогового устройства устанавливается свой индивидуальный порог срабатывания. Это связано с тем, что амплитуда импульсных сигналов, приходящих от каждой волоконно-оптической измерительной секции, будет различной, а для устойчивой работы системы необходимо, чтобы поро-

говый уровень соответствовал линейному участку фронта импульса, т. е. $U_{\text{п}} = (0,3-0,8)U_{\text{а}}$.

Коммутатор цифровых сигналов представляет собой мультиплексор, который является комбинационным устройством с m информационными, n управляющими входами и одним выходом. Функционально мультиплексор состоит из m элементов конъюнкции, выходы которых объединены дизъюнктивно с помощью элемента ИЛИ с m входами. На одни входы всех элементов конъюнкции подаются информационные сигналы, другие входы этих элементов соединены с соответствующими выходами дешифратора с n входами.

Функциональная схема мультиплексора на четыре входа приведена на рис. 2. Из уравнения K видно, что на его выход будет передаваться сигнал только с одного входа, номер которого совпадает с числом, соответствующим кодовой комбинации $X1$ и $X2$, поступающей с БУО. Если $X1 = X2 = 0$, на выход мультиплексора будет передаваться сигнал с входа $D0$. Когда на адресных (управляющих) входах $X1 = 1$ и $X2 = 0$, на выход будет передаваться сигнал с входа $D1$ и т. д. Соответственно, частотомер будет фиксировать частоту рециркуляции выбранного замкнутого оптоэлектронного контура.

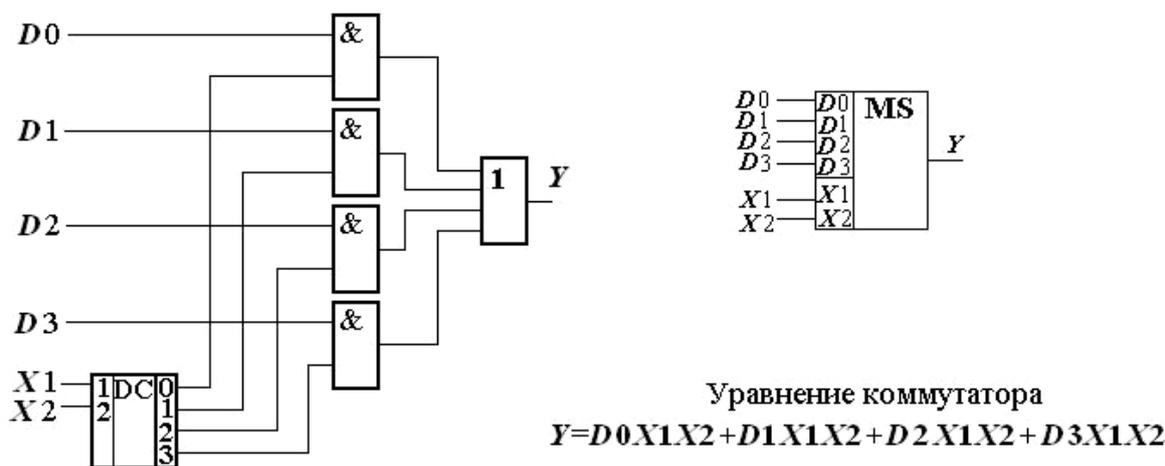


Рис. 2. Функциональная схема коммутатора 4 × 1

Таким образом, представлена новая структура квазираспределенного ВОДТ, предназначенного для скважинной термометрии при добыче высоковязкой нефти. Принцип действия основан на регистрации частоты рециркуляции одиночных импульсов с их периодической регенерацией на различных длинах волн. Чувствительными элементами являются секции оптического волокна с металлическим покрытием, разделенные спектрально-селективными отражающими элементами.