

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ВНУТРИСКВАЖИННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Феофилактов С.В.¹, Черепанов Д.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия (420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10), e-mail: fsv@irz.ru

Рассматриваются характеристики и перспективы развития внутрискважинных волоконно-оптических информационно-измерительных систем, в частности, систем внутрискважинной телеметрии. Проводится сравнение волоконно-оптических и традиционных электрических стационарных внутрискважинных систем. Впервые представлена концепция программно-определяемых внутрискважинных волоконно-оптических телеметрических систем на основе комбинированной нелинейной рефлектометрии, включающая в себя процедуры формирования в волокне распределенного, квази-распределенного или точечного отклика различной природы (вынужденного комбинированного рассеяния Рамана, вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна, обратного рассеяния Релея и отражения от волоконных решеток Брэгга) на температуру и давление в скважине, а также регистрации указанных откликов по спектральным характеристикам с помощью полигармонического анализа, учитывая их схожий квазирезонансный характер. Обсуждаются подходы для реализации разработанной концепции, в том числе с учетом необходимости получения информации о параметрах потока жидкости и построении комбинированных волоконно-оптических расходомеров.

Ключевые слова: внутрискважинные измерительные системы, волоконно-оптические распределенные и квази-распределенные датчики, рассеяние Рамана, рассеяние Манделъштама-Бриллюэна, рассеяние Релея, волоконные брэгговские решетки.

DEVELOPMENT OPPORTUNITIES OF COMBINED DOWN-HOLE FIBEROPTIC MEASUREMENT SYSTEMS

Feofilaktov S.V.¹, Cherepanov D.A.¹

¹Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia (420111, Kazan, Karl Marx street, 10), e-mail: fsv@irz.ru

The characteristics and development opportunities of down-hole fiber-optic information-measuring systems, particularly, systems of down-hole telemetry are considered. A comparison is made of fiber-optic and traditional electrical stationary down-hole systems. For the first time the concept of software-defined down-hole fiber-optic telemetry systems based on the combination of nonlinear reflectometry is introduced. The concept includes the procedure for forming in the fiber the distributed, quasi-distributed or point response of different nature (combined stimulated Raman scattering, stimulated Brillouin scattering, Rayleigh backscattering and reflection from the fiber Bragg grating) at the temperature and pressure in the well. Then registration of the response spectral characteristics using poly-harmonic analysis, based on their similar quasi-resonance character, is realized. Approaches for implementing of developed concept are discussed, including the necessity to obtain information about the parameters of fluid flow and the construction of combined fiber optic flow-meter.

Keywords: down-hole measurement systems, fiber-optic distributed and quazi-distributed sensors, Raman scattering, Brillouin scattering, Rayleigh scattering, fiber Bragg grating.

На сегодняшний день в структуре ТЭК активно используются внутрискважинные стационарные информационно-измерительные системы (СИИС) для управления и мониторинга добычи нефти. Применение СИИС позволяет создавать интеллектуальные скважины и непрерывно проводить гидродинамических исследования (ГДИС) для технологий мониторинга добычи и контроля разработки. Интеллектуальная скважина – адаптивная система повышения дебита и продления срока службы насоса путем управления погружным оборудованием, на основе непрерывного анализа данных, получаемых от

внутрискважинной СИИС, в реальном масштабе времени. Традиционный способ проведения ГДИС состоит в остановке скважины и помещения геофизического оборудования становится дорогим и постепенно теряет актуальность перед использованием ГДИС на основе обработанных данных СИИС. Мониторинг месторождения также может быть обеспечен сбором и обработкой данных, но уже по нескольким скважинам.

Современные СИИС представлены различными электронными приборами, в состав которых входят датчики давления, температуры, расхода, вибрации, аналого-цифровые преобразователи, микроконтроллер и узел передачи данных. В качестве среды передачи используется колонна насосно-компрессорной трубы (НКТ), как волновод для передачи радиосигналов, но чаще всего используется линия «электродвигатель – кабель питания погружного электродвигателя – повышающий трансформатор». Первый вариант требует формирования специальной вставки в НКТ на этапе бурения скважины, второй вариант характеризуется низкой скоростью передачи данных и требует специальных средств защиты от высокого напряжения погружного электродвигателя и помех.

Экстремальные условия скважины, наличие высоких внутрискважинных температур (150 °С и более) и давления (до 60 МПа) накладывают жёсткие требования на традиционные электронные датчики (ЭД) и узлы [9], выявляют их недостатки: электронные компоненты должны быть в высокотемпературном исполнении; ЭД требуют электропитания и подвержены температурному дрейфу, чувствительны к помехам; ЭД требуют совмещенной конструкции чувствительного элемента и электронного преобразователя в жестких условиях зоны измерений. Оптические волоконные датчики (ВОД) лишены данных недостатков.

Внутрискважинные измерительные системы на волоконно-оптических датчиках

Отличительной особенностью ВОД является использование оптического волокна и в качестве линии передачи данных и в качестве чувствительного элемента. Таким образом, в одном волокне может быть несколько датчиков или само волокно является распределённым датчиком. Отсутствие необходимости совмещать чувствительный элемент и электронный преобразователь на расстояние менее нескольких метров позволяет создавать волоконно-оптические измерительные системы (ВОИС) так, что оптико-электронный преобразователь находится вне скважины, в то время как сам датчик-волокно внутри. Появляется возможность установить в скважине множество ВОД в одном оптическом волокне, которые опрашиваются оптическими импульсами, приходящими отражающимися от датчиков и возвращающимися по оптическому кабелю в оптоэлектронный трансивер-регистратор. Разделение сигналов от каждого ВОД производится либо во временной области (OTDR, от каждого датчика оптический сигнал приходит с определенной временной задержкой), либо в

спектральной области (OFDR, каждому датчику соответствует своя длина волны максимума отражения, амплитуда которой прямо пропорционально величине измеряемого параметра).

Дополнительными преимуществами ВОД являются их взрыво- и пожаробезопасность, радиационная стойкость, устойчивость к агрессивным средам, помехозащищенность от электромагнитных воздействий, оптическая гальваническая развязка с электронной аппаратурой, расширенный диапазон рабочих температур, высокая скорость обновления данных.

Современные ВОД позволяют измерять многие физические параметры, но наиболее важными для построения интеллектуальной скважины являются: призабойное давление, температура, а также дебит пласта при наличии нескольких пластов в скважине. ЭД позволяют измерять данные величины с разрешающей способностью в 0,01 Атм и 0,01 °С с точностью порядка 1 % от верхнего предела измерений. ЭД на основе пьезоэлементов имеют на порядок лучшие характеристики, но более дороги. ВОД в качестве чувствительного элемента для измерения температуры и давления можно разделить на распределённые (на основе рассеяния света) и квази-распределённые (на волоконных брегговских решётках (ВБР)) [1].

В распределённых сенсорах используют физические явления, происходящие в кварцевом стекловолноке, – расширение и вибрации молекулярной решётки, ведущие к появлению рассеяния света на фононах и фотонах (вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) и вынужденное комбинированное рассеяние Рамана (ВКРР)).

Системы, построенные на ВКРР, измеряют стоксовую и антистоксовую компоненту частоты сигнала в диапазоне 13 ТГц, что соответствует сдвигу длины волны на 100 нм для накачки на длине волны 1550 нм. Мощность антистоксовой компоненты рассеяния является функцией температуры, в то время как мощность стоксовой компоненты практически не зависит от температуры. Технические спецификации системы измерения температуры по ВКРР могут быть оптимизированы посредством настройки параметров прибора (дальность действия, локальное разрешение, точность температуры, время измерения) и имеют разрешающую способность порядка 1м.

Мощность ВКРР мала, его измерение ОТDR-методом требует мощного (дорогого) импульсного лазера. Существуют и OFDR-методы измерения компонент ВКРР с помощью ЛЧМ-модулированного света лазера, которые в свою очередь реализуются на технически сложном оборудовании (комплексное измерение по амплитуде, частоте и фазе) и с использованием дорогостоящего программного обеспечения.

OFDR-методы также применяются при измерении ВРМБ. Частотные OFDR-методы менее чувствительны к дрейфу мощности сигнала и вносимым потерям, что обеспечивает

долговременную стабильность. Так как стоксовая и антистоксовая компоненты рассеянного света разнесены симметрично на одинаковую частоту, то для их выявления актуально применение не только одночастотных, но и двухчастотных источников излучения [4-5, 8].

В отличие от ВКРР ВРМБ позволяет измерять и температуру (частотный сдвиг около 1 МГц/°С) и деформацию (частотный сдвиг около 493 МГц/ε (%)). К недостаткам систем мониторинга на основе ВРМБ следует отнести сложность их устройства, которая обуславливает высокую стоимость. Преимуществом систем на основе ВРМБ является возможность работы с сенсорными кабелями на основе обычного телекоммуникационного волокна. Для систем мониторинга на основе ВРМБ типичны следующие характеристики: расстояние в 40–50 км при пространственном разрешении 1–2 м, время получения сигнала ориентировочно 1–2 минуты.

Распределённые сенсоры имеют наибольшую привлекательность, так как позволяют получать большой объём информации для ГДИС и оперативного контроля и не имеют аналогов в виде ЭД. Современные решения на рынке представлены западными производителями и имеют точность порядка единиц градусов по температуре.

Системы на ВБР датчиках позволяют добиться на порядок большей точности и разрешающей способности, что даёт те же или лучшие характеристики по сравнению с ЭД. На практике применяются два метода получения спектра отражённого сигнала – использование дифракционной решётки с ПЗС матрицей, регистрирующей спектр отражённого широкополосного сигнала, и использование анализатора с перестраиваемой длиной волны.

Большая длина скважин (до 6 км) накладывает ограничение на затухание оптического сигнала, поэтому наиболее пригодным окном прозрачности для рассматриваемых ОД является окно с длиной волны 1550 нм.

Термическая стойкость стекловолоконного покрытия ограничивает максимальный диапазон рабочих температур ВОД. Стандартные волокна для передачи данных непригодны для применения в НКТ, на них нанесено акриловое покрытие или покрытие, отвержденное в результате облучения ультрафиолетовым излучением, которое способно работать в диапазоне температур до 80°С. Стекловолокно с полиамидным покрытием может использоваться до максимальной температуры 400 °С.

Комбинированные волоконно-оптические системы внутрискважинных измерений

Возможна комбинация распределённых ВОД и ВРБ в одном волокне для калибровки первых. Комбинация распределённых сенсоров температуры и квази-распределённых сенсоров давления позволит при совместной обработке информации получить поля «давление-температура» в стволе НКТ.

На основе анализа разработок фирм Weatherford, Schlumberger, Halliburton были сделаны следующие выводы о комбинированных методах:

- Halliburton использует систему мониторинга скважин на основе ВРМБ, преимущества которой основаны на современных технологических решениях в области бриллюэновских измерений и применении опорных датчиков температуры или давления для разделения мультипликативных показаний бриллюэновского датчика, например, решеток Брэгга (ВРБ).
- Schlumberger имеет патенты на ВРБ, которые касаются в основном лишь точечных или квази-распределенных измерений. Особого внимания заслуживает патент на интегральную систему внутрискважинного термометрирования, использующую обратно рассеянный сигнал одного / любого из видов: Рэлея, Рамана, Бриллюэна;
- аналогичным патентом владеет Weatherford, который получен на 7 лет раньше Schlumberger, при этом патентный портфель Weatherford отличается от подобного фирмы Schlumberger наличием значительного количества разработок датчиков на ВРБ, которые в той или иной мере дополняют рамановскую и бриллюэновскую рефлектометрии, а также используются в качестве точечных датчиков. Кроме того, следует отметить комбинированные виды систем по парам – ВКРР и ВРМБ; ВКРР и рассеяние Рэлея (РР).

Авторы не нашли проектов, в которых бы использовались преимущества всех трех видов измерительных процедур одновременно. Современные технологии, включая патентные решения авторов и научной школы КНИТУ-КАИ [3-9], позволяют сделать программно-определяемыми процедуры формирования в волокне отклика различной природы (ВКРР, ВРМБ, РР и отражение от ВРБ) на температуру и давление в скважине и сделать универсальной процедуру полигармонического зондирования откликов, учитывая их схожий квазирезонансный характер. Указанные факторы определяют актуальность разработки внутрискважинной оптоволоконной телеметрической системы на основе комбинированной программно-определяемой нелинейной рефлектометрии.

Планируемые методы и подходы развития внутрискважинной волоконно-оптической телеметрии на основе комбинированной программно-определяемой нелинейной рефлектометрии базируются на единстве структур формируемых откликов оптического волокна на внешнее воздействие – температуру, давление, параметры потока жидкости (сырой нефти). При определенном уровне мощности лазерного излучения, возбуждающего оптическое волокно, формируются резонансные контуры рассеяния Мандельштама-Бриллюэна и Рамана. Подобным резонансным контуром могут быть описаны спектральные характеристики решетки Брэгга. Если первые несут распределенную информацию об измеряемых параметрах, то последняя – позволяет получать точечную или квази-

распределенную информацию. Дополнительную рефлектометрическую информацию несет РР, которое можно характеризовать во взаимосвязи с ВРМБ по отношению Ландау-Плячека.

Таким образом, представляется обоснованным использование одного источника излучения, формирующего отклик волокна на внешние воздействия, и синтез его специальной формы или спектра, оптимизированной для регистрации спектрально-разнесенных откликов от различных нелинейных эффектов и отражения от решеток Брэгга, привязанных к центральной длине волны формирующего излучения. Некоторые попарные эффекты такой реализации известны, комплексный вариант формирования и использования отклика от трех видов рассеяния и отражения от решетки Брэгга пока не изучен. Его реализация могла бы внести в процесс измерений информационную избыточность, использование которой привело бы к улучшению метрологических характеристик разрабатываемых систем.

Второй подход основан на полигармоническом зондировании полученных резонансных откликов. В последнее время значительного прогресса в плане точности и разрешающей способности измерений, а также практичности применения достигли технологии узкополосного полигармонического зондирования ВРБ, что делает их конкурентоспособными для классических методов преобразования информации по метрологическим характеристикам, простоте и стоимости реализации. Их основным достоинством является отсутствие необходимости проведения измерений в области резонанса спектральной характеристики, что показано в ряде работ [3, 6] и позволяет устранить влияние нестабильности мощности формирующего лазерного излучения. Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность темы и научно-технической задачи разработки методов и средств полигармонического анализа спектральных характеристик, предназначенных для отдельной регистрации физических полей различной природы (температуры, давления, параметров трехфазного потока) и построения на их основе оптоэлектронной системы внутрискважинной телеметрии, использующей комплексные эффекты нелинейной рефлектометрии при их программно-определяемой регистрации.

Третий подход касается структуры построения внутрискважинных расходомеров. За последние пять лет значительно возрос объем установок систем внутрискважинного мониторинга. При этом более 90 % составляют глубокие и сложные разветвленные скважины. Традиционно, постоянный мониторинг, в первую очередь, применяют для контроля давления и температуры в скважине. Благодаря разработке и созданию волоконно-оптических внутрискважинных расходомеров стало возможно измерение продуктивности скважины в ее ответвлениях. Сложная структура потока определяет требования к

построению расходомера, при этом следует учесть, что его основное назначение это определение потока внутри скважины, а не на поверхности. Для построения расходомеров используется комплект точечных датчиков температуры и акустического давления. Нами предложено использовать в указанных целях решетки Брэгга с фазовым сдвигом, которые характеризуется высокой разрешающей способностью и возможностью регистрации изменений без сдвига центральной длины волны, что показано в ряде работ [3, 7].

Заключение

Волоконно-оптические информационно-измерительные системы внутрискважинной телеметрии – развивающаяся область науки и техники в России, которая позволит создать конкуренцию мировыми производителями аналогичных систем для нефтегазовой отрасли и решить вопрос с импортозамещением, существенно уменьшать стоимость применяемых компонент, вытеснить традиционные СИИС на ЭД [2].

Впервые предложенные нами концепция, подходы и методы для ее реализации позволяют обоснованно ставить и решать задачу создания научно-технических основ проектирования программно-определяемых внутрискважинных оптоволоконных телеметрических систем на основе комбинированной нелинейной рефлектометрии с улучшенными метрологическими характеристиками, включая устранение мультипликативности измерений и погрешностей, вызванных нестабильностью формирующих излучений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой и проектной частей государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Фотоника», задание 3.1962.2014К).

Список литературы

1. Аль-Арнаут И.Х., Браун Д., Бёргос Р. и др. Волоконно-оптические исследования скважин через ГНКТ // Нефтегазовое обозрение. — 2009. — Т. 20. — № 4. — С. 32-41.
2. Ипатов А.И. Технологии 2020 года. Фантазия или реальность? // Инженерная практика. — 2013. — № 9. — С. 4-12.
3. Куприянов В.Г., Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р. и др. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 4. — С. 200-204.
4. Морозов, О.Г. Амплитудно-фазовое преобразование частоты в системах временной и частотной рефлектометрии волоконно-оптических информационных и измерительных сетей

// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2004. — Т. 7. — № 1. — С. 63-71.

5. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Просвирина В.П. и др. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2007. — Т. 10. — № 3. — С. 119-124.

6. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применение в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2010. — Т. 13. — № 3. — С. 84-91.

7. Морозов О.Г., Степушенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решёток Брэгга с фазовым сдвигом // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2010. — № 3. — С. 3-13.

8. Севастьянов А.А., Морозов О.Г., Талипов А.А. и др. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 4. — С. 232-236.

9. Теофилактов С.В. Системы погружной телеметрии для «жестких» условий эксплуатации // Инженерная практика. — 2013. — № 10. — С. 8-11.

Рецензенты:

Морозов О.Г., д.т.н., профессор, директор научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань;

Морозов Г.А., д.т.н., профессор, директор Казанского филиала ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Казань.