

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗВИТИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Куревин В.В.¹

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

В статье приведены требования к развитию интегрированных систем управления экологической безопасностью на основе применения волоконно-оптических технологий на системных технологическом и физическом уровнях. Для построения физического уровня подсистемы измерительного контроля, учитывая требования по хранению огне- и взрывоопасных ресурсов, и, в частности, требование о невозможности использования любых токовых датчиков на объектах мониторинга, данные обзоров по волоконно-оптическим датчикам, а также характеристики применимости и отработанность технологии их изготовления, выбраны волоконно-оптические датчики на базе волоконных решеток Брэгга. Проведен анализ сетевых структур для построения технологического уровня системы и определены их типы для решения задач мониторинга экологических параметров, параметров физических полей, определенных требованиями по хранению огне- и взрывоопасных ресурсов и охраны периметра для предотвращения внешних и внутренних угроз экологического, техногенного и террористического происхождения. Показаны пути поиска решений для реализации указанных технологий на методическом уровне.

Ключевые слова: интегрированная система управления экологической безопасностью; логический, технологический и физический уровни, волоконно-оптические технологии.

FIBER-OPTIC TECHNOLOGIES FOR INTEGRATED CONTROL SYSTEMS OF ECOLOGICAL SAFETY DEVELOPMENT

Kurevin V.V.¹

Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia (420111, Kazan, Karl Marx street, 10), e-mail: vkurevin@gmail.com

The paper presents the requirements for the development of integrated systems for environmental safety control through the use of fiber-optic technology for systems' technology and physical levels. To construct the physical layer of measurement control subsystem, taking into account the storage requirements of flammable and explosive resources and, in particular, the requirement not to use any current sensors at the monitoring site, the survey data over fiber-optic sensors, as well as the characteristics and applicability of the technology for their flue manufacturing, fiber-optic sensors based on fiber Bragg gratings were selected. The analysis of network structures for design the technological level of the system and their types are defined to meet the challenges of environmental parameters monitoring, the parameters of the physical fields, specific requirements for storage of flammable and explosive resources and protection of the perimeter to prevent internal and external threats to the ecological, technological and terrorist origin. The ways of solutions search for the implementation of these technologies on the methodological level are shown.

Keywords: integrated system for control of ecological safety; logical, technological and physical levels, fiber-optic technologies.

Для любого современного предприятия наличие эффективной системы управления экологической безопасностью (т.е. экологического менеджмента) является основой обеспечения стабильных характеристик функционирования, так как она позволяет уменьшить экологический, информационный и коммерческий риски загрязнения компонентов окружающей природной среды, связанные с принятием управленческих решений. Как показывает практика, предупреждение является экономически более

выгодным, чем ликвидация негативных экологических последствий, влекущая за собой штрафные санкции и административную ответственность.

Функционирование интегрированной системы управления экологической безопасностью (ИСУЭБ) хранения взрыво- и огнеопасных ресурсов (ХВОР) должно опираться на систему специализированных автоматизированных мест и оперирует информацией на трёх уровнях детализации:

- физический уровень, содержащий представление чувствительных объектов (датчиков) экологического мониторинга и их расположение в структуре ИСУЭБ;
- технологический уровень, отображающий средства передачи данных между датчиками (тип линии передачи, протоколы обмена информации и т.д.), а также непосредственно программное обеспечение обработки информации с них;
- логический уровень, отображающий список требований нормативно-правовых документов по мониторингу ХВОР и соответствие им происходящих процессов мониторинга.

Цель настоящей работы – определение требований к каждому уровню детализации, на основе которых могут быть найдены решения по совершенствованию характеристик ИСУЭБ.

Логический уровень фактически определяет для персонала ИСУЭБ перечень алгоритмов анализа и прогнозирования уровня экологической безопасности. К ним также относятся требования к условиям ХВОР. Они могут варьироваться в достаточно широком диапазоне, однако, наиболее интересными и важными являются требования, предъявляемые при работе с опасными объектами хранения, пример, которых показан в табл. 1 [1].

Таблица 1

Требования к условиям хранения огне- и взрывоопасных ресурсов

Параметр	Допустимое значение
Влажность, %	80
Давление, кПа	740
Максимальная перегрузка, g	1
Освещённость, люкс	500
Температура, °С	20

Логический уровень является «последним» с точки зрения персонала ИСУЭБ, но с точки зрения разработчика он является «первым», задавая технологические требования для остальных уровней.

Физический уровень включает в себя множество датчиков и устройств сбора информации об условиях хранения, режима охраны складов и внешних экологических параметров. В ИСУЭБ ХВОР важны как возможное влияние объекта на экологическую

обстановку региона, так и влияние внешних угроз (террористических, техногенных, природных и т.д.) на экологическую обстановку пункта хранения, который является составным элементом ХВОР. Вместе они образуют систему инструментального контроля (СИК) – специализированную подсистему ИСУЭБ. При ХВОР недопустимо применение в составе СИК токовых средств, включая датчики, способные вызвать воспламенение или взрыв в зоне хранения [6]. Таким образом, основной акцент при построении СИК ИСУЭБ должен быть сделан на волоконно-оптические датчики.

Волоконные сенсорные системы реагируют на различные внешние воздействия и могут осуществлять контроль за температурой объектов, давлением, деформацией и т.д. Для этого они должны быть тем или иным способом вмонтированы в объект. Большая прочность волоконного световода на основе кварцевого стекла (до 5–6 ГПа), высокая температура размягчения кварцевого стекла ($\sim 2000^{\circ}\text{C}$), возможность нанесения на волоконный световод различных покрытий, в том числе высокотемпературных (полимеры, углерод, различные металлы), позволяют решить указанную задачу.

Несколько физических механизмов способствуют созданию волоконных датчиков, в том числе и квази-распределённых. Простейшим из них является использование волоконной решётки Брэгга (ВРБ), представляющей собой отрезок волоконного световода с периодическим изменением показателя преломления его сердцевины. Датчики температуры, давления и деформации на основе ВРБ предназначены для многопозиционного контроля температуры, давления, деформаций и ориентированы на применение в измерительных комплексах объектов повышенной опасности, ХВОР, нефтегазовой промышленности, теплоэнергетики, технических сооружений и т.п.

Учитывая приведённые выше требования по ХВОР, вытекающие отсюда требования о невозможности использования в пунктах хранения любых токовых датчиков, данные обзоров, а также характеристики применимости и отработанность технологии изготовления, выберем для построения СИК ИСУЭБ волоконно-оптические датчики на базе ВРБ.

Основные достоинства и преимущества – возможность комплектования системы как одним, так и несколькими измерительными трактами (до 100 датчиков в тракте длиной в несколько километров), как одним типом датчиков, так и комбинированным составом датчиков с малыми и сверхмалыми габаритными характеристиками чувствительных элементов (миллиметры, миллиграммы), устойчивыми к электромагнитным и радиационным полям, вибрационным помехам с возможностью применения в пожаро- и взрывоопасных средах. При этом диапазон измерений / погрешность чувствительных элементов для измерения составляет: для температуры: от -50 до $+85^{\circ}\text{C}$ / $0,1^{\circ}\text{C}$; для давления: от 0,1 до 50 МПа / $0,1\%$; для деформаций: от 0 до 1000 $\mu\text{ε}$ / $0,1\%$.

Анализируя возможные проблемы использования ВРБ, необходимо отметить две основные: универсальность их отклика к воздействию различных физических полей, что затрудняет отдельную оценку, например, температуры и давления; необходимость использования очень сложной и дорогостоящей аппаратуры для сбора данных, представляющей собой собственно оптический анализатор спектра.

Решение первой проблемы не является чрезмерно сложным. Требуется лишь провести анализ существующих методов обработки информации и выбрать среди них для реализации в СИК ИСУЭБ такой метод, что позволил бы выделить именно интересующее нас физическое поле. Вторая проблема значительно более сложная, так как требует разработки специальных методов зондирования датчика, которые обеспечивали бы простые процедуры обработки информации и низкую стоимость аппаратуры при неснижаемом количестве точек и параметров инструментального контроля. Отметим, что принятие решений по поднятым вопросам во многом зависит и от технологического уровня ИСУЭБ.

Технологический уровень. При выборе и компоновке технических средств технологического уровня ИСУЭБ определяющей является проблема электромагнитных помех. Использование беспроводных технологий, обеспечивающее значительное сокращение финансовых вложений в инфраструктуру объектов экологического мониторинга, не снимает, а даже повышает риск возникновения мешающих воздействий на каналы передачи полученной информации измерительного преобразования. Не следует исключать и специфику объекта применения настоящих исследований – ХВОР специального назначения, которые могут быть подвержены воздействию специально поставленных электромагнитных помех. Использование открытых оптических технологий значительно снижает риск возникновения электромагнитных помех. Однако их построение затруднено в связи с применением на больших площадях различного высотного профиля с наличием естественных преград и застроек, а также необходимостью опроса множества локализованных в разных местах датчиков.

Использование волоконно-оптических технологий позволяет значительно снизить объём капиталовложений в структуру сети, поскольку при близкой стоимости коммуникаций несравненно выше возможный объём передаваемой информации и скорость её передачи. Одним из подходов, применяемых в таких системах для создания многоканальных сетей, является технология спектрального разделения. При плотном спектральном разделении может быть организовано до 200 каналов передачи информации по одному волокну, при неплотном – до 20.

Были проанализированы три варианта сетевых структур со спектральным разделением:

- с одинарным построением по топологии «звезда» – одна ВРБ на один канал со спектральным разделением через роутер или мультиплексор [10];
- с групповым построением ВРБ по топологии «дерево», отличающихся по коэффициенту отражения, ширине полосы пропускания или ее форме [2];
- с комбинированным построением по топологии открытого или замкнутого «кольца» [9].

Первый вариант сетевой структуры может найти преимущественное использование для анализа экологических параметров внешней среды с установкой датчиков и возможных электрооптических преобразователей на отдельном наблюдательном посту. Второй вариант пригоден для создания измерительных сетей мониторинга в складских помещениях. Сетевая структура в третьем варианте представляет собой универсальную структуру и может быть использована для решения, как указанных выше задач, так и для охраны периметра (предотвращения внешних экологических угроз террористического происхождения).

Однако следует обратить внимание на методы обработки информации, используемые в представленных работах. В работе [9] производится сравнение огибающей спектра измерительной ВРБ с огибающей спектра опорной решетки. В работе [2] используется классический метод оптического спектрального анализа, либо может быть использован многочастотный анализ с измерением общей интегрированной мощности излучения прошедшей или отраженной от ВРБ в зависимости от числа составляющих, попавших в её полосу пропускания. В работе [10] используется двухчастотное зондирование контура ВРБ и сравнительный амплитудный анализ спектральных составляющих, как в паре, так и между парами (исходной и полученной после прохождения ВРБ).

Во всех трёх случаях используется аппаратура оптического спектрального анализа, что, как указывалось ранее, значительно увеличивает стоимость системы. Это касается и системы [10], в которой дополнительный спектральный анализ необходим для определения направления частотного смещения, т.е. увеличения или уменьшения параметра приложенного физического поля. Данное замечание отправляет нас к задаче поиска эффективных методов контроля измеряемых параметров, не связанных с оптическим спектральным анализом.

Одним из возможных путей решения является использование двухчастотного метода определения центральной частоты избирательной цепи, представленной в работах [4] – для колебательного контура, [5] – для контура линии поглощения атмосферных газов, [3] – для измерения толщины диэлектрического покрытия, [8] – для мониторинга решёток Брэгга.

Другим существенным недостатком известных в литературе решений является наличие в структуре сети роутеров или мультиплексоров, имеющих собственную зависимость спектральных характеристик от температуры. В типовой сетевой структуре, использующей

спектральный анализ, зондирующий передатчик и приёмник находятся в одном помещении при одних температурных условиях, откалиброванные относительно них датчики в другом помещении. Роутеры или мультиплексоры, в ряде случаев содержащие электрические цепи управления, по требованиям ХВОР должны находиться с одной стороны вне объектов контроля (внос электрических цепей, в которые, как уже говорилось ранее, запрещён), с другой стороны – близко к ним для минимизации количества отдельных групповых оптических волокон. Оптимальным решением является установка выносных закрытых пунктов распределения волокон, находящихся вне помещений рядом с объектами контроля.

Очевидно, что температурный режим в помещении эколога и на пункте хранения будет различен, следовательно, будут различны и центральные частоты полосы пропускания канала роутера и заранее откалиброванной под этот канал ВРБ, что может привести к погрешностям измерений и повышению уровня ложных тревог.

Таким образом, к задаче определения физических полей на объекте контроля добавляется задача мониторинга температурного смещения (дрейфа) в роутере. При этом измерения собственно температуры роутера не требуется. Решение данной проблемы позволит значительно увеличить число оптических каналов на одно волокно, используемых в системе.

Анализируя возможные проблемы использования однотипных датчиков, объединённых в группу, следует отметить третью задачу, требующую решения – задачу регистрации информации от каждого датчика отдельно. В работе [10] данная проблема не стоит, поскольку на один датчик отведен один канал. В работе [2] используются ВРБ, расположенные в определённом порядке и имеющие различные параметры по ширине полосы пропускания или по форме контура, или по коэффициенту отражения. В [9] используется временное уплотнение каналов датчиков с построением опорных каналов. В статье [7] нами предложено частотное уплотнение одинаковых датчиков, объединённых в группу. Такое разнообразие методов требует дополнительного анализа с точки зрения упрощения системы при переходе на новые методы измерения и разработки новых алгоритмов обработки информации.

Заключение. По результатам анализа современных технологий экологического контроля, методов и средств технической реализации ИСУЭБ определены требования и разработаны варианты построения его логического, физического и технологического уровней. Выбрана структура построения СИК с использованием внешнего программного модуля сбора данных.

Для построения физического уровня СИК ИСУЭБ, учитывая требования по ХВОР и, в частности, требование о невозможности использования любых токовых датчиков на

объектах мониторинга, данные обзоров по волоконно-оптическим датчикам, а также характеристики применимости и отработанность технологии их изготовления, выбраны волоконно-оптические датчики на базе ВРБ.

Проведен анализ сетевых структур для построения технологического уровня ИСУЭБ и определены их типы для решения задач мониторинга экологических параметров, параметров физических полей, определённых требованиями ХВОР, и охраны периметра (для предотвращения внешних и внутренних угроз экологического, техногенного и террористического происхождения).

В ходе дальнейших исследований требуется решение следующих задач:

- разработки эффективных методов и средств измерения параметров физических полей, исключающих использование дорогостоящих средств оптического спектрального анализа;
- разработки эффективных методов и средств контроля температурных дрейфов избирательных оптических устройств, входящих в состав системы;
- разработки методических рекомендаций по выбору решений для регистрации полей различной физической природы с помощью однотипных датчиков, объединённых в группу.

Поиск эффективных путей построения СИК ИСУЭБ следует искать на основе метода двухчастотного зондирования ВРБ для измерения физических полей; использования комбинированной сетевой структуры с применением спектрального разделения каналов измерительного преобразования в одном волокне и частотного или временного уплотнения каналов для однотипных датчиков, объединённых в группу, при мониторинге температурного дрейфа с помощью указанного выше двухчастотного метода; программного обеспечения модульной структуры для обработки информации с каждой из ветвей и групп указанной сетевой структуры.

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. Ажгиревич А.И., Бадтиев Ю.С., Бурлака Н.М. и др. Военная экология [под ред. А.И. Юнака и А.В. Тертышникова]. М.: МО РФ, 2005. — 220 с.
2. Бабин С.А. Опволоконная мультисенсорная система, датчик температуры /деформации для опволоконной мультисенсорной системы, способ записи датчика (варианты) // Патент РФ № 2319988. 2005. Бюл. № 8. — 8 с.

3. Богданов Н.Г., Плотников С.Н., Щекотихин С.Н. Контроль толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2007. — № 12. — С. 30-33.
4. Ильин Г.И., Царева М.А. Настройка колебательного контура // Электронное приборостроение. — 2002. — № 4. — С.65-66.
5. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. ЛЧМ-лидар с преобразованием частоты // Оптика атмосферы и океана. — 1995. — Т. 8. — № 12. — С. 1871-1874.
6. Куприянов В.Г., Морозов О.Г., Степущенко О.А. и др. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т. 13. — № 4(4). — С. 1087-1091.
7. Куревин В.В., Морозов О.Г., Просвирин В.П. и др. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга // Инфокоммуникационные технологии. — 2009. — Т. 7. — № 3. — С. 46-52.
8. Aybatov D.L., Morozov O.G. Two-frequency scanning of FBG with arbitrary reflection spectrum // Proceedings of SPIE. — 2007. — V. 6605. — P. 660506.
9. Udd E., Clark T.E. Fiber optic grating sensor systems for sensing environmental effects // Patent US № 5380995. 1995. — 34 p.
10. Weaver T. Thermal drift compensation system and method for optical network // Patent WO № 020838. 2008. — 40 p.

Рецензенты:

Морозов О.Г., д.т.н., профессор, директор НИИ 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 ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Казань.