

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ СЕТЕВОГО МОНИТОРИНГА БОРТОВЫХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сарварова Л.М., Колесников В.Ю., Куликов В.А., Сахабудтинов А.Ж., Нуреев И.И.

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

Рассматриваются характеристики и перспективы развития волоконно-оптических информационно-измерительных систем, объединенных в единую бортовую сеть мониторинга качества функционирования генерирующих, распределяющих (трансформирующих) и накопительных устройств электроснабжения. Формулируются общая и частные постановки задач для построения волоконно-оптических сетей мониторинга электрических машин, трансформаторов, аккумуляторных батарей. Впервые представлена модернизация концепции единого поля комплексированных волоконно-оптических датчиков в приложении бортовых систем мониторинга, построенных на основе полигармонической рефлектометрии распределенных, квази-распределенных или точечных датчиков. Обсуждаются подходы для реализации разработанной концепции, в том числе с учетом необходимости обработки комплексной информации, полученной на основе нелинейных эффектов бриллюэновской, брэгговской и френелевской природы. Базовый принцип получения информации с волоконно-оптических датчиков единого поля основан на двухчастотном зондировании контуров усиления Мандельштама-Бриллюэна, волоконно-оптических решеток Брэгга с фазовым сдвигом π , тонкопленочных квази-френелевских систем.

Ключевые слова: бортовые сети мониторинга систем и устройств электроснабжения, волоконно-оптические распределенные, квази-распределенные и точечные датчики, рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, волоконные брэгговскиерешетки с фазовым π -сдвигом, квази-френелевское отражение, многослойные диэлектрические зеркала, полигармоническая рефлектометрия

COMPREHENSIVE APPROACH TO PROBLEMS SOLVING FOR NETWORK MONITORING OF ONBOARD SYSTEMS AND DEVICES FOR THE ELECTRICAL SUPPLY OF VEHICLES BASED ON FIBER OPTIC TECHNOLOGIES

Sarvarova L.M., Kolesnikov V.Y., Kulikov V.A., Sahabudtinov A.Z., Nureev I.I.

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

The characteristics and prospects of development of fiber-optic data-measuring systems, combined in a single board network quality monitoring operation of generating, distributing (transforming) and electricity storage devices, are considered. The general and private problems to build fiber-optic network for monitoring of electrical machines, transformers, batteries formulated. First introduced is the modernized concept of the unified field of complexed fiber optic sensors in the applications of onboard monitoring systems that bases on polyharmonic reflectometry of distributed, quasi-distributed or point sensors. Approaches for implementing the developed concept, including taking into account the need to process complex information obtained based on non-linear effects of Brillouin, Bragg and Fresnel nature. The basic principle of information getting from fiber optic sensors of unified field is based on dual-frequency probing of Mandelstam-Brillouin gain contour, contours of optical fiber Bragg grating with a phase -shift and quasi-Fresnel contour systems on thin film mirrors.

Keywords: onboard monitoring network of power supply systems and equipment, fiber optic distributed, quasi-distributed and point sensors, Mandelstam-Brillouin scattering, fiber Bragg gratings with a phase π -shift, quasi-Fresnel reflection, multilayer dielectric mirrors, polyharmonic reflectometry

Развитие техники автономных и скоростных транспортных средств (АТС) неразрывно связано с повышением уровня безопасности их эксплуатации, который определяется как надежностью конструкции и функционирования АТС, так и эффективностью применения бортовых систем контроля состояния их отдельных агрегатов и узлов. Последнее определяет

необходимость поиска новых методов улучшения метрологических и информативных характеристик информационно-измерительных систем мониторинга АСТС.

В настоящее время в системах указанного класса находят широкое применение волоконно-оптические датчики (ВОД), что определяется их уникальными свойствами: высоким быстродействием, устойчивостью к воздействию электромагнитных помех, диэлектрическим характером соединений в системах, пожаробезопасностью, малыми массой и габаритами, работоспособностью при повышенных перегрузках, радиации, в широком диапазоне температур, вакууме и, наконец, возможностью объединения в бортовую волоконно-оптическую систему съема, передачи и обработки информации, управления и синхронизации процессов.

В [4, 10] была введена концепция единого поля комплексированных ВОД для бортовых систем контроля параметров безопасности АСТС, были обсуждены принципы комплексирования, методы съема информации с комплексированных ВОД и варианты их конфигурации. В настоящей работе рассматривается модернизация указанной концепции в приложении бортовых сетей мониторинга систем и устройств электропитания, включающих в свой состав генерирующее, трансформирующее и накопительное оборудование в виде электрических машин, трансформаторов и аккумуляторных батарей.

Постановка общей и частных задач исследования

Общими тенденциями развития бортовых сетей мониторинга характеристик устройств и систем электропитания АСТС, а также их структурной целостности являются:

- необходимость контроля значительного количества сенсоров, что определяется требованиями оперативности контроля и управления, повышением плотности средств измерения и диагностирования;
- пространственное распределение средств контроля по объему АСТС;
- возрастание информационных потоков между блоками систем энергоснабжения в каналах управления и обработки информации, работающих в реальном масштабе времени;
- повышение требований к сроку службы и надежности систем и устройств электроснабжения с учетом их возрастающей сложности.

Остановимся на перспективах развития для этих целей ВОД различного типа: распределенных, квази-распределенных, точечных. Нами должна быть решена задача комплексирования ВОД и создания их единого поля для улучшения качества контроля параметров устройств и систем электропитания АСТС (средних температур, скоростей нарастания температур, силы тока, напряжения, качества электрохимических процессов и т.д.). Под единым полем ВОС будет пониматься множество сенсоров, расположенных в контрольных зонах устройств и систем электропитания АСТС или технологически

встроенных в их узлы и агрегаты, позволяющих получать с одного датчика информацию об одном или нескольких физических процессах и соединенных в общую бортовую волоконно-оптическую сеть передачи и обработки информации, управления и синхронизации.

В целях универсального применения и простоты реализации датчики поля должны обладать позиционной чувствительностью, то есть возможностью получения информации с пространственным разрешением. Наибольший интерес с данной точки зрения представляют собой протяженные распределенные датчики, реализуемые на базе вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), квази-распределенные датчики на основе волоконно-оптических решеток Брэгга (ВРБ), которые сочетают в себе свойства волокна как многоточечного датчика и одновременно как линии передачи информации. Дополнительным преимуществом является необходимость доступа лишь к одному концу ВОС. Проблема разделения информации от различных физических полей решается с момента создания сенсорных систем на базе ВРМБ и ВРБ и на сегодняшний день спектр найденных решений представляет собой значительное множество отличающихся по методологии и технике исполнения вариантов. Для решения ряда задач должна иметь место возможность мультиплексирования в бортовую сеть точечных датчиков, на основе рефрактометрических эффектов в специальных ВРБ или на основе квази-френелевских эффектов на конце волокна, в зоне которого сформировано многослойное зеркало с избирательной волновой (частотной) характеристикой.

Основной задачей инструментального контроля электрических машин (ЭМ) является обнаружение и регистрация источников сверхнормативных нагрузок, которые могут привести к нарушению их работы и уменьшению эксплуатационного ресурса. В связи с этим физический уровень бортовых сетей мониторинга (БСМ) должен содержать датчики параметров состояния ЭМ и их элементов, например, обмоток (температура, влажность, давление и т.д.), сигнализации (возгорание, запыленность и т.п.) и т.д. Частная задача исследования для указанного типа систем электроснабжения заключается в попытке решения задач структурной минимизации БСМ на основе разработки эффективных методов и средств измерения параметров различных физических полей, исключающих использование дорогостоящих средств оптического спектрального анализа.

Близка к указанной выше частная задача исследования для БСМ характеристик силовых трансформаторов и автотрансформаторов, а также их структурной целостности. Она заключается в разработке для этих целей перспективных ВОД термоизмерений, свободных от влияния на них внешнего изменения давления.

Для оценки состояния и прогнозирования ресурса аккумуляторных батареи (АБ) снабжают системами диагностирования, которые должны обеспечить в каждом

аккумуляторе контроль напряжения, температуры и плотности электролита и на основании этих данных оценить остаточную емкость батареи. Наиболее достоверные данные о состоянии АБ получают при наличии информации о плотности электролита в каждом аккумуляторе. Тем не менее, известные на данный момент способы и устройства не позволяют создать достаточно компактные и технологичные конструкции, позволяющие обеспечить контроль плотности электролита в АБ в течение срока их эксплуатации. Частная задача исследований в данной области – повышение точности и достоверности измерения, плотности электролита при изменении температуры окружающей среды от -60 до $+60$ °С, а также разработка способа, позволяющего автоматизировать процесс измерения и максимально упростить конструкцию устройства в составе системы диагностирования АБ для обеспечения непрерывного контроля плотности электролита в аккумуляторах в течение срока их эксплуатации на основе ВОД.

Полигармоническая рефлектометрия как базис для решения поставленных задач

Один из возможных путей решения поставленных задач основан на зондировании контуров ВРМБ или ВРБ полигармоническим излучением, средняя частота которого при калибровке настроена на центральную частоту огибающей спектра ВРМБ или ВРБ, и определении ее расстройки и/или разности амплитуд между спектральными составляющими как информативных факторов для определения параметра приложенного физического поля.

Для простоты пояснения в сетях мониторинга (контроля) заданных значений будем использовать для зондирования не перестраиваемое двухчастотное излучение, полученное по способу Ильина-Морозова в модуляторе Маха-Цендера [2] и рефлектометрическую обработку принятой, после прохождения датчиков, информации (отраженного излучения) [3, 6-9]. Будем считать, что амплитуды составляющих зондирующего двухчастотного излучения, равны, $A_1 = A_2 = 1$, и имеют противоположные начальные фазы. Частоты составляющих симметричны относительно средней расстройки ВРМБ или ВРБ $\delta = \delta_0$ и равны $\delta_{01} = \delta_0 + \Delta\delta/2$ и $\delta_{02} = \delta_0 - \Delta\delta/2$, где $\Delta\delta$ – расстройка между частотами составляющих, которая для оптимальных по чувствительности измерений должна соответствовать спектральной ширине ВРБ на полувысоте. Тогда отраженные от ВРБ или прошедшие контур ВРМБ составляющие имеют одинаковые начальные фазы и равные амплитуды $R_1 = R_2$. Резонансная длина волны ВРБ или ВРМБ $\lambda_{ВРБ}$ зависит от температуры волокна и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений. Известные соотношения дают типичные значения смещения $\lambda_{ВРБ}$ в зависимости от температуры $\sim 0,01$ нм/К и от относительного удлинения волокна $\sim 10^3 (\Delta L/L)$ (нм). При смещении контура ВРБ или ВРМБ, вызванного приложением физических полей,

появляется неравенство $R_1 \neq R_2$ и восстановление противофазности составляющих двухчастотного излучения. Вид неравенства и знак фазы определяется направлением сдвига контура ВРБ или ВРМБ, т.е. увеличением или уменьшением параметра приложенного поля.

В ходе эксплуатации при нагреве трансформатора или его обмоток энергия тепловых полей передается ВОД, изменяя его информативные параметры, которые регистрируются с помощью фотоприемного устройства. Для использования указанных структур на стадии проектирования нами использовались ВРБ, которые встраивались в термопоглощающее покрытие, в том числе, диэлектрического характера. Существенны преимущества ВОД измерения температуры при мониторинге параметров, в которых невозможно использование электрических напряжений, например, рабочих пожароопасных жидкостей и т.д. В этом случае очень актуальны ВРБ, заранее встроенные в емкости или контролируемые среды. При этом следует использовать волокна с малой крутизной зависимости положения центра решетки от температуры и двухчастотные методы зондирования их спектральных характеристик[1]. При этом контроль может осуществляться как с помощью переносных устройств считывания, так и с помощью создания полностью волоконно-оптической распределенной системы мониторинга. Найденные решения – квази-распределенные, но могут быть реализованы и распределенные ВОД с помощью отличных от ВРБ датчиков, а именно разработанных нами ВОД на базе двух скрученных волокон с замкнутыми концами, которые конфигурируются либо в трехмерную структуру, либо в тканую двумерную структуру и помещаются в обмотки или на контролируемые поверхности трансформатора. Также могут быть использованы распределенные структуры на основе волокон, в которых возбуждено ВРМБ.

Разработан широкий спектр ВОД рефрактометрического типа для одновременного измерения коэффициента преломления (КП) и температуры, отличных по применяемым типам сенсоров, модовому взаимодействию, конструкции и используемых в БСМ аккумуляторных батарей. Следует выделить рефрактометры на волоконных решетках Брэгга (ВРБ) и длиннопериодных решетках (ДПР), основанных соответственно на взаимодействии мод сердцевины и мод сердцевины и оболочки. Как правило, это датчики, построенные на основе последовательно соединенных ВРБ, ДПР, их секций и комбинаций с различными по параметрической чувствительности покрытиями. Все приведенные конструкции представляют собой сенсоры рефрактометрического типа последовательной структуры, основанные на одном принципе, измерении сдвига двух длин волн или их разности, при этом каждая из этих волн более чувствительна к одному из параметров, чем к другому. Такой принцип измерений требует высокобюджетной измерительной аппаратуры, включающей

широкополосный стабильный источник излучения, анализатор спектра, программное обеспечение для обработки и повышения разрешающей способности измерений.

С учетом рассмотренных положений нами предложена параллельная структура ВОС-рефрактометра, основанная на использовании двух ВРБ с π -сдвигом и основанная на двухчастотном методе зондирования как ее центрального лоренцевского контура пропускания, так и внешнего гауссова контура отражения. Одна решетка вытравлена и служит для измерения КП и температуры, вторая не вытравлена и служит только для измерения температуры. Обработка сигнала ведется на огибающих соответствующих промежуточных частотах для каждой ВРБ. При этом формируется двухконтурная система измерений с «грубым» гауссовским и «точным» лоренцевским контурами [5]. Полученный отклик сенсора по аппроксимированной характеристике составил $\Delta\lambda/\Delta n = 0,6$ нм, что позволяет при нестабильности длины волны высокостабильного источника зондирующего излучения в сотни кГц (8×10^{-3} пм) говорить о детектировании изменений коэффициента преломления на уровне $1,3 \times 10^{-5}$.

Заключение

Волоконно-оптические бортовые сети мониторинга и информационно-измерительные системы контроля объектов электроснабжения АСТС – развивающаяся область науки и техники в России, которая позволит создать конкуренцию мировыми производителями аналогичных систем и решить вопрос с импортозамещением, существенно уменьшать стоимость применяемых компонент, вытеснить традиционные дискретные средства контроля, не связанные в единую сеть по понятным и объективным причинам.

Впервые предложенные нами модернизации концепции единого поля комплексированных ВОД в приложениях указанных сетей, подходы и методы для ее реализации позволяют обоснованно ставить и решать задачу создания научно-технических основ проектирования бортовых сетей мониторинга на основе полигармонической рефлектометрии с улучшенными метрологическими характеристиками, включая устранение мультипликативности измерений.

Испытания опытных узлов сети были проведены на основе ВРБ, изготовленных и откалиброванных на станции записи ВРБ и в метрологической лаборатории НОЦ «Волоконно-оптические технологии» НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ, а также формирователе ВРМБ в одномодовом оптическом волокне, предоставленном кафедрой ЛСиИТС ПГУТИ.

В единую сеть были объединены датчики температуры обмоток генератора, датчики износа электрических щеток, масла трансформатора и коэффициента преломления электролита аккумуляторной батареи. В качестве интеррогатора использовался прибор полевого типа «FiberSense». При использовании методов двухчастотной рефлектометрии

были применены драйвер лазерного диода SuperlumPilot-4, лазерный диод LDI-DFB 1550-20/50-T2-SM3-FA-CWP, модулятор Маха-Цендера (ПНППК, Пермь), генератор TektronixAFG 3251, генератор высокочастотный Г4-114, фотодетекторAPD, осциллограф AgilentDSO 7104B.

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

Список литературы

1. Касимова Д.И., Кузнецов А.А., Крыницкий П.П. и др. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2013. — № 2 (18). — С. 73-81.
2. 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. — Том 7. — № 1. — С. 63-71.
3. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Просвирин В.П. и др. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2007. — Том 10. — № 3. — С. 119-124.
4. Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Единое поле комплексированных ВОД в системах контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. — 1997. — № 4. — С. 27-31.
5. Морозов О.Г., Степущенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решёток Брэгга с фазовым сдвигом // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2010. — № 3. — С. 3-13.
6. 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.
7. Morozov O.G., Aybatov D.L., Talipov A.A. et al. Metrological aspects of symmetric double

frequency and multi frequency reflectometry for fiber bragg structures// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. — 2008. — Vol. 7026. — P. 70260J.

8. Morozov O.G., Aybatov D.L., Prosvirin V.P. et al. Methodology of symmetric double frequency reflectometry for selective fiber optic structures// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. —2008. —Vol. 7026. —P. 70260I.

9. Natanson O.G., Morozov O.G., Akhtiamov R.A., Gusev V.F. Development problems of frequency reflectometry for monitoring systems of optical fiber structures // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. — 2005. — Vol. 5854. — P. 215-223.

10. Polski Y.E., Morozov O.G. Joint field of integrated fiber optic sensors for aircraft and spacecraft safety parameters monitoring // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. — 1998. — Vol. 3397.— P. 217-224.

Рецензенты:

Анфиногентов В.И., д.т.н., профессор, профессор Казанского филиала ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Казань;
Морозов Г.А., д.т.н., профессор, директор Казанского филиала ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Казань.