Оптоволоконные измерительные каналы для автоматизированных систем контроля и управления

Рассмотрены новые технические решения по построению измерительных каналов на основе современных волоконно-оптических технологий. Обоснован облик и приведены структурная и функциональная схемы проектируемой СМАС «Ариадна». Даны научно-технические описания новой отечественной элементно-компонентной базы (ЭКБ) нижнего и верхнего уровней СМАС «Ариадна» в составе: радиационно- и термостойких оптоволоконных датчиков, волоконно-оптических кабельных линий, волоконно-оптических гермопроходок, малоразмерных многоволоконных оптических разъемов и программно-технических средств (ПТС) сбора, обработки и отображения информации, упреждающей диагностики и управления запроектными авариями (ЗПА) на объектах атомной энергетики.

ООО «Московский завод «ФИЗПРИБОР», г. Москва

Введение

Согласно заключению МАГАТЭ о запроектной аварии (ЗПА) на АЭС «Фукусима» в 2011 году, контрольно-измерительное оборудование, предусмотренное для мониторинга аварий на АЭС, оказалось неэффективным в силу ряда причин, к которым относятся: потери электропитания, испарение жидкости в импульсных линиях, выход из строя датчиков из-за экстремальных условий окружающей среды, несоответствие измерительных диапазонов для мониторинга условий ЗПА на атомной станции и отсутствие альтернативных источников информации, необходимых для подтверждения достоверности показаний приборов. Опыт работы по управлению ЗПА на АЭС «Фукусима» продемонстрировал необходимость создания приборов, предназначенных для контроля технологических параметров в широком диапазоне, включая режимы тяжелых (запроектных) аварий, и достаточно надежных для выживания в условиях окружающей среды, которые могут быть созданы в результате тяжелых аварий. Условия, создаваемые тяжелыми авариями, могут привести к непредвиденным повреждениям или ухудшениям даже в самых защищенных приборах (датчиках, линиях связи, разъемах электронных устройств для обработки сигналов или преобразователях). Опыт АЭС «Фукусима» показал, что на атомной станции должны быть приборы, которые будут работать в течение длительного времени без возможности замены. Поэтому необходимо обеспечить соответствие технических характеристик приборов экстремальным условиям, возникающим при тяжелых авариях [1].

Согласно стандарту IEC/IEEE, альтернативный состав измерительных каналов АЭС должен быть определен для условий, когда существующие штатные измерительные каналы отсутствуют, недоступны или ненадежны. Кроме того, измерительное оборудование, предусмотренное для условий ЗПА, должно быть частью сети датчиков, и выход из строя одного прибора не должен приводить к недопустимой потере данных [2].

По оценкам международных и отечественных экспертов по ядерному приборостроению, «в ближайшие 10–15 лет основными применяемыми датчиками на атомных станциях будут интеллектуальные волоконно-оптические датчики» [1], [2], [4].

Наиболее подходящими для реализации режимов управления ЗПА, в соответствии с последними отечественными и международными требованиями и нормами, являются измерительные каналы на основе современной ЭКБ с термо- и радиационно-стойкими волоконно-оптическими датчиками и технологиями, способными обеспечить надежность, живучесть и безопасность измерительных систем для объектов атомной энергетики [3], [4], [5].

Принципы построения системы СМАС

В основе концепции проектируемой системы мониторинга аварийных ситуаций (СМАС) «Ариадна» лежат следующие принципы:

- наличие энергонезависимого или разнесенного электропитания первичных преобразователей системы;
- реализация соответствия характеристик ПТС СМАС характеристикам экстремальных условий эксплуатации при ЗПА на АЭС;
- использование отечественных комплектующих элементов.

Технико-технологически построение систем мониторинга состояния оборудования в режиме ЗПА (например, системы аварийных контрольно-измерительных приборов (АКИП) на атомных станциях) бессмысленно на базе штатных измерительных каналов, поскольку штатные системы уже имеют двойное и тройное аппаратное резервирование измерительных каналов. Добавление АКИП к аналогичной штатной системе нецелесообразно и экономически неоправданно: АКИП, как и штатная система, в условиях ЗПА однозначно выйдет из строя. Проектирование СМАС должно основываться на новом принципе построения систем, традиционный подход – это «деньги на ветер».

Важнейшей задачей СМАС является послеаварийный мониторинг при возникновении ЗПА с возможной длительной полной потерей электропитания на АЭС.

При реализации СМАС на АЭС необходимо внедрять термостойкие и радиационно-стойкие волоконно-оптические датчики, которые способны расширить диапазон и точность измерения и диагностирования. Например, применение на атомных станциях с реакторами типа ВВЭР системы мониторинга аварийных ситуаций «Ариадна», использующей измерительные волоконно-оптические датчики, обеспечит контроль следующих основных технологических параметров:

- температуры теплоносителя на выходе из тепловыделяющих сборок, под крышкой реактора и в петлях главного циркуляционного контура (0–1400 °С);
- температуры в гермообъеме (0–260 °С);
- температуры у поверхности днища корпуса реактора (0–400 °С);
- температуры нижней части строительной шахты реактора (0–400 °С);
- давления над активной зоной (0–25 МПа);
- давления в парогенераторах (0–10 МПа);
- давления в гермообъеме (0–650 кПа);
- уровня теплоносителя в реакторе (0–4000 мм);
- уровня котловой воды в парогенераторах (0–4000 мм);
- уровня и температуры в бассейне выдержки (0–12500 мм);
- уровня в приямках системы аварийного охлаждения зоны (0–10000 мм);
- концентрации водорода H_2 в гермообъеме (0–5 %);
- радиационной обстановки в центральном зале (над реактором) – до 2×10^4 Гр/ч;
- активности пара (наведенной нейтронами) в паровом коллекторе парогенераторов (1–106 Бк/м³);
- протечек радиоактивной воды из контура в помещения – по влажности (30–100 %);
- напряженно-деформированного состояния элементов и оболочек реакторов (0–5000 млн$^{-1}$);
- целостности конструкций элементов и оболочек реакторов по акустической эмиссии (30–300 кГц).

Применение волоконно-оптических датчиков (ВОД) в области использования атомной энергии ничем не регулируется в отличие от следующих применяемых военными стандартов:

- ГОСТ РВ 6040-001-2007 «Преобразователи измерительные волоконно-оптических датчиков. Общие технические условия»;
- ГОСТ РВ 50899-96 «Сети сбора данных волоконно-оптические на основе ВОД «Общие технические требования»;
- ГОСТ РВ 51949-2002 «Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Общие технические условия».

Достоверность измерения физических величин не всегда обеспечена процедурой их периодической калибровки (поверки), особенно датчиков, встроенных в оболочки и работающих в активной зоне ядерного реактора. В СМАС «Ариадна» эта проблема решается с помощью применения волоконно-оптических датчиков и измерительных каналов, обладающих функцией метрологического самоконтроля (интеллектуальностью) [3]. Измерительные каналы, объединенные в интеллектуальные измерительные системы (ИИС), имеют возможность проводить периодическую самокалибровку в процессе эксплуатации без останова технологического процесса, без извлечения (отсоединения) измерительных преобразователей волоконно-оптических датчиков от контролируемых точек и агрегатов атомной станции [3], [4].

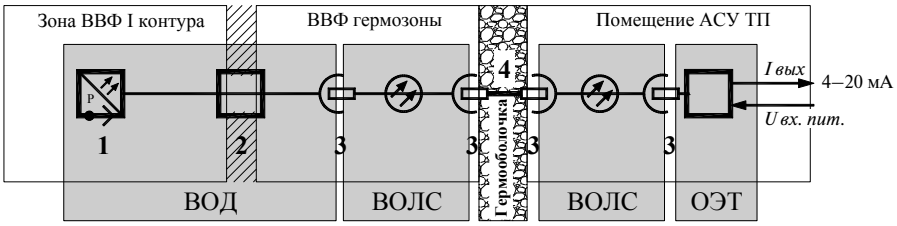
Используемое на основе волоконно-оптических технологий схемотехническое построение, элементная база и конструктивные решения обеспечивают возможность создания большого модельного ряда измерительных каналов, применение которых в измерительных и диагностических системах даст возможность качественно повысить надежность и эффективность использования результатов измерения и диагностики.

Кроме того, важным достоинством широкого применения проектируемой СМАС «Ариадна» является снижение металлоемкости объекта за счет исключения импульсных трубок измерительных каналов давления примерно в 50 раз (без учета вспомогательных узлов и оборудования). Наличие импульсных трубок приводит к возникновению резонансных режимов в гидродинамической части измерительных каналов DP и P и, как следствие, к потере достоверной информации в силу «закипания» воды в них во время как проектных аварий, так и ЗПА [6].

Технические и программные средства СМАС «Ариадна». Концепция построения измерительного канала

Ниже рассмотрена концепция построения измерительного канала на основе волоконно-оптического принципа измерения давления (КВОД). Данный волоконно-оптический измерительный канал представляет собой пространственно распределенную структуру, включающую следующие элементы:

- чувствительный элемент;
- измерительная линия гидродинамической связи датчика давления с точкой измерения (импульсная линия), длиной не более одного метра;
- собственно волоконно-оптический датчик давления (ВОДД);
- волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) между чувствитель-



1 – чувствительный элемент; 2 – присоединительный узел ВОД к месту установки; 3 – оптический коннектор; 4 – гермопроходка

Рис. 1. Функциональная схема КВОД и зоны ВВФ

ным элементом и оптоэлектронным трансивером (ОЭТ);

- ОЭТ электронный блок формирования сигнала по ГСП и программируемой коррекции сигнала;
- преобразователь и распределитель сигнала в соответствии с задачами контролируемого процесса;
- оптические соединители (разъемы), посредством которых осуществляется соединение оптических элементов измерительного канала.

На рис. 1 приведена функциональная схема КВОД и зоны воздействия внешних факторов на составные части измерительного канала.

Таблица 1. Условия эксплуатации участков измерительного канала

Участки измерительного канала	Условия эксплуатации	Предельные значения ВВФ
I	Первый РУ	Параметры первого контура в месте расположения элементов конструкции
II	Второй контур РУ	Параметры второго контура в месте расположения элементов конструкции
III	Помещения внутри герметичной оболочки	Таблица А.2 СТО 1.1.1.07.001.0675-2008
IV	Помещение АСУ ТП	Таблица А.3 СТО 1.1.1.07.001.0675-2008

Таблица 2. Группы условий эксплуатации участков измерительного канала

Название зоны	Наименование групп	Участки измерительного канала	Группа условий эксплуатации
	Первый или второй контур РУ	I или II	0 или 1
Контролируемый доступ	Помещения внутри герметичной оболочки	III	1.1
	Помещения технологические необслуживаемые	IV	1.2
	Помещения технологические, периодически обслуживаемые		1.3
	Помещения технических средств автоматизации, постоянного пребывания персонала		1.4
Свободный доступ	Помещения технологические, периодически обслуживаемые		2.1
	Помещения технических средств автоматизации, постоянного пребывания персонала		2.2
	Помещения пунктов и щитов управления, постоянного пребывания персонала		2.3

Примечания: 1. Для датчиков, контактирующих с измеряемой средой первого или второго контура РУ, в СТО 1.1.1.07.001.0675-2008 группа условий эксплуатации не определена [6].
2. Датчики групп условий эксплуатации 0, 1, 1.1, 1.2 и 1.3 должны быть устойчивы к воздействию радиационной активности измеряемой среды в пределах, которые должны устанавливаться в проекте АЭС.

Согласно этой схеме конструкцию измерительного канала можно условно разделить на участки, отличающиеся друг от друга различными воздействиями внешних факторов:

- I или II – чувствительный элемент и погружная часть датчика;
- III – не погружаемая часть датчика, ВОЛС от датчика до гермопроходки;
- IV – ВОЛС от гермопроходки до измерительной аппаратуры.

Конструкция участков измерительного канала должна соответствовать условиям эксплуатации (табл. 1).

Участки измерительного канала по условиям эксплуатации принадлежат к различным группам (табл. 2). Конструкция элементов измерительного канала спроектирована согласно условиям эксплуатации его участков.

Создан базовый модуль герметизации оптического волокна, который может быть использован как самостоятельный корпус, а также встроен в любой другой переходной корпус для применения в типовых установочных местах в соответствии с ГОСТ, DIN и другими стандартами.

Разработан и опробован узел герметизации базового модуля с самоизвлекаемым уплотнением на основе графита, белого графита (нитрида бора) и вариантов их смесей. Узел герметизации обеспечивает работоспособность при температуре до 1000 °С и давлении до 600 МПа.

На данный момент проводится разработка модуля групповой герметизации оптических волокон и разработка волоконно-оптической гермопроходки через контаймент. В качестве линий связи планируется применение волоконно-оптического кабеля в нержавеющей оплетке.

Особенности создания СМАС

Главной особенностью создания системы является возможность использования принципа мультиплексирования. На рис. 2 приведен пример распределенного измерения температуры в главном циркуляционном трубопроводе (ГЦТ).

По периферии трубопровода установлены шесть волоконно-оптических датчиков измерения температуры ВОДТ(3), в каждом датчике имеются три независимых чувствительных элемента. ВОЛС от датчика

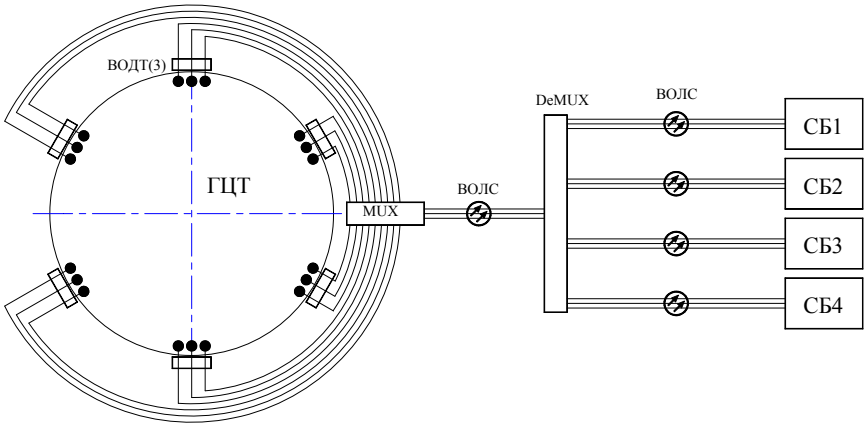
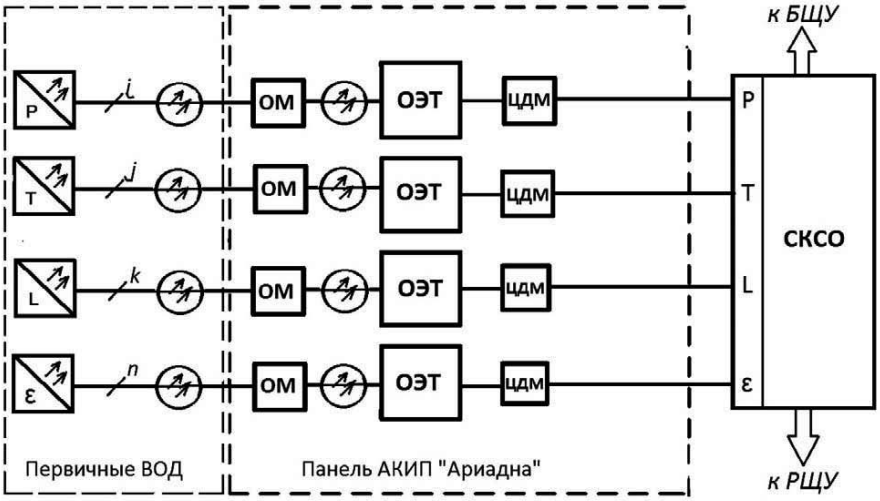


Рис. 2. Вариант использования ВОД для измерения температуры в ГЦТ



ОМ – оптический мультиплексор; ОЭТ – оптико-электронный трансивер; ЦДМ – цифровой демультиплексор; СКСО – субкомплекс сбора и обработки первичных данных; БЩУ, РЩУ – блочный и резервный щиты управления

Рис. 3. Структура нижнего уровня СМАС

до мультиплексора состоит из трех оптоволоконных передающих линий. Посредством мультиплексора происходит объединение сигналов с последующей передачей по трехволоконному ВОЛС, что позволяет распределить сигналы по всем системам безопасности. Такая структура измерения позволит в каждой СБ иметь полную информацию о температуре в ГЦТ.

Другая немаловажная особенность СМАС – это способность приема и обработки до 100 сигналов от однотипных ВОД одним ОЭТ, что позволяет сократить:

- электронное оборудование;
- потребление электроэнергии;
- количество помещений для размещения СМАС.

Ключевым звеном оптоволоконной СМАС является нижний уровень первичных датчиков и измерительных каналов. На рис. 3 приведена структура нижнего уровня СМАС, выходные данные которого передаются на блочный пульт управления (БПУ) и на резервный пульт управления (РПУ).

Измерительные волоконно-оптические каналы могут содержать как одноканальные оптико-электронные трансиверы, так и многоканальные. На рис. 4 приведен внешний вид одноканального и многоканального трансиверов.

На рис. 5 приведен внешний вид волоконно-оптических датчиков измерения давления и температуры.

На рис. 6 приведен внешний вид устройств приема, обработки и представления информации оператору о технологических параметрах, передаваемых от волоконно-оптических датчиков.

Технические средства для приема, обработки и представления информации изготавливаются ООО

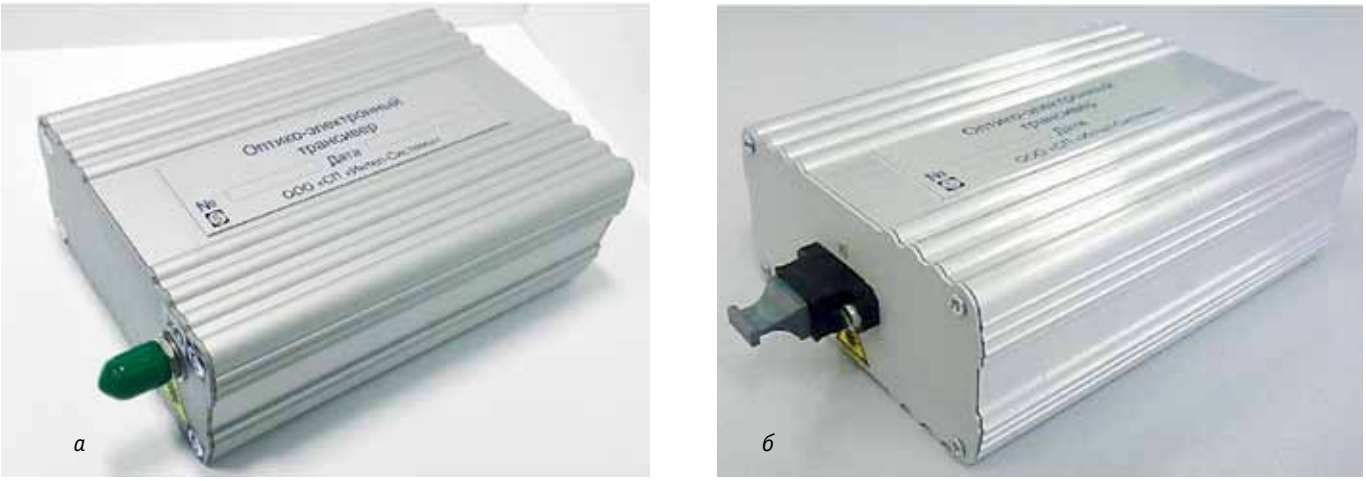
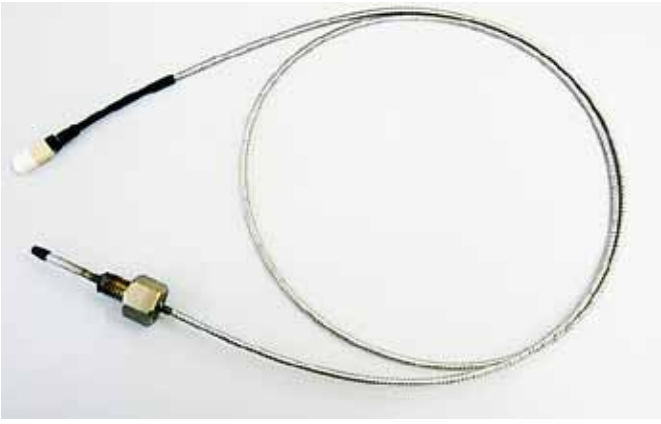


Рис. 4. Внешний вид оптико-электронных трансиверов общепромышленного исполнения: *а* – ОЭТ одноканальный; *б* – ОЭТ многоканальный (до 100 каналов)



а

б

Рис. 5. Волоконно-оптические датчики: *а* – ВОД температуры; *б* – ВОД давления

«Московский завод «ФИЗПРИБОР» в трех модификациях:

- в виде шкафа размером 600 × × 610 × 1680 мм;
- в виде крейта в 19-дюймовую стойку;
- в виде мобильного устройства, подключаемого непосредственно к трансиверам.

Шкафы базовые изготавливаются в двух исполнениях:

- с модулями ввода/вывода, построенными на базе микроконтроллеров;
- с модулями ввода/вывода, построенными на технических средствах непрограммируемой логики.

Локальный крейт может принимать до 1000 сигналов ВОД. Мобильное устройство может использоваться не только для контроля текущих параметров, но и для наладки, тестирования и программирования ВОД.

Высокая живучесть всего программно-технического комплекса (ПТК) СМАС «Ариадна» при тяжелых запроектных авариях на атомных станциях достигается за счет следующих решений:

- применения волоконно-оптической шины сбора данных на основе ВОД, оптических кабелей, оптических герморазъемов и гермопроходников, которым не требуется электропитание и заземление;
- применения интеллектуальных датчиков и измерительных каналов с функцией метрологического самоконтроля (дистанционной самокалибровки) как в процессе эксплуатации, так и при ЗПА на АЭС;
- разделения ПТК на 5 автономных субкомплексов (3 субкомплекса сбора и обработки информации (СКСО) и 2 субкомплекса рабочих станций). Технические и программные средства, в том числе обработка данных, реализуются таким образом, чтобы исключить взаимное влияние субкомплексов. Выход из строя любого из них не влияет на работу других;
- разнесения субкомплексов по разным помещениям и отметкам энергоблока атомной станции;
- тройного резервирования СМАС, каждый из которых обрабатывается отдельным СКСО;
- реализации схемы присвоения приоритетов и развязки шин электропитания, обеспечивающей:
  - электропитание субкомплексов ПТК почти при любом сценарии развития аварии;
  - электропитание СМАС и систем, осуществляющих важные аварийные измерения, от ПТК;
  - использование остаточного заряда аккумуляторных батарей системы управления защитой (после выполнения ее основных функций);
  - удаленное отключение любого СКСО для минимизации энергопотребления;
- применения оборудования с минимальным энергопотреблением;

а

б

в

Рис. 6. Комплекс технико-программных средств повышенной надежности для АЭС: *а* – шкаф базовый; *б* – крейт; *в* – мобильное устройство

- защищенности информации от несанкционированного доступа и внешнего влияния на работу датчиков и системы в целом;
- передачи данных в кризисный центр Росэнергоатома по 4 независимым резервированным каналам;
- применения резервированного оборудования для приема, обработки и предоставления информации (верхний уровень СМАС). При этом резервированные компоненты построены на различных схемотехнических решениях, в том числе на элементах «жесткой» логики.

В комплект поставки СМАС «Ариадна» в общем случае входят:

- волоконно-оптические датчики физико-химических параметров;
- волоконно-оптические линии связи с оптическими герморазъемами и гермопроходниками;
- шкафы автоматизированной обработки данных (резервированный комплект), реализованные на базе комплекса технико-программных средств повышенной надежности (КТПС-ПН);
- комплект монтажных частей и ЗИП на гарантийный период хранения и эксплуатации;
- комплект эксплуатационной и ремонтной документации.

СМАС «Ариадна» комплектуется специальными соединительными оптическими кабелями с ответными разъемными соединениями для подключения к модулям волоконно-оптических гермопроходок. Подключение соединительного кабеля к СМАС «Ариадна» осуществляется герметичными соединительными разъемами заводского исполнения. Разъемы соединительные оптические многоволоконные (тип «МРО») и подключаемые к ним соединительные кабели обеспечивают передачу измерительного сигнала при механических, тепловых и прочих воздействиях, возникающих в результате аварии (в том числе тяжелой).

Всеми вышеприведенными отечественными технологиями производства волоконно-оптических систем контроля технологических параметров, включая термо-радиационно-стойкие ВОД с оптическими гермопроходниками, оптико-электронные трансиверы, оборудование верхнего уровня на базе комплекса технико-программных средств повышенной надежности (КТПС-ПН) для АЭС, обладает российский консорциум предприятий во главе с лидером по разработке и изготовлению современных АСУ ТП для опасных производственных объектов Московским заводом «ФИЗПРИБОР» [8].

Литература

1. Accident monitoring systems // IAEA Nuclear Energy Series № NP-T-3.16. Vienna, 2015.
2. Nuclear power plants – instrumentation, control and electrical power systems. Criteria for Accident Monitoring Instrumentation Nuclear Power Generating Stations // IEC/IEEE Standard 497. Paris, 2016.
3. *Буймистрюк Г. Я.* Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // Control Engineering Россия. 2013. № 3.
4. *Hashemian H. M., Bean W. C.* Sensors for Next-Generation Nuclear Plants: Fiber-Optic and Wireless // Nuclear Science and Engineering. 2011. № 3.
5. *Ильин А. В., Набоков Р. Н., Сафонов С. И.* Новый технико-технологический подход к надежности, живучести и безопасности измерительных систем для объектов атомной энергетики // Материалы 2-го Всероссийского Конгресса по сенсорному приборостроению «Сенсорное слияние». Кронштадт, 30–31 мая 2017.
6. ОТТ. 08042462 «Приборы и средства автоматизации для атомных станций. Общие технические условия».
7. *Buymistriuck G. Y.* Radiation-Hard and Intelligent Optical Fiber Sensors for Nuclear Power Plants // Nuclear Power: Control, Reliability and Human Factors. Chapter 7. Intech. N. Y., 2011.
8. *Буймистрюк Г. Я., Рогов А. М.* Интеллектуальный датчик давления для измерений в экстремальных условиях // ANIMMA International Conference, 7–10 June 2009, Marseille, France.
9. *Сафонов С. И.* Современные отечественные решения для автоматизации промышленных и энергетических объектов // Газовая промышленность. 2018. № 6.

Г. Я. Буймистрюк, д.т.н., ген. директор
ООО «Сенсорное слияние», г. Кронштадт,
А. В. Ильин, ведущий инженер
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва,
С. И. Сафонов, технический директор,
ООО «Московский завод «ФИЗПРИБОР»,
г. Москва,
тел.: +7 (495) 228-6019,
e-mail: info@fizpribor.ru,
сайт: www.fizpribor.ru