

УДК 621.039.058

В. В. Елисеев, Г. Ю. Пивоваров,
К. Е. Герасименко

ЧАО «Северодонецкое научно-производственное объединение «Импульс», г. Северодонецк, Украина

Опыт реализации управляющих систем безопасности и нормальной эксплуатации энергоблоков АЭС

Приведены сведения об опыте создания программно-технических комплексов (ПТК) управляющих систем безопасности технологических (УСБТ) и управляющих систем нормальной эксплуатации (УСНЭ) энергоблоков АЭС, внедренных на Запорожской АЭС, проектных решениях и базовых компонентах ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ.

Ключевые слова: атомные электростанции, ядерная и радиационная безопасность, программно-технические комплексы управляющих систем безопасности технологических и управляющих систем нормальной эксплуатации энергоблоков.

В. В. Єлісеєв, Г. Ю. Пивоваров, К. Є. Герасименко

Досвід реалізації керуючих систем безпеки і нормальної експлуатації енергоблоків АЕС

Наведено відомості про досвід створення програмно-технічних комплексів (ПТК) керуючих систем безпеки технологічних (КСБТ) і керуючих систем нормальної експлуатації (КСНЭ) енергоблоків АЕС, впроваджених на Запорізькій АЕС, проектні рішення та базові компоненти ПТК КСБТ і ПТК КСНЭ.

Ключові слова: атомні електростанції, ядерна та радіаційна безпека, програмно-технічні комплекси керуючих систем безпеки технологічних і керуючих систем нормальної експлуатації енергоблоків.

© В. В. Елисеев, Г. Ю. Пивоваров, К. Е. Герасименко, 2016

Северодонецкое НПО «Импульс» (СНПО «Импульс») — разработчик, производитель и поставщик высоконадежных цифровых информационных и управляющих систем (ИУС) АЭС, таких как цифровая управляющая система безопасности, цифровые управляющие системы нормальной эксплуатации реакторного и турбинного отделений, система группового и индивидуального управления стержнями, система контроля нейтронного потока, информационно-вычислительная система верхнего блочного уровня, система внутрореакторного контроля, комплексная система диагностики и др.

За последние 15 лет в Украине и за рубежом предприятием внедрены около 150 ИУС, важных для безопасности АЭС, в том числе по программам НАЭК «Энергоатом» и TACIS. ИУС производства СНПО «Импульс» охватывают практически полный диапазон систем АСУ ТП энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР.

Одними из наиболее сложных и значительных по объёму оборудования ИУС являются управляющие системы нормальной эксплуатации (УСНЭ) и управляющие системы безопасности технологические (УСБТ). УСНЭ (класс безопасности 3) выполняет автоматизированное управление технологическими процессами энергоблока с целью оптимизации затрат при выработке электрической и тепловой энергии, а УСБТ (класс безопасности 2) предназначена для обеспечения ядерной безопасности реакторной установки (РУ).

Одной из актуальных задач при разработке программно-технических комплексов (ПТК), реализующих функции УСНЭ и УСБТ, является минимизация количества типов оборудования, входящего в состав ПТК УСНЭ и ПТК УСБТ, при безусловном соблюдении всех требований действующих в Украине норм и правил по ядерной и радиационной безопасности. Минимизация номенклатуры оборудования уменьшает издержки на разработку и серийное освоение продукции, что повышает ее конкурентоспособность, а также снижает эксплуатационные расходы на АЭС.

Целью данной статьи является освещение опыта реализации ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ различных исполнений с учётом минимизации номенклатуры применяемого оборудования.

Общие сведения о ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ. Основными целями модернизации устаревшего оборудования УСБТ и УСНЭ с использованием соответствующих ПТК производства СНПО «Импульс» являются [1]:

необходимость замены оборудования УСБТ и УСНЭ, выработавшего свой ресурс;

приведение в соответствие оборудования УСБТ и УСНЭ требованиям (в том числе требованиям к контролю и диагностированию) действующих в Украине норм и правил по ядерной и радиационной безопасности;

улучшение эксплуатационных характеристик.

Создание ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ основывалось на опыте разработки и эксплуатации УСБТ и УСНЭ, реализованных на базе унифицированного комплекса технических средств УКТС-ВЛ с учетом мировых тенденций по созданию таких систем, а также предложенной персоналу АЭС Украины.

Современными аналогами ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ производства СНПО «Импульс» являются Teleperm XS (УСБТ), Teleperm XP и SPPA (УСНЭ) Areva-Siemens [2, 3].

ПТК УСБТ обеспечивает реализацию управляющих функций одного из каналов системы безопасности (СБ) энергоблока. ПТК УСНЭ предназначен для использования

Таблица 1. ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ производства СНПО «Импульс», внедренные на АЭС Украины

Энергоблок Запорожской АЭС			Энергоблок № 2 Хмельницкой АЭС
№ 1	№ 2	№ 3	
ПТК УСНЭ ТО, ПТК АСР ТО, ПТК СРТ	ПТК УСНЭ ТО, ПТК АСР ТО	ПТК КИП УСНЭ ТО	—
ПТК УСНЭ РО	ПТК УСНЭ РО	ПТК УСНЭ РО	—
ПТК УСБТ-1	ПТК УСБТ-1	—	ПТК САР УСБТ-1
ПТК УСБТ-2	ПТК УСБТ-2	—	ПТК САР УСБТ-2
ПТК УСБТ-3	ПТК УСБТ-3	—	ПТК САР УСБТ-3

Примечание. АСР — автоматическая система регулирования; СРТ — система регулирования турбиной; САР — система автоматического регулирования.

в составе АСУ ТП реакторного (РО) или турбинного (ТО) отделений энергоблоков АЭС.

ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ реализуют следующие основные функции (на примере энергоблока с реактором ВВЭР-1000):

1) алгоритмы технологических защит и блокировок (ТЗиБ):

— ПТК УСБТ реализует защиты РУ в части ее охлаждения, наиболее важные защиты технологического оборудования, а также блокировки систем обеспечения СБ в соответствии с существующим проектом АСУ ТП ВВЭР-1000;

— ПТК УСНЭ реализует все защиты и блокировки первого и второго контуров, не вошедшие в ПТК УСБТ;

2) питание первичных измерительных преобразователей (ПИП);

3) прием, нормализацию и обработку входных непрерывных сигналов от ПИП и входных дискретных сигналов;

4) размножение непрерывных сигналов для смежных систем;

5) реализацию алгоритмов автоматического регулирования;

6) управление исполнительными механизмами (ИМ) по командам ТЗиБ, автоматического регулирования и дистанционного управления;

7) дистанционное управление ИМ, технологическую сигнализацию, индикацию состояния ИМ на БЩУ и РЩУ;

8) визуализацию, архивирование данных о значениях технологических параметров, состоянии защит, блокировок, ИМ и технических средств ПТК;

9) подготовку и передачу в блочную информационно-вычислительную систему (ИВС) данных о значениях технологических параметров и состоянии ИМ.

ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ при модернизации энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР используются для замены:

1) нормирующих преобразователей, в частности серий «Ш-78», «Ш-79», «ЭП-4700», «ЭП-4701», и блоков питания 22БП-36;

2) технических средств УКТС: шкафов базовых, распределительных токовых (РТ), кроссовых, а также их функциональных аналогов (РП-160, панелей реле и др.);

3) аппаратуры регулирования ГСП «Каскад».

Перечень ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ производства СНПО «Импульс», внедренных на АЭС Украины, приведен в табл. 1.

Проектные решения УСБТ, УСНЭ и принципы их реализации в исполнениях ПТК. В качестве основной задачи при разработке платформ аппаратных и программных средств МСКУ 3М и МСКУ 4М, структура которых приведена на рис. 1, стояло обеспечение возможности реализации различных проектных требований к УСБТ и УСНЭ, примеры которых даны в табл. 2, с минимизацией количества типов компонентов в конкретном исполнении ПТК при соблюдении требований ядерной и радиационной безопасности [4].

Платформы аппаратных и программных средств МСКУ 3М и МСКУ 4М обеспечивают возможность серийного производства оборудования как для цифровых ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ, так и для других подсистем АСУ ТП энергоблоков АЭС [5, 6]. Особенностью данных платформ является наличие двух различных промышленных контроллеров — микропроцессорных комплексов МСКУ 3 и МСКУ 4, обеспечивающих возможность реализации проектных требований по диверсности (разнообразию) оборудования и программного обеспечения.

ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ соответствуют требованиям нормативной документации Украины, а также положениям руководств по безопасности МАГАТЭ NS-G-1.3 [7] и SSG-39 [8], в том числе по обеспечению надёжности; соблюдению принципа единичного отказа, резервирования, независимости; контролю доступа к оборудованию; эффективному интерфейсу «человек — машина»; обнаружению неисправностей; применению программы обеспечения качества.

Соответствие перечисленным требованиям обеспечено реализацией ряда технических решений и организационных мероприятий, к которым, в частности, относятся:

1) применение резервированных блоков (модулей) измерения сигнала от каждого датчика независимо от проектных схем алгоритмов, в которых используется данный датчик;

2) применение резервированных блоков управления исполнительными механизмами;

3) применение резервированных блоков, устанавливаемых в операторских панелях БЩУ, РЩУ (сигналы ключей дистанционного управления, ламп состояния механизмов и табло сигнализации);

4) использование резервированных блоков центральной части:



Рис. 1. Структура платформ МСКУ 3М и МСКУ 4М

Таблица 2. Проектные требования к АСУ ТП

Характеристики	УСБТ для ВВЭР-1000	АЗ-УСБТ (интегрированная) для энергоблоков Areva, Westinghouse
Количество комплектов (основной+диверсный)	—	2
Количество каналов	3	4
Связи между каналами	Каждый канал УСБТ содержит 4 под-канала защит с мажорированием «2оо4»	Перекрестные связи между каналами с мажорированием «2оо4»

– блоков автоматического управления (защиты, блокировки);

– блоков коммутации управляющей сети (связь блоков автоматического управления, блоков управления механизмами, блоков операторских панелей БЩУ, РЩУ);

5) применение высоконадежных электронных компонентов промышленного исполнения;

6) обеспечение защиты от отказов по общей причине в УСБТ за счет применения при проектировании принципа независимости для резервированных компонентов, а именно:

– физического разделения элементов, относящихся к разным каналам УСБТ;

– гальванического разделения и экранирования входных цепей, выходных цепей и цепей электропитания;

– соединения компонентов между собой радиальными линиями связи;

7) применение программного кода, обеспечивающего выполнение функций УСБТ и УСНЭ с детерминированными алгоритмами и временными параметрами;

8) автоматический контроль состояния технических средств, линий связи, входных и выходных сигналов, первичного и вторичного электропитания, использование встроенных схем фоновое тестового диагностирования каналов ввода дискретных сигналов внутри блоков элементов;

9) выполнение в соответствии с программой обеспечения качества проектирования, изготовления, аттестации,

испытаний, монтажа, наладки, сопровождения эксплуатации и технического обслуживания УСБТ и УСНЭ.

Описание базовых компонент для построения ПТК УСБТ и ПТКУСНЭ. Номенклатура и описание базовых компонент, используемых для построения ПТК УСБТ и ПТКУСНЭ, приведены в табл. 3; их внешний вид — на рис. 2; структурная схема ПТК УСБТ, реализующего функции одного из трех каналов УСБТ ВВЭР-1000, — на рис. 3.

В ПТК УСБТ и ПТКУСНЭ использован ряд принципов построения, отличных от принципов построения УКТС и оборудования других производителей и направленных на улучшение эксплуатационных характеристик, а именно: *поканальное питание ПИП* (каждый ПИП питается от трех каналов одного МСКУ). Такой подход к построению схемы питания позволяет отказаться от внешних нерезервированных блоков питания и обеспечить работоспособность измерительного канала при единичных неисправностях. При этом за счет сравнения значений в трех каналах МСКУ обеспечивается непрерывный автоматический контроль технического состояния оборудования, позволяющий отказаться от значительной части периодических проверок в процессе эксплуатации;

более высокая степень интеграции технических средств автоматизации ПТК. Для улучшения показателей надежности используется полное резервирование всего канала, включая исполнительный модуль и помехоустойчивые

Таблица 3. Базовые компоненты для построения ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ

Компонент	Назначение	Система
<i>Платформа МСКУ 3М</i>		
Микропроцессорный комплекс МСКУ 3	<p>Реализация функций приема, нормализации и обработки входных сигналов от первичных измерительных преобразователей (ПИП) и входных дискретных сигналов.</p> <p>Реализация функций технологических защит, блокировок, сигнализации, автоматического регулирования по заданным алгоритмам.</p> <p>Формирование и выдача в смежные системы АСУ ТП непрерывных сигналов в диапазоне 0–5 мА, соответствующем диапазону изменения технологических параметров.</p> <p>Цифровой резервированный оптический интерфейс приема и передачи данных</p>	УСБТ, УСНЭ
Устройство связи с панелью оператора УСПО	<p>Прием сигналов типа «сухой контакт» от ключей (в том числе от ключей с функцией кодирования): дистанционного управления ИМ, выбора режима, опробования табло и звука; от кнопок съема мигания и звука.</p> <p>Формирование потенциальных сигналов индикации положения ИМ и технологической сигнализации (через панели сигнализации).</p> <p>Цифровой резервированный оптический интерфейс приема и передачи данных</p>	УСБТ, УСНЭ
Шкаф дискретных сигналов ШДС	<p>Формирование сигналов управления и состояния ИМ запорной, пневмоотсечной, регулирующей арматур и двигателей, формирование дискретных сигналов в смежные системы.</p> <p>Цифровой резервированный оптический интерфейс приема и передачи данных</p>	УСБТ, УСНЭ (исполнительная часть)
Шкаф управления и коммутации ШУК	Коммутация данных между устройствами нижнего уровня (ШДС, УСПО) по управляющей сети на базе UART	УСНЭ
Шкаф аналогового управления ШАУ	Формирование и выдача аналоговых сигналов 0–5 мА, 0–20 мА	УСБТ, УСНЭ
<i>Платформа МСКУ 4М</i>		
Микропроцессорный комплекс МСКУ 4	Обеспечение диверсности по отношению к платформе МСКУ 3М по всем функциям автоматического и дистанционного управления	УСБТ, УСНЭ
Рабочие станции ПС 5140	Функционирование в качестве резервированных рабочих мест на БЩУ (РМОТ), серверов и инженерных станций различного назначения, прием данных от устройств ПТК по промышленной сети на базе Ethernet	УСБТ, УСНЭ

оптоволоконные линии связи. ПТК имеет резервированные независимые каналы обработки алгоритмов, выходные команды которых мажорируются в дублированных блоках управления механизмами и арматурой;

реализация связи с БЩУ и РЩУ через цифровые резервированные каналы связи с блоками ввода-вывода сигналов от ключей, ламп, табло. В блоках вывода формирование сигналов на лампы и табло сигнализации реализуется по мажоритарной схеме. Сигналы дистанционного управления от блоков ввода сигналов ключей передаются независимо по резервированным каналам в блоки управления механизмами и арматурой, в которых выполняется их мажоритарная обработка;

использование МСКУ для реализации алгоритмов, что обеспечивает устойчивость к любому типу одиночной неисправности ПТК, а также возможность замены неисправных блоков, изменения настроек и алгоритмов управления без потери работоспособности подсистем;

наличие резервированных серверов диагностирования и архивирования, каждый из которых поканально соединен независимыми оптоволоконными линиями с каждым устройством из состава ПТК. Все сигналы КИП, РТ, положения

ИМ, команды алгоритмов, а также диагностическая информация могут без ограничений передаваться по цифровому каналу на верхний уровень общеблочной ИВС;

использование резервированных РМОТ на БЩУ в качестве оперативного средства контроля состояния, изменения задания и режимов работы.

Перечисленные принципы построения ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ дают следующие преимущества при модернизации и в процессе эксплуатации:

1) увеличение надежности при использовании резервированных структур, возможность поканального технического обслуживания ПТК с сохранением работоспособности по всем функциям;

2) минимизацию количества оборудования и кабельных связей благодаря переходу на цифровые средства обработки и передачи данных;

3) существенное сокращение количества кабельных связей от БЩУ, РЩУ к помещению средств автоматики УСБТ и УСНЭ при переходе на оптический цифровой интерфейс передачи данных. Блоки ввода-вывода устанавливаются непосредственно в панелях БЩУ и РЩУ;



Рис. 2. Внешний вид базовых компонентов ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ

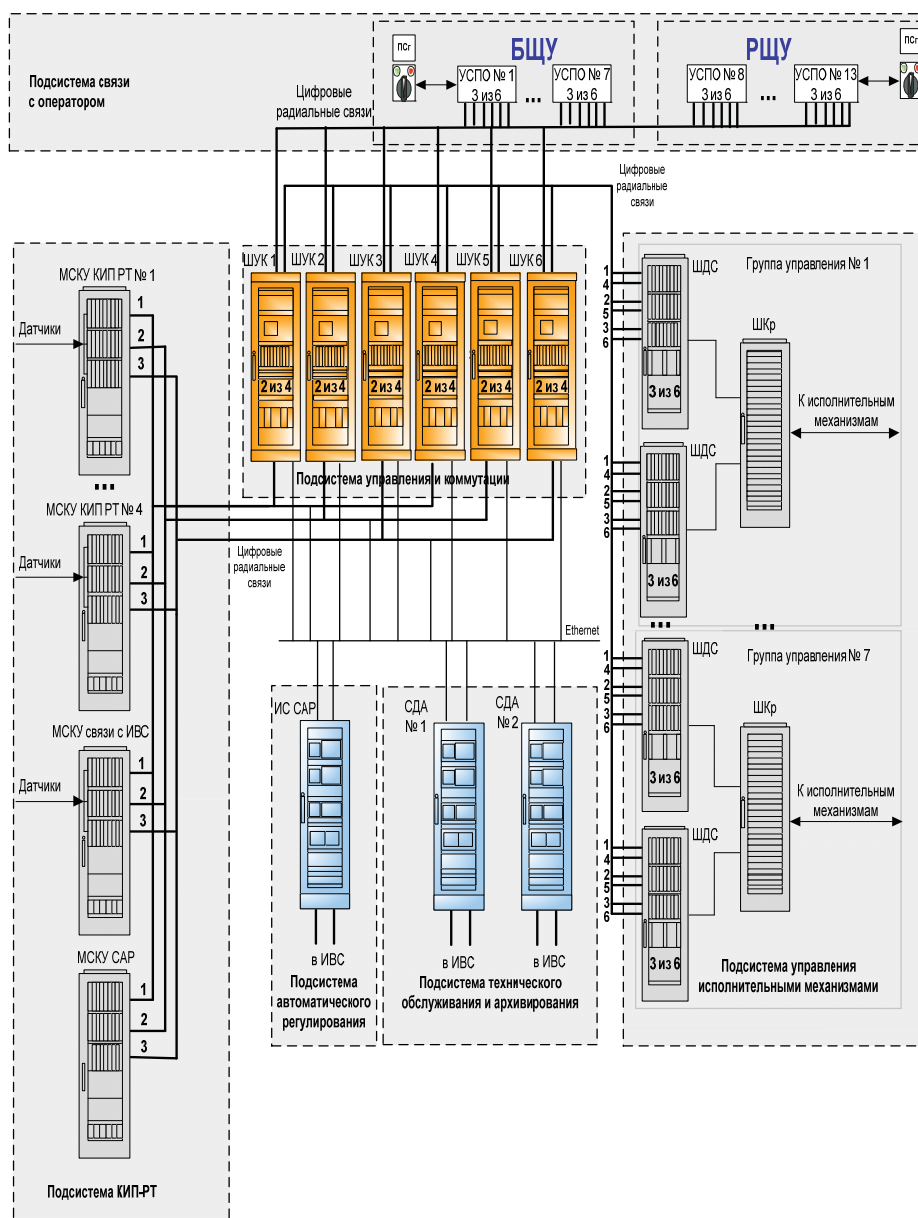


Рис. 3. Структурная схема ПТК УСБТ

4) наличие развитой системы представления текущей и ретроспективной информации о состоянии технологических параметров, защит, блокировок, регулирования, исполнительных механизмов;

5) диагностирование состояния технических средств, линий связи, входных сигналов, цепей первичного и вторичного электропитания;

6) достижение модификации алгоритмов управления (при необходимости), как правило, за счет корректировки программного обеспечения без применения дополнительных технических средств;

7) возможность этапной модификации, снижение трудоемкости электромонтажа при установке за счет уменьшения количества используемых связей, значительное улучшение эксплуатационных характеристик, уменьшение трудозатрат на проведение регламентного технического обслуживания.

Выводы

Структурные решения и технические средства, рассмотренные в данной статье, обеспечивают реализацию различных проектных решений для прикладных исполнений ПТК УСБТ (класс безопасности 2) и ПТК УСНЭ (класс безопасности 3) производства СНПО «Импульс» с минимумом номенклатуры применяемого оборудования. При этом обеспечиваются требуемые эксплуатационные характеристики и выполнение нормативных требований по безопасности, предъявляемых к изделиям данных классов, что подтверждено материалами различных видов испытаний и промышленной эксплуатацией на АЭС, начиная с 2008 г., более десяти различных ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ. По программе МАГАТЭ IERICS (Независимый технический анализ информационных и управляющих систем) [9] в 2013—2015 гг. непосредственно при посещении площадки Запорожской АЭС проведена экспертиза технических решений, применяемых в ПТК УСБТ и ПТК УСНЭ, включавшая всесторонний анализ применяемых подходов, конструкторских реализаций, а также особенностей эксплуатации. В отчете о проведении экспертной миссии МАГАТЭ, в частности, отмечено, что проанализированные ПТК соответствуют разделам Руководства МАГАТЭ по безопасности NS-G-1.3, при этом качество разработки, изготовления, испытаний и сопровождения эксплуатации ПТК оценено как высокое.

Список использованной литературы

1. Безопасность атомных станций. Информационно-управляющие системы / М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская, Г. Джонсон, В. В. Елисеев, А. А. Сиора, В. В. Скляр, Л. И. Спектр, В. С. Харченко; под ред. М. А. Ястребенецкого. — К. : Основа-Принт, 2011. — 768 с.
2. Instrumentation and Control TELEPERM XS System Overview, 2016. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.aveva.com/mediatheque/liblocal/docs/activites/reacteurs-services/reacteurs/pdf-teleperm-xs-feat.pdf>
3. Advanced Digital I&C Technology in Nuclear Power Plants A Success Story from Finland and China. Tino Liebschner, Framatome ANP, NGLAA and oth., International Conference Nuclear Energy for New Europe 2005 Bled, Slovenia, September 5—8, 2005. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nss.si/proc/bled2005/htm/pdf/00070.pdf>

4. Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та керуючих систем, важливих для безпеки атомних станцій : НП 306.2.202—2015 // Офіційний вісник України. — 2015. — № 66. — Стор. 99, стаття 2196, код акту 78166/2015.

5. Продукция для АЭС. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.imp.lg.ua/index.php?option=com_content&view=category&id=2%3A2010-12-01-14-45-12&Itemid=5&lang=ru

6. Высоконадежные информационные и управляющие системы для атомной энергетики и других отраслей промышленности. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.imp.lg.ua/booklet/npp_book.pdf

7. SAFETY GUIDE No. NS-G-1.3 Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants, 2002. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1116_scr.pdf

8. Specific Safety Guide No. SSG-39 Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants, 2016. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1694web-90481357.pdf>

9. TECDOC-1662 Preparing and Conducting Review Missions of Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants, 2016. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1662_web.pdf

References

1. Yastrebenetskyi, M.A., Rozen, Yu.V., Vinogradskaya, S.V., Johnson, G., Yeliseiev, V.V., Siora, A.A., Skliar, V.V., Spektr, L.I., Kharchenko, V.S. (2011), "Safety of Nuclear Power Plants. Instrumentation and Control Systems" [Informatsionno-upravliayushchiye sistemy], Kyiv, Osнова-Print, 2011, 768 p. (Rus)
2. Instrumentation and Control TELEPERM XS System Overview, 2016, available at: <http://www.aveva.com/mediatheque/liblocal/docs/activites/reacteurs-services/reacteurs/pdf-teleperm-xs-feat.pdf>
3. Advanced Digital I&C Technology in Nuclear Power Plants A Success Story from Finland and China, Tino Liebschner, Framatome ANP, NGLAA and oth., International Conference Nuclear Energy for New Europe 2005 Bled, Slovenia, September 5—8, 2005, available at: <http://www.nss.si/proc/bled2005/htm/pdf/00070.pdf>
4. Nuclear and Radiation Safety Requirements for Instrumentation and Control Systems Important to NPP Safety: NP 306.2.202—2015 [Vymohy z yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky do informatsiinykh ta keruiuchykh system, vazhlyvykh dlia bezpeky atomnykh stantsii: NP 306.2.202—2015], Official Bulletin of Ukraine, 2015, No. 66, p. 99, Art. 2196, Code 78166/2015. (Ukr)
5. Products for NPP [Produktsiia dlia AES], available at: http://www.imp.lg.ua/index.php?option=com_content&view=category&id=2%3A2010-12-01-14-45-12&Itemid=5&lang=ru (Rus)
6. Highly Reliable Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Engineering and other Industries [Vysokonadiozhnyie informatsionnyie i upravliayushchiye sistemy dlia atomnoi energetiki i drugikh otraslei promyshlennosti], available at: http://www.imp.lg.ua/booklet/npp_book.pdf (Rus)
7. SAFETY GUIDE No. NS-G-1.3, Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants, 2002, available at: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1116_scr.pdf
8. Specific Safety Guide No. SSG-39 Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants, 2016, available at: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1694web-90481357.pdf>
9. TECDOC-1662 Preparing and Conducting Review Missions of Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants, 2016, available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1662_web.pdf

Получено 14.05.2016.