

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ СУПЕРВИЗОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭС

Полетыкин А.Г

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65  
poletik@inbox.ru*

### **Введение**

В середине 90-х годов прошлого века атомная промышленность России начала стремительный выход на мировой рынок. Ряд стран (Иран, Индия, Китай и другие) проявили заинтересованность в приобретении отечественных энергоблоков с реакторами на легкой воде типа ВВЭР-1000. Потенциальных заказчиков устраивали экономические характеристики российских АЭС, их надежность и безопасность. Вместе с тем, ряд подсистем АЭС их не устраивал.

К ним, в первую очередь, относились автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), которые строились на основе традиционных средств автоматики с жесткой логикой, а программируемые контроллеры практически не применялись. Кроме этого, средства контроля и управления блочного пульта АЭС создавались на основе архаичных средств - стрелочные приборы, самописцы, световые индикаторы, ключи индивидуального управления оборудованием и т.п. В результате отечественные АСУ ТП АЭС занимали огромные помещения, требовали большого количества эксплуатационного и ремонтного персонала. Не были также реализованы алгоритмы контроля, управления и диагностики, повышающие безопасность АЭС, наличие которых является обязательным в соответствии с требованиями МАГАТЭ. К ним, в частности, относятся: система представления параметров безопасности АЭС, система регистрации важных параметров эксплуатации и другие.

В целом, отечественные АСУ ТП АЭС практически по всем параметрам уступали своим зарубежным аналогам. При этом для АЭС «Бушер», строящейся в Иране, закупки зарубежных технологий были невозможны из-за эмбарго. Было решено создать собственную лицензионно-чистую цифровую АСУ ТП, которую можно поставлять в любые страны без ограничений. Она должна соответствовать требованиям по безопасности в области атомной энергетики, широко применять программируемые контроллеры, цифровые средства передачи информации, включать расчетные и диагностические задачи. Причем в центре АСУ ТП должна находиться интегрирующая часть – вычислительная система верхнего блочного уровня (СВБУ), которая должна концентрировать информационные потоки и предоставить оперативному персоналу АЭС удобные, надежные и быстрые средства управления АЭС, на современном уровне решать как традиционные задачи, так и задачи, повышающие уровень безопасности АЭС.

Задача создания СВБУ была успешно решена усилиями нескольких организаций, включая ОАО «Атомэнергопроект», ЭНИЦ, ФГУП «ФНПЦ НИИИС» и ИПУ РАН. Основные сведения о работе

представлены в открытой печати на русском и английском языках. (Наиболее подробно сведения изложены в монографии [1], доступной по ссылке:

[http://www.ipu.ru/sites/default/files/page\\_file/busher.pdf](http://www.ipu.ru/sites/default/files/page_file/busher.pdf).)

Технические решения по СВБУ АСУ ТП АЭС «Бушер» успешно используются на действующих АЭС за рубежом (АЭС «Куданкулам», блоки 1-2 в Индии) и на новых АЭС в России (Калининская АЭС, блоки 3, 4, Нововоронежская АЭС, блок 6,7).

На каждой АЭС имеются отличия в реализации СВБУ, что позволяет объективно провести их сравнительный анализ. В работе это будет сделано.

За прошедшие 20 лет с момента, когда были сформулированы основные решения по СВБУ, произошли революционные изменения в области вычислительной техники, которые привели к фундаментальным культурным сдвигам, изменили мышление человека. Произошли изменения требований, зафиксированных в нормативной документации. Приобрели остроту старые вызовы и угрозы, такие как проблема подтверждения качества программного обеспечения, кибератаки. Проявились новые, например, укорочение жизненных циклов компонентной базы. Это делает актуальным пересмотр основных технических решений по СВБУ, внесение изменений в жизненный цикл, поиск новых решений, которые были бы достаточны в среднесрочной перспективе: до 2030 года.

Данная работа является частью масштабных исследований, проводимых в ИПУ РАН в области систем АСУ ТП. Результаты исследований опубликованы в [2-14].

## **1 Дисплеи широкого формата и высокого разрешения**

В 90-х - 2000-х годах профессиональные компьютерные дисплеи имели размеры до 20" (или чуть выше). Разрешение SGA позволяло размещать их на дистанции 70-100см от глаз человека и обеспечивать комфортную работу. Если требовалось расширить площадь, то применялись 2 (реже 3 или более) дисплеев или размещали дисплеи в две ряда (4-6).

Несколько дисплеев на одном рабочем месте имеют один недостаток: невозможно отобразить окна большого размера. А это важное ограничение в АСУ ТП, где информация об объекте управления часто носит связный характер.

В настоящее время промышленность получила возможность создавать дисплеи практически неограниченного размера с размерами пикселей не больше чем у тех, что были раньше. При этом четкость, контрастность и реактивность значительно улучшились. (А цена наоборот стала меньше.)

ТВ панели с отношением сторон 4:3 снимаются с производства.

Освоены промышленные производства ТВ панелей размерами до 215 см (85") с отношением сторон 16:9 для:

- FHD (2K) - разрешение 1920\*1080
- UHD (4K) - разрешение 3840\*2180
- перспективное (8K) - разрешение 7680\*4320.

Появились панели с отношением сторон 21:9, с разрешением: 2560\*1080, 3840\*1600, 5120\*2160 с размерами до 2,6 м (105").

На смену LCD начинает приходить OLED (Organic Light Emitting Diode). Технология, обеспечивает:

- минимальное время отклика,
- широкий угол обзора и отличную передачу цвета,
- низкое энергопотребление,
- возможность создавать гибкие экраны,
- диапазон рабочих температур (от -40 до +70 °C)

На сегодня недостатком OLED-телевизоров является непродолжительное время работы, относительно ЖК-панелей - 30 тысяч часов против ста тысяч.

Поэтому на рабочих местах пультов управления вместо много дисплейных конструкции можно применять одно дисплейные и снять ограничение на размер окон, доведя его до охвата всей зоны видимости одного человека.

## **2 Интернет, беспроводные технологии и мобильные устройства**

Беспроводные технологии разнообразны. Они включают инфракрасные устройства, устройства на основе радиоволн, на основе света и т.д.

Развитие Интернет и беспроводных технологий носило взрывной характер и в настоящее время почти все пространство земли оказалось ими охвачено.

Вместе с мобильными устройствами они превратили большинство мест в околосреднем пространстве в точки доступа к информации.

В профессиональной области эти технологии позволили интенсифицировать труд людей в том месте, где они находятся и тогда, когда это нужно.

На промышленных предприятиях это позволило качественно повысить информационную оснащенность работников, связать их напрямую с автоматизированными системами управления.

Беспроводные технологии позволили включать в контуры управления для решения сложных задач уникальных (и труднодоступных) людей-экспертов, находящихся вне предприятий.

Технологии оказали качественное влияние на поведенческую культуру людей: с точки зрения современного человека доступ к информации (всей/любой) есть/должен быть всегда и находится рядом с ним. (А отсутствие этой возможности вызывает у современного человека чувство оторванности, незащищенности.) Разработчики автоматизированных систем управления должны рассматривать это как одно из главных (если не основных) эргономических требований.

В части беспроводных сетей:

- Повышение несущей частоты WiFi:
- Широко освоенный стандарт 802.11ac- несущая частота -5ГГц.
- Стандарт 802.11ad (Технология WiGig) - несущая частота- 60ГГц. Специфицированный предельный скоростной уровень для WiGig – 8 Гбит/с, в 3-5 раз быстрее, чем у современных устройств, поддерживающих стандарт 802.11ac (Wave I), при этом радиус покрытия технологии ограничивается 10 метрами. Считается, что WiGig с легкостью вытеснит с рынка технологию Bluetooth.
- Начинает развиваться технология Li-Fi (Light Fidelity) (Стандарт IEEE 802.15.7), которая позволяет передавать с помощью светодиодной лампы информацию на очень высоких скоростях, и по факту является оптической, высоко помехоустойчивой версией Wi-Fi.

Стандарт IEEE 802.15.7 определяет для Li-Fi физический уровень сетевой модели OSI PHY (Physical layer), а также уровень управления доступом к среде MAC-адрес (Media Access Control).

Преимущество Li-Fi в сравнении с Wi-Fi:

1 Использует электромагнитный спектр светового диапазона и соответственно может иметь более широкую полосу пропускания (проверенные скорости передачи до 224 Гб/с).

2 Может иметь детерминированную (заранее определенную) зону (площадь) покрытия в пределах прямой видимости, что позволит обеспечить более высокий уровень информационной безопасности.

3 Возможность использования системы освещения для организации, локальной вычислительной сети с регламентированными зонами доступа (см. рис. 1).

4. Отсутствие кибер угроз.

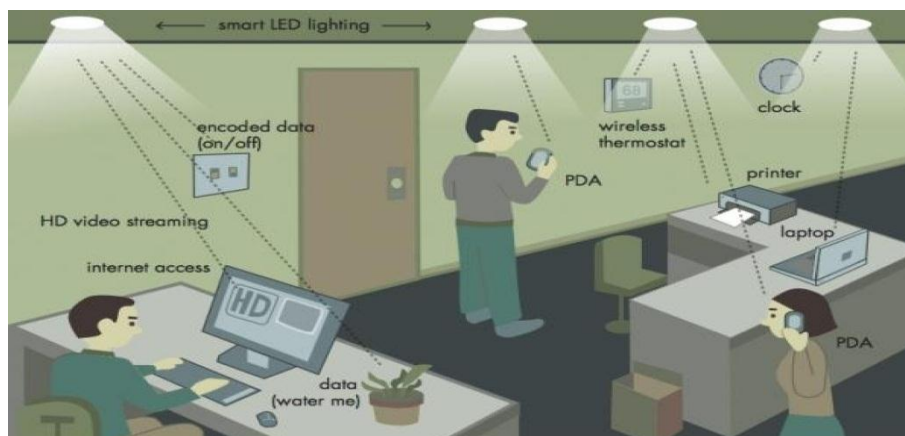


Рис. Вычислительная сеть на основе света.

Применение технологий поможет повысить комфортность для людей при выполнении служебных обязанностей за счет снятия ограничений, связанных с обязанностью находиться на рабочих местах в сидячем или стоячем положениях и т.п.

### 3 Контактные устройства

Данный вид устройств (браслеты, датчики, часы, наушники, очки и др.) улучшают жизнь и бурно завоёвывают популярность у людей.

Часть из них пассивна и управляются командами от человека. Это наушники, очки для просмотра фильмов и др.

А некоторые устройства активно взаимодействуют с людьми. Пока в ограниченном объеме: для браслетов и часов это контроль пульса, давления, управление двигательной активностью и т.п.; для устройств дополненной реальности - навигация в пространстве.

Общим для этих устройств является наличие органов ввода информации от человека и устройства для прямого воздействия на органы его чувств: тактильные, звуковые, световые.

Если разместить эти устройства на теле и/или одежде человека можно контролировать параметры его здоровья, эмоциональное состояние, перемещения, разговоры и т.д. А если использовать устройства воздействия на человека, то можно им управлять. Это открывает широкие возможности для совершенствования управления производством, в котором используются люди.

Для потенциально опасных объектов контроль и управление персоналом является одной из важнейших задач. Применение контактных устройств поможет ее решать гораздо эффективнее. Люди, оснащенные контактными устройствами, могут включаться в качестве объектов в автоматизированные системы управления.

### 4 LINUX и виртуализация в системном программном обеспечении

Linux и стандарты POSIX, ANSI C, X11 и др. заняли доминирующее положение и породили семейства операционных систем, завоевавшие основные рынки системного программного обеспечения (СПО), включая СВУ АЭС. Альтернатив этой тенденции пока не наблюдается, хотя попытки имеют место.

Тенденция имеет два направления. Первое состоит в создании полноценных полифункциональных систем, которые конкурируют с MS Windows. Это «системы для бедных» или для тех, кто не может использовать качественные проприетарные продукты (спецслужбы, военные и т.п.). Они не очень надежны, еще менее стабильны и редко используются в промышленных офисах.

Примеры: Fedora, Альт Линукс и др.

Вторая тенденция: создание узкоспециализированных (с ограниченными функциями) СПО с ориентацией на специфическое оборудование. Эти СПО, наоборот, очень надежны и стабильны.

Примеры: MAC OS, LICS и др.

Это имеет простое объяснение. Дело в том, что компоненты проприетарных СПО сделаны более качественно, чем у Linux. Естественно, полномасштабные СПО собранные на их основе будут лучше. Но узкоспециализированные СПО имеют необходимый минимум компонент и их можно лучше проверить. В результате у разработчиков со средними возможностями получаются высококачественные продукты.

Основываясь на опыте по созданию СПО для СВУ АЭС, предлагается продолжать линию LICS с периодом обновления в 10 лет.

До недавнего времени этапы жизненного цикла программ от модернизации до модернизации зависели от времени поддержки версий операционных систем производителями. При смене версии производителям прикладных программ, приходилось их адаптировать, внося существенные изменения, и (увы, неизбежно) на какое-то время снижая их надежность.

Для АСУ модернизация прикладных программ особенно вредна, опасна и затратна. Поэтому очень часто для их работы используются устаревшие технические средства (дорогие и не надежные) и устаревшие операционные системы иногда уже вне пределов поддержки производителями.

Чтобы продлить стабильные участки жизненного цикла прикладных программ начали широко применяться программные среды виртуализации. В их основе лежит принцип относительной стабильности сервисов, которые операционные системы предоставляют для разработчиков прикладных программ. Оказывается, что стабильные участки в жизненном цикле этих сервисов намного превосходят время жизни версий и самих операционных систем.

Было предложено выделить стабильные части из операционных систем и создать на их основе, так называемые среды виртуализации, которые играют роль стабильных промежуточных слоев между операционными системами и прикладными программами. (Подробнее см. Приложение 5).

Примеры: Oracle VM, Docker и др.

В результате стало возможным продлевать жизненный цикл прикладных программ на интервалы времени, определяемые сменой семейств процессоров (определяется системой команд), которые занимают многие десятки лет и сопоставимы со временем жизни АСУ промышленных объектов.

Предлагается разработать среду виртуализации для атомной энергетики с периодом обновления в 30 лет.

## 5 Тенденции развития вычислительных средств

Рост частоты процессора остановился. Закрытии Intel проектов, продолжателей архитектуры NetBurst (Pentium 4) в направлении увеличения тактовой частоты, по сути ознаменовало переход в эпоху многоядерных процессоров (см. рис. 2).



Рис. 2 Тренды развития процессоров

Наметился тренд вытеснения архитектурной платформы x86 архитектурой ARM. Монополии Intel и AMD с архитектурой платформой x86 начинает противостоять большая группа независимых изготовителей и разработчиков процессоров с архитектурной платформой ARM. При этом и Intel, и AMD начинают собственное производство ARM процессоров (см. рис. 3, 4).

ARM Holdings ожидает, что крупномасштабные развертывания серверов, основанных на ARMv8-A-совместимых процессорах, начнутся в 2016 или 2017 году и, что каждый четвертый сервер в 2020 году будет использовать процессор с архитектурой ARM.

Специализирующаяся в области стандартов организация Linaro в настоящее время готовит к выпуску референсную Open Source-платформу для серверов, оснащенных процессорами с 64-разрядной архитектурой ARMv8-A. Эта платформа предоставит производителям чипов, проектировщикам и разработчикам свободное ПО и микропрограммные средства, необходимые для интеграции создаваемых ими продуктов и технологий в ARM-серверы.

Прогнозируется, что бурное развитие и применение ARM архитектуры будет обусловлено взрывными темпами роста технологии IoT (интернет вещей).

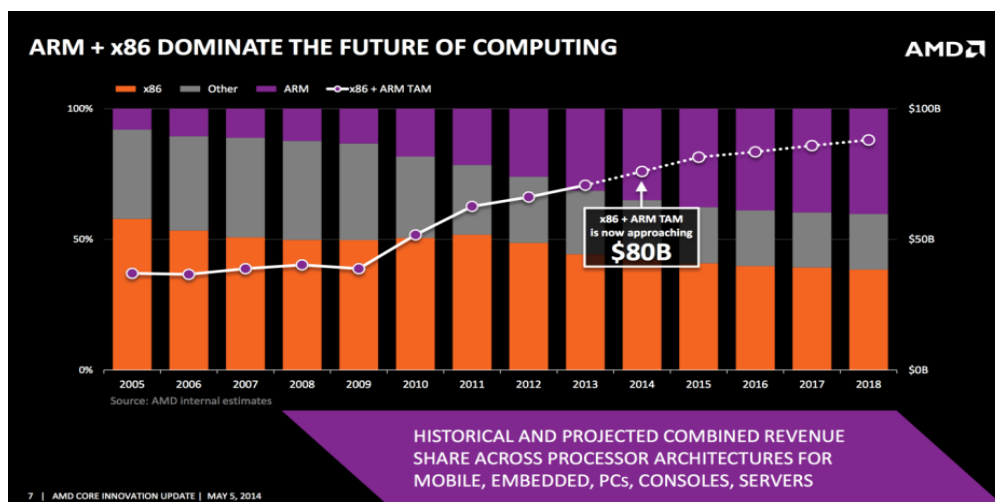


Рис. 3 Тренды развития ARM-процессоров

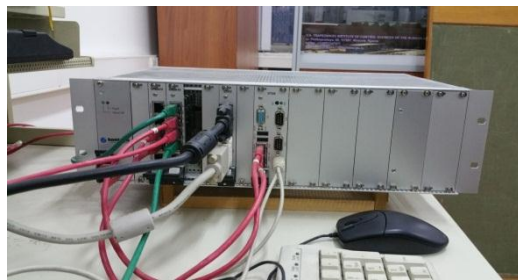
## ARM servers available from multiple manufacturers



*Рис. 4 Платы на основе ARM-процессоров*

Значительное уменьшение массогабаритных характеристик, количества механических контактных соединений, тепловыделения, повышение надежности и помехоустойчивости основаны на технологиях SiP (System-in-Package, «система-в-упаковке») и SoC (System-on-Chip, «система-в-чипе»)

Примеры эволюции системных блоков рабочих станций представлены на рис. 4, 5 и 6, которые соответствуют 2005г., 2016 г. и 2017-2020гг.



*Рис. 4 Устаревший крейт*



*Рис. 8 Современный крейт*



*Рис. 9 Современная плата*

В настоящее время широкое применение SoC технологий в телевизионных приемниках, превращает их в интеллектуальное информационное средство, подключенное к интернет среде.

Эволюция конструкции серверов основана на модульном принципе, называемые Blade-серверами, или серверами-лезвиями (blade — лезвие).

Первыми компаниями, интегрировавшие данные системы в свои IT-инфраструктуры, стали NASA и военные структуры. Впоследствии эту технологию производства серверного оборудования выкупила компания HP, а затем и другие компании – гиганты IT-индустрии: Intel, IBM, DELL, Cisco и др.

Помимо форм-фактора, основные отличия блейд-серверов от традиционных систем в том, что все необходимые элементы управления кластером серверов, мониторинга, питания, охлаждения и пр. физически расположены «в одной коробке». Объединяющим элементом является пассивная системная плата BackPlane.

Преимущества Blade-серверов:

- уменьшение стоимости и повышение надежности;
- сокращение количества коммутационных проводов;
- повышение удобства управления системой;
- уменьшение занимаемого объема;
- уменьшение энергопотребления и выделяемого тепла;
- высокая масштабируемость;
- гибкость.

Компании «Рикор» и «Альт Линукс» представили отечественный аппаратно-программный комплекс. Решение включает блейд-сервер от «Рикор» и операционную систему ALT Linux.

Как говорится в заявлении «Альт Линукс», блейд-сервер от «Рикор» построен на базе ARM-процессоров Armada-XP. На «лезвиях» этого блейд-сервера работает специальная сборка ALT Linux и различные решения под ее управлением.

Среди таких решений: стандартный сервер типа LAMP (Linux+Apache+MySQL+php); модульная система удаленного управления Alterator (ALT Linux); система управления бизнес-процессами Runa WFE; а также удаленное офисное рабочее место, доступное в режиме терминального доступа (VDI).

Подробнее: [http://www.cnews.ru/news/line/rikor\\_i\\_alt\\_linuks\\_predstavili](http://www.cnews.ru/news/line/rikor_i_alt_linuks_predstavili)

Среди разнообразных средств получения информации наибольшую популярность получили несколько технологий искусственного интеллекта.

Первая обеспечивает людей информацией. Это поисковые системы, которые понимают письменную или устную речь и находят ответы на самые разнообразные вопросы.

Вторая технология связана с логистикой и планированием. Это разнообразные навигационные ресурсы: планирование путешествий, поездок по странам и городам и т.п.

На основе указанных технологий строятся системы управления разного назначения. В частности поисковые системы используются для манипулирования потребительской, политической и др. активностями масс людей. В промышленных системах поисковые системы используются для доступа к документам, инструкциям, записям и т.п.

Технологии логистики легли в основу систем управления перевозками такси. Это пример из области транспорта. Но сфера применения технологии планирования гораздо шире.

Третья технология – социальные сети. В ней искусственный интеллект выступает в роли организатора интеллектуальной деятельности множества людей. Такого рода деятельность характерна для работы в промышленности при решении сложных проблем управления и ее интенсификация является, безусловно, актуальной.

Четвертая технология, виртуальная реальность, находится на подъеме и уже занимает прочные позиции в сфере развлечений. Примером применения в технических системах являются тренажеры. Они используются в авиации, управлении судами, машинами и т.п. Для управления АЭС технологии виртуальной реальности могут также использоваться для тренировки персонала. Например, для создания условий, которые невозможно воспроизвести на функциональных и полномасштабных тренажерах: для тренировки работы на резервном пульте управления, управлении АЭС в условиях сейсмических колебаний, при пожарах и т.п. При этом виртуальные модели могут подключаться как к компьютерным моделям, так и к реальным данным от АСУ ТП.

Технологии виртуальной реальности также могут успешно применяться при проектировании/модернизации блочных пультов, их верификации и валидации. При этом могут применяться и технологии дополненной реальности, когда часть оборудования моделируется натурно, а часть при помощи компьютеров.

Технологии дополненной реальности одни из самых новых и перспективных. В АСУ ТП их можно применять для замены традиционных показывающих приборов и компьютерных пультов управления. В первом случае показания можно привязать к месту (метке, коду) на оборудовании или окружающих поверхностях, при сканировании которого цифровой камерой на экране появляются данные измерений. Местные компьютерные пульта управления можно имитировать при помощи переносных устройств, которые будучи помещены в определенное место, автоматически перепрограммируются и выполняют все функции замещаемого компьютера.

Дополненная реальность позволяет совмещать в пространстве видео изображения реальных устройств и информацию о них из АСУ ТП, что позволяет усилить информационную поддержку персоналу при работе с оборудованием АЭС и АСУ ТП на местах их расположения.

Распространение перечисленных технологий сделало их незаменимыми, превратило в часть культуры, цивилизации. Поэтому в системах управления, в тех местах, где используются люди, нужно ориентироваться именно на эти технологии при организации информационной поддержки.

## Выводы

Изменения в вычислительной технике, появление новых устройств и технологий, программном обеспечении открывают новые возможности для создания новых систем верхнего уровня АСУ ТП АЭС, которые будут обладать высокой надежностью, удобством для людей и встроенным искусственным интеллектом.

Новые системы управления АЭС будут состоять из трех основных частей: традиционной автоматики, человека и искусственного интеллекта.

## Литература

1. Менгазетдинов Н.Э., Бывайков М.Е., Зуенков М.А и др. Комплекс работ по созданию первой управляющей системы верхнего блочного уровня АСУТП для АЭС «Бушер» на основе отечественных информационных технологий. – М.: ИПУ РАН, 2013.
2. В.Г. Промыслов, К.В. Семенов, А.С. Шумов Синтез архитектуры кибербезопасности для систем управления атомных станций / Проблемы управления. 2019. № 3. С. 61–71 .
3. Байбулатов А.А., Промыслов В.Г. Аппроксимация огибающей в приложениях «Network calculus» // Проблемы управления. 2016. № 6. С. 59-64.
4. Промыслов В.Г. Assessment of the security architecture of control system using discretionary security models / Proceedings of the 10th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Piscataway, USA: IEEE, 2017. Vol. 1. С. 1-4;
5. Байбулатов А.А., Промыслов В.Г. Control System Availability Assessment Via Maximum Delay Calculation / Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi: IEEE, 2019. С. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8743012>.
6. Байбулатов А.А., Промыслов В.Г. A Technique for Envelope Regression in Network Calculus / Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2017, Moscow). М.: IEEE, 2017. Vol. 1. С. 338-341.
7. С. И. Масолкин, В. Г. Промыслов, “Расчет некоторых параметров промышленной вычислительной сети объектов повышенного риска эксплуатации на примере АСУТП АЭС”, Пробл. управл., 2010, № 1, 47–52
8. Elena Jharko. Quality Evaluation and Risks Under the Development of the Safety Important Systems Software for Nuclear Power Plants / Proceedings of the 14th International Scientific-technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018, Novosibirsk). Novosibirsk: IEEE Catalog Number CFP18471-PRT, 2018. Vol. 1, Part 4. Pp. 430-435, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8545957>.
9. Elena Jharko. Verification and Software Quality Assurance for Nuclear Power Engineering / Proceedings of the 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE Catalog Number CFP18GAE-ART, 2018. С. 1-4, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551840>.
10. Elena Jharko, Ekaterina Sakrutina. Evaluation of Technical and Economic Indexes and Providing Normal Operation of Nuclear Power Plants / Proceedings of the 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE Catalog Number CFP18GAE-ART, 2018. Pp. 1-5, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551827>.
11. Жарко Е.Ф. Верификация и обеспечение качества программного обеспечения для атомной энергетики / Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. С. 447-451.
12. Жарко Е.Ф. К вопросу проведения верификации программного обеспечения для атомной энергетики / Материалы 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. Т.2. С. 238-240.
13. Жарко Е.Ф., Сакрутина Е.А. Оценка технико-экономических показателей и обеспечение нормальной эксплуатации атомной электростанции / Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. С. 451-457.
14. Жарко Е.Ф., Сакрутина Е.А. Прогноз технико-экономических показателей атомной электростанции / Материалы 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. Т.2. С. 240-242.