

УДК 628.012.011.56:628.512:621.311.25:621.039

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ АСУ ТП И КОНЦЕПЦИЯ INDUSTRY 4.0

А.Г. Полетыкин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: poletik@ipu.ru

Е.Ф. Жарко

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: zharko@ipu.ru

Н.Э. Менгаетдинов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: mengazne@ipu.ru

В.Г. Промыслов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: V1925@mail.ru

Ключевые слова: система верхнего уровня, СВБУ, СВСУ, АСУ ТП, АЭС.

Аннотация: Доклад посвящен системам верхнего уровня АСУ ТП АЭС. В докладе проводится критический анализ достижений в этой области в свете изменений в науке, технике и обществе, произошедших за последние 15 лет. Предлагается описание основных черт систем следующего поколения.

1. 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 российских энергоблоков с реакторами на легкой воде типа ВВЭР-1000. Потенциальных заказчиков устраивали экономические характеристики российских АЭС, их надежность и безопасность.

Технические решения по СВБУ АСУ ТП АЭС «Бушер» [1] 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.

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.

В последнее время все большее внимание уделяется так называемой четвертой промышленной революции, являющейся следствием концепции Industry 4.0. В основе атомной энергетики всегда лежала безопасность эксплуатации, основанная на надежном оборудовании контроля и управления. В настоящее время связь между системами АЭС, осуществляемая системами верхнего уровня, становится краеугольным камнем концепции Industry 4.0.

2. Виды и свойства систем верхнего уровня АСУ ТП АЭС

К системам верхнего уровня (СВУ) АСУ ТП АЭС относятся:

- Система верхнего блочного уровня (СВБУ);
- Технические средства оперативно-диспетчерского управления (ТС ОДУ);
- Панели управления системами безопасности;
- Система регистрации важных параметров эксплуатации (СРВПЭ);
- Система верхнего станционного уровня (СВСУ).

ТС ОДУ представляют собой панели с традиционными аналоговыми и цифровыми приборами, которые предназначены для решения 3-х основных задач:

1. Представление персоналу информацию о состоянии основных параметров и технологического оборудования АЭС,
2. Управление основным технологическим оборудованием АЭС,
3. Управление (непродолжительное время) и перевод АЭС в безопасное состояние при отказе СВБУ.

СВБУ предназначена для реализации информационных, управляющих и вспомогательных функций во всех режимах работы энергоблока АЭС.

СРВПЭ предназначена для регистрации, хранения и выдачи информации о техническом состоянии энергоблока до, во время и после аварии в объеме, достаточном для последующего анализа аварийной ситуации и выяснения причин ее возникновения, путей развития, а также анализа действий персонала по ее локализации, ликвидации и предупреждению.

СВСУ предназначена для:

- реализации функции сбора и представления информации о состоянии основного технологического оборудования и систем энергоблоков АЭС, общестанционных технологических систем;
- интеграции информации по обще станционным системам АСУ ТП и важной информации по энергоблокам;
- передачи данных во внешние системы.
- СРВПЭ – это регистратор, не включенный в контур управления, а СВБУ и СВСУ – системы человеко-машинной коммуникации, вовлеченные в управление непосредственно.

СВБУ автоматизирует работу нескольких основных категорий персонала:

- Операторов-технологов реакторного отделения,
- Операторов-технологов турбинного отделения,
- Операторов систем неоперативного контура (систем спецводоочистки, пожароту-

- шения и вентиляции и др.),
- Начальников смены блока (НСБ),
- Персонала цеха ТАИ АСУ ТП.

Определяющей особенностью человеко-машинного интерфейса СВБУ и СВСУ является способ контроля состояния АЭС и управления оборудованием посредством рабочих станций (РС). РС может иметь один или несколько (2-3) пассивных дисплеев, устройства типов трекбол-мышь, обычную и функциональную клавиатуру. Рабочие места (АРМ) СВБУ и СВСУ включают несколько РС, расположенных в ряд. Имеются РС, встроенные в панели ТС ОДУ, но они решают вспомогательные задачи. На приборных (пультовых) стойках РС располагаются отдельные органы управления особо важными агрегатами. В рамках одного АРМ отдельные РС могут иметь специализированное назначение или дублировать друг друга. ЧМИ СВБУ российских АЭС включают также экраны коллективного пользования (ЭКП), расположенные на блочном пульте управления (БПУ), на которых выводятся данные для всеобщего обзора, дублирующие информацию на РС. Отображение сигнализации на СВБУ и СВСУ включает привлечение внимания звуком, цветовое и символьное кодирование, обобщение и представление информации различными способами. Фрагментарно сигнализация дублируется на ТС ОДУ.

С технической точки зрения СВБУ и СВСУ представляют собой многомашинные вычислительные комплексы, связанные с другими системами АСУ ТП (через шлюзы) и между собой локальной вычислительной сетью (ЛВС). Киберзащита СВУ включает средства обеспечения защиты от несанкционированного доступа: механическими запорами, ключами, блокировкой сервисов, разграничением доступа, парольной защитой и др.

3. Анализ СВБУ (СВСУ, СРВПЭ) первого поколения

Приведенное выше описание СВБУ, работающих на энергоблоках АЭС «Бушер» (блок 1), «Куданкулам» (блоки 1, 2), Калининской (блоки 3,4), Ростовской (блоки 3, 4), Нововоронежской (блок 6,7), позволяют объединить их в группу с названием «1-е поколение СВБУ».

Несмотря на то, что СВБУ 1-го поколения убедительно доказали, что управление АЭС при помощи РС возможно и не вызывает критических замечаний, можно выделить ряд недостатков.

- СВБУ эффективно автоматизируют работу только части эксплуатационного персонала. Дополнительные АРМ не обеспечивают потребностей всего персонала, особенно, при пуско-наладочных работах.
- АРМ операторов-технологов, особенно реакторного отделения, включают несколько РС, соединенных в изогнутый ряд и образующих рабочую область большой протяженности. Это приводит к тому, что один оператор в сидячем положении может комфортно работать только с одной 2-х (3-х) дисплейной РС. Исходя из этого ограничения создавался весь дизайн видеокадров. Что указывает на достаточность 2-х (3-х) дисплеев на одном АРМ.
- АРМ НСБ не обеспечивает удобный доступ ко всему набору измеряемых параметров, циркулирующих на всех других РС СВБУ, что было связано с изначальными проектными подходами к распределению информации по АРМам в рамках СВБУ.
- Персонал цеха ТАИ АСУ ТП активно взаимодействует с операторами-технологами, особенно при неисправностях, которые влияют на управление АЭС, но относятся к сфере компетенции персонала цеха ТАИ АСУ ТП. Поскольку АРМ

системы администрирования технических и программных средств (АТПС) АСУ ТП расположен не на блочном пульте, это создает значительные неудобства.

- Для звуковой сигнализации, воспроизводимой РС разных АРМ, используются разные мелодии. Но поскольку эти АРМ находятся в одном помещении, то тревожный звук влияет не только на того, кому это предназначено. Операторам приходится оперировать большим количеством сигнализации, которую невозможно держать в памяти. Методы фильтрации и агрегации сигналов, применяемые в СББУ, не эффективны в решении этой проблемы.
- Модульная конструкция приборных стоек показала свою эффективность, но имеет и недостатки. Один связан с тем, что стойки внутри представляют собой сложное переплетение кабелей, разъемов и т.п. При техническом обслуживании и ремонтах персонал легко может совершить ошибочные действия, которые иногда могут приводить к серьезным отказам. Второй связан с легкостью внедрения и трудным выявлением инородных (вредоносных) элементов кибератаки.
- Опасность кибератак исходит также от подключения к сети принтеров, ИБП, мультимедийных блоков, которые включают в себя полноценные компьютеры с проприетарным программным обеспечением (ПО), а также внешних устройств (флеш-карты, ноутбуки и др.).
- Из-за снятия с производства компонент промышленной электроники СББУ, СВСУ, СРВПЭ столкнулись с проблемой отсутствия ЗИП и необходимостью производить замену технических и программных компонент (модернизацию).
- Модернизация СВУ предусмотрена каждые 10 лет. Она включает замену компонент вычислительной техники, что влечет за собой замену операционных систем и далее внесение существенных изменений в прикладное программное обеспечение. Это дорогое и потенциально опасное мероприятие может снизить надежность СВУ, так как невозможно оценить надежность и безопасность процесса технической поддержки, гарантировать результат (оказание квалифицированной помощи вовремя), что создает дополнительные риски (кибератаки).

4. Вызовы

Вызовы, влияющие на АСУ ТП АЭС, связаны с эволюционными и революционными изменениями в области вычислительной техники, автоматизированных систем управления и человеческого фактора.

4.1. Автоматизированные системы управления

В отличие от старых автоматизированных систем, которые включали машины как объект управления, оборудование АСУ для автоматического и дистанционного управления и людей на самом верхнем уровне, самые современные автоматизированные системы имеют иную структуру. В качестве объектов управления выступают не только машины, но и люди. Для связи с ними используются промышленные и публичные средства коммуникации. Для управления применяется симбиоз человек-машина, где решение задач равноправно распределено между людьми и автоматикой под общим руководством алгоритмов искусственного интеллекта.

Появление и доказанная эффективность нового вида автоматизированных систем позволяет по-новому организовать управление АЭС.

Во-первых, можно непосредственно включить обслуживающий персонал АЭС в качестве объектов управления наряду с механизмами. Это позволит увеличить произ-

водительность труда и минимизировать влияние человеческого фактора на безопасность.

Во-вторых, используя возможности современных средств связи и методы искусственного интеллекта, можно в рамках АСУ ТП АЭС автоматизировать контуры управления, существовавшие в неформализованном виде. Имеется в виду административное управление, техническую поддержку со стороны заводов-изготовителей, экспертов, надзорных органов и т.д. Это может иметь значительный экономический эффект за счет сокращения затрат на документооборот, совещания, командировки и т.п.

4.2. Киберпреступления

Являясь компьютерными системами, АСУ ТП (и АЭС) стали объектами кибератак давно, но в 2008 году, после атак на иранские центрифуги, наступила эпоха кибервойн, которая характеризуется следующими особенностями:

- Целью является нанесение вреда объекту управления,
- Комплексно используются уязвимости в технологическом процессе, системе охраны и информационной безопасности,
- Явно уличить виновных невозможно,
- Кибератаки применяются однократно, после чего утрачивают разрушительную силу.
- Ответ проектировщиков СВУ должен быть симметричным. Это означает, что:
- Защищать нужно объект, используя методы оценки риска по аналогии с теми, что применяются для технологической и специальной безопасности,
- Защита должна комплексно использовать все средства из арсенала информационной, технологической и специальной безопасности,
- Защита должна совершенствоваться по мере развития методов нападения.

Защиту от киберугроз предлагается рассматривать как непрерывный процесс, охватывающий все этапы жизненного цикла, включая эксплуатацию. Для реализации этого процесса в СВБУ должна решаться специальная задача. Для нее в проекте необходимо предусмотреть: помещение, персонал и специальные аналитические инструменты, позволяющие оперативно контролировать уровень безопасности, выявлять новые угрозы, оценивать риски и выбирать меры по их минимизации.

4.3. Изменение ментальности

Web, поисковые системы и офисные программы сделали информацию доступной, а бумажную форму не нужной. Беспроводные сети, ноутбуки, планшеты и смартфоны обеспечили доступ к информации из любой точки в пространстве, а перемещение к ее источникам не нужным. Социальные сети создали виртуальную среду общения, сделав очные встречи не нужными. «Интернет вещей» обеспечил удаленный интерфейс людей и машин, что сделало не нужным физический доступ к ним.

Все эти достижения революционно повлияли на способы жизни, работы и мышления людей. В частности, это изменило общий способ решения проблем, которым пользуются люди. Если возникает бытовая проблема, то современный человек осуществляет следующие действия:

1. Производит запрос к поисковой системе (Google, Yandex или др.),
2. Если ответ не позволяет решить проблему, то он обращается к социальным сетям, размещая текстовые описания наряду с аудио и видеoinформацией.
3. Если и это не помогает, то человек пытается разобраться сам, привлекая информацию из таких источников, как Википедия, электронные инструкции и мануалы, размещенные в сети и т.п.

4. Если самостоятельно решить проблему не получается, то прибегают к традиционным способам (звонки в сервисные центры, вызов специалистов, эвакуация и т.п.), используя при этом все возможности Интернет.

Пункты 1, 2, 3 могут меняться местами для разных людей. Нетрудно заметить, что способы решения проблем не совпадают с теми, какими решаются проблемы на производстве. И это порождает диссонанс, заставляя людей постоянно перестраивать способ мышления с бытового на профессиональный.

Между тем описанный новый способ решения проблем в быту выработан в результате развития человеческой цивилизации и внедрения самых современных технологий: искусственного интеллекта (I), автоматизированного интересубъектного взаимодействия (II), Интернет (III). Он намного более современный и эффективный, чем старый, основанный на библиотеках документов, телефонных переговорах, совещаниях, командировках и т.п. Его адаптация к производственной деятельности сулит большую экономию человеческого рабочего времени, одновременно повышая качество продукции. Адаптация в части СВБУ состоит в создании развитых производственных сетей обмена информацией и в применении информационных инструментов, включая:

- Производственные поисковые системы с управлением при помощи текстов на естественном языке, голосом,
- Системы интересубъектного аудита, поддерживающие работу целевых виртуальных экспертных групп,
- Экспертные систем для решения различных задач,
- Банки данных и знаний по тематике производства и др.

4.4. Фундаментальные ограничения вычислительной техники

К настоящему времени иллюзии о том, что возможно путем верификации и валидации создавать ПО без ошибок, можно считать окончательно утратившими силу. Осознано, что компьютеры современной архитектуры, всегда будут иметь ошибки. Это такое же фундаментальное ограничение как скорость света.

В силу невозможности определить вероятность ошибочной работы ПО для АСУ, ошибки в которых могут приводить к большим потерям, риск применения ПО считается недопустимым. Это касается АЭС: применить ПО можно только в тех случаях, когда возможный ущерб и риск не критичен, например, для решения задач контроля, диагностики, информационной поддержки и др. при нормальной эксплуатации, но нельзя применять для управления системами безопасности.

Часть ошибок ПО можно использовать для организации киберпреступлений. Это так называемые уязвимости ПО. Их наличие – точнее невозможность убедиться в их отсутствии – также следует рассматривать как ограничение. Оно ограничивает возможность применения вычислительной техники, если возможный ущерб от киберпреступлений велик, а эффективных мер борьбы с потенциальными киберпреступниками нет или они не применяются.

В отличие от ошибок в ПО, для противодействия киберпреступникам разработаны многочисленные способы борьбы. Анализ угроз, оценка рисков с последующими выбором и реализацией мер киберзащиты могут снять данное ограничение для конкретных АСУ или их частей.

По-видимому, такое положение дел будет сохраняться, пока не будут разработаны принципиально новые виды вычислительной техники, но это дело будущего.

5. Новые функции СВБУ

Был проведен анализ стандартов, касающихся СВБУ. В результате были выявлены те их требования, которые не реализованы в СВБУ-1 в полном объеме. В таблице 1 представлены результаты с предложениями по учету в СВБУ-2.

Концепция систем верхнего уровня АСУ ТП АЭС включает не только расширение функций СВУ в соответствии с требованиями стандартов, но и переход на новые технические средства (например, для рабочих станций предлагаются неразборные самопрограммирующиеся конструкции (моноблоки), в которых единственный дисплей и компоненты электроники смонтированы в виде единого прибора, который монтируется на АРМ и имеет подключение к электропитанию; для серверов предлагается использовать блейд-серверы, которые могут содержать одинаковые вычислительные модули, объединенные сетевыми интерфейсами), а также включения в состав технических средств СВУ нового поколения мобильных устройств, которые будут полностью дублировать информационные функции РС операторов-технологов и использоваться для различных целей, в частности, для работы с панелями систем безопасности.

Объектом автоматизации для СВБУ-1 является АЭС в части технологического оборудования и АСУ ТП. Для СВБУ-2 в состав объектов автоматизации предлагается дополнительно включить персонал АЭС, непосредственно вовлеченный в процесс эксплуатации технологического оборудования.

Таблица 1. Сравнение СВБУ первого и второго поколений.

| Стандарт | Пункт стандарта | СВБУ 1-го поколения | СВБУ 2-го поколения | Примечание |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ГОСТ Р ИСО 11064-6-2013 [2] | 5.4.8. | ± | + | Для СВБУ-1 дифференциация есть только, но частичная. Нет дифференциации по группам важности, технологическим подсистемам. В СВБУ-2 предлагается звуковую сигнализацию дополнить голосовым сообщением, дифференцированным с нужной степенью детализации. |
| ГОСТ Р МЭК 60073-2000 [3] | 4.2.3.2 | – | + | В СВБУ-1 не 2 частоты, а 3 – 0,5Гц, 2Гц, 8Гц. В СВБУ-2 предлагается удалить частоту 8Гц, которая используется только для обозначения хода задвижек. Использовать для этого нормальное мигание. |
| IEC 61227:2008 [4] | 5.2.5, 5.3 | – | – | В СВБУ-2 не предусмотрены много дисплейные рабочие станции. |

| Стандарт | Пункт стандарта | СВБУ 1-го поколения | СВБУ 2-го поколения | Примечание |
|--------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IEC 61772:2009 [5] | 4.2, 6 | ± | + | <p>В СВБУ-2 предлагается:</p> <ul style="list-style-type: none"> – предоставить оперативному и ремонтному персоналу доступ через дисплеи рабочей станции ко всей станционной информации как непосредственно измеряемой, так и получаемой в результате обработки данных, а также специальные средства, позволяющие отображать следующую информацию: <ul style="list-style-type: none"> • логические алгоритмы управления; • уставки срабатывания защиты; • уставки срабатывания сигнализации; • масштабирующие коэффициенты сигналов; • назначения входов и другие характеристики, используемые для определения качества функционирования дисплейной системы – внедрить экраны коллективного пользования |
| IEC 62241:2004 [6] | 8.3.1, 8.3.2 | ± | + | <p>В СВБУ-2 предлагается:</p> <ul style="list-style-type: none"> – предусмотреть средства подавления сигнализации вручную, позволяющие выбрать сигнал и определить требуемую функцию подавления. – предусмотреть средства, позволяющие проводить проверку, регистрацию, возврат в работу и подтверждение подавляемой сигнализации – предусмотреть средства, позволяющие оператору управлять подавлением сигнализации, которая повторяется и является шумящей |

| Стандарт | Пункт стандарта | СВБУ 1-го поколения | СВБУ 2-го поколения | Примечание |
|---------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ГОСТ Р МЭК 60964-2012 [7] | 7.7.2.5, 7.9.1 | ± | + | <p>В СВБУ-2</p> <ul style="list-style-type: none"> – для повышения безопасности, работоспособности и эффективности АС предлагается предусмотреть: <ul style="list-style-type: none"> • функции поддержки оператора, такие как отображение параметров безопасности и контроль за функциями безопасности (see IEC 60960); • функции диагностирования АС; • функции выдачи советов оператору в режимах нормальной эксплуатации послеаварийных ситуациях, например основанные на симптомно-ориентированных и событийно-ориентированных процедурах; • функции автоматического контроля энергетических режимов – для повышения эффективности и безопасности АС между БПУ и другими информационными центрами желательно предусмотреть системы неречевой коммуникации, такие как факсимильная связь и каналы передачи данных (между компьютерами) |

СВБУ-2 должна выполнять все функции СВБУ-1, а также дополнительные функции:

- информационные (контроль состава, физического состояния и местоположения оперативного персонала АЭС; функции системы подготовки данных (внесение изменений в ПО); отображение информации и ведение диалога в части интеллектуальной поддержки и т.д.),
- управляющие (голосовое управление видеокдрами, выдача распоряжений персоналу АЭС, выполнение команд по блокированию и восстановлению оборудования СВБУ при наличии подозрений о кибератаках, автоматическое блокирование оборудования СВБУ при наличии признаков кибератак),
- диагностические (диагностика состояния персонала по медицинским показателям),
- вспомогательные (временное понижение важности сигнализации, обеспечение многосторонней мультимедийной связи),
- информационная (интеллектуальная) поддержка персонала.

Список литературы

1. Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетькин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г. Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и телемеханика. 2006. № 5. С. 65-79.

2. ГОСТ Р ИСО 11064-6-2013. Эргономическое проектирование центров управления. Часть 6. Требования к окружающей среде.
3. ГОСТ Р МЭК 60073-2000. Интерфейс человекомашиный. Маркировка и обозначения органов управления и контрольных устройств. Правила кодирования информации.
4. IEC 61227:2008. Nuclear power plants – Control rooms – Operator controls.
5. IEC 61772:2009. Nuclear power plants – Control rooms – Application of visual display units (VDUs).
6. IEC 62241:2004. Nuclear power plants – Main control room – Alarm functions and presentation.
7. ГОСТ Р МЭК 60964-2012. Пункты управления. Проектирование. Атомные станции.