

## ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО АДАПТИВНОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ОПЕРАТОРОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Н. Анохин, А.Н. Черняев (АО «Русатом Автоматизированные системы управления»)

Рост сложности технологических объектов управления, а также увеличение потоков информации в АСУ неминуемо ведут к усложнению человеко-машинного интерфейса, что, в свою очередь, чревато информационными перегрузками операторов. Одним из возможных путей решения данной проблемы является дозированное представление информации оператору, осуществляемое с учетом сложившейся ситуации. Для реализации этого подхода в настоящей статье предлагается концепция адаптивного многослойного интерфейса, в котором состав и форма представления информации изменяются в зависимости от задач оператора. Предложенный интерфейс включает три слоя: структурный, аналитический и функциональный, которые могут визуализироваться в зависимости от ситуации. В качестве критериев визуализации того или иного слоя выступают привычность ситуации, необходимость выполнения ментальных операций, наличие динамики в поведении объекта управления, необходимость оценки эффективности выполнения функций и др. Проектирование слоев такого интерфейса основано на функциональном анализе, в ходе которого технологический процесс описывается в виде взаимодействия технологических функций, для каждой из которых определяются критерии их эффективности. Функциональное проектирование многослойного адаптивного интерфейса иллюстрируется на примере простой технологической системы теплоснабжения.

Ключевые слова: многослойный интерфейс, адаптация, человек-оператор, атомная станция, технологическая система, управление, функциональный анализ.

### Введение

подавляющее большинство крупных современных промышленных предприятий уже перешли или переходят с традиционного «кнопочно-лампочно-приборного» человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) на дисплейный, когда весь контроль и управление объектом ведутся через экран дисплея посредством мыши, трекбола и других манипуляторов. На сегодняшний день «мэйнстримом» в дисплейном ЧМИ является отображение мнемосхем, на которые наложена динамическая информация — текущие состояние оборудования и значения технологических параметров. Важным качеством такого ЧМИ является демонстрация технологических взаимосвязей оборудования, полностью совпадающая с информационной моделью объекта, сложившейся и у операторов, и у технологов. Однако подобное представление информации почти никак не облегчает отслеживание динамики, анализ балансных соотношений, учет функциональных и причинно-следственных отношений и другой информации, необходимой для глубокого понимания состояния объекта управления.

В то же время, процесс управления сложными человеко-машинными системами, такими как атомные электростанции (АЭС), сам по себе является сложной, многоуровневой и многогранной деятельностью. Основными факторами, свидетельствующими об этом, являются:

- разнородность задач, методов и способов управления, включая разнородность используемых математических методов, методов моделирования и принципов автоматизации;

- растущие требования к экономической эффективности, повышению производительности, снижению затрат, повышению коэффициента использования установленной мощности и, одновременно, ужесточение требований к безопасности.

Эти факторы приводят, в свою очередь, к высокой разнородности деятельности оперативного персонала, связанной с управлением объектом. Диапазон характеристик этой деятельности простирается от привычных многократно отработанных действий в хорошо известных эксплуатационных режимах до управления малоизвестными и неожиданными ситуациями, от рутинного выполнения элементарных ручных операций до контроля за полностью автоматическими срабатываниями, от периодов безделья до запредельной нагрузки, от малоответственных операций до действий, способных нанести значительный ущерб системе и окружающей среде. В разных ситуациях в ходе работы могут изменяться не только задачи, но и цели и приоритеты управления, уровни мышления и типы поведения операторов. Эти обстоятельства существенно затрудняют вопрос о распределении функций между человеком и автоматикой, а также зачастую влияют и на следующий шаг — проектирование ЧМИ.

Для определения круга задач, на поддержку которых должен быть нацелен ЧМИ, рассмотрим и классифицируем разновидности управления, реализуемого операторами:

- по удаленности оператора от объекта управления (управляемого оборудования) управление подразделяется на местное и дистанционное (удаленное);

- по степени автоматизации управления обычно выделяются ручное, автоматизированное, автоматическое; автоматизированное управление, в свою очередь, также может иметь множество градаций в зависимости от исполняемой человеком роли;

- по цели управления возможно управление, направленное на достижение результата функционирования системы независимо от цены и качества, на повышение коэффициентов использования и готовности, на повышение качества функционирования и качества продукции, на минимизацию временных и материальных затрат, на обеспечение безопасности; цели могут меняться и дополнять друг друга в зависимости от ситуации;

- по характеру целевой функции различаются стабилизация (минимизация расхождения между заданным и текущим значениями состояния объекта), слежение, достижение экстремума определенной функции (параметра, показателя), недопущение достижения определенного состояния, оптимальное управление, адаптивное управление, программное управление [1];

- по уровню агрегированности управляемого оборудования возможно управление отдельным оборудованием, управление группой (функциональной или технологической) оборудования, управление технологической системой, управление всем объектом целиком;

- по уровню абстракции функционального управления можно выделить управление технологической средой, управление технологической функцией и управления целями функционирования объекта;

- по стратегии управления известны событийно-ориентированный и симптомно-ориентированный подходы к управлению;

- по типам поведения человека в ходе управления можно выделить действия, выполняемые на уровне навыков, правил и знаний.

Данный перечень можно развивать и детализировать, однако это тема отдельной работы. Здесь же мы остановимся на функциях, выполняемых ЧМИ для поддержки операторов при решении различных задач управления. Анализ упомянутого выше разнообразия задач оператора и видов управления, а также общение с оперативным персоналом АЭС выявили три основные философии ЧМИ, эффективно «покрывающие» большинство операторских задач:

- интерфейс, облегчающий анализ ситуации, — такой ЧМИ основан на представлении технологической информации в виде графических образов, переносящих мыслительный процесс на уровень восприятия (ЧМИ данного типа в литературе получил название «экологический интерфейс» [2], «когнитивная графика», «высокопроизводительный интерфейс» [3]);

- функционально-ориентированный интерфейс [4] представляет работу объекта в виде совокупности обобщенных высокоуровневых индикаторов, каждый из которых характеризует состояние технологической функции вместо традиционного представления состояния технологических сред, насосов и задвижек;

- интерфейс, ориентированный на задачу, когда на один экран сводится разнородная информация (процедуры, мнемосхема, технологические параметры, графики и др.), релевантная выполняемой задаче.

Совершенно очевидно, что не существует универсального ЧМИ «на все случаи жизни». Эффективность каждого способа представления информации зависит от массы факторов: от эксплуатационного режима, от типа решаемой задачи, от уровня управления и др. Возможным решением в данной ситуации является создание адаптивного интерфейса, предлагающего оператору наиболее эффективные в данных условиях способы визуализации информации. В качестве инструмента для реализации такого интерфейса может послужить концепция многослойного представления информации, состоящая в том, что одна и та же технологическая информация может быть по-разному представлена на разных слоях, которые могут быть видимыми или невидимыми в зависимости от обстоятельств. Назовем такой подход адаптивным многослойным интерфейсом. В настоящей статье предлагаются основные принципы и подходы к проектированию такого ЧМИ.

### Структура многослойного ЧМИ

В одной из наиболее часто цитируемых статей [5] под многослойным интерфейсом понимается такая конструкция, которая позволяет пользователю управлять набором возможностей, доступных в данный момент на экране. В качестве «возможностей» в данной статье мы будем понимать визуализацию трех слоев, а именно:

- *структурного*, предназначенного для отображения структуры объекта управления, как правило, в виде технологической схемы (мнемосхемы) с наложенными на нее технологическими параметрами;

- *аналитического*, накладываемого на структурный и предназначенного для поддержки когнитивных действий, выполняемых оператором;

- *функционального*, визуализирующего состояние технологических функций, выполняемых оборудованием АЭС.

Слои могут проектироваться таким образом, чтобы будучи наложенными друг на друга, они образовывали целостную картину, не перекрывая и не мешая друг другу. В этом случае адаптивность ЧМИ состоит в отображении или скрытии того или иного слоя в зависимости от определенных факторов. Каждый слой может находиться в одном из четырех состояний:

- не отображаться;

- быть непрозрачным — в этом случае слои, находящиеся под ним, не видны;

- быть прозрачным, когда, наряду с данным слоем, видны слои, находящиеся под ним;

- быть в полупрозрачном состоянии, когда слои, находящиеся под ним, видны в неконтрастном исполнении, что позволяет визуально акцентировать необходимую информацию и управлять вниманием оператора [6].

Если верхний слой полностью прозрачен, то присутствующая на нем информация объединяется

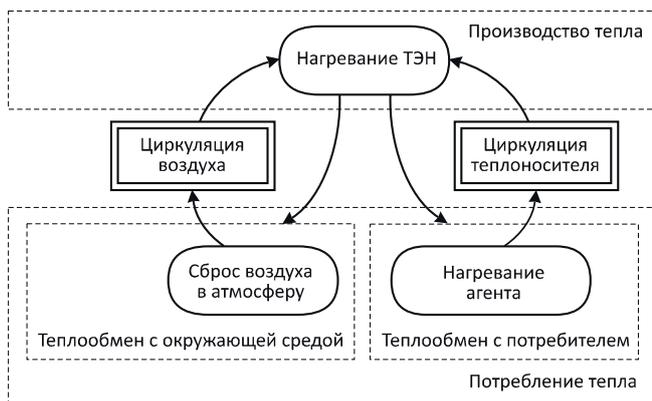


Рис. 1. Сеть технологических и абстрактных функций

с информацией нижнего (фонового) слоя. Иными словами, к информации нижнего слоя добавляется информация верхнего слоя. Если верхний слой непрозрачен, то на экране видна информация только этого слоя.

Перевод слоя из одного состояния в другое может осуществляться как вручную, так и автоматически, в соответствии с заданным алгоритмом, например, в результате изменения эксплуатационного режима, ситуации или перехода на очередной уровень глубокоэшелонированной защиты.

Процесс проектирования адаптивного интерфейса включает в себя:

- проектирование базового структурного слоя с использованием схем технологических систем, разработанных в ходе проектирования технологического объекта управления (ТОУ);
- проектирование функционального слоя на основе результатов анализа технологических функций, проведенного в рамках общего функционального анализа ТОУ;
- проектирование аналитического слоя на основе анализа задач управления;
- разработка алгоритма адаптации ЧМИ, то есть сценария и критериев активации различных слоев.

Проиллюстрируем проектирование прототипа адаптивного ЧМИ на примере. Учитывая, что реальная АЭС — чрезвычайно сложный объект с большим числом внутренних взаимосвязей, учет которых превратит пример в головоломку, возьмем для нашего прототипа простую технологическую систему теплоснабжения. Аналогично АЭС в этой системе реализуются перемещение различных технологических сред, генерация и передача тепловой энергии, обеспечение безопасности и другие характерные для любого ТОУ функции и процессы.

#### Разработка структурного слоя

Как уже отмечалось, структурный слой основан на мнемосхеме технологического объекта. В нашем случае система теплоснабжения представляет собой замкнутый контур, по которому циркулирует теплоноситель.

Тепло производится в результате преобразования электрической энергии в тепловую посредством трубчатого электронагревателя (ТЭН) — основного элемента

электрического котла. Циркуляция теплоносителя обеспечивается двумя насосами (основным и резервным), для нормального функционирования которых предусмотрен контур рециркуляции. Проходя через электрический котел, теплоноситель омывает ТЭН, нагревается и далее подается в теплообменник. В нем осуществляется передача тепла потребителю посредством нагревания некоторого агента — воды, газа или другой среды. При нарушении циркуляции теплоносителя активируется аварийная система обдува ТЭН воздухом, который затем сбрасывается в атмосферу через вентиляционную трубу, что позволяет избежать перегрева котла.

В качестве контролируемых параметров выступают: сила тока через ТЭН, температура ТЭН, температура теплоносителя на выходе из электрокотла, температура теплоносителя на выходе из теплообменника, температура воды на выходе из теплообменника, давление теплоносителя перед электрокотлом, расход теплоносителя на входе в электрокотел, состояние каждого насоса (включен/отключен, готов/не готов), состояние газодувки (включена/отключена, готова/не готова).

#### Разработка функционального слоя

Функциональный слой формируется в результате функционального анализа ТОУ — общепринятой методологии, позволяющей выполнять системное проектирование сложного технологического объекта [7]. Используемая в настоящей работе методика [8] состоит в построении четырехуровневой иерархии. На верхнем уровне иерархии представлена цель (одна или несколько) системы. Второй уровень состоит из абстрактных функций, описывающих цель в терминах физических процессов, таких как преобразование или транспортировка энергии. На следующем уровне представлены технологические функции, с помощью которых выполняются абстрактные функции. Эти функции формулируются в терминах конкретных процессов, происходящих с технологическими средами, например, нагревание теплоносителя, транспортировка вещества и т.п. Технологический процесс — это, по существу, взаимодействие технологических функций.

С функциональной точки зрения работа рассматриваемой системы теплоснабжения представляет собой реализацию пяти взаимодействующих технологических функций: нагревание ТЭН, циркуляция теплоносителя, нагревание агента, циркуляция воздуха, сброс воздуха в атмосферу (рис. 1). Эти пять технологических функций обеспечивают выполнение двух абстрактных функций верхнего уровня: производство тепла и потребление тепла, которые должны быть сбалансированы для достижения целей эффективности и безопасности системы теплоснабжения.

Эффективность и безопасность технологического процесса зависят от состояния и результативности выполнения каждой из этих функций. В результате анализа технологических функций, для каждой из них

Таблица. Критерии эффективного выполнения функций

Функция	Критерий результативности	№ критерия
Нагревание ТЭН	Сила тока 10...80 А	1
Циркуляции теплоносителя	Давление теплоносителя перед электрокотлом обеспечивает запас до кипения $\geq 15^\circ\text{C}$ (например, $\geq 1,8$ МПа при температуре теплоносителя $180^\circ\text{C}$ )	2
	Расход теплоносителя на входе в электрокотел $\geq 20$ кг/с	3
	Расход теплоносителя на входе в электрокотел пропорционален силе тока через ТЭН	4
	Температура теплоносителя на выходе из электрокотла $< 180^\circ\text{C}$	5
	Температура ТЭН $\leq 240^\circ\text{C}$	6
Нагревание агента	Температура агента на выходе из теплообменника $\leq 20^\circ\text{C}$ ниже температуры теплоносителя на выходе из электрокотла	7
	Температура теплоносителя на выходе из теплообменника на $60...80^\circ\text{C}$ ниже температуры ТЭН	8
Циркуляция воздуха	Температура ТЭН $\leq 240^\circ\text{C}$	9
Сброс воздуха в атмосферу	—	—

определены критерии, свидетельствующие о ее результативности (таблица).

Для функции сброса воздуха в атмосферу показатели не предусмотрены, так как она является пассивной и выполняется при любых условиях.

Для оценки состояния функций наряду с критериями результативности могут использоваться определенные дополнительные условия. Например, состояние функции циркуляции теплоносителя определяется на основе следующих условий:

- наличие одного включенного насоса и одного резервного насоса означает, что функция активна;

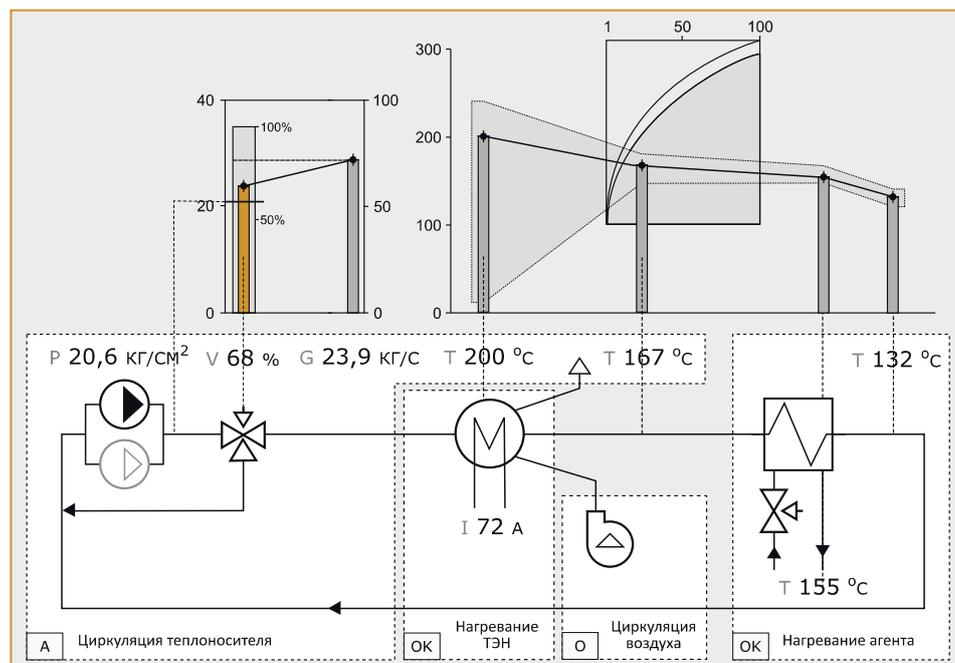


Рис. 2. ЧМИ для контроля системы теплоснабжения: представлены структурный слой и наложенные на него прозрачные аналитический и функциональный слои; верхний насос в работе, нижний в ремонте, газодувка отключена

- второй насос выведен из работы в ремонт (то есть отсутствует резервный насос) — надежность функции находится под угрозой.

Функциональный слой представляет собой совокупность геометрических фигур, визуально «покрывающих» соответствующую функциональную группу оборудования. Состояние функции кодируется специальным маркером, пиктограммой, цветом заливки, цветом контура фигуры или другим способом. В данном примере (рис. 2) маркером А в нижнем левом углу фигуры показана неэффективная функция, маркером ОК — нормально выполняемая, а маркером О — неактивная функция.

### Разработка аналитического слоя

Аналитический слой должен облегчать оценку состояния системы и, прежде всего, оценку состояния функций. Для облегчения общей оценки оператором температурного режима строится диаграмма (рис. 2), на которую сводятся все температуры, измеряемые по ходу движения среды (учитывая необходимость сравнения нескольких значений температуры по ходу среды, циркуляционный контур системы теплоснабжения развернут в прямую линию). На диаграмме выделяется область допустимых значений параметров. В соответствии с условиями 5–9, границы этой области являются динамическими и зависят от температуры ТЭН и температуры теплоносителя на выходе из электрокотла.

На следующем шаге для контроля запаса до кипения строится Р-Т диаграмма (диаграмма «давление-температура»). Первая кривая на этой диаграмме показывает зависимость температуры кипения от давления. Вторая кривая рисуется на  $15^\circ\text{C}$  ниже первой кривой. Область ниже второй кривой соответствует выполнению условия 2 (поддержание запаса до кипения теплоносителя  $\geq 15^\circ\text{C}$ ).

Во избежание отвлечения внимания области допустимых значений закрашиваются цветом низкой цветовой насыщенности. При необходимости (например, в случае приближения параметра к предельно допустимому значению) в диаграмму добавляется линия ненасыщенного красного цвета, отражающая верхнюю уставку температуры теплоносителя на выходе из электрокотла. Аналогичная уставочная линия может добавляться и к столбику температуры ТЭН на диаграмме температур.

Для отображения соответствия расхода теплоносителя на входе в электрокотел силе тока через ТЭН (условия

3, 4) строится столбиковая диаграмма, в которой правый столбик показывает силу тока, а левый — расход теплоносителя. Шкала расхода масштабируется таким образом, чтобы любое значение силы тока и соответствующее ему значение расхода находились на одной горизонтальной линии. Таким образом, необходимый в данный момент расход указывается горизонтальной линией, проведенной из текущего значения силы тока.

На этой же диаграмме показана шкала положения регулирующего клапана, изображенная в виде прямоугольника позади столбика расхода. Высота этого прямоугольника является переменной и соответствует пропускной способности полностью открытого клапана при текущем давлении. Это дает оператору возможность увидеть, сможет ли он в данной ситуации в принципе добиться необходимого расхода даже при полном открытии клапана.

**Алгоритм адаптации**

Как уже отмечалось, адаптивность многослойного ЧМИ состоит в визуализации и скрытии того или иного слоя в зависимости от типа и когнитивной сложности выполняемой задачи, от роли оператора в решении задачи и других факторов (рис. 3). Сформулируем качественные критерии, позволяющие определить оптимальный слой, необходимый операторам.

Структурный слой является базовым и существенно облегчает операторам привязку любой дополнительной информации к технологическому оборудованию и технологическим участкам АЭС. Структурный слой служит своего рода «географической картой» для оператора и его отображение является желательным в большинстве случаев.

Аналитический слой необходим в следующих случаях:

- ситуация малознакома и непривычна для операторов, а эксплуатационная процедура является неполной или неэффективной; операторам приходится самостоятельно разбираться в причинах происшедшего;

- для понимания ситуации и принятия решения операторам необходимо выполнять большой объем ментальных операций, таких как сопоставление нескольких параметров друг с другом и с уставками, сложение и вычитание величин и др.;

- ситуация является динамичной и в процессе отслеживания этой динамики операторам необходимо быстро оценить, насколько скоординированно развивается процесс в различных частях системы;

- в текущей ситуации важно отслеживать материальные и энергетические балансы, а также имеющиеся запасы технологических сред и энергии.

Функциональный слой эффективен в случаях, если:

- операторы должны отслеживать, достигается ли цель функционирования технологической системы или группы оборудования;

- для оценки эффективности работы оборудования и систем необходимо не только проанализировать значения технологических параметров, но и учесть несколько логических условий, таких как режим работы и состояние оборудования;

- существуют альтернативные способы выполнения технологических функций высокого уровня, и оператор должен учитывать это в процессе принятия решения.

Функциональный и экологический подходы к представлению информации эффективны также для оценки состояния станции в целом, особенно в случае серьезных нарушений, связанных с глубокими материальными и энергетическими дисбалансами.

Выявление ситуаций и задач, в которых операторы сталкиваются с перечисленными выше фактора-

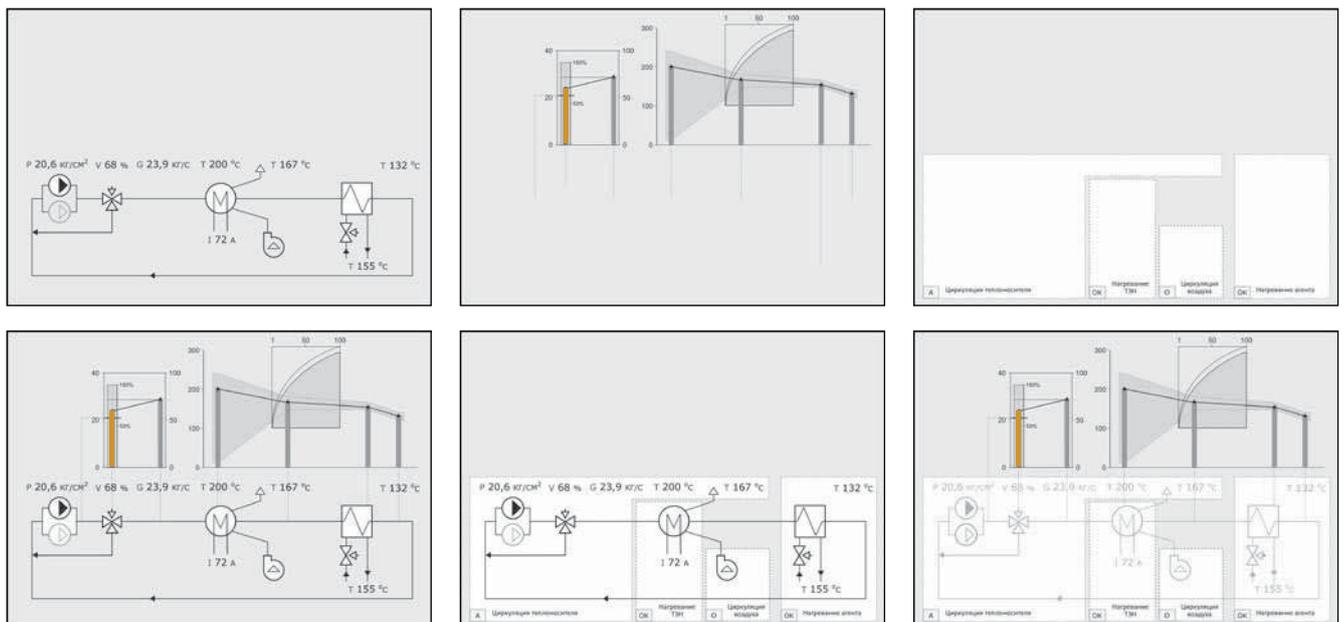


Рис. 3. Слои интерфейса (слева направо, сверху вниз): структурный, аналитический, функциональный, структурный и прозрачный аналитический, структурный и прозрачный функциональный, структурный, прозрачный аналитический и полупрозрачный функциональный

ми, осуществляется в ходе функционального анализа и анализа задач.

### Обсуждение и выводы

Проблема информационной перегрузки операторов, особенно в переходных и аварийных режимах упоминается многими исследователями как в современных публикациях, так и в работах второй половины XX века. В сложных ситуациях очень важно сфокусировать внимание оператора на важной информации и отобразить эту информацию так, чтобы оператор увидел именно то, что является значимым в данный момент. Иными словами, интерфейс должен менять содержание и форму представления информации в зависимости от ситуации и задач оператора. Это свойство интерфейса называется адаптивностью. Обзор основных принципов адаптивного интерфейса выполнен в [9].

Основная идея данной работы состояла в представлении идеи адаптивного многослойного интерфейса и разработке процесса его функционального проектирования на примере простого объекта — системы теплоснабжения. Для повышения строгости процесса проектирования предлагается рассматривать функционирование технологического объекта как совокупность функций, обеспечивающих достижение цели и соблюдение материальных и энергетических балансов, таких как «производство тепла — потребление тепла», «потеря теплоносителя — подпитка теплоносителя». В этом случае появление в технологическом процессе некоторой функции, нарушающей баланс, требует внедрения другой, «ответной» функции, восстанавливающей баланс, нарушаемый исходной функцией.

Предложенная парадигма многослойного интерфейса включает в себя сочетание структурного, аналитического и функционального слоев, которые могут визуализироваться в зависимости от ситуации. С одной стороны, это существенно повышает гибкость ЧМИ и расширяет число задач оператора, которые этот ЧМИ способен поддерживать. С другой стороны, смена картинки в самый ответственный и сложный момент может запутать оператора вместо того, чтобы облегчить его работу. Оператор привыкает к той компоновке информации, с которой он работает подавляющую часть времени. Замена привычной картинки новым, даже самым эффективным представлением может потребовать от оператора вызова совершенно другой ментальной модели, что в стрессовых условиях чревато потерей времени и ошибками.

Поэтому очень важно, чтобы операторский интерфейс имел некоторый стабильный неизменный образ. В рассмотренном в настоящей статье примере в качестве такого неизменного образа предлагается использование привычных мнемосхем, на которые при необходимости накладывается дополнительная информация.

В рассмотренном выше примере реализации многослойного интерфейса использована очень упрощенная схема технологического объекта. Очевидно, что реальная схема выглядит намного сложнее. К основному оборудованию добавляется отсечная арматура, линии для заполнения контура теплоносителем и другое оборудование. Очевидно, что усложнение системы непременно приведет к усложнению процесса проектирования видеокadra. К сожалению, этот процесс пока трудно поддается алгоритмизации и является, скорее, творческим, нежели рутинным.

В качестве направления дальнейшего исследования концепции многослойного ЧМИ предлагается создание библиотеки унифицированных решений, позволяющих разработчику легко и быстро выбирать нужные формы представления и компоновать видеокادر, а также экспериментальная оценка эффективности интерфейса такого рода и востребованности различных слоев реальными операторами.

### Список литературы

1. Теория автоматического управления / Под ред. А. А. Воронова. М.: Высш. шк., 1986.
2. Vicente K.J., Rasmussen J. Ecological interface design: theoretical foundations // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1992. Vol. 22. No 4. P. 589-606.
3. Hollifield B., Oliver D., Nimmo I., Habibi E. The High Performance HMI Handbook. Plant Automation Services, 2008.
4. Pirus D. Functional HSI for computerized operation // Proceedings of NPIC&HMIT 2004 (Columbus, OH, USA, September 19-22, 2004). La Grange Park, IL: ANS Inc., 2004. P. 1165-1172.
5. Shneiderman B. Promoting universal usability with multi-layer interface design / Proceedings of the 2003 Conference on Universal Usability: CUU '03 (Vancouver, British Columbia, Canada, November 10-11, 2003). P. 1-8.
6. Harrison B.L., Ishii H., Vicente K.J., Buxton W.A. Transparent layered user interfaces: an evaluation of a display design to enhance focused and divided attention / Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems: CHI '95 (Denver, Colorado, USA, May 7-11, 1995). P. 317-324.
7. IEC 61839:2000. Nuclear power plants. Design of control rooms. Functional analysis and assignment.
8. Chernyaev A., Anokhin A. Formalization of the functional analysis methodology to improve NPP I&C system design process / Proceedings of the 10th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Machine Interface Technologies: NPIC&HMIT'2017 (San Francisco, CA, USA, June 11-15, 2017). La Grange Park, IL: ANS Inc., 2017. P. 1058-1067.
9. Rothrock L., Koubek R., Fuchs F. et al. Review and reappraisal of adaptive interfaces: toward biologically inspired paradigms // Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2002. Vol. 3, No 1. P. 47-84.

**Анохин Алексей Никитич** — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора департамента — начальник отдела функционального анализа, ЧМИ и эргономики, **Черняев Алексей Николаевич** — канд. техн. наук, заместитель технического директора — директор департамента проектирования АО «Русатом Автоматизированные системы управления».

Контактный телефон (495) 933-43-40.

E-mail: ANAnokhin@rasu.ru AINChernyaev@rasu.ru