

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ОПЕРАТОРОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Н. Анохин, А.С. Ивкин, Е.Н. Алонцева (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

Экологический интерфейс (ЭИ) позволяет существенно снизить когнитивную нагрузку на операторов в сложных ситуациях. Однако в ходе его создания и внедрения разработчики должны преодолеть довольно специфические трудности, такие как сложный анализ предметной области, недостаточная формализация процесса создания визуального образа, предубежденность опытных операторов и неоднозначная эффективность ЭИ в разных ситуациях. В статье описывается процесс создания ЭИ, в котором предусмотрены определенные процедуры для разрешения перечисленных вопросов. Создание ЭИ включает шесть этапов: анализ предметной области; синтез графического образа; разработка прототипа; разработка опытного образца; тестирование, опытная эксплуатация и оценка; внедрение. Обсуждаются особенности и методики выполнения каждого этапа.

Ключевые слова: экологический интерфейс, когнитивная графика, проектирование, оценка, когнитивная эргономика.

Введение и постановка задачи

Большинство существующих подходов к проектированию операторских интерфейсов для управления сложными системами с непрерывными ТП, такими как энергетические, нефтехимические и перерабатывающие производства, состоят в наложении значений технологических параметров на мнемосхему или топологическую структуру объекта. Достоинством таких интерфейсов является существенное облегчение поиска нужной информации. Недостаток же состоит в том, что они, как правило, представляют человеку «сырую» необработанную информацию вне контекста решаемых задач. Учитывая, что в сложных аварийных ситуациях операторы вынуждены сопоставлять и обрабатывать в уме большие объемы данных, такие интерфейсы никак не предотвращают информационную перегрузку и, как следствие, возникающие ошибки персонала. Одним из многообещающих направлений, нацеленных на решение этой проблемы, стал экологический подход к проектированию интерфейса.

Слово «экологический» по отношению к визуальному восприятию и психологии стало применяться, начиная с 60–70-х годов XX века. В своей монографии [1] Дж. Гибсон обосновывает новый подход, отвергая устоявшуюся точку зрения, что восприятие есть результат ментальной обработки ощущений, возникших у человека в результате воздействия стимулов на рецепторы. Вместо этого Гибсон предлагает принцип «прямого» восприятия, заменяя стимул на информацию и утверждая, что с точки зрения восприятия субъект находится не в физическом, а в экологическом мире, с которым они взаимно дополняют друг друга и по отношению к объектам которого субъект обладает набором определенных возможностей.

В 1990-е годы экологический подход к восприятию получил развитие применительно к задачам контроля и управления сложными системами. В работе [2] К. Вайсент и Й. Расмуссен вводят понятие экологический интерфейс (ЭИ) для обозначения такого интерфейса, который обеспечивает человеку-оператору естественное и непосредственное восприятие ситуации, не требующее или минимизирующее ментальную обработку поступающей информации. Особую

роль такой интерфейс может сыграть в поведении, основанном на знаниях, когда оператор сталкивается с незнакомой ситуацией, для которой отсутствуют процедура и соответствующие управленческие навыки.

В отличие от традиционных операторских интерфейсов, просто констатирующих значения технологических параметров и состояние оборудования, ЭИ должен помочь человеку увидеть ситуацию в целом, ее наглядные признаки и физические закономерности процессов. В многочисленных последующих работах К. Вайсент и его коллеги предложили множество примеров того, как можно визуализировать такую информацию, используя известные способы визуального кодирования.

Необходимо отметить, что задача целостного образного и наглядного представления сложной информации обсуждается не только в рамках экологического подхода. Впервые идея образного восприятия была сформулирована гештальтпсихологами еще в начале XX века. Основатели этого направления психологии утверждали, что восприятие — это процесс узнавания или выявления целостных образов, а не аналитическое соединение отдельно воспринимаемых деталей. Благодаря способности к целостному восприятию мы можем узнать старого знакомого, которого не видели десятки лет, или мелодию, изменившуюся до неузнаваемости в результате необычной аранжировки. Прикладным результатом *гештальтпсихологии* являются выявленные эмпирическим путем закономерности образования целостного образа из деталей.

В 1990-е годы в нашей стране стало развиваться еще одно направление, связанное с визуализацией информации и получившее название *когнитивная графика*. Изначально оно было ориентировано на выявление визуальным способом новых зависимостей в числовых рядах. Позднее идеи когнитивной графики были применены для задач управления ТП [3]. Еще одним активно развивающимся прикладным направлением является *инфографика*, появившаяся в начале 1980-х годов как инструмент для журналистов, дизайнеров, специалистов по рекламе и бизнесменов. Специалистами в этой области также накоплен зна-

чительный опыт и создано множество рекомендаций об оптимальных способах визуализации той или иной информации.

На сегодняшний день стараниями нескольких исследовательских групп в разных странах создано большое число экспериментальных образцов ЭИ, стимулирующего образное восприятие операторов сложных технологических систем в разных отраслях: в энергетике, перерабатывающей промышленности, медицине, на транспорте и др. Однако проектирование и внедрение ЭИ обладает рядом особенностей.

1. Проектированию предшествует сложный анализ предметной области. При этом отсутствуют единое мнение о методе анализа и технологии использования результатов анализа в дальнейшем проектировании.

2. Несмотря на наличие определенного алфавита кодирования, процесс создания визуального образа остается плохо формализованным и сильно зависит от опыта и даже воображения разработчика.

3. ЭИ существенно отличается от традиционного операторского интерфейса. Его непривычный вид способен отпугнуть или, по крайней мере, создать негативную предубежденность у опытных операторов.

4. Полезность ЭИ зависит от ситуации: в одних ситуациях он существенно лучше, в других — сравним или даже уступает традиционному интерфейсу. Поэтому внедряя ЭИ, необходимо иметь четкое представление о границах его эффективности.

Перечисленные особенности свидетельствуют о том, что применение стандартных моделей проектирования и жизненного цикла программной/автоматизированной системы при создании ЭИ не всегда возможно. В данной статье рассматривается процедура проектирования ЭИ, которая обобщает зарубежный опыт и собственный опыт авторов по созданию ЭИ для контроля и управления технологическими системами [4].

Зарубежных работ, обобщающих опыт создания ЭИ, крайне мало. Из их числа можно выделить одну [5], наиболее точно сфокусированную на этой проблеме. Авторы разделяют процесс создания ЭИ на стадии *анализа и проектирования*. На первой стадии выполняется анализ предметной области, результаты которого обсуждаются с пользователями. Целью этого обсуждения является валидация построенных моделей, на основе которых формулируются требования к ЭИ. На второй стадии выполняется шкалирование технологических параметров, выбор для каждого из них формы визуализации, разработка эскиза видеокadra, разработка форматов представления отдельных информационных элементов и видеокadra в целом. Затем разработанный интерфейс подвергается эвристической оценке, в ходе которой эксперты отмечают, насколько новая разработка облегчает операторам выполнение различных стадий задач.

Эта и другие работы, описывающие примерно такую же схему создания ЭИ, помогают учесть перечисленные выше особенности, но не создают технологию. Особую проблему составляет переход от результатов анализа к визуальному образу — этот стык по-прежнему является больше творческой задачей, чем инженерной.

Обобщая опыт проектирования ЭИ, процесс его создания можно представить как совокупность шести этапов:

1) *анализ предметной области*, в ходе которого исследуются законы функционирования объекта управления и задачи оператора;

2) *синтез графического образа*, визуализирующего принципиальные моменты, ради которых создается ЭИ;

3) *разработка прототипа*, предназначенного для демонстрации и обсуждения с операторами с после-

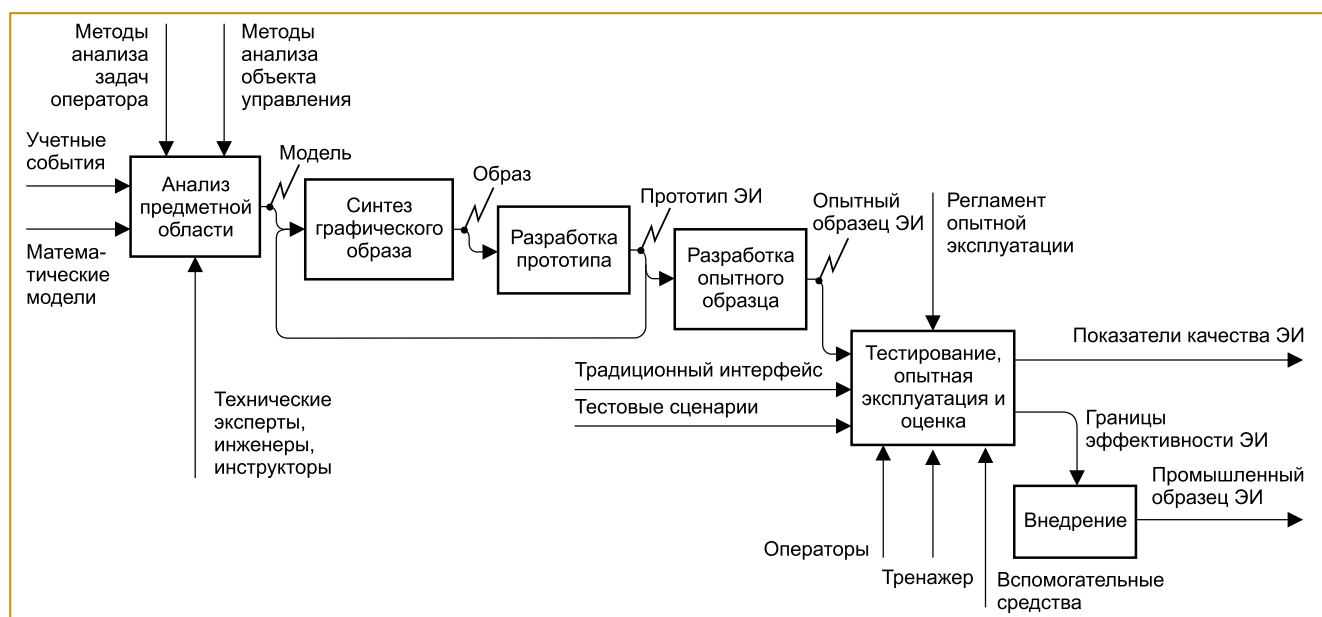


Рис. 1. Этапы проектирования ЭИ в форме диаграммы IDEF0

дующей доработкой или переработкой графического образа;

4) разработка опытного образца;

5) тестирование, опытная эксплуатация и оценка, задача которых состоит в получении объективных данных об эффективности ЭИ;

б) внедрение, в ходе которого возможна доработка опытного образца или новая разработка на его основе промышленного образца ЭИ.

На рис. 1 перечисленные этапы показаны в виде диаграммы IDEF0. Эта графическая нотация позволяет изображать описываемый процесс в виде последовательности функций (в прямоугольниках), взаимодействующих с материальными и информационными объектами. Объекты, поступающие на вход функции (стрелки, примыкающие к прямоугольнику слева), преобразуются в выходные объекты (исходящие стрелки справа). Преобразование осуществляют определенные субъекты — люди, оборудование, инструменты (показаны стрелками снизу) в соответствии с заданными правилами и алгоритмами (стрелки, примыкающие сверху). Рассмотрим некоторые из перечисленных этапов более подробно.

Анализ предметной области и синтез графического образа

Традиционными методами анализа, используемыми при создании ЭИ, являются *метод анализа предметной области* (Work Domain Analysis, WDA) и *метод иерархического анализа задач* (Hierarchical Task Analysis, HTA). Метод WDA нацелен на исследование технологического объекта вне контекста управления этим объектом. Задача метода состоит в функциональной декомпозиции объекта и его описании в виде:

- иерархии оборудования;
- структурной схемы взаимодействия оборудования;
- графа, отображающего взаимодействие функций, выполняемых оборудованием и системами;
- графа, показывающего структуру и взаимосвязь абстрактных функций преобразования вещества и энергии, на которых основан ТП.

Метод HTA, наоборот, рассматривает объект как черный ящик и концентрируется на действиях оператора по контролю и управлению. Задача метода состоит в иерархической декомпозиции деятельности оператора до уровня простых операций с последующим анализом процесса исполнения этих операций с разных точек зрения: когнитивной сложности, качества интерфейса, дефицита времени и др.

Первые работы в области ЭИ (например, [2]) всецело ориентировались на метод WDA, поскольку ЭИ позиционировался как средство поддержки оператора в непредвиденных ситуациях. В таких ситуациях процедура просто отсутствует и, следовательно, алгоритм действий оператора не известен, а человек действует на уровне знаний. Поэтому разработчики интерфейса изучают не деятельность оператора, а функцио-

Одно время решающим фактором производства была земля, затем капитал. Сегодня решающий фактор — сам человек и его знания.

Иоанн Павел II

нирование самого технологического объекта. Метод HTA, наоборот, чрезвычайно полезен для описания деятельности оператора в изученных ситуациях. Его сильной стороной является выявление действий оператора, наиболее подверженных ошибкам из-за высокой когнитивной нагрузки. Исследование, описанное в работе [6], подтверждает, что оба метода — WDA и HTA взаимно дополняют друг друга.

Описанные методы позволяют разработчику разобраться с функционированием объекта и с потенциальными проблемами для оператора. Однако они не всегда выявляют именно то, на что нацелен ЭИ — на визуализацию диагностических признаков ситуации (таких, как приближение параметра к уставке, выход системы к границе эффективности), арифметических и логических операций (например, суммирование нескольких параметров, сопоставление параметров и состояния оборудования). Именно на визуализацию такого рода признаков и операций четко ориентирован алфавит кодирования, применяемый при проектировании ЭИ. При этом методы WDA и HTA не могут служить прямыми инструментами для выявления такой информации, хотя и способствуют этому. Непосредственными источниками такой информации являются качественные и количественные модели ТП, описывающие причинно-следственные связи и балансные соотношения вещества и энергии. Такие модели могут быть: 1) созданы аналитическим путем, 2) взяты из существующего моделирующего комплекса, например, тренажерного (при его наличии); 3) синтезированы в результате экспериментов с тренажером или обработки «срезов» данных, накопленных за время эксплуатации объекта.

Еще одним важным компонентом анализа предметной области является *обзор событий и нарушений*, имевших место на предприятии или в отрасли. Анализ этих данных может сыграть значительную роль в формализации требований к ЭИ, так как наличие повторяющихся нарушений, сопряженных с ошибками персонала, обычно свидетельствует о слишком высокой сложности задачи, неудовлетворительном интерфейсе или неадекватной ментальной модели процесса. Использование ЭИ во всех этих случаях, как правило, уместно.

Прототипирование ЭИ

ЭИ воплощает принципиально новый подход к наблюдению за объектом управления. Традиционный интерфейс выдает информацию без привязки к решению какой-либо задачи. Обычная практика — представление технологических параметров и состояния оборудования в трех формах: в виде таблицы, с нало-

жением на мнемосхему и в виде временных графиков. ЭИ в свою очередь не предназначен для скрупулезного представления всей технологической информации, его задача — поддержка оператора в идентификации режима работы системы, выявлении локальных и глобальных тенденций, выявлении приближения к эксплуатационным пределам, оценке степени выполнения технологических функций и др. Сталкиваясь впервые с ЭИ, операторы могут посетовать

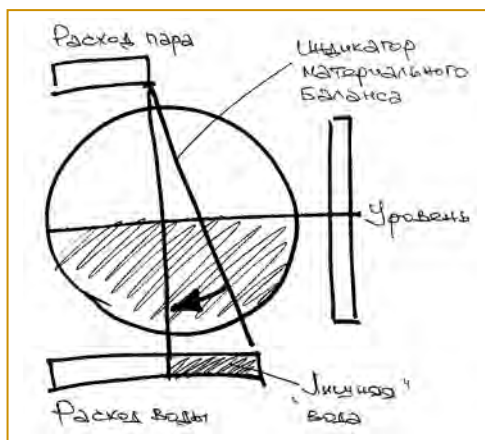


Рис. 2. Эскиз ЭИ

на отсутствие подробных параметров, без которых, по их мнению, интерфейс будет неполным. При этом чаще всего операторы поначалу не замечают основной идеи ЭИ и стремятся видоизменить предлагаемый видеокادر так, чтобы он максимально походил на то, к чему они привыкли.

Именно поэтому важнейшим этапом проектирования ЭИ является его прототипирование, позволяющее наглядно продемонстрировать операторам и техническим экспертам основную идею нового представления информации и ее выигрышность для

решения определенных задач, дать возможность операторам «поиграть» с интерфейсом и понять вместе с ними, как можно улучшить исходную идею.

В качестве прототипа могут выступать различные по степени проработки варианты ЭИ, реализованные разными способами. Самый слабый вариант — это эскиз (рис. 2) или статичный скриншот видеокadra. С его помощью можно обсудить идею и внешний вид интерфейса, однако нельзя оценить самое главное достоинство ЭИ — ото-

бражение динамики, позволяющее оператору увидеть изменение состояния технологического объекта как «движение» в некоторой системе координат, например «давление — температура», «уровень воды — паросодержание» и др. Более сильный вариант — показ видеозаписи, демонстрирующей поведение ЭИ в ответ на определенные события. Объектом для видеозаписи может стать как реальный программный интерфейс, так и анимация, выполненная в одном из графических пакетов. Следующий вариант — прототип,

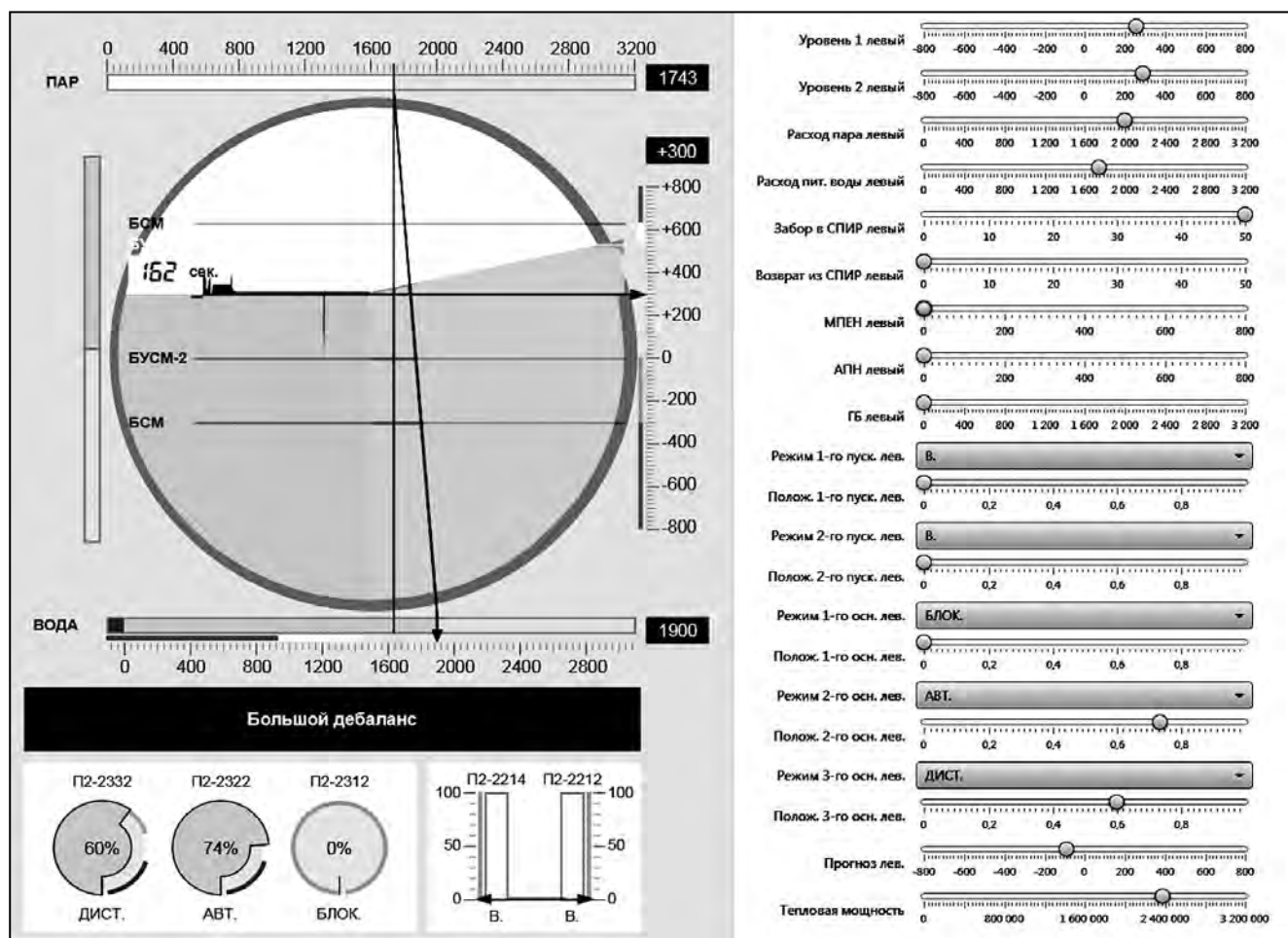


Рис. 3. Прототип ЭИ, управляемый пользователем

управляемый пользователем в реальном масштабе времени с помощью диалоговых элементов — ползунковых задатчиков, кнопок, переключателей и др. (рис. 3). Имея возможность внесения возмущений и конфигурирования состояний оборудования, разработчик может продемонстрировать операторам поведение ЭИ в самых разных условиях. Такой прототип может иметь разные уровни проработки — от изображения общей идеи до максимально детального приближения к предполагаемому промышленному образцу.

Наконец, наиболее сильный вариант — прототип, интегрированный в состав тренажера, полномасштабного или функционально-аналитического. Прототип такого рода может использоваться в качестве опытного образца, участвующего в экспериментальной серии для оценки эффективности предлагаемого ЭИ.

Тестирование, опытная эксплуатация и оценка ЭИ

Как уже отмечалось, эффективность ЭИ довольно чувствительна к условиям его использования. Внедрение ЭИ сопряжено с изменением эксплуатационных процедур, регламентирующих действия операторов и предписывающих условия, при которых операторам следует пользоваться тем или иным источником информации. При этом очень важно точно осознавать границы полезности ЭИ.

Вопросы получения и интерпретации объективных данных о качестве обычного и тем более экологического интерфейса для управления технологическим объектом очень слабо освещены в литературе. К немногочисленным публикациям на эту тему относятся работы [7, 8], в которых оценка ЭИ выполнялась тремя способами:

- 1) путем «измерения» степени осведомленности операторов о ситуации при работе с ЭИ;
- 2) с помощью опросника, заполняемого операторами по окончании работы с ЭИ;

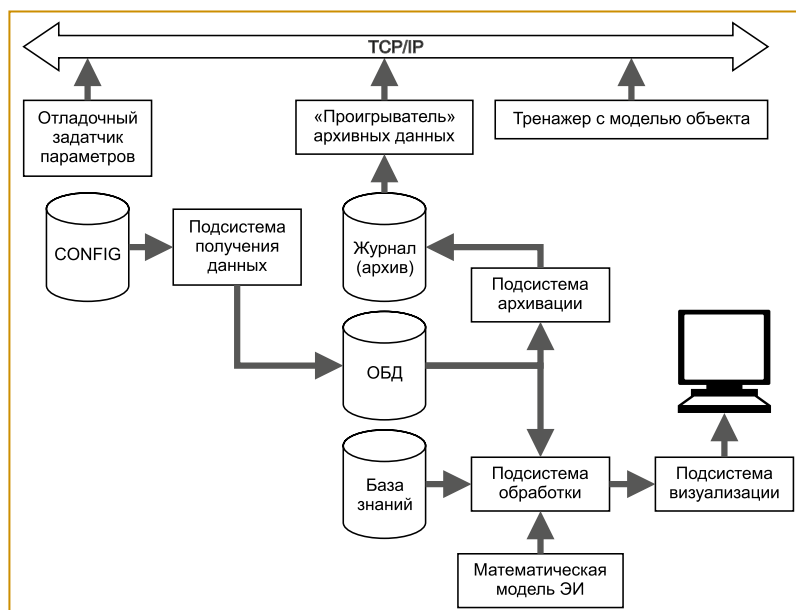


Рис. 4. Архитектура экспериментального комплекса для тестирования ЭИ

3) в результате анализа зарегистрированных данных о качестве и эффективности работы оператора с ЭИ по сравнению с традиционным интерфейсом.

Все эти методы позволяют собрать достаточно большой объем информации, по которой можно судить о возможностях дальнейшего внедрения ЭИ в производственный процесс. При экспериментальном сравнении экологического и традиционного интерфейсов наиболее сложными в методическом плане являются три проблемы.

1. *Освоение* экологического интерфейса операторами — участниками опытной эксплуатации. Эта задача чрезвычайно важна, так как плохо освоенный интерфейс может оказать существенное влияние на эффективность, демонстрируемую операторами в ходе тестов. При низкой эффективности возникает естественный вопрос: интерфейс плохой или оператор его недостаточно освоил?

2. *Выбор сценариев* для тестирования интерфейса. Полезность ЭИ может зависеть от типа решаемой оператором задачи. Важно, чтобы перечень сценариев, на которых тестируются интерфейсы, был достаточно репрезентативным и охватывал все основные комбинации влияющих факторов. В противном случае может случиться, что среди отобранных сценариев не оказалось именно тех, при которых преимущество ЭИ проявляется наиболее заметно или, наоборот, полезность ЭИ сомнительна.

3. *Измеряемые и оцениваемые характеристики*, по которым можно судить о качестве предлагаемого интерфейса. Выбор характеристик и их показателей зависит от типа задач оператора. Так, например, в задаче ручного регулирования параметра — уровня воды в барабане-сепараторе АЭС в условиях возмущающего воздействия нескольких факторов (несанкционированных забросов воды, изменения паросодержания смеси, резких изменений мощности реактора, неисправности оборудования и др.) в качестве

показателей взяты [9]: число ошибок оператора; время реакции оператора; время выполнения задачи; точность установки регулируемого параметра; амплитуда изменения регулируемого параметра; максимальное приближение регулируемого параметра к уставке. Использование одно- и двухфакторного дисперсионного анализа позволяет получить статистически достоверные выводы о различии экологического и традиционного интерфейсов применительно к разным операторским задачам.

Как показано в [7, 8], наиболее информативным средством тестирования интерфейса являются тренажеры. Самый удобный способ — интеграция тестируемого ЭИ в программный комплекс тренажера и его визуализация с помощью штатных графических инструмен-

тов и средств отображения. Однако в ряде случаев это невозможно, например, если тренажерный комплекс имеет закрытый программный код, он находится вдали от разработчиков ЭИ или существующие в нем средства проектирования операторского интерфейса не способны воспроизвести требуемую графику (так, в одном из реализованных авторами проектов в нужной зоне операторского пульта на полномасштабном тренажере вообще отсутствовал компьютерный дисплей). В такой ситуации ЭИ реализуется как автономно отлаживаемая «приставная» система, функционирующая на отдельном компьютере и взаимодействующая с тренажерным сервером по сетевому протоколу. Программно-технический комплекс такой системы должен включать в себя, наряду с модулем визуализации, средства регистрации, хранения и обработки данных (пример архитектуры представлен на рис. 4). Источниками исходной технологической информации являются три подсистемы, выступающие в качестве серверов (только один из них активен):

1) полномасштабный или функционально-аналитический тренажер, включающий модель объекта управления;

2) «проигрыватель» архивных данных, выбирающий информацию из журнала (архива) и воссоздающий поток данных в том же темпе, как это было в реальной ситуации;

3) отладочный задатчик параметров, с помощью которого можно автономно (без подключения к тренажеру) отлаживать ЭИ, задавая параметры вручную (рис. 3).

Каждый из этих источников выполняет свою задачу: отладочный задатчик — автономную отладку и демонстрацию ЭИ, тренажер — тестирование ЭИ, а «проигрыватель» — автономное «прокручивание» записанных тестов, наблюдая картину в том же виде, в котором ее наблюдал оператор во время тестов на тренажере.

Полученная информация временно сохраняется в оперативной базе данных (ОБД) и передается на обработку, где выполняется логический анализ данных (с помощью базы знаний), формируются вторичные параметры (с помощью математической модели ЭИ), сообщения и признаки, управляющие поведением графических элементов интерфейса. Кроме того, данные, поступающие от сервера, могут быть записаны в архив для последующих «проигрываний».

Заключение

Процесс проектирования ЭИ имеет свою специфику, обусловленную сложным анализом предметной области, недостаточной формализацией процесса создания визуального образа, предубежденностью опытных операторов и различной эффективностью ЭИ в различных ситуациях. Для учета этих факторов предлагается в процесс проектирования включить этап разработки

Анохин Алексей Никитич — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой автоматизированных систем управления, Ивкин Алексей Сергеевич — аспирант, Алонцева Елена Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ).

Контактный телефон (484) 393-85-85.

E-mail: anokhin@obninsk.ru alexej.ivkin@gmail.com alenika-vega@mail.ru

и обсуждения с операторами прототипа ЭИ и этап оценки эффективности ЭИ по результатам тестирования и опытной эксплуатации.

Информационное содержание ЭИ определяется в результате анализа предметной области, традиционно выполняемого методами WDA и НТА. Однако эти методы не всегда выявляют диагностические признаки и причинно-следственные зависимости, которые должен учитывать оператор при оценке ситуации. Эффективным инструментом для получения этой информации служат математические модели объекта управления — имеющиеся или вновь создаваемые.

Оптимальным способом отладки, тестирования и оценки ЭИ является его встраивание в тренажер. При отсутствии возможности такой интеграции создается программно-технический комплекс, включающий в себя задатчик параметров для автономной отладки ЭИ, подсистемы архивации и «проигрывания» прошедших тестов и саму систему, обеспечивающую формирование и отображение ЭИ.

Список литературы

1. Гибсон Дж. Экологический подход к зрительному восприятию. М.: Прогресс. 1988. 464 с.
2. Vicente K.J., Rasmussen J. Ecological interface design: Theoretical foundations // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1992. V. 22. № 4. P. 589-606.
3. Башлыков А.А. Образное представление состояния сложных технологических объектов управления // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № С. 9-18.
4. Анохин А.Н., Ивкин А.С. Экологический интерфейс для мониторинга состояния барабанов-сепараторов АЭС с РБМК // Человеческий фактор: Проблемы психологии и эргономики. 2013. № 3 (66). С. 69-75.
5. Upton C., Doherty G. Extending ecological interface design principles: a manufacturing case study // International Journal of Human Computer Studies. 2008. 66 (4). P. 271-286.
6. Jamieson G.A., Miller C.A., Ho W.H., Vicente K.J. Integrating task- and work domain-based work analyses in ecological interface design: A process control case study // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans. 2007. V. 37. No. 6. P. 887-905.
7. Lau N., Jamieson G.A., Skraaning G., Burns C.M. Ecological interface design in the nuclear domain: An empirical evaluation of ecological displays for the secondary subsystems of a boiling water reactor plant simulator // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. V. 55. № 6. P. 3597-3610.
8. Дозорцев В.М., Назин В.А. Компьютерные тренажеры как инструмент экспериментального исследования операторской деятельности // В сб. «Экспериментальная психология в России». Под ред. В.А. Барабанщикова. М.: Институт психологии РАН. 2010. С. 491-496.
9. Ивкин А.С., Анохин А.Н., Чепурко В.А. Подход к эмпирической оценке человеко-машинного интерфейса для управления технологическим процессом: на примере экологического интерфейса для управления уровнем воды в барабане-сепараторе АЭС типа РБМК // Биотехносфера. 2014. № 6(36).