

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРОВ АЭС

**А.Н. Анохин \* , А.Е. Калинушкин \*\* , В.А. Горбаев \*\* , В.П. Сивоконь \*\*\***

*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ*

*249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1*

*\*\* Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт»*

*123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*

*\*\*\* АО «Русатом – Автоматизированные системы управления»*

*109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25*



Рост интереса к системам поддержки операторов (СПО) АЭС стал поводом для подготовки предлагаемого аналитического обзора, где сформулирован ряд системных положений. Целью СПО АЭС является предотвращение или уменьшение частоты и тяжести ошибок операторов. Эта цель достигается за счет исполнения системой четырех функций поддержки: обеспечение осведомленности о ситуации, помощь в адекватной оценке ситуации, помощь в планировании действий и предотвращение ошибок при выполнении действий оператором. В качестве задач поддержки, обеспечивающих исполнение данных функций, рассматриваются пошаговое представление процедур, управление вниманием оператора и др. Предлагаются шесть критериев классификации СПО АЭС: по способу реализации, по технологическому уровню и участку, по виду поддержки, по типу задач оператора, по поддерживаемой фазе выполнения задачи и по поддерживаемому эксплуатационному режиму.

В результате анализа обоснованы основные функции, обеспечивающие эффективную поддержку оператора в различных эксплуатационных режимах АЭС. Предложенные функции ориентированы на существующее процедурное поле операторов, структуру и задачи системы верхнего блочного уровня АСУ ТП энергоблоков АЭС-2006.

**Ключевые слова:** атомная станция, оператор блочного пункта управления, система поддержки оператора, функция поддержки, задача поддержки.

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к системам поддержки операторов (СПО) АЭС появился в начале 1980-х гг. Одним из катализаторов этого стала авария на американской АЭС ТМ1-II, происшедшая в 1979 г. Данную аварию можно было предотвратить, если бы операторы сопоставили друг с другом различные признаки, разобрались в ситуации и вовремя пришли к выводу, что поступающая к ним информация не отражает реального положения вещей – вытекания теплоносителя через незакрытый клапан в системе компенсации давления и вскипания теплоносителя, вызвавшего недостоверные показания уровнемера в компенсаторе объема.

Потребность в системах, помогающих операторам правильно понять ситуацию, возникла на фоне общего интереса к технологии искусственного интеллекта, особенно к

© А.Н. Анохин, А.Е. Калинушкин, В.А. Горбаев, В.П. Сивоконь, 2016

экспертным системам. В нашей стране свидетельством интереса к тематике СПО стали многочисленные научные мероприятия второй половины 1980-х – начала 1990-х гг., наиболее представительным из которых стал семинар МАГАТЭ «Системы поддержки операторов АЭС» (Москва, 1994). В основе создаваемых в те годы экспериментальных прототипов СПО АЭС лежали логические модели представления знаний, использующие логику предикатов, продукционные правила, деревья и диагностические таблицы. Реже встречались фреймовые и сетевые модели. Среди пионеров отечественной школы и технологий СПО АЭС следует выделить А.А. Башлыкова (ЦНИИКА, Москва), И.Д. Ракитина (ИАЭ им. И.В. Курчатова), А.Г. Чачко (Киевский институт автоматики) и др. Важнейшим результатом тех лет стало опытное внедрение на Игналинской и Калининской АЭС системы СПРИНТ [1], созданной коллективом ЦНИИКА. СПРИНТ – это система поддержки принятия решений с интеллектуальными механизмами поиска, знания в которой кодировались на языке исчисления предикатов. Созданием научных основ СПО блочного уровня занимались в ФЭИ, ИПУ, МИФИ, ИАТЭ. Многочисленные работы велись и по системам для решения частных задач диагностики на основе результатов неразрушающего контроля или данных о шумах, вибрации, течах и т.п.

С научной точки зрения, отечественные и зарубежные исследования развивались практически синхронно. Различие проявилось в их практической реализации. Уже в начале 1980-х гг. в США наметилось сужение задач поддержки оператора и доведение до промышленной реализации одного класса СПО – систем представления параметров безопасности (СППБ). Эти системы появились в результате извлечения уроков из аварии на ТМІ-II, а их задача состояла в слежении за состоянием критических функций безопасности (КФБ) и помощи оператору в восстановлении должного уровня выполнения этих функций. Внедрение таких систем «потянуло» за собой еще одну задачу – компьютеризацию симптомно-ориентированных аварийных инструкций (СОАИ), предназначенных для восстановления КФБ. Таким образом, СППБ и компьютеризованные процедуры стали первыми промышленными образцами СПО в США уже в первой половине 1980-х гг., в то время как в России СППБ стали внедряться только спустя десятилетие. Другая задача поддержки оператора, доведенная до промышленной реализации, – снижение объемов аварийной сигнализации путем фильтрации и упорядочения по приоритетности. Основные подходы к обработке сигнализации были сформированы середине 1980-х гг. и внедрены уже в начале 1990-х гг. Скачок в промышленном внедрении СПО был совершен при вводе в эксплуатацию в 1996 г. первых «дисплейных» блочных пунктов управления (БПУ) на АЭС Kashiwazaki-Kariwa 6 (Япония) и Choos B1 (Франция).

Обзор СПО, созданных в 1980–1990-х гг., представлен в [2] и в трех отчетах МАГАТЭ: Computer based aids for operator support in nuclear power plants (TECDOC-549, 1990); Development and implementation of COSS in nuclear installations (TRS-372, 1994); Computerized support systems in nuclear power plants (TECDOC-912, 1996). К середине 1990-х гг. вместе с общим спадом активности в ядерной энергетике начался длительный спад интереса к дальнейшим исследованиям в области СПО. Судя по публикациям, возрождение произошло уже в 2000-х гг. в Южной Корее и Китае. И хотя в этих работах применялись, в основном, давно известные методы, основанные на логике, либо конъюнктурные в то время нейронные сети и многоагентный подход, однако их основной вклад состоял в создании технологии и в наработке опыта прототипирования СПО. Для представления нынешней ситуации авторами выполнен аналитический обзор работ по СПО блочного уровня последнего десятилетия. Рассмотрено около 50-ти зарубежных статей, опубликованных в журналах издательства Elsevier, в трудах конференций NPIC&NMIT и др. В результате этого анализа был сформулирован перечень актуальных задач поддержки операторов БПУ энергоблоков серии АЭС-2006 для различных эксплуатационных режимов станции.

## СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ СПО АЭС

Практически все исследователи единодушны в том, что *целью* СПО является предотвращение или уменьшение частоты и тяжести ошибок операторов, возникающих во время переходных процессов и нештатных ситуаций, когда операторы работают в условиях дефицита времени, быстро меняющейся картины и больших объемов информации, обуславливающих чрезмерно высокую рабочую нагрузку. Эта цель достигается за счет того, что система исполняет следующие *функции поддержки* оператора:

- обеспечивает осведомленность о состоянии технологического процесса, оборудования и возможных рисках;
- облегчает оценку ситуации и интерпретацию состояния станции или оборудования;
- помогает правильно планировать действия и приоритеты управления в соответствии с меняющимися условиями;
- способствует предотвращению ошибок при выполнении действий и контроле их результативности.

Исполнение этих функций может достигаться через решение различных *задач поддержки* оператора и их комбинаций, таких как пошаговое представление процедуры, акцентирование внимания оператора на важных признаках, соотнесение наблюдаемых симптомов с признаками известных ситуаций, фильтрация вторичной сигнализации и др.

Внедрение СПО в контур управления, а также общее повышение уровня автоматизации АЭС затрагивают тему оптимального распределения функций между человеком и автоматикой. Об опасности чрезмерной автоматизации, выводящей оператора из активного контура управления и делающей его пассивным наблюдателем, свидетельствуют многочисленные исследования [3]. Так, в [4] справедливо утверждается, что внедрение СПО потенциально опасно тем, что операторы начинают чрезмерно полагаться на систему, снижая при этом свою психическую и познавательную активность. В таком состоянии человеку бывает сложно обнаружить ошибку системы и уж тем более исправить ее [5]. С этих позиций недостаточно хорошо спроектированная система может ухудшить положение с ошибками операторов вместо ее улучшения. Для предотвращения возможных негативных последствий внедрения СПО необходим научно обоснованный подход к определению ее *роли и места* в процессе управления АЭС. Для этого выполним классификацию этих систем, используя как известные ранее, так и новые признаки (рис. 1).



Рис. 1. Классификация СПО АЭС

Рассмотрим вначале достаточно простые «формальные» признаки классификации. В соответствии с [5] СПО может существовать как независимая или как встроенная система. Независимые СПО характерны для традиционных БПУ с приборным, а не компьютеризованным интерфейсом. Они внедряются гораздо позже, чем сам БПУ, и предоставляют операторам полезную, но необязательную информацию, дополняющую штатные средства БПУ. Встроенная система проектируется вместе с БПУ и образует верхний уро-

вень компьютеризованного человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) штатной АСУ ТП.

Другим простым признаком классификации СПО является ее отнесение к технологическому уровню или участку АЭС. Здесь можно выделить системы поддержки операторов станционного уровня, блочного уровня, реакторной, турбинной и электрической части, отдельных технологических систем и т.п.

Третьим важным качеством СПО является способ (вид) поддержки оператора. При интеллектуальной поддержке система берет на себя часть функций обработки технологической информации. При информационной поддержке система визуализирует информацию так, чтобы облегчить ее обработку человеком.

Характер поддержки существенно зависит от типа задачи (характера деятельности), выполняемой оператором. Типовыми задачами операторов АЭС являются контроль, регулирование, переключения, поиск неисправности, ремонт и восстановление, проверки и др.

Одним из наиболее информативных признаков классификации СПО является разделение по функциональному назначению. В [5] классификация функций СПО привязана к модели действия оператора, состоящей из четырех фаз: мониторинг и обнаружение; оценка ситуации; планирование ответных действий; исполнение действий. Используя эту модель, можно выделить системы поддержки процессов обнаружения ситуации, оценки ситуации, планирования действий и исполнения действий. Подобную модель «оперативного мышления» рассматривают авторы [1], выделившие следующие основные процессы исполнения задачи оператором: оценка состояния системы; определение целей и критериев эффективности; выработка решения, принятия решения; реализация решения; оценка результатов. Упомянутые модели не являются единственно возможными. В 1970–1980-е гг. отечественными психологами Д.А. Ошаниным, Б.Ф. Ломовым и другими предлагались структуры, разбивающие действие человека-оператора вплоть до десяти фаз: 1) образование мотива; 2) формулирование цели; 3) переработка текущей информации; 4) диагностирование; 5) планирование; 6) построение концептуальной модели; 7) принятие решения; 8) выполнение действия; 9) проверка результатов; 10) коррекция действия. Почему же рассмотрение функциональности СПО в контексте определенной фазы действия оператора столь важно?

Как отмечалось, СПО не должна заменять человека и брать его работу на себя. Ее цель – усилить возможности человека в тех действиях, которые он выполняет лучше машины. Иногда такое усиление достигается тем, что компьютер акцентирует внимание оператора на одном из десятков значимых признаков. В другом случае необходимо проконтролировать, не забыл ли человек выполнить определенную операцию. Иными словами, зачастую необходимо «поддерживать» не всю задачу, а лишь определенную ее фазу. Выявление таких критических и уязвимых фаз вытекает из анализа ошибок, допускаемых операторами на тренажере или в процессе эксплуатации, либо из экспертного анализа. Вводя классификацию систем по их ориентированности на поддержку определенной фазы выполнения задачи, мы получаем инструмент для выбора именно тех функций поддержки оператора, которые вносят наиболее существенный вклад в повышение надежности деятельности.

В заключение рассмотрим еще один важный признак классификации, существенно влияющий практически на все характеристики СПО, – эксплуатационный режим, для которого создается система – нормальная эксплуатация, эксплуатация с отклонениями, предаварийные ситуации и аварии различной тяжести (проектные, запроектные и тяжелые). Несмотря на отсутствие в литературе явных упоминаний о классификации СПО по эксплуатационным режимам разработчики чаще всего довольно четко позиционируют создаваемую систему и задают диапазон ее применимости, что

особенно отчетливо видно на примере СППБ. Привязка СПО к эксплуатационному режиму важна еще и потому, что от режима зависят тип применяемых процедур, цель, стратегия и задачи управления, разделение функций между человеком и автоматикой, психологические факторы и др. Учет обстоятельств, сопутствующих тому или иному режиму, позволяет более точно сформулировать требуемые функции поддержки и задачи информационного обеспечения оператора. Еще более «тонкая» классификация СПО и функций поддержки может быть выполнена наложением друг на друга фаз решения задачи и эксплуатационных режимов.

### **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СПО АЭС**

Как отмечалось, выделяются два типа поддержки операторов – интеллектуальная и информационная. В области *интеллектуальной поддержки* на сегодня в мире сложились три устойчивых класса систем, доведенных до уровня промышленной эксплуатации: системы обработки и представления сигнализации, системы представления КФБ и системы компьютеризованных процедур. Явным признаком этой сформированности служат три стандарта: МЭК 62241 – Функции и представление сигнализации; МЭК 60960 – Функциональные требования к СППБ для АЭС; МЭК 62646 – Компьютеризованные процедуры.

Системы обработки и представления сигнализации предназначены для снижения объема сигналов в критических ситуациях и эффективного управления вниманием операторов. В соответствии с МЭК 62241, это достигается тремя способами: динамическим изменением приоритетов сигналов, их фильтрацией (подавлением) и иерархической организацией. Иерархическая организация обычно состоит во введении трех уровней – обзорного, системного и индивидуальных сообщений. Понижение приоритета сигнала или его подавление происходит в случаях, когда сигнал отражает событие-следствие, не требует немедленной реакции оператора, является избыточным для текущего эксплуатационного режима, отмечает менее тяжелые нарушения в одном и том же оборудовании и т.п. [6]. В качестве методов и алгоритмов анализа применяются логические деревья событий, однако возможна более тонкая аналитическая обработка сигнализации, включающая в себя корреляционный и частотный анализы [7].

СППБ осуществляют расчет и отображение индикаторов безопасности, причин их деградации и способов восстановления. Требования к этим системам описаны в МЭК 60960, а технология их проектирования и закладываемые алгоритмы достаточно хорошо отработаны и описаны, в том числе и применительно к отечественным проектам [8].

Системы компьютеризованных процедур предназначены для сопоставления наблюдаемых симптомов с входными симптомами имеющихся процедур, выбора и пошагового представления подходящей процедуры и контроля ее исполнения. Основные положения представлены в МЭК 62646, однако их реализация требует решения двух научных проблем:

- разработка методов идентификации ситуации и выбор наиболее подходящей процедуры с использованием различных показателей релевантности [9];
- разработка подходов к автоматической генерации процедуры в случае ее отсутствия с применением, например, семантических сетей [10].

Современные тренды расширения интеллектуальной поддержки направлены в сторону систем оценки риска, прогнозирования, визуализации путей протекания и управления авариями (в том числе и тяжелыми), а также систем, основанных на знаниях и моделях и предназначенных для комплексной диагностики энергоблока и контроля правильности протекания эксплуатационных режимов. Довольно удач-

ной представляется классификация методов для такой диагностики, приведенная в [11]: методы, основанные на моделях, когда текущее поведение станции сравнивается с нормальным, представленным в виде математической модели; методы, основанные на данных, когда поведение станции анализируется с точки зрения зависимостей, полученных в результате обработки исторических данных с помощью многомерных статистических методов; методы, основанные на сигналах, когда текущие значения сигналов или технологических параметров сравниваются со значениями, считающимися нормой. По анализу литературы к методам первой группы можно отнести традиционные четкие и нечеткие производственные правила, постулированные аварийные последовательности событий, семантические сети. Среди методов второй группы наибольшую популярность (более половины всех проанализированных публикаций) имеют нейронные сети, а в качестве новых интересных идей можно назвать применение алгоритмов динамической трансформации временной шкалы [12], байесовских сетей, регрессионных зависимостей. В третьей группе интересным опытом является использование контрольных карт Шухарта [13].

Основным направлением *информационной поддержки* операторов на сегодня является поиск таких способов интеграции и представления информации, которые способны облегчить быстрое понимание операторами сложившейся ситуации и своих действий в конкретных случаях. К числу интерфейсов, ориентированных на такую поддержку, сегодня следует отнести [14, 15] интерфейс, ориентированный на задачу, функционально-ориентированный интерфейс, экологический интерфейс, обзорный экран коллективного пользования и информационно насыщенный интерфейс (рис. 2).



Рис. 2. Типы СПО АЭС (исследовательские прототипы обрاملены серым)

Интерфейс, ориентированный на задачу (*task-based display*), предназначен для информационной поддержки оператора при выполнении одной конкретной задачи из заранее постулированного перечня [16]. На один видеокادر сводится только та информация, которая релевантна решаемой задаче, даже если эта информация относится к разным технологическим системам и использует разные принципы визуального кодирования. Если в процесс выполнения задачи вовлечены несколько технологических систем, то этот подход избавляет операторов от вторичной деятельности, т.е. от действий по переходу между видеокадрами.

Функционально-ориентированный интерфейс (*functional-oriented display*) предназначен для мониторинга некоторой технологической функции (мониторинг КФБ является частным случаем данного подхода). Для этого на мнемосхеме визуально выделяется каждая функциональная группа оборудования (т.е. оборудование, ответственное за обеспечение некоторой технологической функции). Иными слова-

ми, информация для оператора представляется в контексте выполнения некоторой технологической функции, а внимание оператора при этом переносится с состояния оборудования на состояние этой функции.

Экологический интерфейс (ecological interface design) – это представление информации, облегчающее восприятие и правильную интерпретацию данных, особенно в аномальных и незнакомых ситуациях. Суть метода состоит в представлении информации в образной форме, характеризующей физику происходящих процессов и позволяющей разобраться в ситуации независимо от того, насколько хорошо эта ситуация изучена и имеется ли для нее процедура. Первое упоминание о данной концепции было сделано в работе [17]. Отечественный опыт реализации экологического интерфейса для поддержки оператора в оценке баланса материальных потоков, входящих и исходящих из барабана-сепаратора РБМК, описан в [18].

Обзорный монитор (overview display) – это видеокادر, предназначенный для быстрой оценки одним взглядом состояния энергоблока или станции в целом и отображаемый на экране коллективного пользования (large screen display) или на индивидуальных рабочих станциях операторов. В отечественной практике обзорный экран впервые реализован на энергоблоке № 3 Калининской АЭС, после чего он стал тиражироваться во всех новых проектах. Из станций старого дизайна обзорный экран установлен на энергоблоках № 3, 4 Курской АЭС [19].

Технология информационно насыщенного интерфейса (information rich design) состоит в том, что каждый параметр представляется в виде диаграммы, включающей в себя временной график, уставки и цветовое кодирование [20]. Если все параметры находятся в пределах нормальной эксплуатации, то линии на рядом стоящих диаграммах складываются в общую прямую благодаря нормированию шкал. Данная технология применяется совместно с технологией приглушенного экрана (dull screen), состоящей в использовании пастельных тонов, на фоне которых яркие пятна, визуализирующие отклонения, быстро привлекают внимание.

### **ЗАДАЧИ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРОВ БПУ АЭС-2006**

Встраивание рассмотренных форм поддержки в деятельность операторов конкретной АЭС конкретной эксплуатирующей организации не является тривиальной задачей. Чтобы сформулировать, в чем должна состоять поддержка оператора, следует учесть несколько важных факторов. Рассмотрим их на примере строящихся российских АЭС с ВВЭР.

Прежде всего необходимо отметить, что деятельность оператора во всех эксплуатационных режимах осуществляется в рамках процедурного поля, очерченного следующими основными документами (естественно, этот список не является исчерпывающим): инструкцией по ликвидации нарушений (ИЛН), инструкцией по ликвидации аварий (ИЛА), руководством по управлению запроектными (РУЗА) и тяжелыми (РУТА) авариями. Верхний уровень документации образует технологический регламент безопасной эксплуатации, определяющий эксплуатационные пределы, пределы и условия безопасной эксплуатации. Второй особенностью является номенклатура функций безопасности, предусмотренных проектом для реакторов типа ВВЭР – их около 20-ти. Третьим фактором является структура, архитектура и функции автоматики и системы верхнего блочного уровня (СВБУ) АСУ ТП АЭС. Состав автоматических регуляторов, функционально-группового управления, алгоритмы защит и блокировок, эргономические решения видеокладов, система навигации СВБУ могут существенно повлиять на актуальность тех или иных форм поддержки операторов БПУ.

Исходя из характеристик проекта АЭС-2006 специалистами АО «ВНИИАЭС», АО «АЭП», АО ОКБ «Гидропресс», НИЦ «Курчатowski институт» и НВАЭС разработаны

функции СПО на различных уровнях «глубокоэшелонированной защиты» (ГЭЗ) (табл. 1). Основным средством для реализации функций поддержки операторов является СВБУ. Однако требуется определенная модификация представления состояния энергоблока на основе выполнения пределов и условий, обеспечивающих готовность к выполнению функций безопасности на первом и втором уровнях ГЭЗ. Отдельные задачи поддержки, необходимые для контроля и управления в условиях аварий с отказом СВБУ, должны реализовываться на альтернативных средствах, включая резервные мозаичные панели, мониторы систем безопасности и др. Средства аварийного КИП должны обеспечивать контроль выполнения КФБ, в том числе в условиях полной потери внешних и внутренних источников электроснабжения.

Таблица 1

**Функции поддержки операторов БПУ АЭС-2006 на различных уровнях ГЭЗ**

№ функции	Наименование функции СПО	Уровни ГЭЗ			
		1	2	3	4
1	Автоматизированное определение режима энергоблока (уровня ГЭЗ)	+	+	+	+
2	Определение состояния энергоблока (работа на мощности, выход на МКУ, горячее состояние и т.д.)	+	+		
3	Автоматический выбор уставок сигнализации в зависимости от текущего состояния энергоблока	+	+		
4	Подавление вторичной сигнализации, являющейся следствием первичной сигнализации	+	+		
5	Контроль эксплуатационных пределов и условий эксплуатации	+	+		
6	Мониторинг состояния основного оборудования энергоблока	+	+	+	+
7	Мониторинг систем безопасности	+	+	+	+
8	Контроль автоматического управления оборудованием	+	+	+	+
9	Рекомендации по оптимизации управления технологическим процессом	+			
10	Прогнозирование состояния энергоблока в режимах нормальной эксплуатации (с помощью модели энергоблока)	+			
11	Представление оперативному персоналу обобщенной информации по процедурам пуска/останова энергоблока, ввода/вывода оборудования, регламентных проверок, опробований и испытаний	+			
12	Периодический анализ изменения характеристик энергоблока	+			
13	Автоматизированное формирование протокола приема-сдачи смены	+	+		
14	Реакция на сигнал – представление оперативному персоналу электронного интерактивного аналога процедур при отклонении контролируемых параметров от допустимых значений	+	+		
15	Контроль пределов и условий безопасной эксплуатации	+	+	+	+
16	Представление оперативному персоналу электронного интерактивного аналога процедур по ликвидации нарушений нормальной эксплуатации в соответствии с ИЛН (СПО ННЭ)		+		
17	Представление оперативному персоналу электронного интерактивного аналога процедур по управлению проектными авариями в соответствии с ИЛА (СПО ПА)			+	
18	Поддержка для принятия решения при управлении в условиях запроектной аварии в соответствии с РУЗА (СППБ)			+	+
19	Поддержка для принятия решения при управлении в условиях тяжелой аварии в соответствии с РУТА (СПО ТА)				+

Очевидно, что предлагается далеко не полный объем задач СПО. Эти задачи будут возникать и решаться в процессе накопления опыта эксплуатации энергоблока, развития науки и техники, расширения возможностей интеллектуальной поддержки персонала, внедрения новых режимов эксплуатации, например, режимов суточного маневрирования мощностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании аналитического обзора предложена классификация СПО АЭС, выполняемая по шести критериям: по способу реализации, по технологическому уровню и участку, по виду поддержки, по типу задач, по поддерживаемой фазе выполнения задачи, по поддерживаемому эксплуатационному режиму. Выделены сложившиеся типы СПО АЭС, а также направления их дальнейшего развития. Предложены функции поддержки операторов БПУ АЭС-2006, состав которых зависит от уровня «глубокоэшелонированной защиты» и эксплуатационного режима станции.

## Литература

1. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике. – М.: Издательство МЭИ, 1994. – 216 с.
2. Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 344 с.
3. Голиков Ю.А., Костин А.Н. Психология автоматизации управления техникой. – М.: Институт психологии РАН, 1996. – 160 с.
4. Машин В.А. Компьютеризированные системы поддержки операторов АЭС (психологические проблемы) // Электрические станции. – 1995. – №7. С. 2–7.
5. Lee S.J., Seong P.H. Design of an integrated operator support system for advanced NPP MCRs: issues and perspectives / in Progress of Nuclear Safety for Symbiosis and Sustainability: Advanced Digital Instrumentation, Control and Information Systems for Nuclear Power Plants / H. Yoshikawa, Z. Zhang (eds.). – Springer, 2014. – Ch. 2. – PP. 11–26.
6. Десятников И.И., Ермолаев А.Д., Ракитин И.Д. Повышение качества информационного обеспечения оператора АЭС в аномальных ситуациях // Атомная техника за рубежом. – 1986. – №7. – С. 15–17.
7. Jang G.-S., Suh S.-M., Park J.-Y., Kim Y.-K. A framework of an active alarm processing for an advanced nuclear power plant / Proc. 6<sup>th</sup> ANS Int. Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies: NPIC & HMIT 2009 (Knoxville, TN, USA, April 5–9, 2009). – La Grange Park: ANS, 2009. – 10 p.
8. Подшибякин М.А., Васин В.М., Гермаш М.М., Стребнев Н.А., Мартынов А.В., Подшибякин А.К. Вопросы концепции создания системы представления параметров безопасности РУ ВВЭР / Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, Россия, 28–31 мая 2013).
9. Hsieh M.-H., Hwang S.-L., Liua K.-H., Liangb S.-F.M., Chuangc C.-F. A decision support system for identifying abnormal operating procedures in a nuclear power plant // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – Vol. 249. – PP. 413–418.
10. Niwa Y., Hollnagel E. Integrated computerization of operating procedures // Nuclear Engineering and Design. – 2002. – Vol. 213. – PP. 289–301.
11. Ma J., Jiang J. Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants: a review // Progress in Nuclear Energy. – 2011. – Vol. 53. – PP. 255–266.
12. Galbally J., Galbally D. A pattern recognition approach based on DTW for automatic transient identification in nuclear power plants // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 81. – PP. 287–300.
13. Hwang S.-L., Lina J.-T., Lianga G.-F., Yaua Y.-J., Yennb T.-C., Hsub C.-C. Application control chart concepts of designing a pre-alarm system in the nuclear power plant control room // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – Vol. 238. – PP. 3522–3527.
14. Анохин А.Н. Адаптивный интерфейс для операторов сложных систем / Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления: ВСПУ-2014 (Москва, 16–19 июня 2014). – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 6345–6356.

15. *Kvalem J., Braseth A.O., Hurlen L., Karlsson T., Nihlwing C.* What constitutes a good human system interface? Lessons learned from Halden project research // Proc. 7<sup>th</sup> ANS Int. Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies: NPIC & HMIT 2010 (Las Vegas, November 7–11, 2010). – La Grange Park: ANS, 2010. – 12 p.

16. *Andresen G.* Information display design: three attempts at superseding the traditional process mimic display / Simulator-based human factors studies across 25 years: The history of the Halden man-machine laboratory / A.B. Skjerve, A. Bye (eds.). – London: Springer-Verlag, 2011. PP. 169–180.

17. *Vicente K. J., Rasmussen J.* Ecological interface design: theoretical foundations // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1992. – Vol. 22, – № 4. – PP. 589–606.

18. *Anokhin A., Ivkin A.* Evaluation of ecological interface design for supporting cognitive activity of nuclear plant operators / Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conference on Applied Human Factors and Ergonomics: AHFE 2014 (Krakow, 19–23 July, 2014). – Stoughton: The Printing House, 2014. – PP. 260–270.

19. *Anokhin A., Lourie V., Dzhumayev S., Golovanev V., Kompanietz N.* Upgrade of the Kursk NPP main control room (case study) / Proc. Int. Control Room Design Conference: ICOCO 2010 (Paris, France, October 25–26, 2010) / Edited by J. Wood. – Loughborough: IEHF, 2010. – PP. 207–214.

20. *Braseth A.O., Nurmilaukas V., Laarni J.* Realizing the information rich design for the Loviisa nuclear power plant // Proc. 7<sup>th</sup> ANS Int. Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies: NPIC & HMIT 2010 (Las Vegas, NM, USA, November 7–11, 2010). – La Grange Park: ANS, 2010. – 12 p.

Поступила в редакцию 30.03.2016 г.

#### Авторы

Анохин Алексей Никитич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления  
E-mail: anokhin@obninsk.ru

Калинушкин Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела Курчатовского ядерно-технологического комплекса  
E-mail: ocud-main@nrcki.ru

Горбаев Владимир Алексеевич, заместитель руководителя отделения Курчатовского ядерно-технологического комплекса  
E-mail: Gorbaev\_VA@nrcki.ru

Сивоконь Владимир Петрович, кандидат технических наук, советник генерального директора  
E-mail: v.sivokon@gmail.com

UDC 004.89:621.039

### **NPP OPERATOR SUPPORT SYSTEMS: STATE OF ART AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

Anokhin A.N. \*, Kalinushkin A. E. \*\*, Gorbaev V.A. \*\*, Sivokon V.P. \*\*\*

\* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI». 1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

\*\* Research Centre «Kurchatov Institute».

1 Academic Kurchatov sq., Moscow, 123182 Russia

\*\*\*«Rusatom Automated Control Systems» JSC.

25 Ferganskaya str., Moscow, 109507 Russia

#### ABSTRACT

The growing interest in the subject of NPP operator support systems (OSS) inspired us to prepare an analytical review which is described in the present article. The following systemic principles are proposed as a result from this review. The aim of NPP OSS is to prevent or decrease frequency and importance of operators' errors. In order to achieve

this aim OSS should perform four operator support functions, namely: facilitation of situation awareness, assistance in adequate estimation of situation, assistance in planning of reaction and prevention of errors when performing actions. Performance of the functions is ensured by execution of support tasks, such as step-by-step representation of operating procedures, operators' attentional control, etc. Six criteria for categorization of NPP OSS are proposed, namely: way of realization, covered part of NPP, type of support, type of task, task execution phase to be supported and relevance to operational mode.

Currently, two types of operator support are used, namely intellectual and information support. Safety parameters display system, alarm processing and presentation system and computerized procedure system can be attributed to the first group. The second group comprises overview display, task-based display and function-oriented display. The following trends of NPP OSS development became apparent: risk estimation and accident management systems, overall diagnosis and operational mode supervision systems, ecological interface design and information rich design.

The proposed systematization enables to identify the most effective operator support functions depending of NPP operational mode. These functions are oriented to the AES-2006 type of NPP as well as to the set of operational procedures available for MCR operators and to functionality of power unit I&C system.

**Key words:** nuclear power plant, main control room operator, operator support system, support function, task of support

#### REFERENCES

1. Bashlykov A.A., Ereemeev A.P. *Ekspertnye sistemy podderzhki prinyatiya reshenij v energetike* [Expert systems for support of decision making in power engineering]. Moscow. MEI Publ., 1994. 216 p. (in Russian).
2. Anokhin A.N., Ostrejkovskij V.A. *Voprosy ergonomiki v yadernoj energetike* [Ergonomics issues in application to nuclear power engineering]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 344 p. (in Russian).
3. Golikov YU.A., Kostin A.N. *Psikhologiya avtomatizatsii upravleniya tekhnikoj* [Psychological aspect of automation of control in technical systems]. Moscow. IPРАН Publ., 1996. 160 p. (in Russian).
4. Mashin V.A. *Komp'yuterizirovannye sistemy podderzhki operatorov AES (psikhologicheskie problemy)* [Computerized systems for support of NPP operators: psychological issues]. *Elektricheskie Stantsii*, 1995, no. 7, pp. 2–7 (in Russian).
5. Lee S.J., Seong P.H. Design of an integrated operator support system for advanced NPP MCRs: issues and perspectives. In: *Progress of Nuclear Safety for Symbiosis and Sustainability: Advanced Digital Instrumentation, Control and Information Systems for Nuclear Power Plants* by H. Yoshikawa, Z. Zhang (eds.). Springer, 2014. Ch. 2, pp. 11–26.
6. Desyatnikov I.I., Ermolaev A.D., Rakitin I.D. *Povyshenie kachestva informatsionnogo obespecheniya operatora AES v anomal'nykh situatsiyakh* [Improvement of information support of NPP operator under abnormal situations]. *Atomnaya Tekhnika za Rubezhom*, 1986, no. 7, pp. 15–17 (in Russian).
7. Jang G.-S., Suh S.-M., Park J.-Y., Kim Y.-K. A framework of an active alarm processing for an advanced nuclear power plant. *Proc. 6<sup>th</sup> ANS Int. Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies: NPIC & HMIT 2009*. La Grange Park, ANS, 2009.
8. Podshibyakin M.A., Vasin V.M., Germash M.M., Strebnev N.A., Martynov A.V., Podshibyakin A.K. *Voprosy kontseptsii sozdaniya sistemy predstavleniya parametrov bezopasnosti RU VVER* [Issues of the concept of developing the system for displaying safety parameters of VVER RP]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konf. «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER»* (Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Safety Assurance of NPP with WWER). Podol'sk. Gidropress Publ., 2013.
9. Hsieh M.-H., Hwanga S.-L., Liua K.-H., Liangb S.-F.M., Chuangc C.-F. A decision support system for identifying abnormal operating procedures in a nuclear power plant. *Nuclear*

- Engineering and Design*. 2012, v. 249, pp. 413–418.
10. Niwa Y., Hollnagel E. Integrated computerization of operating procedures. *Nuclear Engineering and Design*. 2002, v. 213, pp. 289–301.
11. Ma J., Jiang J. Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants: a review. *Progress in Nuclear Energy*. 2011, v. 53, pp. 255–266.
12. Galbally J., Galbally D. A pattern recognition approach based on DTW for automatic transient identification in nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, v. 81, pp. 287–300.
13. Hwang S.-L., Lina J.-T., Lianga G.-F., Yaua Y.-J., Yennb T.-C., Hsub C.-C. Application control chart concepts of designing a pre-alarm system in the nuclear power plant control room. *Nuclear Engineering and Design*. 2008, v. 238, pp. 3522–3527.
14. Anokhin A.N. Adaptivnyj interfejs dlya operatorov slozhnykh sistem [An adaptive interface for complex system operators]. *Trudy XII Vserossijskogo soveshchaniya po problemam upravleniya: VSPU-2014* (Proc. 12<sup>th</sup> All-Russian Topical Meeting on Problems of Control). Moscow. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN Publ., 2014, pp. 6345–6356 (in Russian).
15. Kvalem J., Braseth A.O., Hurlen L., Karlsson T., Nihlwing C. What constitutes a good human system interface? Lessons learned from Halden project research. *Proc. 7<sup>th</sup> ANS Int. Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies: NPIC & HMIT 2010*. Las Vegas, 2010.
16. Andresen G. Information display design: three attempts at superseding the traditional process mimic display. In: *Simulator-Based Human Factors Studies Across 25 Years: The History of the Halden Man-Machine Laboratory* by A.B. Skjerve, A. Bye (eds.). London: Springer-Verlag, 2011, pp. 169–180.
17. Vicente K. J., Rasmussen J. Ecological interface design: theoretical foundations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1992, v. 22, no. 4, pp. 589–606.
18. Anokhin A., Ivkin A. Evaluation of ecological interface design for supporting cognitive activity of nuclear plant operators. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Applied Human Factors and Ergonomics 2014*. Krakow, 2014, pp. 260–270.
19. Anokhin A., Lourie V., Dzhumaev S., Golovanev V., Kompanietz N. Upgrade of the Kursk NPP main control room (case study). *Proc. Int. Control Room Design Conf.: ICOCO 2010*. Loughborough, IEHF, 2010, pp. 207–214.
20. Braseth A.O., Nurmilaikas V., Laarni J. Realizing the information rich design for the Loviisa nuclear power plant. *Proc. 7<sup>th</sup> ANS Int. Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies: NPIC & HMIT 2010*. La Grange Park, ANS, 2010.

### Authors

Anokhin Alexey Nikitich, Chair of Dept. for Computer-Aided Control Systems,  
Professor, Dr. Sci. (Engineering)  
E-mail: anokhin@obninsk.ru

Kalinushkin Andrej Evgen'evich, Head of Dept. in the Institute for Nuclear Reactors,  
Cand. Sci (Engineering)  
E-mail: ocud-main@nrcki.ru

Gorbaev Vladimir Alexeevich, Deputy Head in the Institute for Nuclear Reactors,  
E-mail: Gorbaev\_VA@nrcki.ru

Sivokon Vladimir Petrovich, Cand. Sci (Engineering), Advisor of Director General  
E-mail: v.sivokon@gmail.com