

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОБЗОРА СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА АТОМНОЙ СТАНЦИИ

**Е.Н. Алонцева\*, А.Н. Анохин\*, А.С. Стебнев\*\*, Э.Ч. Маршалл\*\*\***

*\* Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,  
г. Обнинск*

*\*\* Ленинградская АЭС, г. Сосновый Бор*

*\*\*\* Synergy Consultants Ltd., Великобритания*



Количество параметров, представляемых операторам блочных щитов управления (БЩУ) АЭС, может стать причиной информационного стресса, грозящего неминуемыми ошибками персонала. Чтобы снизить вероятность возникновения информационного стресса в мировой практике создания современных компьютеризованных БЩУ применяется принцип многоуровневого иерархического представления информации. Верхний уровень такого представления составляет обобщенная мнемосхема (ОМС), задача которой – отображение общего состояния энергоблока, состояния критических функций безопасности, основных материальных и энергетических балансов. В настоящей статье описывается методика разработки ОМС на примере энергоблока с РБМК-1000 Ленинградской АЭС.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, основные, важные для безопасности функции оперативного управления энергоблоком АЭС, реализуются с блочного щита управления (БЩУ). В зависимости от типа АЭС, на современном БЩУ работают от 3 до 4 операторов. Количество элементов БЩУ – средств отображения информации (СОИ) и органов управления (ОУ) может достигать 8–9 тыс., темп представления информации – нескольких десятков, а иногда и нескольких сотен единиц информации в минуту. В ходе работы операторам БЩУ приходится обмениваться друг с другом и с местными операторами большим количеством сообщений, несущих как дополнительную информацию, так и различные распоряжения.

Таким образом общепризнано, что одним из важнейших факторов, влияющих на операторскую деятельность, является огромный объем информации. В работе [1] отмечается, что этот фактор может послужить сильным стрессором, вызывающим у операторов так называемый «информационный стресс». Большой объем информации может усугубляться такими явлениями, как плохое и неоднородное представление информации, разбросанность важных параметров, неадекватность (неоднозначность) кодировки параметров и др. Многочисленные интервью, проведенные авторами настоящей статьи с операторами БЩУ отечественных АЭС, убедительно демонстрируют наличие перечисленных проблем.

---

© Е.Н. Алонцева, А.Н. Анохин, А.С. Стебнев, Э.Ч. Маршалл, 2005

Самостоятельно или в сочетании с другими стрессорами (например, эмоциональными), факторы объема и качества представления информации могут спровоцировать стрессовые реакции оператора, особенно в экстремальных ситуациях, что в свою очередь приводит к функциональным и структурным отказам операторов. Это также подтверждается в работе [2], посвященной анализу более 70 стрессовых ситуаций на АЭС и выявлению наиболее значимых стрессоров, приводящих к ошибкам операторов.

На практике известны несколько способов снижения объема информации, подлежащей восприятию и переработке операторами. К их числу относятся:

- различные методы фильтрации информации, особенно сигнализации;
- более удобная компоновка приборов и ключей на БЩУ;
- автоматизированная обработка информации и передача части функций от операторов компьютерам;
- многоуровневое представление информации.

Последний подход родился из опыта операторов, которые обычно наблюдают за состоянием энергоблока, используя относительно небольшое количество параметров – от нескольких до десятков. При возникновении нештатных ситуаций или в переходных режимах именно эти параметры характеризуют общее состояние блока, а к более детальной информации операторы обращаются по мере необходимости. Однако одной из проблем на этом пути является разбросанность этих параметров, трудности их сопоставления между собой и другие эргономические факторы.

Сегодня многоуровневое представление информации активно реализуется в мировой практике современных компьютеризированных БЩУ и включает в себя три уровня представления информации, а именно

- уровень 1 – представление информации об общем состоянии энергоблока;
- уровень 2 – представление информации о технологических системах;
- уровень 3 – представление информации и управление отдельным технологическим оборудованием (арматурой, регуляторами, насосами и их группами).

Вся информация представляется в контексте текущей ситуации и решаемых операторами задач.

Верхний уровень такого представления составляет обобщенная мнемосхема (ОМС), задача которой – отображение общего состояния энергоблока, состояния критических функций безопасности, мониторинг основных материальных и энергетических балансов. ОМС является образной и наглядной моделью всего энергоблока в целом.

В настоящей статье описывается методика синтеза ОМС верхнего уровня, а также ее реализация для БЩУ АЭС с РБМК-1000 на примере энергоблоков Ленинградской АЭС (ЛАЭС). Основная идея работы – найти такой способ отображения технологических параметров и состояния оборудования, который обеспечил бы быстрое понимание состояния основных материальных и энергетических балансов, а также критических функций безопасности энергоблока. Это позволит в любой момент времени быстро сформировать у операторов общий образ блока, детализируемый в случае необходимости на двух нижних уровнях представления информации.

Разработка ОМС предполагает два аспекта – определение содержания ОМС (отбор технологических параметров и значимого оборудования для представления на ОМС) и разработку формы представления ОМС. Рассмотрим их более подробно.

## **МЕТОДИКА ОТБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Предлагаемая методика отбора технологических параметров для ОМС включает в себя три этапа.

1. На первом этапе формируется перечень параметров-кандидатов. В качестве

источников информации для формирования исходного перечня выступают:

- интервью с операторами БЩУ и инструкторами полномасштабного тренажера;
- технологический регламент, техническая и эксплуатационная документация, документация вероятностного анализа безопасности;
- результаты анализа задач и изучения событий, имевших место при эксплуатации АЭС данного типа.

Затем из исходного перечня исключаются наиболее редко упоминаемые параметры, а полученный список из  $n$  параметров-кандидатов подлежит дальнейшему анализу.

2. На втором этапе выполняется ранжирование выявленных параметров-кандидатов, осуществляемое на основании экспертных оценок. Эксперты оценивают следующие показатели значимости параметров:

- **частота использования** параметра во всех режимах блока (насколько часто операторы БЩУ используют данный параметр в процессе слежения и/или управления блоком);
- информационная емкость параметра (**информативность**) и его важность для понимания общего состояния блока и тенденций его изменения;
- важность параметра для оценки текущего уровня **безопасности** блока, а также слежения и обеспечения критических функций безопасности.

Балльные шкалы с интерпретацией баллов, используемые для оценки перечисленных показателей, приведены в табл. 1–3.

3. На третьем этапе выполняется обработка экспертных оценок и определение значимости параметров-кандидатов. Обработка выполняется по следующему алгорит-

Таблица 1

**Шкала для оценки частоты использования параметра**

Вес ( $w^F$ )	Балл	Интерпретация
0	1	Используется очень редко
0,33	2	Используется периодически
0,67	3	Используется часто
1	4	Используется всегда

Таблица 2

**Шкала для оценки информативности параметра**

Вес ( $w^I$ )	Балл	Интерпретация
0	1	Малая информативность
0,5	2	Средняя информативность
1	3	Высокая информативность

Таблица 3

**Шкала для оценки важности параметра для безопасности**

Вес ( $w^S$ )	Балл	Интерпретация
0	1	Неважен для оценки безопасности
0,5	2	Важен для оценки безопасности
1	3	Необходим для оценки безопасности

му.

Экспертные оценки (баллы) преобразуются в веса в соответствии с табл. 1–3. Так, например, оценка «используется периодически» (балл 2) фактора «Частота использования» преобразуется в вес 0,33, а оценка «необходим ...» (балл 3) фактора «Безопасность» – в 1.

Введем следующие обозначения:

- $w_{ij}^F$  – степень выраженности (вес) фактора «Частота использования», присвоенная  $i$ -му параметру ( $i=1...n$ )  $j$ -м экспертом ( $j=1...m$ );
- $w_{ij}^I$  – степень выраженности (вес) фактора «Информативность», присвоенная  $i$ -му параметру  $j$ -м экспертом;
- $w_{ij}^S$  – степень выраженности (вес) фактора «Безопасность», присвоенная  $i$ -му параметру  $j$ -м экспертом.

Рассмотрим процедуру обработки оценок на примере одного из факторов – «Частота использования». Предположим, что всего по данному фактору получено  $m$  векторов весов параметров (по одному вектору от каждого эксперта) –  $W_j^F$  ( $j=1...m$ ). Балльная шкала позволяет упорядочить объекты экспертизы по их относительной значимости с точки зрения измеряемого фактора, т.е. наша задача – получить вектор рангов  $R^F$  параметров по частоте их использования операторами БЩУ. Для этого необходимо сначала преобразовать *веса* параметров, полученные от экспертов, в *относительные веса*. Это достигается путем нормирования весов:

$$\tilde{w}_{ij}^F = \frac{w_{ij}^F}{\sum_i w_{ij}^F}.$$

Далее, для каждого параметра рассчитаем его *средний относительный вес* по всем экспертам:

$$\bar{w}_i^F = \frac{\sum_j \tilde{w}_{ij}^F}{m_i},$$

где  $m_i$  – число экспертов, давших оценку данному параметру (т.е.  $w_{ij}^F \neq \emptyset$ ) ( $m_i \in [1; m]$ ).

Нормируем эти веса

$$w_i^F = \frac{\bar{w}_i^F}{\sum_i \bar{w}_i^F}$$

и получаем обобщенный вектор относительной значимости параметров по фактору «Частота использования» –  $W$ . Проранжировав его, переходим к вектору рангов параметров:  $W^F \rightarrow R^F$ . Описанная процедура повторяется для оценок по факторам «Информативность» и «Безопасность». Суммарная значимость параметра определяется как среднее его значимостей по трем факторам.

На последнем шаге из списка параметров-кандидатов после консультаций с экспертами исключаются параметры с наиболее низкими значениями.

### СИНТЕЗ ОМС НА ПРИМЕРЕ ЭНЕРГОБЛОКА РБМК-1000 ЛАЭС

С помощью описанной выше методики для энергоблока с реактором РБМК-1000 были выявлены 26 важных технологических параметров, 32 дискретных сигнала, отражающих наступление некоторых событий, и 34 устройства, состояние которых важно для быстрого восприятия и понимания ситуации операторами БЩУ.

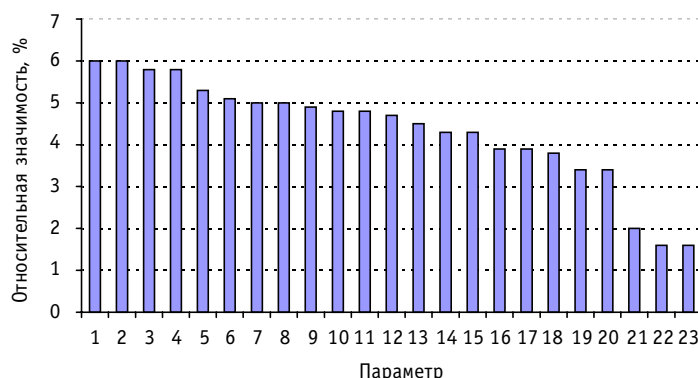


Рис. 1. Диаграмма относительных значимостей параметров: 1 – уровень в БС по сторонам КМПЦ; 2 – расход питательной воды в БС по сторонам КМПЦ; 3 – расход пара от БС по сторонам КМПЦ; 4 – давление в БС; 5 – электрическая мощность ТГ-1,2; 6 – тепловая мощность реактора; 7 – уровень в Д-1,2; 8 – давление в напорном коллекторе ПЭН; 9 – суммарная электрическая мощность; 10 – суммарный расход КМПЦ по сторонам; 11 – частота тока в системе; 12 – давление в Д-1,2; 13 – скорость изменения давления в БС; 14 – расход ОК на Д-1,2; 15 – оперативный запас реактивности; 16 – вакуум в КНД ТГ-1,2; 17 – уровень в КНД ТГ-1,2; 18 – температурный запас до кавитации ГЦН по сторонам КМПЦ; 19 – скорость изменения давления в БС по сторонам КМПЦ; 20 – расход пара на ТГ-1,2; 21 – давление в БС по сторонам КМПЦ; 22 – температура ОК на Д-1,2; 23 – обороты турбины ТГ-1,2

Относительные значимости основных параметров-кандидатов показаны на диаграмме (рис. 1), где явно выделяются две группы: первая, лидирующая – из четырех параметров с наиболее высокой значимостью (параметры барабана-сепаратора – уровни воды, давление пара, расходы питательной воды, расходы пара) и вторая – из трех параметров-аутсайдеров (отдельное представление давления пара в барабанах-сепараторах, температуры основного конденсата перед деаэраторами и обороты турбины). По отдельным факторам выделяются также электрическая мощность турбогенераторов, скорость изменения давления в барабанах-сепараторах (по информативности), суммарный расход через КМПЦ по сторонам (с точки зрения оценки безопасности).

Далее выполняется синтез формы ОМС. Для этого необходимо

1) разработать алфавит кодирования оборудования, информации и динамики. Наряду с отечественными справочниками по эргономике, наиболее репрезентативным является руководство [3], используемое в мировой практике; при разработке кодов выполняется следующее:

- разработка алфавита знаковых обозначений (мнемознаков) для отображения динамики (повышение, понижение параметра), диапазонов значений параметров, технологических систем, оборудования и его состояния;
- разработка цветового кода, согласующегося с известными стереотипами и отвечающего существующим эргономическим и психофизиологическим нормам;
- выбор легко воспринимаемого и хорошо различимого шрифта;

2) синтез общей компоновки схемы; главная идея – скомпоновать всю необходимую информацию так, чтобы обеспечить полный обзор всего поля, отобразить не только необходимые параметры, но и технологический процесс и при этом не потерять образ реальной схемы блока;

3) графическое представление основных материальных и энергетических балансов; балансовые соотношения дают представление о происходящем процессе и позволяют предположить причину незапланированных изменений состояния.

Эскиз полученного графического образа ОМС, который проходит верификацию и валидацию с использованием полномасштабной модели РБМК-1000 ЛАЭС и стенда, созданного в рамках программы TACIS R1.04-96A, представлен на рис. 2.

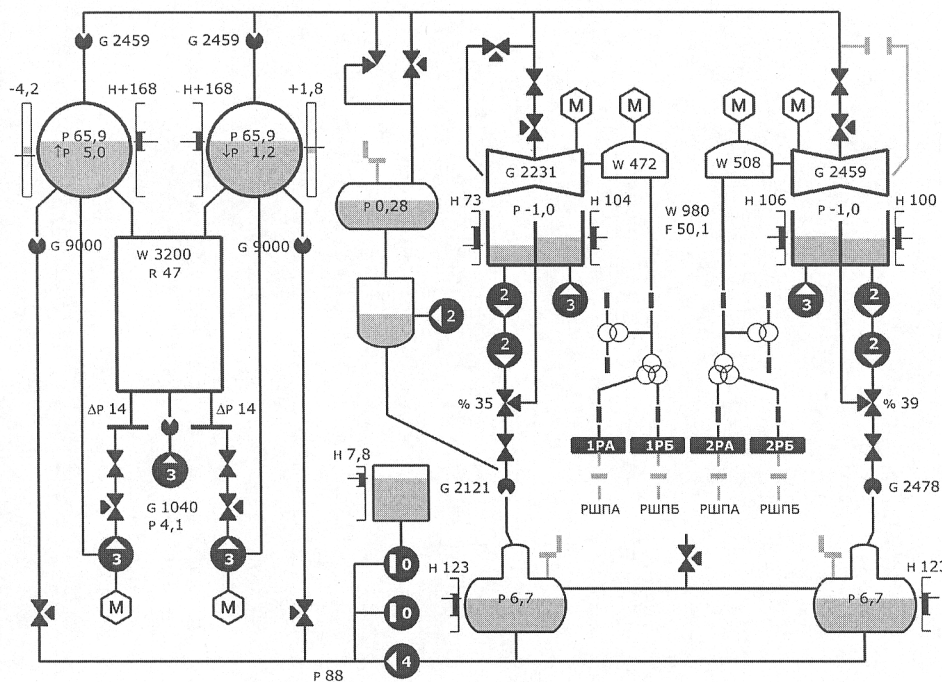


Рис. 2. Эскиз обобщенной мнемосхемы для обзора состояния энергоблока РБМК-1000

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика синтеза информации первого уровня для обзора и оценки состояния энергоблока АЭС. Показана реализация методики на примере ОМС для БЩУ ЛАЭС с РБМК-1000. Такой способ представления информации позволит снизить вероятность возникновения «информационного стресса» оператора и его последствий. Далее предполагается применить созданную методику для синтеза представления информации второго и третьего уровня.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Пойшу, А.В. Подкопаеву, Л.А. Тарасову, С.Л. Калпащикову, Д.В. Каляженкову, С.В. Фролову за активное содействие и консультации в ходе работы над обобщенной мнемосхемой энергоблока АЭС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 05-08-18092-а)

## Литература

1. Бодров В.А. Информационный стресс. – М.: ИП РАН, 2000. – 352 с.
2. Анохин А.Н., Алонцева Е.Н. Выявление значимых факторов, влияющих на эффективность деятельности операторов АЭС в экстремальных ситуациях//Проблемы психологии и эргономики. – 2003. – №3. – С. 14-15.
3. Human-System Interface Design Review Guidelines (NUREG-0700). – Washington, D.C.: US Nuclear Regulatory Commission, 2002.

Поступила в редакцию 22.10.05

**УДК 621.311.25: 621.039**

*Information Representation for In-Process Review of NPP Unit STATUS\ E.N. Alontseva, A.N. Anokhin, A.S. Stebenev, E. Marshal; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 3 titles.*

The large number of process parameters which are available for NPP Main Control Room (MCR) operators can provoke the information stress which leads to unavoidable personnel errors. To decrease a probability of information stress the principle of multilevel hierarchical representation of information is used in the good world-wide practice of modern computerized MCR design. A generalized mimic diagram (GMD) constitutes the top level of such representation. The GMD objective is to provide for MCR operators the NPP conditions in a general way as well as to display status of critical safety functions and main material and power balances. The present paper describes the approach to GMD developing in the case of RBMK-1000 power unit of Leningrad NPP.

**УДК 621.311.25: 621.039**

*Efficiency Evaluation for Small and Medium-Sized Reactors in the Sakha Republic (Yakutia) \A.A.Andrianov, Yu.A.Korovin, E.V. Fedorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 11 pages, 2 tables, 17 illustrations. – References, 9 titles.*

The present paper analyzes the technical and economic feasibility of small and medium-sized reactors (SMSR) deployment in remote regions of Russia using the Sakha Republic (Yakutia) as an example. The analysis made shows that the SMSR competitiveness evaluation models for particular regions with due account of their energy and economic environment hold more promise for SMSR development than aggregated models. The advantages of nuclear power as an energy source are offset by transition to the aggregated model of the energy supply of the republic. The calculations show that SMSR deployment in the republic may be economically feasible and desirable because it will result in the following: (1) a reduction in fossil fuel delivery costs; (2) a reduction in annual electricity production costs; (3) prerequisites for mining industry development; (4) improved environmental conditions in the region.

**УДК 621.311.25: 621.039**

*Optimization of Nuclear Reactor Operation Regime in Variable Daily Loading Schedule with Accounting for Energy Utilization \A.M. Zagrebayev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 10 titles.*

The paper investigates potential possibilities for optimization of power nuclear reactor operation in variable daily loading schedule with accounting for energy utilization. Total fuel consumption is considered as an optimization criterion. The effects of the reactor parameters and energy utilization efficiency coefficient on characteristics of optimal regimes were studied. Total optimization effect was evaluated, and conditions for optimization expediency were defined.

**УДК 621.311.25: 621.039**

*About a Possibility High and Low Pressure Pumps Anomalies Identification Based on Testing Data Analysis \S.T. Leskin, V.V. Kornilova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 8 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 8 titles.*

The application of main components method for revealing the abnormal conditions reasons of VVER high and low pressure pumps are discussed. On the basis of selected space transformation model the laws of describing pumps behavior dynamics informative parameters influence on resulting attributes distribution in main components space are received. The parameters caused pumps behavior anomalies occurrence are revealed. The results of data processing of the fourth block of the Balakovo NPP are presented.