

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДЕКЛАРАТИВНЫХ ЗНАНИЙ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕДУРАХ ДЛЯ АЭС

А.Н. Анохин*, Н.В. Плешакова**

**Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*

***Смоленский филиал учебно-тренировочный центр «Атомтехэнерго», г. Десногорск*



В статье рассматриваются вопросы представления знаний в системах компьютеризированных процедур, предназначенных для поддержки операторов БЩУ АЭС. Предлагается метод представления декларативных знаний о технологическом оборудовании и технологических средах АЭС, основанный на семантических сетях. С помощью функционального подхода к управлению построена иерархическая структура технологического оборудования. Проанализированы состояния и режимы работы оборудования. На основании результатов анализа разработаны интенсификационные семантические сети, описывающие структуру базы знаний. Знания о конкретном оборудовании и технологических средах хранятся в виде экстенсимальных сетей и шаблонов, предназначенных для идентификации диагностических симптомов.

Ключевые слова: система поддержки оператора, представление знаний, семантическая сеть, экстенсимальное и интенсимальное описание.

Key words: operator support system, knowledge representation, semantic net-work, extensional and intensional description.

ВВЕДЕНИЕ

Управление современным энергоблоком АЭС представляет собой непростую задачу, сопровождаемую такими факторами как сложность самой станции, обилие взаимосвязей между системами, оборудованием и разными энергоблоками одной станции, энергетическая и материальная разомкнутость некоторых технологических контуров. Для операторов процесс управления – это смена монотонных периодов ожидания и безделья и ситуаций, в которых нагрузка (когнитивная и моторная) превышает все мыслимые пределы. Обилие электроники и автоматизации улучшает ситуацию, однако полностью не разрешает ее, т.к. автоматика сама по себе существенно увеличивает сложность энергоблока и не всегда положительно влияет на его надежность [1].

Одним из выходов в этой ситуации является внедрение систем поддержки операторов (СПО) блочных пунктов (или щитов) управления (БПУ, БЩУ), усиливающих потенциал человека в задачах мониторинга функционирования энергоблока, обнаружения отказов, диагностики оборудования, контроля функций безопасности, интерпретации сложных процедур, оценки ситуации и принятия решений [2].

© А.Н. Анохин, Н.В. Плешакова, 2011

Опыт внедрения и эксплуатации СПО [3, 4] показывает, что поддержка когнитивных процессов, таких как сбор информации, принятие решения и планирование, реально уменьшает вероятность ошибок персонала и позволяет поддерживать должный уровень осведомленности о состоянии станции.

Обзор существующих в мире СПО АЭС представлен в [5, 6]. В настоящее время можно говорить о нескольких сложившихся подходах к классификации СПО [7, 8]:

- по *поддерживаемым фазам решения задачи* оператором – системы, поддерживающие процесс обнаружения, диагностики, планирования, исполнения и отслеживания;
- по *режиму работы АЭС* – системы, поддерживающие оператора в нормальных режимах эксплуатации, при нарушениях (инцидентах) и в аварийных режимах;
- по *объекту управления* – системы, поддерживающие управление реактором, оборудованием первого и второго контуров, системами безопасности, энергоблоком в целом.

Интересный подход к классификации СПО излагается в работе [3], где они разделяются на системы косвенной и непосредственной поддержки оператора. СПО первого типа обеспечивают более образное и эффективное представление информации, используемой оператором в разных фазах решения задачи. СПО второго типа выполняют за оператора часть интеллектуальной работы и служат советчиками при обработке сигнализации, выборе и исполнении процедур, диагностике неисправностей и др.

Анализ современного состояния дел с СПО в мире показывает, что наиболее распространенными сегодня разновидностями являются системы представления параметров безопасности (СППБ) и системы компьютеризованных процедур (СКП) или, просто, *компьютеризованные процедуры*. Внедрение СППБ концентрирует внимание операторов в опасных ситуациях на самом главном – обеспечении функций безопасности, что позволяет снизить избыточность информации. Использование СКП позволяет существенно облегчить работу операторов с аварийными инструкциями за счет автоматической навигации по процедурам, чувствительности к контексту ситуации, изменения уровня детализации и других возможностей [9].

В самом простом случае компьютеризованная процедура – это отображение текста, аналогичного бумажному, на экране компьютера. При более сложном варианте предполагается варьирование формы представления процедур, например, в виде блок-схемы или таблицы, а также пошаговое отслеживание переходов внутри и между процедурами. Наконец, СКП сама выполняет мониторинг состояния энергоблока АЭС и отображает процедуры исходя из контекста ситуации. Такие системы могут исполнять и управляющие функции [13]. В отчете [9] предлагаются две градации автоматизации управления:

- совместное управление, когда оператор делегирует системе часть своих функций;
- автоматическое управление, когда система сама выполняет все функции без вмешательства или после подтверждения со стороны оператора.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ В СПО

Основная научная проблема, сопровождающая разработку и внедрение СПО, состоит в формировании метода представления и кодирования знаний об объекте и процессе управления. В теории искусственного интеллекта известны различные подходы к представлению знаний, такие как логические деревья, продукционные правила, фреймы, семантические сети, нечеткие множества, нейронные сети, сети Петри и др. Выбор подхода зависит от решаемой задачи: логические деревья и продукционные правила удобны для описания причинно-следственных отноше-

ний; фреймы применимы для представления иерархии объектов, обладающих наследуемыми свойствами, а семантические сети используются для формализации самых разных ролевых отношений между объектами предметной области.

Очевидно, что не существует единственно возможного и наилучшего подхода для представления одновременно всех разнородных знаний об АЭС – о физических, функциональных и структурных связях оборудования и систем, о методах диагностирования и управления энергоблоком, о моделях технологических процессов и др. Выбор метода представления знаний зависит не только от их природы, но и от того, в какой форме эти знания уже существуют и используются операторами в их работе.

Статья посвящена разработке СКП, основным источником знаний для которой являются сами эксплуатационные процедуры, регламентирующие деятельность персонала как в штатных режимах, так и при нарушениях и в аварийных ситуациях. Анализ процедур позволил выявить состав этих знаний, включающий в себя

- знания о технологическом оборудовании, его связях и поведении;
- знания о технологических средах и их поведении;
- алгоритмы принятия решений и управления;
- прочие знания и информацию.

Используемые на АЭС процедуры представляют собой структурированный текст на естественном языке. Особенности такого представления являются неунифицированные языковые и синтаксические конструкции, наличие нечетких и неоднозначных понятий. Кроме того, не исключены и логические ошибки, неполнота и противоречивость самих алгоритмов процедур. Все это не только затрудняет восприятие и понимание отдельных элементов процедур, но и делает невозможным непосредственное представление знаний этих процедур в памяти ЭВМ для организации последующего логического вывода на их основе.

Таким образом, на пути к СКП необходимо создать метод кодирования знаний, который, несмотря на нечеткость и неунифицированность вербальных формулировок позволил бы точно и непротиворечиво отразить логику и алгоритм процедуры и, с другой стороны, оставлял бы эти формулировки «нетронутыми» – в том виде, к которому привыкли и с которым работают операторы. В статье обсуждается такой подход к представлению знаний об оборудовании и технологических средах.

Традиционно в искусственном интеллекте для представления знаний, выраженных в вербальной форме, используется аппарат *семантических сетей*. Под «семантической сетью» подразумевается целый класс общих подходов. Например, самым простым видом семантических сетей являются реляционные графы, где каждый узел обозначает понятие, а дуги – отношения между этими понятиями. Более сложными считаются пропозиционные сети, узлы которых представляют собой целые предложения и являются точками соприкосновения для отношений между отдельными высказываниями. Также существуют выполняющиеся сети (например, сети Петри), содержащие механизмы для отправки сообщений от узла к узлу, модификаций графа сети и выполнения встроенных процедур, и обучающиеся сети (например, нейронные), способные изменять внутреннее представление на основе поступающей информации [10].

Общим для всех подходов является декларативное графическое представление предметной области с выделением набора смысловых понятий, объектов предметной области и их состояний (вершин сети), связанных между собой отношениями различного типа (конструкционными, функциональными, структурными), изображаемыми в виде дуг. С формальной точки зрения, семантическая сеть – это ненаправленный граф с поименованными вершинами и дугами (ребрами). Семантичес-

кие сети могут иметь собственную внутреннюю структуру. Так, семантическую сеть можно разделить на подсети (пространства) и устанавливать отношения не только между вершинами, но и между пространствами. Кроме того, каждая вершина сети может сама представлять собой семантическую сеть – в этом случае мы имеем дело со сложной иерархической сетью.

В работе рассматривается двухуровневая семантическая сеть. На верхнем, *интенциональном*, уровне с помощью семантической сети представляются обобщенные объекты, классы, категории и отношения между ними. В работе предложены две интенциональные сети – для описания технологического оборудования и технологических сред. На нижнем, *экстенциональном*, уровне строятся семантические сети для каждого конкретного технологического параметра, элемента или группы оборудования. *Шаблоны*, накладываемые на экстенциональные сети, позволяют диагностировать ситуацию и принимать решения.

ИЕРАРХИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Энергоблок АЭС – это сложная техническая система, функционирование которой зависит не только от работы отдельного оборудования, но и от того, насколько слаженно взаимодействуют элементы этого оборудования между собой в ходе выполнения определенной технологической задачи. Очевидно, что классификация и описание устройства оборудования – сложная, многосторонняя проблема. Наиболее известным является разделение оборудования на классы в зависимости от его

- роли в технологическом процессе – основное, вспомогательное,
- устройства и физических принципов действия – тепломеханическое, электромеханическое и др.;
- значимости для безопасности и надежности станции – категоризация оборудования и систем по четырем классам безопасности и по четырем типам выполняемых функций безопасности [11].

Учитывая, что работа сконцентрирована на вопросах контроля и управления, введем еще один принцип структурирования оборудования АЭС. Для этого представим технологический процесс АЭС как совокупность взаимодействующих функций, например, преобразование ядерной энергии в тепловую, генерация пара, преобразование тепловой энергии в механическую и электрическую, перемещение вещества и др. Функции образуют иерархию, в нижней части которой расположены элементарные действия, такие как перекачка конденсата, хранение запаса теплоносителя и др. Для выполнения каждой функции в конструкции АЭС предусмотрено соответствующее оборудование: насосы, задвижки, баки – для выполнения функций нижнего уровня; технологические системы и сложные агрегаты, такие как реактор или турбина – для выполнения функций верхнего уровня. Управление единицей или группой оборудования позволяет воздействовать на соответствующую функцию – активизировать или, наоборот, остановить ее [12].

Таким образом, оборудование АЭС рассматривается как иерархия *объектов управления*, обеспечивающих выполнение технологических функций определенного уровня. Подчеркнем, что объектом управления может быть одна единица оборудования, например, задвижка или регулирующий клапан вместе с трубопроводом, обеспечивающие функцию перетока воды из одного места в другое. В то же время, обеспечение циркуляции теплоносителя через реактор – это функция, выполняемая одновременно несколькими главными циркуляционными насосами (ГЦН), рассматриваемыми в данном случае тоже как единый, но не элементарный объект управления.

Анализ процесса управления энергоблоком АЭС, выполненный в результате изучения эксплуатационных процедур, человеко-машинного интерфейса и дискус-

сий с оперативным персоналом БЦУ, позволяет выделить следующие иерархические уровни технологического оборудования.

1. *Элемент оборудования* – техническое устройство, способное находиться в различных состояниях и воспринимаемое в процессе управления как единое и неделимое целое. Типичными примерами элементарного оборудования являются запорная задвижка, регулирующий клапан, насос, бак, трубопровод.

2. *Технологическая группа оборудования* – совокупность взаимодействующих элементов оборудования, совместно выполняющих простую технологическую функцию. Примером такой группы является насос с отсечными задвижками на входе и выходе. Перекачивание среды возможно только при включенном насосе, открытых задвижках и целостных трубопроводах.

3. *Рабочая группа оборудования* – совокупность однотипных элементов или технологических групп оборудования, выполняющих одну и ту же задачу. Примером рабочей группы является группа насосов, создающих давление в напорном коллекторе, например, четыре ГЦН. Специфической характеристикой рабочей группы, упоминаемой в процедурах, является количество одновременно работающего оборудования, например, «три ГЦН из четырех». В различных ситуациях управляющие действия могут выполняться в контексте сразу всей рабочей группы, например, ввод в работу хотя бы «одного ГЦН из четырех», «отключение двух работающих ГЦН» – без указания конкретного насоса.

4. *Функциональная группа оборудования* – совокупность взаимодействующих элементов, технологических и рабочих групп оборудования, совместно реализующих предписанную технологическую функцию, например, обеспечение питательной водой барабанов-сепараторов левой стороны. Другим примером функциональной группы является группа аварийного ввода бора, которая включает в себя насосные агрегаты аварийного ввода бора, арматуру и клапаны, управляемые с БЦУ.

5. *Технологическая система* – совокупность оборудования, реализующего технологическую функцию высокого уровня, например, системы обеспечения питательной водой, аварийного расхолаживания.

Безусловно, данная классификация не является строгой, т.к. в ряде случаев невозможно определить четкую границу, например, между рабочей группой, функциональной группой и технологической системой. Однако по отношению к большей части оборудования такая схема вполне работоспособна. На рисунке 1 приведена технологическая схема части системы обеспечения питательной водой энергоблока с РБМК, иллюстрирующая введенные уровни иерархического обобщения оборудования.

Учитывая, что на концептуальных схемах иерархия объектов представляется одной сущностью, на которой определено рекурсивное отношение «родитель-потомок», введем еще одно обобщающее понятие – *группа оборудования*, которое будет использоваться как обобщенное название оборудования любого из четырех верхних уровней иерархии.

СОСТОЯНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Прежде чем вводить понятия, описывающие состояние оборудования, рассмотрим конкретные состояния на примере одного относительно несложного насосного агрегата, например, насоса питательной воды. С точки зрения выполнения заданной функции, данный насос может быть включен или выключен, т.е. перекачивать воду или стоять. Однако, с точки зрения управляемости и готовности, количество градаций состояния значительно больше. Так, насос может быть в ремонте и, таким образом, не доступен для использования. В работоспособном состоянии насос может стоять, будучи отключенным от процесса либо в дежурном ожида-

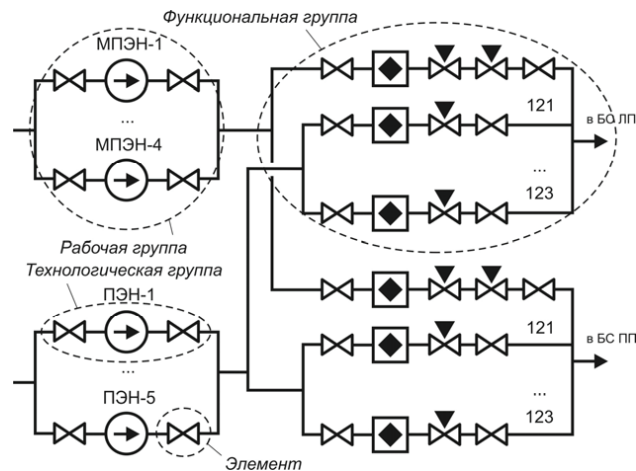


Рис. 1. Иерархические уровни оборудования (ПЭН (МПЭН) – (малый) питательный электронасос, БС – барабан-сепаратор, ЛП, ПП – левая и правая половины)

нии команды автоматического ввода резерва.

Строго говоря, текущее состояние насоса определяется состоянием электрической схемы, режимом работы и положением выключателя насоса. Электрическая схема насоса может быть

- разобрана – насос при этом находится в состоянии ремонта, выключатель разобран, и возможно, заземлен;
- собрана в испытательное положение, когда формируются все управляющие сигналы, но не подается силовое напряжение;
- собрана в рабочее положение, когда формируются управляющие сигналы и подается силовое напряжение.

Сам насос может находиться в трех режимах:

- в отключенном состоянии – насос не используется в технологическом процессе; он стоит и полностью «отсечен» от соответствующей технологической нитки;
- в резерве (или в «горячем» резерве) – насос считается «рабочим», однако в зависимости от ситуации он может стоять или в любой момент подключаться к перекачиванию вещества; обычно резервными называют насосы, подключенные к автоматике, дающей управляющие команды на их пуск;
- в работе – насос считается «рабочим» и может быть включен или выключен оператором в любой момент времени.

Подчеркнем, что насос, находящийся в резерве или в работе, может быть как включен, так и выключен. Таким образом, к режиму добавляется еще один фактор, определяющий состояние насоса, – состояние выключателя, запускающего электродвигатель насоса и, следовательно, перекачку вещества.

Декартово произведение трех перечисленных параметров состояния насоса – состояния электрической схемы, положения выключателя и выбранного режима плюс аномальное состояние дает $3 \times 2 \times 3 + 1 = 19$ вариантов состояния насоса, потенциально реализуемая часть которых приведена в табл. 1.

Изучение эксплуатационных процедур и анализ задач операторов БЩУ позволил выявить следующие элементы информации, значимые в процессе управления оборудованием:

- описание отдельных элементов и групп оборудования, а также иерархических связей между ними;
- описание текущего состояния и режимов работы элементов и групп оборудования;

Таблица 1

Возможные состояния насоса, требующие различения

Номер состояния	Электрическая схема	Режим	Выключатель	Аномалия
1	Разобрана	Отключен	Не имеет значения	Нет
2		Резерв, работа		
3	Собрана в испытательное положение	Отключен	Не имеет значения	
4		Резерв	Отключен	
5			Включен	
6		Работа	Отключен	
7			Включен	
8	Собрана в рабочее положение	Отключен	Не имеет значения	
9		Резерв	Отключен	
10			Включен	
11		Работа	Отключен	
12			Включен	
13	Не имеет значения	Не имеет значения	Не имеет значения	Есть

• описание фактов, истории и допустимых в данный момент переходов оборудования из одного состояния в другое.

Далее рассмотрим интенциональное представление данной информации в виде семантической сети.

ИНТЕНСИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

На данном уровне описание технологического оборудования осуществляется с помощью 12-ти понятий, представленных в интенциональной семантической сети в виде вершин, таких как элемент оборудования, группа оборудования, состояние группы оборудования, конфигурация и др. (рис. 2).

Элемент оборудования. Данное понятие содержит описание элемента оборудования, включающее в себя такую информацию, как технологическое обозначение элемента оборудования, используемое в качестве уникального идентификатора, полное и сокращенное название элемента оборудования, используемые в эксплуатационных процедурах, например, 2TQ31D01, «спринклерный насос №3».

Элемент оборудования может *входить в состав группы оборудования*, которая, в свою очередь, может являться компонентом другой группы более высокого уровня. Последнее представлено в сети рекурсивным отношением *входит в состав*. В зависимости от принятой на станции терминологии, описание группы может выполняться в виде технологического обозначения, названия, аббревиатуры или даже с помощью образования множественного числа от названия элемента оборудования, например ТФ, «система промконтура», «САКП» (система аварийной конденсации пара), «насосы промконтура».

В каждый момент времени элемент оборудования находится в определенном состоянии и режиме. Как **состояние**, так и **режим работы элемента оборудования**

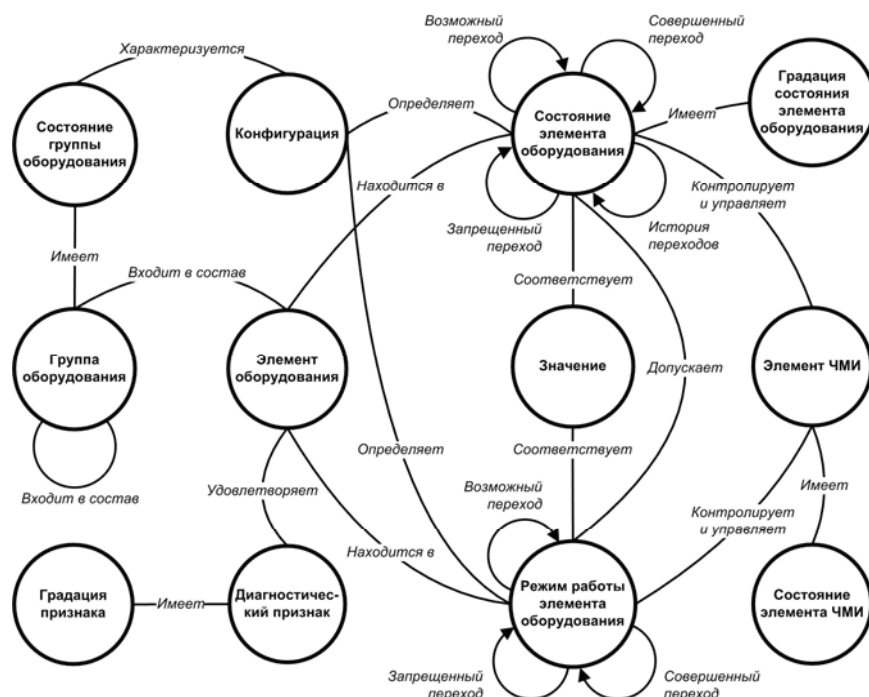


Рис. 2. Интенциональная семантическая сеть для описания технологического оборудования

ния определены на конечном множестве возможных **значений**, характеризующих функционирование данного оборудования. Например, как было показано ранее, насос может находиться в «отключенном» или «включенном» состоянии. В ряде случаев насос может иметь переменную характеристику расхода, например, насос с изменяющимся углом или скоростью вращения лопаток. Для представления подобной информации вводится понятие **градации состояния элемента оборудования**, дополняющее описание состояния и особенно важное для представления состояния арматуры – регулирующих клапанов и задвижек, имеющих промежуточные положения. Так, для БРУ-К, БРУ-А и других клапанов могут встречаться такие градации, как «открыт на 5, 10–95%», «частично открыт», «приоткрыт», «не закрыт» и т.п. Градации состояния могут быть определены как на числовой, так и на номинальной шкалах.

Для определенных категорий оборудования, таких как насосы, регулирующие клапаны и другие, функциональная характеристика, наряду с текущим состоянием, дополняется режимом работы.

Несмотря на то, что режим работы и состояние элемента оборудования являются двумя взаимодополняющими характеристиками, в ряде случаев они не являются полностью независимыми. Так например, насос не может быть включен (состояние «включен»), если он выведен из работы (режим «отключен»). Допустимые сочетания состояний и режимов показаны в семантической сети дугой *допускает*.

Наряду со штатными, определенными технической документацией, режимами работы и состояниями оборудования введем еще два, оказывающих существенное влияние на процесс диагностики и управления: «недоверное» состояние и «неисправный» режим. Недоверное состояние фиксируется в случае прихода недоверенных данных о состоянии оборудования. Необходимо отметить, что при этом оборудование все же находится в одном из предусмотренных состояний, однако это состояние неизвестно.

Неисправный режим означает, что оборудование не может должным образом управляться и (или) выполнять свои функции. Подчеркнем, что неисправность – это режим, а не состояние оборудования. Будучи неисправным оборудование может находиться в определенном рабочем состоянии, например, неисправная задвижка может остаться в промежуточно открытом состоянии.

Наряду с текущим состоянием и режимом работы оборудования операторам важно знать информацию о свершившихся или потенциально возможных их изменениях. Так например, при автоматическом вводе в работу резервного насоса на БЩУ загорается информационное табло. В семантической сети смена состояния или режима работы оборудования изображается дугой *совершенный переход*. При управлении оборудованием важно представлять, какие состояния или режимы работы являются достижимыми для оборудования в данный момент. Эта информация отображается дугой *возможный переход*. В ряде ситуаций при формировании определенных технологических условий срабатывают так называемые «блокировки» – автоматически исполняемые цепочки команд, формирующие, в том числе и запреты на определенные состояния оборудования, например, «запрет на открытие БРУ-К». Состояния и режимы работы оборудования, в которые невозможно перейти в данных условиях работы (но достижимые в другой ситуации), указываются дугой *запрещенный переход*.

Журнал работы оборудования сохраняется в виде совокупности значений, каждое из которых представляет собой кортеж <время, состояние элемента оборудования, режим работы элемента оборудования>. Журнал позволяет восстановить *историю переходов*, которая в ряде ситуаций может послужить важным симптомом, например, «кратковременное открытие TX50,60,70,80S05» или «включение и отключение резервного подпиточного насоса». В ходе анализа процедур выделены два типа историй:

- кратковременные переходы – быстрая однократная смена состояния оборудования с возвратом в исходное состояние;
- периодические переходы – неоднократная с определенной периодичностью смена состояний.

Наряду с состоянием отдельного элемента оборудования важное значение играет **состояние группы оборудования**, которое характеризуется **конфигурацией** данной группы и определяется состоянием и режимом работы элементов оборудования, входящих в данную группу. Для пояснения понятий «состояние» и «конфигурация» рассмотрим пример с рабочей группой ГЦН, характеризующейся количеством работающих насосов и наличием одного или нескольких резервных насосов, например, «два ГЦН в работе и один в режиме автоматического ввода резерва (ABP)». Такому состоянию соответствуют следующие возможные конфигурации, т.е. сочетания состояний элементов оборудования: <ГЦН-1, ГЦН-2 – в работе, ГЦН-3 – в АВР>, <ГЦН-1, ГЦН-2 – в работе, ГЦН-4 – в АВР>...<ГЦН-3, ГЦН-4 – в работе, ГЦН-2 – в АВР> (всего 12 конфигураций).

Как правило, в процессе управления с большинством оборудования ассоциирован достаточно большой набор условий, *удовлетворение* которых воспринимается операторами как признак определенной ситуации или необходимости совершения какого-то действия. Такие условия представлены в семантической сети в виде вершины **диагностический признак**. Примером диагностического признака может служить «открытие БРУ-К». Аналогично градациям состояния диагностический признак также может иметь **градации признака**, например, «открытие БРУ-К на 10%», «частичное открытие БРУ-К» и др.

С точки зрения процесса управления, важнейшими свойствами оборудования является управляемость и наблюдаемость. Эти свойства означают наличие у опе-

ратора возможности контролировать и управлять состоянием и режимом работы оборудования посредством определенного инструментария и элементов человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) – индикаторов, кнопок, ключей, блоков регуляторов и т.п. При этом, каждому режиму и состоянию оборудования соответствует определенное **состояние элемента ЧМИ**, например, поворот ключа TQ13D01 влево выключает насос ввода бора TQ13D01. По изменению состояния (или положения) органов управления можно также отслеживать выполнение операторами того или иного шага процедуры. Наряду с органами управления о состоянии и режимах работы оборудования можно судить и по различным индикаторам, таким как лампы, табло сигнализации или стрелочные приборы, показывающие, например, процент открытия задвижки.

ЭКСТЕНСИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

На данном уровне интенциональная семантическая сеть реализуется для каждого конкретного элемента и группы оборудования. Ниже представлен пример экстенциональной сети для быстродействующей редукционной установки сброса пара в конденсатор (БРУ-К).

БРУ-К имеет несколько режимов: может находиться в режиме автоматической работы, дистанционной работы, быть неисправен («сломан») или отключен (выведен из работы, разобрана его электросхема). При этом БРУ-К может быть открыт, закрыт или иметь недостоверное состояние (когда отсутствуют указания положений его клапанов), может обеспечивать расхолаживание энергоблока с различной скоростью. Допустим, БРУ-К находится в автоматической работе и закрыт, и при этом сформировался запрет на его открытие. Экстенциональная сеть, полученная в результате реализации интенциональной сети для текущего состояния БРУ-К, показана на рис. 3.

С помощью экстенциональной сети кодируется вся информация, связанная с данным конкретным оборудованием и содержащаяся в процедуре. Существенная часть этой информации является частью различных диагностических признаков, симптомов и технологических условий, которые подлежат проверке в ходе управ-

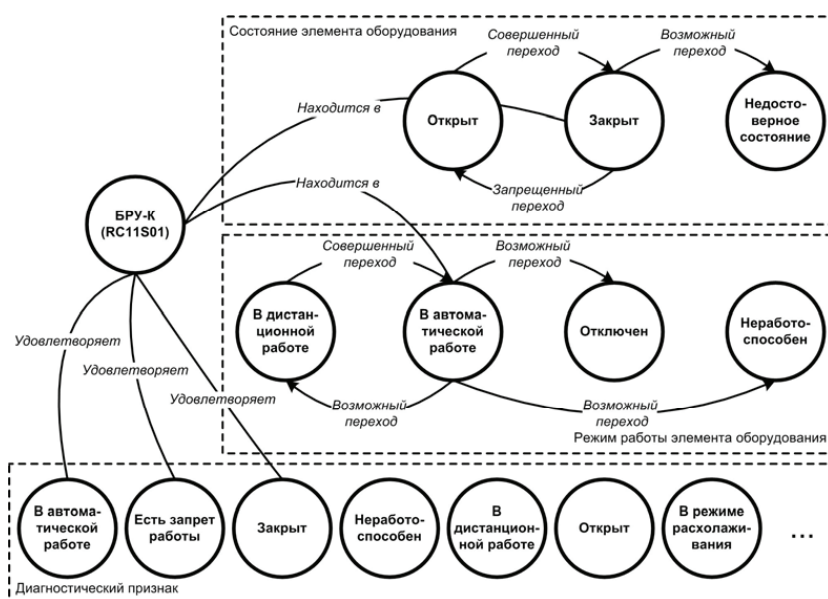


Рис. 3. Экстенциональная сеть, описывающая БРУ-К и его текущее состояние

ления энергоблоком. Все эти симптомы и условия являются логическими утверждениями, которые можно выразить в виде фрагмента экстенциональной сети. В данной работе такие фрагменты будем называть сетями-шаблонами или просто шаблонами.

На рисунке 4 представлен пример шаблона, кодирующего симптом «Закрытие БРУ-К RC11S01». Следует заметить, что в данном случае не важно, в каком режиме работает БРУ-К, работоспособен он или нет, и как БРУ-К оказался в закрытом состоянии.



Рис. 4. Шаблон для идентификации симптома «Закрытие БРУ-К (RC11S01)»

ИНТЕНСИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Аналогичный подход – интенциональное и экстенциональное представление применим и для описания **технологических сред** АЭС, таких как теплоноситель, питательная вода, конденсат, пар, масло, газ и др. Перемещаясь по объему контура, технологическая среда попадает в оборудование, где заполняет определенный объем, меняет фазовое состояние, совершает работу, изменяет свои теплофизические характеристики. Состояние среды, находящейся в определенном элементе или группе оборудования, характеризуется **технологическими параметрами** – давлением, расходом, температурой, уровнем, концентрацией (рис. 5). К параметрам среды можно отнести напряжение, силу тока, электрическую мощность, частоту, а также различные производные характеристики – нейтронная или тепловая мощность, запас до кавитации, суммарный расход, перепад давления и др., определяемые на основании других, первичных параметров. Параметры могут характеризовать не только технологические, но и конструктивные элементы, например, температура корпуса реактора или бетона.

Подчеркнем, что технологический параметр обычно измеряется в конкретном **оборудовании**, например, «уровень воды в барабане-сепараторе БС-12». Однако в ряде случаев требуется более точно описывать **место** измерения, которое является частью оборудования, например, температура охлаждающей воды на сливе из технологического конденсатора», «расход воды на напоре насосов расхолаживания». По умолчанию, в качестве места принимается понятие «внутри», «в». В дру-

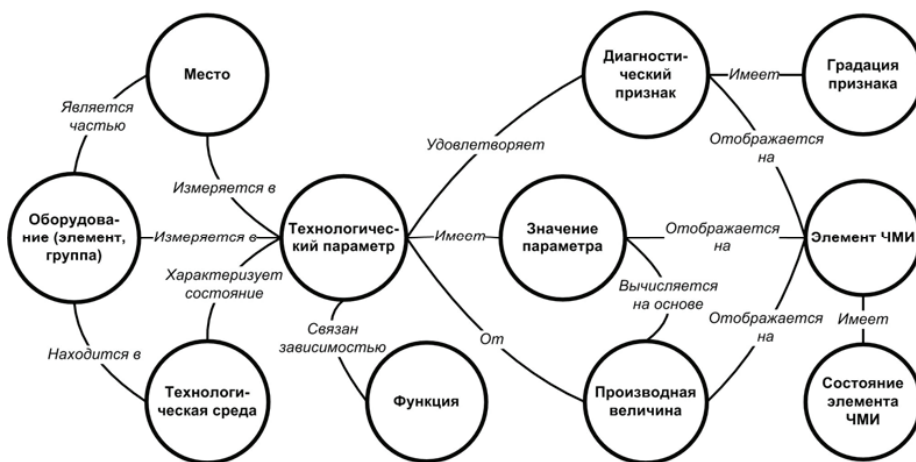


Рис. 5. Интенциональная семантическая сеть для описания технологического параметра

гих случаях местом может быть «на сбросе», «после», «перед», «на всасе», «через», «на входе», «на выходе» и др.

Технологический параметр идентифицируется полным и сокращенным названием, а также технологическим обозначением соответствующего датчика, например, «уровень конденсата в технологическом конденсаторе №1», «уровень в ТК-1», ДОН-3211. В каждый момент времени параметр имеет определенное **значение**. Историческая совокупность значений хранится в виде упорядоченного множества кортежей <время, значение параметра>, при этом первым хранится текущее значение. На основании этих значений можно вычислить **производные величины** от данного параметра, например, «скорость изменения температуры» или «прогноз достижения параметром уставки». Значение параметра определяется не только количественной (качественной) характеристикой, но и единицей измерения, типом значения, диапазоном возможных изменений (например, 0–250 см), частотой обновления, а также словесной интерпретацией возможных значений.

Аналогично оборудованию, в представлении технологических параметров используются вершины **диагностический признак** и **градация признака**. Они описывают условия, которые должны анализироваться при идентификации ситуации и принятии решений, например, «снижение давления (пара) в парогенераторе», «резкое снижение», «плавное снижение» и др. Так же, как и в интенциональной сети для описания оборудования, наблюдаемость параметра для оператора отражается вершинами **элемент ЧМИ** и **состояние элемента ЧМИ**. Эти вершины содержат ссылки на видеокадры, приборы, индикаторы, лампы и другие средства отображения информации. Помимо самого параметра ЧМИ может отображать также диагностические признаки (например, табло сигнализации о достижении параметром аварийной уставки) и производные величины от параметров.

ЭКСТЕНСИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

На данном уровне выполняется описание каждого конкретного технологического параметра. Рассмотрим экстенциональную сеть на примере уровня воды в компенсаторе давления (КД) (рис. 6). При текущем уровне в КД, равном 8600 мм,

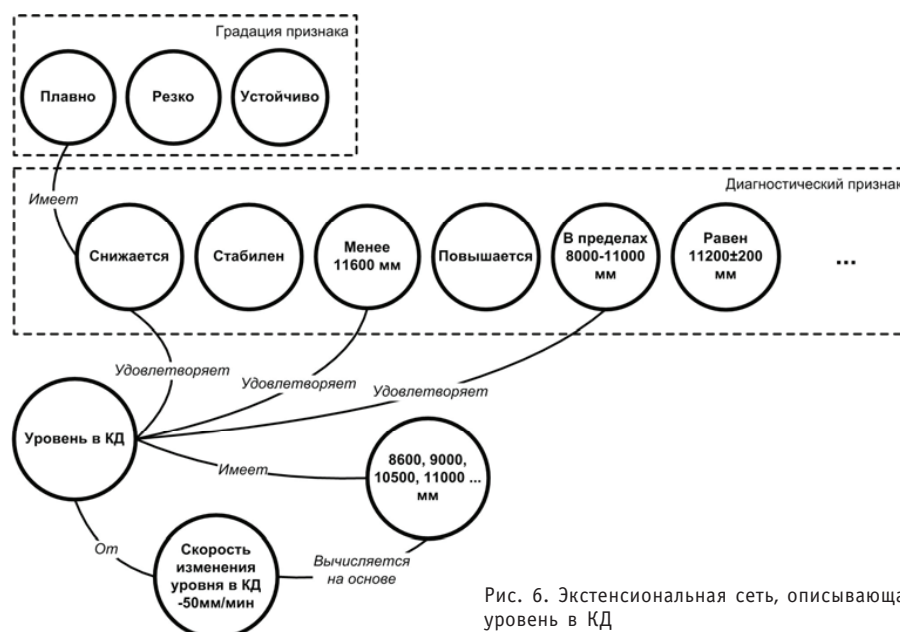


Рис. 6. Экстенциональная сеть, описывающая уровень в КД

и тенденции к снижению со скоростью 50 мм/мин удовлетворены следующие диагностические признаки: снижается плавно, менее 11600 мм, в пределах 8000–11000 мм. Пример шаблона, кодирующего симптом «Плавное снижение уровня в КД» показан на рис. 7.



Рис. 7. Шаблон для идентификации симптома «Плавное снижение уровня в КД»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к представлению декларативных знаний, учитывающий специфику их вербального описания в эксплуатационных инструкциях и сочетающий строгое структурирование информации о технологическом оборудовании и средах с использованием нечетких и неунифицированных понятий. Для представления знаний разработаны интенциональные семантические сети, задающие общую структуру базы знаний, основанные на результатах разбора оперативных процедур, изучения работы различных видов оборудования, а также анализа деятельности операторов БЩУ энергоблоков ВВЭР-1000 и РБМК-1000. Сами знания о конкретном оборудовании, технологических средах и их свойствах содержатся на экстенциональном уровне – в виде экстенциональных сетей и шаблонов.

Для реализации предложенной структуры знаний может быть использован объектно-ориентированный подход. В этом случае каждая вершина интенциональной семантической сети образует поименованный класс. Информация, содержащаяся в вершинах, хранится в виде наследуемых свойств класса. Вершины интенциональной сети имеют множество реализаций на экстенциональном уровне в виде объектов. Для вычисления свойств этих объектов используются встроенные процедуры-методы. В работе [14] обсуждался прототип такой объектно-ориентированной системы знаний, созданный с целью проверки адекватности данного подхода для реализации базы знаний.

Литература

1. Papin B., Quellien P. The operational complexity index: a new method for the global assessment of the human factor impact on the safety of advanced reactors concepts//Nuclear Engineering and Design. – 2006. – V. 236. – № 10. – P. 1113-1121.
2. O'Hara J.M., Higgins J., Stubler W. et al. Computer-based procedure systems: technical basis and human factors review guidance (NUREG CR/6634). – Washington, D.C., NRC, 2000.
3. Lee S.J., Seong P.H. Human-centered HMI design to support cognitive process of operators in nuclear power plants/Proceedings of the 5th ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Machine Interface Technologies: NPIC&HMIT 2006 (Albuquerque, NM, November 12-16, 2006). – La Grange Park, IL: ANS Inc., 2006. – P. 1191-1198.
4. Miller C.A., Funk H.B., Goldman R.P., Meisner J., Wu P. Implications of adaptive vs. adaptable UIs on decision making: why «automated adaptiveness» is not always the right answer/Proceedings of the 1st International Conference on Augmented Cognition (Las Vegas, NV; July 22-27, 2005)
5. Полетыкин А.Г., Байбулатов А.А. Обзор зарубежного опыта разработки систем человеко-машинного интерфейса АСУ ТП/Труды III Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO04) (Москва, 28-30 января 2004 г.). – М.: ИПУ, 2004. – С. 719-734.
6. Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 344 с.
7. Алпеев А.С. Классификация систем поддержки оператора атомной станции//Атомная энергия. – 1993. – Т. 75. – Вып. 6. – С. 423-426.
8. Зверков В.В. Блочные щиты управления АЭС. – М.: Скрипто, 1993.
9. O'Hara J.M., Higgins J., Stubler W. Computerization of nuclear power plant emergency operating procedures (BNL-NUREG-67216). – Upton, NY: BNL, 2000.

10. Sowa J.F. Semantic networks / In Encyclopedia of Artificial Intelligence/Edited by S.C. Shapiro. – John Wiley & Sons, 1987 (1992, second edition).
11. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97. ПНАЭ Г-01-011-97. – М.: Госатомнадзор России, 1997.
12. Anokhin A. The structural system approach to functional design of control room / Proceedings of the International Control Room Design Conference: ICOC0 2010 (Paris, France, October 25-26, 2010)/ Edited by J. Wood. – Loughborough: Institute of Ergonomics and Human Factors, 2010. – P. 132-139.
13. Pirus D., Chambon Y. The computerized procedures for the French N4 series / Global perspectives of human factors in power generation // Proceedings of the 1997 IEEE Sixth Conference on Human Factors and Power Plants (8-13 June 1997). – p. 6/3-6/9.
14. Анохин А.Н., Промохова Е.С. Представление знаний о технологическом процессе АС // Тезисы докладов XI Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2009» (Обнинск, 29 сентября-2 октября 2009 г.). В 2-х тт. – Обнинск: НОУ «ЦИПК», 2009. – Т.2. – С. 19-20.

Поступила в редакцию 12.01.2011

УДК 621.039.51

The Technique of Calculation of Neutron Group Constants for Materials – Mixtures of Isotopes in the ABBN-System \A.A. Peregodov, V.N. Kosheev, G.N. Manturov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 9 titles.

The work presents a technique for calculation of neutron group constants for materials – mixtures of isotopes by using the code CONSYST, which is one of the main part of the ABBN constants system, and using neutron group constants for stable isotopes as input data. The calculated neutron group constants are compared with results of similar calculations using NJOY and CALENDF codes. This technique is tested through the criticality calculations of a series of benchmark models of fast critical assemblies from the ICSBEP Handbook.

УДК 621.039.578:629.7

The Search an Optimal Locations Scheme for Thermionic Fuel Elements in the Core of Space Thermionic Conversion Reactor \ P.A. Alekseev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 10 pages, 4 illustrations. – References, 12 titles.

In this paper, the problem of the search of an optimal locations scheme for thermionic fuel elements (TFE) in the core of advanced thermionic conversion reactor of TOPAZ type, which minimize fission power peaking in the radial direction of the core, is solved. The location scheme includes the radiuses of TFE location rings and the number of TFE in each ring.

By means of genetic algorithm (GA) method, the decision variables, which may satisfy the delivery constraints, are searched. The decision, obtained by GA, is researched and then, trade-off solution is chosen among them.

УДК 621.039.58

Representation of the Declarative Knowledge Acquired from NPP Emergency Procedures \A.N. Anokhin, N.V. Pleshakova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 14 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 14 titles.

The paper concerns of the problem of knowledge representation for computerized procedure systems dedicated to support NPP main control room operators. The methodology for representation of the declarative knowledge about process equipment and technological mediums is proposed on the basis of semantic network theory. The process equipment has been hierarchically structured from the point of view of functional approach to control process. Possible operational states and modes of equipment have been studied. The intensional semantic networks which define knowledge base structure have been developed based on the finding from this analysis. The knowledge about particular equipment and technological mediums are represented as the extensional networks and the patterns which specify diagnostic symptoms.

УДК 519.23/.24/.25

Statistical Analysis of Failure Data of Nuclear Power Plant Equipment in Non-Homogeneous Failure Flow \ A.V. Antonov, K.A. Belova, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 6 tables, 7 illustrations. – References, 20 titles.

The technique of reliability coefficients assessment for nuclear power plant equipment is described. This technique allow to take into account possible non-homogeneity of failure flow. Specificity of incoming statistical failure data is pointed. The hypothesis test of incoming data nature is proposed. Application of normalizing flow function model for calculating of required reliability coefficients is described. Practical example of analysis of failure data for some elements of Bilibino nuclear power plant control and protection system is given.