

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМАЛИЗОВАННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕДУР ДЛЯ ОПЕРАТОРОВ БЛОЧНЫХ ПУНКТОВ УПРАВЛЕНИЯ АС

*Н. В. Плешакова, А. Н. Анохин **

Смоленский филиал учебно-тренировочного центра «Атомтехэнерго»

* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ»

Введение

При управлении атомной электростанцией (АС) оператору блочного пункта управления (БПУ) приходится быстро и точно ориентироваться в море разнородной информации, получаемой от средств отображения информации и средств коммуникации, а также определять состояние основного и вспомогательного оборудования (систем) и идентифицировать возникающие технологические события.

Поступающую информацию оператору БПУ необходимо воспринять и осмыслить, после чего принять верное решение о применении той или иной процедуры управления. Особенно это важно в условиях нештатных ситуаций. При этом ошибка человека может произойти на любом этапе данного процесса – при восприятии информации, ее сопоставлении, анализе, диагностировании ситуации, выборе и применении требуемой процедуры.

Персонал БПУ оперирует огромным объемом процедур и инструкций. Подобное обилие процедур требует их систематизации, гармонизации и взаимной увязки. Кроме того, работа персонала с процедурами управления, в частности, аварийными процедурами, сопряжена с рядом трудностей, вызванными недостатками самих процедур. Среди таких недостатков можно выделить: отсутствие четко определенных целей процедур и критериев достижения данных целей, неоптимальную последовательность действий процедур; сложные, неунифицированные формулировки шагов, сложную навигацию по процедурам и др.

Таким образом, большое количество аварийных процедур, а также их недостатки значительно снижают надежность работы человека-оператора при управлении энергоблоком (ЭБ) АС. Уменьшить вероятность ошибки позволит четкая формализация процедур, оказание оператору помощи в правильной идентификации сложившихся условий и в выборе требуемой процедуры. Все это становится возможным при разработке системы поддержки операторов БПУ, а именно – системы компьютеризованных аварийных процедур (СКП).

СКП представляет собой информационную систему, которая анализирует сложившуюся на ЭБ ситуацию, осуществляет выбор требуемой процедуры

управления и представляет пошагово данную процедуру оператору БПУ с сопутствующей информацией. Подобная система облегчает навигацию по процедурному полю, дает возможность оператору изменять уровень детализации шагов процедуры, осуществлять мониторинг значений параметров, необходимых для реализации действий, и обладает целым рядом преимуществ по сравнению с бумажными процедурами. Однако, необходимым условием функционирования СКП является формализованное представление процедур и их шагов, благодаря которому становятся возможными интерпретация и выполнение процедур, а также использование знаний процедур при управлении энергоблоком.

Данное исследование является первым шагом на пути создания системы компьютеризованных аварийных процедур. Оно посвящено разработке метода формализованного представления аварийных процедур. Для решения этой задачи было сделано следующее:

- 1) выполнен системный анализ процедур, включающий в себя их классификацию, анализ роли и места;
- 2) выполнено теоретико-множественное описание энергоблока, концепции управления и аварийных процедур;
- 3) выполнен анализ и классификация условий входа (симптомов), шагов и действий процедур.

Системный анализ роли и места процедур в процессе управления

Для формализации процедур необходимо, прежде всего, определить место и роль процедур в процессе управления энергоблоком АС. На первом этапе все состояния АС были разбиты на два больших класса:

- 1) эксплуатационные состояния – режимы нормальной эксплуатации, режимы эксплуатации с отклонениями;
- 2) аварийные состояния – инциденты (аварийные ситуации), проектные аварии, запроектные аварии, тяжелые аварии (рис. 1).

С каждым состоянием станции ассоциируются определенные условия и эксплуатационные пределы. Пределы отделяют один класс состояний от другого. Условия позволяют поддерживать определенное состояние. По условиям и пределам оператор может определить состояние, в котором находится энергоблок, и определить нужный тип процедуры.

Каждый класс состояний АС выдвигает свои цели и приоритеты управления, достигаемые с помощью процедур различного типа. На примере Балаковской АЭС можно выделить следующие виды процедур: инструкции по эксплуатации (ИЭ), процедуры реакции на сигналы, инструкции по действиям при нарушениях нормальной эксплуатации, инструкции по ликвидации аварийных ситуаций (ИЛА), руководство по управлению запроектными авариями (РУЗА), руководство по управлению тяжелыми авариями (РУТА) и др.

Для того, чтобы из разрозненных процедур составить общее процедурное поле деятельности оперативного персонала БПУ АС, необходимо определить их назначение, выполнить их единую идентификацию, удобно организовать переходы, четко обозначить условия входа в процедуры. Для решения данной задачи было выполнено теоретико-множественное описание энергоблока, концепции управления и аварийных процедур, которое позволило определить пространство возможных состояний энергоблока АС и описать процесс управления ЭБ.

Теоретико-множественное описание ЭБ АС, концепции управления и аварийных процедур

При построении теоретико-множественного описания энергоблок АС рассматривался как совокупность некоторого технологического оборудования (насосы, задвижки, компенсаторы и т. д.) и технологических сред (пар, вода, масло и др.).

Каждый единичный i -й элемент оборудования ($i = 1 \dots n$) может находиться в состоянии из конечного множества состояний E_i . Например, множеством состояний насоса ввода бора TQ13D01 является $E_{TQ13D01} = \{\text{обесточен, отключен, в резерве, включен}\}$. Состояние технологических сред характеризуется технологическими параметрами, такими как температура, давление, расход, уровень и др. Каждый j -й параметр ($j = 1 \dots m$) может изменяться в определенном диапазоне значений P_j . Например, уровень воды в компенсаторе давления может принимать значения $P_{LKД} \in [0; 11 \text{ м}]$. Подмножество декартова произведения указанных множеств образует $n \times m$ -мерное пространство возможных состояний S энергоблока АС:

$$S \subseteq E_1 \times \dots \times E_n \times P_1 \times \dots \times P_m.$$

Очевидно, что стационарное состояние АС описывается точкой s_k в пространстве состояний. Переходный режим представляет собой множество точек, т. е. траекторию в пространстве состояний, совершаемую во времени – $A = \{< s_k, t_k >\}$.

За управление энергоблоком АС, находящимся в одном из достижимых состояний пространства S , отвечает общий алгоритм управления, т. е. набор условий, проверок, команд и операций. Частью алгоритма управления является система защит и блокировок. В некоторых состояниях ЭБ управление полностью осуществляется автоматически, при этом оператор лишь информируется о каких-либо произошедших событиях. Однако в большинстве состояний часть операций и команд осуществляется оперативным персоналом БПУ вручную одновременно с контролем действий автоматики. При этом операторы используют процедуры управления.

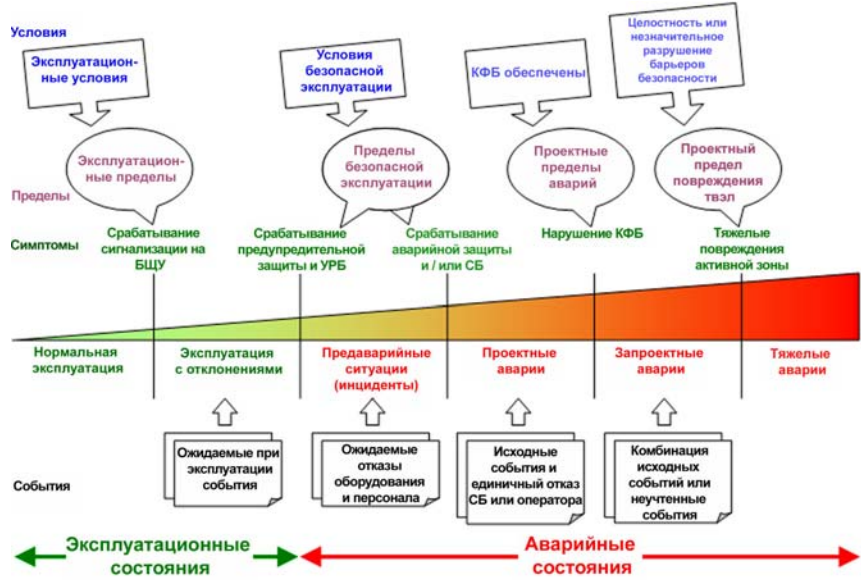


Рис. 1. Состояния атомной электростанции

Количество состояний пространства S бесконечно, поэтому определить алгоритм управления или процедуру управления для каждого отдельного состояния невозможно. По этой причине состояния объединяются в множества (или подпространства) состояний, для которых характерны общие операции и команды алгоритма управления. Если состояния данного множества требуют ручного оперативного управления, то должна существовать процедура для персонала БПУ.

С учетом введенных обозначений, процесс управления энергоблоком должен описываться следующими характеристиками: s_1 – исходное состояние энергоблока; s_G – целевое состояние ЭБ, или подпространство состояний, т. е. состояние, в котором должен находиться ЭБ в случае успешного выполнения процедуры или алгоритма управления; $U = \{u_1, \dots, u_n\}$ – множество управляющих воздействий, переводящих ЭБ из состояния S_i в состояние S_j ; V – множество внешних воздействий на ЭБ; $A = \{<s_1, t_0>, <s_1, t_1>, \dots, <s_G, t_{n+1}>\}$ – траектория переходного процесса при успешной реализации управляющих воздействий.

Для построения теоретико-множественного описания аварийных процедур, проясним значения некоторых понятий.

Введем понятие симптома. *Симптом* – это логическое условие, накладываемое на состояние оборудования или значение технологического параметра, например, «давление под оболочкой более $0,3 \text{ кгс/см}^2$ ($P_{ГО} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$)» или «локализирующая арматура закрыта». Каждый симптом x_i или совокупность симптомов $X = \{x_1 \dots x_n\}$ «отсекает» определенную часть пространства состояний, образуя при этом отношение (т. е. подмножество пространства состояний)

$$R(X) \subseteq S.$$

Совокупность симптомов образует критерий применения или, другими словами, условие входа в ту или иную процедуру. Иначе говоря, совокупность симптомов выделяет подмножество состояний, к которым применима некоторая процедура.

Предположим, что X_i и X_j – совокупности симптомов, являющихся входами в процедуры w_i и w_j соответственно. Тогда должно выполняться условие $R(X_i) \cap R(X_j) = \emptyset$, обеспечивающее однозначный выбор необходимой процедуры (при этом необязательно, чтобы выполнялось $X_i \cap X_j = \emptyset$). Однако гипотетически могут существовать процедуры, для которых это условие не выполняется, поскольку реальные описания процедур несовершенны.

Существует проблема, заключающаяся в том, что симптомы некоторых процедур пересекаются или близки друг другу, в результате чего некоторые аварии плохо различимы. Трудности, возникшие у операторов БПУ в идентификации процедур, упоминались в их интервью, а также следовали из анализа существующего комплекта процедур.

Еще одно понятие, имеющее отношение к процедурам, – *управляющее воздействие*. Аварийная процедура содержит счетное множество управляющих воздействий, составляющих множество U , которые представляют собой шаги и действия процедуры. Каждое управляющее воздействие имеет целью перевести ЭБ из одного состояния S_i в другое состояние S_j . При этом цель воздействия может быть достигнута (блок переведен в состояние S_j) или не достигнута. В последнем случае ЭБ окажется в состоянии S_j^* .

Если каждое управляющее воздействие было выполнено успешно, то множество всех успешных реализаций управляющих воздействий переведет ЭБ в определенное подпространство целевых состояний s_G . Однако с каждой неудачной реализацией управляющего воздействия состояние ЭБ «отклоняется» от упомянутой выше траектории переходного процесса A . Если подобных «отклонений» будет слишком много, то в результате накопившихся ошибок после применения процедуры состояние ЭБ не будет принадлежать подпространству целевых состояний s_G .

Кроме управляющих воздействий, аварийная процедура имеет набор шагов, не требующих от оператора моторных действий. Это – шаги контроля, принятия решений, коммуникации, и действия навигации по процедуре, которые, в зависимости от состояния ЭБ, либо уточняют последовательность применения процедуры, либо определяют «точку останова» для оператора, где нужно прекратить работу с данной процедурой и начать применение другой процедуры управления.

Теперь можно определить некоторые *принципы применения аварийных процедур* операторами БПУ АС.

Во-первых, в результате непрерывного протекания технологических процессов и возможного влияния других внешних факторов (пожары, затопления и др.) изменение состояний ЭБ происходит непрерывно. При этом оператор улавливает данные изменения состояний только в дискретные моменты времени.

Во-вторых, решение о применении той или иной процедуры управления оператор принимает на основе анализа текущего состояния энергоблока посредством сопоставления данного состояния с симптомами процедур. Далее оператор выполняет по очереди все действия и шаги выбранной процедуры. Каждое действие направлено либо на оценку и контроль состояния ЭБ, либо на перевод ЭБ из состояния S_i в S_j .

Однако существуют нюансы в управлении ЭБ АС. Оценка того, применим и правомерен тот или иной шаг процедуры, осуществляется оператором на основе текущего состояния ЭБ. Это состояние и результат выполнения шага он фиксирует в памяти. Тем не менее, под влиянием различных факторов состояние ЭБ может измениться в любой момент, в частности, между выполнениями оператором дейст-

вий процедуры. Таким образом, создается предпосылка для ошибок операторов из-за различия между их ментальной моделью и реальным состоянием блока.

Таким образом, было выполнено теоретическое описание ЭБ, концепции управления и аварийных процедур, а также определены некоторые принципы применения процедур. Дальнейшая формализация аварийных инструкций предполагает выполнение классификации их симптомов, шагов и действий.

Классификация условий входа (симптомов) аварийных процедур

Симптом – это логическое условие, накладываемое на состояние оборудования или значение технологического параметра. Можно выделить следующие классы симптомов:

- *симптомы по технологическому параметру*, которые представляют собой утверждения, содержащие информацию о тенденции или границах изменения какого-либо технологического параметра (например, «Снижение температуры подпиточной воды на выходе из РТО 1TK80W01 до (60-70) °С»);
- *симптомы по оборудованию*, которые представляют собой утверждения, содержащие информацию о состоянии или изменении состояния технологического оборудования (например, «СК ТК закрыты – индикация положения 4SE11,12,13,14S01 «закрыто»»).

В процедурах часто встречаются симптомы, которые описывают, какая аварийная сигнализация сработала при возникновении данного события. Например, срабатывание табло аварийной сигнализации «Отключение ТГ от сети». Однако срабатывание любой аварийной сигнализации является следствием изменения состояния оборудования ЭБ или значения

технологического параметра. Таким образом, симптомы, содержащие описание сработанных сигнализаций, можно отнести к одному из выделенных классов.

Классификация шагов и действий аварийных процедур

Аналогично симптомам была выполнена классификация шагов и действий аварийных процедур (рис. 2).

Рассмотрим все виды шагов и действий более подробно.

1. Действия, различающиеся по характеру заложенной деятельности.

Эти действия отражают тот вид физической или ментальной деятельности, которую выполняет оператор БПУ при исполнении шага или действия. Выделяют:

- *действия контроля*, когда оператор осуществляет контроль состояния ЭБ, а именно, значений технологических параметров, состояния оборудования или срабатывания аварийной сигнализации;
- *моторные действия*, когда оператор осуществляет перевод ЭБ из одного состояния в другое, а именно, воздействует на органы управления пультов и панелей БПУ (поворот ключа, включение/выключение, нажатие кнопки и т. д.);
- *действия регулирования*, когда оператор постепенно достигает желаемого состояния ЭБ, а именно, осуществляет регулировку или устанавливает требуемое значение определенного технологического параметра;
- *действия принятия решений и диагностики* (идентификации, обнаружения, вычисления), когда оператор проводит диагностику текущего состояния ЭБ, отслеживает развитие ситуации, осуществляет вычисления или иные умственные операции и/или принимает соответствующие управленческие решения;

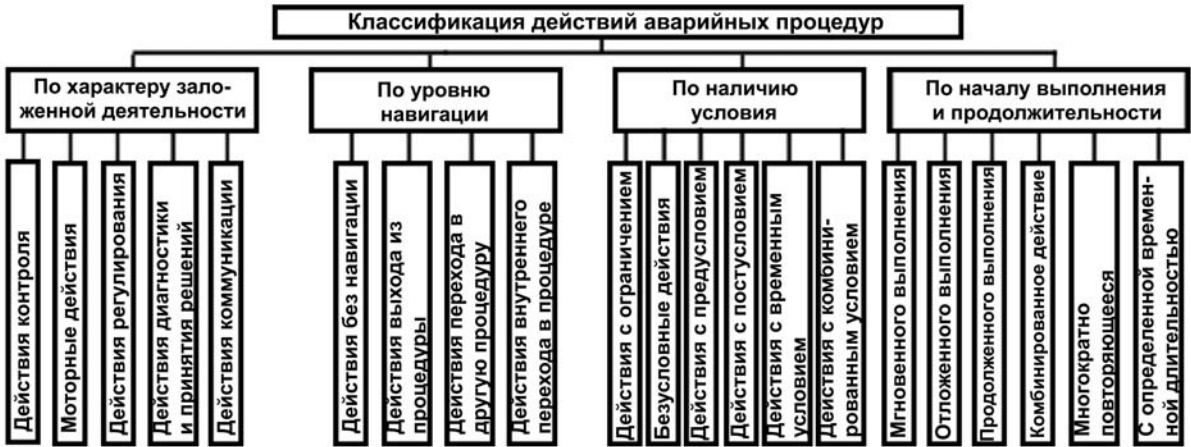


Рис. 2. Классификация шагов и действий аварийных процедур

– *действия коммуникации*, когда оператор сообщает информацию другим операторам, запрашивает информацию, получает разрешение на выполнение действий, т. е. осуществляет коммуникацию с другими субъектами управления.

2. Действия, различающиеся по уровню навигации.

Действия навигации не содержат никакой физической или ментальной деятельности, а только лишь являются служебными для процедуры. Они уточняют последовательность выполнения команд процедуры в зависимости от текущего состояния ЭБ, способствуя перемещениям оператора внутри процедуры, между ними или выходу из процедурного поля. Выделяют:

– *действия без навигации* – действия, которые не содержат в себе переходов к другим шагам и действиям процедуры, кроме автоматического перехода к следующему шагу по окончании выполнения текущего шага;

– *действия выхода из процедуры* – действия, содержащие команду «Выйти из раздела»;

– *действия перехода в другую процедуру* – действия, содержащие команду перехода в другую процедуру в виде предложения «Перейти в процедуру X, шаг Y»;

– *действия внутреннего перехода в процедуре* – действия, содержащие команду перехода на другой шаг текущей процедуры в виде предложения «Перейти к шагу X» или «Вернуться к шагу Y».

3. Действия, различающиеся по наличию условия.

Условные действия выполняются (или не выполняются) в зависимости от успешности срабатывания условий. Выделяют:

– *безусловные действия* – действия, не содержащие условие выполнения;

– *действия с предусловием* – действия, которые выполняются, если удовлетворено некоторое условие; при этом выполнение действия происходит немедленно;

– *действия с постусловием* – действия, которые завершают выполнение в тот момент, когда удовлетворено некоторое условие;

– *действия с комбинированным условием* – действия, которые содержат и предусловие, и постусловие;

– *действия с временным условием* – действие, условие выполнения которого содержит время или временной интервал;

– *действия с ограничением* – действие, в процессе выполнения которого требуется, чтобы соблюдалось некоторое ограничение.

4. Действия, различающиеся по началу выполнения и продолжительности.

Данный тип действий имеет значение для оперативного персонала во время применения процедуры и обуславливает начало выполнения действий и шагов процедуры и продолжительность их выполнения. Различаются:

– *действие мгновенного выполнения* – действие, которое выполняется в тот момент, когда встречается в ходе использования процедуры;

– *действие отложенного выполнения* – действие, которое содержит некоторое условие и выполняется в тот момент, когда срабатывает данное условие;

– *действие продолженного выполнения* – действие, которое начинает выполняться в момент, когда встречается в ходе использования процедуры, но не достигает своего результата до начала реализации следующего действия;

– *многократно повторяющееся действие* – действие, которое выполняется в соответствии с периодом выполнения, например, раз в 30 минут;

– *действие с определенной временной длительностью* – действие, длительность выполнения которого строго регламентирована;

– *комбинированное действие* – действие, которое является комбинацией предыдущих типов (например, действие продолженного выполнения с определенной временной длительностью).

Заключение

Таким образом, данная работа посвящена проблеме формализации аварийных процедур для управления энергоблоками АС в условиях аварийных ситуаций. В ходе работы был выполнен системный анализ роли и места процедур в процессе управления, выполнено теоретико-множественное описание энергоблока АС, концепции управления и аварийных процедур, а также классифицированы условия входа, шаги и действия процедур.

Следует отметить, что все процедуры управления написаны на естественном языке. Семантически каждый симптом, шаг или действие представляют собой предложения, т. е. имеют вербальное описание, что является существенным недостатком инструкций. Например, один и тот же симптом может быть написан по-разному в разных процедурах. Также велика вероятность орфографических и логических ошибок. Все это существенно затрудняет понимание и анализ условий входа, шагов и действий процедур для человека-оператора БПУ АС. Поэтому развитием работы будет служить создание метода представления знаний, который позволит:

– унифицировать описание, провести синтаксический и семантический анализ всех формулировок симптомов, шагов и действий процедур;

– построить таблицу решений, предназначенную для формального диагностирования ситуации на ЭБ, выбора требуемой процедуры и различения аварий, имеющих близкие симптомы;

– разработать единую базу знаний инструкций для последующего создания системы компьютеризованных аварийных процедур.