

УДК 621.039

## МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ СИМПТОМОВ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ НА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

**В. И. Скалозубов<sup>1</sup>, В. Н. Колыханов<sup>1</sup>, Н. И. Власенко<sup>2</sup>, А. В. Шавлаков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup>*НАЭК «Энергоатом», Киев*

Предложен метод идентификации симптомов запроектных аварий на ядерных энергоустановках, основанных на принципах минимальной достаточности, адекватности и идентичности. Приведены примеры идентификации симптомов для запроектных аварий с потерей теплоносителя.

Одним из ключевых вопросов при разработке руководств по управлению запроектных аварий (РУЗА) является идентификация признаков (симптомов) возникновения и развития запроектных аварий. Наиболее актуальным этот вопрос является относительно доминантных для АЭС с ВВЭР групп запроектных аварий с потерей теплоносителя (ЗА ПТ). Проведен анализ известных результатов идентификации признаков ЗА ПТ в соответствии со следующими документами: Инструкцией по ликвидации аварий и аварийных ситуаций без углубленного анализа безопасности (ИЛА-ТОБ [1]); Инструкцией по ликвидации аварий и аварийных ситуаций с учетом углубленного анализа безопасности (ИЛА-ОАБ [2]); Углубленным анализом безопасности ЗА ПТ (ОАБ [3]); Руководствами по управлению запроектными авариями без углубленного анализа безопасности (РУЗА-ТОБ [4, 5]).

Анализ представленных в этой проектно-эксплуатационной документации признаков возникновения аварий с потерей теплоносителя позволяет сделать следующие оценки:

1. Основные и дополнительные признаки исходных аварийных событий в подавляющем большинстве случаев не соответствуют принципам минимальности, достаточности и идентичности, согласно которым набор и последовательность признаков (симптомов) исходных аварийных событий (ИСА) должны быть минимальными, но характерными именно для всей группы событий. Так, например, сами по себе такие признаки ИСА S1 «Большие течи 1-го контура», как формирование сигнала и срабатывание аварийной защиты (АЗ), формирование сигнала защиты системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ), формирование сигнала «разность температуры насыщения и температуры теплоносителя в горячей нитке менее 10°C», формирование сигнала на запуск механизмов системы безопасности, закрытие стопорных клапанов турбины (СК ТГ), срабатывание сигнализации «ступенчатый пуск», отключение главного циркуляционного насоса и др., являются характерными также и для других групп ИСА. Характерные же только для ИС S1 такие признаки, как «резкое снижение давления в реакторе», «резкое повышение давления, температуры и радиоактивности в ГО», «резкое снижение уровня в компенсаторе давления (КД)», не конкретизированы и являются в общем случае разными для различных размеров течей.

2. Отсутствует однозначная идентификация ИСА «Большие течи 1-го контура» по эквивалентному диапазону размеров течей. Так, в ИЛА [1, 2] к таким ИСА относятся течи более 30 мм, в РУЗА-ТОБ [4, 5] – более 150 мм, ОАБ [3] – более 200 мм. В отношении группирования ИСА «Большие течи» по размеру течей для обоснования алгоритмов управления запроектными авариями целесообразно использование последнего значения, так как оно в большей степени соответствует критерию группирования ИСА по обеспечению критических конфигураций систем для выполнения критических функций безопасности (КФБ).

3. Необходимы уточнения отдельных конкретизированных признаков. Так, в РУЗА-ТОБ [4, 5] уставки ГЕ САОЗ срабатывают (давление 1-го контура ниже 5,9 МПа) на 10 - 60 с для ИСА S1 «Большие течи», а в ОАБ [3] для нижних границ группы ИСА S1 – на 200 - 500 с. Основные причины таких расхождений связаны, возможно, с качеством расчетного

моделирования, в том числе с разными расчетными средствами, нодализационными схемами и влиянием эффектов «пользователя».

4. В отличие от ОАБ [3] и РУЗА-ТОБ [4, 5] в ИЛА [1, 2] не выделена группа ИСА «Средние течи 1-го контура», а выделена более общая группа ИСА «Течи 1-го контура, компенсируемые насосами САОЗ ВД», которая по сути включает как группу средних течей, так и малых, некомпенсируемых системой подпитки-продувки, течей 1-го контура. Кроме того, в ИЛА-ОАБ [2] недостаточно обосновано в ИСА «Течи 1-го контура, компенсируемые САОЗ ВД» включены течи из 1-го контура во 2-й с эквивалентным размером до 100 мм. Такой подход, по крайней мере, противоречит принятой же в [2] концепции «Больших течей» размером более 30 мм. С позиции формирования алгоритмов управления запроектными авариями более обосновано разделение групп ИСА S2 «Средние течи 1-го контура», ИСА S3 «Малые течи 1-го контура, некомпенсируемые ТК» и ИСА T41 «Малые течи из 1-го контура во 2-й», так как эти группы имеют различные критические конфигурации систем, обеспечивающие выполнение КФБ, а соответственно и различные алгоритмы управления запроектными авариями.

5. Различия в подходах группирования ИСА S1 и S2 определяют и существенные несоответствия в непосредственных признаках исходных аварийных событиях этих групп аварий по ИЛА для проектного протекания процессов и по ОАБ, РУЗА для проектного и запроектного протекания процессов. С позиции разработки обобщенных алгоритмов управления авариями такие несоответствия являются недопустимыми, так как признаки (симптомы) исходных аварийных событий как для проектных, так и запроектных аварий должны быть идентичны. Кроме того, обращает внимание расхождение в отдельных признаках ИСА S2 и S3 и в самих ИЛА. Так, например, в ИЛА [1] – «резкое снижение давления и уровня КД», а в ИЛА [2] – «снижение давления и уровня КД»; в ИЛА [2] – «снижение уровня в деаэраторе ТК10В01»; в ИЛА [1] – отсутствует и т.п. Не конкретизированы отдельные признаки S2, S3: в ИЛА [2] – «возможно повышение параметров под оболочкой», «возможно срабатывание АЗ» и др.

6. Основные признаки исходных аварий для ИСА S1 «Большие течи 1-го контура», ИСА S2 «Средние течи 1-го контура» и ИСА S3 «Малые некомпенсируемые течи 1-го контура» в ОАБ [3] являются фактически одинаковыми, что в рамках такого подхода исключает для этих групп аварий возможность применения симптомно-ориентированных руководств по управлению запроектными авариями и/или однозначную идентификацию по признакам ИСА.

Таким образом, в целом необходимо отметить, что представленные в проектно-эксплуатационной документации и в соответствующих технических обоснованиях (включая углубленный анализ безопасности) признаки (симптомы) исходных аварийных событий с потерей теплоносителя не отвечают минимальности, достаточности и адекватности, существенно ограничивают возможность развития симптомно-ориентированных подходов управления авариями с потерей теплоносителя, а также идентификацию групп исходных аварийных событий в рамках событийно-ориентированных подходов.

В случае отсутствия или недостаточной надежности прямых методов идентификации исходных событий аварий при любых подходах управления авариями основополагающим фактором построения алгоритмов управления являются идентификация признаков (симптомов) аварии. В рамках событийно-ориентированного подхода (СБОУИ) по признакам идентифицируются исходные события, а при симптомно-ориентированных подходах (СОАИ) - непосредственно алгоритм управления аварией.

В общем смысле под *признаками (симптомами – S) аварий/аварийных ситуаций* следует понимать отклонения от условий нормальной эксплуатации, которые характеризуют факт возникновения исходного события и соответствующих последовательностей. Признаками аварий могут быть отклонения технологических параметров (реактивности, давления, температуры и т.п.) от условий нормальной эксплуатации в рабочих и переходных режимах

реакторной установки; срабатывание уставок технологических защит и блокировок; отказы в системах, обеспечивающих выполнение функций безопасности, и др. При этом следует понимать, что не каждое отклонение технологических параметров является признаком аварии. Например, вибрация оборудования, различные виды теплогидродинамической и нейтронно-физической неустойчивости, турбулентные пульсации теплоносителя и т.п. также характеризуются отклонениями технологических параметров, но могут и не быть признаками аварий. Признаками аварий являются только те отклонения, которые отражают непосредственные условия исходных аварийных событий

Идентификация таких признаков для конкретных исходных событий (в рамках СБОУИ) или алгоритм управления запроектных аварий (в рамках СОАИ) может быть определена на основе моделирования аварийных последовательностей.

Признаки аварий могут быть контролируруемыми системами измерений и диагностики или неконтролируемыми. Для идентификации исходных событий или алгоритмов управления могут быть использованы только *контролируемые признаки*.

Метод идентификации признаков (симптомов – S) запроектных аварий регламентирует требования и порядок их определения. В основе метода находятся следующие положения:

1. В наборе признаков, идентифицирующих исходные события и/или алгоритмы управления авариями, используются только контролируемые оператором, системами измерений и диагностики (*принцип контролируемости* симптомов).

2. Используются две группы симптомов:

набор и последовательность симптомов для идентификации непосредственного исходного события аварии (*симптомы исходного события*);

набор и последовательность симптомов промежуточных исходных состояний запроектных аварий, связанных с отказами систем, обеспечивающих выполнение функций безопасности (*симптомы запроектных аварий*).

Симптомы исходного события  $S_{ИС}$  определяются набором и последовательностью характерных для исходных событий отклонений контролируемых технологических параметров  $S_1$  и набором и последовательностью характерных для исходных событий срабатываний уставок защит и блокировок  $S_2$ :

$$S_{ИС} = S_{ИС}(S_1, S_2) \quad (1)$$

Симптомы запроектных аварий  $S_{ЗА}$  определяются набором и последовательностью контролируемых отказов систем, обеспечивающих выполнение функций безопасности  $S_{ОТ}$ :

$$S_{ЗА} = S_{ЗА}(S_{ОТ}) \quad (2)$$

Наборы и последовательности реализации симптомов исходных событий и запроектных аварий определяются по результатам моделирования аварийных процессов с учетом критерия соответствия критическим конфигурациям систем (ККС), обеспечивающих выполнение КФБ, или опыта управления/ликвидации аварий в натуральных условиях.

3. При формировании наборов и последовательностей симптомов исходных событий применяются:

принцип минимальной достаточности;

принцип адекватности исходному событию.

*Принцип минимальной достаточности* определяет необходимость применения минимального набора симптомов, но достаточных для идентификации исходного аварийного события:

$$S_{ИС} \rightarrow \min(S_1, S_2) \quad (3)$$

Выполнение принципа минимальности и достаточности необходимо для упрощения, а соответственно и повышение надежности действий оператора по идентификации исходных событий или по выбору алгоритмов управления аварией.

*Принцип адекватности исходному событию* определяет необходимость дополнительного условия по различию достаточных наборов и последовательностей симптомов между другими исходными событиями/обобщенными группами исходных событий. Очевидно, что в случае невыполнения этого принципа идентификация исходных событий или выбор алгоритмов управления необоснованны.

4. Идентификация симптомов обобщенных групп исходных событий должно осуществляться на основе *принципа идентичности* симптомов обобщаемых исходных событий.

Таким образом, первым условием построения обобщаемых симптомов  $\bar{S}_0$  группы исходных событий и аварийных последовательностей является наличие одинакового набора характерных и необходимых симптомов при выполнении принципов минимальной достаточности и адекватности исходным событиям

$$\bar{S}_0 = idem\{S_j\} \quad (4)$$

Условие (3) не является достаточным для идентификации обобщенных алгоритмов. Так одинаковые симптомы разных группируемых исходных событий аварий могут иметь, в общем случае, разные временные интервалы реализации

$$idem\{S_j\} = \begin{pmatrix} C_1(t_{j1}) \\ C_2(t_{j2}) \\ \vdots \\ C_n(t_{jn}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

где  $C_n$  – набор одинаковых и необходимых симптомов группируемых  $j$ -х исходных событий с  $t_{jm}$  временем реализации в процессе развития аварийного процесса ( $m = 1, \dots, n$ ).

Поэтому при обобщении симптомов в общем случае необходимо рассматривать диапазоны временных интервалов одинаковых наборов симптомов, для которых должны выполняться принципы минимальной достаточности и адекватности обобщаемой группы исходных событий

$$\Delta t_m \in \{t_{jm}\} \quad (6)$$

Тогда окончательное условие принципа идентичности симптомов обобщаемых исходных событий

$$\bar{S}_0 = idem\{S_j\} = \{C_m(\Delta t_m)\} \quad (7)$$

Реализация принципа идентичности симптомов обобщаемых исходных событий неразрывна с реализацией принципов минимальной достаточности и адекватности исходным событиям.

Таким образом, в соответствии с представленным методом идентификации признаков (симптомов) исходных событий и последовательностей запроектных аварий предлагается следующий алгоритм их формирования:

1. По результатам моделирования аварийных процессов конкретных исходных событий/обобщенных групп исходных событий с учетом критерия соответствия КФБ определяются наборы и последовательность реализации всех возможных признаков (симптомов) исходных событий и последовательностей запроектных аварий.

2. Для отдельных исходных событий запроектных аварий определяется конечный набор и последовательность их реализации на основе принципов контролируруемости, минимальной достаточности и адекватности.

3. Симптомы обобщенных групп исходных событий определяются в соответствии с принципом идентичности симптомов (6) и последующей проверкой на соответствие принципу адекватности исходным событиям и последовательностям запроектных аварий.

На основе принципов минимальности, достаточности и адекватности, а также характерности временных интервалов формирования уставок, защит и блокировок для различных групп аварий можно сформулировать обобщенные признаки (симптомы) исходных событий аварий с потерей теплоносителя, которые представлены в таблице. Согласно представленным в таблице результатам каждая группа ИСА с потерей теплоносителя имеет минимальный и достаточный набор признаков, адекватно отражающих как возникновение, так и отличие разных групп аварий на начальном этапе развития до условий развития запроектных аварий по работоспособности критических конфигураций систем, обеспечивающих выполнение КФБ:

$$\text{ИСА } S1 = \text{col} (S_0, S_1, S_4, S_9, S_{12}, S_{17}), \tag{8}$$

$$\text{ИСА } S2 = \text{col} (S_0, S_2, S_5, S_9, S_{13}, S_{17}), \tag{9}$$

$$\text{ИСА } S3 = \text{col} (S_0, S_2, S_7, S_9, S_{13}, S_{17}), \tag{10}$$

$$\text{ИСА } S4 = \text{col} (S_0, S_3, S_7, S_{11}, S_{13}, S_{17}), \tag{11}$$

где содержание признаков  $S_0, \dots, S_{18}$  и уставок срабатывания приведены в таблице.

**Обобщенные признаки (симптомы) исходных событий аварий с потерей теплоносителя в соответствии с принципами минимальности, достаточности и адекватности**

S	Признак	Группа ИСА			
		S1	S2	S3	S4
$S_0$	Снижение уровня КД и давление 1-го контура стабильное открытие регуляторов ТК (начало ИСА) Формирование сигнала срабатывания АЗ				
$S_1$	- не более 2 с от начала ИСА по уставкам $У_1$ и/или $У_2$ и/или $У_3$				
$S_2$	- 2...50 с от начала ИСА по уставкам $У_1$ и/или $У_2$ и/или $У_3$				
$S_3$	- более 50 с от начала ИСА по уставкам $У_1$ и/или $У_2$ и/или $У_3$ или без автоматического срабатывания АЗ Формирование сигнала срабатывания САОЗ				
$S_4$	- не более 10 с от начала ИСА по уставкам $У_2$ и $У_4$				
$S_5$	- 10...200 с от начала ИСА по уставкам $У_2$ и $У_4$				
$S_6$	- 10...200 с от начала ИСА по уставке $У_2$				
$S_7$	- 200...4000 с от начала ИСА по уставкам $У_2$ и $У_5$ или $У_6$				
$S_8$	- 200...4000 с от начала ИСА по уставке $У_2$ Формирование сигнала на закрытие СК ТГ				
$S_9$	- не более 1 с от начала ИСА по уставке $У_7$				
$S_{10}$	- 10...100 с от начала ИСА по уставке $У_7$				
$S_{11}$	- более 100 с от начала ИСА по уставке $У_7$ Формирование условий срабатывания ГЕ САОЗ				
$S_{12}$	- 1...200 с от начала ИСА по уставке $У_8$				
$S_{13}$	- более 200 с от начала ИСА по уставке $У_8$ Формирование условий отключения ГЦН				
$S_{14}$	- не более 30 с от начала ИСА по уставке $У_9$				
$S_{15}$	- 30...300 с от начала ИСА по уставке $У_9$				
$S_{16}$	- более 300 с от начала ИСА по уставке $У_9$				
$S_{17}$	Повышение давления и активности под оболочкой				

Примечание.  $У_1$  – уставка срабатывания АЗ «Давление над активной зоной менее 148 кгс/см<sup>2</sup> при температуре в горячих нитках более 260 °С и мощности реактора более 75 % номинальной мощности;  $У_2$  – уставка срабатывания АЗ «Уменьшение разности температуры насыщения

теплоносителя и температуры теплоносителя в горячей нитке любой петли менее 10 °С»; У<sub>3</sub> – уставка срабатывания АЗ «Давление над активной зоной менее 140 кгс/см<sup>2</sup> при температуре теплоносителя в горячих нитках более 260°С и мощности реактора менее 75 % номинальной мощности»; У<sub>4</sub> – уставка срабатывания САОЗ «Давление под оболочкой более 0,3 кгс/см<sup>2</sup>»; У<sub>5</sub> – сигнализация «Давление под оболочкой более 0,2 кгс/см<sup>2</sup>»; У<sub>6</sub> – сигнализация «Давление под оболочкой более 0,003 кгс/см<sup>2</sup>»; У<sub>7</sub> – уставка закрытия СК ТГ «Снижение давления перед ГПЗ менее 52 кгс/см<sup>2</sup> или отключение двух ТПН»; У<sub>8</sub> – уставка срабатывания ГЕ САОЗ «Давление в 1-м контуре ниже 60 кгс/см<sup>2</sup>»; У<sub>9</sub> – уставка отключения ГЦН «Снижение давления масла менее 0,6 кгс/см<sup>2</sup>».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Инструкция* по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на РУ.00.ПТ.ГТ.ИЭ.05.А. Запорожская АЭС, 1993.
2. *Инструкция* по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на РУ энергоблока № 4 Ровенской АЭС с реактором ВВЭР-1000 / 5-Э-УНИК-ГП НАЭК «Энергоатом», 2003.
3. *Проект* углубленного анализа безопасности энергоблока № 5 Запорожской АЭС. Анализ аварийных последовательностей (моделирование деревьев событий). Руководство по проекту ВОА 1900083-А-Р4 (ZPG-4) / ГП НАЭК «Энергоатом», 2001.
4. *Руководства* по управлению запроектными авариями энергоблоков ЗАЭС // 00.ГТ.Рг.04 А – 1998.
5. *Руководства* по управлению запроектными авариями на энергоблоке № 1 Хмельницкой АЭС / Госкоматом Украины – 1.ЯБ 1273.ИЭ-97.

Поступила в редакцию 23.02.09