

УДК 621.311.25:621.039

Определение наиболее опасных аварийных ситуаций на АЭС и идентификация их возникновения в процессе эксплуатации

К. Н. Чьонг Ван, Ю. Б. Воробьев

Сведения об авторах

Чьонг Ван Кхань Ньят — аспирант кафедры Атомных электрических станций МЭИ**Воробьев Юрий Борисович** — кандидат технических наук, доцент кафедры Атомных электрических станций МЭИ, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: yura3510@gmail.com

Представлены результаты работ по развитию двух оригинальных методов и их совместному применению в области анализа безопасности АЭС.

Первое направление касается нахождения наиболее опасных аварийных сценариев на АЭС. Предлагаемый подход основан на развитии методов динамического вероятностного анализа безопасности (ДВАБ). В созданном оригинальном методе ГА-ДВАБ используется объединение системных кодов типа Relap5 для корректного отображения динамики аварии на АЭС и алгоритмов поиска глобального оптимума (генетический алгоритм) для исследования пространства возможных аварий на станции на основе варьирования неопределенных (свободных) параметров аварийных сценариев. Рассмотрена реализация поиска наиболее опасного сценария.

Приведены расчеты, показывающие возможность определения наиболее опасных аварий для двух различных реакторных установок на основе предлагаемого метода ГА-ДВАБ. Первый тип АЭС базируется на реакторе PWR. Проведенный в рамках задачи ДВАБ автоматизированный поиск наиболее худшего сценария позволил найти наиболее опасные варианты в сформированном пространстве поиска и выделить различные моды отказа.

Второй вариант в рамках решения задач ДВАБ, демонстрирующий возможности представляемого метода ГА-ДВАБ, относится к исследованию пространства состояния установки ВВЭР-1000/В-320. В рассматриваемом процессе была найдена область отказа, где наибольшая температура оболочки твэлов достигала 1580 К. Таким образом, на двух примерах показано, что предлагаемый метод ГА-ДВАБ способен к нахождению опасных сценариев аварий на АЭС.

Проведены исследования возможности ранней идентификации потенциально опасных сценариев или их возникновения в процессе развития аварии. Для этого возможно использовать развиваемый авторами метод идентификации аварий на АЭС. Проанализирована возможность его адаптации на основе декомпозиции найденных аварий в рамках ДВАБ на последовательность событий на временной шкале ее развития. В качестве примера дан результат ГА-ДВАБ для ВВЭР-1000/В320 и описана возможность настройки системы на распознавание ключевых событий развития аварии.

Ключевые слова: безопасность АЭС и ее вероятностный анализ, генетические алгоритмы, нейронные сети.

Determining the worst-case accidents at an NPP and identifying their occurrence during operation

К. N. Truong Van, Yu. B. Vorob'ev

Information about authors

Truong Van Khan Nyat — Ph.D.-student of Nuclear Power Plants Dept., MPEI**Vorob'ev Yuriy B.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Nuclear Power Plants Dept., MPEI, Leading Researcher of Research Center «Kurchatov Institute», e-mail: yura3510@gmail.com

The article presents the results of studies aimed at elaborating two original methods and jointly applying them for an analysis of NPP safety. The first line of research is concerned with finding the worst-case accident scenarios at an NPP. The proposed approach is based on further development of the dynamic probabilistic safety assessment (DPSA) techniques. The newly developed original method, called the GA-DPSA, combines the Relap5-type system computation codes correctly representing the accident dynamics at an NPP and the algorithms of searching for the global optimum (a genetic algorithm) to investigate the space of possible accidents at the plant by varying indefinite (free) parameters of accident scenarios. A procedure of searching for the worst-case scenario is considered.

Calculations demonstrating the possibility of determining the worst-case accident scenarios for two different reactor plants using the proposed GA-DPSA method are given. The first type of NPP is based on a PWR reactor. The automated search for the worst-case accident scenario carried out within the framework of the DPSA problem made it possible to find the most dangerous cases in the constructed space of search and to identify various failure modes.

The second case considered in the article within the framework of solving DPSA problems, which demonstrates the capabilities of the proposed GA-DPSA method, relates to studying the state space of the VVER-1000/V-320 reactor plant. The failure domain in which the maximum fuel cladding temperature reached 1580 K was found in the considered process. Thus, it has been demonstrated on the basis of two examples that the proposed GA-DPSA method can be used for finding the worst-case scenarios at an NPP.

The possibility of carrying out early identification of potentially dangerous scenarios or their occurrence during the accident evolution process is analyzed. The NPP accident identification method developed by the authors can be used for this purpose. The possibility of adapting this method by decomposing the accidents identified within the DPSA into a sequence of events occurring on the time scale of their evolution is analyzed. As example, the GA-DPSA result obtained for the VVER-1000/V320 reactor plant is given, and the possibility of tuning the system for recognizing the main accident evolution events is described.

Key words: NPP safety and its probabilistic assessment, genetic algorithms, neural networks.

Введение

События последних десятилетий развития ядерной энергетики показывают, что, несмотря на существенное накопление знаний о процессах на АЭС, внедрение нового оборудования и использование все более точных методов в анализе безопасности, аварийные ситуации происходят довольно часто, причем некоторые в совершенно неожиданных областях, например, на АЭС «Фукусима». Это говорит о том, что современная система анализа безопасности АЭС не является законченной и идеальной, использование устоявшихся групповых (отраслевых) стереотипов и априорных предположений о сложных феноменах может давать ложный консерватизм. Одним из решений данной проблемы является использование новых технологий, в частности — методов обработки информации, позволяющих в значительной мере уйти от субъективизма в анализе. Они должны использоваться в гармоничном сочетании с традиционными, хорошо апробированными подходами.

В статье представлен метод динамического вероятностного анализа безопасности (ДВАБ) в его применении к поиску наиболее опасных сценариев на АЭС. Для раннего обнаружения такого рода аварий и, следовательно, их предотвращения предлагается использовать другой подход (по результатам ДВАБ), базирующийся на идентификации аварий на АЭС с использованием нейронных сетей (НС).

Метод ДВАБ

Начиная с конца 1970 г. XX в., вероятностный анализ безопасности (ВАБ) АЭС является неотъемлемой частью общего анализа безопасности в ядерной энергетике. Особенность ВАБ-процедур при анализе АЭС принуждает использовать упрощения и предположения, ограничивающие его при учете динамической природы взаимодействий оборудования, физических процессов во время аварий на станции и взаимовлияния между:

- стохастическими возмущениями (например, отказом оборудования);
- детерминистической реакцией АЭС (т.е. переходным процессом);
- системами контроля и защиты;
- действиями оператора.

Пассивные системы безопасности, запроектные аварии и явления, происходящие в защитной оболочке, являются теми примерами, когда подобные зависимости развития аварии от времен и порядка событий особенно важны.

Другим важным инструментом анализа безопасности АЭС считаются системные детерминистические коды типа RELAP5, позволяющие с достоверностью моделировать динамические процессы во время аварии, однако их использование в ВАБ ограничено, что затрудняет учет в вероятностных оценках динамических процессов.

Связь между детерминистическими методами и вероятностными может быть установлена в рамках подхода динамического ВАБ (ДВАБ), рассматривающего опасные сценарии как неизвестные, необходимые для нахождения в процессе решения. Реализация этой задачи — сложная проблема из-за существенных требований к вычислительным ресурсам. ДВАБ-методы могут быть представлены следующими классами:

- Марковскими [1] и графическими [2] моделями;
- непосредственным моделированием системы на основе метода Монте-Карло (МК) [3];
- дискретными динамическими деревьями событий (ДДДС) [4].

Методы МК и ДДДС используют случайное и систематическое исследования пространства событий и могут быть наиболее эффективны в анализе безопасности АЭС. Проблема ДДДС состоит в том, что уточнение дискретности в анализе приводит к комбинаторному взрыву. В методах, базирующихся на МК, комбинаторный взрыв избегается, но требуется большое количество расчетов по детерминистическому коду для уверенной идентификации маловероятных (10^{-6} — 10^{-8}), но потенциально очень опасных событий. Поэтому прямое использование МК-методов в анализе безопасности АЭС является вычислительно затратным. Из последних работ можно выделить направления по моделированию подмножеств (SS) [5, 6] и метод выборки по линии (LS) [7 — 9]. Хотя указанные методы интересны, проблема вычислительной эффективности остается актуальной и для них.

Существуют две типичные задачи ДВАБ:

- 1) идентификация сценария с наихудшими последствиями (например, максимальное превышение пределов безопасности);

2) идентификация области отказа или подобластей в пространстве возможных сценариев АЭС, где критерий безопасности превышает барьер по пределу безопасности и оценку вероятности попадания в данную область.

Большинство рассмотренных методов нацелены на решение второй задачи и в них используются понятия предельной вероятности для отбрасывания в анализе событий с вероятностью реализации ниже нее. В то же время более актуальной является первая задача, когда вероятность аварии может быть невелика, однако ее последствия будут катастрофичны и, таким образом, риск велик. Развиваемый авторами метод ГА-ДВАБ является оригинальным подходом, позволяющим эффективно решить поставленную задачу.

Метод ГА-ДВАБ

Основные моменты использования генетического алгоритма (ГА) в ДВАБ представлены в [10], дадим их краткое описание.

Сценарии аварий на АЭС содержат последовательность начальных событий, отказов компонент, действий оператора, функционирования систем контроля и безопасности, отклонения параметров оборудования от номинальных значений, приводящих к отказу барьеров безопасности (например, оболочки твэлов — $T_{об}$ корпуса реактора, защитной оболочки и т.д.). Степень превышения или близости к опасному пределу по большей степени устанавливает опасность аварии, а изменение ее параметров, заключающихся в вариации начальных событий, действиях оператора и т.д., определяет пространство исследования, в котором и будет меняться степень опасности. Критически важные для безопасности параметры (например, максимальная температура оболочки твэлов — $T_{об\max}$ и т. п.) могут быть использованы для управления процессом исследования уязвимости АЭС. Для контроля процесса поиска (исследования) в методе берется семейство алгоритмов поиска глобального оптимума и, в частности, ГА [11]. ГА — эвристический метод, базирующийся на технике эволюции биологических систем, формализованных на основе математических и вычислительных процедур для нахождения глобального оптимума функции $Y = F(U)$, где U — вектор параметров. При использовании в безопасности АЭС U представляет неопределенности, связанные с моделированием и функционированием АЭС (например, время отказа или срабатывания оборудования, задержки активирования систем безопасности, коэффициенты теплообмена, перепады давления, расходы насосов). ГА не имеет ограничений на тип функции приспособленности $F(U)$ и на параметры U (непрерывные и дискретные), что делает простым его использование совместно с системными кодами, такими как RELAP5, TRACE, КОРСАР или MELCOR [12]. ГА-метод успешно работает при исследовании сложных, нелинейных систем, включая

проблемы надежности и диагностики АЭС [13], и при оптимизации систем [14]. В ГА достаточно просто реализуются параллельные расчеты, что позволяет серьезно снизить расчетное время ДВАБ-анализа.

Подход ГА-ДВАБ реализован на базе кода NPO (Nuclear Plant Optimizer) [15], разработанного для автоматизации анализа безопасности АЭС с использованием параллельных расчетов. Для ГА-ДВАБ также адаптированы системные коды: Relap5/Parcs, MELCOR 1.8x, 2.x. Для оценок вероятностей используются следующие подходы: схожий с методом существенной выборки метода МК и на основе конструирования суррогатной модели с применением НС [10].

Использование метода ГА-ДВАБ для нахождения наихудших аварийных сценариев на АЭС

Покажем возможности ГА-ДВАБ-подхода по определению наихудших аварийных сценариев для АЭС для двух разных реакторных установок (РУ): PWR и ВВЭР-1000/В320. В обоих вариантах использовался системный код RELAP5 mod 3.3 [16].

Вариант РУ типичный PWR

Модель представляет РУ типа PWR с четырьмя петлями и базируется на тестовом примере, распространяющемся вместе с кодом Relap5. Моделируются только две петли. Первая петля (одиночная) представляет собой обычную петлю. Вторая — является моделью оставшихся трех петель (тройная петля). Рассматривался сценарий с течами варьированного условного диаметра (ДУ) на холодной и горячей нитках первой петли. Пространство событий формировалось на возможности частичных отказов для систем безопасности: впрыска высокого давления (HPIS), подключенной к одиночной и тройной петлям; низкого давления (LPIS), подсоединенной к одиночной петле; гидроаккумуляторов, присоединенных к тройной петле. Временные задержки активации и другие параметры контролировались программой GA-NPO. Размерность параметрического пространства равна 7. Вероятностные характеристики параметров выбирались схожие с РУ ВВЭР-1000/В320 по результатам анализа неопределенностей (АН) [17]. ГА-ДВАБ, выполненный с использованием программы GA-NPO, дал следующие результаты. Всего было смоделировано 1773 аварии. Наибольшее значение $T_{об\max}$ равнялось 1696 К. Количество аварий, у которых $T_{об\max} > 1400$ К — 110. Типичные результаты представлены на рис. 1. Были идентифицированы две разные моды отказа. Первая относилась к отказу активации системы безопасности перед достижением максимального значения (мода тривиального отказа).

Во второй моде, где получилось наибольшее значение $T_{об\max}$ для ГА-ДВАБ, некоторые компоненты системы безопасности активировались с различными запаздываниями $\Delta t_{сб}$ перед достижением максималь-

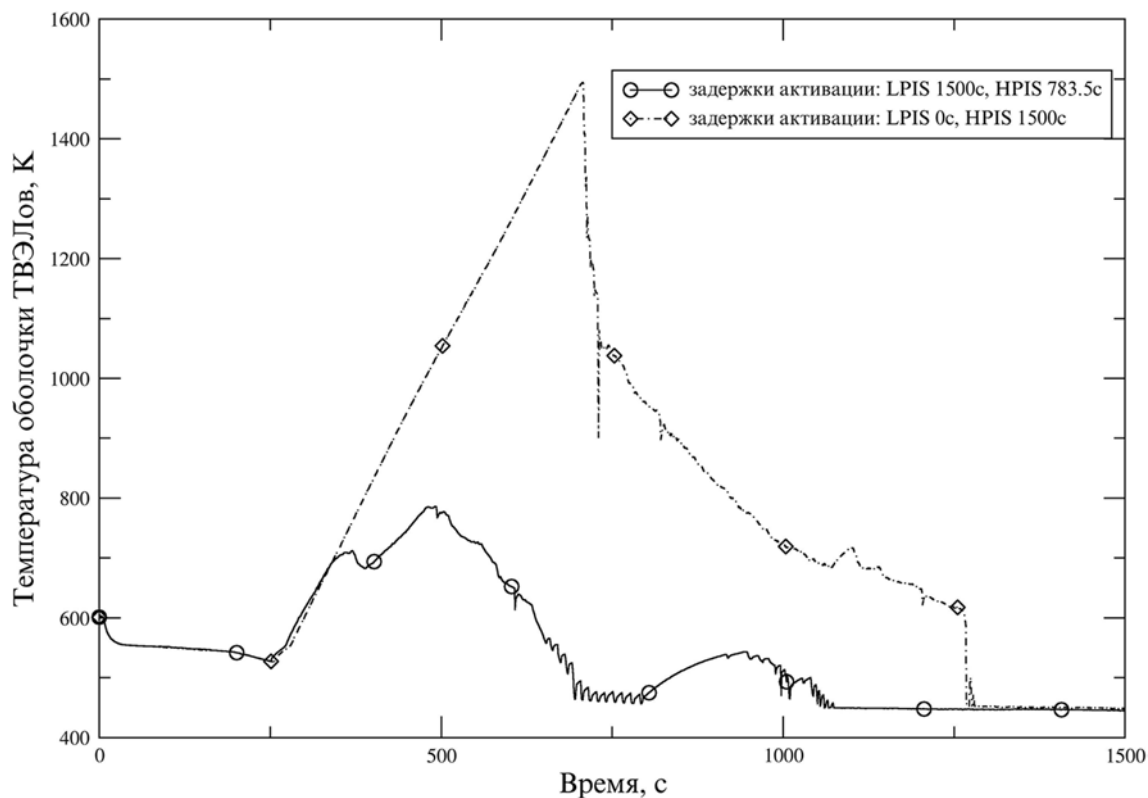


Рис. 1. Изменение $T_{об}$ при ГА-ДВАБ для РУ PWR для опасного сценария аварии с отсутствием задержки активации системы LPSI и более безопасного сценария с наличием задержки в 1500 с на активацию системы LPSI

ного значения $T_{об}$. Разница в значениях $T_{об\max}$ из-за $\Delta t_{сб}$ менялась от 150 до 800 К. В аварии наступал момент осушения верхней части активной зоны, что явилось основной причиной больших значений $T_{об\max}$. Прочищение гидрозатвора холодной нитки вызвало уменьшение давления в первом контуре и увеличило поступление воды от LPIS, приводящее к росту уровня теплоносителя в активной зоне и прекращающее дальнейший рост $T_{об}$ (см. рис. 1). Разница во времени прочищения гидрозатвора определила $T_{об\max}$ в аварии. В расчетах, также как и в [17], наблюдались осцилляции расхода из-за конденсации в холодной нитке и испарения в активной зоне и горячей нитке. Если отсутствовало срабатывание LPIS и запаздывала активация HPIS (например, на рис. 1, вариант единичной петли LPSI — 1500 с, HPIS — 783,5 с), то наблюдалась более высокая амплитуда осцилляций и более раннее прочищение гидрозатвора.

Таким образом, для данного типа аварии и модели РУ ГА-ДВАБ способен найти наиболее наихудший сценарий.

Вариант РУ ВВЭР-1000/В320

Рассматриваемая в ДВАБ авария базировалась на вариации: размера и места течи из первого контура РУ, комбинаций отказов систем безопасности и временных запаздываний их активации, параметров моделей кода Relap5, действий оператора АЭС. Рассматривался сценарий с отказом трех из четырех насосов

высокого давления JND. Размерность параметрического пространства равна 58. Вероятностные характеристики параметров выбирались по результатам анализа неопределенностей (АН) [17]. В ГА-ДВАБ-задаче было рассчитано 1786 варианта, в десяти из которых $T_{об\max} > 1300$ К. В наихудшем аварийном сценарии $T_{об\max}$ достигает 1580 К. Этот и два других характерных варианта представлены на рис. 2.

Анализ найденных аварийных ситуаций определил, что причиной повышения $T_{об}$ стало сложное взаимодействие между различными компонентами системы и действиями оператора АЭС по активации впрыска насосов системы безопасности JDN в компенсатор давления (КД). В результате давление в первом контуре падает и теплообмен от первого ко второму контуру меняет направление на обратное. При отсутствии впрыска теплообмен имеет нормальное направление, что позволяет более интенсивно снизить параметры первого контура и обеспечивает более раннее включение гидроаккумуляторов, в свою очередь обеспечивающее раннее включение системы низкого давления и опасный пик $T_{об}$ не возникает. Эффект от впрыска системы JDN в КД представлен на рис. 2, где, для сравнения с опасным вариантом с достижением наибольшей $T_{об\max}$ в ГА-ДВАБ, представлена авария с безопасной активацией системы JDN в КД при схожих параметрах течи их первого контура. Также для сравнения приведен случай с максимальными размерами

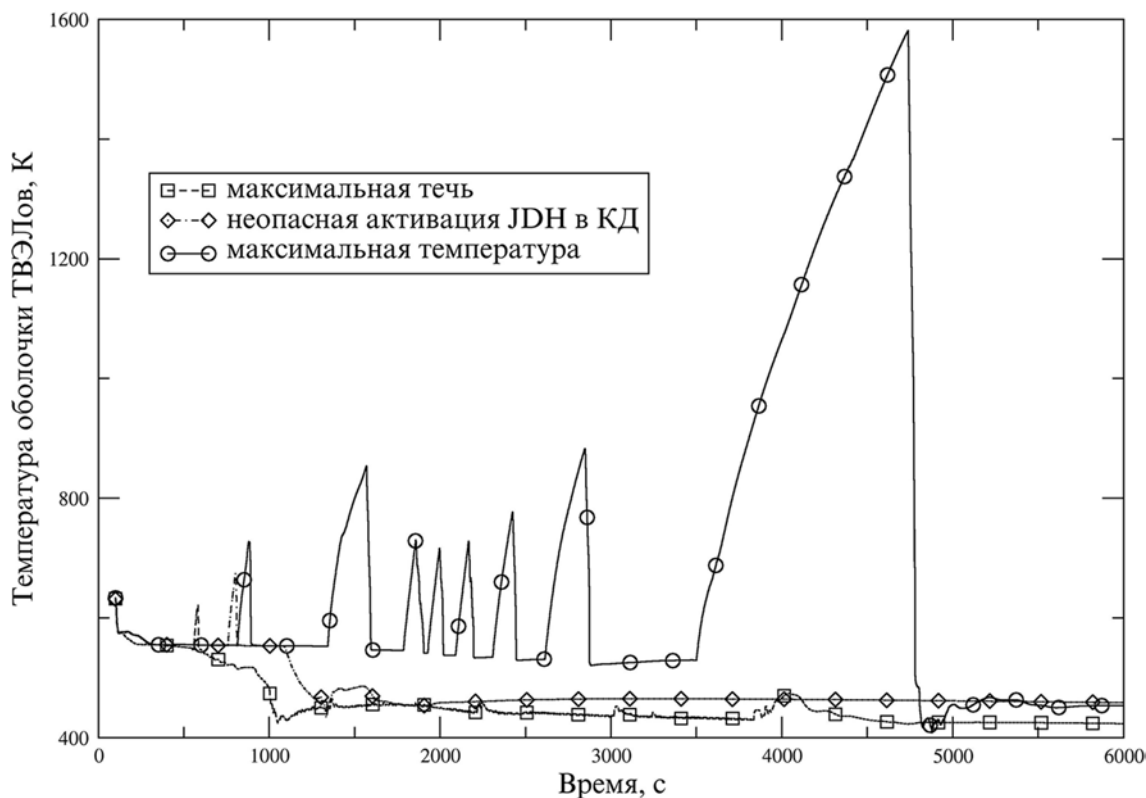


Рис. 2. Изменение $T_{об}$ при ГА-ДВАБ для РУ ВВЭР-1000/В320 для наиболее худшего сценария аварии при опасной активации впрыска JDH в КД (максимальная температура), суммарной максимальной течи на холодной и горячей нитках и при неопасной активации впрыска JDH в КД

течей из холодной и горячей ниток, рассмотренный в ГА-ДВАБ, которые существенно больше варианта с наибольшей $T_{об\max}$. Однако в данном случае значимый рост $T_{об}$ отсутствует.

Решение ГА-ДВАБ-задачи позволило найти парадоксальный аварийный случай, когда правильные действия оператора приводят сложную систему АЭС к опасным последствиям, что не определяется стандартными средствами ВАБ. Как и ранее, можно сделать вывод, что ГА-ДВАБ способен находить наиболее опасные сценарии на АЭС.

Идентификация наиболее опасных сценариев ДВАБ в процессе эксплуатации АЭС

Для безопасности АЭС крайне важно вовремя идентифицировать возникновение наиболее опасных сценариев аварий или спрогнозировать возможность перехода текущей аварии в более опасную форму при выполнении определенных условий в процессе ее развития. Сам процесс идентификации может быть эффективно выполнен на основе совместного использования информационных технологий на базе НС и системных кодов типа RELAP5. Подробно метод представлен в [19, 20], приведем лишь основные его принципы.

При работе АЭС контролируется вектор параметров Y . Также имеется множество возможных аварийных ситуаций на АЭС — $A = \{A_i\}_{i=1}^n$ (формируется на

основе ВАБ или по результатам ГА-ДВАБ). Для идентификации аварии нужно установить соответствие между реализацией множества $A \rightarrow Y_A$ и его конкретным элементом $A \rightarrow A_i \rightarrow Y_{A_i}$, что можно определить из анализа динамики АЭС во время аварии с помощью системных кодов типа Relap5 на основе расчета значений вектора наблюдений $Y: A_i \rightarrow Y_{A_i}$. Задача системы идентификации состоит в автоматизации процесса сопоставления во время аварии величин Y_{A_i} и $Y_{A_{ic}}$ (реальных и смоделированных с помощью системного кода) и определении соответствующего элемента $A_i \in A$. Расчетные коды моделируют процессы с погрешностью, носящей случайный характер. Кроме того, существуют параметры модели аварии, имеющие стохастическую природу, например, текущая мощность реактора, отказы систем. Учет таких погрешностей возможен на основе использования АН. Сопоставление $Y_{A_{ic}}$ и Y_{A_i} во время аварии эффективно выполняют НС.

Функционирование подхода было успешно проверено для РУ ВВЭР-440/В232 и ВВЭР-1000/В320 как для начальной стадии аварии, так и в процессе ее развития. Поэтому логично использовать его для идентификации наиболее опасных сценариев аварий найденных в ДВАБ.

Для успешного применения результатов ДВАБ в системе идентификации следует провести адаптацию. Сначала в общей базе данных результатов ГА-ДВАБ —

$A_{\text{ДВАБ}}$ выделяется область отказа $A_{\text{НДОО}}$, представляющая наибольшую опасность и, соответственно, наибольший интерес в идентификации. $A_{\text{НДОО}}$ может быть определена по показателю безопасности, $T_{\text{обмах}} \geq T_{\text{обкр}}$. Для текущего случая было принято $T_{\text{обкр}} = 1100$ К и для $A_{\text{НДОО}}$ выделено 97 вариантов.

Система идентификации на основе НС способна успешно функционировать на разных этапах развития аварии [20], но для этого НС должна быть настроена на активацию или возможные отказы компонент системы безопасности РУ, действия оператора во время развития аварии. Поскольку в ГА-ДВАБ-поиске могут быть найдены разные моды отказа, то они должны быть идентифицированы, так как пути их развития могут качественно отличаться. В рассматриваемом варианте РУ ВВЭР-1000 была идентифицирована одна мода отказа.

Затем, на основе выделенной моды отказа необходимо провести декомпозицию процесса развития $A_i \in A_{\text{НДОО}}$ на основе N событий, последовательно реализующихся в моде: $I_N: \{I_c\}_{c=0}^N$. Для успешной идентификации стадий развития аварии в сторону наиболее опасного варианта для каждого события I_c проводится идентификация его реализации. Для этого формируются два множества настройки НС [20] без события I_c и с ним, соответственно: $A_{\text{сДОО}}$, $A_{\text{дОО}}$. Эти множества могут быть сформированы двумя методами. В первом

используются данные накопленные в $A_{\text{ДВАБ}}$, которое делится на две части по отношению к реализации события I_c . Во втором подходе можно использовать общую базу данных идентификации аварий на АЭС, разработанную, например, для 64 различных типов [20] — A_{64} . Используя предложенную в [20] систему группировки типов аварий для различных событий на основе иерархического бинарного дерева, сформируем множество $A_{\text{сДОО}}$. Множество $A_{\text{сДОО}}$ определяется на основе $A_{\text{ДВАБ}}$.

Для формирования множеств обучения НС по любому методу следует определить специфику области отказа по отношению к событию I_c . Например, тип отказа оборудования, интервал времени активации или отказа системы, диапазон расхода насоса и т.д. Варианты аварий множества $A_{\text{НДОО}}$ представляют собой класс (кластер) в общем параметрическом пространстве U исследования ГА-ДВАБ, который при детализации может быть разбит на подклассы. Событие I_c определяется подпространством $U_c \subset U$ и необходимо отобразить $A_{\text{НДОО}}$ на $U_c - A_{\text{сДОО}}: A_{\text{НДОО}} \rightarrow A_{\text{сДОО}}$. Для I_c ($c = 0$) $A_{\text{одОО}} = A_{\text{сДОО}}$. Для событий I_c ($c > 0$) $A_{\text{сДОО}}$ определяется на основе $\bigcup_{i=0}^c I_i$, что формирует $A_{\text{сДОО}} = \bigcap_{i=0}^c A_{\text{иДОО}}$.

Для рассматриваемого примера был проведен анализ по формированию последовательности I_N на основе событий: I_0 (начало аварии) — диапазон ДУ течей из

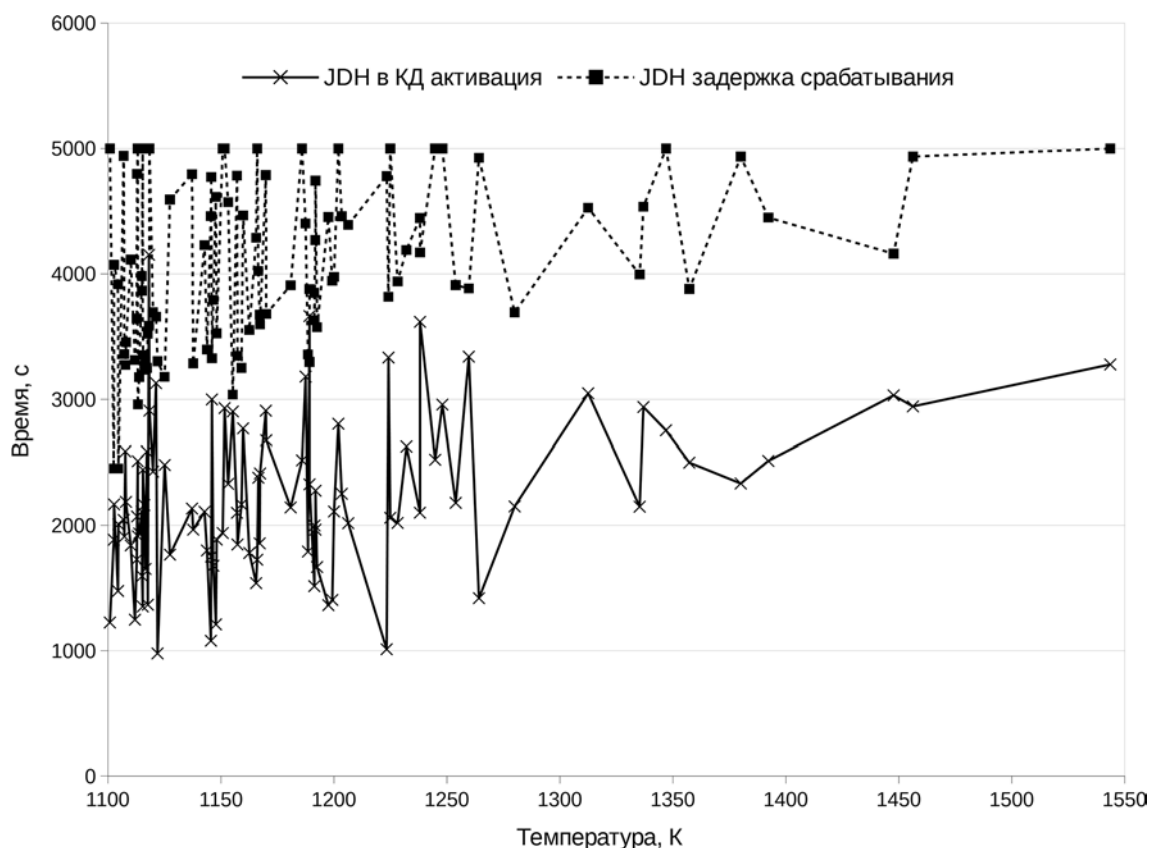


Рис. 3. Изменения параметров времени активации JDH в КД и задержки срабатывания JDH от $T_{\text{обмах}}$ для точек в области отказа

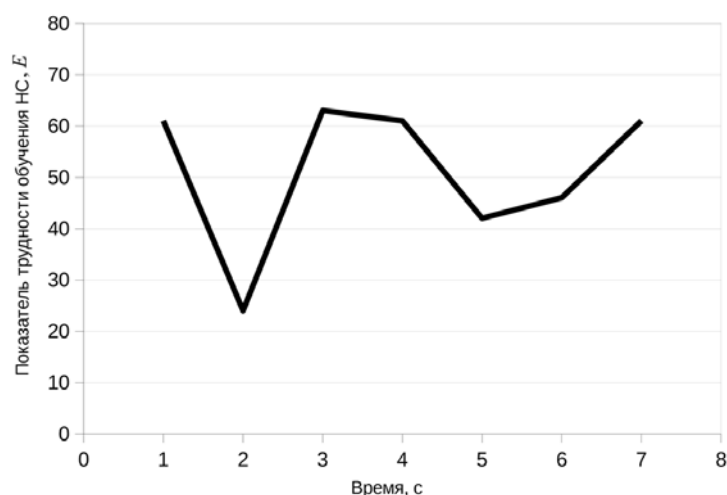


Рис. 4. Изменение показателя трудности настройки НС для идентификации наиболее опасных аварий для события I_0 в зависимости от времени с начала аварии

первого контура холодная нитка: 95 — 118 мм, горячая нитка: 0 — 16 мм, параметры неопределенности модели лежат в соответствующих диапазонах для $A_{0ДОО}$; I_1 (развитие аварии до 980 с) — отказ трех насосов JND, задержка $\Delta t_{CB} = \Delta t_{CB-JDN} > 980$ с для плунжерного насоса высокого давления системы безопасности JDN; I_2 (развитие аварии от 980 с до пика температуры около 5500 с) — активация в t_{JDN-KD} впрыска насоса JDN к КД, $t_{JDN-KD} < \Delta t_{CB-JDN}$. Условие $t_{JDN-KD} < \Delta t_{CB-JDN}$ для области отказа показано на рис. 3, где представлены зависимости t_{JDN-KD} и Δt_{CB-JDN} от найденных значений $T_{обмах}$ в ГА-ДВАБ.

На подобной основе изучалась возможность настройки НС. Отображение $A_{НДОО} \rightarrow A_{НСДОО}$ выполнялось упрощенно по границам области отказа. Более сложный подход с использованием кластеризации может быть исследован позднее. Множества $A_{0ДОО}$ и $A_{0ДОО}$ формировались на основе $A_{ДВАБ}$. Анализировалась возможность настройки НС на распознавание наихудшего варианта аварии в самом его начале. Было получено, что НС успешно настраивается на идентификацию потенциально наиболее опасных аварий. Зависимость композиционного показателя E трудности обучения НС [20] от времени с начала аварии изображена на рис. 4.

Для события I_1 бралась идентификация аварий множества $A_{1ДОО}$, сформированная на основе базы данных A_{64} для аварий со схожими диаметрами течей из холодной и горячей ниток. Расчеты в произвольно выбранных точках на интервале $\Delta t_1 = 0 — 980$ с показали, что НС может быть успешно настроена на идентификацию. Зависимость E для точек Δt_1 продемонстрирована на рис. 5.

Последняя группа расчетов касалась события I_2 , где необходимо было правильно идентифицировать факт срабатывания впрыска JDN в КД. Формирование $A_{2ДОО}$ рассматривалось в различные моменты времени аварии. Например, для момента времени 2000 с с начала аварии для 37 вариантов из области отказа уже имеется активация JDN в КД. Множество $A_{2ДОО}$ состоит из аварий с активацией после 2008 с. Изучалась возможность на-

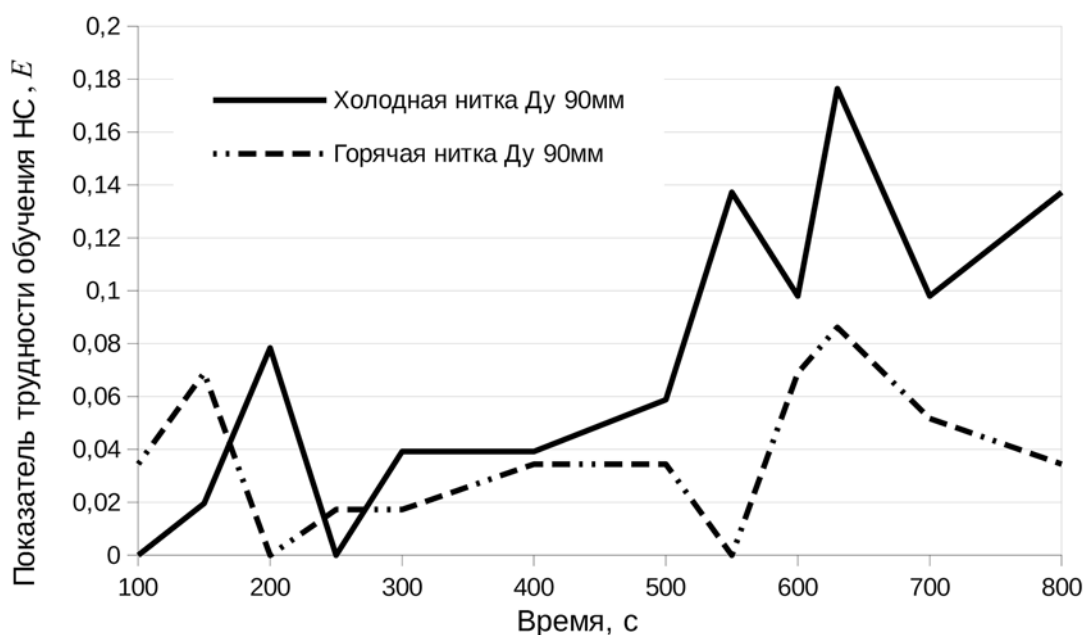


Рис. 5. Изменение показателя трудности настройки НС для идентификации наиболее опасных аварий для события I_1 в зависимости от времени с начала аварии для двух вариантов формирования $A_{1ДОО}$ из A_{64} : течи холодная и горячая нитки Ду — 90 мм

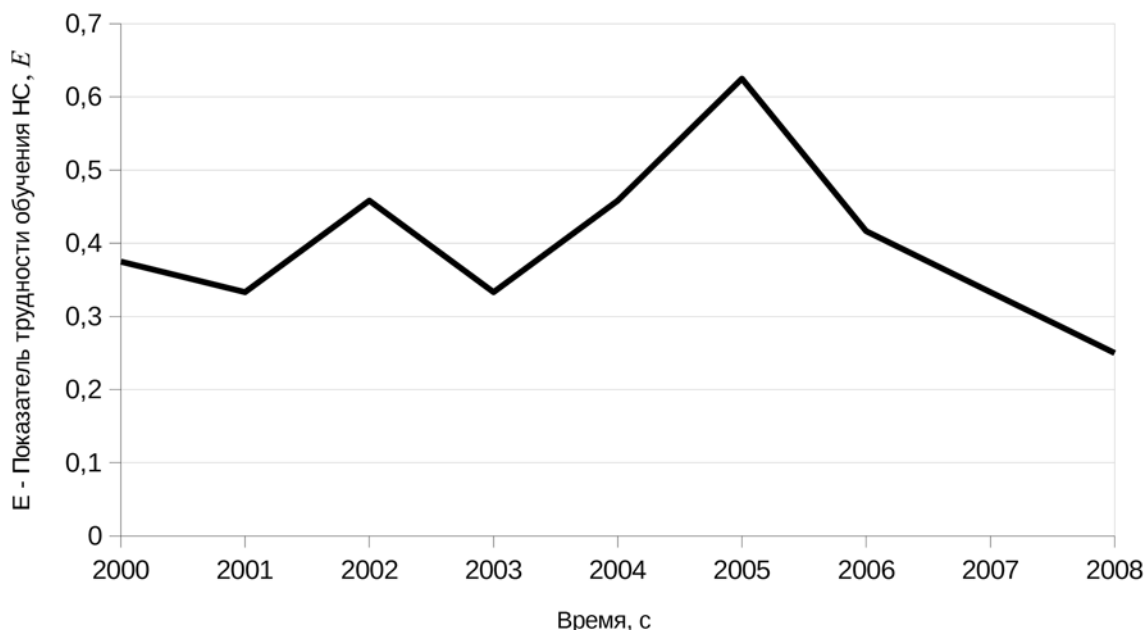


Рис. 6. Изменение показателя трудности настройки НС для идентификации наиболее опасных аварий для события I_2 в зависимости от времени с начала аварии

стройки НС для идентификации I_2 и была получена ее хорошая реализуемость. На рис. 6. представлен пример зависимости параметра E для интервала 2000 — 2008 с.

Расчеты показали возможность настройки системы на распознавание ключевых событий развития аварии. Более сложно система настраивается на начальном этапе и значительно легче на поздних. Это связано с тем, что вначале специфика близко расположенных в параметрическом пространстве аварий только начинает проявляться и требуется более тщательное обучение НС.

Выводы

В представленных расчетах для двух разных РУ показано, что разрабатываемый метод ГА-ДВАБ позволяет опознавать наихудшие аварийные сценарии. Для их своевременной идентификации при возникновении в процессе эксплуатации АЭС было предложено использовать развиваемый метод на основе НС. В работе продемонстрирована адаптация метода, учитывающая специфику ДВАБ, на основе декомпозиции аварий из области отказа на упорядоченную последовательность событий и формирования на этом базисе множества настройки НС. Расчеты показали, что для рассмотренного примера аварии РУ ВВЭР-1000/В320 по предложенному алгоритму реализуется настройка НС для идентификации наиболее опасных сценариев на всех этапах развития аварии. Предложенный подход может быть использован для создания системы поддержки оператора АЭС или кризисного центра.

Литература

1. **Belhadj M., Hassan M., Aldemir T.** On the need for dynamic methodologies in risk and reliability studies

// *Reliability Eng. and System Safety*. 1992. V. 38. P. 219 — 236.

2. **Coppit D., Sullivan K.J., Dugan J.B.** Formal semantics of models for computational engineering- a case study on dynamic fault trees // *Software Reliability Eng.: Proc. 11th Intern. Symp. San Jose (USA), 2000*. P. 270 — 282.

3. **Marseguerra M., Zio E., Devooght J., Labeau P.E.** A concept paper on dynamic reliability via Monte Carlo simulation // *Math. and Computers in Simulation*. 1998. V. 47. P. 371 — 382.

4. **Hakobyan A.P.** Severe Accident Analysis using Dynamic Accident Progression Event Trees. Ohio State University, 2006.

5. **Au S.-K., Beck J.L.** Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation // *Probabilistic Eng. Mech.* 2001. V. 16. P. 263 — 277.

6. **Zio E., Pedroni N.** Estimation of the functional failure probability of a thermal-hydraulic passive system by Subset Simulation // *Nuclear Eng. and Design*. 2009. V. 239. P. 580 — 599.

7. **Koutsourelakis P.S, Pradlwarter H.J, Schueller G.I.** Reliability of structures in high dimensions. Pt. I: algorithms and application // *Probabilistic Eng. Mech.* 2004. V. 19. P. 409 — 417.

8. **Zio E., Pedroni N.** An optimized Line Sampling method for the estimation of the failure probability of nuclear passive systems // *Reliability Eng. and System Safety*. 2010. V. 95. P. 1300 — 1313.

9. **Zio E., Pedroni N.** How to effectively compute the reliability of a thermal hydraulic nuclear passive system // *Nuclear Eng. and Design*. 2011. V. 241. P. 310 — 327.

10. **Воробьев Ю.Б. и др.** Применение информационных технологий (генетические алгоритмы, ней-

ронные сети, параллельные вычисления) в анализе безопасности АЭС // Труды ин-та системного программирования РАН. 2014. Т. 26. Вып. 2. С. 137 — 158.

11. **Goldberg D.E.** Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.

12. **Байбаков В.Д., Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д.** Коды для расчетов ядерных реакторов. М.: Изд-во МЭИ, 2003.

13. **Zio E., Baraldi P., Pedroni N.** Selecting Features for Nuclear Transients Classification by Means of Genetic Algorithms // IEEE Trans. on Nuclear Sci. 2006. V. 53. N 3. P. 1479 — 1493.

14. **Vorobyov Yu.B., Kuznetsov V.D.** The Approach to the Optimization of the NPP Characteristics on a Basis of the Use of Best Estimate Codes and of Information Technologies // Proc. of ICAPP. Nice (France), 2007. P. 7525.

15. **Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д.** Использование современных интегральных кодов для управления безопасностью АЭС // Вестник МЭИ. 2001. № 5. P. 31 — 37.

16. **RELAP5/MOD3.** Code Manual, NUREG/CR-5535, INEL-95/0174. V. 1 — 5.

17. **Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д., Мансури М.** Оценка влияния неопределенных факторов при анализе аварийных процессов на АЭС с ВВЭР-1000 // Теплоэнергетика. 2006. № 9. С. 16 — 21.

18. **Fletcher C.D., Callow R.A.** Long-term recovery of pressurized water reactors following a large break loss-of-coolant accident // Nuclear Eng. and Design. 1989. V. 110. P. 313 — 328.

19. **Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д.** Идентификация аварийных ситуаций на АЭС и выработка оптимальных управляющих воздействий // Вестник МЭИ. 2006. № 5. С. 17 — 24.

20. **Воробьев Ю.Б., Чьонг Ван К.Н.** Система распознавания типа аварий на АЭС // Вестник МЭИ. 2015. № 5. С. 14 — 20.

Статья поступила в редакцию 05.05.2016