

Ш.В. Камынов, М.И. Рылов (РЭСцентр, С.-Петербург),
А.С. Можаяев, А.А. Нозик (СПИК «Севзапмонтажавтоматика», С.-Петербург)

Методика применения программного комплекса АСМ СЗМА для расчета показателей безотказности и безаварийности стенда физических измерений

В статье приведен конкретный пример использования созданного в ОАО "СПИК СЗМА" программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования сложных системных объектов и процессов (ПК АСМ СЗМА) [1] для моделирования и расчета вероятностных показателей надежности и безаварийности (технического риска [2]) объекта использования атомной энергии – стенда физических измерений [4].).

Стенды физических измерений (критические стенды) (СФИ) предназначены для определения показателей критичности тепловыделяющих сборок (ТВС) активных зон ядерных реакторов различного назначения (исследовательских, энергетических, судовых и т.д.). Ввиду потенциальной ядерной опасности к СФИ предъявляются высокие требования по надежности (безотказности) и безаварийности (техническому риску) [2,3]. Поскольку измерение критичности сборки (активной зоны) предусматривает ее вывод на уровень управляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления (СЦР), важную роль в обеспечении безаварийной работы СФИ играет встроенная подсистема аварийной защиты (АЗ). Она должна быть спроектирована и действовать таким образом, чтобы в случаях возникновения аварийных ситуаций (АС), в т.ч. и запроектных (ЗАС), полностью выполнялась функция гашения СЦР по сигналу АЗ. Тем самым должен обеспечиваться возможный предельно низкий уровень вероятности возникновения неуправляемой СЦР, т.е. возникновения ЗАС и перехода от нее, вследствие отказов оборудования АЗ, к запроектной аварии (ЗА) СФИ.

Исследование указанных свойств СФИ, как и многих других сложных объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), ручными методами моделирования и расчетов весьма затруднительно, а зачастую практически невозможно из-за их большой размерности и высокой структурной сложности.

Разработанная методика основывается на том, что для решения задачи анализа надежности и безаварийности СФИ общим логико-вероятностным методом [6, 14–16] и программными средствами [1, 7–13] технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ) необходимо:

1. На основе анализа функциональной структуры и процесса работы СФИ, определить состав моделируемых свойств его надежности и безаварийности (технического риска) и выполнить логически строгое описание условий их реализации в объеме, достаточном для формализованной постановки задачи;
2. Осуществить формализованную постановку задачи моделирования свойств и расчета показателей надежности и безаварийности (технического риска), включающую в себя построение схемы функциональной целостности (СФЦ), задание логического критерия функционирования (ЛКФ) и определение исходных вероятностных параметров элементов;
3. Выполнить автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчет показателей надежности и безаварийности (технического риска) с помощью ПК АСМ СЗМА.

В настоящей статье описана методика применения ПК АСМ СЗМА для расчета показателей безотказности и безаварийности СФИ, используемая также для определения остаточного ресурса элементов и систем СФИ, влияющих на безопасность, и для управления надежностью ОИАЭ [4,5].

1. Анализ структуры и процесса работы стенда физических измерений

1.1. Функциональная схема СФИ

Состав основных элементов и обобщенная функциональная схема СФИ приведена на рис.1. На этой схеме прямоугольниками обозначены подсистемы, а кружками – отдельные элементы исследуемого СФИ. В совокупности указанные подсистемы обеспечивают реализацию всех основных технологических этапов процесса функционирования СФИ. Безотказная работа и возможные отказы элементов и подсистем определяют исследуемые свойства надежности и безаварийности СФИ в целом.

1.2. Описание технологического процесса функционирования СФИ [4]

1. Посредством оборудования "Системы перемещения изделий по объекту" (см. рис.1) каждое изделие (сборка) с помощью мостового крана 1, грузового лифта 2, подвесного электрического крана 3, специальной и порталной тележек 4, 5 извлекается из хранилища сборок и перемещается по объекту (зданию) в специальное помещение, где производятся контрольные измерения. Надежность и безопасность СФИ на этом этапе обеспечивается безотказной работой элементов 1÷5 системы перемещения изделий по объекту. При этом считается, что отказ любого из элементов 1÷5 приводит к **функциональному отказу** и возникновению **проектной аварии** (ПА) СФИ (но не вызывает СЦР).

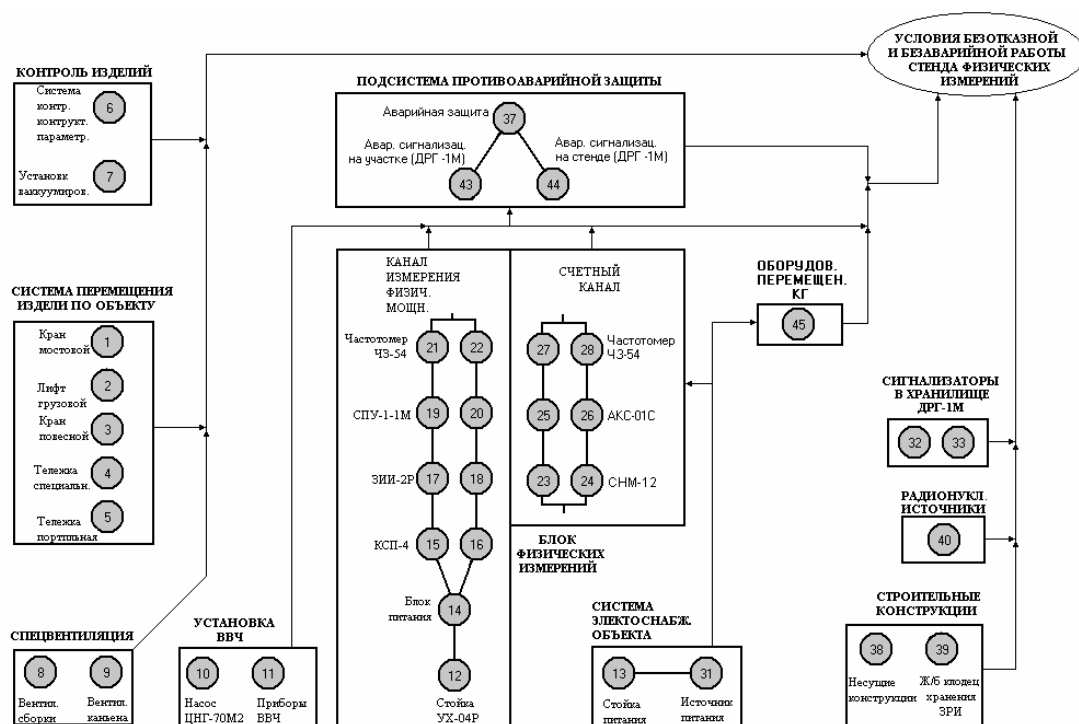


Рис.1. Функциональная схема стенда физических измерений

2. В помещении сборки и в каньоне установлена система "Спецвентиляции" (элементы 8 и 9). Считается, что отказ хотя бы одного из этих элементов приводит к **функциональному отказу** и к **возникновению проектной аварии** СФИ.
3. Подсистема "Строительные конструкции" объекта включают в себя:

- Несущие конструкции – фундамент, стены, перекрытия стендового корпуса (элемент 38);
- Железобетонные колодцы для хранения закрытых радионуклидных источников (ЗРИ) (элемент 39).

Считается, что отказ любого из указанных элементов приводит к **функциональному отказу** и возникновению **проектной аварии СФИ**.

4. Закрытые радионуклидные источники (ЗРИ) нейтронов хранятся в железобетонных колодцах в отдельном хранилище. Под отказом ЗРИ понимается событие возможной его разгерметизации в нормальных условиях эксплуатации и хранения (элемент 40). Это приводит к **функциональному отказу** и возникновению **проектной аварии СФИ**.
5. В хранилище изделий, находящихся на объекте, установлены два датчика (32, 33) подсистемы "Сигнализации в хранилище". Они предназначены для сигнализации о возникновении аварии в хранилище изделий (сборок). Однако отказ собственно подсистемы сигнализации (отказ любого из датчиков) приводит только к **функциональному отказу СФИ** (не приводит к возникновению аварийной ситуации).
6. Подсистема "Контроль изделия" на специальном оборудовании 6 производит контроль конструктивных параметров (габаритов, изгиба и др.), а на установке вакуумирования 7 выполняется проверка герметичности сборки. **Функциональным отказом СФИ** в данной операции считается непрохождение любого из указанных видов контроля изделием вследствие отказов элементов 6 или 7. Эти отказы не приводят к возникновению аварийной ситуации СФИ. Прошедшее контроль изделие перемещается и устанавливается в помещение каньона стенда в одно из гнезд специальной сборки, находящейся в баке из нержавеющей стали.
7. С помощью оборудования 45 "Перемещения компенсирующих групп" (КГ) стержней они опускаются в бак с изделиями и препятствуют возникновению самоподдерживающейся цепной реакции. Отказы КГ 45 или элементов системы электроснабжения 13, 31 в процессе выполнения физических измерений на стенде приводят к возникновению **запроектной аварии СФИ** (неуправляемой СЦР).

8. Для непосредственного выполнения физических измерений бак с изделиями и компенсирующими группами должен быть заполнен водой высокой чистоты (ВВЧ) из "Установки ВВЧ", состоящей из насоса ЦНГ-70М2 (элемент 10) и приборов ВВЧ (элемент 11). Считается, что в процессе физических измерений на стенде отказ хотя бы одного из указанных элементов 10 или 11 приводит к возникновению **запроектной аварийной ситуации СФИ** (возникновению СЦР).
9. Оборудование "Блока физических измерений" включает в себя следующие объекты: элемент 12 - стойка УХ-04Р, элемент 14 – блок питания БНВЗ, а также две линии специальных измерительных приборов с внутренним резервированием элементов:
- "Канал измерения физической мощности" (ФМ): 15, 16 (КСП-4); 17, 18 (ЗИИ-2Р); 19, 20 (СПУ-1-1-М); частотомеры 21,22 (ЧЗ-54);
 - "Счетный канал" (СК): – счетчики нейтронов 23, 24 (СНМ-12), счетные устройства 25, 26 (АКС-01С), частотомеры 27, 28 (ЧЗ-54).

Для производства физических измерений осуществляется вывод сборки на мощность посредством медленного выдвижения стержней компенсирующих групп из заполненного водой бака с помощью оборудования перемещением КГ 45. Начало управляемой СЦР должно фиксироваться одновременно каналом измерения физической мощности (ФМ) и счетным каналом (СК) блока физических измерений. Сразу после начала реакции производится ее прекращение путем быстрого введения в бак КГ стержней. Безаварийность СФИ на данном этапе обеспечивается одновременным безотказным функционированием КГ (элемент 45), измерительного и счетного каналов блока физических измерений. В случае отказа хотя бы одного из каналов возникает **запроектная аварийная ситуация (СЦР)**. Считается, что в случае своевременной локализации (гашения) СЦР системой "Аварийной защиты" (элементы 43, 44, 37) и КГ (элемент 45) она сводится до уровня **проектной аварии СФИ**. В противном случае возникает **запроектная авария СФИ**.

10. Система "Аварийной защиты" (АЗ) предназначена для управления процессом локализации (гашения) СЦР, вызванной отказами оборудования

Блока физических измерений и Установки ВВЧ. По сигналу датчиков ДРГ-1М (элементы 43 или 44) возникновения СЦР на стенде, включается аварийная защита (элемент 37), которая обеспечивает быстрый ввод в бак со сборкой компенсирующих групп стержней КГ (45), чем обеспечивается локализация **запроектной аварийной ситуации** (прекращение СЦР) и сведение ее к уровню **проектной аварии СФИ**.

Из приведенного описания следует, что надежность и безаварийность СФИ могут быть представлены следующими основными свойствами и показателями.

Надежность СФИ:

- Функциональная безотказность СФИ, оценивается вероятностью $P_{СФФ}(t)$ безотказной работы или $Q_{СФФ}(t) = 1 - P_{СФФ}(t)$ - вероятностью отказа.

Безаварийность (технический риск) СФИ:

- Возникновение (или невозникновение) проектной аварии, оценивается вероятностью $P_{ПА}(t)$ ($Q_{ПА}(t) = 1 - P_{ПА}(t)$);
- Возникновение и локализация запроектной аварии, оценивается вероятностью $P_{\text{Локализации ЗАС}}(t)$;
- Возникновение запроектной аварии, оценивается вероятностью $P_{ЗА}(t)$.

Сформулированные в описании технологического процесса условия безотказной работы, функционального отказа, проектной аварии, запроектной аварийной ситуации и запроектной аварии СФИ являются логически строгими и непосредственно связаны с состояниями элементов и подсистем СФИ. Поэтому они могут быть представлены в СФЦ СФИ для моделирования и расчета соответствующих показателей с помощью ПК АСМ СЗМА.

2. Формализованная постановка задачи моделирования и расчета безотказности и безаварийности СФИ

2.1. Построение СФЦ и определение основных составляющих ЛКФ, представляющих свойства надежности и безаварийности СФИ

На основе рассмотренных выше функциональной схемы (см. рис.1) и описания технологического процесса СФИ для проведения вероятностного анализа безотказности и безаварийности рассматриваемой СФИ с помощью ПК АСМ СЗМА разработана СФЦ, изображенная на рис.2.

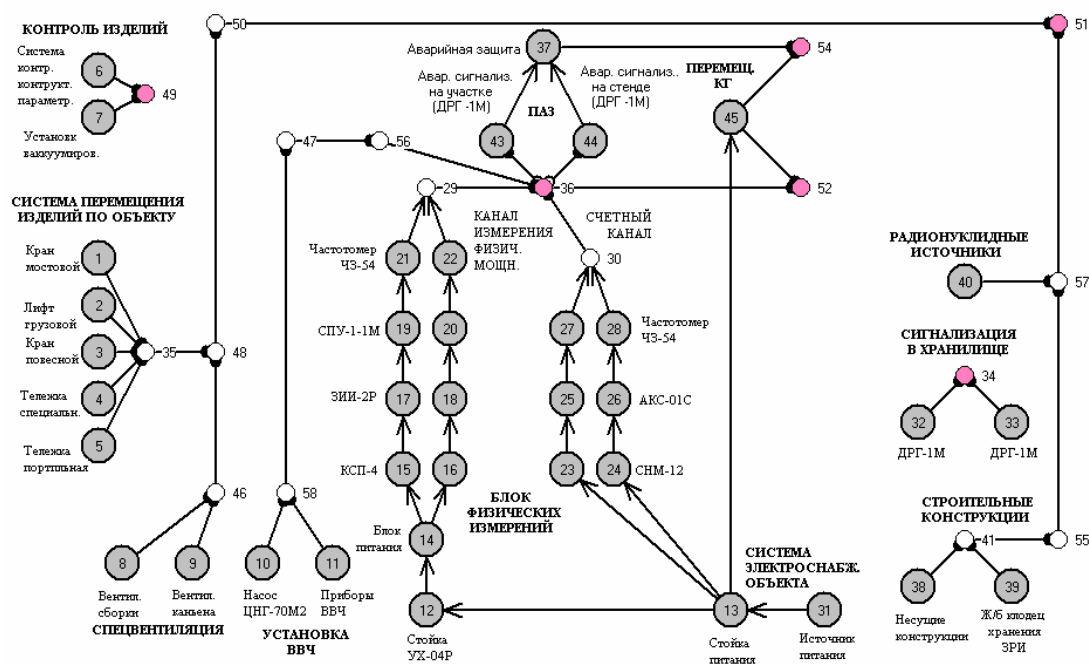


Рис. 2. СФЦ безотказности и безаварийности СФИ

При построении СФЦ применялся прямой подход (прямая логика рассуждений), согласно которому каждая из функциональных вершин 1÷28, 31÷33, 37÷39 и 40÷45 представляет исход безотказности (работоспособности) соответствующих элементов СФИ. С помощью фиктивных вершин 34, 35, 36, 41, 46, 49, 58, представлены логические условия безотказной работы и безаварийности (не возникновения аварийных ситуаций) в основных подсистемах СФИ, указанных на рис.1. Эти логические условия вытекают из приведенного выше описания технологического процесса работы различных подсистем СФИ.

В разработанной СФЦ с помощью выходных интегративных функций y_i и $\bar{y}_i = y''_i$ ряда фиктивных вершин представлены основные составляющие ЛКФ:

- Прямые выходы y_{34} и y_{49} фиктивных вершин 34 и 49 определяют условия безотказности подсистем "Сигнализаторов в хранилище" и "Контроля изделий". Согласно описанию технологического процесса (см. п. 5 и п. 6) отказы этих подсистем приводят только к функциональному отказу и не вызывают аварийных ситуаций СФИ.
- Прямой выход y_{51} фиктивной вершины 51 определяет условия не возникновения таких функциональных отказов подсистем, которые отнесены (по уровню последствий) к проектным авариям СФИ, не требующим их локализации средствами АЗ. Согласно описанию технологического процесса СФИ (см. пп. 1, 2, 3, 4) это отказы хотя бы одной из подсистем: "Перемещения по объекту", "Спецвентиляции", "Строительных конструкций" и "Радионуклидных источников".
- Прямой выход y_{36} фиктивной вершины 36 определяет условия не возникновения аварийных ситуаций, приводящих к СЦР, в ходе физических измерений. Согласно описанию технологического процесса СФИ (см. п. 8, 9) это обеспечивается безотказной работой Установки ВВЧ и обоих каналов Блока физических измерений. Инверсные выходы y''_{36} определяют условия возникновения запроектной аварийной ситуации, которая должна локализоваться посредством безотказной работы оборудования АЗ и перемещения КГ (см. описание технологического процесса п. 9 и п. 10).
- Прямой выход y_{52} фиктивной вершины 52 определяет условия безотказной работы всех подсистем, обеспечивающих непосредственные физические измерения на СФИ, т.е. условия не возникновения запроектной аварийной ситуации.
- Прямой выход y_{54} фиктивной вершины 54 определяет условия возникновения запроектной аварийной ситуации и ее локализации (гашения, прекращения) посредством безотказной работы оборудования

системы АЗ и перемещения КГ, т.е. сведения к штатному уровню последствий (проектной аварии).

Приведенные выходные интегративные функции Y_{34} , Y_{49} , Y_{51} , Y_{36} , Y''_{36} , Y_{52} , Y_{54} по содержанию представляемых ими событий являются существенными для последующего построения полных ЛКФ анализа безотказности и безаварийности СФИ.

На завершающем этапе формализованной постановки задачи задаются (определяются) параметры надежности элементов СФИ, в качестве которых используется показатели T_{0i} средней (или гамма-процентной, остаточной и т.д.) наработки до отказа элемента i , выраженные в годах [4]. Выбранные для анализа СФИ значения этого параметра приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры надежности элементов СФИ (остаточная наработка на отказ, T_{0i})

№ эл-та	T_{0i} [год]	Наименование элемента СФИ
1	4	Кран мостовой
2	5.5	Лифт грузовой
3	12	Кран подвесной электрический
4	11	Тележка специальная
5	8	Тележка порталная
6	10	Система контроля конструктивных параметров
7	6	Установка вакуумирования систем изделий
8	12	Спец. вентиляция помещения сборки
9	12	Электрическая часть спец. вентиляции каньона
10	6	Насос (ЦНГ-702М) и оборудование ВВЧ
11	6	Приборы ВВЧ
12	6	Стойка УХ-04Р
13	6	Стойка питания системы электроснабжения
14	2	Блок питания БНВЗ-05
15	2	КСП-4
16	2	КСП-4
17	5	ЗИИ-2Р
18	5	ЗИИ-2Р
19	2.2	СПУ-1-1М

20	2.2	СПУ-1-1М
21	1.5	Частотомер ЧЗ-54
22	1.5	Частотомер ЧЗ-54
23	3	СНМ-12
24	3	СНМ-12
25	7	АКС-01С
26	7	АКС-01С
27	1.5	Частотомер ЧЗ-54
28	1.5	Частотомер ЧЗ-54
31	10	Источник питания системы электроснабжения
32	2.5	Сигнализатор ДРГ-1М-03 в хранилище
33	2	Сигнализатор ДРГ-1М-03 в хранилище
37	10	Аварийная защита
38	10	Несущие конструкции: фундамент, стены, перекрытия стендового корпуса
39	12	Железобетонные колодцы для хранения ЗРИ
40	10	Радионуклидные источники нейтронов
43	5.5	Система аварийной сигнализации на участке (ДРГ-1М)
44	3	Система сигнализации стенда ХИ
45	5	Оборудование управления перемещением КГ

3. Автоматизированное моделирование и расчет безотказности и безаварийности СФИ с помощью ПК АСМ СЗМА

Для решения поставленной задачи моделирования и расчета вероятностных показателей безотказности и безаварийности СФИ разработанная СФЦ (см. рис.2) и заданные параметры элементов из таблицы 1 вводятся в ПК АСМ СЗМА, который и выполняет соответствующие расчеты.

3.1. Расчет вероятности безотказного функционирования и отказа СФИ

Вероятность $P_{сф\phi}(t)$ безотказного функционирования СФИ определяется сложным событием, включающим в себя следующие составляющие:

- Не возникновения функциональных отказов подсистем "Контроля изделий" (y_{49}) и "Сигнализации в хранилище" (y_{34}), которые не являются аварийными для СФИ;

- Не возникновение проектных аварий (y_{51});
- Не возникновение запроектной аварийной ситуаций (y_{52}).

Таким образом, полный логический критерий безотказного функционирования СФИ составляет:

$$Y_{СФИ} = y_{49} \cdot y_{34} \cdot y_{51} \cdot y_{52} = y_{49}y_{34}y_{51}y_{52} \quad (1)$$

В правой части выражения (1) приведена форма записи логического критерия, которая используется при его непосредственном вводе в окно "Ввод ЛКФ" панели управления ПК АСМ СЗМА. При анализе функциональной безотказности СФИ рассматривается как невосстанавливаемая система, общее время полного цикла работы (наработка) которого составляет $t = 1000$ час. После ввода логического критерия (1) и указанной наработки включается режим "Моделирование и расчет" ПК АСМ СЗМА. По окончании сеанса моделирования и расчетов на экран дисплея выводятся следующие результаты:

- вероятность безотказного функционирования СФИ за 1000 часов $P_{СФФ}(t) = 0.63465857517$;
- средняя наработка до отказа $T_{O_СФИ} = 0,22$ года.

В данном случае сформированные ПК АСМ СЗМА логическая функция работоспособного состояния (ФРС) и многочлен вероятностной функции (ВФ) составили 4 конъюнкции и 5 одночленов соответственно, а по структуре ФРС представляет 4 кратчайших пути успешного функционирования (КПУФ) СФИ.

Т.к. ПК АСМ СЗМА является логически полной системой моделирования, это позволяет строить как прямые (безотказность, безаварийность), так и обратные (отказ, авария) математические модели и выполнять расчет соответствующих показателей, а пользователю дает возможность ставить задачи моделирования и расчетов как в прямой, так и в обратной форме (в зависимости от того, что для него удобнее) и осуществлять контроль непротиворечивости результатов. Для построения обратной модели надежности рассматриваемого СФИ достаточно изменить логический критерий (1) на противоположный (задать логическую инверсию) и повторить решение

на ПК АСМ СЗМА. Выполняя инверсию {сравним с (1)}, получаем следующий критерий функционального отказа СФИ:

$$\bar{Y}_{СФИ} = \overline{y_{49} \cdot y_{34} \cdot y_{51} \cdot y_{52}} = \bar{y}_{49} \vee \bar{y}_{34} \vee \bar{y}_{51} \vee \bar{y}_{52} = y^{49} + y^{34} + y^{51} + y^{52}$$

Выполняя на ПК АСМ СЗМА моделирование и расчеты получаем:

- вероятность функционального отказа СФИ за 1000 часов $Q_{СФФ}(t) = \mathbf{0.36534142483}$;
- сформированные ПК АСМ СЗМА логическая функция отказа и многочлен соответствующей ВФ составили 46 конъюнкций и 190 одночленов соответственно.

В этом случае сформированная ПК АСМ СЗМА логическая ФРС по построению представляет 46 минимальных сечений отказов (МСО) исследуемого СФИ.

Полученные результаты моделирования и расчета вероятности безотказного функционирования и отказа СФИ являются согласованными, поскольку $P_{СФФ}(t) + Q_{СФФ}(t) = 1.0$. Это подтверждает непротиворечивость процедур прямого и обратного моделирования и расчетов показателей безотказности и отказа ПК АСМ СЗМА и позволяет на практике применять оба указанных подхода в зависимости от выбора пользователя. Правильность полученных результатов решения этого небольшого примера была подтверждена выполненным ручным аналитическим моделированием, результаты которого также приведены в отчете о верификации ПК АСМ СЗМА [13], представленном в Совет по аттестации программных средств при Ростехнадзоре РФ в НТЦ ядерной и радиационной безопасности.

3.2. Расчет вероятности возникновения проектной аварии СФИ

Анализ функциональной схемы (см. рис.1), описания технологического процесса (см. п. 1÷5, 8, 9) и СФЦ (см. рис.2) позволяют заключить, что к возникновению проектной аварии СФИ приводят следующие события:

- Отказы подсистем "Перемещения изделий по объекту", "Спецвентиляции", "Радионуклидных источников" и "Строительных конструкций". Условия не возникновения проектной аварии по причине отказов этих подсистем

представлены в СФЦ (см. рис.2) прямым выходом y_{51} фиктивной вершины 51.

- Возникновение запроектной аварийной ситуации (y_{36}) и ее успешная локализация, которая обеспечивается безотказной работой подсистем АЗ и КГ. Поэтому общим условием сведения ЗАС к проектной аварии является y_{54} (прямой выход фиктивной вершины 54 СФЦ).

Объединяя (суммируя) эти два логических условия, получаем общий логический критерий возникновения на СФИ проектной аварии:

$$Y_{ПА} = \bar{y}_{51} \vee y_{54} = y_{51} + y_{54} \quad (2)$$

Моделирование и расчет вероятности возникновения проектной аварии выполнены для заданной наработки $t = 100$ часов (предполагаемое среднее время выполнения одного цикла физических измерений на стенде).

После ввода логического критерия (2) и заданной наработки в ПК АСМ СЗМА и включения режима моделирования и расчетов, были получены следующие результаты:

- вероятность возникновения проектной аварии $P_{ПА}(t) = 0,022015184423$;
- сформированные ПК АСМ СЗМА логическая ФРС и многочлен вероятностной функции составили 68 конъюнкций и 356 одночленов соответственно.

3.3. Расчет вероятности возникновения и локализации запроектной аварийной ситуации СФИ

Анализ функциональной структуры (см. рис.1), описания технологического процесса (см. п.8 и п.9) и СФЦ (см. рис.2) позволяет сделать следующие заключения:

- невозникновение запроектной аварийной ситуации СФИ предполагает совместную безотказную работу в течение всего цикла физических измерений (100 часов) трех подсистем: "Установки ВВЧ", "Канала измерения физической мощности" и "Счетного канала". В СФЦ это условие представляется прямым выходом фиктивной вершины 36. Следовательно,

- инверсный выход \bar{y}_{36} этой вершины является критерием возникновения запроектной аварийной ситуации;
- для локализации ЗАС (т.е. для прекращения СЦР) должно находиться в работоспособном состоянии оборудование подсистемы аварийной защиты (элементы 37 и 43 или 44), и перемещения КГ (элементы 45, 13 и 31). Это условие в СФЦ представлено прямым выходом y_{54} фиктивной вершины 54.

Совместное выполнение этих двух условий (см. рис. 2) позволяет задать следующий логический критерий возникновения и локализации запроектной аварийной ситуации СФИ:

$$Y_{\text{Локализации ЗАС}} = \bar{y}_{36} \cdot y_{54} = y^{36}y_{54} \quad (3)$$

Для решения данной задачи в ПК АСМ СЗМА вводятся логический критерий (3) и наработка $t = 100 \text{ час}$. Расчет дал следующие результаты:

- вероятность возникновения и локализации (гашения СЦР) запроектной аварийной ситуации $P_{\text{Локализации ЗАС}}(t) = 0,008740287705$;
- сформированные ПК АСМ СЗМА логическая ФРС и многочлен вероятностной функции данного примера составили 58 конъюнкций и 346 одночленов соответственно.

3.4. Моделирование и расчет вероятности возникновения запроектной аварии СФИ

Анализ функциональной структуры (см. рис.1), описания технологического процесса, реализованного в рассматриваемой СФИ (см. п.8 и п.9) и СФЦ (см. рис.2) позволяет выделить следующие условия возникновения запроектной аварии (ЗА):

- возникновение запроектной аварийной ситуации вследствие отказов "Установки ВВЧ" или "Блока физических измерений", что на СФЦ (см. рис.2) представляется инверсным выходом \bar{y}_{36} фиктивной вершины 36.

- нелокализация ЗАС вследствие отказа оборудования АЗ или системы перемещения КГ, что представляется на СФЦ инверсным выходом \bar{y}_{54} фиктивной вершины 54.

Сказанное выше позволяет задать следующий логический критерий возникновения запроектной аварии на СФИ:

$$Y_{3A} = \bar{y}_{36} \cdot \bar{y}_{54} = y_{36} y_{54} \quad (4)$$

Для решения данной задачи в ПК АСМ СЗМА вводится логический критерий (4), наработка $t = 100$ час. и включается режим "Моделирование и расчет". Результаты решения этого примера составляют:

- вероятность возникновения запроектной аварии:

$$P_{3A}(t) = \mathbf{0.003069564202} \quad (5)$$

- сформированные ПК АСМ СЗМА логическая ФРС и многочлен вероятностной функции данного примера составили 89 конъюнкций и 521 одночлен соответственно.

Наряду с оценкой вероятностей событий, определяющих надежность и безаварийность исследуемой системы, ПК АСМ СЗМА вычисляет ряд важных дополнительных характеристик, дающих количественную оценку роли каждого элемента в обеспечении надежности и безаварийности системы в целом.

$$1. \text{ Значимость элемента: } \xi_i = \frac{P_{3A}(t)}{p_i(t)=1} - \frac{P_{3A}(t)}{p_i(t)=0} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, H .$$

Здесь $\frac{P_{3A}(t)}{p_i(t)=1}$ - значение вероятностной характеристики системы при абсолютной надежности элемента i , а $\frac{P_{3A}(t)}{p_i(t)=0}$ - при достоверном отказе элемента i на рассматриваемом интервале t времени функционирования.

$$2. \text{ Положительный вклад элемента: } \beta_i^+ = \frac{P_{3A}(t)}{p_i(t)=1} - P_{3A}(t) .$$

$$3. \text{ Отрицательный вклад элемента: } \beta_i^- = -(P_{3A}(t) - \frac{P_{3A}(t)}{p_i(t)=0}) .$$

В качестве иллюстрации на рис.3 изображена диаграмма положительных вкладов элементов СФИ, увеличение безотказности которых в наибольшей степени уменьшает вероятность возникновения запроектной аварии.

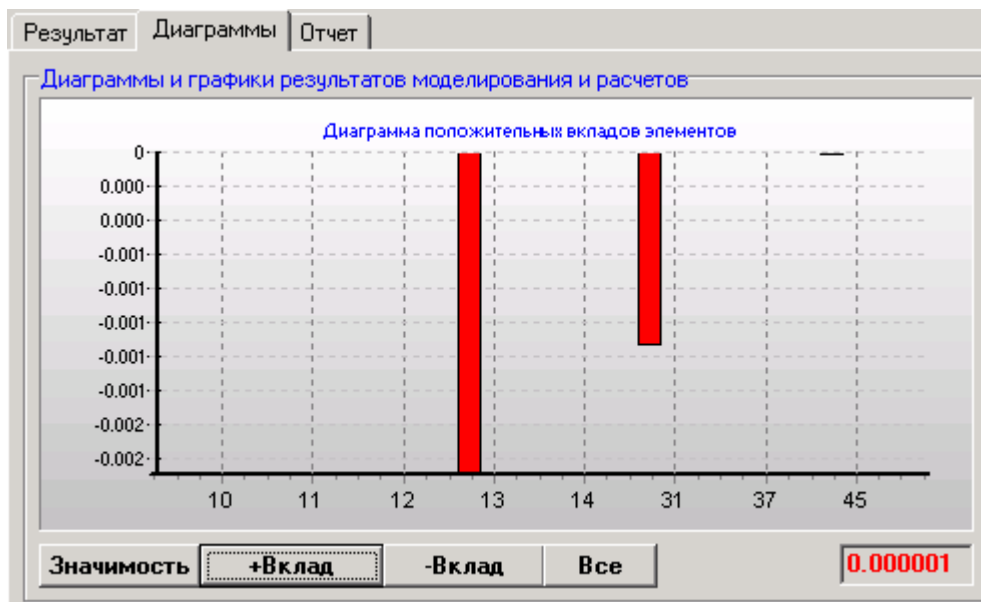


Рис.3. Диаграмма положительных вкладов элементов

Из диаграммы следует, что наибольшее снижение вероятности запроектной аварии могут дать мероприятия, направленные на увеличение надежности двух элементов: 13 (стойка питания) и 31 (источник питания) системы электроснабжения объекта. Из той же диаграммы видно, что увеличение надежности ни одного другого элемента СФИ (включая КГ – 45) в данной ситуации не приведет к заметному снижению вероятности возникновения запроектной аварии.

4. Оценка эффективности мероприятий по снижению вероятности запроектной аварии СФИ

Полученные в предыдущем разделе результаты позволяют заключить, что наибольшего снижения вероятности запроектной аварии следует ожидать при увеличении безотказности системы электроснабжения объекта. Допустим, что принято решение увеличить надежность этой подсистемы путем

поэлементного резервирования. В этом случае СФЦ безотказности Системы электроснабжения приобретает следующий вид.

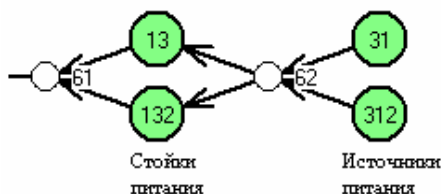


Рис.4. СФЦ резервированной системы электроснабжения СФИ

Для оценки эффективности поэлементного резервирования фрагмент, изображенный на рис.4, вводится в СФЦ исследуемой системы. Элементы 13 и 31 сохраняют свои старые значения своих параметров, а для дополнительных вершин 132 и 312 в таблицу исходных данных записываются значения их средних наработок до отказа, равные соответственно $T_{O_{132}} = 6$ годам, а $T_{O_{312}} = 10$ годам. Расчеты показали, что в результате дублирования элементов 13 и 31 вероятность возникновения запроектной аварии снизится до величины $P_{3A}(100) = 0.000035058955$, т.е. в сравнении с предыдущим результатом $P_{3A}(100) = 0.003069564202$ (см. (5)) уменьшится почти на два порядка. При этом существенно изменятся значимости и вклады элементов, что видно из диаграммы на рис.5.

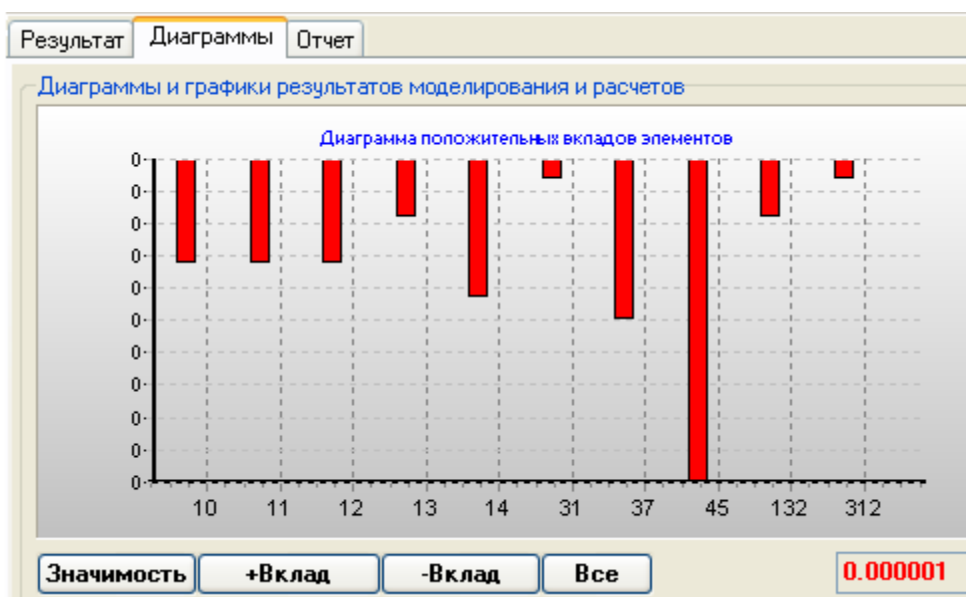


Рис.5. Диаграмма положительных вкладов элементов

Как видно из рис. 5, после резервирования элементов 13 и 31 наибольший вклад в дальнейшее снижение вероятности запроектной аварии СФИ могут внести мероприятия, направленные на повышение безотказности оборудования КГ 45.

Заключение.

1. Применение ПК АСМ СЗМА [1], основанного на общем логико-вероятностном методе [6], позволило рассчитать показатели безотказности и безаварийности СФИ (критического стенда), являющегося одним из наиболее опасных объектов использования атомной энергии.
2. Методика применения ПК АСМ СЗМА для анализа надежности и безопасности (технического риска) ОИАЭ предусматривает разработку на первом этапе СФЦ исследуемого объекта. Для этого может использоваться как прямой (модель безотказности, безаварийности) так и обратный (модель отказа, аварии) подходы к постановке задачи. В рассмотренном примере был использован прямой подход и построена СФЦ работоспособности и безаварийности СФИ на основе анализа технологических операций, предусмотренных нормативной документацией на данный объект [3,4]. Это существенно облегчило постановку задачи по сравнению с обратным подходом, который основывается на переборе и графическом представлении всех возможных сечений отказов исследуемого объекта, что в данном примере было сделать затруднительно. Это, однако, не ограничивает рамки анализа системы, поскольку ПК АСМ СЗМА позволяет и на основе прямой структурной модели автоматически получать все сечения отказов и аварий исследуемого объекта в целом и его подсистем.
3. Методика предусматривает практическое использование возможности ПК АСМ СЗМА не только для расчета текущих показателей безотказности и безаварийности ОИАЭ, но и для определения значимостей и вкладов элементов. В случае СФИ эти возможности использованы для выработки, обоснования и оценки эффективности предложений по снижению вероятности запроектной аварии.
4. Дифференциация показателей безотказности и безаварийности СФИ в зависимости от масштаба последствий (функциональный отказ, проектная

авария, запроектная аварийная ситуация и запроектная авария), предложенная в настоящей работе, имеет особое значение и для других опасных объектов и производств, помогая сосредоточиться на снижении вероятности наиболее опасных аварийных ситуаций и аварий ОИАЭ.

5. Использование в ПК АСМ СЗМА инверсных выходов из соответствующих фиктивных вершин для моделирования систем аварийной защиты позволяет указать пути значительного (на порядки!) снижения вероятности возникновения неуправляемой СЦР (запроектной аварии) за счет обоснованного и целенаправленного повышения надежности наиболее важных элементов аварийной защиты.

По-видимому, предложенная методика использования новой отечественной информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования и ПК АСМ СЗМА может найти применение в системах аварийной защиты различных опасных производственных объектов, например, химической, нефтегазодобывающей, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности.

Литература

1. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА). Свидетельство № 2003611101 об официальной регистрации программ. Автор: Можаяев А.С. Правообладатель: ОАО "СПИК СЗМА". М.: Роспатент РФ, 2003. Internet сайт: <http://www.szma.com>.
2. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Выпуск 10. М.: ГУП "НТЦ ПБ" Госгортехнадзора России, 2001. - 60с.
3. Правила ядерной безопасности критических стенов (НП-008-04). Ядерная и радиационная безопасность, № 4 (36), 2005, с. 29-45. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.
4. Программа управления надежностью (ресурсом) объекта использования атомной энергии. Отчет рег. № Р-30/05 от 25.07.05, РЭСцентр, С.-Петербург, 2005, 65 с.
5. Методика определения остаточного ресурса объектов использования атомной энергии. Инв. № 25.11-1.03.137-2004 ФГУП "ПО "Северное машиностроительное предприятие", г. Северодвинск, 2004.
6. Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988. –68 с.
7. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА). СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611101 об официальной регистрации программ. Автор: Автор: Можаяев А.С. Правообладатель: ОАО "СПИК СЗМА". М.: Роспатент РФ, 2003. Internet сайт: <http://www.szma.com>.
8. Нозик А.А., Можаяев А.С., Потапычев С.Н., Скворцов М.С. Программный комплекс автоматизированного моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования. // Материалы III

- Международной научно-практической конференции: "Моделирование. Теория, методы и средства". Часть 1. Новочеркасск: НПИ, 2003, С.28-35.
9. Можаяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной Научной Школы 'Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах' (МА БРК – 2001). СПб.: Издательство ООО 'НПО 'Омега', 2001, с.56-6. свидетельство об официальной регистрации № 2003611099. М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003.
 10. Можаяев А.С. Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем. // Труды Международной научной школы: "Моделирование и анализ безопасности, риска в сложных системах" (МА БР – 2003). СПб.: СПбГУАП, 2003, С.101-110.
 11. Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ & ВФ). СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611100 об официальной регистрации программ. Авторы: Можаяев А.С., Гладкова И.А. Правообладатель: Можаяев А.С.. М.: Роспатент РФ, 2003.
 12. Можаяев А.С. Теория и практика автоматизированного структурно-логического моделирования систем. // Доклады международной конференции по информатике и управлению. (ICI & C') Том 3. СПб.: СПИИРАН, 1997, с.1109-1118. Mozhaev A.S. Theory and practice of automated structural-logical simulation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). Tom 3. St.Petersburg: SPIIRAS, 1997, p.1109-1118.
 13. Можаяев А.С., Киселев А.В., Струков А.И. Скворцов М.С. Отчет о верификации программного средства: "Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем" (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0) СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2005, -214 с.
 14. Можаяев А.С. Теоретические основы и опыт структурно - логического автоматизированного моделирования и анализа систем. // В кн. "Методические вопросы исследования надежности больших систем

энергетики", Вып.41. Вычислительные модели исследования надежности электроэнергетических систем. Сопоставительный анализ. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1991, с.91-105.

15. Можаяев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. СПб. ВИТУ, 2000. –145 с.
16. Ершов Г.А., Козлов Ю.И., Солодовников А.С., Можаяев А.С. Оценка безопасности атомных энергетических объектов на стадии проектирования. // Журнал "Тяжелое машиностроение" № 8/2004, М.: ООО "Дом печати "Столичный бизнес", 2004. с. 33-39.