

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CONTINUOUS RISK ASSESSMENT

Д. В. Евланов, О. В. Коваленко, А. В. Огородников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

21 июля 1997 года вступил в силу Федеральный закон "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" [1]. Принятие этого закона привело к необходимости проводить анализ безопасности потенциально опасных объектов на всех стадиях их жизненного цикла. В анализе безопасности структурно-сложных технических систем (ССТС) центральное место принадлежит вероятностному анализу безопасности (ВАБ). ВАБ с должным качеством может проводиться только при использовании программных комплексов, автоматизирующих процедуру расчетов.

На сегодняшний день известно множество программных комплексов автоматизирующих ВАБ как иностранных, так и отечественных. Среди иностранных программных продуктов широкое распространение в России получили «Risk Spectrum» и «PTC WindChill Quality Solutions» (ранее известный как «Relex», а затем как «Relex Reliability Studio»), «SAPHIRE». Среди отечественных продуктов богатством функционалом обладают программные комплексы «БАРС», «CRISS» и «АСМ СЗМА». Подробный сравнительный анализ большинства этих программных продуктов был сделан в [2] и [3]. Все вышеперечисленные программные средства имеют свои достоинства и недостатки, они хорошо известны на рынке, и имеют своих приверженцев. Большое разнообразие программ для автоматизации ВАБ вызвано, прежде всего, тем, что данное направление продолжает бурно развиваться, появляются новые особенности, которые улучшают процедуру ВАБ, и которые реализуются в том или ином программном продукте. Разработка собственного программного комплекса «CONTINUOUS RISK ASSESSMENT 2.0» (ПК CRA) [4] была вызвана таким же обстоятельством.

ПК CRA выделяется тем, что отличительной особенностью этой программы с первой ее версии было объединение различных графо-вероятностных подмоделей, построенных с помощью различных методов моделирования ВАБ, для расчета показателей надежности, живучести и безопасности (НЖБ) в одной модели, представляющей иерархический гиперграф. Следующие виды подсистем одной ССТС могут быть смоделированы с использованием ПК CRA:

- деревья отказов (ДО) [3];
- схемы функциональной целостности (СФЦ) [3];
- марковские процессы [5].

В данной работе приводится описание общего алгоритма функционирования ПК CRA. Кроме этого, особое внимание уделено реализации новой функциональности, расширяющей возможности расчета показателей НЖБ, включая следующие:

- 1) расчет марковских процессов, в которых присутствуют дискретные переходы;
- 2) расчет параметров живучести;
- 3) расчет среднего значения коэффициента готовности;
- 4) декомпозиция графов СФЦ.

Описание функциональности ПК CRA

ПК CRA разработан на языках программирования C#, Java и C++ и предназначен для работы под операционными системами семейства Microsoft Windows. В состав ПК CRA входит программа CRA_GUI с графическим пользовательским интерфейсом (ГПИ) для подготовки графов и управления расчетом (язык C#) и программный модуль расчета CRA_Solver со встроенным ГПИ представления результатов (язык Java/C++).

Общая схема работы ПК CRA приведена на рис. 1.

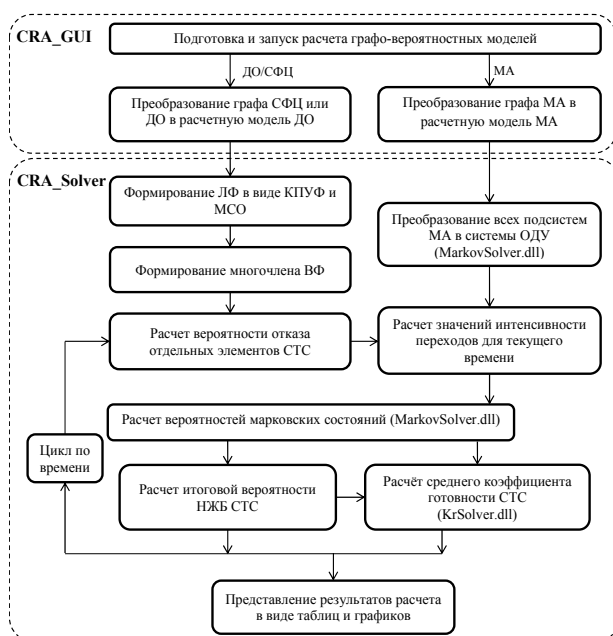


Рис. 1. Общая схема работы ПК CRA

Синтез моделей и расчет требуемых показателей НЖБ ССТС производится в соответствии с заданным логическим критерием функционирования на основе исходной информации, подготовленной в ГПИ CRA_GUI и хранящейся в файлах с расширением *.xcrs, состоящей из следующих элементов:

- логических связей между подсистемами и элементами ССТС;
- вероятностных характеристик их надежности.

Пример графа СФЦ, подготовленного средствами ГПИ ПК CRA, представлен на рис. 2.

В соответствии с общей схемой работы после ввода (редактирования) исходных данных с помощью ГПИ производится построение дерева отказа модели НЖБ ССТС и запись его в промежуточный файловый контейнер с расширением *.xml.

С помощью расчетного модуля CRA_Solver происходит считывание файла .xml, формирование логической конъюнктивной формы (ЛКФ) и логической дизъюнктивной формы (ЛДФ), а также на их основе вероятностной функции (ВФ), расчет итоговой вероятности, построение графика зависимости итоговой вероятности, а также узлов модели НЖБ объектов использования атомной энергетики (ОИАЭ) от времени.

Помимо вышперечисленных модулей в ПК CRA присутствует модуль марковского анализа (МА) MarkovSolver.dll, отвечающий за расчет подсистем марковских процессов в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), а также модуль KrSolver.dll, отвечающий за поиск среднего значения коэффициента готовности.

Пример представления результатов расчета приведен на рис. 3.

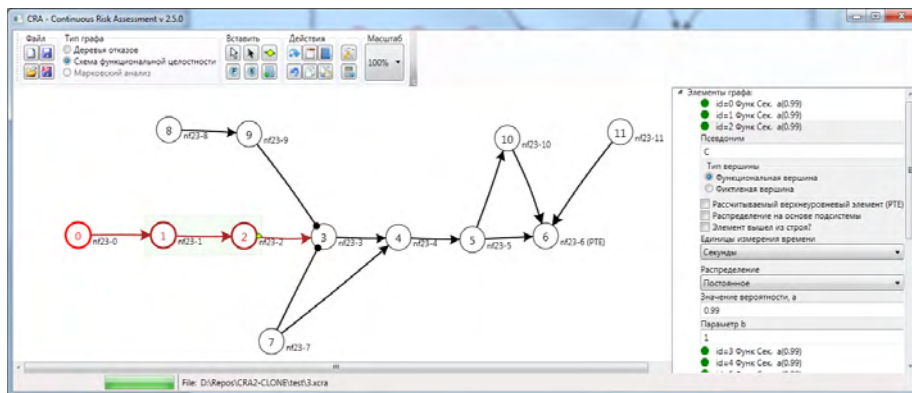
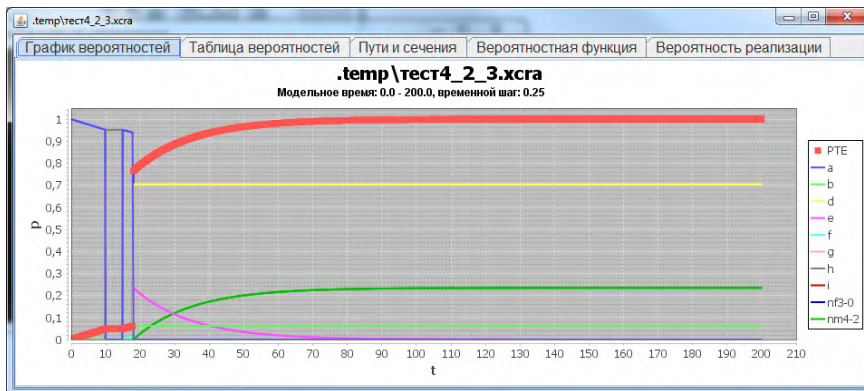


Рис. 2. Пример графа СФЦ в ГПИ ПК CRA



Time	PTE	a	b	d	e	f
0	0,00000000e+00	1,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00
0.25	1,24921908e-03	9,98750781e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,24921908e-03
0.5	2,49687760e-03	9,97503122e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	2,49687760e-03
0.75	3,74297753e-03	9,96257022e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	3,74297753e-03
1	4,98752081e-03	9,95012479e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	4,98752081e-03
1.25	6,23050938e-03	9,93769491e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	6,23050938e-03
1.5	7,47194518e-03	9,92528055e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	7,47194518e-03
1.75	8,71183016e-03	9,91288170e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	8,71183016e-03
2	9,95016625e-03	9,90049834e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	9,95016625e-03
2.25	1,11869554e-02	9,88813045e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,11869554e-02
2.5	1,24221995e-02	9,87577800e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,24221995e-02
2.75	1,36559005e-02	9,86344099e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,36559005e-02
3	1,48880604e-02	9,85111940e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,48880604e-02

Рис. 3. Пример представления результатов расчета

Описание марковских переходов

Переход	Тип перехода	Параметры перехода
0 → 1	экспоненциальный	Интенсивность отказа = λ ожидания = 0,005
1 → 0	экспоненциальный	Интенсивность отказа = μ исходящая = 0,006
1 → 2	дискретный	Сдвиг по времени = 4, коэффициент амплитуды передачи = 1, период повторения = 1, период длительности проверки = 0
0 → 3	дискретный	Сдвиг по времени = 4, коэффициент амплитуды передачи = $q = 0,75$, период повторения = 1, период длительности проверки = 0
0 → 4	дискретный	Сдвиг по времени = 4, коэффициент амплитуды передачи = $1 - q = 0,25$, период повторения = 1, период длительности проверки = 0
4 → 7	экспоненциальный	Интенсивность отказа = λ отказа = 0,06

Как уже было сказано, в ПК CRA имеется возможность работы с подграфами марковских процессов. Марковский процесс [4] – это случайный процесс, эволюция которого после любого заданного значения временного параметра t не зависит от эволюции, предшествовавшей t , при условии, что значение процесса в этот момент фиксировано. Т.е. марковский процесс позволяет вероятностно связать переходы между независимыми состояниями.

В дополнение к ранее реализованным непрерывным вероятностным распределениям для интенсивностей переходов в МА (таким как экспоненциальное, Вейбулла–Гнеденко, логнормальное, гамма-распределение, релеевское, хи-квадрат) было реализовано распределение мгновенного перехода с использованием дельта-функции Дирака. Плотность распределения в этом случае записывается в виде:

$$\begin{cases} \delta[t - a], t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}$$

Для учета дискретных переходов в модуле MarkovSolver.dll перед расчетом систем ОДУ со сформированными правыми частями и матрицей Якоби выделяются все временные точки, в которых пользователь задал интенсивности с гарантированным переходом между соответствующими парами состояний. Такие временные точки порождаются всеми интенсивностями, которые соответствуют распределениям, заданными на конечных отрезках, и мгновенными переходами в определенные моменты времени, задаваемые функциями Дирака. Расчет ОДУ выполняется только между этими временными точками, при этом сами дискретные переходы осуществляются между входами в решатель ОДУ с помощью алгебраических соотношений, сохраняющих общую нормировку вероятностей марковского процесса.

На рис. 4. представлен пример марковского процесса с дискретными переходами, а в табл. 1 описание соответствующих марковских переходов.

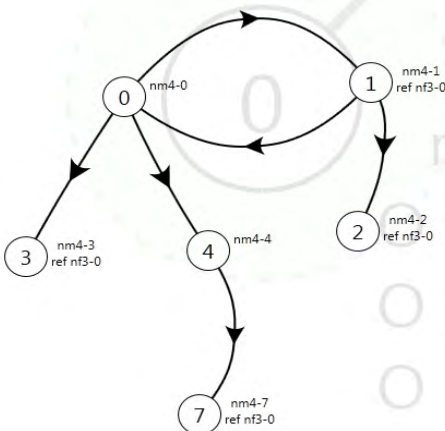


Рис. 4. Пример марковского процесса

Для примера рассмотрим расчет представленного марковского процесса на отрезке времени $[0,10]$. В процессе расчета такой задачи программный модуль МА выполняет следующие шаги:

- 1) находятся все дискретные (мгновенные) переходы $1 \rightarrow 2, 0 \rightarrow 3, 0 \rightarrow 4$;
- 2) находятся все критические времена. В нашем случае 4, 5, 6, 7, 8, 9;
- 3) критические времена упорядочиваются в порядке возрастания 4, 5, 6, 7, 8, 9;
- 4) расчет разбивается на отрезки от $[0;4], [4;5], [5;6], [6;7], [7;8], [8;9], [9;10]$;

5) в момент времени $T = 4$ значение вероятности события 1 добавляется к значению вероятности события 2. Затем значение события узла 1 обнуляется. В момент времени $T = 4$ значение вероятности, умноженное на 0,75, события 0 добавляется к значению вероятности события 3. В момент времени $T = 4$ значение вероятности, умноженное на 0,25, события 0 добавляется к значению вероятности события 4. Затем значение вероятности события 0 обнуляется.

На рис. 5. представлены результаты расчета данного марковского процесса в ПК CRA.

Итоговая вероятность probability of top event (PTE) элемента nf3-0, описанного марковским процессом на рис. 4., равна сумме вероятностей состояний марковского процесса: 1(b), 2(c), 3(d), и 7(f).

Time	PTE	a	b	c	d	e	f	n3-0
0	0,00000000e+00	1,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00
3.99...	1,95663351e-02	9,80433665e-01	1,95663351e-02	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663351e-02
4	7,54891596e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	2,45108404e-01	0,00000000e+00	7,54891596e-01
4.99...	7,69165459e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	2,30834541e-01	1,42738637e-02	7,69165459e-01
5.99...	7,82608217e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	2,17391783e-01	2,77166209e-02	7,82608217e-01
6.99...	7,95268129e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	2,04731871e-01	4,03765328e-02	7,95268129e-01
7.99...	8,07190785e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	1,92809215e-01	5,22991888e-02	8,07190785e-01
8.99...	8,18419119e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	1,81580881e-01	6,35275234e-02	8,18419119e-01
9.99...	8,28993566e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	1,71006434e-01	7,41019707e-02	8,28993566e-01
10	8,28993669e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	1,71006331e-01	7,41020733e-02	8,28993669e-01

Рис. 5. Таблица вероятностей, рассчитанная в ПК CRA, для каждого события марковского процесса, изображенного на рис. 4

Расчет показателей живучести

Для расширения возможностей анализа НЖБ ССТ в ПК CRA реализован расчет показателей живучести. Под живучестью [6] понимается способность систем к сохранению своих основных функций (хотя бы с допустимой потерей качества их выполнения) при воздействии факторов внешней среды катастрофического характера – неблагоприятных условий эксплуатации.

[2] В качестве показателей живучести используются условный закон живучести (УЗЖ) $P_m\{P_i(j)\}$ (1) и условный закон поражения (УЗП) $Q_m = 1 - P_m\{P_i(j)\}$.

УЗЖ выражает вероятность не поражения ОИАЭ в зависимости от количества поражающих воздействий (ПВ) на нее и вероятности поражения ОИАЭ каждого отдельного ПВ:

$$P_m = f(\{P_i(j)\}), \quad i = \overline{1, K}, \quad j = \overline{1, n}, \quad m = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где i – номер элемента ОИАЭ, подвергающегося неблагоприятному воздействию (НВ); j – номер НВ; K – число элементов ОИАЭ; $P_{i(j)}$ – вероятность поражения i -го элемента при j -том НВ.

Для определения УЗЖ в ПК CRA выделяются 2 типа элементов:

- 1) элементы, вышедшие из строя после НВ;
- 2) элементы, вышедшие из строя вследствие потери обеспечивающих элементов.

Элементы первого типа задает пользователь вручную в окне настроек СФЦ вершины с помощью поля CheckBox «Элемент вышел из строя» как на рис. 6. Элементы второго типа определяются ПК CRA согласно следующему алгоритму, приведенному ниже.

Пусть $A[N]$ – массив всех элементов типа Node, вышедших из строя после НВ. N – количество элементов, вышедших из строя. Пусть функция $F(a)$ рекурсивным обходом элемента a из $A[N]$ ищет элементы второго типа. Тогда для нахождения всех элементов второго типа необходимо в цикле для каждого элемента массива $A[N]$ запустить функцию $F(a)$. Для нахождения всех элементов второго типа внутри

функции $F(a)$ необходимо проверить связи между всеми потомками вершины a и вершиной a . Если тип связи между ними имеет тип «И» или тип связи между ними имеет тип «ИЛИ» и число вершин родителей для потомка узла a равно 1, то рассматриваемый потомок узла a является элементом, вышедшим из строя вследствие потери обеспечивающего элемента a .

На рис. 7. представлен результат поиска элементов, вышедших из строя вследствие потери обеспечивающих элементов, в ГПИ CRA_GUI.

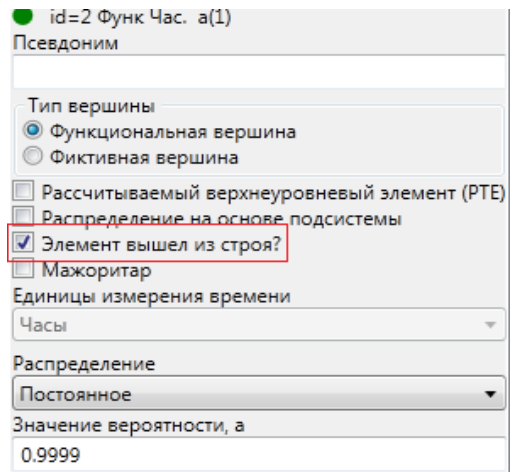


Рис. 6. Окно настроек СФЦ вершины

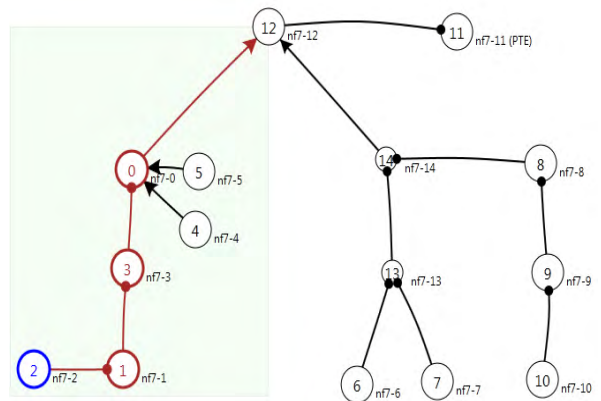


Рис. 7. Результат работы псевдокода по поиску элементов, вышедших из строя вследствие потери обеспечивающих элементов, в ПК CRA

На рис. 7. узел 2 является элементом, вышедшим из строя после НВ. Узлы 1,3,0 являются элементами, вышедшими из строя вследствие потери обеспечивающих элементов. Соответственно, в результате проведенного анализа в CRA_GUI узлы 0,1,2,3 не вовлекаются в расчет итоговой вероятности.

Расчет среднего значения коэффициента готовности

Для более полного анализа надежности в ПК CRA производится расчет среднего значения коэффициента готовности. Согласно [7] средний коэффициент готовности $A(t1;t2)$ – среднее значение мгновенного коэффициента готовности на интервале времени $(t1;t2)$ (2), а мгновенный коэффициент готовности $A(t)$ – вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии.

$$\bar{A}(t1;t2) = \frac{\int_{t1}^{t2} p(t)dt}{t2-t1}, \quad (2)$$

где $p(t)$ – функция вероятности безотказной работы

Расчет среднего значения коэффициента готовности в ПК CRA производится внутри модуля CRA_Solver с использованием библиотеки

KrSolver.dll. Ниже приведен алгоритм расчет среднего коэффициента готовности в ПК CRA:

- 1) интегрируется функция вероятности безотказной работы на интервале времени (a;b);
- 2) полученное значение интеграла на шаге № 1 делится на b-a.

В результате выполнения шага №2 получается значение среднего коэффициента готовности на интервале (a;b).

На рис. 8. изображен граф СФЦ, для которого требуется рассчитать коэффициент готовности:

- вершине 0 соответствует экспоненциальное распределение с параметром $\lambda = 1E-5$;
- вершине 1 – нормальное распределение с параметрами $a = 10000$ ч., $\sigma = 1000$ ч.;
- вершине 2 – распределение Вейбулла–Гнеденко с параметрами $\alpha = 42000$, $\beta = 2$;
- вершине 3 – распределение Рэлея с параметром $a = 28000$;
- вершине 4 – бета-распределение с параметрами $X = 0,7$, $\alpha = 8000$, $\beta = 3300$;
- вершине 5 – гамма-распределение с параметрами $\lambda = 1E-5$, $\alpha = 2,63$;
- вершине 6 – логарифмически-нормальное распределение с параметрами $a = 1$, $\sigma = 2$.

На рис. 8. в результирующей таблице в столбце «коэффициент готовности» в момент времени T представлено среднее значение коэффициента готовности на интервале от (0;T), рассчитанное в ПК CRA.

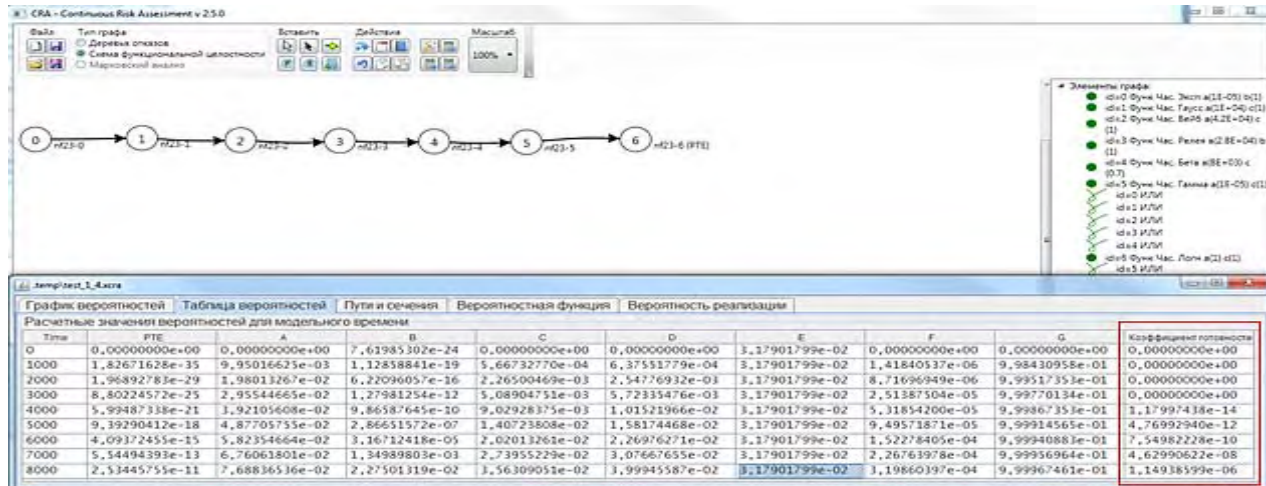


Рис. 8. Пример расчета коэффициента готовности в ПК CRA

Декомпозиция графа СФЦ

Расчет показателей НЖБ ССТС с помощью графов СФЦ и ДО по мере роста количества рассматриваемых вершин упирается в NP-сложность расчета вероятностной функции. Для решения данной проблемы в ПК CRA был реализован механизм декомпозиции графа СФЦ на совокупность самостоятельных подграфов.

Ниже приведен алгоритм декомпозиции СФЦ. Для удобства восприятия этого алгоритма вводятся следующие понятия:

– точка сочленения (articulation point, vertex cut) – точка, связывающая между собой два графа. Так для каждого подграфа должна быть одна головная точка сочленения и как минимум одна выходная. Число выходных точек сочленения может быть и неограниченным, но все они должны являться головными вершинами;

– квазифункциональная точка – точка, заменяющая собой подграф.

Точки сочленения в ПК CRA бывают двух типов:

а) точки сочленения, соединяющие между собой любые два графа, каждый из которых не является линейным;

б) точки сочленения, являющиеся началом и концом линейных участков графа. Этот тип точек сочленения ищется в графах, в качестве узлов которого выступают только событийные вершины.

Стоит отметить, что точки сочленения первого типа обладают следующими свойствами:

- могут иметь одну входную связь и выходные связи (> 1);
- могут иметь одну входную связь и выходные связи (> 1);
- могут иметь входные (> 1) и выходные связи (> 1).

В программном комплексе (ПК) Continuous Risk Assessment (CRA) построение гиперграфа производится автоматически в шесть этапов:

- 1) в схеме функциональной целостности (СФЦ) выделяются точки сочленения первого типа;
- 2) выделяются подмножества вершин, образованные первым типом точек сочленения;
- 3) ищутся точки сочленения второго типа (являющиеся началом и концом линейных участков графа);
- 4) выделяются подмножества вершин, образованные вторым типом точек сочленения;
- 5) подмножество вершин, полученное на четвертом этапе, отождествляется с эквивалентной квазифункциональной точкой;
- 6) подмножество вершин, полученное на втором этапе, отождествляется с эквивалентной квазифункциональной точкой.

В результате проведенной декомпозиции первоначального графа СФЦ получается гиперграф, который через обменный файл формата *.xml передается на расчет в решатель CRA_Solver.

Пример преобразования графа СФЦ в гиперграф проиллюстрирован на рис. 9.

На рис. 9а. точками сочленения являются вершины с номерами: 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16.

На рис. 9б. квазифункциональными точками являются вершины с номерами 8, 9, 11, 12, 20.

На рис. 9в. квазифункциональными точками являются вершины с номерами 21, 22, 23.

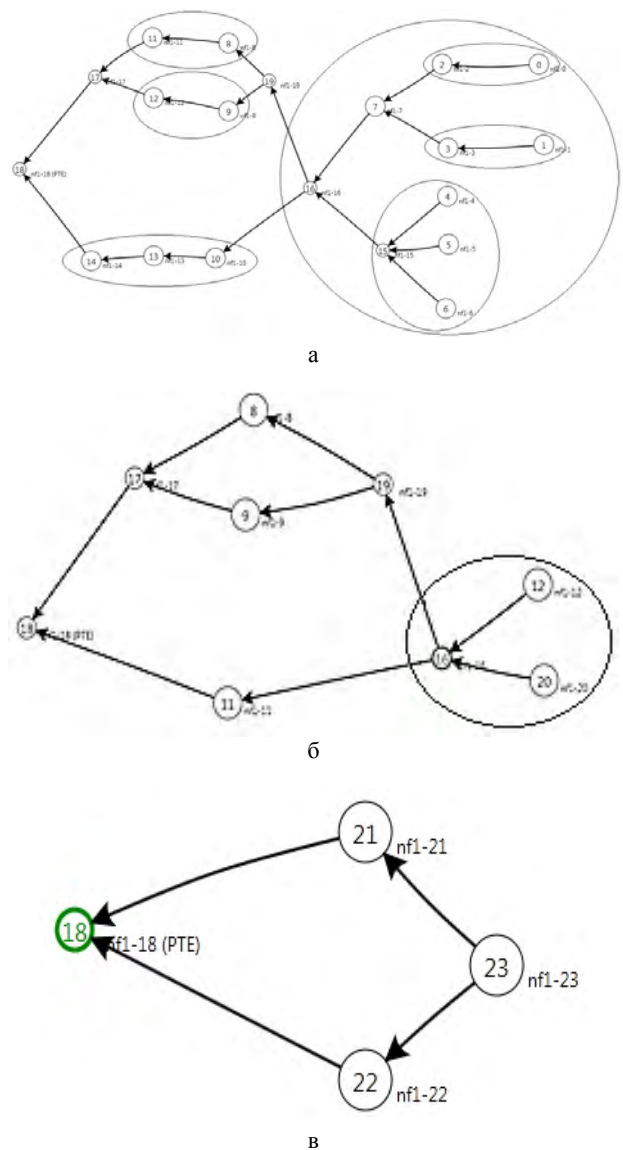


Рис. 9. Преобразование СФЦ в гиперграф: а – исходная СФЦ ССТС; б – промежуточный гиперграф; в – конечный гиперграф

Для каждой квазифункциональной вершины, начиная с самого нижнего уровня, производится полный комплекс моделирования и вычислений, включая построение булевой функции, ее преобразование в расчетный вероятностный многочлен, вычисление системной характеристики. Результаты вычислений сохраняются и используются в дальнейшем при расчете системной характеристики всего ОИАЭ. Для верификации реализованного механизма

декомпозиции графов СФЦ использовалось сравнение пары результатов расчета: без учета декомпозиции и с применением методики декомпозиции. Такое сравнение применимо лишь в случае, когда количество вершин в графе относительно мало и не приводит к экспоненциальному росту времени расчета в силу NP-сложности формирования вероятностной функции при большом количестве вершин. Для вер-

рификации корректности работы механизма декомпозиции использовалось более 10 сложных графов. Примеры некоторых из них представлены на рис. 10., при этом на рис. 11. и рис. 12. изображены СФЦ анализа надежности системы планового и аварийного расхолаживания Южноукраинской АЭС [2].

Результаты расчета верификационных тестов представлены в табл. 2.

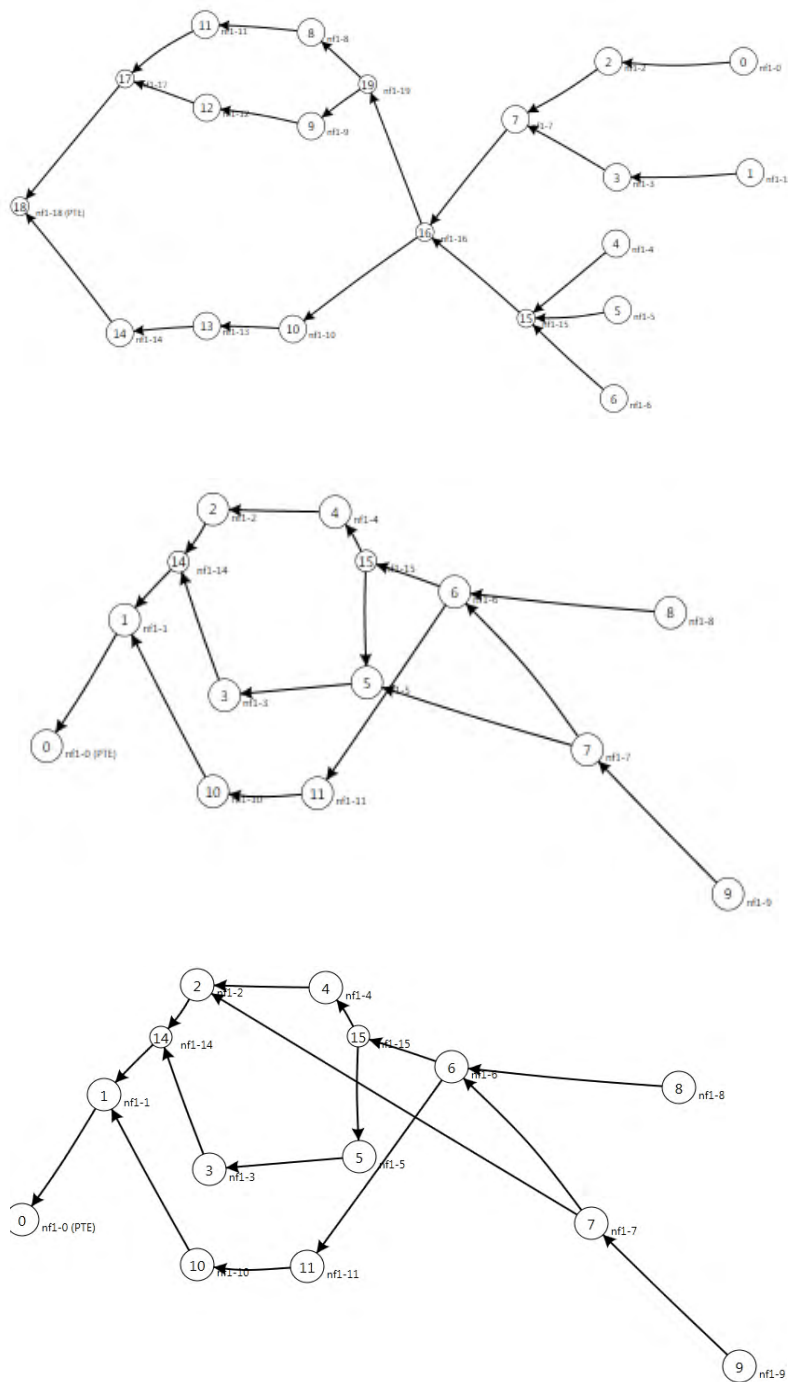


Рис. 10. Примеры графов СФЦ для верификации декомпозиции

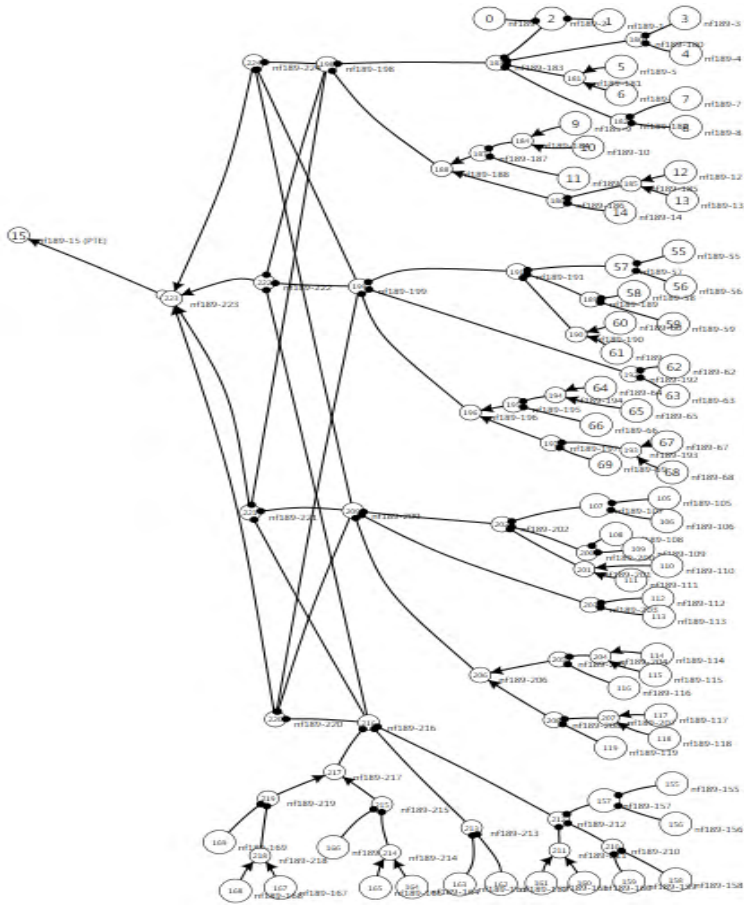


Рис. 11. СФЦ системы планового и аварийного расхолаживания ЮУ АЭС (пассивная часть)

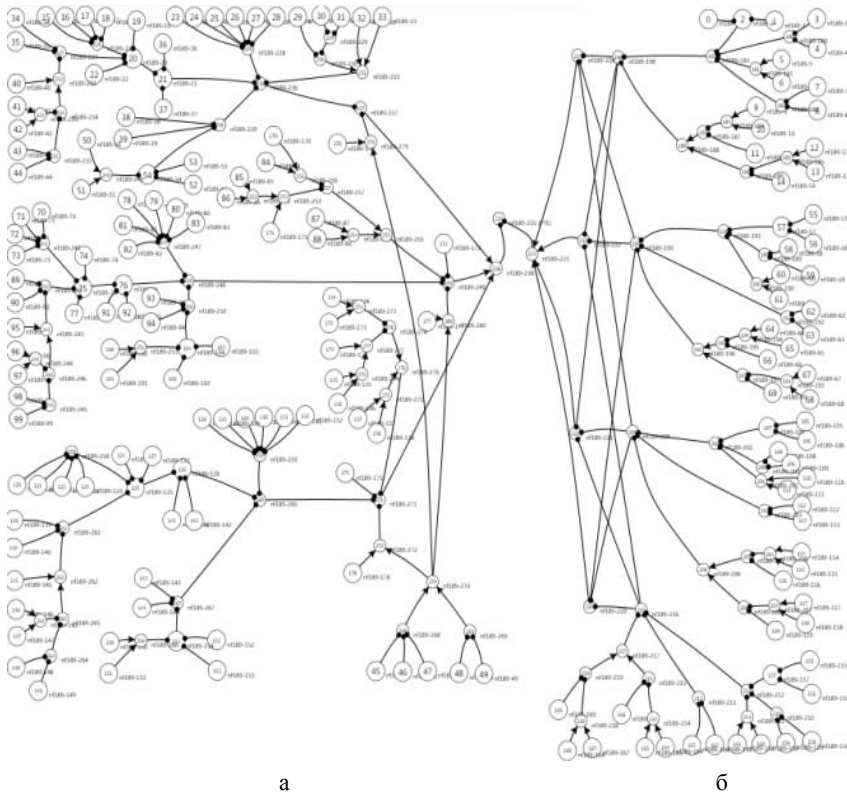


Рис. 12. СФЦ системы планового и аварийного расхолаживания ЮУ АЭС: а – активная часть, б – пассивная часть

Результаты тестов верификации декомпозиции

№ теста	Итоговая вероятность		Время расчета, с	
	с декомпозицией	без декомпозиции	с декомпозицией	без декомпозиции
1 (рис. 10а)	0,45822143554	0,45822143554	~1	~1
2 (рис. 10б.)	0,05297851562	0,05297851562	~1	~1
3 (рис. 11.)	0,00225834462	0,00225834462	~1	~600
4 (рис. 10с.)	0,06518554687	0,06518554687	~1	~1
5 (рис. 12.)	0,96250184622	не определено	~1	не определено

Как видно из полученных результатов, итоговая вероятность в данных тестах при использовании и без использования декомпозиции совпадает с точностью до $E-11$. Исключением является тест №5, так как его расчет без декомпозиции нет возможности провести до конца из-за экспоненциального роста времени формирования вероятностного многочлена по причине наличия большого количества базовых вершин (~200).

Также стоит отметить, что время расчета всех тестов с применением механизма декомпозиции не превышает ~1 секунды в отличие от расчета без декомпозиции (~600с для теста №4). Таким образом, это позволяет получить новый уровень производительности ПК CRA и обеспечить возможность расчета еще более сложных графов для анализа крупномасштабных ССТС.

Заключение

В данном докладе приведено описание следующих добавленных возможностей, расширяющих функциональность ПК CRA: расчет марковских процессов с дискретными переходами, расчет показателей живучести, расчет среднего значения коэффициента готовности, механизм декомпозиции графов СФЦ.

Добавление в марковский анализ расчета дискретных переходов обеспечило возможность моделирования в ПК CRA ССТС с детерминированными по времени планами обслуживания ее элементов.

Для расширения возможностей анализа НЖБ ССТС в ПК CRA реализован расчет живучести на основе модификации графа СФЦ средствами ГПИ, а также расчет среднего значения коэффициента готовности ССТС с использованием решателя ОДУ.

Реализованный алгоритм декомпозиции графов СФЦ в ПК CRA позволил значительно ускорить рас-

чет сложных СФЦ с большим количеством функциональных вершин.

Литература

1. Нозик А. А. Оценка надежности и безопасности структурно-сложных технических систем // Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2005.

2. Безлепкин В. В., Семашко С. Е., Ершов Г. А., Солодовников А. С., Ермакович Ю. Л., Козлов М. А., Калинин А. А., Парфентьев М. А. // НИР. Итоговый отчет. Отчет о верификации средства БАРС (Безопасность и Анализ Риска Систем), версия 1.0 НИР.0-0-22-ОТ-041. Изм. 0 11.2011. ОАО «СПБАЭП», 2011.

3. Отчет о научно-исследовательской работе. Сравнительный анализ технологий деревьев отказов и автоматизированного структурно-логического моделирования, используемых для выполнения работ по вероятностному анализу безопасности АЭС и АСУТП на стадии проектирования. (Шифр темы: «Технология-2004»). СПб.: ФГУП «СПБАЭП», ОАО «СПИК СЗМА», ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2005. С. 282.

4. Kovalenko O. V. Additional Possibilities of «Continues Risk Assessment» VNIIEF Program (Modeling Of Dependent Events and Joint Calculation SPA with Deterministic Models) // 23rd International System Safety Conference, San Diego, 2005.

5. Портенко Н. И., Скороход А. В., Шуренков В. М. Марковские процессы // Итоги науки и техн. Современ. пробл. Матем. Фундам. Направления. ВИНТИ, 1989. С. 5–248

6. Глушков В. М. Словарь по кибернетике, Киев: Гл. ред. Укр. сов. энциклопедии, 1979.

7. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016.