

## ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ (продолжение 4)

### Завершение рассмотрения тестового примера расчета и использования показателей роли элементов боевой системы с применением ПК АСМ

В предыдущей статье (см. [11], с.60-63) были даны определения и приведены методы расчета в ОЛВМ, технологии и ПК АСМ показателей значимостей, положительных и отрицательных вкладов элементов, и приведена первая часть тестового примера их использования в модели боевой системы (см. [10], с.58, рис.11 и [11], с.63, рис.1 и рис.2). В данной, завершающей части указанного примера рассматриваются методические подходы к практическому применению показателей роли элементов для выработки и обоснования управленческих решений.

На рис.1 показан вид окна ввода СФЦ программного комплекса ПК АСМ 2001 [8], в котором размещена структурная модель боевой устойчивости ( $Y_{БВ} = y_{36}$ ) и боевой эффективности ( $Y_{БЭ} = y_{34}$ ) исследуемой боевой системы.

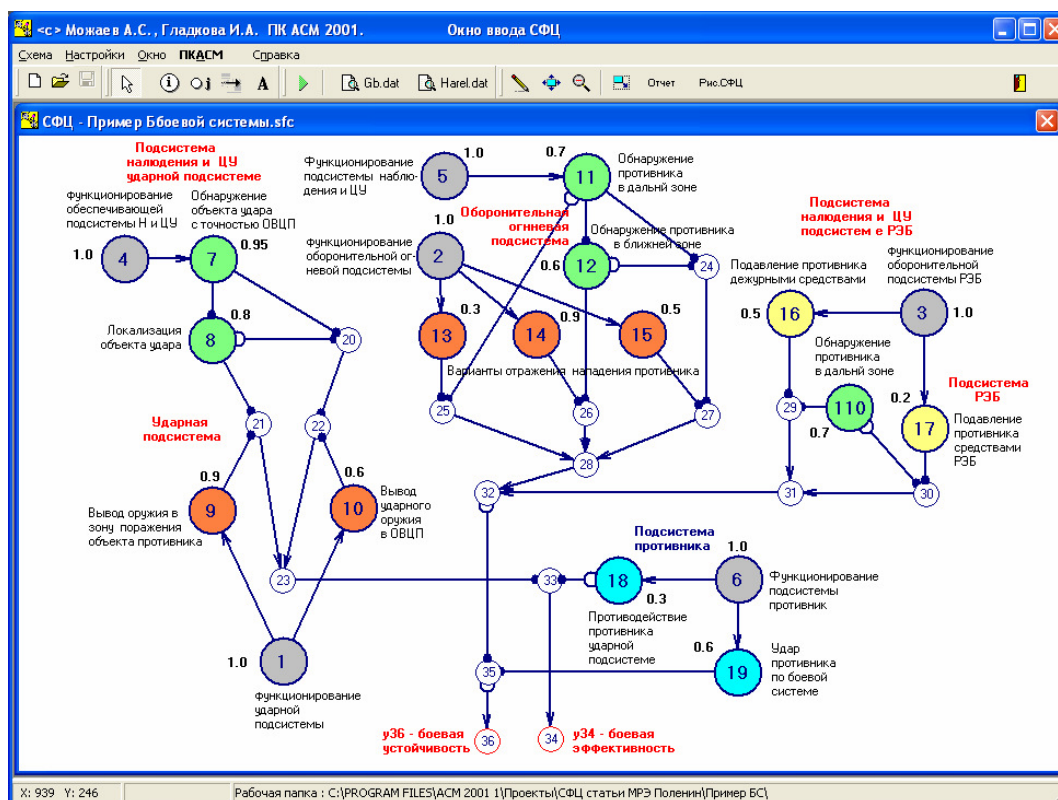


Рис.1. Вид окна ввода СФЦ ПК АСМ для примера моделирования боевой системы

В табл.1 приведены результаты расчетов, с помощью ПК АСМ 2001, показателей значимости  $\xi_i$ , отрицательного  $\beta_i^-$  и положительного  $\beta_i^+$  вкладов элементов в боевую устойчивость исследуемой системы

$$P_c = 0.8446. \quad (1)$$

Таблица 1

Характеристики роли элементов боевой системы

Номер элемента $i$	Вероятность $p_i$	Значимость $\xi_i$	Отрицательный вклад $\beta_i^-$	Положительный вклад $\beta_i^+$
8	0.8	0.0	0.0	0.0
19	0.6	-0.259	0.1554	-0.1036
6	1.0	-0.1554	<b>0.1554</b>	0.0
3	1.0	0.0798	-0.0798	0.0
17	0.2	0.126	-0.0252	<b>0.1008</b>
16	0.5	0.1092	-0.0546	0.0546
2	1.0	0.1986	-0.1986	0.0
15	0.5	0.084	-0.042	0.042
14	0.9	0.126	-0.1134	0.0126
13	0.3	<b>0.144</b>	-0.0432	<b>0.1008</b>
12	0.6	0.084	-0.0504	0.0336
11	0.7	<b>0.258</b>	-0.1806	0.0774
5	1.0	0.0924	-0.0924	0.0

Приведенный в предыдущей статье (см. [11]) анализ значимостей показал, что наиболее важными по этому показателю являются элементы 11 и 13.

## 2) Анализ, положительных и отрицательных вкладов элементов

Из табл.1 следует, что для выбранных ранее по максимальной значимости элементов 11 и 13 имеют место следующие соотношения отрицательных и положительных вкладов:

– для элемента 11:

$$\begin{aligned} \beta_{11}^- &= -p_{11}\xi_{11} = -0.7 \cdot 0.258 = -0.1806; \\ \beta_{11}^+ &= (1 - p_{11})\xi_{11} = (1 - 0.7) \cdot 0.258 = 0.0774; \\ \xi_{11} &= \beta_{11}^+ - \beta_{11}^- = 0.0774 - (-0.1806) = 0.258. \end{aligned} \quad (2)$$

– для элемента 13:

$$\begin{aligned} \beta_{13}^- &= -p_{13}\xi_{13} = -0.3 \cdot (0.144) = -0.0432; \\ \beta_{13}^+ &= (1 - p_{13})\xi_{13} = (1 - 0.3) \cdot (0.144) = 0.1008; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\xi_{13} = \beta_{13}^+ - \beta_{13}^- = 0.1008 - (-0.0432) = 0.144.$$

На рис.2 приведена совмещенная диаграмма текущих значений положительных (красный цвет) и отрицательных (зеленый цвет) вкладов элементов, которые увеличивают боевую устойчивость системы.

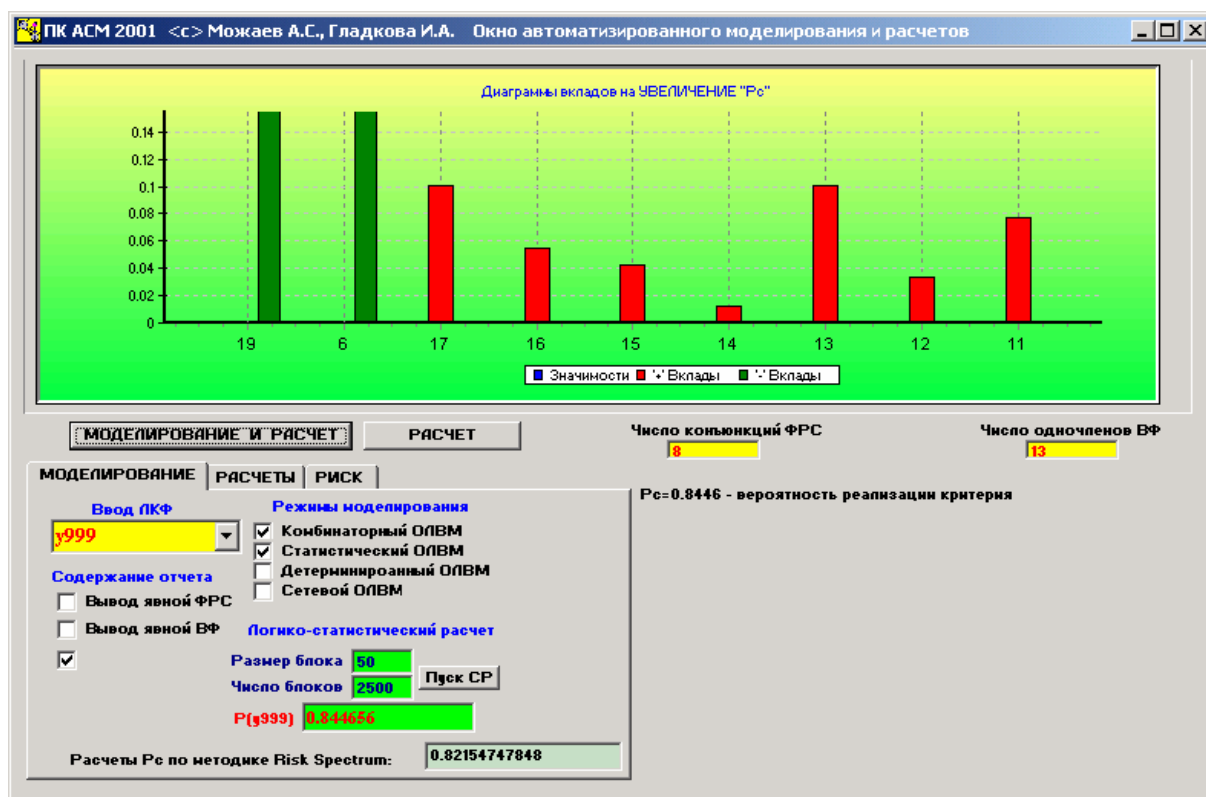


Рис.2. Вид окна автоматизированного моделирования с диаграммой текущих значений вкладов элементов

Если вклады рассматривать в плане соотношения теоретического и прагматического аспектов, то полученные результаты (см. табл.1 и рис.2) следует трактовать следующим образом:

– для элемента 11:

$\beta_{PB.11}^{(+)} = -(\beta_{11}^-) = 0.1806$  – реальный, осуществленный вклад элемента 11 с положительным инградиентом (за счет его достигнутого значения  $p_{11} = 0.7$ );

$\beta_{PB.11}^{(+)} = \beta_{11}^+ = 0.0774$  – потенциально возможный предельный вклад элемента 11 с положительным инградиентом (при увеличении его значения от текущего  $p_{11} = 0.7$  до теоретически возможного предельного  $p_{11} = 1.0$ ).

– для элемента 13:

$\beta_{PB.13}^{(+)} = -(\beta_{13}^-) = 0.0432$  – реальный, осуществленный вклад элемента 13 с положительным инградиентом (за счет его достигнутого значения  $p_{11} = 0.7$ );

$\beta_{ПВ.13}^{(+)} = \beta_{13}^{+} = 0.1008$  – потенциально возможный, предельный вклад элемента 13 с положительным инградиентом (при увеличении его значения от текущего  $p_{13} = 0.3$  до теоретически возможного предельного  $p_{13} = 1.0$ );

Таким образом, теоретические положения, изложенные в [11] выражения (8)-(10) подтверждены численным расчетом (2), (3), реализованным ПК АСМ 2001.

Здесь следует обратить внимание на следующее обстоятельство, уже отмеченное в конце раздела А [11]. В качестве наиболее важных для совершенствования боевой системы по показателю значимости были выбраны элементы 11 и 13. Однако по показателю положительного (или, что то же, потенциально возможного) вклада  $\beta_{ПВ.11}^{(+)} = \beta_{11}^{+} = 0.0774$  (см. табл.1) элемент 11, имеющий наибольшую значимость, является не самым достойным претендентом на выделение средств и проведение мероприятий по его совершенствованию, в целях повышения боевой устойчивости системы в целом. Действительно (см. табл.1 и диаграмму на рис.2), по этому показателю гораздо большая роль принадлежит элементам 17 «подавление средств нападения противника средствами РЭБ при наличии данных ЦУ» и 13 «отражение средств нападения противника дежурными огневыми средствами самообороны при отсутствии данных обнаружения». Они имеют одинаковый наибольший ролевой показатель положительного или, что то же, потенциально возможного, вклада  $\beta_{ПВ.13}^{(+)} = \beta_{13}^{+} = \beta_{ПВ.17}^{(+)} = \beta_{17}^{+} = 0.1008$ . Высокая значимость элемента 11 в значительной мере оказалась уже востребованной и реализованной с показателем  $p_{11} = 0.7$ .

Это позволяет сделать обоснованный вывод, что на первом шаге оптимизации целесообразно выделить, средства, для повышения вероятности выполнения задачи, элементу 17 (или элементу 13, что равноценно). Если в результате этого достигнуто значение  $p_{17} = 1.0$ , то следующий сеанс автоматизированного моделирования позволяет получить новые значения боевой устойчивости системы, положительных и отрицательных вкладов элементов.

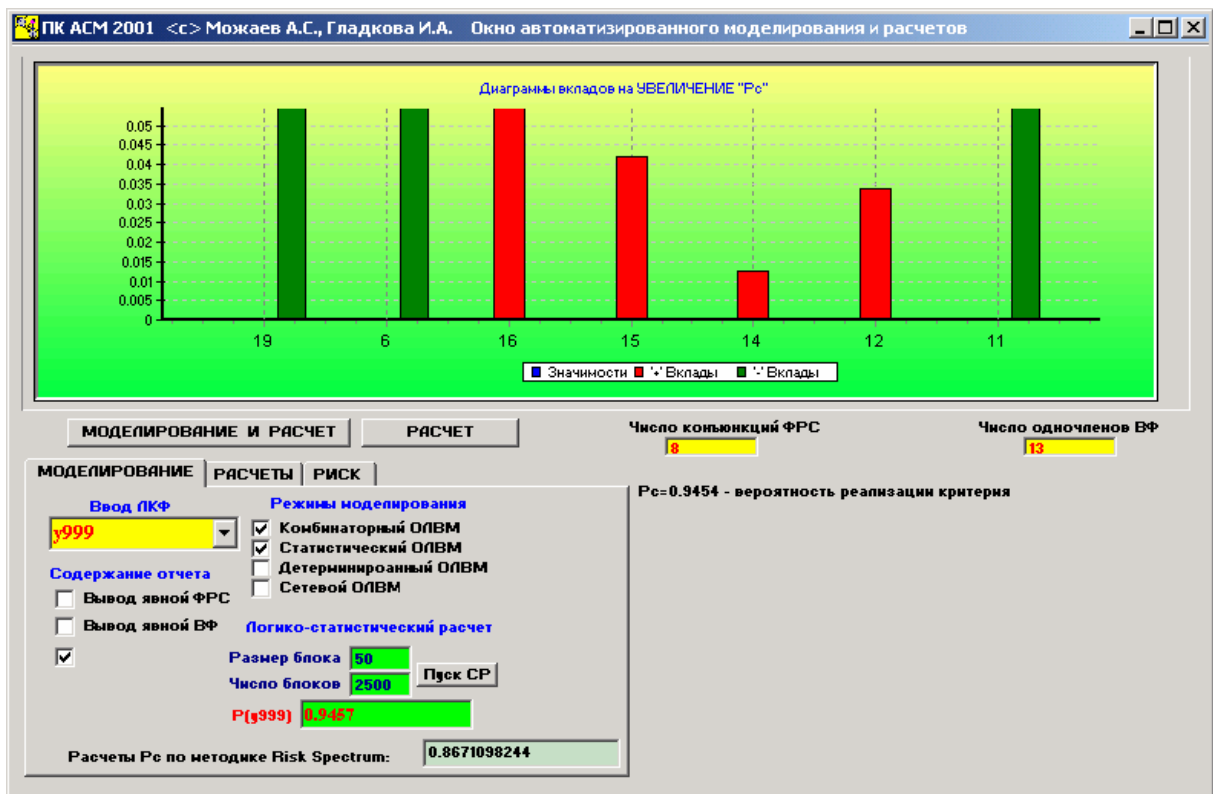


Рис.3. Вид окна автоматизированного моделирования с диаграммой вкладов элементов, после первого шага оптимизации ( $p_{17} = 1.0$ )

Боевая устойчивость системы возросла от (1) до значения

$$P_c = 0.9454. \quad (4)$$

Из новой диаграммы вкладов (см. рис.3) следует, что доступными и наиболее эффективными решениями следующего, второго шага оптимизации боевой системы могут быть, или увеличение вероятности события 16 «подавление средств нападения противника дежурными средствами РЭБ при отсутствии данных ЦУ», или уменьшение вероятности события 11 «обнаружение обеспечивающей подсистемой средств нападения противника в дальней зоне, наличие данных ЦУ средствам коллективной обороны». Любое из этих действий приводит к дальнейшему наибольшему увеличению (на  $\beta_{16}^+ = \beta_{11}^- = 0.0546$ ), боевой устойчивости  $P_c$  рассматриваемой в примере системы.

Такова прагматика использования ролевых характеристик значимостей и вкладов элементов для выработки и обоснования эффективных решений по совершенствованию структурно сложных систем и планов операций.

## Заключение

Завершая изложение вводного учебного курса технологии автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (см. "Морская радиоэлектроника", №3(21), №4(22), 2007 г. и №1(23))

2008 г.), остановимся кратко на ряде положений, характеризующих историю создания и современное состояние разработки и практического использования общего логико-вероятностного метода и программных комплексов автоматизированного моделирования сложных систем.

Разработки графического аппарата схем функциональной целостности, общего логико-вероятностного метода [12, 13] и первых образцов программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем были завершены в Военно-морской академии к середине 80-х годов. Все последующее время осуществлялось последовательное развитие этого нового научного направления, его адаптация к различным предметным областям, происходило становление технологии автоматизированного структурно-логического моделирования в системном анализе. В последние годы произошло существенное расширение областей практического применения теории, технологии и программных комплексов АСМ. Основой этого расширения явилось создание в 2002 году первого отечественно промышленного образца программного комплекса АРБИТР (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0) [7]. Техническим прототипом промышленного комплекса АРБИТР является учебно-исследовательский комплекс ПК АСМ 2001 [8], который продолжает активно использоваться в учебном процессе и научных исследованиях Военно-морской академии.

В 2004-2005 годах комплекс АРБИТР (ПК АСМ СЗМА) и другие программы технологии АСМ, применялись в комплексной НИР [14] трех организаций: СПБАЭП (ПК "Risk Spectrum", Швеция), ИПУ РАН (ПК "Relex", США) и ОАО "СПИК СЗМА" (ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ 2000, ПК АСМ 2001 и др.). Технология и программные комплексы АСМ успешно прошли сравнительный анализ с комплексами Relex (США) и Risk Spectrum (Швеция). В выводах этой НИР было сделано общее заключение всех трех организаций – исполнителей: "Считаем целесообразным, объединить усилия организаций-исполнителей данной работы и приступить к разработке на базе ОЛВМ, технологии и ПК АСМ СЗМА отечественных специализированных программных комплексов автоматизированного структурно-логического статического и динамического моделирования, расчета показателей и оптимизации надежности, безопасности и риска функционирования сложных систем для различных отраслей промышленности" [14].

В период 2005-2006 года комплекс АРБИТР проходил процедуру официальной аттестации в Совете по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ РОСТЕХНАДЗОРа РФ. В работе по аттестации приняли участие эксперты из ведущих проектных организаций: СПБАЭП, ВНИИАЭС, АЭП, НТЦ ЯРБ (Москва) и ОКБМ им. И.И.Африкантова (Нижний Новгород). В Отчете о верификации, разработанном заявителем (ОАО "СПИК СЗМА"), экспертам были представлены 10 расчетно-аналитических Тестов, состоящих из 42 примеров, включающих 184 различные задачи.

В настоящее время комплекс АРБИТР реализует следующие функции (прошедшие процедуру аттестации):

- представление в исходной СФЦ (в суперграфе СФЦ) до 400 элементов (вершин) и до 100 элементов в каждой декомпозированной вершине (подграфах СФЦ) основного графа исследуемой системы (т.е. можно ввести до 40 000 вершин);
- автоматическое построение логических функций, представляющих пути функционирования, сечения отказов или их немонотонные комбинации (явные детерминированные модели исследуемых свойств системы);
- автоматическое построение вероятностных функций, обеспечивающих точный расчет показателей устойчивости, эффективности и риска исследуемых систем;
- расчет вероятности реализации заданных критериев, представляющих свойства устойчивости, эффективности и риска функционирования систем;
- расчет вероятности безотказной работы или отказа и средней наработки до отказа невосстанавливаемых систем;
- расчет коэффициента готовности, средней наработки на отказ, среднего времени восстановления и вероятности безотказной работы восстанавливаемых систем;
- расчет вероятности готовности смешанных систем, состоящих из восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов;
- расчет значимостей, положительных и отрицательных вкладов всех элементов исследуемой системы в вероятность реализации исследуемого свойства, используемые для выработки и обоснования управленческих решений по обеспечению устойчивости, живучести, безопасности эффективности и риска функционирования;
- приближенный расчет вероятностных показателей (без построения вероятностной функции), с отсечкой или без отсечки малозначимых путей и сечений;
- расчет вероятности реализации отдельных КПУФ или МСО системы;
- расчет значимости и суммарной значимости сечений отказов по Fussell-Vesely;
- расчет значимости, уменьшения и увеличения риска элементов по Fussell-Vesely;
- приближенный расчет вероятностных характеристик системы с учетом трех типов отказов элементов: отказ на требование, отказ в режиме работы и скрытый отказ в режиме ожидания (по методике, реализованной в ПК CRISS 4.0);
- структурный и автоматический учет отказов групп элементов по общей причине (модели альфа-фактора, бета-фактора и множественных греческих букв);
- учет различных видов зависимостей и множественных состояний элементов, представляемых с помощью групп несовместных событий;

- учет двухуровневой декомпозиции структурной схемы, дизъюнктивных и конъюнктивных кратностей сложных элементов (подсистем);
- учет неограниченного числа циклических (мостиковых) связей между элементами и подсистемами;
- учет различных комбинаторных отношений (K из N) между группами элементов и подсистем.

В ходе аттестации было выдано задание на решение пяти Контрольных примеров "Моделирования и анализа систем безопасности и ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности" (5 примеров, 20 задач). При выполнении этого задания с помощью АРБИТР были получены и представлены экспертам три вида решений Контрольных примеров:

- приближенные решения всех пяти Контрольных примеров по методике аттестованного программного средства (ПС) CRISS 4.0 (совпали с заданием около 2000 сопоставляемых показателей);
- приближенные решения всех пяти Контрольных примеров по методике ПС Sapphire-7 (совпали более 2000 сопоставляемых показателей);
- дополнительно, с помощью АРБИТР, впервые были выполнены точные расчеты вероятностей вершинных событий деревьев отказов для трех выданных Контрольных примеров (модели с независимыми отказами элементов).

Контроль правильности решений Тестовых и Контрольных задач, полученных с помощью ПС АРБИТР, осуществлялся экспертами в соответствии с требованиями Положения об аттестации программных средств (РД-03-17-2001) путем сопоставления:

- с аналитическими решениями задач;
- с решениями, приведенными в литературных источниках;
- с решениями, полученными с помощью ранее аттестованных программных средств Risk Spectrum (Швеция) и CRISS 4.0 (РФ);
- с решениями, полученными с помощью программного комплекса Sapphire-7, имеющего лицензию Комиссии ядерного регулирования США;
- с решениями, полученными с помощью программного комплекса RELEX (США), широко используемого во многих странах мира.

В основных режимах моделирования комплекса АРБИТР [7] обеспечивается точный расчет показателей на основе автоматически формируемого правильного многочлена вероятностной функции во всем диапазоне возможных значений задаваемых параметров элементов. Вспомогательные режимы расчетов, реализованные в этом комплексе, позволяют получать приближенные значения вероятностных характеристик исследуемых свойств систем с такой же точностью, как и аттестованные программные средства Risk Spectrum, CRISS-4.0 и Sapphire-7, имеющее лицензию Комиссии ядерного регулирования США.



В ходе аттестации у экспертов не было ни одного замечания по правильности решений с помощью АРБИТР всех 204 задач расчетно-аналитических Тестов и Контрольных примеров. На основании результатов экспертизы, проведенной Советом по аттестации ПС НТЦ ЯРБ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ (РОСТЕХНАДЗОР), на программное средство АРБИТР (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0, выдан Аттестационный паспорт № 222 от 21 февраля 2007 г. Комплекс аттестован на срок 10 лет и разрешен к применению на предприятиях РОСТЕХНАДЗОРа РФ.

В настоящее время проводятся работы по дальнейшему совершенствованию комплексов АРБИТР и ПК АСМ 2001. Одним из перспективных направлений развития является реализация в комплексах технологии АСМ итерационного логико-статистического метода (ИЛСМ, автор Алексеев А.О.). ИЛСМ позволяет автоматически строить статистические модели сложных систем большой размерности непосредственно по графам СФЦ, минуя этапы построения логических и вероятностных функций. На основе сформированных статистических моделей определяются оценки вероятностных характеристик исследуемых свойств надежности, живучести и безопасности систем, значимости и вклады элементов. Так, например, на рис.2 и на рис.3, наряду с результатами точного аналитического расчета (режим "Комбинаторный ОЛВМ) боевой устойчивости (1), (4) исследуемой системы, приведены результаты автоматизированной логико-статистической оценки этого показателя, составляющие  $P_c \approx 0.844656$  и  $P_c \approx 0.9457$  соответственно.

Другими направлениями развития теории, технологии и ПК АСМ являются:

- автоматизация процессов построения различных видов и классов детерминированных моделей структурно-сложных систем (детерминированный ОЛВМ);
- автоматизация процессов построения различных видов и классов Марковских моделей;
- автоматизация процессов построения различных видов сетевых моделей системных объектов и процессов;
- адаптация программных комплексов технологии АСМ к различным предметным областям практического применения и классам задач системного анализа.

## Литература

1. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007 г., 278 с

2. Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, безопасности и риска сложных систем. // Многотомное издание «Безопасность России». Анализ риска и проблем безопасности. В четырех частях. Часть I. Основы анализа и регулирования безопасности. М.: МГФ «Знание», 2006, 640 с. (с. 153-197). Общий логико-вероятностный метод и технология моделирования безопасности сложных систем. // Многотомное издание «Безопасность России». Анализ риска и проблем безопасности. В четырех частях. Часть III. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов, 2007, 816 с. (с. 243-293).
3. Можаяев А.С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование систем // Учебник. – СПб: ВМА им Кузнецова Н.Г, 2006. 577 с.
4. Свирина С. К. Организация научного обеспечения развития вооружения ВМФ. – Военная мысль, № 8, 2006.
5. Современные проблемы управления силами ВМФ: Теория и практика. Состояние и перспективы / И. В. Соловьев, В.В. Геков, С. М. Доценко и др. Под ред. В. И. Куроедова. – СПб: Политехника, 2006. – 432 с.
6. Трухаев Р.И. Методы исследования процессов принятия решений в условиях неопределенности. - Л.: ВМОЛА, 1972. - 437 с.
7. АРБИТР, «Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0». Автор Можаяев А.С. Правообладатель ОАО «СПИК СЗМА». // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611101. – М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003. Аттестационный паспорт программного средства № 222 от 21 февраля 2007 г. Совета по аттестации ПС НТЦ ЯРБ при Ростехнадзоре РФ.
8. Можаяев А.С., Гладкова И.А. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем 2001 (ПК АСМ 2001). // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099. – М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003.
9. Рябинин И.А., Можаяев А.С., Свирина С.К., Поленин В.М. Технология автоматизированного моделирования структурно-сложных систем. // «Морская радиоэлектроника», № 3 (21), сентябрь 2007, с.58-63.
10. Рябинин И.А., Можаяев А.С., Свирина С.К., Поленин В.М. Технология автоматизированного моделирования структурно-сложных систем. // «Морская радиоэлектроника», № 4 (22), декабрь 2007, с.54-59.
11. Рябинин И.А., Можаяев А.С., Свирина С.К., Поленин В.М. Технология автоматизированного моделирования структурно-сложных систем. // «Морская радиоэлектроника», № 1 (23), март 2008, с.60-63.

12. Можаяев А.С. Логико-вероятностных подход к оценке надежности автоматизированных систем управления. Представлена ВМА им. Гречко А.А. Депонирована п/я А-1420 N Д04750, 1982. -24 с.
13. Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988. -68с.
14. ФГУП СПбАЭП, ОАО "СПИК СЗМА", (Санкт-Петербург), ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова (г. Москва). НИР "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 "Технология 2004"), 2005, 282 с.
15. Можаяев А.С., Киселев А.В., Струков А.В., Скворцов М.С. Отчет о верификации программного средства "Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем" (АРБИТР, ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0). Заключительная редакция с приложениями. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2007. – 1031 с.

Дополнительные сведения по применению и развитию комплекса АРБИТР, ОЛВМ и технологии АСМ можно получить на сайте ОАО «СПИК СЗМА»: <http://www.szma.com>.