

*Редакция журнала «Морская радиоэлектроника», памятуя о функции образования, пропаганды и распространения новых знаний, открывает новую рубрику «Наш университет».*

*Рубрика начинается с публикации материалов, служащих введением в новую и перспективную информационную технологию автоматизированного моделирования структурно-сложных систем.*

**И.А. Рябинин**, почетный профессор ВМА им. Н.Г. Кузнецова, д.т.н., профессор, засл. работник Высшей школы

**А.С. Можяев**, вед. специалист ОАО «СПИК СЗМА», д.т.н., профессор

**С.К. Свирин**, старший научный сотрудник 24 ЦНИИ МО РФ, д.в.м.н., профессор, засл. деятель науки и техники РФ

**В.И. Поленин**, профессор ВМА им. Н.Г. Кузнецова, д.в.н., профессор, засл. деятель науки РФ

## **ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

*Рассматривается новая и перспективная информационная технология автоматизированного моделирования, имеющая название «Общий логико-вероятностный метод», реализованная в программном комплексе автоматизированного структурного моделирования (ПК АСМ) и обеспечивающая оценивание надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования разнородных систем различной физической природы и назначения, обладающих высокой структурной сложностью.*

### **Введение**

Структурно-сложные системы, рассматриваемые ниже, представляют собой два класса систем:

- 1) Технические системы.
- 2) Системы военного назначения, в т.ч. боевые системы – функциональные системы вооружения и организационные системы, представляющие собой формирования вооруженных сил произвольных масштабов, предназначенные для ведения военных действий [6]. Боевые системы имеют целевое предназначение для ведения вооруженной борьбы и характеризуются целенаправленностью и наличием ударной, оборонительной, командно-управляющей, обеспечивающей и

обслуживающей подсистем, охваченных координационными и субординационными связями.

Важный класс задач, связанный с моделированием структурно-сложных систем, состоит в оценивании структурных свойств их устойчивости (надежности, стойкости, живучести, безопасности), эффективности и риска функционирования. Для их решения существует ряд методов, составляющих содержание системного анализа, теории надежности, теории вероятностей, математической статистики и исследования операций, в том числе цепи Маркова, теория массового обслуживания, метод статистического моделирования, аппарат полумарковских процессов и т.п.

При оценивании структурных свойств структурно-сложных систем с применением различных методов возникают проблемные вопросы адекватного представления систем и их свойств моделями, получения оценок с необходимой точностью. «Проклятие размерности», состоящее в экспоненциальном росте сложности модели при увеличении числа элементов и связей между ними в структурном представлении систем, заставляет прибегать к различным приемам обобщения, редукции моделей, переходу к понятию состояний, с определенной потерей информации.

В связи с этим всегда существовала актуальная проблема создания метода, позволяющего, при корректном описании функциональной структуры системы получить требуемые показатели свойств. Решению этой проблемы во второй половине XX века в значительной степени способствовала разработка логико-вероятностного метода (ЛВМ). Исключительная актуальность результатов привела к широкому распространению и дальнейшему развитию ЛВМ, формированию крупной отечественной научной школы логико-вероятностных методов системного анализа, создателем и постоянным руководителем которой является И.А. Рябинин [3, 4].

Общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ), расширяющий возможность применения ЛВМ на область так называемых немонотонных систем, был разработан А.С. Можаяевым и обеспечен программным комплексом автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ), получившим сертификат Ростехнадзора и международное признание [1, 2].

Технология исследования свойств систем с применением ОЛВМ включает следующие действия:

- графоаналитическое модельное представление структурно-сложной системы исследователем с использованием интерфейса ПК АСМ;
- выполняемая ПК АСМ, автоматическая корректная свертка функциональной структуры модели системы в значения требуемых показателей свойств – целевых (выходных) функций системы;
- анализ результатов исследователем, проведение серий расчетов с варьированием показателей свойств и целевых функций.

Графоаналитическое модельное представление структурно-сложной системы осуществляется с помощью нового, логически универсального

графического средства – схемы функциональной целостности (СФЦ), с задаваемыми в исходных данных значениями показателей функционирования элементов по их целевому назначению. Результаты расчетов, наряду со значениями показателей свойств, содержат значения и весовых значений элементов – откликов целевой функции системы на изменения ее параметров, что позволяет оценить их значимость (т.е. роль) для системы в целом.

### **Технология решения прикладных задач оценивания типовых систем.**

Автоматизация основных процессов технологии АСМ существенно снижает трудозатраты на традиционную работу по созданию и программной реализации подходящего аппарата оценивания показателей функционирования систем, если речь идет о типовых структурах и предметных областях.

Типовыми системами такого рода являются:

- структуры технических систем при исследовании свойств устойчивости (надежности, стойкости, живучести, безопасности), эффективности и риска их функционирования;
- структуры боевых систем при планировании их развития и деятельности.

Сегодня, в связи с разработкой логико-вероятностных методов и соответствующих программных комплексов, исследователь может все более сосредоточиться собственно на постановке и формализации своей задачи, а решение осуществляется автоматически. Освоение и применение логико-вероятностного метода и технологии АСМ является необходимым и достаточным средством решения многих типовых задач оценивания показателей их структурных свойств.

Это освоение и применение касается двух аспектов.

Первый из них связан с модельным отображением исследуемой структурно-сложной системы в виде событийной граф-схемы логических переходов. И хотя логические умозаключения (на основе таблицы истинности «И-ИЛИ-НЕ») свойственны человеку в его речи и мышлении, и являются естественными формой и способом представления знаний, графически корректно это сделать обычно бывает весьма не просто. Освоение приемов модельного отображения систем событийными граф-схемами – наиболее трудная часть технологии ОЛВМ. Руководства по исследованию операций ограничиваются примерами составления граф-схем, вроде бы и очевидными, но еще не являющимися полноценным учебным материалом в качестве введения для этого вида работы. Специальные руководства, например, по конечным автоматам, являются слишком специфическими и обширными. Поэтому в принципе нужна специальная учебная дисциплина и даже культура корректного представления функционирования системы в виде событийной граф-схемы. Частично введение по составлению граф-схем содержат представляемые ниже материалы.

Второй аспект касается собственно технологии ОЛВМ, оформления событийной граф-схемы в форме так называемой схемы функциональной целостности (СФЦ) исследуемой системы и освоения программного комплекса ПК АСМ. В силу высокой степени формализма этих компонентов, они осваиваются уверенно, как и любые программные компоненты персональных компьютеров.

По роли и месту, ОЛВМ и его программному комплексу принадлежит большое будущее. Действительно, во-первых, ОЛВМ обладает 100-процентной адекватностью преобразования составленной событийной граф-схемы переходов в логико-вероятностные уравнения и их решения с отысканием значений показателей свойств системы в целом, во-вторых, применение ОЛВМ обеспечивается готовыми, программно отлаженными и процедурно доступными средствами.

Актуальной задачей науки является выход технологии ОЛВМ за пределы оценивания надежности и безопасности технических систем, применение ОЛВМ в предметных областях, для которых характерны структурно-сложные системы, например, в предметной области моделирования военной деятельности.

#### **Возможность оценивания немонотонных систем.**

Принципиальное системное сходство технических систем и систем военного назначения порождает и сходство, даже тождество в применяемых методах моделирования процессов их моделирования и исследования. Однако имеются и существенные отличия, одно из которых связано с немонотонностью моделей военных действий.

Для технических систем характерно свойство монотонности, состоящее в том, что повышение надежности или иных характеристик свойств элементов приводит к повышению надежности и иных характеристик свойств (живучести, безопасности и т.д.) системы в целом. Особенность моделей военных действий, систем предметной области противоборства, состоит в их немонотонности: увеличение значений части показателей, например, показателя огневой мощи, приводит к деградации системы по части интегральных характеристик, например, к снижению боевой устойчивости противника.

Разработка ЛВМ была направлена на вероятностную оценку надежности, живучести и безопасности функционирования технических систем. Основное отличие ОЛВМ от ЛВМ состоит в возможности модельного представления и немонотонных систем а, следовательно, в расширении предметной области применения.

В частности, ниже будут рассмотрены модели боевых систем и военных действий, которые являются традиционным предметом применения методов исследования операций.

#### **Вычисляемые показатели.**

Важной характеристикой комплекса ПК АСМ, повышающей его потребительские свойства, является вычисление показателей:

– значимости или отклика элементов системы как прироста критериального показателя системы при изменении показателя элемента от нуля до единицы (заданное текущее значение показателя при этом не учитывается, поскольку оно варьируется);

– положительного вклада или отклика элементов как прироста критериального показателя системы при изменении показателя эффективности элемента от текущего заданного значения до единицы; это позволяет оценить целесообразность затрат на повышение показателя эффективности элемента;

– отрицательного вклада или отклика элементов как прироста критериального показателя системы при изменении показателя элемента от текущего значения до нуля.

Показатели свойств функционирования технических систем и показатели эффективности военных действий, выражаясь в общей для них вероятностной мере, имеют и свою традиционную специфику:

– показатели свойств функционирования технических систем основываются на понятии комплексного свойства «устойчивость», включающим в себя составляющие основные структурные свойства надежности (безотказности), стойкости (условной живучести), живучести, технического риска;

– показатели эффективности военных действий основываются на понятии «поражение», с формированием различных сочетаний по своим силам (средствам) и противнику: поражение цели, поражение противника, не поражение (сохранение боевой устойчивости) своих сил, и т.д.

Однако использование комплексного свойства «устойчивость» и его структурных свойств вполне приемлемо и для систем военного назначения, где целевыми функциями могут быть такие, которые попарно сходны со структурными свойствами технических систем: готовность – боевая готовность, работоспособность – боеспособность, живучесть – боевая устойчивость.

При применении вероятностных методов, грубых ошибок прогноза удается избежать путем:

– использования вероятностных характеристик для описания величин и событий, имеющих стохастическую природу, свободных от влияния субъективных факторов;

– отказа от использования выводов в отношении уровня вероятностей наступления тех или иных событий, достижения целей (использования уровневого критериального выбора), в пользу выводов о сравнительном превосходстве одних вариантов над другими (использования порядкового, сравнительного, экстремального критериального выбора).

### **Исходные данные.**

Моделирование и технических систем, и военных действий требует исходных данных, которые для рассматриваемых показателей свойств и эффективности имеют форму вероятностей событий двойной природы – во времени наступления событий и в нанесении поражения.

Следует отметить, что значения показателей функционирования элементов рассматриваемых систем, используемые в качестве исходных данных, определяются статистически или расчётами по частным методикам, которые являются составными частями аппарата исследования. Никакой из методов исследования операций не имеет преимущества перед другими методами в части необходимости таких исходных данных. Единство и сходство всех методов состоит в том, что они дают прогнозные оценки в заданных гипотетических условиях функционирования систем, выполнения задач. Эти методики разрабатываются с использованием всего арсенала перечисленных выше методов различных отраслей науки.

Адекватность показателей и методов, применяемых для определения их значений, исследуемым процессам в значительной мере определяет качество конечных результатов исследований.

Существенным является обстоятельство, состоящее в том, что для военных организационных и организационно-технических систем, адекватность проще достигается при использовании показателей эффективности выполнения задач, действий сил для критериального выбора наилучшего, в смысле вероятностного критерия, варианта построения сил и способа действий из нескольких возможных вариантов. Такое использование показателей соответствует ролевой оценке элементов системы, которая сохраняет объективность даже для вероятностей логической природы. От оценки же собственно уровня вероятности выполнения задач следует отказываться, поскольку для единичных актов индивидуальных решений и поведения индивидов в конкурирующей среде (конкурентная борьба, политика, война) вероятностные характеристики непригодны в силу нестохастичности этого вида случайности, ее принадлежности к неопределенному типу.

Для поддержки исследователей и пользователей персональных компьютеров созданы пособия по изучению ЛВМ и ОЛВМ [5 и др.], а также программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ) сложных систем [1, 2] и руководство по его использованию.

### **Основные этапы общего логико-вероятностного метода**

ОЛВМ, как и все известные логико-вероятностные методы системного анализа устойчивости, имеет четыре основных этапа, которые выполняются последовательно.

**1) *Формализованная постановка задачи (первичное структурно-логическое моделирование)***. Этот начальный этап включает следующие основные действия:

- разработка и ввод в ПК **структурной модели** исследуемого свойства устойчивости, эффективности или риска функционирования системы в форме схемы функциональной целостности;

- определение и ввод в ПК значений вероятностных параметров элементов, например, вероятности безотказной работы или отказа, средней наработки до отказа, среднего времени восстановления, возникновения поражающего фактора, стойкости к поражающему воздействию и т.п.;
- задание и ввод в ПК одного или нескольких логических критериев функционирования (ЛКФ), определяющих условия реализации исследуемого свойства системы, например, безотказности или отказа, выполнения или невыполнения функции системы с определенным уровнем эффективности, возникновения или не возникновения аварии с определенным уровнем последствий и др.

**2) Построение логической модели устойчивости системы.** Логическая функция является явной детерминированной моделью исследуемого свойства системы, определяемой на основе СФЦ (системы логических уравнений и заданного ЛКФ).


**3) Построение расчетного многочлена вероятностной функции.** Обеспечивается автоматическое построение правильных многочленов вероятностных функций при допущениях о независимости в совокупности вероятностных параметров элементов и наличии зависимых событий, представляемых с помощью аналитического аппарата так называемых групп несовместных событий (ГНС).

**4) Вычисление вероятностных показателей исследуемых свойств устойчивости системы.** Вычисляются показатели надежности и безопасности, соответствующие действующим государственным стандартам и руководящим документам.

В программном комплексе, реализующем технологию АСМ, первый этап ОЛВМ выполняется исследователем при обеспечении сервисными средствами ввода графов СФЦ, параметров элементов, задания режимов и критериев автоматизированного моделирования и расчетов системных характеристик. Все остальные этапы ОЛВМ (построения математических моделей большой размерности и выполнения расчетов) осуществляются автоматически.

### Аппарат схем функциональной целостности ОЛВМ

Для практического применения технологии и программного комплекса АСМ пользователю необходимо освоить методику представления свойств устойчивости, эффективности и риска исследуемых системных объектов с помощью графического аппарата СФЦ ОЛВМ. Основные графические символы, используемые в СФЦ, приведены на рис. 1.

  $x_i, p_i$  **Функциональная вершина.** Представляет событие  $x_i$ , сопоставленное элементу  $i$  системы и происходящее с вероятностью  $p_i$ .

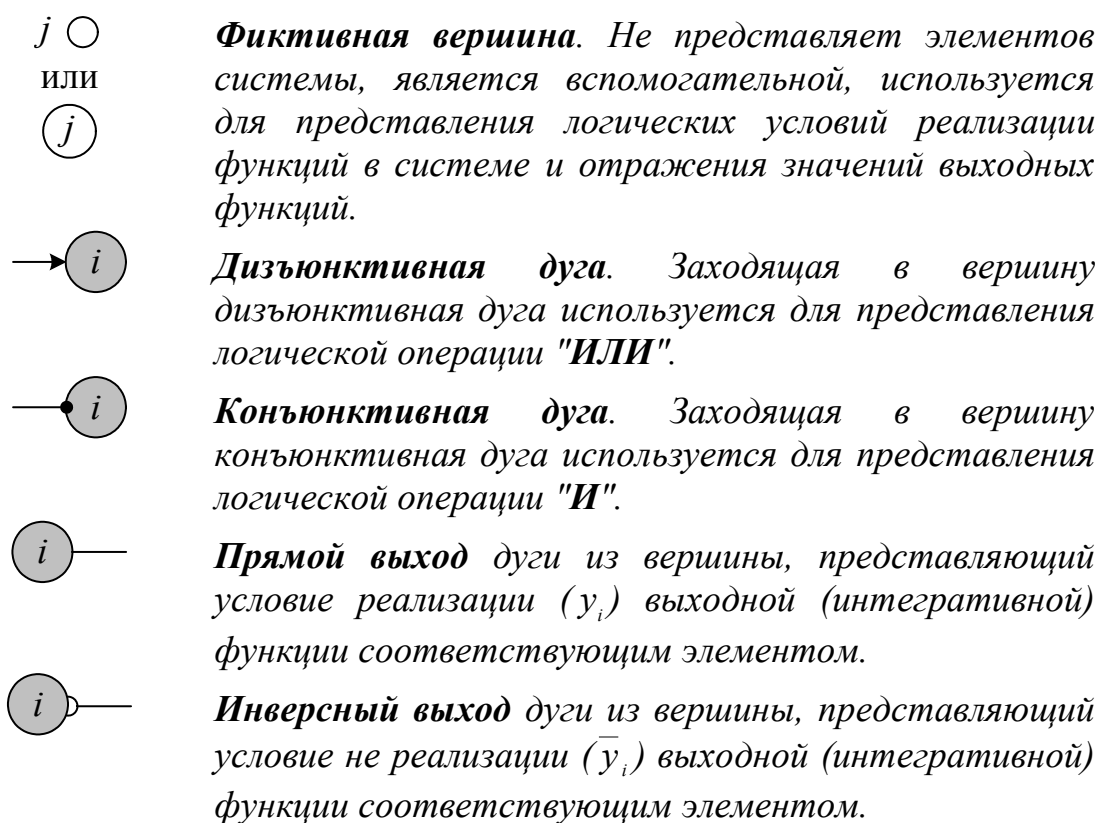


Рис. 1. Основные графические символы аппарата схем функциональной целостности

Методика применения аппарата СФЦ для построения структурных моделей свойств устойчивости систем подобна известным методикам построения блок-схем, графов связности с циклами, деревьев отказов и деревьев событий.

Однако имеют место ряд особенностей аппарата СФЦ, которые следует учитывать при построении структурных моделей различных свойств системной устойчивости, эффективности и риска. Они заключаются в следующем:

- При построении СФЦ применяется так называемый событийно-логический подход.

Этот подход включает в себя анализ исследуемого системного объекта и выделение конечного числа бинарных случайных событий  $x_i$ , элементов  $i=1,2,\dots,N$  системы, которые, по мнению разработчика, являются существенными и позволяют с достаточной точностью представить графом СФЦ исследуемые системные свойства.

Затем устанавливаются логические связи  $\tilde{y}_i = \{y_i, \bar{y}_i\}$  реализации или не реализации выходных функций всеми выделенными элементами. В совокупности они позволяют графическими средствами СФЦ (см. рис. 1) строго и логически точно представить все существенные условия реализации (или не реализации) моделируемого свойства рассматриваемого системного объекта в целом.



На рис. 2 изображен обобщенный фрагмент СФЦ и соответствующие ему базовые логические уравнения для прямого и инверсного выходов вершины  $i$ .

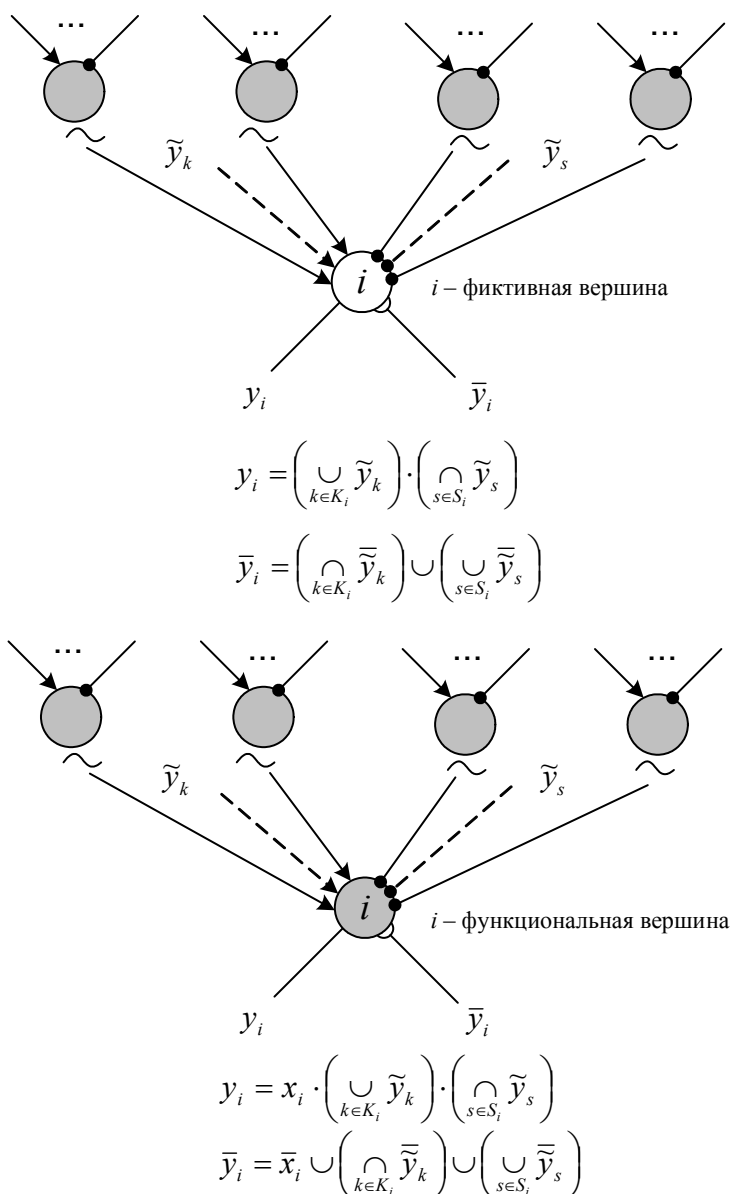


Рис. 2. Обобщенный фрагмент СФЦ и базовые логические уравнения

- С помощью функциональных вершин  $i$  (см. рис. 1, 2) в разрабатываемой СФЦ могут представляться как исходы события безотказной (безаварийной) работы, так и исходы событий отказов (аварий) соответствующих элементов исследуемой системы.

Аналогичное смысловое значение приобретают логические  $x_i$  переменные и вероятностные  $p_i$  характеристики, сопоставляемые выделенным элементам системы. Далее эти логические переменные и вероятностные характеристики используются при автоматическом построении логических и вероятностных математических моделей устойчивости исследуемой системы в целом.

- С помощью выходящих дуг ( $\circ \rightarrow$ ) и ( $\circ \rightarrow$ ) графически представляются условия реализации (прямой выход  $y_i$ , монотонное логическое условие) или не реализации (инверсный выход  $\bar{y}_i$ , немонотонное логическое условие) элементами  $i$  выходных (интегративных) функций.
- Заходящие в функциональную или фиктивную вершину  $i$  дизъюнктивные ( $\rightarrow \circ$ ) и конъюнктивные ( $\rightarrow \circ$ ) дуги используются для представления логических условий реализации прямой выходной функции  $y_i$  этого элемента системы.
- Уравнение  $y_i = \left( \bigcup_{k \in K_i} \tilde{y}_k \right) \cdot \left( \bigcap_{s \in S_i} \tilde{y}_s \right)$  для фиктивной вершины  $i$  означает реализацию выходной функцией  $y_i$  **хотя бы одного** из входов  $\tilde{y}_k$  и **всех** входов  $\tilde{y}_s$ . Уравнение  $y_i = x_i \cdot \left( \bigcup_{k \in K_i} \tilde{y}_k \right) \cdot \left( \bigcap_{s \in S_i} \tilde{y}_s \right)$  для функциональной вершины  $i$  означает реализацию выходной функцией  $y_i$  события  $x_i$  и **хотя бы одного** из входов  $\tilde{y}_k$  и **всех** входов  $\tilde{y}_s$ .
- Уравнения  $y_i = \left( \bigcup_{k \in K_i} \tilde{y}_k \right) \cdot \left( \bigcap_{s \in S_i} \tilde{y}_s \right)$  и  $\bar{y}_i = \left( \bigcap_{k \in K_i} \bar{\tilde{y}}_k \right) \cup \left( \bigcup_{s \in S_i} \bar{\tilde{y}}_s \right)$  для фиктивной вершины  $i$  означает реализацию противоположных событий.

Ниже приводится типовой фрагмент СФЦ, который демонстрирует узел инверсии – способы представления логической взаимосвязи элемента 2 с предысторией, условием его реализации – выходной функцией элемента 1.

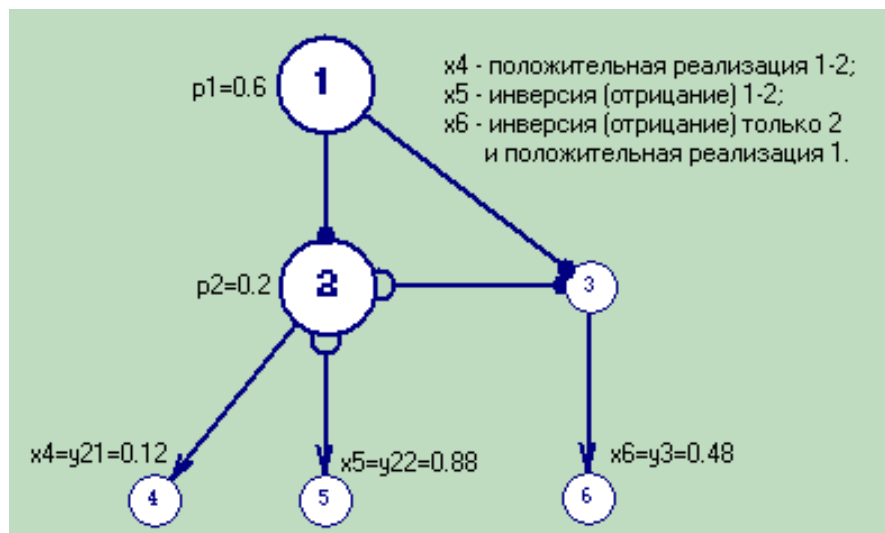


Рис. 3. Способы представления узлом инверсии вариантов логической взаимосвязи элемента 2 с предысторией – выходной функцией элемента 1

Выходные элементы СФЦ отражают произведение выходных функций элементов 1 и 2:

- элемент 4 – положительную, монотонную взаимосвязь элементов 1 и 2;
- элемент 5 – инверсию обоих элементов 1 и 3;
- элемент 6 – инверсию элемента 2 и монотонную реализацию

предыстории – выходной функции элемента 1.

Из изложенного материала и примеров следует, что каждая разработанная СФЦ является неявной (символической), но математически строгой (в форме системы логических уравнений) детерминированной моделью исследуемых свойств системы. Графическая форма СФЦ удобна для пользователя на этапе формализованной постановки задачи. Математически строгое соответствие СФЦ системе логических уравнений обеспечивает возможность полностью автоматического выполнения всех последующих этапов моделирования и расчетов показателей устойчивости исследуемых системных объектов высокой структурной сложности.

## Понятия и показатели свойств функционирования систем. Тестовые примеры построения моделей и применения технологии АСМ

### А. Содержание и составляющие понятия свойств функционирования структурно-сложной системы.

Содержание и составляющие понятия свойств функционирования структурно-сложной системы характеризуются следующими определениями.

**Устойчивость** – комплексное свойство системы, состоящее в ее способности сохранять свойства работоспособности и/или безопасности в процессе функционирования и при изменениях, вызываемых различными причинами.

Для боевых систем устойчивость может трактоваться как **боевая устойчивость** – сохранение боеспособности в условиях противоборства с противником (противодействия противника) на период выполнения задачи.

**Работоспособность** – свойство системы, состоящее в ее способности реализовать свое функциональное предназначение.

Для боевых систем может трактоваться как **боеспособность** – способность выполнять поставленную задачу.

**Безопасность** – свойство системы, состоящее в ее способности функционировать, не переходя в опасное, аварийное состояние, разрушающее систему (нарушающее функционирование системы) и (или) причиняющее вред персоналу, другим системам и окружающей среде.

Устойчивость является комплексным свойством, в общем случае включающим в себя различные совместные комбинации составляющих структурных свойств, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Структура устойчивости систем

Технические системы	Боевые системы
Надежность (безотказность)	Боеспособность
Стойкость (условная живучесть)	Боевая устойчивость при достоверном воздействии противника (поражающих факторов)

Живучесть (полная)	Боевая устойчивость при прогнозируемом воздействии противника (поражающих факторов)
Технический риск	Риск аварии (катастрофы)

**Эффективность** – прогнозируемая способность системы реализовать свое функциональное предназначение, цель функционирования при ограничениях на ресурсы.

Для боевых систем аналогично трактуется **боевая эффективность**.

Ниже рассматриваются примеры моделирования показателей свойств функционирования систем, включающие:

- 1) Модель надежности (безотказности) системы.
- 2) Модель стойкости (условной живучести) системы.
- 3) Модель живучести системы.
- 4) Модель устойчивости системы.
- 5) Модель реальной эффективности системы.
- 6) Модель технического риска по надежности.
- 7) Модель ожидаемого ущерба по надежности.
- 8) Модель ожидаемого ущерба по устойчивости.

Примеры моделирования показателей свойств функционирования систем будут рассмотрены в следующем номере журнала.

### Литература

1. 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.
2. 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.
3. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981.
4. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Изд. СПб университета, 2007 г., 278 с.
5. Можаяев А.С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование систем // Учебник. – СПб: ВМА им Кузнецова Н.Г., 2006. 590 с.
6. Свириин С.К. Организация научного обеспечения развития вооружения ВМФ. – Военная мысль, №8, 2006. С. 2-17.

Продолжение следует