

Мусаев А.А., Гладкова И.А.
**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
ОБЩЕГО ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА
АНАЛИЗА СИСТЕМ**

Мусаев А.А., Гладкова И.А. Современное состояние и направления развития общего логико-вероятностного метода анализа систем.

Аннотация. Приведены результаты систематизации данных о современном уровне разработки общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ), теории и технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ). Определены основные разделы и направления дальнейшего развития ОЛВМ анализа систем, дана их краткая содержательная характеристика, приведены примеры решения задач.

Ключевые слова: общий логико-вероятностный метод, схема функциональной целостности, автоматизация моделирования, состояние, разделы, направления развития.

Musaev A.A., Gladkova I.A. Current Status and Directions of a General Logic-probabilistic Method of System Analysis.

Abstract. The article presents the systematic results on the present level of a common logical-probabilistic method (CLPM) development, theory and technology of automated structural and logical simulation (ASLS). The article identifies the main sections and areas for further development CLPM analysis systems, given their brief informative description, examples of solving problems.

Keywords: common logical-probabilistic method, scheme of functional integrity, automation simulation, state, section, development directions.

1. Введение. Целью статьи является обзор результатов выполненной авторами систематизации данных о современном уровне разработки общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) системного анализа, теории и технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ). Определены основные разделы и направления дальнейшего развития ОЛВМ, дана их краткая содержательная характеристика, приведены примеры решения задач. Общий логико-вероятностный метод создан в начале 1980-х гг. путем расширения теоретической базы классических монотонных логико-вероятностных методов [1–11] на общий класс задач построения всех видов монотонных и немонотонных моделей различных свойств структурно-сложных и высокоразмерных систем. Одновременно с разработкой теоретических основ ОЛВМ осуществлена алгоритмизация и полная автоматизация основных процессов построения логических и вероятностных аналитических моделей исследуемых свойств систем [4, 5, 20]. Это соответствует мировой практике автоматизации классических моно-

тонных логико-вероятностных методов системного анализа [12–18] и явилось основой создания на базе ОЛВМ теории и новой информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования [3].

2. Современное состояние аналитического ОЛВМ. Это исторически первое и наиболее разработанное направление ОЛВМ, в котором на основе структурной схемы исследуемого свойства системы строятся и используются для вычисления вероятностных показателей точные или приближенные аналитические модели (функции).

В классических методах логико-вероятностного анализа и соответствующих программных комплексах для структурного описания свойств исследуемых систем используются графические аппараты деревьев отказов [6, 7, 12–15], блок-схем и графов связности [6–11, 16]. Этими видами структурных схем можно представлять только две логические операции: 1) "И" (конъюнкцию), 2) "Или" (дизъюнкцию).

Данный набор операций не является функционально полным. Поэтому классические логико-вероятностные методы и соответствующие программные комплексы, уже по своему построению, не могут реализовать всех возможностей основного аппарата моделирования — алгебры логики. Они позволяют строить только определенные подклассы монотонных моделей свойств систем так называемого первого типа [9].

Для снятия указанного ограничения и обеспечения возможности построения и анализа всех видов монотонных и немонотонных моделей систем разработан общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) системного анализа [1–5, 18–21, 23–25]. В ОЛВМ используются не две операции «И» и «Или», а функционально-полный набор логических операций «И», «Или» и «Не». Это потребовало принципиально новой разработки математических средств и методов выполнения первых двух этапов моделирования — структурной постановки задач и построения логических моделей. В ОЛВМ для структурной постановки задач разработан новый логически полный графический аппарат, названный схемой функциональной целостности (СФЦ) [1–3].

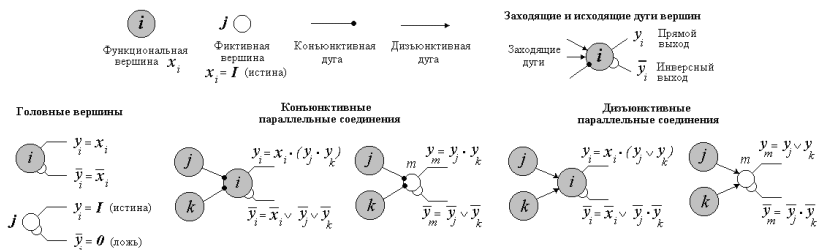


Рис. 1. Изобразительные средства и типовые фрагменты СФЦ.

На рис. 1 изображены основные графические средства, простейшие фрагменты СФЦ и соответствующие им логические переменные и уравнения. Графический аппарат СФЦ ОЛВМ по построению является математически строгим. Его полным, точным и однозначным математическим эквивалентом является система логических уравнений. Логическая полнота графического аппарата СФЦ позволяет представлять с его помощью все виды традиционных монотонных структурных моделей систем (деревья отказов и событий, блок-схемы и графы связности с циклами), а также принципиально новый класс немонотонных структурных моделей различных свойств исследуемых объектов. Это в полном объеме подтверждено в НИР [18] и отчете [19] (см. сайт ОАО «СПИК СЗМА»¹: <http://www.szma.com/pkasm.shtml>).

Разработанные в классических логико-вероятностных методах [6–10, 18] различные способы определения логических функций работоспособности систем (ФРС) на основе деревьев отказов, деревьев событий, блок-схем и графов связности оказались непригодными для построения в ОЛВМ всех видов монотонных и немонотонных логических моделей на основе СФЦ. Поэтому в ОЛВМ был разработан соответствующий всем возможностям аппарата СФЦ и алгебре логики универсальный графоаналитический метод (УГМ) решения систем логических уравнений и соответствующий программный модуль автоматического построения монотонных и немонотонных логических ФРС [4, 5]. УГМ позволяет на основе любых СФЦ и критериев реализации исследуемых свойств систем (работоспособности, отказа, безопасности, аварии, риска, эффективности и др.) строить все виды монотонных и немонотонных логических ФРС. При этом с помощью

¹ ОАО «Специализированная инженеринговая компания «Севзапмонтажавтоматика».

УГМ на основе СФЦ (систем логических уравнений) любого вида могут быть определены прямые логические функции (работоспособность, безопасность), обратные логические функции (отказ, авария) и немонотонные смешанные ФРС (частичная работоспособность, аварии с различными уровнями последствий и т.п.). Для иллюстрации сказанного далее рассмотрены структурные, логические и вероятностные модели известного тестового примера ОЛВМ-моделирования свойства безопасности участка железной дороги [3, 18, 19].

На рис. 2.А изображена исходная функциональная схема исследуемого участка железной дороги. Из этой схемы видно, что авария может произойти по двум возможным исходным причинам:

- из-за излома рельса (исходное событие 1),
- из-за наличия предмета на рельсах (исходное событие 2).

Авария может быть предотвращена, если машинист своевременно обнаружит опасность — предмет на рельсах (событие 2) или сигнал индикатора излома рельса (событие 3), — включит тормозную систему (событие 4), и она при этом сработает безотказно (событие 5).

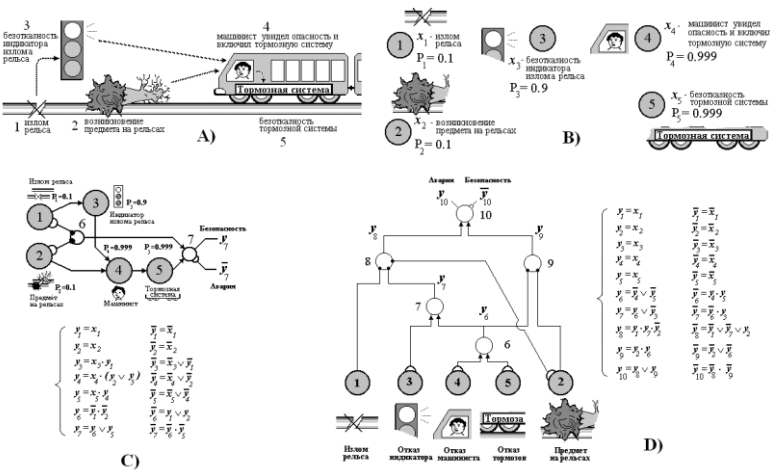


Рис. 2. Разработка вариантов СФЦ безопасности участка железной дороги. Арабскими цифрами обозначены события.

На рис. 2.В изображены пять функциональных вершин 1–5, представляющих выделенные исходные элементарные случайные события $x_1 - x_5$, которые будут использоваться для построения СФЦ безопас-

ности рассматриваемого участка железной дороги, и указаны заданные значения вероятностей $p_1 - p_5$ их свершения.

Логическая полнота и универсальность ОЛВМ позволяет пользователю на этапе постановки задачи выбрать прямой, обратный или смешанный подход для построения СФЦ исследуемого свойства безопасности участка железной дороги. В рассматриваемом примере выбор прямого подхода означает, что разрабатываемая СФЦ должна представлять все логические условия безопасности системы, т.е. условия невозникновения аварии. При выборе обратного подхода разрабатываемая СФЦ должна быть логически противоположной и представлять все логические условия возникновения аварии. Далее рассматриваются примеры реализации процедур прямого и обратного подходов к ОЛВМ построению СФЦ, определению логических ФРС и много-членов ВФ.

На рис. 2.С изображена СФЦ и записана соответствующая система логических уравнений, которые разработаны на основе прямого подхода к применению ОЛВМ. В этой схеме представлены следующие логические условия:

– прямая выходная функция $y_7 = y_6 \vee y_5$ является логическим критерием безопасности (не возникновения аварии) на рассматриваемом участке железной дороги;

– первое входящее в y_7 условие $y_6 = \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$ определяет, что авария не происходит, если нет ни одной исходной причины ее возникновения;

– второе входящее в y_7 условие $y_5 = x_5 \cdot y_4 = x_5 \cdot x_4 \cdot (x_1 \vee y_3)$ определяет, что при возникновении хотя бы одной причины возможной аварии машинист своевременно включил тормозную систему, которая сработала безотказно;

– не раскрытая в правой части y_5 функция $y_3 = x_3 \cdot y_1 = x_3 \cdot x_1$ определяет условие того, что информация об изломе рельса поступает машинисту только при безотказной работе индикатора 3;

– объединяя приведенные логические условия и решая соответствующую систему логических уравнений для критерия безопасности, получаем

$$y_7 = y_6 \vee y_5 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_5 \cdot x_4 \cdot (x_2 \vee x_3 \cdot x_1). \quad (1)$$

Таким образом, и структурная (см. рис. 2.С) и логическая (1) модели безопасности рассматриваемого участка железной дороги немотонны и могут быть корректно представлены только ОЛВМ.

На рис. 2.D изображены СФЦ и соответствующая система логических уравнений, построенные на основе обратного подхода к постановке задачи ОЛВМ анализа безопасности участка железной дороги. В этой схеме представлены следующие логические условия, приводящие к возникновению аварии:

– прямая выходная функция $y_{10} = y_9 \vee y_8$ представляет общее условие возникновения аварии, которое включает дизъюнкцию двух частных условий: y_9 — авария вследствие наличия предмета на рельсах, y_8 — авария вследствие возникновения излома рельса;

– условие возникновения аварии из-за наличия предмета на рельсах $y_9 = x_2 \cdot (\bar{x}_4 \vee \bar{x}_5)$ происходит, если есть предмет на рельсах (x_2), но машинист его не увидел и не включил тормозную систему (\bar{x}_4), или она отказала (\bar{x}_5);

– условие возникновения аварии из-за излома рельса $y_8 = y_1 \cdot y_7 \cdot \bar{y}_2$ включает в себя составляющие собственно возникновения этой аварии $y_1 \cdot y_7 = x_1 \cdot (\bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5)$ и дополнительное условие $\bar{y}_2 = \bar{x}_2$ отсутствия предмета на рельсах, которое может показаться не очевидным и часто пропускается при использовании обратного подхода;

– объединяя приведенные логические условия и решая соответствующую систему логических уравнений для критерия аварии, получаем

$$y_{10} = y_8 \vee y_9 = x_1 \cdot (\bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5) \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot (\bar{x}_4 \vee \bar{x}_5). \quad (2)$$

Структурная (см. рис. 2.D) и логическая (2) модели аварии рассматриваемого участка железной дороги также немонокотонны и могут быть корректно представлены только ОЛВМ.

Отметим, что и прямая и обратная постановка задачи абсолютно эквивалентны и дают одинаковые результаты моделирования и расчетов показателей безопасности. Это означает, что для (1) и (2) справедливы следующие соотношения:

$$y_7 = \bar{y}_{10}; \quad y_{10} = \bar{y}_7.$$

Кроме того, на основе прямой СФЦ безопасности (см. рис. 2.C) с помощью УГМ по обратному критерию \bar{y}_7 определяется точная логическая функция аварии (2) и, наоборот, по обратной СФЦ (см. рис.

2.D) и противоположному критерию \bar{y}_{10} определяется точная логическая функция безопасности (1).

Таким образом, в ОЛВМ и соответствующих ПК АСМ впервые пользователю предоставляется возможность выбора любого из существующих подходов (прямого, обратного или смешанного) для постановки задачи, построения с помощью СФЦ любого из существующих видов структурных моделей (дерево отказов, дерево событий, блок-схемы, графа связности и их немонотонные комбинации). При этом на основе любого выбранного подхода и вида разработанной СФЦ с помощью ОЛВМ могут без ограничений строиться все виды логических ФРС, представляющих или кратчайшие пути успешного функционирования (КПУФ), или минимальные сечения отказов (МСО), или их немонотонные комбинации, например, (1) и (2). Указанные свойства ОЛВМ проверены и подтверждены множеством исследовательских, практических работ и процедурой аттестации комплекса «Арбитр» Ростехнадзором РФ [18, 19].

До настоящего времени наибольшее практическое применение нашли разработанные в ОЛВМ и реализованные в различных программных комплексах (ПК) технологии АСМ [4, 5, 20] аналитические формы построения (на основе СФЦ и ЛКФ) логических и расчетных вероятностных математических моделей свойств надежности (безотказности), стойкости, живучести, безопасности, технического риска, ожидаемого ущерба и эффективности исследуемых системных объектов и процессов. Аналитический расчет вероятностных показателей основывается на преобразовании логических ФРС в правильные расчетные многочлены вероятностных функций (ВФ). В рассматриваемом примере путем преобразования ФРС (1) и (2) разработанным в ОЛВМ комбинированным методом [2] получены следующие многочлены расчетных вероятностных функций:

$$\begin{aligned}
 p\{y_7\} &= p\{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_5 \cdot x_4 \cdot (x_2 \vee x_3 \cdot x_1)\} = \\
 &= q_1 \cdot q_2 + p_5 \cdot p_4 \cdot (p_2 \vee p_3 \cdot p_1 \cdot q_2) = 0.990638181; \quad (3) \\
 p\{y_{10}\} &= p\{x_1 \cdot (\bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5) \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot (\bar{x}_4 \vee \bar{x}_5)\} = \\
 &= p_1 \cdot (q_3 \cdot q_2 \cdot p_5 \cdot p_4 + q_4 \cdot q_2 \cdot p_5 + q_5 \cdot q_2) + \\
 &\quad + p_2 \cdot (q_4 + q_5 \cdot p_4) = 0.009361819. \quad (4)
 \end{aligned}$$

На рис. 3 приведены результаты автоматизированного ОЛВМ-моделирования и расчета вероятности (3) невозникновения аварии на участке железной дороги, полученные с помощью ПК АСМ 2001 [4, 5].

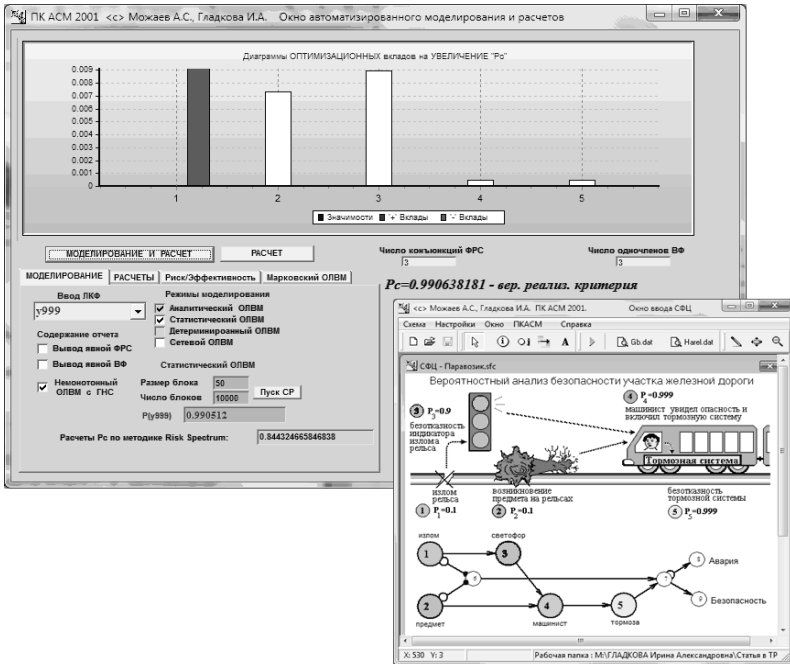


Рис. 3. Результаты автоматизированного анализа безопасности участка железной дороги.

В наиболее полном объеме современный уровень разработки аналитического ОЛВМ и технологии АСМ характеризуются результатами аттестации промышленного образца комплекса «Арбитр» (ПК АСМ СЗМА) Ростехнадзором РФ [19, 20], проведенной в 2005–2007 гг. На тот период были успешно аттестованы 46 функций ОЛВМ [19], реализованные в комплексе «Арбитр», которые охватывают следующие основные вопросы моделирования и расчета показателей надежности и безопасности структурно-сложных систем объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) и других опасных производственных объектов (ОПО) различного назначения [19, 20, 21]:

- 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;
- 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;
- 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: отказа на требование, отказа в режиме работы и скрытого отказа в режиме ожидания (по методике, реализованной в ПК CRISS 4.0);
- структурный и автоматический учет отказов групп элементов по общей причине (модели альфа- и бета-факторов 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.

В основных режимах ОЛВМ-моделирования комплекс «Арбитр» [20] обеспечивает расчет системных 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 [19] исследуемых свойств систем с такой же точностью, как и ранее аттестованные программные средства Risk Spectrum [12], CRISS-4.0 [14] и Saphire-7 [15], последнее имеет лицензию Комиссии ядерного регулирования США.

Вместе с тем общей проблемой всех аналитических логико-вероятностных методов и их программных реализаций остается ограничение по быстродействию и размерности построения логических ФРС и многочленов ВФ. В настоящее время наилучшие результаты в решении этой проблемы получены на основе разработки в ОЛВМ и внедрении в ПК АСМ методов односвязной структурной декомпозиции СФЦ [2, 4, 5, 19, 20], УГМ построения логических ФРС и комбинированного метода определения многочленов ВФ. Эффективность указанного способа решения проблемы быстродействия и размерности в ОЛВМ иллюстрируется следующим примером. На рис. 4 изображен интерфейс пользователя ПК «Арбитр» [20] с результатами решения ОЛВМ тестовой задачи большой размерности, приведенными в работе [19].

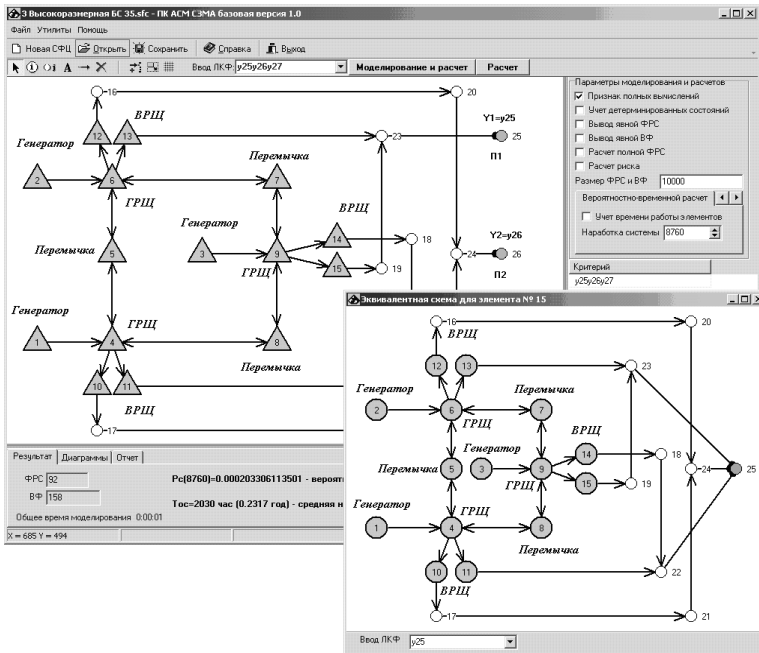


Рис. 4. Результаты ОЛВМ решения высококоразмерного варианта «задачи 35».

Рассматривается структурная схема работоспособности электроэнергетической системы (ЭС) известной «задачи 35», разработанной основоположником отечественной школы логико-вероятностного моделирования академиком РАЕН И.А. Рябининым [9].

Особенность данного варианта этой задачи состоит в том, что каждый из 15 элементов системы (на рис. 4 обозначены треугольниками) представляет собой односвязную подсистему, имеющую аналогичную структурную схему работоспособности (см. правую нижнюю часть рис. 4). В табл. 1 приведены результаты решения трех вариантов этой задачи.

Таблица 1. Результаты моделирования и расчета надежности ЭС

| ЛКФ | Размер ФРС | Показатели надежности ЭС |
|---|----------------------|--|
| $y_{25} \vee y_{26} \vee y_{27}$ | 2.6 E+011 КПУФ | $P_c(8760) = 0.844995710941$ $T_{oc} = 1.16$ год [год] |
| $\overline{y_{25} \cdot y_{26} \cdot y_{27}}$ | 8 621 131 МСО | $Q_c(8760) = 0.155004289059$ |
| $y_{25} \cdot y_{26} \cdot y_{27}$ | 3.4941 E+019 КПУФ | $P_c(8760) = 0.000203306113501$ $T_{oc} = 0.2317$ [год] |

При выполнении расчетов использовались следующие значения показателей надежности элементов невосстанавливаемой ЭС:

$T_{O_i} = 2$ года — средняя наработка на отказ элементов $i = 1, 2, \dots, 225$;

$t = 1$ год = 8760 ч. — общая наработка системы.

Во втором столбце табл. 1 приведены количественные оценки размеров полных логических функций каждой из трех задач (число кратчайших путей успешного функционирования или минимальных сечений отказов). Размеры этих логических функций столь велики (достигают $3.4941 \text{ E}+19$ конъюнкций), что в прямой постановке (без применения ОЛВМ односвязной структурной декомпозиции) ни одна из указанных задач аналитически не может быть решена ни одним из существующих логико-вероятностных методов. Для решения каждой из указанных задач с помощью ОЛВМ и односвязной структурной декомпозиции комплексу «Арбитр» потребовалось менее 1 с машинного времени.

Аналитический ОЛВМ постоянно совершенствуется, и на его основе создаются новые аналитические методы построения логических и вероятностных математических моделей [3], выполнения односвязной и многосвязной структурной декомпозиции [2], учета групп несовместных событий [21], оценки роли элементов (полных и шаговых значимостей, положительных и отрицательных вкладов) в обеспечении надежности, живучести, безопасности, риска и эффективности функционирования систем.

3. Новые направления развития ОЛВМ. К настоящему времени в ОЛВМ сформировались и активно развиваются ряд теоретически взаимосвязанных, но относительно самостоятельных по областям практического применения разделов и направлений. В рамках данной статьи приводится только краткая характеристика новых направлений ОЛВМ.

3.1. Оптимизационный ОЛВМ. Это новое научное направление использования формируемых с помощью ОЛВМ и ПК АСМ логических и вероятностных математических моделей в качестве целевых функций постановки и решения различных задач структурной и параметрической оптимизации сложных системных объектов и процессов. В рамках данного направления созданы специальные логико-вероятностные методы и программные средства оптимизации проектных решений при разработке сложных технических систем по различ-

ным критериям «надежность/стоимость». К ним относятся ОЛВМ-методы: — минимизации стоимости при выполнении требований к надежности проектируемой системы; — максимизации надежности при заданных ограничениях на стоимость; — структурной и параметрической оптимизации путем удаления лишних элементов, замены элементов и/или изменения кратности их резервирования [22, 5, 20].

3.2. Статистический ОЛВМ. Становление этого направления развития ОЛВМ связано с разработкой А.О. Алексеевым итерационного логико-статистического метода (ИЛСМ) [23] и его полной программной реализацией, которая в настоящее время внедрена в программные комплексы технологии АСМ [5, 20]. ИЛСМ работает на основе постановки задач в форме СФЦ и ОЛВМ решения соответствующих систем логических уравнений. Но в ИЛСМ не требуется построения ни логических, ни расчетных вероятностных математических моделей. Это позволяет решать с помощью статистического ОЛВМ задачи вероятностного анализа систем такой большой размерности, которые не могут быть решены методами аналитического ОЛВМ. В настоящее время осуществляется дальнейшее развитие ИЛСМ в направлениях получения оценок вероятностно-временных показателей надежности и безопасности систем, решения задач анализа неопределенностей и учета различных зависимостей, которые не имеют аналитического решения.

3.3. Марковский ОЛВМ. До последнего времени все логико-вероятностные методы выполняли моделирование на основе структурных схем состояний элементов исследуемых системных объектов (деревьев отказов, деревьев событий, блок-схем, графов связности, СФЦ). Другим направлением анализа систем являются известные методы марковского моделирования, основанные на структурных схемах состояний исследуемой системы в целом. Очевидно, что все логико-вероятностные задачи, в принципе, могут быть решены методами марковского моделирования. Однако техническим препятствием здесь является известная экспоненциально нарастающая размерность графов переходов состояний марковских моделей. Часто она не позволяет вручную даже формализовано ставить задачи марковского моделирования, т.е. строить исходные графы переходов состояний систем, состоящих из большого числа элементов. Поэтому основу марковского ОЛВМ-моделирования составляют специальные аналитические методы, которые позволяют на основе СФЦ автоматически строить высокомерные графы переходов состояний цепей Маркова и марковских случайных процессов. Дальнейшее автоматизированное моделирова-

ние и расчеты могут осуществляться традиционными методами марковского анализа. Одна из таких задач, разработанная в ОЛВМ и реализованная в ПК АСМ [5], позволяет моделировать и рассчитывать условные законы живучести систем к различным последовательностям поражающих воздействий [24].

3.4. Сетевой ОЛВМ. Существует достаточно большой класс задач структурно анализа, в которых, наряду с общесистемными структурными факторами (последовательными, параллельными, циклическими соединениями элементов и т.д.) необходимо учитывать случайные последовательности элементарных событий (отказов, поражений, восстановлений и др.) во времени. Но традиционные логико-вероятностные методы являются комбинаторными по построению и последовательности элементарных событий учитывать не могут. Это обусловлено комбинаторностью самого основного аппарата моделирования — алгебры логики. Поэтому для создания сетевых ОЛВМ требуется разработка соответствующих новых математических аппаратов алгебры логики и теории вероятностей, позволяющих корректно учитывать случайные последовательности событий и рассчитывать их вероятностные характеристики [25].

3.5. Детерминированный ОЛВМ. Исторически все логико-вероятностные методы имели основной конечной целью моделирования расчет вероятностных показателей различных свойств исследуемых системных объектов и процессов. В последние годы на практике все более востребовано решение вопросов детерминированного анализа структурно-сложных системных объектов и процессов. Вот некоторые из задач детерминированного анализа систем:

- определение детерминированных структурных последствий достоверного возникновения отдельных и групповых отказов элементов, их поражений внешними воздействиями или аварийными ситуациями;
- моделирование и расчет «остаточных» вероятностных характеристик надежности, живучести или безопасности функционирования систем после детерминированного изменения их состояний;
- определение и расчет изменений детерминированных показателей эффективности функционирования различных видов и классов систем после возникновения достоверных изменений их состояний;
- моделирование и расчет детерминированных показателей риска функционирования систем после возникновения различных аварийных ситуаций и аварий в процессе эксплуатации системы (детерминированный мониторинг рисков);

– методы решения обратных задач детерминированного анализа, позволяющие выполнять автоматизированное диагностирование наиболее вероятных причин возникновения отказов, аварийных ситуаций и аварий в процессе эксплуатации систем.

3.6. ОЛВМ анализа технического риска и ожидаемого ущерба.

В данном разделе ОЛВМ разрабатываются методы и программные средства анализа качественно сложных системных объектов и процессов различного назначения (функционируют в разных состояниях с разной эффективностью или разными уровнями последствий аварий). Расчет этих показателей предусмотрен требованиям РД 03-418—01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов». В настоящее время достигнуты следующие результаты разработки данного направления:

- разработаны теоретические основы аналитического ОЛВМ-моделирования качественно сложных систем [21];
- автоматизированы построение на основе СФЦ и ЛКФ математических моделей и расчет показателей технического риска и ожидаемого ущерба от различных вариантов аварийных ситуаций и аварий ОПО с оценкой значимостей и вкладов элементов [5, 20].

Рассмотрим тестовый пример ОЛВМ-моделирования и расчета ожидаемого ущерба аварии качественно сложной ЭС (см. рис. 4, «задача 35»). В методических указаниях по анализу риска ОПО (РД 03-418—01) показатель «ожидаемый ущерб» определен, как «математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии».

Для ОЛВМ-моделирования и расчета ожидаемого ущерба от возможных аварий рассматриваемой ЭС определяются условия Y_{oj} возникновения нескольких вариантов ее отказов (в примере $j = 1, 2, 3$), приводящих к авариям с разными уровнями последствий F_j (потерь, ущербов) (табл. 2).

Таблица 2. Условия возникновения и уровни последствий аварий ЭС

| Критерии уровней аварий | Последствия аварий |
|--|------------------------|
| $Y_{O1} = \bar{y}25 \cdot \bar{y}26 \cdot \bar{y}27$ | $F_1 = 100 \text{ ye}$ |
| $Y_{O2} = \bar{y}25 \cdot \bar{y}26 \cdot y27 \vee \bar{y}25 \cdot y26 \cdot \bar{y}27 \vee y25 \cdot \bar{y}26 \cdot \bar{y}27$ | $F_2 = 70 \text{ ye}$ |
| $Y_{O3} = \bar{y}25 \cdot y26 \cdot y27 \vee y25 \cdot y26 \cdot \bar{y}27 \vee y25 \cdot \bar{y}26 \cdot y27$ | $F_3 = 30 \text{ ye}$ |

На рис. 5 изображен интерфейс пользователя с результатами решения данной задачи комплексом «Арбитр».

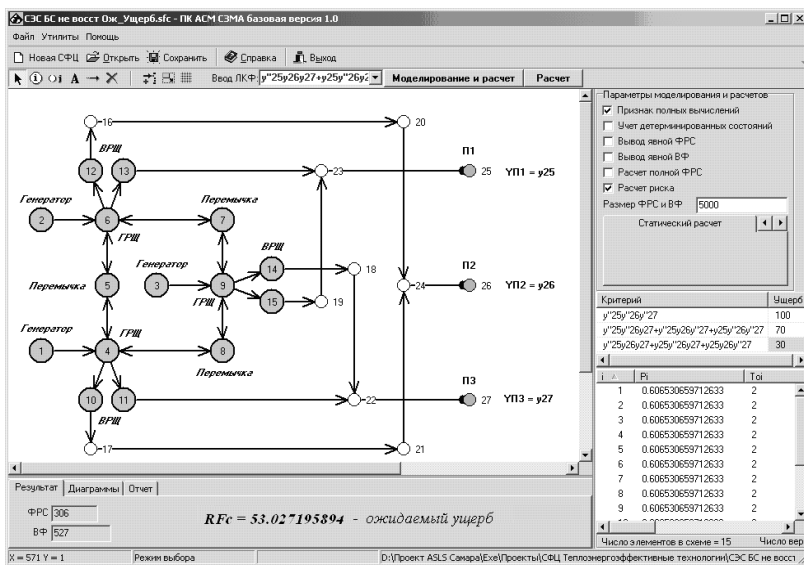


Рис. 5. ОЛВМ расчета ожидаемого ущерба аварии ЭС комплексом «Арбитр».

После ввода в комплекс «Арбитр» СФЦ ЭС параметров надежности элементов, критериев и уровней аварий (см. табл. 2) с помощью качественно сложного ОЛВМ-моделирования в комплексе «Арбитр» получают следующие результаты расчета ожидаемого ущерба:

1. число конъюнкций ФРС аварии — 306;
2. число одночленов многочлена ВФ аварии — 527;
3. ожидаемый ущерб возможной аварии — 53,027 условных единиц.

Диаграмма положительных вкладов элементов в ожидаемый ущерб от возможной аварии приведена на рис. 6.

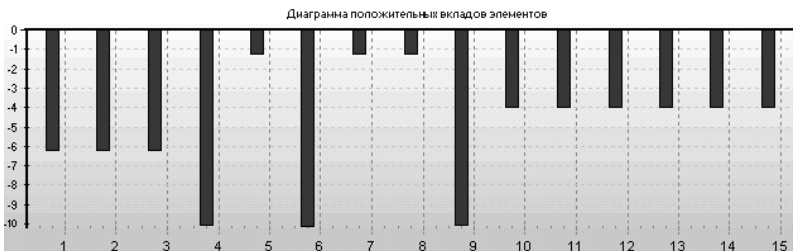


Рис. 6. Диаграмма положительных вкладов в ожидаемый ущерб от возможной аварии.

Из рис. 6 следует, что к наибольшему снижению ожидаемого ущерба от возможной аварии приведут мероприятия, направленные на увеличение надежности элементов 4, 6 и 9 данной системы электропитания.

4. Заключение. В настоящее время более десяти промышленных организаций и вузов РФ активно применяют ОЛВМ, теорию, технологию и ПК АСМ в своей практической деятельности. С опытом их работы можно ознакомиться по материалам доклада проф. А.С. Можаяева на семинаре НТЦ «Промышленная безопасность» от 23.11.09 (http://safety.moy.su/Seminars/PromBezNTC/17/ppt_Mozhaev_17PB.pdf). Сравнение и тестирование теоретических и технологических основ ОЛВМ, проведенные в последние годы многими организациями, убедительно показали их преимущества по отношению к традиционным монотонным теориям, технологиям и программным комплексам логико-вероятностного моделирования отечественной и зарубежной разработки [18, 19]. Приведенный в статье краткий обзор перспективных разработок новых разделов ОЛВМ показывает основные направления его дальнейшего развития. Более полные описания теоретических положений новых разделов ОЛВМ предполагается представить в последующих выпусках сборников трудов СПИИРАН.

Литература

1. *Можаяев А.С.* Логико-вероятностный подход к оценке надежности автоматизированных систем управления. Л.: Изд. ВМА им. Н.Г. Кузнецова. Деп. п/я А-1420 № Д04750, 1982. 24 с.
2. *Можаяев А.С.* Общий логико-вероятностный метод анализа надежности структурно-сложных систем, Учебное пособие. Л.: Изд. ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 1988. 68 с.
3. *Можаяев А.С.* Безопасность России М.: МГФ «Знание», 2006. С. 153–197

4. *Можжаев А.С., Гладкова И.А.* Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛЮГ и ВФ) // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611100. М.: Изд. Роспатента РФ, 12 мая 2003. 1 с.
5. *Можжаев А.С. Гладкова И.А.* Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001) // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099. М.: Изд. Роспатента РФ, 12 мая 2003. 1 с.
6. *Диллон Б., Сингх Ч.* Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. 318 с.
7. *Хенли Э. Дж., Кумамот Х.* Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
8. *Рябинин И.А.*, Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л.: Судостроение, 1967. 362 с.
9. *Рябинин И.А., Черкесов Г.Н.*, Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 286 с.
10. *Парфенов Ю.М.*, Надежность, живучесть и эффективность корабельных электроэнергетических систем. Учебное пособие. Л.: Изд. ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 1989. 324 с.
11. *Рябинин И.А.* Надежность. Живучесть. Безопасность. Очерки разных лет. Новочеркасск: Изд. Южно-Российского государств. техн. ун-та (Новочеркасского политехнического института), 2008. 580 с.
12. Risk Spectrum PSA Professional 1.20/Theory Manual, RELCON AB, Sweden, 1998. 57 с. [электронный ресурс: <http://www.riskspectrum.com>].
13. Код «РИСК» для выполнения стандартных вероятностных расчетов безопасности АС. М.: Изд. ОЦРК, 2003. 36 с.
14. *Бахметьев А.М., Былов И.А., Милакова Ю.В.* Верификация и обоснование программы CRISS 4.0 для моделирования и анализа систем безопасности ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности. Ч. 1 (заключительная редакция) // Отчет о НИР. Нижний Новгород: ФГУП ОКБМ им. И.И. Африкантова, 2005. 88 с. [электронный ресурс: <http://www.nuclear.ru/productions/view.html?From=25&cat=42>].
15. Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Version 7.0 (saphire.inel.gov). Reference Manual¹, 2002.
16. *Викторова В.С., Кунтшиер Х., Петрухин Б.П., Степанянц А.С.* Relex — программа анализа надежности, безопасности, рисков // Надежность. 2003. №4 (7). С. 42–64.
17. Relex Software Corhoration, Reliability: A Practitioner's Guide, Relex Software, 2003.
18. Сравнительный анализ технологий деревьев отказов и автоматизированного структурно-логического моделирования, используемых для выполнения работ по вероятностному анализу безопасности АЭС и АСУТП на стадии проектирования / Отчет о НИР. ФГУП СПбАЭП, ОАО «СПИК СЗМА», (Санкт-Петербург), ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова (Москва). Шифр «Технология 2004». СПб.: ОАО «СПИК СЗМА», 2005. 282 с.
19. *Можжаев А.С., Киселев А.В., Струков А.В., Скворцов М.С.* Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем" (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0, «Арбитр») /

¹ САПФИР. Программа вероятностного анализа риска атомных электростанций), Лицензия Комиссии Ядерного Регулирования США, 2002.

- чет о верификации программного средства. Заключительная редакция. СПб.: ОАО «СПИК СЗМА», 2007. 1031 с.
20. *Можжаев А.С.* Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем «Ар-битр» (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0. СПб: Изд. ОАО «СПИК СЗМА», 2007. 6 с.
 21. *Можжаев А.С.* Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем. Ч. I. // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Вып. 1 / Под ред. И.А. Рябина. СПб., 1994. С. 23–53.
 22. *Скворцов М.С.* Решение задачи оптимизации надежности с помощью метода логико-вероятностных вкладов // Надежность. 2009. № 2 (30). С. 15–29.
 23. *Алексеев А.О.* Логико-статистический метод оценки устойчивости функционирующих сложных и пространственных объектов // Решение эксплуатационных задач на ЭВМ. 1992. № 1. С. 13–24.
 24. *Иванов М.В., Можжаев А.С., Рябинин И.А.* Логико-вероятностные методы расчета живучести автоматизированных электроэнергетических систем судов // Вопросы судостроения. Сер: Судовая автоматика. 1984. Вып. 30. С. 3–16.
 25. *Можжаев А.С.* Учет временной последовательности отказов элементов в логико-вероятностных моделях надежности // Надежность систем энергетики. Новочеркасск, 1990. С. 94–103.

Мусаев Александр Азерович — д-р техн. наук, профессор; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской группы информационных технологий в образовании Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН), научный консультант ОАО «Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика» (ОАО «СПИК СЗМА»). Область научных интересов: анализ данных, управление и прогнозирование в сложных динамических системах, хаотические системы. Число научных публикаций — 180. amusaev@szma.com, www.szma.com; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)350-5885, факс +7 (812)350-1113.

Musaev Alexander Azerovich — Dr. in Appl. Math., professor; leading researcher, Education Information Technology Group, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), expert, public corporation Specialized engineering company "Sevzapmontageautomatica". Research interests: data analysis, complicated dynamic systems prognosis and control, chaos systems. The number of publications — 182. amusaev@szma.com, www.szma.com; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)350-5885, fax +7(812)350-1113.

Гладкова Ирина Александровна — ведущий инженер-программист консалтингового центра комплексной безопасности ЗАО «ТЕЛРОС». Область научных интересов: вероятностный и детерминированный структурный анализ сложных динамических систем, разработка методов, алгоритмов и программ автоматизированного моделирования. Число научных публикаций — 3. gladkova@telros.ru, www.telros.ru. ЗАО «ТЕЛРОС», Большой Сампсониевский пр., д.87, лит.А, Санкт-Петербург, 194157, РФ; р.т.+7(812)346-88-90, факс +7(812)603-28-88.

Gladkova Irina Alexandrovna — Senior Software Engineer of Consulting Center complex security Closed Joint Stock Company "TELROS". Research interests: probabilistic

and deterministic structural analysis of complex dynamic systems, development of methods, algorithms and software-aided modeling. Number of publications — 3. gladkova@telros.ru, www.telros.ru. JSC "TELROS", Big Sampson Avenue, 87, liter A, St. Petersburg, 194157, Russia; office phone +7(812)346-88-90, fax +7(812)603-28-88.

Рекомендовано ИГИТО СПИИРАН, рук. канд. техн. наук, доц. А. В. Тишков.
Статья поступила в редакцию 1.12.2010.

РЕФЕРАТ

Мусаев А.А., Гладкова И.А. Современное состояние и направления развития общего логико-вероятностного метода анализа систем.

В классических методах логико-вероятностного анализа и соответствующих программных комплексах для структурного описания свойств исследуемых систем используются графические аппараты деревьев отказов, блок-схем и графов связности. Эти виды структурных схем могут представлять только функционально не полный набор из двух логических операций «И» (конъюнкция) и «Или» (дизъюнкция). Это не соответствует всем возможностям основного аппарата моделирования алгебре логики. Поэтому классические логико-вероятностные методы и соответствующие программные комплексы позволяют строить не все, а только определенные подклассы монотонных моделей свойств систем так называемого первого типа.

В целях преодоления указанного ограничения и обеспечения возможности анализа всех видов монотонных и немонотонных моделей был разработан общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) системного анализа. На всех этапах ОЛВМ используется функционально полный набор логических операций «И», «Или» и «Не» и аппарат групп несовместных событий. Это позволило впервые реализовать в ОЛВМ все возможности основного аппарата моделирования — алгебры логики и строить все виды монотонных и новый класс немонотонных моделей свойств сложных систем. Одновременно с разработкой ОЛВМ была осуществлена его полная алгоритмизация и программная реализация процессов построения высокоразмерных аналитических математических моделей и выполнения на их основе показателей системных свойств. Теория и технология аналитического ОЛВМ успешно прошли всестороннюю теоретическую проверку и аттестацию программных средств Ростехнадзором РФ. Накоплен опыт практического применения ОЛВМ и комплекса «Арбитр» промышленными организациями и вузами РФ. Продолжается дальнейшее совершенствование и развитие теории аналитического ОЛВМ, теории, технологии и программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования. В настоящее время кроме аналитического ОЛВМ сформировалось несколько новых, относительно самостоятельных разделов этого научного направления. К ним относятся: 1) оптимизационный ОЛВМ, который охватывает вопросы автоматизированной параметрической и структурной оптимизации высокоразмерных систем; 2) статистический ОЛВМ, позволяющий получать вероятностные оценки свойств систем без построения аналитических моделей; 3) марковский ОЛВМ, в котором центральное место занимают методы автоматического построения высокоразмерных графов переходов состояний систем; 4) сетевой ОЛВМ, позволяющий учитывать случайные последовательности элементарных событий; 5) детерминированный ОЛВМ, охватывающий несколько классов задач моделирования и расчета специальных системных характеристик; 6) ОЛВМ анализа технического риска и ожидаемого ущерба различных опасных производственных объектов.

SUMMARY

Musaev A.A., Gladkova I.A. **Current status and directions of a general logic-probabilistic method of systems analysis.**

In the classical methods of logical and probabilistic analysis and the corresponding software complexes for structural description of the properties of the systems used by graphic devices failure trees, flow charts and graphs of connectivity. These types of structural diagrams may represent only a functionally incomplete set of the two logical operations "AND" (conjunction) and "OR" (disjunction). This does not fit for all the capabilities of the basic apparatus of the simulation — logical algebra. Therefore classical logic-probabilistic methods and corresponding software systems make it possible to build not everything, but only certain subclasses of monotone models of properties of systems of so-called first type.

In order to overcome this limitation and enable the analysis of all types of monotonic and nonmonotonic models, was developed by a common logic-probabilistic method (CLPM) of system analysis. At all stages CLPM used functionally complete set of logical operators AND, OR and NOT, and the apparatus of groups of incompatible events.

This allowed for the first time to realize all the opportunities in CLPM main vehicle simulation - the algebra of logic and build all types of monotonic and a new class of nonmonotonic models of properties of complex systems. Simultaneously with the development CLPM was carried out to complete algorithmic and software implementation processes for constructing high-resolution dimensional analytical mathematical models and implementation based on these indicators of the system properties.

Theory and technology of analytical CLPM successfully passed comprehensive theoretical review and certification of software Rostekhnadzor RF. Accumulated experience in the practical application of CLPM and complex ARBITR industry organizations and university of Russia. Continues further improvement and development of the theory of analytic CLPM, theory, technology and software systems of automated structural and logical simulation.

Currently, besides the analytical CLPM formed several new, relatively independent part of this scientific direction.

These include: Optimization CLPM, which covers questions of the automated parametric and structural optimization of highly-dimensional systems; Statistics CLPM, which allows to get probabilistic assessment of the properties of systems without the construction of analytical models; Markov CLPM, in which methods of automatic constructing of highly-dimensional graphs of conversion of states of systems occupy the central place; Network CLPM, allowing to take into account the random sequence of elementary events; deterministic CLPM, covering several classes of problems of modeling and calculation of the special characteristics of the system; CLPM of analysis of technical risk and expected damage of various hazardous industrial facilities.