



**Борис Владимирович Соколов** - д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ; заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН).

Специалист в области комплексного моделирования и проактивного управления сложными динамическими объектами с перестраиваемой структурой. Автор более 450 печатных трудов в отечественных и зарубежных изданиях.

## **КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ: ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ**

**Михаил Юрьевич Охтилев, Александр Николаевич Павлов,  
Александр Михайлович Плотников, Семен Алексеевич Потрясаев,  
Борис Владимирович Соколов,  
Рафаэль Мидхатович Юсупов (Санкт-Петербург)**

*Тел.: 8-812-328-01-03, e-mail: [sokolov\\_boris@inbox.ru](mailto:sokolov_boris@inbox.ru)*

В докладе проанализированы основные проблемы комплексного моделирования сложных объектов, а также существующие и перспективные методологии и технологии реализации указанного вида моделирования. Приведены примеры практической реализации технологий комплексного моделирования применительно к задачам синтеза систем проактивного управления космическими аппаратами, а также многокритериального оценивания и анализа производственных планов судостроительных предприятий.

### **Введение**

В настоящее время для повышения степени обоснованности и достоверности прогнозов развития существующих и проектируемых сложных объектов (СЛО) в таких наукоемких отраслях экономики как судостроение, аэрокосмическая отрасль, топливно-энергетические и военно-технический комплексы и т.п., принципиально требуется проведение упреждающего моделирования и многовариантного прогнозирования различных сценариев реализации жизненных циклов

рассматриваемых объектов. При этом на практике для таких ситуаций наиболее часто используются *имитационные моделирование* и *соответствующие имитационные модели (ИМ)* [4,28,45].

Однако, как показывает анализ, на современном этапе развития теории и технологий имитационного моделирования СЛО уже нельзя никак обойтись без рассмотрения вопросов его взаимодействия с другими теориями и технологиями моделирования в рамках интенсивно развивающейся концепции комплексного (системного) моделирования [1,7,15–17, 22,45]. Это связано со следующими основными особенностями существующих и создаваемых СЛО: повышенная сложность и размерность, избыточность, многофункциональность, распределенность, унификация, однородность основных элементов, подсистем и связей СЛО; структурная динамика, нелинейность и непредсказуемость поведения; иерархически-сетевая структура СЛО; неравновесность, неопределенность от вмешательства и выбора наблюдателя СЛО; постоянное изменение правил и технологий функционирования, изменение правил изменения технологий и самих правил функционирования СЛО; наличие как контуров отрицательной, так и положительной обратной связи, приводящих к режимам самовозбуждения (режимам с обострением) СЛО; наряду с детерминированным и стохастическим поведением, возможно хаотическое поведение СЛО; ни один элемент не обладает полной информацией о СЛО в целом; избирательная чувствительность на входные воздействия (динамическая робастность и адаптация); время реагирования СЛО на изменения, вызванные возмущающими воздействиями, оказывается больше, чем время проявления последствий этих изменений, чем интервал между этими изменениями; абсолютную полноту и достоверность информации описания реального СЛО получить принципиально невозможно в соответствии с пределом Бремерманна и теоремой Геделя [4,8,38].

Далее под комплексным (*системным*) *моделированием (КМ)* сложных объектов (СЛО) любой природы (естественных, искусственных, реально существующих и виртуальных и т.п.) будем понимать методологию и технологии полимодельного описания указанных объектов, а также комбинированного использования методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений, связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок [1,35].

Основное достоинство КМ состоит в том, что комбинированное использование альтернативных моделей, методов и алгоритмов позволяет взаимно компенсировать их объективно существующие недостатки и ограничения одновременно усилив их положительные качества. Идейная сторона КМ была заложена еще великим физиком Н. Бором при формулировке им принципа дополнительности [38,41]. Согласно этому принципу, для полного описания квантовомеханических явлений необходимо применять два взаимоисключающих («дополнительных») набора классических понятий, совокупность которых даёт исчерпывающую информацию об этих явлениях как о целостных. Применение принципа дополнительности со временем привело к созданию концепции дополнительности, охватывающей не только физику, но и биологию, психологию, культурологию, гуманитарное знание в целом [38,42,53]. Необходимо отметить, что разработка и широкое внедрение на практике в последнее десятилетие таких интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) как, например, искусственные нейросети, мультиагентные системы, нечеткая логика, технологии эволюционного моделирования и т. п., привели к появлению еще одного вида моделирования — *гибридного моделирования (ГМ)* [8,9,16,34,39,44,61,62].

Перечисленные обстоятельства объясняют особую актуальность исследования вопросов взаимодействия ИМ с другими видами и технологиями моделирования (например, аналитического, логико-алгебраического, логико-лингвистического моделирования и их комбинаций) в рамках концепции КМ исследуемых СЛО. В предлагаемом докладе рассмотрены основные особенности проведения КМ данных объектов, а также приводятся конкретные примеры решения прикладных задач КМ для различных предметных областей (космонавтика, судостроение).

### **Особенности организации и проведения комплексного моделирования сложных объектов**

Анализ многочисленных исследований проблем, связанных с ИМ, показывает, что его целесообразно использовать в следующих случаях [1,4,46]:

1) когда не существует законченной математической постановки задачи, либо еще не разработаны соответствующие аналитические методы решения задачи;

2) аналитические методы существуют, но они столь сложны (с точки зрения времени реализации на ЭВМ, затрат оперативной памяти ЭВМ и т.п.), что имитационное моделирование дает более экономичный и простой способ получения решения задачи. Кроме того, отказ от аналитических методов возможен и из-за высоких требований, предъявляемых к профессиональной подготовке лиц, которые должны использовать указанные методы при решении практических задач;

3) когда необходимо осуществить прогноз и наблюдения за ходом исследуемого сложного процесса в течение длительного интервала времени либо требуется осуществить ретроспективный анализ ранее имевших место событий и явлений. Например, моделирование Синопского морского сражения, военных действий в годы Великой Отечественной войны;

4) при моделировании таких явлений, где натурный эксперимент в реальных условиях невозможен, например, моделирование военных действий с применением ракетно-ядерного оружия;

5) когда необходимо моделировать процессы, протекающие в системах в различных масштабах времени: ускоренном либо замедленном.

Кроме того, имитационное моделирование находит широкое применение в тренажерных системах для отбора, подготовки и контроля за деятельностью операторов и лиц, принимающих решение (ЛПР), в различных звеньях системы управления СЛО.

Необходимо также подчеркнуть, что, несмотря на то, что ИМ на ЭВМ является мощным инструментом исследования сложных и больших систем, его применение в "чистом" виде целесообразно не во всех случаях. Это связано с целым рядом недостатков, которые присущи данному методу. К ним в первую очередь следует отнести [52]:

1) частный эвристический характер решений, которые находятся с помощью имитационной модели, так как они соответствуют фиксированным элементам структуры, алгоритмам поведения и значениям параметров системы, начальным условиям и воздействиям внешней среды. В общем случае доказательство полноты, замкнутости и непротиворечивости результатов, получаемых с помощью имитационных моделей, затруднительно;

2) большие временные и стоимостные затраты на программирование, отладку, проведение машинных экспериментов, разработку соответствующего информационного обеспечения;

3) трудности интерпретации полученных результатов, интуитивный характер оценок, касающихся рационального управления системой при имитационном моделировании;

4) отсутствие хороших методически обоснованных принципов построения имитационных моделей для широкого класса сложных и больших систем.

Указанные недостатки привели к необходимости совместного использования аналитических и имитационных моделей, т.е. переходу к концепции комплексного (системного) моделирования [1,7,15,23,24,35,37,39,45].

Концепция и технологии КМ на первом этапе своего существования в нашей стране и за рубежом (70-80-е годы прошлого века) наиболее полно была реализованы в рамках так называемых *имитационных систем (ИмС)*, в которых достигается глубокое сочетание имитационных и аналитических подходов к моделированию, всестороннее использование возможностей математики, ЭВМ и творческого мышления человека [1,15,23,24,37,48–50].

В настоящее время под *ИмС* понимается специальным образом организованный моделирующий комплекс, состоящий из следующих элементов: а) имитационной модели (ИМ) (иерархии имитационных моделей), отражающих определенную проблемную область; б) аналитических моделей (АМ) (иерархии аналитических моделей), дающих упрощенное (агрегированное) описание различных сторон моделируемых явлений; в) информационной подсистемы, включающей базу (банк) данных, а в перспективе базу знаний, основанную на идеях искусственного интеллекта; г) системы управления и сопряжения, обеспечивающей взаимодействие всех компонент системы и работу с пользователем (лицом, принимающим решения) в режиме интерактивного диалога [1,15,37].

Таким образом, *первая* и, пожалуй, самая *главная особенность КМ* Сло состоит в необходимости в процессе моделирования осуществлять согласование (координацию) на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях используемых моделей, методов и алгоритмов.

При этом, в общем случае, наряду с собственно модельным согласованием при решении задач анализа и синтеза Сло должно проводиться межмодельное и (или) внутримодельное согласование критериальных функций (показателей эффективности, показателей качества, целевых функций и т.п.), с помощью которых проводится сравнение и выбор альтернативных решений [10,13,22,25,31,32,58,59]. На рис. 1 в качестве примера приведена обобщенная классификация возможных вариантов соответствующих задач многокритериального анализа и выбора.

Говоря о таком широко распространенном виде КМ как аналитико-имитационное моделирование (АИМ), следует отметить, что выбор принципов, методов, моделей и алгоритмов согласования указанных моделей в каждом конкретном случае определяется целями проводимых исследований. Так, например, при решении одних задач АМ целесообразно использовать (на алгоритмическом уровне) внутри ИМ для поиска допустимых вариантов изменения экзогенных переменных (рис.2) [11,15,33].

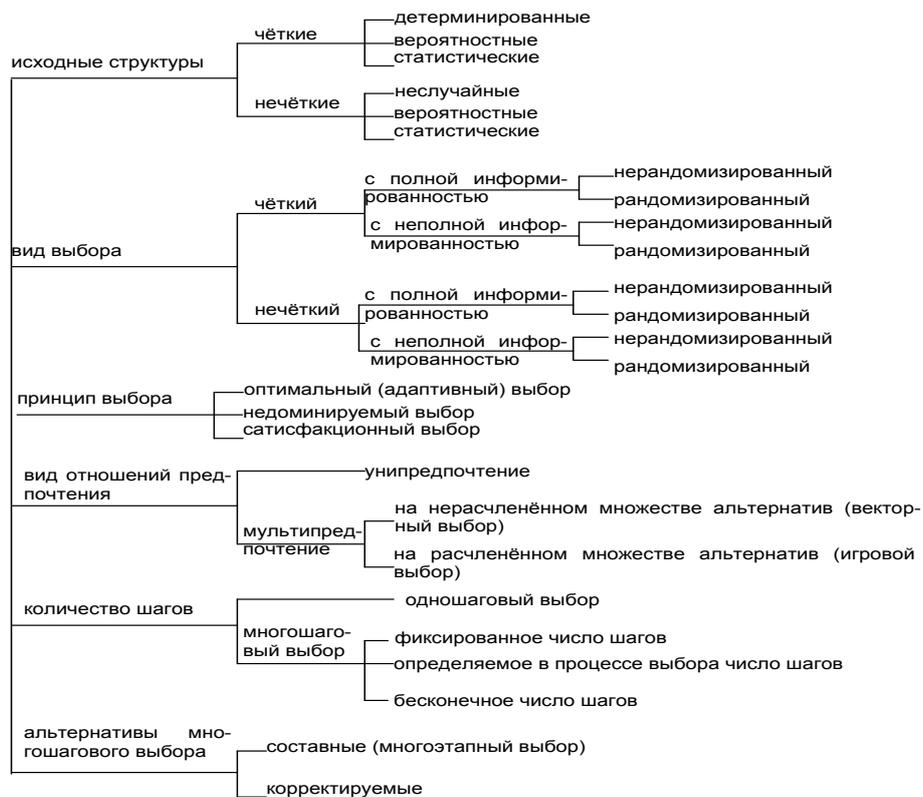


Рис.1. Обобщённая классификация задач многокритериального принятия решений в условиях неопределённости при проведении комплексного моделирования СЛО

В другом случае, наоборот, ИМ используют для уточнения релаксированных решений, полученных на АМ (рис.3) [48,54–56]. Указанное включение одного класса моделей в качестве блока в состав другого класса моделей можно использовать при большой частоте численных реализаций сравнительно малоразмерных решаемых задач, которые ввиду отлаженности процедур не требуют участия ЛПР и осуществляются в автоматическом режиме. На рис. 4 показаны другие возможные схемы взаимодействия аналитических и имитационных моделей. Проиллюстрируем на отдельных примерах возможные схемы взаимодействия разнородных моделей.

В задачах проектирования таких СЛО как сложные технические системы (СТС) моделируемая система и соответствующая критериальная функция, количественно оценивающая эффективность ее функционирования, задается, как правило, с помощью ИМ. При этом задача синтеза характеристик системы формулируется следующим образом:

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \text{extr}, \quad \mathbf{x} \in \Delta_{\beta} \quad (1)$$

где  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  – вектор конструктивных параметров проектируемой системы;  $\Delta_{\beta}$  – множество допустимых значений вектора  $\vec{x}$ . Трудность решения данной задачи состоит в том, что размерность  $\vec{x}$  при создании достаточно сложных СТС очень велика. Так, например, в работе [23] было показано, что при проектировании современного самолета перед конструктором стоит задача выбора нескольких сот (а иногда и тысячи) конструктивных параметров. Методы поиска экстремума целевой функции, основанные на проведении направленных имитационных экспериментов, в данном случае оказываются неприемлемыми. Поэтому вместо глобальной целевой функции  $f(\vec{x})$  в работах [23,24,35] было предложено вводить набор частных показателей

эффективности функционирования СЛО и соответствующих АМ, отражающих различные стороны её поведения. Так, например, в [23] было выделено  $m$  таких моделей вида

$$f_i(\vec{x}^{(i)}) \rightarrow \text{extr}_{x^{(i)} \in \Delta_\beta^{(i)}} , \quad (2)$$

где  $\vec{x} = \|\vec{x}^{(1)\top} \vec{x}^{(2)\top} \dots \vec{x}^{(m)\top}\|^\top$ ,  $\vec{x} = \|\vec{x}_1^{(i)} \vec{x}_2^{(i)} \dots \vec{x}_{L_i}^{(i)}\|^\top$ .



Рис.2.

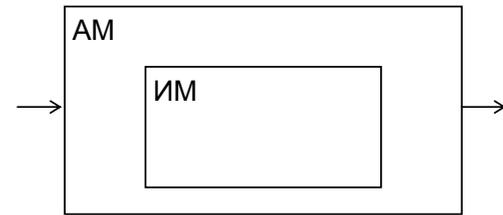


Рис.3.

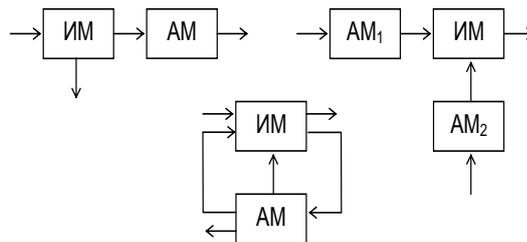


Рис. 4.

Проводя данную декомпозицию, необходимо стремиться к тому, чтобы число  $m$  не было велико ( $m \ll n$ ), каждый вектор  $\vec{x}^{(i)}$  являлся подвектором вектора  $\vec{x}$ , а число компонент  $\vec{x}^{(i)}$  было бы значительно меньше числа компонент вектора  $\vec{x}$ . При указанной декомпозиции выдвигается гипотеза о том, что экстремум в исходной задаче достигается в одной из точек множества недоминируемых альтернатив (множества Парето), определяемых в результате решения частных оптимизационных задач.

Тогда решение задачи (1) заменяется решением следующей совокупности задач:

$$f(\vec{x}(\vec{\alpha})) \rightarrow \text{extr}_{\vec{\alpha} \in \{\vec{\alpha} | x(\vec{\alpha}) \in \Delta_\beta\}} , \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(x^{(i)}) \rightarrow \text{extr}_{x^{(i)} \in \Delta_\beta^{(i)}} , \alpha_i \geq 0; \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1; \vec{\alpha} = \|\alpha_1, \dots, \alpha_m\|^\top . \quad (4)$$

При фиксированном векторе  $\vec{\alpha}$  на АМ решается задача (2) и находится соответствующий вектор  $\vec{x} = \vec{x}(\vec{\alpha})$ . Ввиду того, что размерность вектора  $\vec{\alpha}$  мала, становится возможной постановка серии прямых машинных экспериментов на исходной ИМ (1). Для этого в ИМ вводятся полученные на аналитических моделях значения вектора  $\vec{x}(\vec{\alpha})$ , соответствующие фиксированному значению  $\vec{\alpha}$ , и осуществляется проведение машинных экспериментов, направленных на поиск  $\vec{\alpha}_{\text{опт}}$ . Данная задача в силу того, что  $m \ll n$ , качественно проще исходной (1). В рассмотренном примере вектор  $\vec{\alpha}$  явился параметром согласования результатов, полученных на АМ с данными, вводимыми в ИМ.

Широкое распространение аналитико-имитационный подход получил и при решении задачи синтеза организационно-технической структур СЛО. Типовая задача синтеза данных структур чаще всего формулируется в терминах задач математического программирования вида

$$\left. \begin{array}{l} f_0(\vec{x}) \rightarrow \text{extr}_{x \in \Delta}, \\ \Delta = \{ \vec{x} \mid f_i^{(A)}(\vec{x}) \leq 0, i \in I; \varphi_j^{(u)}(\vec{x}) \leq 0, j \in J \}, \end{array} \right\}$$

где  $\vec{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$  – вектор, описывающий набор структурных параметров создаваемой системы;  $f_0$  – целевая функция (в общем случае, набор целевых функций), с помощью которой оценивается эффективность работы системы при заданном наборе параметров;  $f_i^{(A)}(\vec{x})$  – ограничения на значения параметров системы, заданные аналитически;  $\varphi_j^{(u)}(\vec{x})$  – ограничения, заданные алгоритмически (через ИМ). К числу последних ограничений чаще всего относят пространственно-временные ограничения, ограничения, с помощью которых задаются варианты воздействия внешней среды на систему [47–50,54–56]. В этом случае в зависимости от способа задания целевой функции и множества допустимых альтернатив могут быть предложены несколько схем взаимодействия АМ и ИМ [55]. На рис. 5 приняты следующие обозначения: ОМ – аналитическая оптимизационная модель, ИМ – имитационная модель; АН – анализ полученных результатов (проводимый автоматически либо с привлечением ЛПР); К – коррекция полученных решений;  $\Delta^{(A)}$ ,  $\Delta^{(u)}$  – множества (либо подмножество) допустимых альтернатив, заданные соответственно аналитически и алгоритмически;  $f_0^{(A)}$ ,  $\varphi_0^{(u)}$  – целевые функции, заданные аналитически и алгоритмически. В работах [47–50,54–56] было показано, что в зависимости от класса модели могут быть использованы различные процедуры согласования АМ и ИМ для поиска оптимального варианта структуры СдО, отличающиеся друг от друга способом генерации вариантов структуры, правилами проверки алгоритмически и аналитически заданных ограничений, способом перехода к следующему шагу.

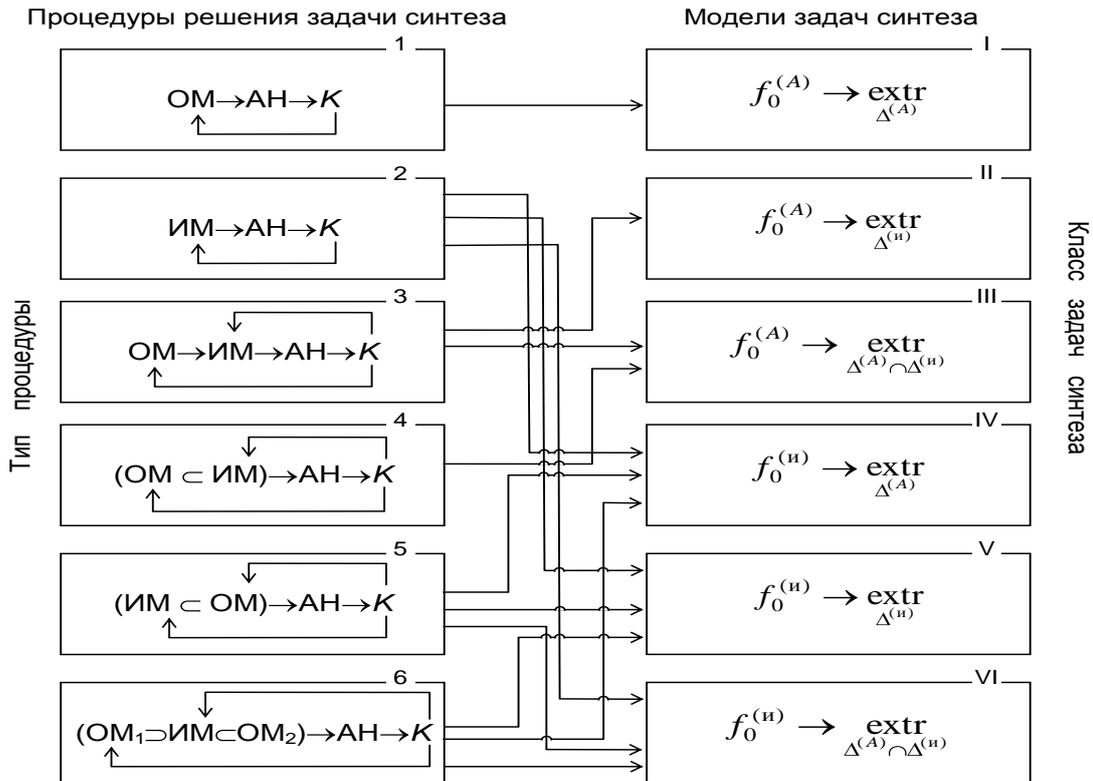


Рис.5. Возможны варианты согласования аналитических и имитационных моделей при структурно-функциональном синтезе облика СТС.

В работах [19,29,35,36,50] приведены примеры реализации еще одного варианта многокритериального аналитико-имитационного межмодельного согласования, осуществляемого путем задания множества Парето с помощью основополагающей большеразмерной многокритериальной модели дискретной оптимизации, сужения этого множества на основе машинного анализа его свойств и введения соответствующей информации в ходе интерактивной процедуры, выполняемой ЛПР, лицом, обосновывающим решения (ЛОР) с ЭВМ, а также на основе привлечения дополнительных математических моделей, обеспечивающих последующее уточнение и сужение множества Парето вплоть до принятия единственного решения. Паретовский принцип согласования при условии дополнения его положениями о сужении множества Парето создает наиболее благоприятные возможности для принятия всесторонне обоснованных решений, основывающихся на анализе поведения различных показателей эффективности внутри этого множества. При этом важное значение имеет правильная разработка стратегии сужения с привлечением компетентных специалистов и математических моделей: аналитических и имитационных.

В работе [50] предложен методологический подход снятия критериальной неопределенности при оценивании эффективности выполнения производственных планов судостроительных предприятий, вызванной многообразием лингвистически заданных показателей эффективности. Дополнительная ЛПР представлена продукционными моделями и обрабатывается с использованием параметрических нечетких мер и методами теории планирования эксперимента. Использование предлагаемого подхода позволяет полнее учитывать систему предпочтений ЛПР о критериях достижения поставленной цели, осуществлять вычисление комплексных оценок эффективности, гибко учитывающих достоинства и недостатки сравниваемых производственных планов.

Выше были приведены примеры согласования аналитических и имитационных моделей на концептуальном и алгоритмических уровнях. Вопросы согласования данных классов моделей на информационном и программном уровне должны решаться каждый раз с учетом конкретно выбранной для моделирования схемы базы данных, соответствующих программных средств. Данные вопросы подробно изложены в литературе [9,12,20,27,40].

Преимущества совместного использования АМ и ИМ при комплексном исследовании СЛО проявляются не только на этапе планирования машинных экспериментов и их КМ, но и при обработке и анализе результатов машинных экспериментов. Так, например, если существует корреляционная связь между результатами моделирования на упрощенной АМ и точной ИМ, то в этом случае можно достичь значительного уменьшения числа реализаций ИМ для получения заданной точности оценок эндогенных переменных. Поэтому в настоящее время интенсивно разрабатываются комбинированные (аналитико-имитационные) методы определения вероятностных характеристик систем [39,40,46].

Анализ показывает, что каждый из перечисленных вариантов методик организации КМ на основе АМ и ИМ свои преимущества и недостатки, а их выбор определяется спецификой конкретной предметной области, где функционирует СЛО, ее ограничениями, а также поставленными целями исследований. Более подробный анализ вопросов согласования АИМ СЛО проведен в работах [28,49,60–62] в рамках развиваемой ее авторами теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов (квалиметрии моделей и полимодельных комплексов).

Говоря о возможных конкретных путях согласования математических (аналитико-имитационных) моделей принятия решений с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе ИИТ, мы

будем, прежде всего, ориентироваться на результаты, полученные к настоящему времени в области гибридного моделирования (ГМ), которое является одной из разновидностей КМ. Говоря об указанном виде моделирования следует подчеркнуть, что оно базируется на комбинированном использовании таких современных информационных технологий как: технологии экспертных систем (Expert Systems) или систем, основанных на знаниях (Knowledge-Based Systems); технологии нечёткой логики (Fuzzy Logic); технологии искусственных нейронных сетей (Artificial Neural Networks); технологии вывода, основанного на прецедентах (Case Based Reasoning, CBR); технологии естественно-языковых систем и онтологиях; технологии ассоциативной памяти; технологии когнитивного картирования и операционного кодирования; технологии эволюционного моделирования; технологии мультиагентного моделирования [5,6,8,9].

Имеющийся технологический разрыв между бионическим интеллектом искусственных нейронных сетей (ИНС) и интеллектом систем логического вывода в настоящее время уменьшают на основе создания fuzzy-neuro-genetic информационных технологий и инструментальных средств. При этом наряду с гибридными интеллектуальными технологиями (ГИТ) широко используется зонтичный термин (от англ. brella term) «мягкие вычисления», который был введён в 1994 году профессором Л. Заде и интерпретируется следующей формулой: **Мягкие вычисления = нечёткие системы + нейронные сети + генетические алгоритмы.**

Данные мягкие вычисления реализуются соответствующей мягкой интеллектуальной системой, в которой должны гармонично сочетаться технологии управления неопределённостью, технологии обучения и самоорганизации. Типовая процедура функционирования указанной системы включает в себя [6,8,34,35,44,61,62,65–67]: преобразование входных параметров (ситуаций) в нечёткое представление; извлечение знаний, представленных в виде продукций ЕСЛИ-ТО из нечёткой обучающей выборки с помощью нейронной сети; оптимизацию структуры продукционных правил с помощью генетического алгоритма. Таким образом, за счёт комплексирования перечисленных ИИТ нечёткие нейронные сети обучаются как нейронные сети, но их результаты объясняются как в системах нечёткого вывода. Возможны также варианты обучения нейронных сетей корректировки уже обученных сетей с использованием генетических алгоритмов (ГА). Достоинством такого взаимодействия ИИТ является то, что в отличие от метода обратного распространения ошибки ГА мало чувствительны к архитектуре сети. В целом, по результатам исследований, выполненных в области гибридных интеллектуальных систем, предложено несколько направлений интеграции рассматриваемых методов и технологий, которые представлены в табл. 1.

Необходимо подчеркнуть [5,19,35], что рассматриваемая интеграция предлагаемых моделей, методов и технологий в рамках КМ осуществляется на **глубинном**, а не **внешнем** уровне, когда различные блоки системы реализуют какой-то один метод решения интеллектуальных задач и взаимодействуют между собой. Глубинный уровень объединения предполагает создание новых методов, использующих на конструктивном (формальном) уровне описания концепты и отношения объединяемых базовых методов.

**Вторая особенность комплексного моделирования** СЛО состоит в обязательном оценивании корректности согласования разнотипных моделей, а также проведении предварительного анализа существования решения соответствующих задач моделирования. Необходимость исследования такого рода задач является своего рода платой за полноту и адекватность представления СЛО полимодельным комплексом.

Рассмотрим на конкретных примерах как может быть решен рассматриваемый класс задач. В автоматизированной имитационной системе, построенной на базе агрегативного подхода, согласование АМ и ИМ различной степени детализации осуществляется с использованием операторов сопряжения  $\mathbf{R}$  [1,4]. До последнего времени математический аппарат исследования схем взаимодействия агрегатов (имитационных моделей) был разработан весьма слабо. Однако в работах [1,15,17] было показано, что произвольной схеме сопряжения элементов СЛО может быть поставлен в соответствие некоторый геометрический объект, состоящий из правильно соединенных друг с другом симплексов (симплициальных комплексов). С этой целью каждый элемент СЛО заменяют симплексом, размерность которого равна числу контактов, инцидентных этому элементу, а вершины симплексов, соответствующих сопряженным контактам, отождествляются (склеиваются).

Основное достоинство такого перехода состоит в том, что вопросы о структурных свойствах взаимосвязи ИМ в этом случае трансформируются в вопросы об алгебраических свойствах групп гомологии  $\{H_i(S)\}$ , которые соответствуют симплициальному комплексу. В работе [1] было показано, как надо проводить структурный анализ сложных систем в том случае, если они заданы симплициальными комплексами. К настоящему времени сформулировано ряд критериев оценки корректности взаимодействия различных классов математических моделей динамических систем, заданных в наиболее общем виде. Так, например, в рамках категорийно-функторного подхода, указанные классы моделей представляются монадными морфизмами (специальным образом построенные морфизмы в категории индексированных множеств), а их взаимодействие описывается многокомпонентной конфигурационной диаграммой. В этом случае задача анализа корректности взаимодействия на категорном языке формулируется как задача определения коммутативности конфигурационной диаграммы и сводится к классической задаче о существовании неподвижной точки эндоморфизма [1,17,26].

Проиллюстрируем суть указанной задачи на двух примерах. В первом из них рассматриваются вопросы согласования  $N$  простейших имитационных моделей, заданных изохронными операторами вида

$$\bar{y}(t) = S\bar{x}(t), \quad (5)$$

где  $\bar{y} = (\bar{y}_1^T, \bar{y}_2^T, \dots, \bar{y}_N^T)^T$ ,  $\bar{x} = (\bar{x}_1^T, \bar{x}_2^T, \dots, \bar{x}_N^T)^T$  – вектор эндогенных и экзогенных переменных общей имитационной модели, полученной из  $N$  простейших имитационных моделей;  $S$  – оператор, с помощью которого аппроксимируется алгоритмически заданная связь между  $\bar{y}(t)$  и  $\bar{x}(t)$ ; на координаты  $\bar{y}(t)$  и  $\bar{x}(t)$  наложены связи  $\bar{x}(t) \in D_x(\bar{y}(t))$ , отличные от связей, входящих в каждую модель  $\bar{y}_i(t) = s_i \bar{x}_i(t)$ . В этом случае говорят, что  $N$  моделей согласованы с помощью изохронного оператора при следующих условиях:

– построен изохронный оператор  $S_0$  такой, что

$$\bar{x}(t) = S_0 \bar{y}, \quad (6)$$

где  $\bar{y}(t) \in D_0$  – заданная область евклидова пространства;

- существует решение  $\bar{x}(t)$ ,  $\bar{y}(t)$  объединенной системы (5), (6), которое называют согласованным. Объединенная система операторных уравнений может быть записана в двух эквивалентных видах:

$$\bar{y}(t) = SS_0 \bar{y}(t) \quad \text{или} \quad \bar{x}(t) = S_0 S \bar{x}(t). \quad (7)$$

Из (7) видно, что проблема согласования взаимодействия моделей сводится к проблеме существования неподвижной точки у операторов  $SS_0$ ,  $S_0S$  [17,30]. Данный результат и способ его получения по своему содержанию близок к результату,

полученному ранее в работах [18,26,35,48,49] при решении примера согласования статических и динамических АИМ комплексов операций. Там же было показано, что непротиворечивость указанных классов моделей и согласованность результатов исследований, полученных на их основе, будут соблюдаться только в том случае, если выполняются условия коммутативности диаграмм, описывающих операции естественного преобразования функторов. Другими словами, в этом случае должна выполняться функциональная преемственность (функториальность) причинно-следственных связей, зафиксированных в каждой из моделей.

Говоря о согласовании АМ, входящих в имитационную систему, необходимо отметить следующее. В том случае, когда при построении иерархии АМ используются формальные декомпозиционные схемы, задача согласования указанных моделей сводится к задаче координационного выбора [11,18,19,23,55–56]. Попутно отметим, что в тех ситуациях, когда ИМ удастся аппроксимировать полиномиальной моделью, вопрос согласования АМ и ИМ можно также рассматривать в рамках задач координационного выбора. В случае эвристической декомпозиции исходной задачи в основу согласования АМ, описывающих различные стороны функционирования моделируемой системы, целесообразно положить свойство функциональной преемственности (функториальности) моделей, или, по-другому, потребовать выполнения условий гомоморфизма отношений, задающих АИМ [19,26,30].

Проиллюстрируем на конкретном примере как на конструктивном уровне можно проверить выполнения условий гомоморфизма отношений (корректности согласования) различных классов моделей. Для этого приведем следующее упрощенное полимодельное описание задач анализа и синтеза технологии автоматизированного управления (ТАУ) заданным классом активными подвижными объектами (АПО), концептуальные и формальные модели которого для различных предметных областей представлены была в работах [19,35,48]. Традиционно решение данных задач осуществляется на основе проведения соответствующей декомпозиции с привлечением как АИМ, так и экспертных знаний. При этом формализация задач анализа и синтеза ТАУ чаще всего проводится с использованием детерминированных и стохастических графовых (сетевых) моделей, либо моделей линейного и целочисленного программирования.

Таблица.1. Виды гибридных систем

Метод вычислительного интеллекта и интеллектуальные системы на его основе	Комбинация		
	из двух методов	из трёх методов	из четырёх методов
Системы нечёткого вывода Fzelips 6.04 Matlab	Нечёткие нейронные сети	Нечёткие нейронные вероятностные сети	Нечёткая вероятностная нейронная сеть с использованием генетического алгоритма (*)
Нейронные сети Neurosolution 3.0	Системы нечёткого и вероятностного вывода Gugu	Вероятностные нейронные сети с использованием генетического алгоритма (*)	–
Вероятностные рассуждения. Экспертная система Prospector	Системы нечёткого вывода с использованием генетического алгоритма	Нечёткие нейронные сети с использованием генетического алгоритма Fungen 1.2	–

Метод вычислительного интеллекта и интеллектуальные системы на его основе	Комбинация		
	из двух методов	из трёх методов	из четырёх методов
Генетические алгоритмы Professional Version 1.2	Вероятностные нейронные сети Trajan 2.1 Matlab	Системы нечёткого вероятностного вывода с использованием генетического алгоритма (*)	–
NeuroGenetic Optimezer	Нейронные сети с использованием генетических алгоритмов		
	–	–	
	Системы вероятностного вывода с использованием генетических алгоритмов	–	–

Примечание. (\*) – данный знак в таблице указывает, что соответствующий гибрид не создан или не описан в научной литературе.

Результатом решения данных задач в этом случае являются допустимые последовательности выполнения операции взаимодействия с каждым АПО в отдельности. Однако на практике при реализации ТАУ АПО, необходимо учитывать ограничения, связанные с синхронностью выполнения ряда операций группами АПО, входящими в состав конкретного класса АПО, а также конфликтные ситуации, вызванные ограничениями в пропускной способности каналов управления СУ АПО. Это обуславливает привлечение соответствующих динамических моделей, позволяющих учесть перечисленные ограничения. Однако при таком полимодельном описании рассматриваемых задач остаётся открытым вопрос обеспечения согласованности и непротиворечивости результатов, полученных с использованием перечисленных моделей. Для конструктивного ответа на данный вопрос, базируясь на результатах, полученных в работах [1,19,26,30] был предложен функториальный переход из категории орграфов  $Kat \Phi$ , задающей структурные (статические) модели технологий выполнения работ (операция) с АПО, в категорию динамических моделей  $Kat D$ , описывающих собственно процессы выполнения взаимосвязанных операций, связанных с функционированием системы АПО. В этом случае конструирующий ковариантный функтор  $G: \Phi \rightarrow D$  устанавливает соответствие как между вершинами графа  $x_i \in Ob \Phi$  и динамическими моделями  $d_i \in Ob D$ , так и между рёбрами графа  $\langle x_i, x_j \rangle \in Mor_{\Phi}(X, X)$  и отображениями динамических моделей  $\psi_{ij} \in Mor_D(G(\langle x_i, x_j \rangle))$ , названными в [26,30] отображениями сопряжённости (см. рис. 6).

К настоящему времени предложено несколько вариантов формализации указанных отображений, среди которых можно отметить способы, основанные на введении логических функций [6], ступенчатых функций [4,26], фазовых и смешанных ограничений, заданных в виде равенств и неравенств. Вместе с тем, перечисленные способы и соответствующие модели имеют целый ряд недостатков (критичность к размерности решаемых задач, трудности учёта ряда ограничений, к числу которых относятся ограничения на неразрывность выполнения операций взаимодействия с АПО), затрудняющих их широкое использование на практике. Поэтому в работах [19,29,35,36,48] был предложен другой подход к формализации отображений

сопряжённости. Упрощённый вариант такой формализации может быть представлен в виде следующей модели:

$$\Delta = \left\{ \mathbf{u} \mid \dot{x}_i = \sum_{j=1}^m u_{ij}; \sum_{i=1}^n u_{ij}(t) \leq 1; \sum_{j=1}^m u_{ij} \leq 1; u_{ij}(t) \in \{0,1\}; \right. \\ \left. t \in (t_0, t_f] = T; x_i(t_0) = 0; x_i(t_f) = a_i; \right. \\ \left. \sum_{j=1}^m u_{ij} \left[ \sum_{\alpha \in \Gamma_{1i}^-} (a_\alpha - x_\alpha(t)) + \prod_{\beta \in \Gamma_{2i}^-} (a_\beta - x_\beta(t)) \right] = 0; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \right\},$$

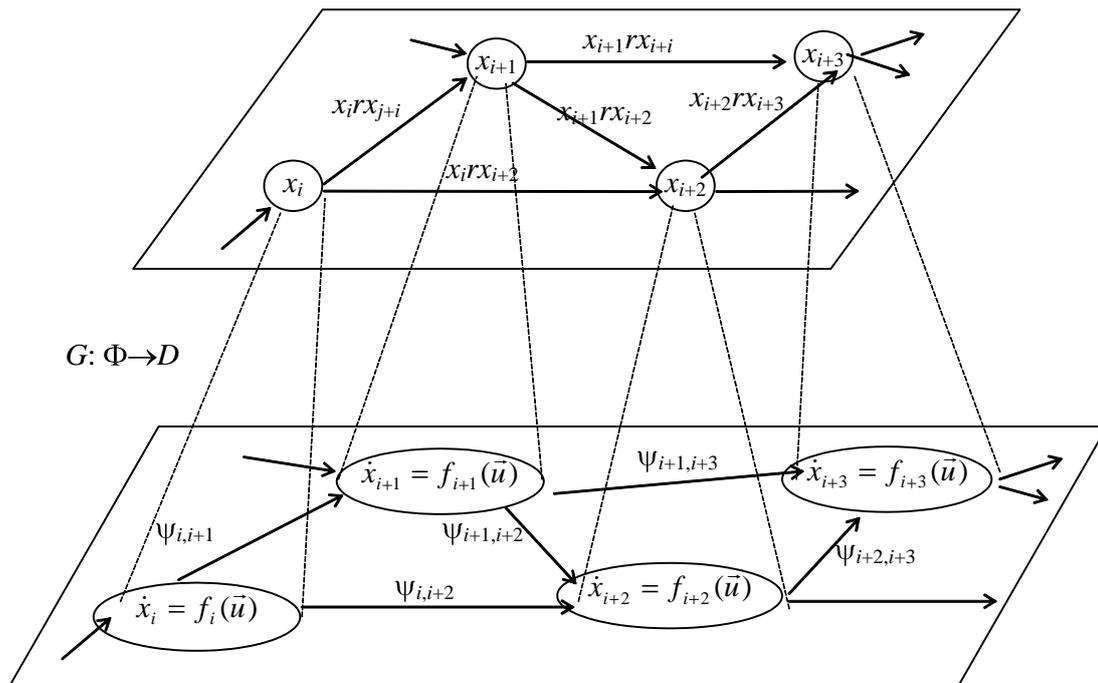
где  $x_i(t)$  – переменная, характеризующая состояние выполнения операции взаимодействия  $D_i$  в момент времени  $t$ ;  $a_i$  – заданный объём выполнения указанной операции;  $u_{ij}(t)$  – управляющее воздействие, принимающее значение 1, если операция взаимодействия  $D_i$  выполняется с использованием  $B_j$  ресурса (подсистемы) СУ АПО, 0 – в противоположном случае;  $\alpha \in \Gamma_{1i}^-$ ,  $\beta \in \Gamma_{2i}^-$  – множество номеров операций, непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией  $D_i$ ; с помощью логических операций “И”, “ИЛИ” (альтернативное “ИЛИ”),  $T$  – интервал времени, на котором рассматривается функционирование СУ АПО;  $t_0$ ,  $t_f$  – начальный и конечный моменты времени. В работах [48–50] рассматриваются возможные варианты детализации указанной модели для различных предметных областей.

В рамках предложенной формализации проверка условий функториальности преобразования (или условий гомоморфизма отношений при структурно-математическом уровне описания) орграфа в динамическую модель может, например, базироваться на анализе результатов транзитивного замыкания бинарных отношений, задающих в каждой из моделей очерёдность следования операций в системе управления (СУ) АПО. Для графовой (статической) модели проверка данных условий не вызывает особых затруднений и сводится к выполнению простейших действий с матрицей смежности. Для динамической модели данная проверка требует проведения специальных преобразований её структуры. Проведённые исследования показали, что в рамках предложенного варианта полимодельного описания функционирования СУ АПО, выполняются не только условия функториальности, но и условия общности положения отображений сопряжённости. Это открывает широкие перспективы использования достижений современной теории управления при решении проблем структурно-функционального синтеза СЛО и систем управления ими.

В заключение следует еще отметить, что подобные функториальные преобразования могут быть применены и к другим классам сетевых динамических моделей, к которым, в первую очередь, относятся: модели системной динамики, логико-динамические системы, сети Петри, динамические модели выполнения комплексов операций. Однако, к сожалению, перечисленные классы моделей позволяют формально описывать и решать лишь ограниченный спектр задач анализа, мониторинга и управления состояниями СЛО. Это касается, прежде всего чрезвычайно актуальных в настоящее время проблем проактивного мониторинга и управления СЛО.

Завершая рассмотрение *основных особенностей комплексного моделирования СЛО* необходимо отметить еще одну из них, которая состоит в необходимости на всех этапах реализации данного вида моделирования широко использования *современных средств автоматизации моделирования*. В противном случае КМ станет невозможным из-за очень больших затрат времени, денежных средств и других ресурсов, которые нужно выделять каждый раз в случае отсутствия необходимых унифицированных средств автоматизации моделирования. К настоящему времени известны более 400 языков автоматизации моделирования и соответствующих систем автоматизации моделирования [7,20,21].

Kat  $\Phi$  (категория статических моделей комплексов операций)



Kat  $D$  (категория динамических моделей выполнения комплексов операций)

Рис. 6. Графическая иллюстрация функториального перехода из категории орграфов  $Kat \Phi$ , в категорию динамических моделей  $Kat D$ .

Проактивный мониторинг и управления СЛО в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления указанными объектами, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает предотвращение их возникновения за счет создания в соответствующей системе мониторинга и управления **принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей** при формировании и реализации управляющих воздействий, основанных на парировании не следствий, а причин, вызывающих возможные нештатные, аварийные и кризисные ситуации в СЛО. При этом данные прогнозирующие и упреждающие возможности должны базироваться, прежде всего, на результатах **комплексного моделирования рассматриваемых процессов проактивного мониторинга и управления**.

На прошедших конференциях ИММОД [28] неоднократно обсуждались достоинства и недостатки многочисленных отечественных и зарубежных инструментальных средства и среды автоматизации моделирования (ИССАМ). Среди ИССАМ, наиболее часто обсуждаемых на прошедших конференциях ИММОД, следует указать — GPSS, AnyLogic, BPsim, PowerSim, Simplex, Modul Vision, Triad.Net, CERT, ESimL, Simulab, NetStar, Pilgrim, МОСТ, КОГНИТРОН и т.д .

Говоря о средствах автоматизации комплексного моделирования, следует указать, что они, к сожалению, либо ориентированы на решение узко специализированных классов прикладных задач при широкой функциональности предоставляемых сервисов [14], либо являются достаточно универсальными средствами автоматизации моделирования, в которых координация разнотипных моделей, методов и алгоритмов анализа и синтеза СЛО осуществляется не на глубинном (модельно-алгоритмическом) уровне описания, а через ЛПР в интерактивном режиме на уровне программного и информационного обеспечения [20]. Говоря другими словами, в последнем случае

проводится не интегративное, а коммуникативное взаимодействие, не обеспечивающее появление синергетических эффектов в виде появления новых знаний, получаемых при интегративном комплексном моделировании. Проиллюстрируем на нескольких примерах разработанные авторами подходы к организации комплексного моделирования. Сло

## **2. Примеры практической реализации методологии и технологий комплексного моделирования Сло.**

Многочисленные исследования, направленные на поиск разумного компромисса между требованиями универсализации и специализации ИмС, показали, что в настоящее время разработка универсальных формализованных процедур автоматизации моделирования и соответствующих ИмС, ориентированных на широкую предметную область, является трудно разрешимой проблемой. Целесообразно создавать ИмС, специализированные по допустимому классу моделируемых объектов и универсальные по поддерживаемым функциям, связанным с проведением комплексных исследований указанных объектов. При этом ИмС может изначально и не содержать в себе модель конкретного объекта, характеристики которого интересуют ЛПР. Данная система представляет ЛПР только математический аппарат (формализованную схему), позволяющий ему легко генерировать желаемую структуру модели объекта, отвечающую целям исследования, наполнять эту структуру количественными соотношениями, описывающими связи между ее элементами, решать разнообразные задачи анализа и выбора. В зависимости от состава, структуры ИмС и поддерживаемых ею функций той предметной области, для которой она создавалась, целесообразно различать широко специализированные (проблемно-ориентированные) и узкоспециализированные (частные) ИмС. Создание ИмС так же, как и имитационных моделей (моделей имитационного уровня), представляет сложный многоэтапный итерационный процесс, основная особенность которого (по сравнению с «чисто» имитационным моделированием) состоит в необходимости на каждом из этапов исследования проводить согласование (на концептуальном, алгоритмическом, информационном и программном уровне) разнородных моделей, описывающих различные стороны функционирования объекта.

В современных ИмС выбор допустимых альтернатив основывается на сужении (сжати) множества рассматриваемых вариантов экзогенных переменных путем отбраковки доминируемых по заданным отношениям предпочтения альтернатив. Указанные процедуры по своему содержанию близки к идеям, реализованным в многочисленных модификациях метода «ветвей и границ». При отбрасывании доминируемых экзогенных переменных в зависимости от этапа решения задачи выбора, обеспеченности исходными данными ЛПР пользуется каждый раз такими моделями и методами получения релаксированных решений исходной задачи, чтобы оценки затрат на реализацию полученных решений (затрат на расход используемого ресурса) не убывали и становились все более и более точными по мере сужения множества допустимых альтернатив. Перечисленные концептуальные положения, связанные с созданием и использованием ИмС были реализованы авторами доклада при выполнении ряда НИР и ОКР. Остановимся кратко на некоторых из полученных к настоящему времени научных и практических результатах.

Так, в рамках НИОКР [29,36], связанных с исследованием процессов управления структурной динамикой разнородных классов космических аппаратов (КА), в том числе, и исследованием задач анализа и синтеза технологий автоматизированного управления (ТАУ) орбитальными и наземными космическими средствами (КСр), было показано, что данные процессы имеют многоуровневый, многоэтапный и

полифункциональный характер. Данное представление процессов функционирования автоматизированных систем управления (АСУ) КА повлияло на выбор структуры банка моделей разрабатываемого специального программно-математического обеспечения ИмС, в котором в соответствии с рисунком 7 необходимо, прежде всего, выделить три основных блока: модели функционирования АСУ КА и объектов обслуживания (ОБО) (блок I); модели оценки и анализа состояния КА, АСУ КА, оценки обстановки (блок II); модели принятия решений в АСУ КА (блок III).

Блок моделей функционирования АСУ КА, ОБО включает в себя: модели функционирования КА, системы КА, орбитальной группировки КА, орбитальной системы КА (блоки 1, 2, 3); модели функционирования отдельного командно-измерительного комплекса (ОКИК) (блок 4), подсистем наземного комплекса управления (НКУ) (ОКИК, пункты управления (ПУ), блок 5), НКУ (блок 6); модели взаимодействия основных элементов и подсистем АСУ КА между собой и ОБО (блок 7); модели функционирования ОБО (внешних систем) (блок 8); модели воздействия внешней среды на АСУ КА (блок 9); модели имитации результатов целевого применения АСУ КА (блок 10). Напомним, что в общем случае функционирование КА предполагает информационный, вещественный, энергетический обмен с ОБО, с другими КА, внешней средой, функционирование аппаратуры, расход (пополнение) ресурсов КА, перемещение КА.

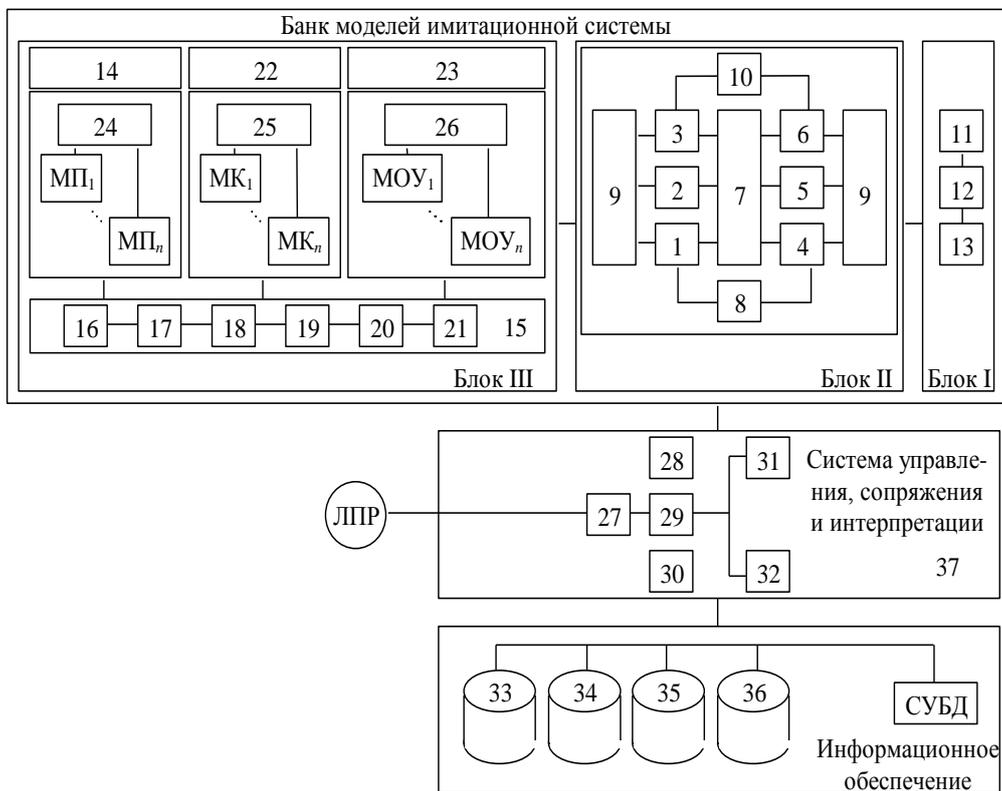


Рис. 7. Обобщенная структура имитационной системы для решения задач управления структурной динамикой АСУ КА

Блок моделей оценки и анализа состояния КА, АСУ КА, оценки обстановки включает в себя: модели и алгоритмы оценки и анализа состояния движения, аппаратуры, ресурсов и обмена КА (блок 11); модели и алгоритмы оценки и анализа состояния ОБО (блок 12); модели и алгоритмы оценки и анализа ситуаций и обстановки (блок 13).

В блок 3 входят: модели и алгоритмы долгосрочного и оперативного планирования операций ОБ в АСУ КА (блок 14); модели и алгоритмы управления структурами АСУ КА (блок 15): топологической (блок 16), технической (блок 17), технологической (блок 18), организационной (блок 19); структурой СПМО (блок 20), информационной структурой (блок 21); модели и алгоритмы коррекции долгосрочных и оперативных планов проведения ОБ в АСУ КА (блок 22); модели и алгоритмы решения задач координации в АСУ КА на этапах планирования (блок 24), коррекции (блок 25), оперативного управления (блок 26); модели и алгоритмы оперативного управления элементами и подсистемами АСУ КА (блок 23). На рисунке 7 приняты следующие условные обозначения:  $МП_{1,...,n}$ ,  $МК_{1,...,n}$ ,  $МОУ_{1,...,n}$  – соответственно модели планирования, коррекции и оперативного управления КА, входящими в АСУ КА (1,...,n)-го типов. Кроме того, на структурной схеме изображена система управления, сопряжения и интерпретации, в которую входят: общая диалоговая система управления СПМО (блок 27); локальные системы управления и сопряжения (блок 28); блок обработки, анализа и интерпретации результатов планирования, управления, моделирования (блок 30); блок формализации сценариев моделирования (блок 31); блок параметрической и структурной адаптации СПМО (блок 32); блок выработки рекомендаций по организации процедур моделирования и принятия решений (блок 29).

Важную роль в решении задач анализа и синтеза ТАУ АСУ КА играет информационное обеспечение, включающее в себя: базы данных о состоянии КА (блок 33), АСУ КА (блок 35), ОБО (блок 34), в целом по обстановке (блок 35); базы данных об аналитических и имитационных моделях функционирования и принятия решений в АСУ КА (блок 36).

Используя предложенную ИмС, к настоящему времени удалось решить широкий спектр задач расчета, анализа и оптимизации показателей качества и эффективности функционирования АСУ СлО в динамически изменяющихся условиях. Так, например, применительно к космической сфере разработан прототип специального программного обеспечения ИмС, включающий в себя набор следующих программных модулей, в рамках которых реализованы предложенные алгоритмы и методики расчета, многокритериального оценивания и анализа показателей качества и эффективности функционирования рассматриваемой АСУ КА: программный модуль (ПМ) расчета и многокритериального анализа показателей структурной надежности и устойчивости АСУ КА (ПМ «НАДЕЖНОСТЬ»); ПМ расчета расписания функционирования НКУ КА, а также расчета показателей пропускной способности, оперативности и ресурсоемкости АСУ КА для детерминированных сценариев изменения внешних воздействий (ПМ «РАСПИСАНИЕ»); ПМ расчета и оптимизации показателей робастности и динамической устойчивости программ функционирования АСУ КА для интервально заданных сценариев изменения внешних воздействий (ПМ «УСТОЙЧИВОСТЬ»); ПМ расчета показателей пропускной способности и ресурсоемкости АСУ КА для стохастических сценариев изменения внешних воздействий (ПМ «ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ»); ПМ расчета показателей эффективности применения АСУ КА для стохастических сценариев изменения внешних воздействий (ПМ «ЭФФЕКТИВНОСТЬ»); ПМ модуль многокритериального анализа и упорядочения вариантов функционирования АСУ КА при различных сценариях изменения обстановки и воздействий (ПМ «МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТЬ»).

При этом для каждого фиксированного сценария функционирования АСУ КА рассчитывались следующие внутренние и внешние показатели эффективности АСУ КА: показатель структурной (статической) устойчивости АСУ КА; показатель полноты

реализации ТЦУ КСр в АСУ КА; показатель динамической устойчивости АСУ КА; показатель пропускной способности НКУ ОГ КА; показатель эффективности автоматизированного управления КА. Перечисленные показатели рассчитывались на полимодельном аналитико-имитационном комплексе, в состав которого вошли все вышеописанные на рис. 7 модели. В таблице 2 приведен перечень комбинаций АМ и ИМ, учитывающих различные аспекты функционирования АСУ КА, а также соответствующие программные модули, их реализующие.

Для многокритериального оценивания и упорядочивания возможных сценариев функционирования АСУ КА в штатных и заданных условиях ее работы была разработана соответствующая методика построения и использования интегрального показателя качества и эффективности функционирования указанной АСУ КА, базирующаяся на комбинированном использовании математического аппарата нечеткой логики и теории планирования эксперимента [29,36].

В настоящее время разработанный комплекс используется в ряде проектных организаций Федерального космического агентства. При этом разработанное специальное программное обеспечение повысило оперативность и обоснованность выработки проектных решений, связанных с анализом и синтезом облика АСУ КА за счет применения автоматизированных технологий системного моделирования и многокритериального оценивания значительно большего числа альтернативных управленческих решений по сравнению с традиционными подходами, используемыми в настоящее время на практике.

В качестве второго примера использования разработанной ИмС можно привести проект комплексного моделирования производственных процессов на судостроительных вервях (ССВ), входящих в состав судостроительной корпорации (ССК). Цель указанного моделирования состояла в оценивании возможностей выполнения ССВ годовых производственных планов при различных сценариях изменения внешней обстановки.

На рис.8 представлена обобщенная организационно-технологическая структура ССВ. На рисунке 8 приняты следующие условные обозначения – КОП: корпусообрабатывающее производство; ССП: сборочно-сварочное производство (сборочные единицы); КСП: корпусостроительное производство (стапель); ОК: окрасочное производство; ТО: трубообрабатывающее производство; ММ: механо-монтажное производство. Из анализа данного рисунка следует, что современная ССВ представляет собой сложный производственно-технический и организационно-технологический комплекс (объект), проблемы создания, эксплуатации и развития которого представляют весьма актуальные проблемы.

Кроме того, системный анализ задач расчета, многокритериального оценивания и анализа основных характеристик и показателей качества выполнения производственных планов ССВ показал, что решение данных задач должно базироваться на концепция системного моделирования сложных организационно-технических объектов (СОТО), к числу которых относится и рассматриваемая ССВ [50]. Выполненные исследования также показали, что используемые на ССВ программные средства автоматизации моделирования (например, AnyLogic, GPSS) их основных элементов и подсистем на различных этапах жизненного цикла характеризуются существенной гетерогенностью применяемого специального программного обеспечения (СПО) из-за чего возникают большие проблемы с непосредственной организацией взаимодействия между имеющимися в наличии программными средствами автоматизации моделирования и вновь вводимыми программными модулями.

Таблица 2. Реализация комплекса аналитико-имитационных моделей подсистем АСУ КА в разработанных программных модулях

№ п/п	Наименование моделей подсистем АСУ КА	Реализованные модели в составе программных модулей									
		Модуль «Надежность»		Модуль «Расписание»		Модуль «Устойчивость»		Модуль «Пропускная способность»		Модуль «Эффективность»	
		АМ	ИМ	АМ	ИМ	АМ	ИМ	АМ	ИМ	АМ	ИМ
	АИМ тракта ТМИ	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
	АИМ тракта ИТНП	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-
	АИМ тракта КПИ	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
	АИМ тракта СпИ	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
	АИМ ЦУП КА	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-
	АИМ СОД	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
	АИМ внешней среды	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-

Примечание: АМ – аналитическая модель, ИМ – имитационная модель, тракты измерения, передачи, обработки измерений текущих навигационных параметров, телеметрической, командно-программной, специальной информации (ИТНП, ТМИ, КПИ, СпИ), ЦУП-центр управления полетом, СОД-система обмена данными.

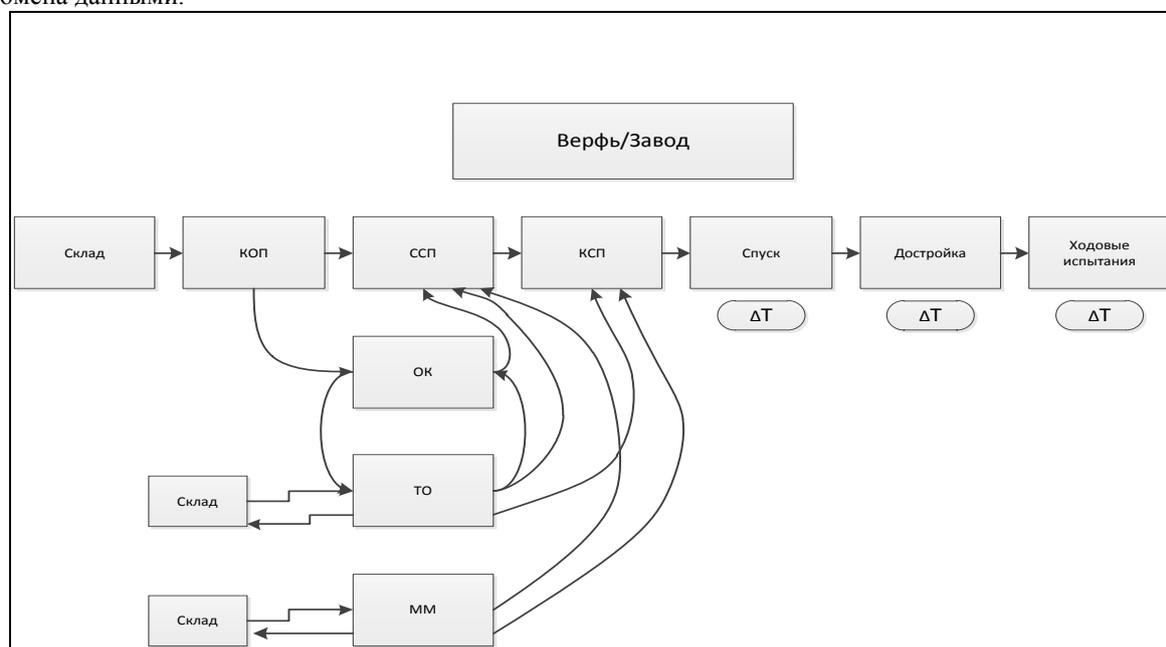


Рис. 8 Обобщенная организационно-технологическая структура ССВ

Упомянутые выше программные средства автоматизации моделирования представляют собой унаследованные программные системы в виде законченных решений, реализующих ИМ судостроительного предприятия и прошедших валидацию и верификацию. Исследования показали, что такие подсистемы целесообразно использовать в составе создаваемого в рамках предложенной ИмС (см. рис.7) программно-методического комплекса (ПМК). Указанный комплекс предназначен для решения следующих прикладных задач: расчет статистических, оптимистических и пессимистических оценок значений показателей выполнимости производственных планов; расчет показателей структурной надежности и функциональной устойчивости производственных планов; показателей критичности отказов при выполнении

производственных планов; проведения многокритериального оценивания и анализа показателей выполнимости производственных планов; автоматизированное формирование, реализация и анализ сценариев моделирования.

Выполненные исследования показали, что разработка подобных подсистем «с нуля» представляет собой экономически не выгодный процесс как с точки зрения трудозатрат, так и времени выполнения проекта. В связи с этим, было принято решение об организации такой архитектуры ПМК, чтобы обеспечивался беспрепятственный обмен согласованными исходными данными и выходным результатом между готовыми и создаваемыми программными средствами. Наиболее хорошо зарекомендовавшим себя подходом к построению гетерогенных модульных систем на сегодняшний день является сервис-ориентированная архитектура (Service Oriented Architecture, SOA) [12,63,64]. Данный подход эффективен при слабой связности и распределённости используемых модулей. В то же время SOA требует использования стандартизированных интерфейсов модулей и работы по стандартизированным протоколам, что не было реализовано во всех унаследованных программных продуктах. В соответствии с требованиями технического задания в выполняемом проекте сервисная шина была реализована на свободно распространяемом программном обеспечении с открытым исходным кодом. При этом в базе данных хранятся наборы исходных данных для имитационного и аналитического моделирования, а также сведения о конфигурациях ПМК и сценариях моделирования. Указанные сведения позволяют технологу судостроительного предприятия строить различные вычислительные программы для моделирования производственных процессов с различной степенью детализации.

Подсистема управления моделированием, визуализации и интерпретации результатов представляет собой программный модуль, реализованный в виде клиент-серверного приложения. С учётом указанных ранее особенностей используемых унаследованных программных комплексов была предложена следующая архитектура ПМК (см. рис.9). Данная архитектура позволяет, во-первых, для преодоления проблем гетерогенности с одной стороны, и удобства развёртывания ПМК с другой стороны, разместить все модули с несовместимыми требованиями к среде исполнения на различных виртуальных машинах в рамках одного аппаратного сервера. Во-вторых, с учётом перспектив дальнейшего развития ПМК в направлении создания территориально-распределённых архитектур, данная архитектура обеспечила взаимодействие модулей посредством сетевого обмена данными. Для этих целей было предложено создать программные "обёртки", преобразующие частную систему ввода-вывода каждого модуля в стандартизированный интерфейс обмена данными, а также кроссплатформенный интегрированный пользовательский интерфейс, позволяющий удалённо использовать все возможности ПМК.

К настоящему времени завершается отладка и автономные испытания рассматриваемого ПМК, которые уже показали, что разработанные средства автоматизации комплексного моделирования ССВ обеспечивают повышение качества управленческих решений, связанных с анализом и синтезом облика данного предприятия, а также принятием оперативных производственных решений за счет комбинированного применения АМ и ИМ, а также многокритериального оценивания и анализа значительно большего числа альтернатив по сравнению с существующими подходами.

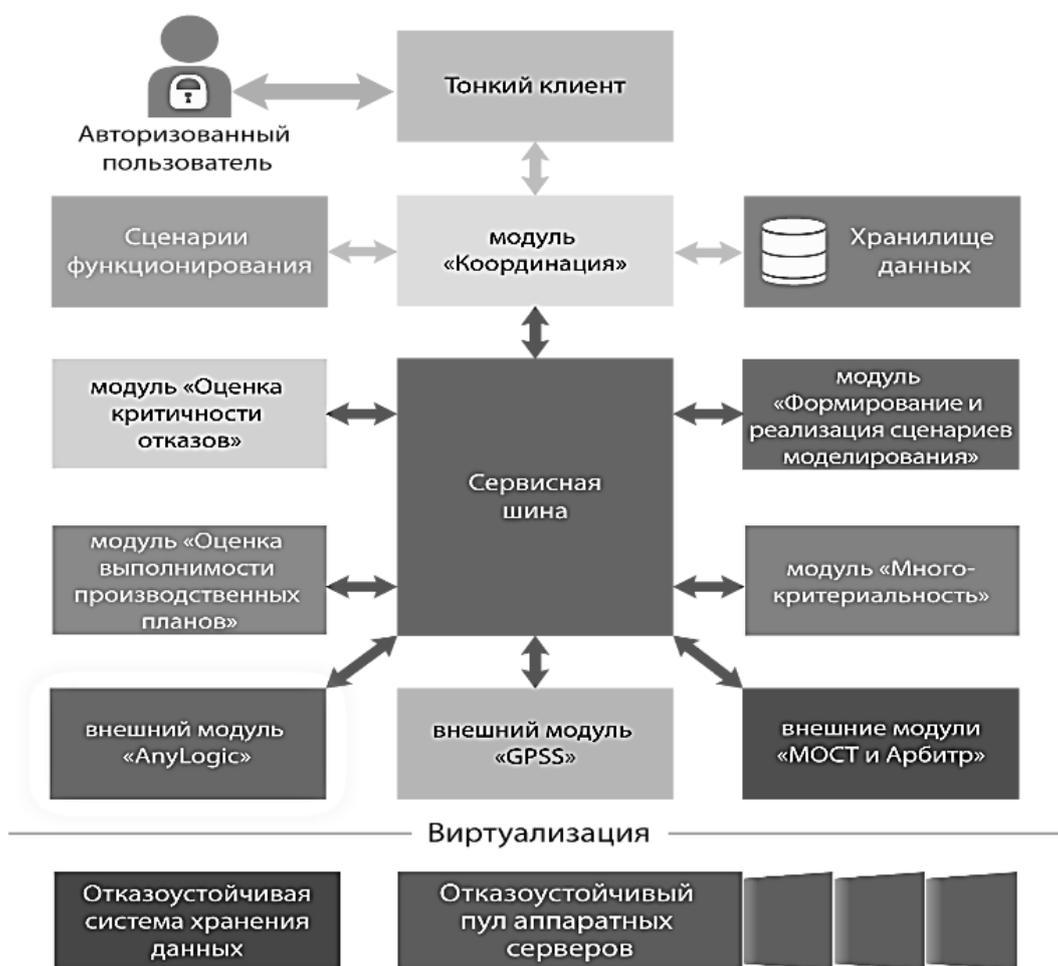


Рис.9. Обобщенная архитектура создаваемого экспериментального образца специального программного обеспечения.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что для обеспечения требуемого уровня показателей адекватности, достоверности и точности моделирования СЛО необходимо базироваться на современной методологии и технологиях комплексного моделирования указанных объектов. При этом основное достоинство данного вида моделирования состоит в том, что за счет полимодельного (многомодельного) описания каждой конкретной исследуемой предметной области и соответствующего согласования разнотипных моделей, методов и алгоритмов анализа и синтеза СЛО на формализованном (глубинном) уровне описания удастся, во-первых, взаимно компенсировать недостатки и ограничения, присущие каждому частному классу моделей, методов и алгоритмов, и, во-вторых, получить синергетический эффект от их интегративного использования, выражающийся в формировании новых знаний о СЛО и его поведении. Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг СГ» (проект 1.4.1-1), РФФИ №№15-07-08391, 15-08-08459, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087, Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект №2.11), проекта ESTLATRUS

2.1/ELRI -184/2011/14, проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

### **Литература**

1. Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В. и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В.Емельянова. И.: Машиностроение, 1988.
2. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров: Основы квалиметрии. – М.: Экономика, 1982. – 248 с.
3. Бешенков С.А., Ракитина Е.А. Моделирование и формализация. Методическое пособие. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 336., ил.
4. Бусленко Н.П. «Моделирование сложных систем», М., «Наука», 1968.
5. Валькман Ю.Р. О проблеме “отчуждения” моделей исследуемых объектов от создателей в проектировании сложных изделий // Теория и системы управления -1996.-№3.
6. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001. - № 1. – С.5-22; № 2. – С.5-21.
7. Власов С.А., Девятков В.В. Имитационное моделирование в России: прошлое, настоящее, будущее //Автоматизация в промышленности, 2005, №5. стр. 63-65.
8. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000.
9. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. Инструментальные средства для открытых сетей агентов. – Известия РАН. Теория систем и управления. - М.: Наука. 2008, вып. 3 – с.106-124.
10. Горский Ю.М. Системно-информационный анализ процессов управления. – Новосибирск: Наука, 1988. – 200 с.
11. Гранберг А.Г. Моделирование социалистической экономики. – М.: Экономика, 1988. – 488с.
12. Дмитров А. Сервисно-ориентированная архитектура в современных моделях бизнеса. М.: Наука. 2006. С. 224.
13. Емельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений. – М.: Знание, 1985.
14. Замятина Е.Б., Мерзляков Д.В., Семеновых А.А. Языковые и программные средства для многомодельного исследования имитационных моделей компьютерных сетей// Труды 7-й, Всероссийской научно-практической конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика ”, т.т. 1-2 – М.: ИПУ РАН, 2015., (принята к опубликованию) ([www.simulation.su](http://www.simulation.su)).
15. Имитационное моделирование производственных систем / А.А. Вавилов, Д.Х. Имаев, В.И. Плескунин и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983.
16. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов VIII-й Международной научно-технической конференции (Коломна, 18-20 мая, 2015). В 2-х томах. Т2. – М.: Физматлит, 2015. -388 с.
17. Калашников В.В., Немчинов Б.В., Симонов В.М. Нить Ариадны в лабиринте моделирования. – М.: Наука, 1993. – 192 с., ил.
18. Калинин В.Н, Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами //Теория и системы управления.-.1995.-№1.
19. Калинин В.Н., Резников Б.А. Теория систем и управления (структурно-математический подход). – Л.: ВИКИ, 1987
20. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
21. Киндлер Е. Языки моделирования. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
22. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981.
23. Краснощёков П.С., Морозов В.В., Федоров В.В. Декомпозиция в задачах проектирования // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1979. №2. С.7–18.

24. Краснощёков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: Фазис, 2000. – 400 с.
25. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2000. – 295 с.
26. Лескин А.А. Алгебраические модели гибких производственных систем. – Л.: Наука, 1986
27. Липаев В.В. Оценка качества программных изделий. – М.: ЭРИС, 2001. – 252 с.
28. Материалы 1-й, 2-й, 3-ей, 4-ой Всероссийской научно-практической конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”, т.т. 1-2 – СПб.: ФГУП “ЦНИИ технологий судостроения”, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013 ([www.simulation.su](http://www.simulation.su)).
29. Международный проект – СЧ НИР «Мониторинг – СГ» - Разработка методического обеспечения и экспериментального программного комплекса для анализа и прогнозирования надежностных характеристик бортовой аппаратуры маломассогабаритных космических аппаратов на различных этапах жизненного цикла», Заказчик НИИКС, Исполнитель СПИИРАН - СПб.: СПИИРАН 2014 г. - 187 с.
30. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978.
31. Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив. Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2009, 272 с.
32. Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10-ти т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1988, т.3. Эффективность технических систем /Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова.
33. Нейлор Т., Ботон Дж., Бердик Д. и др. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. – М.: Мир, 1975. – 500 с.
34. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.
35. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
36. Опыт-конструкторская работа №6–12 «Разработка комплекса методик и прототипа программного обеспечения для решения задач расчета, анализа и оптимизации показателей качества функционирования АСУ КА в штатных и заданных условиях функционирования». Заказчик ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга. исполнитель СПИИРАН - СПб.: СПИИРАН 2013 г. -245 с.
37. Павловский Ю.А. Имитационные модели и системы. – М.: Фазис, 2000. – 132 с.
38. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.
39. Пешель М. Моделирование сигналов и систем. – М.: Мир, 1981. – 300 с.
40. Полляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. – М.: Сов. радио, 1971. – 400 с.
41. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: Синтег, 2000.
42. Ростовцев Ю.Г. Основы построения автоматизированных систем сбора и обработки информации. – СПб.: ВИКИ, 1992. – 717 с.
43. Ростовцев Ю.Г., Юсупов Р.М. Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования// Известия ВУЗов. Приборостроение. - № 7, 1991. – С.7-14.
44. Рыбина Г.В., Рыбин В.М., Паронджанов С.С., Со Ти Ха Аунг Имитационное моделирование внешнего мира при построении динамических интегрированных экспертных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы, №12, т.12, 2014, с. 3-15.
45. Савин Г.И. Системное моделирование сложных процессов. М.: Фазис, 2000.
46. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
47. Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В. Адаптивные системы управления машиностроительным производством. – М.: Машиностроение, 1989. – 207 с.

48. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики.-2002.-№5.
49. Соколов Б. В., Юсупов Р.М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Теория и системы управления, 2004, № 6 -с. 5 - 16.
50. Составная часть НИР «Разработка технологии имитационного моделирования производственных комплексов судостроительных предприятий» Шифр «Модель-С». Заказчик ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта». Исполнитель СПИИРАН - СПб.: СПИИРАН 2013 г. -146 с.
51. Тятюшкин А.И. Многометодная технология для расчета оптимального управления // Теория и системы управления. – 2003.-№3.
52. Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
53. Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. Системы и модели. – М.: Радио и связь, 1982.
54. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982
55. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). – М.: Наука, 1993.
56. Цурков В.И. Динамические задачи большой размерности. – М.: Наука, 1988
57. Юдин Д.Б., Юдин А.Д. Математики измеряют сложность. Число и мысль, вып. 8. – М.: Знание, 1975. – 191 с.
58. Юсупов Р.М. Элементы теории испытаний и контроля технических систем: / Под ред. Р.М. Юсупова. – М.: Энергия, 1977. – 189 с.
59. Юсупов Р.М., Заболотский В.П. Научно-методические основы информатизации.- СПб.: Наука, 2000.
60. Юсупов Р.М., Иванищев В.В., Костельцев В.И., Суворов А.И. Принципы квалиметрии моделей // IV СПб Международная конференция «Региональная информатика-95», тез. докладов. – СПб, 1995.
61. 21st European Conference on Modelling and Simulation, June 4–6, Prague, Czech Republic, Proceedings, 2007, Prague 826 pp.
62. 29 European Conference on Modelling and Simulation, May 26–29, Albena (Varna), Bulgaria, Proceedings, 2015, Albena (Varna), 843 pp.
63. OASIS Standard: Web Services Business Process Execution Language (2007).
64. Vasiliev, Y.: SOA and WS-BPEL: Composing Service-Oriented Solution with PHP and ActiveBPEL. Packt Publishing (2007).
65. <http://www.liophant.org/scsc>
66. <http://www.scs.org>
67. <http://www.wintersim.org>