

УДК: 681.324

## КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

**Б. В. Соколов,**

д-р. техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)

**К. А. Малюгин,**

начальник отдела интегрирования и администрирования  
программного обеспечения

Главное управление Центрального банка РФ по Санкт-Петербургу

*Рассмотрены методологические и методические основы организации и проведения комплексного моделирования процессов управления структурной динамикой информационной системы. Предложен оригинальный полимодельный комплекс, описывающий процессы функционирования и развития информационной системы и включающий в себя динамические аналитико-имитационные модели управления операциями, потоками, ресурсами, структурами информационной системы. Рассмотрен пример использования указанного комплекса.*

*Within the proposed study the methodological and methodical bases for the problem of integrated modeling of information system structure dynamics control. An original multiple-model complex for simulation of information system (IS) was proposed. The complex included analytical-simulation models of control processes for IS operation, flows, resources and structures. The utilization example of multiple-model complex was outlined.*

В современных условиях успешное развитие любой крупной бизнес-системы (БС) во многом определяется эффективностью функционирования ее информационной системы (ИнС), обеспечивающей процессы обработки разнородных потоков информации и управления структурной динамикой как БС, так и как самой ИнС. В настоящее время при описании ИнС используется, как правило, их полиструктурное многомодельное описание. В качестве основных структур в этом случае рассматриваются следующие типы структур: топологическая, техническая, технологическая (функциональная), организационная структуры; структура программно-математического и информационного обеспечения (ПМО и ИО) [1, 2].

При таком варианте описания ИнС как объект исследования представляет собой интегрированную территориально-распределенную сложную организационно-техническую систему (СОТС). Одной из основных особенностей указанной системы является то, что ее параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных причин. Другими словами, на практике мы постоянно

сталкиваемся со структурной динамикой СОТС.

На рис. 1 представлены возможные варианты структурной динамики СОТС. В этих условиях для повышения (сохранения) требуемого уровня работоспособности и возможностей СОТС либо обеспечения наилучших условий их функционирования при деградации указанных систем необходимо осуществлять управление структурами СОТС (в том числе управление реконfigurацией структур СОТС). Задачи управления структурной динамикой СОТС по своему содержанию относятся к классу задач структурно-функционального синтеза облика СОТС, формирования и реализации соответствующих программ управления их развитием [1, 3–5].

Главная особенность решения задач рассматриваемого класса состоит в следующем. Определение оптимальных программ управления основными элементами и подсистемами СОТС может быть выполнено лишь после того, как будет известен перечень функций и алгоритмов обработки информации и управления, который должен быть реализован в указанных элементах и подсистемах.

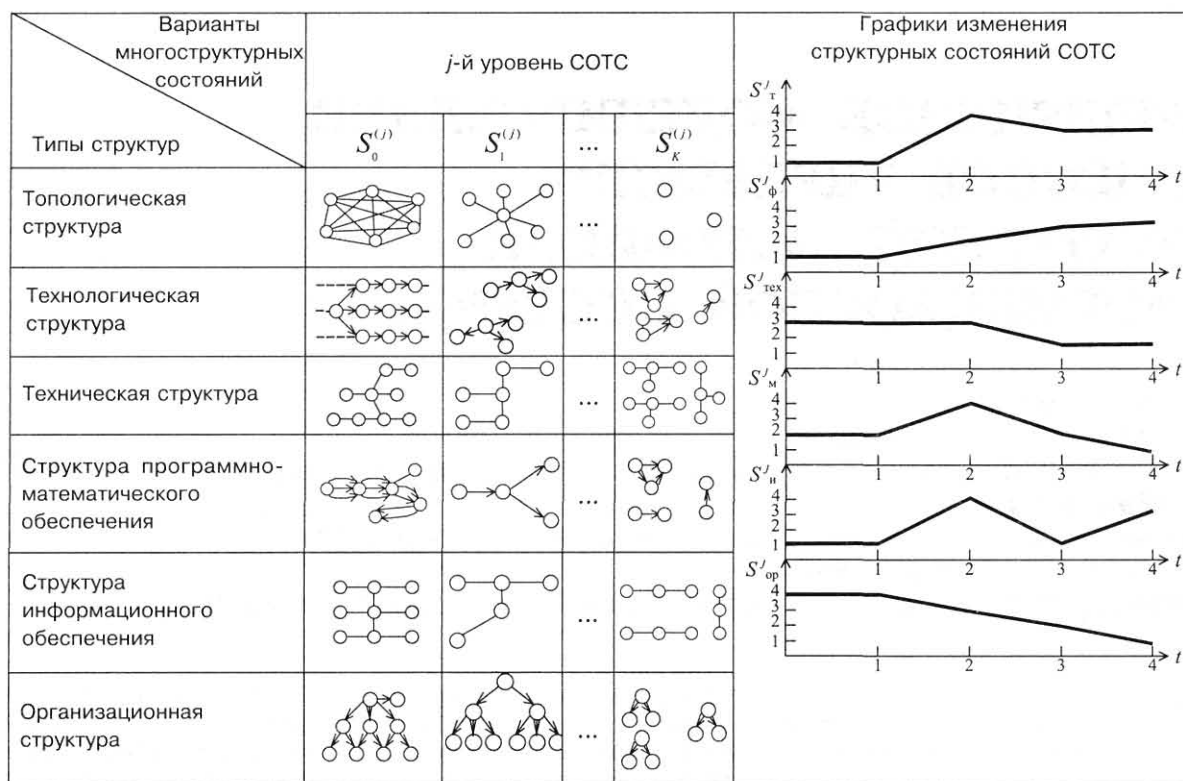


Рис. 1. Возможные варианты структурной динамики сложной организационно-технической системы:

$S_k^{(j)}$  — k-е структурное макросостояние СОТС;  $S_1^j, S_{\text{ф}}^j, S_{\text{тех}}^j, S_{\text{м}}^j, S_{\text{и}}^j, S_{\text{ор}}^j$  — состояние топологической, функциональной, технической структур, состояние структур программно-математического и информационного обеспечения, состояние организационной структуры соответственно

В свою очередь, распределение функций и алгоритмов по элементам и подсистемам СОТС зависит от структуры и параметров законов управления данными элементами и подсистемами. Трудность разрешения данной противоречивой ситуации усугубляется еще и тем, что под действием различных причин (внутренних либо внешних, объективных либо субъективных) изменяется состав и структура СОТС.

К настоящему времени рассматриваемый класс задач структурно-функционального синтеза и управления развитием СОТС исследован недостаточно глубоко. Получены новые научные и практические результаты в рамках следующих направлений исследований [3–7]:

— синтез технической структуры СОТС при известных законах функционирования основных элементов и подсистем СОТС (первое направление исследований);

— синтез функциональной структуры СОТС или, по-другому, синтез законов и программ управления основными элементами и подсистемами СОТС при известной технической структуре (второе направление исследований);

— синтез программ создания и развития новых поколений СОТС без учета этапа совместного функционирования существующей СОТС и внедряемой СОТС (третье направление исследований);

— одновременный синтез как технической, так и функциональной структур СОТС (четвертое направление исследований)

Кратко остановимся на состоянии и результатах исследований, проведенных в рамках каждого из перечисленных направлений. К настоящему времени как в нашей стране, так и за рубежом выполнен достаточно большой объем научных работ, посвященных решению проблемы синтеза технических структур СОТС различных классов. При этом обобщенная задача синтеза (выбора) структуры (либо структур) СОТС сводится, как правило, к постановке и решению следующей оптимизационной задачи [3, 4]:

$$\bar{S} \{ \{ \bar{f} \in \bar{F}(\bar{\pi}) \bar{R} \{ \bar{m} \in \bar{M} \} \} \} \rightarrow \text{extr}, \quad (1)$$

$$\bar{\pi} \in \bar{P}, \quad (2)$$

$$\bar{f} \in \bar{F}(\bar{\pi}), \quad (3)$$

$$\bar{m} \in \bar{M}, \quad (4)$$

где  $\bar{P}$  — множество возможных принципов и алгоритмов управления  $\bar{\pi} \in \bar{P}$ , используемых при формировании облика системы или ее элементов;  $\bar{F}$  — множество взаимосвязанных функций (задач, операций), выполняемых системой. Каждому набору принципов и алгоритмов управления  $\bar{\pi}$  соответ-

ствует множество функций  $\bar{F}(\bar{\pi})$ , из которого при проектировании системы необходимо выбрать подмножество, достаточное для реализации выбранных принципов управления, т. е. выбрать  $\bar{f} \subset \bar{F}(\bar{\pi})$ ;  $M$  — множество возможных взаимосвязанных элементов СОТС. Подобными элементами применительно к СОТС могут быть средства приема, регистрации, передачи и обработки информации, пункты обслуживания и управления и т. п.;  $R$  — операция отображения элементов множества  $\bar{F}$  на элементы множества  $M$ .

В этом случае данное оптимальное отображение должно обеспечивать экстремум некоторой (либо некоторых) целевой функции  $S$  при выполнении заданных ограничений.

Дальнейшее обобщение рассматриваемой задачи синтеза проводится в направлении учета факторов неопределенности, вызванных воздействием внешней среды, а также в направлении, связанном с постановкой и решением многокритериальных задач выбора оптимальных структур СОТС.

Одной из основных трудностей решения сформулированной задачи синтеза структур вида (1)–(4) является ее большая размерность, которая определяется общим числом переменных и ограничений, используемых при формализации и решении данной задачи. Поэтому на основу решения рассматриваемого класса задач положены различные варианты реализации процедур декомпозиции (композиции), агрегирования (деагрегирования), координации, с помощью которых удается «проклятие размерности». Дополнительные особенности данные процедуры приобретают еще и из-за того, что большинство переменных, используемых при решении задачи синтеза структур СОТС, должны принимать целочисленные значения. В качестве примера успешного решения задач данного класса можно привести результаты, полученные в работах [3, 4]. Авторами данных работ был предложен агрегативно-декомпозиционный подход, предусматривающий (на основе альтернативно-графовой формализации) построение многоуровневого комплекса взаимосвязанных моделей различного типа: оптимизационных аналитических и/или имитационных моделей синтеза структур СОТС.

Многочисленные исследования задач синтеза структур СОТС вида (1)–(4) показали [3, 4], что если при формировании облика СОТС для некоторых ее элементов и подсистем возникают проблемы ликвидации больших (пиковых) информационных нагрузок, то в этом случае должны оптимизироваться сами правила, алгоритмы функционирования указанных элементов и подсистем (второе направление исследований).

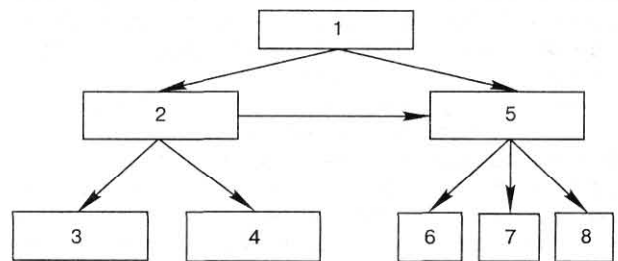
Исследование данных вопросов (задач синтеза функций, алгоритмов функционирования и правил поведения элементов заданной иерархической системы) уже более 40 лет выполняется различными научными школами в нашей стране и за рубежом в рамках интенсивно развивающейся теории управления [5–7].

В связи с этим, кратко остановимся лишь на одном из частных направлений этих исследований, непосредственно связанных с тематикой данной статьи, а именно с исследованием задач управления структурной динамикой СОТС. Эволюция исследований данных вопросов определялась эволюцией создания и применения соответствующих СОТС с управляемой структурной динамикой.

На рис. 2, взятом из работы [5], представлена классификация СОТС, в которых к настоящему времени получила практическую реализацию концепция управляемой структурной динамики.

К настоящему моменту времени задачи управления базовыми СОТС с реконфигурацией исследованы в наибольшей степени. Полученные фундаментальные научные результаты (концепции, принципы, способы, методы управления данными СОТС) позволили получить интересные прикладные результаты в различных предметных областях [5–8]. В отличие от базовых СОТС с реконфигурацией исследования проблем создания и применения интегрированных систем активного управления к настоящему моменту находятся в начальной стадии. Это, в первую очередь, касается СОТС с управляемой структурной динамикой, в которых реализуются элементы интеллектуального управления. Данные системы функционируют в условиях существенной неопределенности, связанной, как уже указывалось ранее, с изменением содержания целей и задач, стоящих перед СОТС, воздействием возмущающих факторов со стороны внешней среды и имеющих целенаправленный и/или нецеленаправленный характер.

Для указанных систем использование традиционных подходов при формализации и решении задач управления структурной динамикой СОТС становится уже малоэффективным. Одним из наиболее перспективных путей конструктивного учета перечисленных выше факторов сложности в соот-



■ Рис. 2. Классификация СОТС с управляемой структурной динамикой:

1 — СОТС с управляемой структурной динамикой; 2 — базовые СОТС с реконфигурацией; 3 — системы координатно-параметрического (операторного, бинарного) управления (СКПУ); 4 — системы с активной управляемой технологией (САУТ); 5 — интегрированные системы активного управления (ИСАУ); 6 — системы альтернативного и многоуровневого управления; 7 — системы отказоустойчивого и самовосстанавливаемого управления; 8 — системы, в которых реализованы концепции интеллектуального управления

ветствующих задачах управления является направление исследований, получившее название «искусственного интеллекта» [6]. В рамках данного научного направления применительно к исследованию проблем управления сформировалась отдельная область исследований, связанная с созданием и эксплуатацией систем интеллектуального управления. К настоящему времени наиболее интересные научные и практические результаты, связанные с процессами формирования и реализации управляющих воздействий в СОТС, получены на основе применения производственных систем в форме нечетких и других правил, а также применения искусственных нейронных сетей [6].

Вместе с тем, до сих пор наименее исследованными остаются задачи структурно-функционального синтеза СОТС, в ходе решения которых требуется одновременно синтезировать как функциональную, так и техническую структуры указанных систем с учетом различных классов пространственно-временных, технических и технологических ограничений [1, 2, 8]. Такого рода задачи возникают, например, на этапе применения СОТС для следующих ситуаций: при изменении способов и целей функционирования СОТС, их содержания, последовательности выполнения; при перераспределении и децентрализации функций, задач, алгоритмов управления, информационных потоков между уровнями СОТС, при реконфигурации их структур в случае их деградации. Таким образом, в современных условиях назрела острая необходимость в формировании теоретических основ управления структурной динамикой СОТС. С нашей точки зрения, данная теория должна иметь междисциплинарный характер и основываться на результатах, полученных в классической теории управления, в исследовании операций, в искусственном интеллекте, в теории систем и системном анализе. Два последних научных направления позволяют в дальнейшем корректно осуществлять переход от слабоструктурированной к структурированной постановке задач управления структурной динамикой. На рис. 3 показано место разрабатываемой теории в рамках предлагаемых междисциплинарных исследований.

Учет структурной динамики СОТС (в том числе и для ИнС) особенно важен в настоящее время, так как в рамках современных транснациональных корпораций уже сейчас создаются так называемые «виртуальные производства» с постоянно изменяющейся конфигурацией. В этом случае, исходя из стратегических целей менеджмента данных корпораций, деятельность реальных производственно-экономических систем, входящих в их состав, координируется на базе соответствующих ИнС, взаимодействующих по телекоммуникационным сетям. Решение задач управления структурной динамикой как самих БС, так и ИнС представляет собой чрезвычайно сложную многоплановую проблему. Важная роль в исследовании данной проблемы отводится методам моделирования. При этом сам процесс моделирования должен иметь комплексный характер и проводиться в рамках соответствующих



■ Рис. 3. Определение места теории управления структурной динамикой СОТС в междисциплинарных исследованиях

ющих интегрированных систем поддержки принятия решений (ИСППР), в состав которых, в общем случае, должны входить: имитационные системы (ИС); интеллектуальные информационно-поисковые системы (ИИПС); экспертные системы поддержки принятия решений (ЭСППР); расчетно-логические системы (РЛС); инструментальные CASE-средства автоматизации проектирования.

Центральной проблемой при построении ИСППР на основе перечисленных средств автоматизации принятия решений была и остается проблема согласования и координации их работы. Для этого необходимо выбрать в качестве базовой структуры одну из тех математических структур, на которых строится большинство рассматриваемых систем, входящих в состав ИСППР.

Проведенный анализ показывает, что в качестве такой базовой структуры следует выбрать динамический альтернативный системный граф (АСГ) с управляемой структурой, с помощью которого можно описать многомодельную структурную динамику как БС, так и их ИнС. Более того, если провести динамическую интерпретацию данного АСГ, то в этом случае, как показали предварительные исследования, можно с единых позиций описать как задачу структурно-функционального синтеза основных элементов и подсистем ИнС, так и процессы управления их развитием [1, 8, 9]. Территориальная распределенность БС и соответствующей ИнС, а также их высокая структурная динамика потребовали от исследователей поиска новых концептуальных моделей процессов управления данными системами. Одним из наиболее перспективных в этом случае является направление, связанное с построением мультиагентных систем [6, 10].

На рис. 4 представлен один из возможных вариантов описания агента, входящего в состав соответствующей мультиагентной системы. В работах [11, 12, 13] данные агенты названы активными подвижными объектами (АПО). Указанные объек-

ты представляют собой искусственно созданные материальные объекты (аппаратно-программные комплексы), перемещающиеся в пространстве и осуществляющие взаимодействие (информационное, вещественное, энергетическое) с объектами обслуживания (ОБО), другими АПО. На рис. 4 показана обобщенная структура АПО как объекта управления. Данный объект АПО состоит из четырех подсистем, которым поставлены в соответствие четыре процесса (вида функционирования): 1) процесс движения; 2) процессы взаимодействия с ОБО, другими АПО; 3) процессы функционирования целевой и обеспечивающей аппаратуры; 4) процессы расхода и (или) пополнения ресурсов. Предлагаемая структура АПО, как показано в работах [11–13], допускает весьма многообразную интерпретацию. Так, например, в качестве АПО может выступать наземное, воздушное, надводное или подводное средство передвижения с установленным на нем аппаратно-программным комплексом, АПО можно интерпретировать также и как космическое средство (КСр), и, наконец, как мобильный агент [10].

Наряду с АПО в составе рассматриваемой концептуальной модели следует выделить ОБО, с которыми АПО осуществляют взаимодействие. Физически ОБО могут представлять собой естественные или искусственно созданные материальные объекты или естественную материальную среду, созданную природой. Так, в качестве ОБО может рассматриваться часть наземной или водной поверхности, области воздушного, подводного, подземного пространства, подвижные объекты, информационные ресурсы сети Internet. В этом случае природа и формы взаимодействия АПО с ОБО

могут носить как активный, так и пассивный характер (т. е. сопровождаться либо не сопровождаться изменением состояния ОБО).

Из вышеизложенного следует, что для каждого типа АПО должна быть сформулирована цель его функционирования, связанная с процессами взаимодействия с ОБО, с другими АПО, и определена соответствующая последовательность действий, в ходе которой будет достигнута поставленная цель. Анализ показывает, что в этом случае концептуальное описание указанной деятельности АПО удобно проводить с использованием понятия «операция», под которой в дальнейшем будем понимать действие или систему действий, объединенных общим замыслом и единой целью [1, 7, 8]. Из анализа рис. 4 следует, что цель функционирования АПО реализуется в ходе выполнения им операций, связанных с информационным, вещественным и энергетическим обменом с ОБО, другими АПО. Таким образом, операция обмена является основным системообразующим фактором, объединяющим (интегрирующим) различные виды деятельности АПО (движение, работу аппаратуры, расход ресурса и т. п.). Содержание и специфика каждой выполняемой операции АПО находит свое отражение в задании соответствующих параметров, характеризующих: результаты выполнения операций (объем, качество, время выполнения операции и т. п.); расход ресурсов при выполнении операции; информационные и материальные потоки, возникающие в ходе выполнения операции.

В работах [11–13] было предложено различать АПО первого и второго рода (АПО-I, АПО-II). При этом на АПО-I принято возлагать задачи непо-



■ Рис. 4. Обобщенная структурная схема активного подвижного объекта (АПО)

средственного взаимодействия с ОБО и внешней средой, а на АПО-II — задачи обеспечения указанного взаимодействия. Переходя непосредственно к задачам комплексного моделирования структурной динамики ИнС на основе концепции АПО, остановимся, прежде всего, на теоретико-множественном описании данных задач. Для проведения данного теоретико-множественного описания воспользуемся ранее предложенной графической интерпретацией процессов управления структурной динамикой СОТС. В рассматриваемых задачах каждая из структур может быть задана своим динамическим альтернативным мультиграфом следующего вида [9]:

$$G_{\alpha}^{t_j} = \langle T_{\alpha}^{t_j}, \Gamma_{\alpha}^{t_j}, P_{\alpha}^{t_j} \rangle, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — индекс, характеризующий вид структуры,  $A = \{T, \Phi, \text{Тех}, \text{ПМО}, \text{ИО}, \text{ОР}\}$  — множество индексов, соответствующих топологической (Т), функциональной (Ф), технической структурам (Тех), структурам программно-математического и информационного обеспечения (ПМО, ИО), организационной структуре (ОР) ИнС;  $t_j \in \{t_1, t_2, \dots, t_f\}$  — линейно упорядоченное множество моментов времени перехода ИнС от одного многоструктурного макросостояния  $S_{\delta}$  к другому макросостоянию  $S_{\delta'}$ ;  $\delta, \delta' \in \{1, \dots, \Delta\}$  — множество номеров макросостояний ИнС;  $X_{\alpha}^{t_j} = \{x_{\alpha}^{t_j}\}$ ,  $\Gamma_{\alpha}^{t_j} = \{\gamma_{\alpha}^{t_j}\}$  — множество вершин и дуг графа, соответствующих фиксированному виду структуры « $\alpha$ » в момент времени  $t_j$  и задающих ее альтернативные варианты;  $P_{\alpha}^{t_j} = \{p_{\alpha}^{t_j}\}$  — множество «весов» (приоритетов), количественно характеризующих значимость каждой из дуг в соответствующем альтернативном мультиграфе. Кроме того, задано множество допустимых (исходя из содержательной постановки каждой конкретной задачи) операций отображения указанных выше альтернативных мультиграфов с динамической структурой вида (1) друг на друга:

$$M_{\langle \alpha, \bar{\alpha} \rangle}^{t_j} : G_{\alpha}^{t_j} = G_{\bar{\alpha}}^{t_j}, \quad (6)$$

а также множество допустимых операций отображения многоструктурных макросостояний ИнС  $S_{\delta}$  друг на друга:

$$\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^{t_j} : S_{\delta} \rightarrow S_{\delta'}. \quad (7)$$

При этом предполагается, что каждое многоструктурное макросостояние ИнС в момент времени  $t_j$  задается в результате операции композиции соответствующих альтернативных мультиграфов, описывающих каждый вид структуры « $\alpha$ ».

С учетом вышеизложенного, графическая интерпретация рассматриваемой задачи синтеза облика ИнС и управления ее структурной динамикой сводится к поиску такого макросостояния  $S_{\delta}^* \in \{S_1, \dots, S_{\Delta}\}$  и такой последовательности выполнения операций отображения во времени  $\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^{t_j}$ ,  $\Pi_{\langle \delta', \delta'' \rangle}^{t_{j+1}}$ , ...,  $\Pi_{\langle \delta_{f-1}, \delta_f \rangle}^{t_f}$ , при которых обеспечивается выбор наилучшей (с точки зрения обобщенного показателя эффективности функционирования

ИнС) программы создания, применения и развития ИнС.

На первом шаге решения предложенной обобщенной проблемы синтеза облика ИнС (в том числе и БС) и управления ее структурной динамикой необходимо, прежде всего, рассмотреть вопрос формирования методологических основ проведения соответствующих исследований.

Масштабность и сложность рассматриваемой в этой связи проблемы требует выбора в качестве базовой методологии принципов, концепций, подходов современного обобщенного системного анализа, представляющего собой одно из главных направлений реализации системного подхода, в рамках которого на основе гармоничного сочетания формально-математических и логико-эвристических методов осуществляется конструктивное решение разнородных и разноуровневых задач анализа и синтеза ИнС на различных этапах их жизненного цикла [2, 8].

Конструктивное решение рассматриваемой проблемы поиска и выбора наилучших вариантов создания и развития ИнС предполагает, во-первых, построение соответствующего полимодельного комплекса, описывающего различные аспекты жизненного цикла существующей и создаваемой ИнС, во-вторых, разработку методов, алгоритмов и методик многокритериального синтеза структуры перспективной ИнС, и, в-третьих, разработку поэтапной интерактивной процедуры поиска решения задачи синтеза ИнС и программ их развития.

Кратко остановимся на вопросе формирования облика одной из компонент ИСППР, а именно, на составе и структуре имитационной системы (ИС), с помощью которой могут быть решены различные классы задач управления структурной динамикой ИнС. В современных ИС 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 доминирующих экзогенных переменных в зависимости от этапа решения задачи выбора, обеспеченности исходными данными ЛПР каждый раз пользуется такими моделями и методами получения релаксированных решений исходной задачи, чтобы оценки затрат на реализацию полученных решений (затрат на расход используемого ресурса) становились все более и более точными по мере сужения множества допустимых альтернатив.

Исследование процессов управления структурной динамикой разнородных классов АПО, в том числе и исследование задач анализа и синтеза БС и соответствующих ИнС, показало, что данные процессы и системы имеют многоуровневый и полифункциональный характер. Данное представление процессов функционирования АПО и соответствующей системы управления (СУ АПО) повлияло на выбор струк-

туры банка моделей разрабатываемого специального программно-математического обеспечения ИС, в котором необходимо, прежде всего, выделить три основных блока (рис. 5): 1) модели функционирования СУ АПО и объектов обслуживания (ОБО) (блок I); 2) модели оценки и анализа состояния АПО, СУ АПО, оценки обстановки (блок II); 3) модели принятия решений в СУ АПО (блок III).

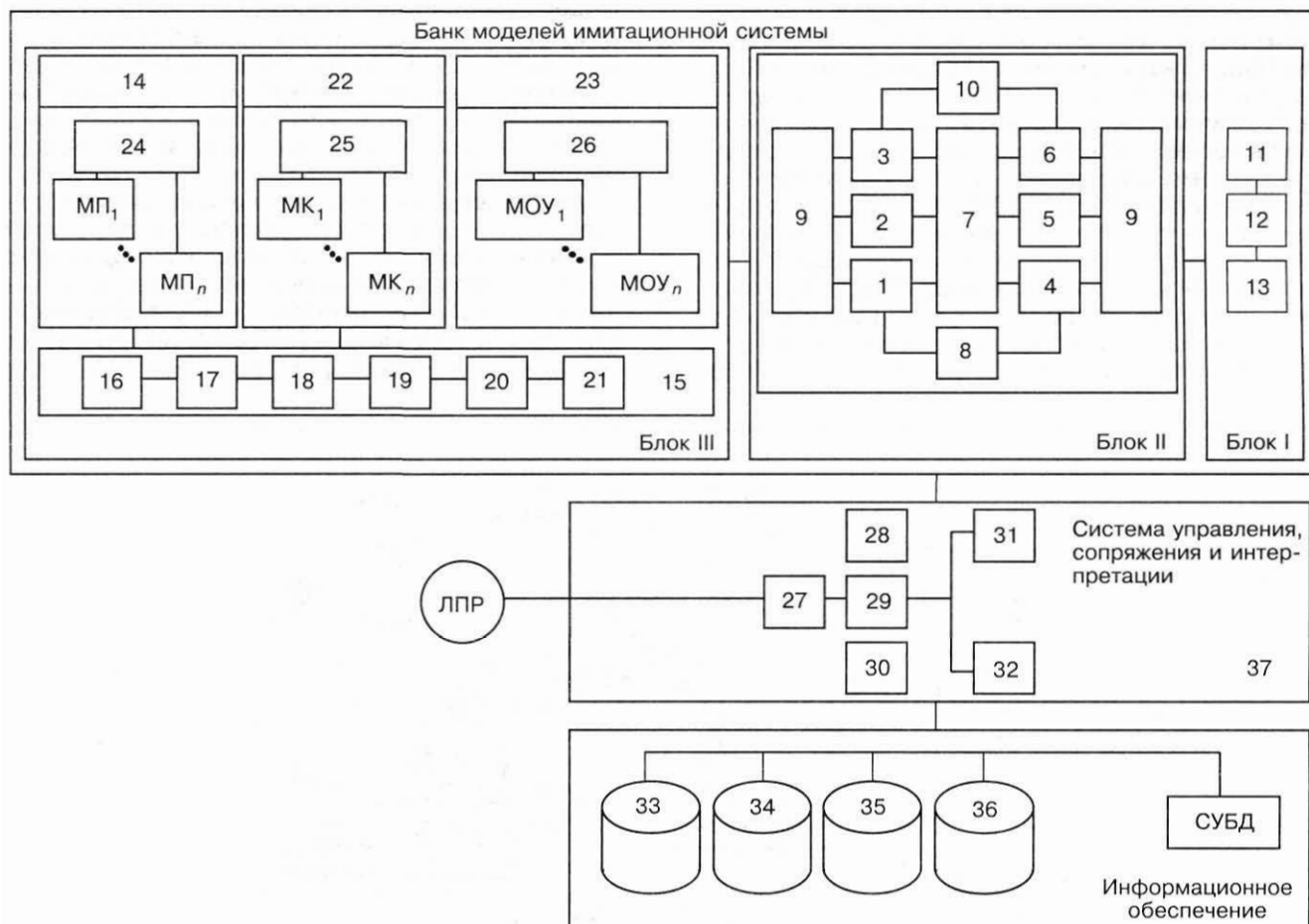
Блок моделей функционирования СУ АПО, ОБО включает в себя: модели функционирования АПО-I, системы АПО-I, группировки систем АПО-I (блоки 1, 2, 3); модели функционирования АПО-II (блок 4), системы АПО-II (блок 5), группировки систем АПО-II (блок 6); модели взаимодействия основных элементов и подсистем СУ АПО между собой и ОБО (блок 7); модели функционирования ОБО (блок 8); модели воздействия внешней среды на СУ АПО (блок 9); модели имитации результатов целевого применения СУ АПО (блок 10).

Блок моделей оценки и анализа состояния АПО, СУ АПО, оценки обстановки включает в себя: модели и алгоритмы оценки и анализа состояния

движения, аппаратуры, ресурсов и обмена АПО (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 моделей принятия решений в СУ АПО входят: модели и алгоритмы долгосрочного и оперативного планирования операций взаимодействия (ОВ) в СУ АПО (блок 14); модели и алгоритмы управления структурами СУ АПО (блок 15), а именно: топологической (блок 16), технической (блок 17), технологической (блок 18), организационной структурой (блок 19); структурой СПМО (блок 20), информационной структурой (блок 21); модели и алгоритмы коррекции долгосрочных и оперативных планов проведения ОВ в СУ АПО (блок 22); модели и алгоритмы решения задач координации в СУ АПО на этапах планирования (блок 24), коррекции (блок 25), оперативного управления (блок 26); модели и алгоритмы оперативного управления элементами и подсистемами СУ АПО (блок 23).

На рис. 5 также изображена система управления, сопряжения и интерпретации (блок 37), в которую



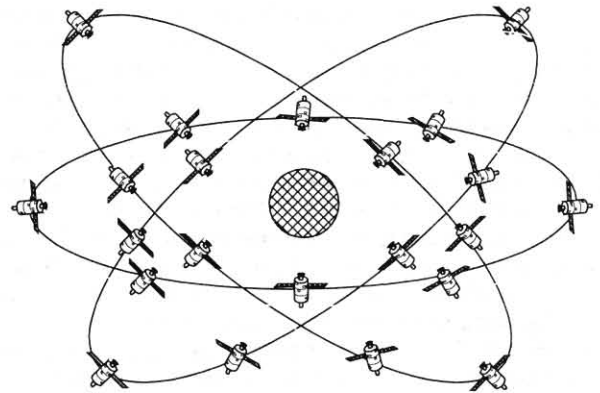
■ Рис. 5. Структура имитационной системы:

$MP_1, \dots, MP_n, MK_1, \dots, MK_n, MOY_1, \dots, MOY_n$  — соответственно модели планирования, коррекции и оперативного управления АПО, входящими в СУ АПО (1, ..., n)-го типов

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 СУ АПО играет информационное обеспечение, включающее в себя: базы данных о состоянии АПО (блок 33), СУ АПО (блок 35), ОБО (блок 34), в целом по обстановке (блок 35); базы данных об аналитических и имитационных моделях функционирования и принятия решений в СУ АПО (блок 36).

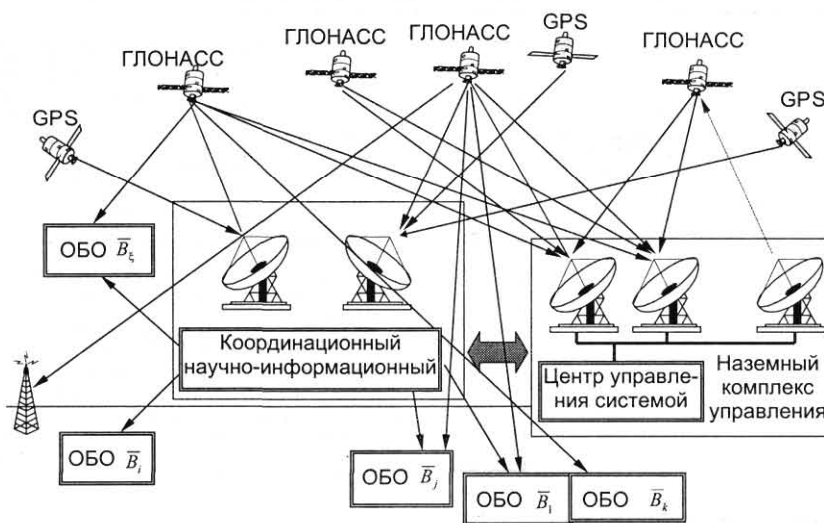
К настоящему времени, используя предложенную имитационную систему, удалось успешно решить целый ряд важных задач управления структурной динамикой СОТС в таких предметных областях, как космонавтика, информатика, менеджмент [9, 12, 13, 18]. В качестве примера, иллюстрирующего конструктивность предлагаемого подхода к организации и проведению комплексного моделирования СОТС, рассмотрим постановку и основные этапы совместного решения задачи оперативного синтеза технологии автоматизированного управления (ТАУ) космическими средствами (КСр) и задачи планирования работы бортовых и наземного комплексов управления (БКУ и НКУ), входящих в состав соответствующей автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами (АСУ НКА) [19]. Базовую основу технического обеспечения указанной системы составляет территориально распределенная информационно-вычислительная сеть, топологическая структура которой постоянно изменяется за счет пространственного перемещения как НКА, так и отдельных подсистем НКУ. Вычислительные ком-



■ Рис. 6. Топологическая структура орбитальной группировки навигационных КА

плексы, входящие в состав указанной сети, располагаются как на борту каждого НКА, так и в подсистемах НКУ. На рис. 6 и 7 в качестве примеров приведены обобщенные топологические структуры существующих систем НКА и НКУ Российской Федерации (система ГЛОНАСС) и США (система GPS) [17]. В этом случае, рассматривая КСр как один из возможных вариантов реализации концептуальной модели АПО, можно, используя разработанную ИС, решить сформулированные ранее прикладные задачи управления данными космическими средствами.

Анализ содержательной и формальной постановок задач управления структурной динамикой АСУ НКА показывает, что из-за их полимодельного многокритериального описания требуется разработка специальных процедур (сценариев) интерактивного взаимодействия ЛПР с ИС для получения решения данных задач [13–15].



■ Рис. 7. Топологическая структура наземного комплекса управления навигационными КА



Рассмотрим некоторые возможные процедуры (сценарии) моделирования процессов управления структурной динамикой АСУ НКА. Для удобства дальнейшего изложения материала будем предполагать, что обобщенное полимодальное многокритериальное описание задач управления структурной динамикой АСУ НКА имеет следующий вид [12]:

$$\begin{aligned}
 & J(x(t), u(t), o(t), t) \rightarrow \underset{u \in \Delta}{extr}, \quad (8) \\
 & \Delta = \{u | x(t) = \varphi(x(t), u(t), \xi(t), \beta, t), y(t) = \\
 & = \psi(x(t), u(t), \xi(t), v, t), x(T_0) \in X_0(\beta), \\
 & x(T_f) \in X_f(\beta), u(t) \in Q(x(t), t), \\
 & \xi(t) \in \Xi(x(t), t), \beta \in B, x(t) \in \bar{X}(t)\}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

где  $J(x(t), u(t), o(t), t) = \|J^{(g)T}, J^{(o)T}, J^{(k)T}, J^{(p)T}, J^{(n)T}, J^{(e)T}, J^{(c)T}, J^{(v)T}\|$  — вектор показателей эффективности функционирования АСУ НКА, а  $J^{(g)T}, J^{(o)T}, J^{(k)T}, J^{(p)T}, J^{(n)T}, J^{(e)T}, J^{(c)T}, J^{(v)T}$  — соответственно векторы показателей эффективности управления движением, операциями взаимодействия, каналами, ресурсами, потоками, параметрами операции, структурами, вспомогательными операциями в АСУ НКА, а индексы в обозначении векторов «g», «o», «k», «p», «n», «e», «c», «v» соответствуют представленным в [12, 13] моделям управления движением ( $M_g$ ), управления операциями взаимодействия ( $M_o$ ), управления каналами ( $M_k$ ), управления ресурсами ( $M_p$ ), управления потоками ( $M_n$ ), управления параметрами операции ( $M_e$ ), управления структурами ( $M_v$ ); управления вспомогательными операциями ( $M_v$ ); управления движением ( $M_g$ ),  $x(t), y(t)$  — соответственно обобщенные векторы состояния и выходных характеристик динамической системы, описывающей процессы управления структурной динамикой АСУ НКА;  $u(t)$  — обобщенный вектор управляющих воздействий,  $\xi(t)$  — обобщенный вектор возмущающих воздействий;  $\beta$  — вектор структурных параметров (характеристик) АСУ НКА, определяющих ее облик;  $Q(x(t), t), \Xi(x(t), t), B$  — заданные области изменений значений векторов  $u(t)$  и  $\xi(t)$ ;  $\beta; X_0(\beta), X_f(\beta), \bar{X}(t)$  — заданные области изменений вектора  $x(t)$  соответственно в начальный, конечный и текущий моменты времени.

В выражении (9) переходная и выходная функции  $\varphi(x(t), u(t), \xi(t), \beta, t)$  и  $\psi(x(t), u(t), \xi(t), v, t)$  в общем случае задаются в аналитико-алгоритмическом (имитационном) виде в рамках предлагаемой ИС. Возможные варианты описания и реализации указанных функций (в более общем случае — операторов) как раз и определяют содержание тех методов и алгоритмов, которые могут быть положены в основу построения процедур получения скоординированных решений в задачах управления структурной динамикой АСУ НКА.

К настоящему времени разработаны многочисленные подходы, способы, методы, алгоритмы и методики координационного выбора на комплексах разнородных моделей, описывающих различ-

ные предметные области [1–8, 13–15]. В табл.1 и 2 приведены примеры реализации такого рода процедур.

Перечисленные в табл.1 и 2 возможные схемы координации (согласования) моделей и показателей эффективности отличаются друг от друга: способами генерации допустимых альтернативных решений в задачах анализа и синтеза технологий автоматизированного управления КА; правилами проверки алгоритмически и аналитически заданных ограничений; способами перехода от одного шага интерактивного сужения множества допустимых альтернатив к другому шагу. Предлагаемый в статье подход к организации и проведению комплексного моделирования СОТС основывается на оригинальном динамическом описании происходящих в ней процессов и отличается от существующих тем, что в рамках единого модельного описания удается совместно решать задачи синтеза как технической, так и функциональной структур СОТС [12, 13]. Применительно к АСУ НКА технология решения указанных задач включает в себя следующие этапы.

**Шаг 1.** Для заданной внешней обстановки и фиксированных исходных данных, при использовании блока моделей функционирования КА (блоки I, II, см. рис. 5), осуществляется (при необходимости) формирование дополнительных исходных для

■ Таблица 1

Процедуры решения задач УСД АСУ КА	Модели задач УСД АСУ КА					
	Задача 1	Задача 2	Задача 3	Задача 4	Задача 5	Задача 6
AOM → AH → K	+					
ИОМ → AH → K				+	+	+
AOM → ИОМ → AH → K		+	+			
(AOM ⊂ ИОМ) → AH → K			+			
(ИОМ ⊂ AOM) → AH → K			+		+	+
(AOM <sub>1</sub> ∪ ИОМ ∪ AOM <sub>2</sub> ) → AH → K				+	+	+

Принятые обозначения: AOM — аналитическая оптимизационная модель; AH — анализ полученных результатов (проводимый автоматически либо с привлечением ЛПР); K — коррекция полученных решений.

■ Таблица 2

Задача 1	Задача 2	Задача 3	Задача 4	Задача 5	Задача 6
$f_0^{(a)} \rightarrow \text{extr}_{\Delta^{(a)}}$	$f_0^{(a)} \rightarrow \text{extr}_{\Delta^{(u)}}$	$f_0^{(a)} \rightarrow \text{extr}_{\Delta^{(a)} \cap \Delta^{(u)}}$	$f_0^{(u)} \rightarrow \text{extr}_{\Delta^{(u)}}$	$f_0^{(u)} \rightarrow \text{extr}_{\Delta^{(u)}}$	$f_0^{(u)} \rightarrow \text{extr}_{\Delta^{(a)} \cap \Delta^{(u)}}$
Принятые обозначения: $\Delta^{(a)}, \Delta^{(u)}$ — множества (либо подмножества) допустимых альтернатив вида (9), заданные соответственно аналитически и алгоритмически; $f_0^{(a)}, f_0^{(u)}$ — обобщенные показатели эффективности функционирования АСУ НКА, полученные на основе решения соответствующих задач векторной оптимизации и заданные соответственно аналитически и алгоритмически.					

решения задачи планирования процессов функционирования АСУ НКА. С этой целью проводятся многократные машинные эксперименты с моделями движения НКА, моделями функционирования телекоммуникационных сетей, информационно-вычислительных комплексов. В результате указанного моделирования получают множество допустимых вариантов перемещения объектов, допустимых вариантов значений максимально (минимально) допустимых скоростей передачи и обработки данных в АСУ НКА. Указанная информация с помощью матричных временных функций  $\varepsilon_{ij}(t)$ ,  $\Theta_{i \in j \lambda}(t)$  (см. [11–13]) и соответствующих констант [16] вводится в детерминированные модели управления структурной динамикой (УСД) АСУ НКА. При этом, используя нелинейные преобразования, предложенные ранее в работах [12, 18], осуществляют формирование множества допустимых альтернатив вида (9) на основе ограничений вида «и—или», косвенно задающих возможные варианты ТАУ НКА.

**Шаг 2.** Исходя из выделяемых на планирование и синтез ТАУ временных и вычислительных ресурсов, решается задача планирования самого процесса планирования и синтеза. Для этого используются модели, входящие в состав блока III.

**Шаг 3.** Проводится анализ существования решений в поставленных задачах выбора. Для этого, используя заранее рассчитанное множество достижимости динамической системы, описывающей процессы функционирования АСУ НКА, можно оценить возможность удовлетворения заданных крайних условий как в задаче планирования, так и в задаче синтеза ТАУ НКА.

**Шаг 4.** Если решение задач существует, то автоматически (по заранее заданному алгоритму) либо в интерактивном режиме с использованием моделей, входящих в блок III, осуществляется формирование как допустимого распределения функций управления между подсистемами АСУ НКА, так и плана ее функционирования.

**Шаг 5.** Используя модели блока III, осуществляют многоэтапный итерационный поиск наилучшей ТАУ и соответствующего оптимального плана функционирования АСУ НКА.

**Шаг 6.** Полученный на шаге 5 оптимальный план (планы) функционирования АСУ НКА, с использованием моделей, входящих в блоки III, I, проверяют на устойчивость по отношению к вариантам возмущающих воздействий, которые могут возникнуть на этапе реализации плана, оценивается чувствительность составленного плана к изменению ис-

ходных данных. Для этого в интерактивном режиме в ходе проведения имитационных экспериментов с моделями АСУ НКА, входящими в состав блоков I, III, осуществляется формирование и анализ нечетко-возможных и интервальных характеристик, показателей, характеризующих устойчивость и чувствительность разработанных планов функционирования элементов и подсистем АСУ НКА. Принципиальное отличие проводимых в ИС машинных экспериментов от классических схем методов статистических испытаний состоит в том, что в ходе моделирования возмущающих воздействий с заданным уровнем рефлексии моделируются возможные варианты компенсации данных воздействий. Для этого при планировании заранее выделяются соответствующие резервы, разрабатываются алгоритмы реконфигурации структур АСУ КА. Оценка чувствительности плана функционирования АСУ НКА проводится в соответствии с алгоритмами, описанными в [19].

**Шаг 7.** Проводится параметрическая и структурная адаптация составленного плана и технологии автоматизированного управления КСр к возможному возмущающим воздействиям (с привлечением блоков I, II, III ИС) [19].

**Шаг 8.** Формирование и интерактивный анализ ТАУ КСр и составленного плана (планов) функционирования АСУ НКА

Проведенные машинные эксперименты показали [12, 18], что при использовании динамических моделей управления КСр существенно сокращается размерность задач управления, решаемых в каждый момент времени, за счет рекуррентного описания моделей, повышается оперативность их решения на основе декомпозиции и распараллеливания вычислительного процесса, широкого использования оверлейных режимов работы ЭВМ. Так, например, для 15 НКА, четырех радиотехнических станций, одного центра управления полетом типовая технология управления указанными КСр и соответствующий оптимальный оперативный план функционирования НКУ для интервала времени 12 ч были рассчитаны на ПЭВМ Pentium III в течение 15 мин.

Оригинальность предложенного варианта формирования процессов управления КСр состоит в том, что в этом случае удается в явном виде связать содержательные аспекты функционирования АСУ КСр с технологией управления КСр. Так, например, исследуя модель  $M_o, M_e, M_n$  методами теории оптимального управления, можно оценить степень взаимного влияния вариантов распределения

ресурсов КСр, схем проведения траекторных изменений и способов маршрутизации информационных потоков на качество процессов применения КА по целевому назначению. Кроме того, в этом случае можно найти оптимальные программы управления потоками, измерениями и ресурсами АСУ КСр.

Проведенный анализ показывает, что разработанный полимодельный комплекс и соответствующая имитационная система могут быть использованы для решения различных прикладных задач

в тех предметных областях, при формальном описании которых оказываются справедливыми предпосылки, положенные в основу предложенной концептуальной модели АПО [11, 12].

Результаты, представленные в данной статье, получены при выполнении исследований в рамках проекта 1992р, выполняемого совместно с European Office Of Aerospace Research and Development, и гранта # 02-07-90463 Российского Фонда фундаментальных исследований.

## Литература

1. **Балашов Е. П.** Эволюционный синтез систем. — М.: Радио и связь, 1983. — 328 с.
2. **Клир Дж.** Системология. Автоматизация решения системных задач. — М.: Радио и связь, 1990. — 540 с.
3. **Добановский С. А., Озеряный Н. А.** Системы автоматического управления с реконфигурацией // Измерение, контроль, автоматизация. — 1990. — № 4(76). — С. 62–80.
4. **Васильев С. Н.** От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления. — 2001. — № 1. — С. 5–22; № 2. — С. 5–21.
5. **Цвиркун А. Д.** Основы синтеза структуры сложных систем. — М.: Наука, 1982. — 200 с.
6. **Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К.** Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. — М.: Наука, 1993. — 160 с.
7. **Моисеев Н. Н.** Элементы теории оптимальных систем. — М.: Наука, 1974. — 526 с.
8. **Николаев В. И., Брук В. М.** Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1985. — 199 с.
9. **Соколов Б. В., Григорьев К. Л.** Методологические основы обоснования и выбора вариантов создания и развития информационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. — 2000. — Т. 43. — № 8. — С. 82–85.
10. **Городецкий В. И.** Информационные технологии и многоагентные системы // Проблемы информатизации. — 1998. — № 1. — С. 3–14.
11. **Калинин В. Н.** О теории управления активными подвижными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. — 1981. — Т. 23. — № 6. — С. 26–31.
12. **Соколов Б. В.** Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. — Министерство обороны СССР, 1992. — 232 с.
13. **Калинин В. Н., Соколов Б. В.** Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. — 1995. — № 1. — С. 56–61.
14. **Методологические** вопросы построения имитационных систем: Обзор / С. В. Емельянов, В. В. Калашников, В. И. Лутков и др. Под научн. ред. Д. М. Гвишиани, С. В. Емельянова. — М.: МЦНТИ, 1973. — 87 с.
15. **Краснощевков П. С., Морозов В. В., Федоров В. В.** Декомпозиция в задачах проектирования // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. — 1979. — Т. 6. — № 2. — С. 7–18.
16. **Соколов Б. В., Курносоев А. Н.** Модель и алгоритм оперативного перераспределения функций управления между техническими комплексами // Изв. вузов. Приборостроение. — 2000. — Т. 43. — № 8. — С. 66–72.
17. **Соловьев Ю. А.** Системы спутниковой навигации. — М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. — 267 с.
18. **Калинин В. Н., Соколов Б. В.** Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. — 1987. — № 1. — С. 106–114.
19. **Скурихин В. И., Забродский В. А., Копейченко Ю. В.** Адаптивные системы управления машиностроительным производством. — М.: Машиностроение, 1989. — 207 с.