

С.А. ПОТРЯСАЕВ, Б.В. СОКОЛОВ, Р.М. ЮСУПОВ
**СОДЕРЖАТЕЛЬНОЕ И ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ
ПРОБЛЕМЫ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА
И УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ
СИСТЕМЫ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Содержательное и формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза и управления развитием информационной системы наземно-космического мониторинга.

Аннотация. Предложен многомодельный (полимодельный) подход к описанию процессов функционирования информационной системы наземно-космического мониторинга (ИС НКМ) эколого-технологических объектов в условиях, когда их параметры и структуры изменяются под действием объективных (субъективных), внешних (внутренних) причин. Данные процессы в статье названы процессами управления структурной динамикой ИС НКМ. На основе разработанной ранее концепции активного подвижного объекта (АПО) проводится содержательная постановка рассматриваемого класса задач управления и её теоретико-множественное описание.

Ключевые слова: информационные системы, наземно-космический мониторинг, эколого-технологические объекты, управляемая структурная динамика.

Potryasaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Conceptual and formal description of structure-functionalsynthesis and development control problems of space and ground based date monitoring information systems.

Abstract. A multiple-model approach to description of space and ground based date monitoring information systems (IS) functioning processes is presented. Moreover these systems investigate in conditions when their parameters and structures changeability by objective (subjective) external (internal) reasons. The processes considered in this paper were qualified as control processes of IS structure dynamics. Previously developed concept of active moving object (AMO) was used to form an informal and set-theory-based statement of control problems.

Keywords: information systems, space and ground based date monitoring, ecological-technological objects, structure dynamics control and management.

1. Современное состояние исследований проблем управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Одной из основных особенностей таких сложных организационно-технических систем (СОТС) как информационные системы наземно-космического мониторинга (ИС НКМ) состояния эколого-технологических объектов является то, что их параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных причин. На рис. 1 представлены существующие объекты и системы мониторинга эколого-технологических объектов и элементы их ИС. На другом рисунке (рис. 2) представлены основные структуры рассматриваемого класса ИС и возможные сценарии их изменения (сценарии структурной динамики).

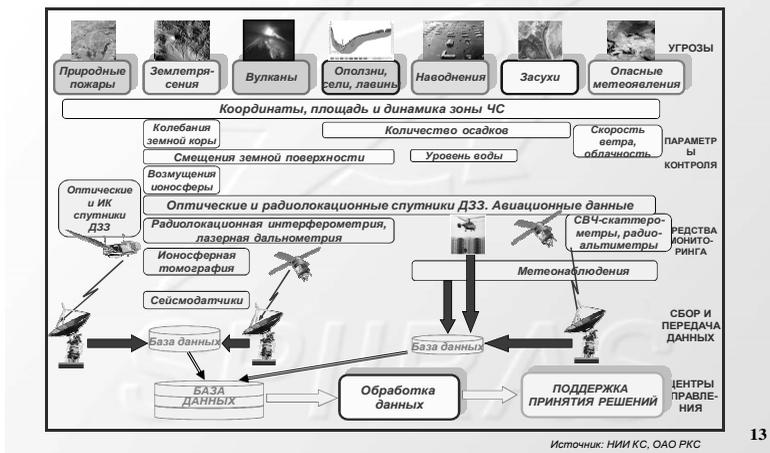


Рис. 1. Существующие объекты и системы мониторинга эколого-технологических объектов.

Анализ показывает, что для повышения (сохранения) требуемого уровня работоспособности и возможностей ИС НКМ, либо минимизации потерь при деградации указанных систем необходимо осуществлять управление их структурами (в том числе, управление реконфигурацией структур ИС НКМ).

Проведенные ранее исследования показали [14–16, 29, 31–33], что задачи управления структурной динамикой ИС НКМ по своему содержанию относятся к классу задач структурно-функционального синтеза облика СОТС, формирования и реализации соответствующих программ управления их развитием.

Главная трудность и 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. В свою очередь, распределение функций и алгоритмов по элементам и подсистемам СОТС зависит от структуры и параметров законов управления данными элементами и подсистемами.

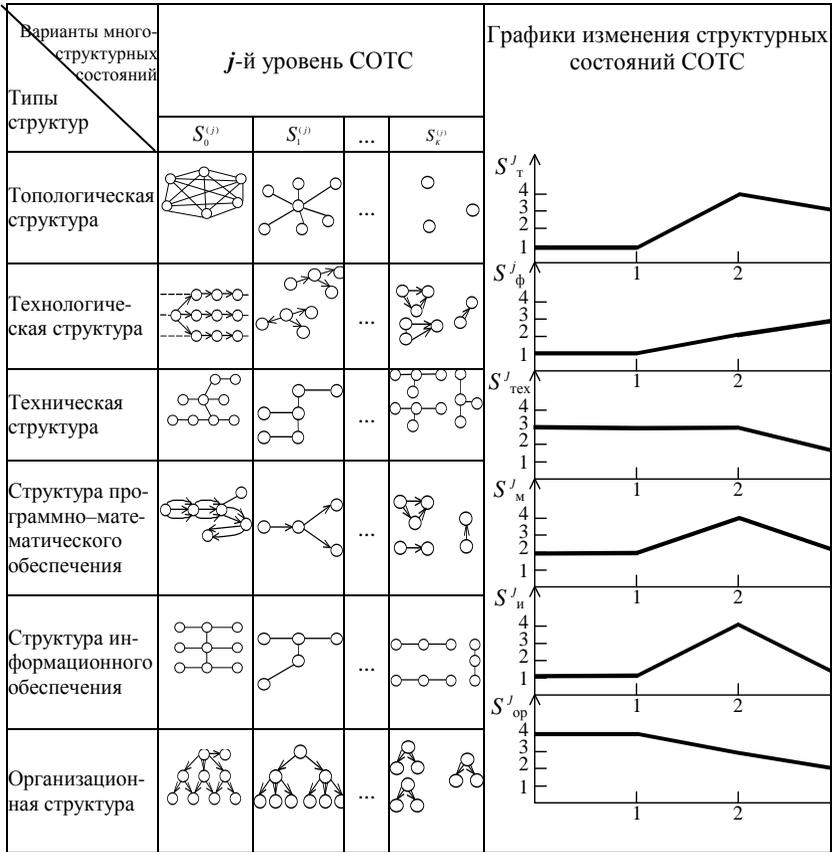


Рис. 2. Возможные варианты структурной динамики СОТС.

Трудность разрешения данной противоречивой ситуации усугубляется ещё 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:

– *синтез технической структуры* СОТС при известных законах функционирования основных элементов и подсистем СОТС (первое направление исследований) [6, 9, 18, 20, 38, 39–41];

– *синтез функциональной структуры* СОТС или, по-другому, синтез законов и программ управления основными элементами и подсистемами СОТС при известной технической структуре (второе направление исследований) [1, 3–5, 22, 23, 27];

– *синтез программ создания и развития новых поколений* СОТС без учёта этапа совместного функционирования существующей СОТС и внедряемой СОТС (третье направление исследований) [9, 16, 28, 40, 41];

– *одновременный синтез как технической, так и функциональной структур* СОТС (четвёртое направление исследований) [5, 6, 9, 31, 40, 41, 42].

Кратко остановимся на состоянии и результатах исследований, проведённых в рамках каждого из перечисленных направлений.

К настоящему времени как в нашей стране, так и за рубежом, выполнен достаточно большой объём научных работ, посвящённых решению проблемы синтеза технических структур СОТС различных классов [6, 9, 40–42]. При этом обобщённая задача синтеза (выбора) структуры (либо структур) СОТС сводится, как правило, к постановке и решению следующей оптимизационной задачи [40–42]:

$$\bar{S} \left\{ \left[\bar{f} \subset \bar{F}(\bar{\pi}) \right] \bar{R} \left[\bar{m} \subset \bar{M} \right] \right\} \rightarrow \text{extr}, \quad (1)$$

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

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

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

где \bar{P} — множество возможных принципов и алгоритмов управления $\bar{\pi} \subset \bar{P}$, используемых при формировании облика системы или её элементов; \bar{F} — множество взаимосвязанных функций (задач, операций), выполняемых системой. Каждому набору принципов и алгоритмов управления $\bar{\pi}$ соответствует множество функций $\bar{F}(\bar{\pi})$, из которого при проектировании системы необходимо выбрать подмножество, достаточное для реализации выбранных принципов управления, т.е. выбрать $\bar{f} \subset \bar{F}(\bar{\pi})$; \bar{M} — множество возможных взаимосвязанных элементов СОТС. Подобными элементами применительно к СОТС могут быть средства приёма, регистрации, передачи и обработ-

ки информации, пункты обслуживания и управления и т. п.; \bar{R} — операция отображения элементов множества \bar{F} на элементы множества \bar{M} .

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

Дальнейшее обобщение рассматриваемой задачи синтеза проводится в направлении учёта факторов неопределённости, 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 её большая размерность, которая определяется общим числом переменных и ограничений, используемых при формализации и решении данной задачи. Поэтому в основу решения рассматриваемого класса задач положены различные варианты реализации процедур декомпозиции (композиции), агрегирования (деагрегирования), координации, с помощью которых удаётся преодолеть «проклятие размерности». Дополнительные особенности данные процедуры приобретают ещё и из-за того, что большинство переменных, используемых при решении задачи синтеза структур СОТС, должны принимать целочисленные значения.

В качестве успешного примера решения задач данного класса можно привести результаты, полученные в работах [40–42]. 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.

При практической реализации рассматриваемого подхода широко использовались как универсальные, так и специализированные средства автоматизации моделирования [40–42].

В заключение отметим, что особенности формального описания рассматриваемого класса задач синтеза структур СОТС позволяют при разной интерпретации переменных и ограничений, используемых при его описании, формулировать и решать не только задачи синтеза технической структуры СОТС, но и задачи синтеза других типов структур СОТС (например, топологической структурны, организационной и т. п.).

Многочисленные исследования задач синтеза структур СОТС вида (1)–(4) показали [40–42], что если при формировании облика СОТС для некоторых её элементов и подсистем возникают проблемы ликвидации больших (пиковых) информационных нагрузок, то в этом случае должны уже 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 выполняются различными научными школами в нашей стране и за рубежом в рамках интенсивно развивающейся теории управления [1, 3–5, 22, 23, 27, 29, 30, 34, 35].

В связи с этим, кратко остановимся лишь на одном из частных направлений данных 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. 3, взятом из работы [9], представлена классификация СОТС, в которых к настоящему времени получила практическую реализацию концепция управляемой структурной динамики. На данном рисунке цифрами обозначены следующие классы систем: 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 многорежимного управления; 7 — системы отказоустойчивого и самовосстанавливаемого управления; 8 — системы, в которых реализованы концепции интеллектуального управления.

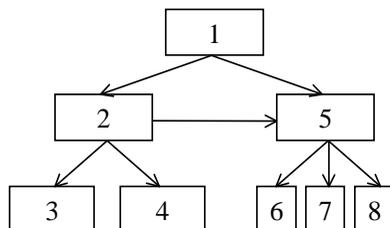


Рис. 3. Классификация СОТС с управляемой структурной динамикой.

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 в различных предметных областях получить интересные прикладные результаты [2, 5, 11, 19, 33].

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 неопределённости, 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 [6, 13, 14, 17, 25, 42].

Для указанных систем использование традиционных подходов при формализации и решении задач управления структурной динамикой СОТС становится уже малоэффективным. Одним из наиболее перспективных путей конструктивного учёта перечисленных выше факторов сложности в соответствующих задачах управления является направление исследований, получившее название «искусственного интеллекта» [5, 6, 8]. В рамках данного научного направления применительно к исследованию проблем управления сформировалась отдельная область исследований, связанная с созданием и эксплуатацией систем интеллектуального управления. На рис. 4 представлена многоуровневая организация процессов управления в СОТС. На рис. 5, 6, взятых из работы [5], представлены соответственно два основных источника интеллектуального управления и взаимосвязь основных науч-

ных направлений, формирующих область теории интеллектуального управления.

В указанной работе [5] приведён подробный анализ современного состояния исследований в области интеллектуального управления за последние 30 лет в нашей стране и за рубежом. В настоящее время наиболее интересные научные и практические результаты, связанные с процессами формирования и реализации управляющих воздействий в СОТС получены на основе применения производственных систем в форме нечётких и других правил, а также применения искусственных нейронных сетей [5, 6, 8, 18].

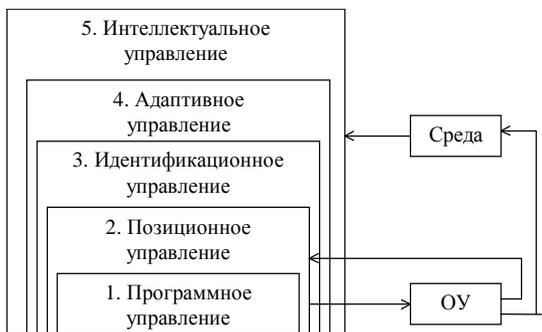


Рис. 4. Многоуровневая организация процессов управления СОТС.

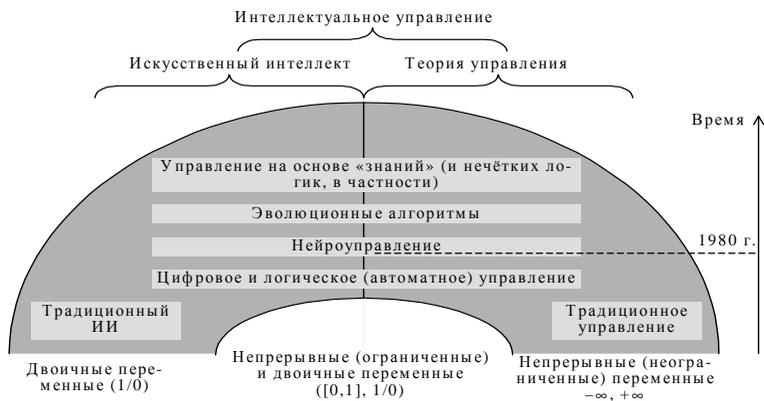


Рис. 5. Два основных источника интеллектуального управления.



Рис. 6. Определение интеллектуального управления как области исследования.

Завершая рассмотрение современного состояния исследований задач управления структурной динамикой СОТС, кратко охарактеризуем результаты, полученные к настоящему времени в рамках сформулированных в начале данного подраздела статьи третьего и четвертого направлений исследования указанных задач.

К настоящему моменту известен ряд работ [9, 16, 28, 40, 41], посвященных созданию теоретических основ управления развитием СОТС. В рамках данных исследований разработаны соответствующие методологические и методические основы постановки и решения планирования развития СОТС. Известен ряд итерационных процедур получения решения в частных задачах структурно-функционального синтеза облика СОТС на ранних этапах их жизненного цикла. Однако, к сожалению, все ранее полученные результаты слабо учитывают динамику изменения внешнего мира СОТС (предметной области) на этапах применения данных систем по целевому назначению, когда фактор времени является определяющим [32]. Также в ранее выполненных исследованиях не учитывалась возможная распределенность элементов и подсистем СОТС на этапе применения.

Таким образом, в современных условиях назрела острая необходимость в обобщении ранее полученных научных и практических ре-

зультатов, полученных при исследовании отдельных аспектов проблемы структурно-функционального синтеза облика СОТС, формировании теоретических основ управления структурной динамикой СОТС. С нашей точки зрения, данная теория будет являться междисциплинарной теорией, базирующейся на результатах, полученных в классической теории управления, в исследовании операций, в искусственном интеллекте, в теории систем и системном анализе [1, 4, 7, 8, 14, 18, 24, 25, 28, 43].

Два последних научных направления позволят в дальнейшем осуществлять корректно переход от слабоструктурированной к структурированной постановке задач управления структурной динамикой. В связи с изложенным ранее, приведённый рис. 6 целесообразно видоизменить применительно к рассматриваемым в данной статье задачам. На рис. 7, в отличие от рис. 6, показано, что разрабатываемая теория дополнительно будет базироваться на результатах, полученных в современной теории систем и системном анализе. На данном рисунке, исходя из целей наглядности, не показаны конкретные направления взаимодействия перечисленных теорий друг с другом. В качестве первого шага при создании данной теории рассмотрим концептуальное и формальное описание структурной динамики СОТС. При этом интерпретацию построенных моделей будем проводить на примере постановки проблемы структурно-функционального синтеза и управления развитием ИС НКМ состояния сложных объектов применительно к различным предметным областям.

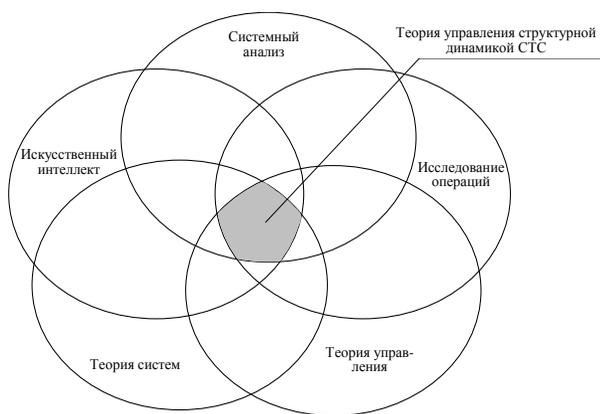


Рис. 7. Определение места теории управления структурной динамикой СОТС в междисциплинарных исследованиях.

2. Концептуальная модель процессов управления структурной динамикой информационной системы наземно-космического мониторинга (ИС НКМ). При построении концептуальной модели управления структурами (управления структурной динамикой) ИС НКМ будем в дальнейшем под орбитальными КСр (ОКСр) понимать совокупность космических аппаратов, решающих задачу дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в интересах мониторинга заданных эколого-технологических объектов (ЭкТехОб).

В свою очередь, в состав наземных средств ИС НКМ входят программно-технические комплексы, обеспечивающие на этапе орбитального полёта процессы функционирования КА ДЗЗ, решающие задачи космического мониторинга ЭкТехОб, а также программно-технические комплексы, обеспечивающие наземный мониторинг рассматриваемых объектов [15, 19, 21, 37]. Пусть организационно указанные комплексы образуют соответствующие наземные комплексы мониторинга и управления (НКМУ), включающие в себя: центры управления НКМ (ЦУ), пункты управления (ПУ), пункты непосредственно информационного взаимодействия с ЭкТехОб [пункты обслуживания (ПО)], центральный пункт управления (ЦПУ), телекоммуникационную систему (ТелС), обеспечивающую взаимодействие всех перечисленных элементов НКУ друг с другом. Совокупность КА ДЗЗ и НКМУ образует ИС НКМ [37]. На рис. 8 приведена обобщённая структура ИС НКМ. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: КСАМ — унифицированный комплекс средств автоматизации мониторинга и управления соответствующего элемента ИС НКМ; символами \circ обозначены КА, входящие в заданную орбитальную систему ДЗЗ, а также оконечные средства (например, измерительные приборы, сенсоры, датчики и т. п.), выполняющие задачи сбора первичных данных о состоянии ЭкТехОб; символами \otimes обозначены ЭкТехОб, в качестве которых могут быть подвижные и неподвижные природно-технические объекты, области наземной и водной поверхности, воздушного и космического пространства, интересующие различных потребителей данных наземно-космического мониторинга. При этом процесс взаимодействия орбитальных и наземных средств мониторинга с ЭкТехОб может иметь вещественный, энергетический и информационный характер, а само, в общем случае, многоструктурное макросостояние ЭкТехОб в общем случае может изменяться.

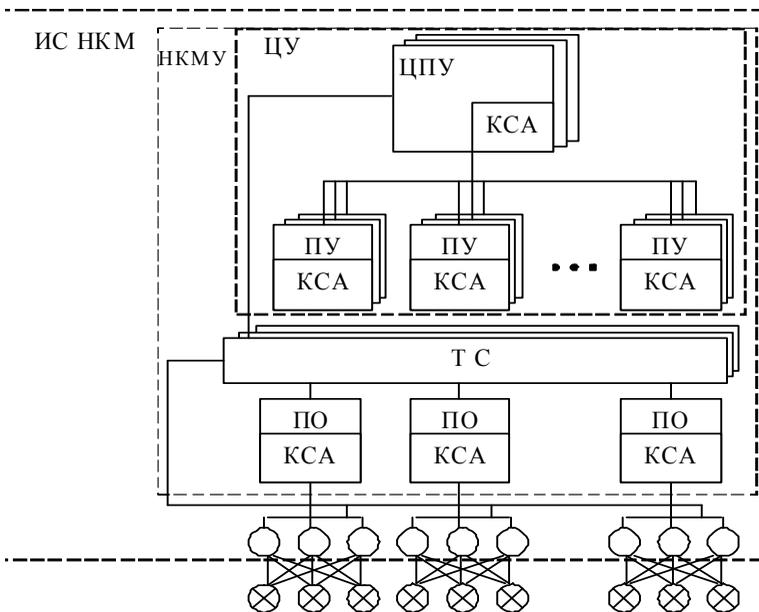


Рис. 8. Обобщённая организационно-техническая структура ИС НКМ ЭкТехОб.

Анализ результатов предварительных исследований показал, что при содержательном описании и последующей формализации процессов структурно-функционального синтеза и управления развитием ИС НКМ ЭкТехОб удобно воспользоваться концепцией активного подвижного объекта (АПО), который, в общем случае, представляет собой искусственно созданный материальный объект (приборный комплекс), перемещающийся в пространстве и осуществляющий взаимодействие (информационное, вещественное, энергетическое) с другими АПО и объектами обслуживания (ОБО — в нашем случае ЭкТехОб) [15, 33]. На рис. 9 показана обобщённая структура АПО как объекта управления. АПО состоит из четырёх подсистем, которым поставлены в соответствие четыре процесса (четыре функции): процесс движения, процесс взаимодействия с другими АПО и ОБО, процесс функционирования аппаратуры (приборов), процесс расхода (пополнения) ресурса.



Рис. 9. Обобщённая структурная схема АПО.

Все перечисленные четыре функции различны по своему характеру, но именно совместное их выполнение при главенствующей роли функции взаимодействия придаёт АПО новое качество, выделяющее его как специфический объект исследования и управления и принципиально отличающее соответствующие задачи управления от традиционных задач управления механическим движением. Предлагаемая структура АПО допускает весьма многообразную интерпретацию и позволяет с единых позиций в рамках концептуальной модели ИС НКМ описать как орбитальную группировку КА ДЗЗ, так и наземные компоненты и структуры синтезируемой ИС, а также собственно ЭкТехОб.

В работах [14–16, 31–33] было показано, что при построении моделей мониторинга и управления АПО должна быть сформулирована цель его функционирования, связанная с процессом взаимодействия с другими АПО, ОБО, и определена соответствующая последовательность операций, в ходе реализации которой будет достигнута поставленная цель. Содержание и специфика каждой выполняемой операции АПО находит своё отражение в задании соответствующих параметров, характеризующих как результаты выполнения операций (объём, качество, время выполнения операций, расход ресурсов и т. п.), так и материальные и информационные потоки, возникающие в ходе их выполнения.

Удобным средством описания концептуальной модели мониторинга и управления АПО в этом случае являются диаграммы состоя-

ний (макросостояний) и диаграммы переходов из состояний (макросостояний). На рис. 10 для примера приведён фрагмент диаграммы переходов из макросостояний некоторого пункта обслуживания (ПО) B_{μ} . ИС НКМ. На рис. 10 приняты следующие условные обозначения: 1 — приём необработанной информации ПО B_{μ} с АПО B_i ; 2 — приём необработанной информации ПО B_{μ} с ПО B_j ; 3 — приём обработанной информации ПО B_{μ} с ПО B_{ξ} ; 4 — хранение поступившей на ПО B_{μ} информации; 5 — обработка информации, поступившей на ПО B_{μ} ; 6 — передача необработанной информации с ПО B_{μ} на ПО B_{ξ} ; 7 — передача обработанной информации в ПО B_{μ} на ПО B_{ξ} ; 8 — передача обработанной информации с ПО B_{μ} на АПО B_i . В работах [15, 19, 21, 37] приведены примеры других вариантов диаграмм состояний АПО.

Таким образом, на концептуальном уровне процесс создания (структурно-функционального синтеза) и управления развитием как основных элементов и подсистем ИС НКМ, так и всей системы в целом целесообразно интерпретировать как двухэтапный процесс, включающий в себя процесс формирования требуемого облика ИС НКМ как некоторого многоструктурного макросостояния, компоненты которого удовлетворяют заданным спецификациям на указанную систему (первый этап), а также процесс перехода (второй этап) ИС НКМ из начального (текущего) многоструктурного макросостояния в синтезированное на первом этапе многоструктурное макросостояние.

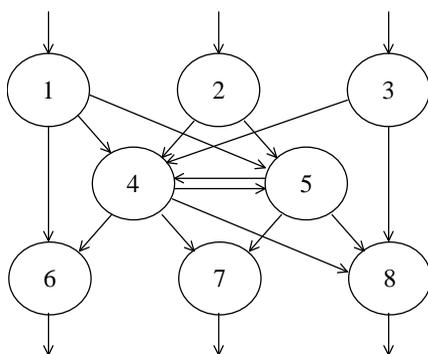


Рис. 10. Фрагмент диаграммы переходов из обобщённых состояний ПО ИС НКМ.

3. Теоретико-множественная модель управления структурной динамикой ИС НКМ. С учётом ранее описанной концептуальной модели управления ИС НКМ выделим в качестве основных следующие множества и структуры:

- $B = \{B_i, i \in M = \{1, \dots, m\}\}$ — множество объектов (подсистем, элементов), входящих в состав ИС НКМ и обеспечивающих её функционирование;
- $\bar{B} = \{\bar{B}_i, i \in \bar{M} = \{1, \dots, \bar{m}\}\}$ — множество объектов (подсистем, элементов), не входящих в состав ИС НКМ, но с которым ИС осуществляет взаимодействие (информационное, энергетическое, вещественное);
- $\tilde{B} = B \cup \bar{B}$ — множество объектов, рассматриваемых при мониторинге и управлении структурной динамикой ИС НКМ;
- $\tilde{C} = C \cup \bar{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_m\} \cup \{\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_{\bar{m}}\}$ — множество каналов, по которым осуществляется взаимодействие элементов и подсистем ИС НКМ друг с другом, с ЭкТехОб;
- $C = \{C_\lambda^{(i)}, \lambda \in \Lambda_i, i \in M\}$ — множество каналов (технических средств), имеющих в элементах и подсистемах ИС НКМ;
- $\bar{C} = \{\bar{C}_\lambda^{(i)}, \lambda \in \bar{\Lambda}_i, i \in \bar{M}\}$ — множество каналов, имеющих на ЭкТехОб;
- $D = \{D^{(c)} \cup \{D_x^{(i)}, i, j \in M, x \in K_i^{(o)}\}\}$ — множество операций, выполняемых в ИС НКМ;
- $D^{(i)} = \{D_x^{(i)}, x \in K_i^{(o)} = \{1, \dots, s_i\}\}$ — множество операций взаимодействия с объектом $\tilde{B}^{(i)}$;
- $D^{(c,1)} = \{\{D_{ivf\eta_1}^{(c,1)}\} \cup \{D_{ivf\eta_1}^{(c,2)}\} \cup \{D_{ivf}^{(c,3)}\}, i \in M, w \in NW^{(i)}, f \in NF^{(w)}, \eta_1 \in NH_1\}$ — множество макроопераций, выполняемых при функционировании ИС НКМ;
- $\{D_{ivf\eta_1}^{(c,1)}\}$ — множество макро операций, описывающих процесс функционирования объекта B_i в макро состоянии S_{ivf} на η_1 -м цикле управления; $M = \{1, \dots, m\}$, $NW^{(i)} = \{1, \dots, K_W^{(i)}\}$, $NF^{(w)} = \{1, \dots, K_F^{(w)}\}$, $NH_1 = \{1, \dots, \mathbb{E}_1\}$ — соответственно множества номеров объектов, номеров макросостояний объекта B_i , номеров мест объектов B_i в макро состоянии с номером «w», номеров циклов управления объекта B_i ;
- $\{D_{ivf\eta_1}^{(c,2)}\}$ — множество вспомогательных макро операций;

- $\{D_{iwf}^{(c,3)}\}$ — множество макро операций, описывающих процесс перехода объекта B_i из текущего макро состояния $S_{iwf'}$ в требуемое макро состояние S_{iwf} ;
- $\Phi = \{\{\Phi S_{\pi}^{(i)}\} \cup \{\Phi N_{\mu}^{(i)}\}, i \in M, \pi \in K_i^{(p,1)} = \{1, \dots, k_i^{(p,1)}\}, \mu \in K_i^{(p,2)} = \{1, \dots, k_i^{(p,2)}\}\}$ — множество ресурсов, используемых в СУ КСр;
- $\Phi S^{(i)} = \{\Phi S_{\pi}^{(i)}, \pi \in K_i^{(p,1)}\}$ — множество не складированных ресурсов, используемых на объекте $B^{(i)}$;
- $\Phi N^{(i)} = \{\Phi N_{\mu}^{(i)}, \mu \in K_i^{(p,2)}\}$ — множество складированных ресурсов, используемых на объекте $B^{(i)}$;
- $P = \{\{P_{<\alpha', \rho>}^{(i)}\} \cup \{P_{<\alpha, \rho>}^{(i,j)}\}, i \in M, \alpha' \in K_i^{(o)}, \alpha \in K_{<i,j>}^{(o)}, \rho \in K_i^{(n)}\}$ — множество потоков, образующихся при функционировании СУ КСр;
- $P^{(i)} = \{\{P_{<\alpha', \rho>}^{(i)}\}, i \in M, \alpha' \in K_i^{(o)}, \rho \in K_i^{(n)}\}$ — множество потоков (энергетических, вещественных, информационных), образующихся при функционировании объекта $B^{(i)}$;
- $P^{(i,j)} = \{P_{<\alpha, \rho>}^{(i,j)}, i, j \in M, \rho \in K_i^{(n)}\}$ — множество потоков (энергетических, вещественных, информационных), образующихся при взаимодействии объектов $B^{(i)}$ и $B^{(j)}$;
- $G = \{G_{\chi}, \chi \in NS\}$ — множество возможных типов структур ИС НКМ, в качестве которых, в первую очередь, выделяются топологическая (Топ), технологическая (функциональная (Фун)), техническая (Тех) структуры, структуры программно-математического и информационного обеспечения (Пмо), (Ио), организационная структура (Ор).

Для связи перечисленных множеств друг с другом введём в рассмотрение динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) следующего вида:

$$G_{\chi}^t = \langle X_{\chi}^t, F_{\chi}^t, Z_{\chi}^t \rangle, \quad (5)$$

где χ — индекс, характеризующий тип структуры ИС НКМ, $c \in NS = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ — множество индексов, соответствующих топологической, функциональной, технической структурам, структурам ПМО, ИО, организационной структуре, $t \in T$ — множество моментов времени; $X_{\chi}^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_{\chi}\}$ — множество элементов, входящих в состав структуры G_{χ}^t (множество вершин ДАМГ) в момент времени t ;

$F_{\chi}^t = \{f_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ — множество дуг ДАМГ типа G_{χ}^t , отражающих взаимосвязи между его элементами в момент времени t ;
 $Z_{\chi}^t = \{f_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ — множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов ДАМГ.

Кроме того, задано множество допустимых (исходя из содержательной постановки каждой конкретной задачи управления структурной динамикой ИС НКМ) операций отображения указанных выше ДАМГ друг на друга:

$$M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t : F_{\chi}^t \rightarrow F_{\chi'}^t, \quad (6)$$

а также операции композиции указанных отображений в момент времени t :

$$M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t = M_{\langle \chi, \chi_1 \rangle}^t \circ M_{\langle \chi_1, \chi_2 \rangle}^t \circ \dots \circ M_{\langle \chi', \chi' \rangle}^t, \quad (7)$$

С учётом вышеизложенного, много структурное состояние можно определить как подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых строятся соответствующие структуры ИС НКМ:

$$S_{\delta} \subseteq X_1^t \times X_2^t \times X_3^t \times X_4^t \times X_5^t \times X_6^t, \quad \delta = 1, \dots, K_{\Delta}. \quad (8)$$

Множество многоструктурных состояний ИС НКМ запишется следующим образом:

$$S = \{S_{\delta}\} = \{S_1, \dots, S_{K_{\Delta}}\}. \quad (9)$$

Введём ещё множество допустимых операций отображения многоструктурных состояний ИС НКМ друг на друга:

$$\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t : S_{\delta} \rightarrow S_{\delta'}. \quad (10)$$

При этом предполагается, что каждое многоструктурное состояние ИС НКМ в момент времени $t \in T$ задаётся в результате операции композиции соответствующих ДАМГ, описывающих каждый тип структуры (см. формулу 7).

Графическая интерпретация рассматриваемых задач управления структурной динамикой ИС НКМ в этом случае сводится к поиску такого многоструктурного состояния $S_{\delta} \in \{S_1, S_2, \dots, S_{K_{\Delta}}\}$ и такой последовательности (композиции) выполнения операций отображения вида (10) во времени $\Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{t_2} \circ \Pi_{\langle \delta_3, \delta \rangle}^{t_3}$ (или, другими словами, такого пути в ДАМГ), при которых обеспечивается выбор и реализация оптимальной (с точки зрения обобщённого показателя эффективности) программы управления структурной динамикой ИС НКМ, обеспечи-

вающей её переход из заданного в требуемое многоструктурное состояние.

Наряду с графической интерпретацией исследуемой проблемы может быть также предложено ее следующее *теоретико-множественное описание*: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, позволяющие находить такие $\langle U^t, S_\delta^{t_f} \rangle$, при которых выполняются следующие условия

$$\begin{aligned}
 J_\theta \left(X'_\chi, \Gamma'_\chi, Z'_\chi, F'_{\langle \chi, \chi' \rangle}, \Pi'_{\langle \delta, \delta \rangle}, t \in (t_0, t_f] \right) &\rightarrow \underset{\langle U^t, S_\delta^{t_f} \rangle \in \Delta_g}{\text{extr}} ; \\
 \Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_\delta^{t_f} \rangle \mid R_\beta \left(X'_\chi, \Gamma'_\chi, Z'_\chi, F'_{\langle \chi, \chi' \rangle}, \Pi'_{\langle \delta, \delta \rangle} \right) \leq \tilde{R}_g \right\} &; \quad (11) \\
 U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta, \delta \rangle}^t ; \beta \in \mathbf{B} \} &,
 \end{aligned}$$

где U^t — управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуру ИС НКМ, так и процессы создания и управления ее развитием; J_θ — стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество создания, функционирования и развития ИС НКМ, $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ — множество номеров показателей; Δ_g — множество динамических альтернатив (множество структур и параметров ИС НКМ, множество программ их создания и развития); \mathbf{B} — множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих процессы создания и развития ИС НКМ; \tilde{R}_g — заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ — интервал времени, на котором синтезируются как ИС НКМ, так и программы ее создания и развития.

К настоящему времени предложено несколько направлений конкретизации предложенной теоретико-множественной модели управления структурной динамикой ИС НКМ [15, 31, 33].

На рис. 11–12 представлены основные направления классификации задач управления структурной динамикой ИС НКМ.

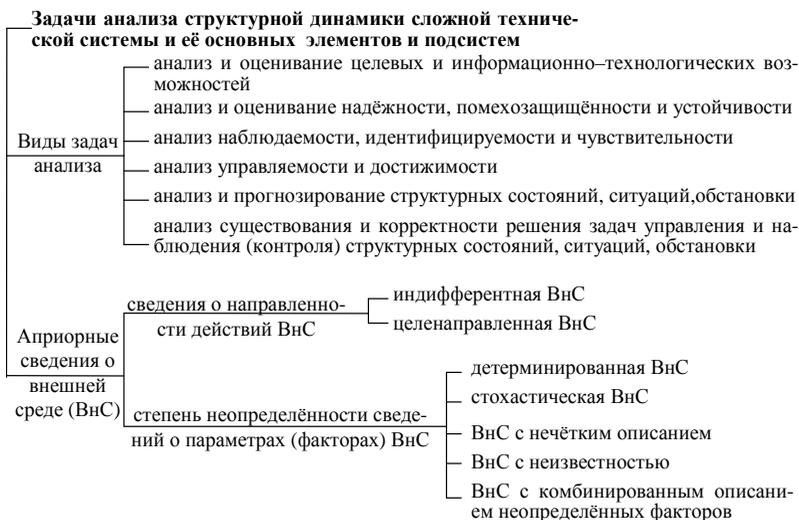


Рис. 11. Классификация задач анализа структурной динамики СОТС и её основных элементов и подсистем.

В работах [6, 14–16, 29, 31–33] представлены полученные к настоящему времени основные результаты решения задач управления структурной динамикой СОТС, которые были перечислены на рис. 10–12. В данном сборнике трудов СПИИРАН также представлен ряд интересных научных и практических результатов, связанных с решением рассматриваемых классов задач применительно к проблемам анализа и синтеза процессов и систем наземно-космического мониторинга сложных эколого-технологических объектов.

4. Заключение. Предложенное в статье рассмотрение вопросов формального описания и решения проблем структурно-функционального синтеза и управления развитием ИС НКМ в общем контексте *управления её структурной динамикой* позволяет, как показывают результаты ранее проведенных исследований, в о - п е р ы х , непосредственно связать те общие цели, на достижение которых ориентировано функционирование ИС НКМ, с теми целями, которые реализуются в ходе управления структурами ИС НКМ, в о - в т о р ы х , обоснованно определить и выбрать соответствующие последовательности решаемых задач и

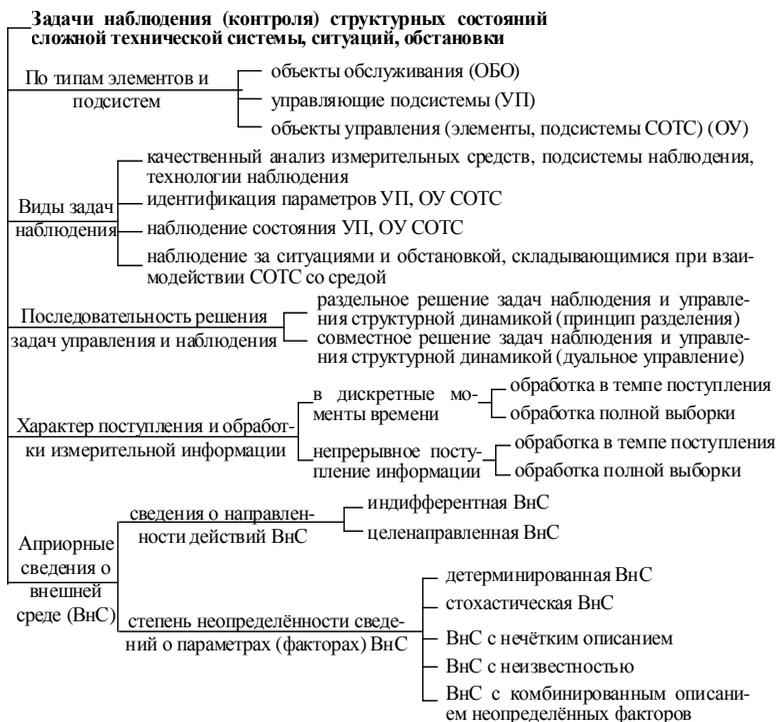


Рис. 12. Классификация задач наблюдения (контроля) структурных состояний СОТС, ситуаций, обстановки.

выполняемых операций (действий), связанных со структурной динамикой (другими словами, синтезировать технологию управления ИС НКМ), и, в - т р е т ь и х , осознанно находить компромиссные решения при распределении ограниченных ресурсов, выделяемых на управление структурной динамикой.

Литература

1. *Атанс М., Фалб П.* Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968.
2. *Беллман Р.* Процессы регулирования с адаптацией. – М.: Наука, 1964.
3. *Болтянский В.Г.* Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1966.
4. *Брайсон А., Хо-Ю-Ши.* Прикладная теория оптимального управления. – М.: Наука, 1972.
5. *Васильев С.Н.* От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001, № 1. – С.5-22, № 2 – С.5-21.

6. Военная системотехника и системный анализ. – Учебник / Под ред. проф. Б.В. Соколова. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999.
7. *Гир Дж. Ван.* Прикладная общая теория систем. – М.: Мир, 1981.
8. *Городецкий В.И.* Информационные технологии и многоагентные системы // Проблемы информатизации, 1998, №1, с.3-14.
9. *Дюбановский С.А., Озерянский Н.А.* Системы автоматического управления с реконфигурацией // Измерение, контроль, автоматизация, 1990, № 4(76). – С.62-80.
10. *Заде Л., Дезоер Ч.* Теория линейных систем. Метод пространства состояний / Пер. с англ. — М.: Наука, 1970. 703 с.
11. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Силаев А.В.* Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах // Автоматика и телемеханика, 1996, № 2. – С.3-20.
12. *Зимин И.Н., Иванилов Ю.П.* Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // ЖВМ и МФ, 1971. – Т. 11. - № 3.
13. *Иванов В.А., Фалдин Н.В.* Теория оптимальных систем автоматического управления. – М. – Наука, 1981. 336 с.
14. *Калинин В.Н., Резников Б.А.* Теория систем и управления (структурно-математический подход). Л.: ВИКИ.,1979.-417 с.
15. *Калинин В.Н.* Теоретические основы управления космическим аппаратом на основе концепции активного подвижного объекта. СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского. 1999. 190 с.
16. *Калинин В.Н., Соколов Б.В.* Многомодельное описание процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. №1. С. 149–156.
17. *Кастри Дж.* Большие системы: связность, сложность, катастрофы. – М.: Мир, 1982. 216 с.
18. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач. – М.: Радио и связь, 1990. 534 с.
19. *Кравец В.Г., Любинский В.Е.* Основы управления космическими полётами. – М.: Машиностроение, 1983. 224 с.
20. *Краснощеков П.С., Морозов В.В., Федоров В.В.* Декомпозиция в задачах проектирования// Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, 1979.-т.6, №2.- с.7-18.
21. *Лебедев А.А., Нестеренко О.П.* Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991. 224
22. *Ли Э.Б., Маркус Л.* Основы теории оптимального управления. – М.: Наука, 1972. 576 с.
23. *Мальшиев В.В., Красильщиков М.Н., Карлов В.И.* Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
24. *Месарович М., Мако Д., Такахара Я.* Теория иерархических многоуровневых системы. – М.: Мир, 1973. 344 с.
25. *Месарович М., Такахара Я.* Общая теория систем. – М.: Мир, 1978. 311 с.
26. 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.
27. *Моисеев Н.Н.* Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1975. 526 с.
28. *Морозов В.П., Дьмарский Я.С.* Элементы теории управления ГАП: математическое обеспечение. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. 333 с.
29. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

30. *Понтрягин Л., Болтянский В., Гамкрелидзе Р., Миценко Е.* Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Физматгиз, 1961. 392 с.
31. *Соколов Б.В.* Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. – МО, 1992. 232 с.
32. *Соколов Б.В., Калинин В.Н.* Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика, 1985, № 5. – С.106-114.
33. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики, 2002 г., №5 – с. 103 -117
34. *Табак Д., Куо Б.* Оптимальное управление и математическое программирование. М. – Наука, 1975. 280 с.
35. *Флеминг У., Ришел Р.* Оптимальное управление детерминированными и стохастическими системами. – М.: Мир, 1978. 316 с.
36. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. – М.: Наука, 1978. 165 с.
37. *Ханциверов Ф.Р., Остроухов В.В.* Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. – М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
38. *Холл А.* Опыт методологии для системотехники. – М.: Сов. радио, 1975. 258 с.
39. *Цвиркун А.Д.* Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982. 200 с.
40. *Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И.* Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). – М.: Наука, 1993. 157 с.
41. *Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И., Филимонов В.А.* Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем: Оптимизационно-имитационный подход. – М.: Наука, 1985. 174 с.
42. *Цурков В.И.* Динамические задачи большой размерности. – М.: Наука, 1988. 288 с.
43. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. 418 с.

Потрясаев Семен Алексеевич — к.т.н., старший научный сотрудник СПИИРАН. Область научных интересов: системный анализ и исследование операций, теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Автор более 30 научных трудов. semp@mail.ru; СПИИРАН, 14-я линия, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812) 328-0103.

Potryasaev Semyon Alekseevich — Ph.D., Leading Researcher, SPIIRAS. Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications more than 30. semp@mail.ru; SPIIRAS, 14th Line, 39, St.Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0103.

Соколов Борис Владимирович — д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ; заместитель директора по научной работе СПИИРАН. Профессор Соколов Б.В. специалист в области системного анализа и исследования операций. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Данная прикладная теория имеет междисциплинарный характер и базируется на результатах, полученных в таких областях научных знаний, как классическая теория управления, исследование операций, искусственный интеллект, теория систем и системный анализ. Автор 320 научных трудов, в том числе 3 монографий и 4 учебников. sokol@iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812) 328-0103, факс +7(812) 328-4450.

Sokolov Boris Vladimirovich — Doctor of Sciences (Tech), Prof., Honored scientist of Russian Federation; Deputy-Director for Research, SPIIRAS. Prof. Sokolov B.V. is a specialist in the field of systems analysis and operations research. Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. This applied theory has interdisciplinary character and is based on results obtained in classical control theory, operations research, artificial intelligence, theory of systems and systems analysis. The number of publications — 320, including 3 monograph and 4 textbook. sokol@iias.spb.su; SPIIRAS, 14th Line, 39, St.Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812) 328–0103, fax +7(812) 328–4450.

Юсупов Рафаэль Мидхатович — член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, директор СПИИРАН, президент НП «НОИМ». Область научных интересов: теория управления, информатика, теоретические основы информатизации и информационного общества, информационная безопасность. Число научных публикаций — 390. СПИИРАН, 14-я линия, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; тел. +7(812) 328–3311, +7(812) 328–3411, факс +7(812) 328–4450, e-mail: yusupov@iias.spb.su; www.spiiras.nw.ru.

Yusupov Rafael Midkhatovich — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Sciences (Tech), Professor, Director of SPIIRAS, Honored scientist of Russian Federation, President of NP «NSS». Research interests: control theory, informatics, theoretic basics of informatization and information society, information security. Number of research publications: 390. SPIIRAS, 14th Line, 39, St.Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328–3311, +7(812)328–3411, fax +7(812) 328–4450, e-mail: yusupov@iias.spb.su; www.spiiras.nw.ru.

Поддержка исследований. Исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-08-01016, 11-08-00767, 12-07-13119-офи-м-РЖД, 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект №2.11), проекта ESTLATRUS 2.1/ELRI - 184/2011/14 «Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems» (2012–2013 гг.), проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

Рекомендовано СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании д-р техн. наук, проф. Зеленцов В.А.
Статья поступила в редакцию 13.06.2013

РЕФЕРАТ

Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. **Содержательное и формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза и управления развитием информационной системы наземно-космического мониторинга.**

Предложен многомодельный (полимодельный) подход к описанию процессов функционирования информационной системы наземно-космического мониторинга (ИС НКМ) эколого-технологических объектов в условиях, когда их параметры и структуры изменяются под действием объективных (субъективных), внешних (внутренних) причин. Данные процессы в статье названы процессами управления структурной динамикой ИС НКМ. На основе разработанной ранее концепции активного подвижного объекта (АПО) проводится содержательная постановка рассматриваемого класса задач управления и её теоретико-множественное описание. Единство концептуального описания позволило с помощью предложенного унифицированного комплекса динамических моделей описать как основные аспекты функционирования элементов и подсистем, входящих в состав ИС НКМ [к ним в первую очередь отнесены орбитальная система космических аппаратов (ОрС КА), наземный комплекс управления (НКУ)], так и процессы их взаимодействия с объектами обслуживания, являющимися источниками (потребителями) космической информации (эколого-технологические объекты).

В этом случае в рамках единого модельного описания удаётся осуществить одновременно синтез как технической, так и функциональных структур ИС НКМ. Предлагаемый полимодельный комплекс позволяет при решении задач управления структурной динамикой ИС НКМ осуществлять поиск альтернатив не в дискретных, а в конечномерных пространствах, существенно сократить размерность задач структурно-функционального синтеза ИС НКМ, решаемых в каждый момент времени, непосредственно формально связать технологию управления космическими аппаратам с результатами их применения по целевому назначению. Одно из основных достоинств предложенного в статье подхода к описанию процессов управления структурной динамикой ИС НКМ состоит в том, что в этом случае при решении различных классов прикладных задач современной космонавтики удаётся конструктивно использовать новые научные и практические результаты, полученные к настоящему времени в современной теории управления сложными динамическими системами.

SUMMARY

Potryasaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. **Conceptual and formal description of structure-functional synthesis and development control problems of space and ground based data monitoring information systems.**

A multiple-model approach to description of space and ground based data monitoring information systems (MIS) functioning processes is presented. Moreover these systems investigate in conditions when their parameters and structures changeability by objective (subjective) external (internal) reasons. The processes considered in this paper were qualified as control processes of IS structure dynamics. Previously developed concept of active moving object (AMO) was used to form an informal and set-theory-based statement of control problems. The common conceptual basis facilitated a construction of a complex of unified dynamic models for elements and subsystems of MIS [in-orbit groups of spacecrafts (OGS), ground-based control complexes (GCC)] embodied in a comprehensive SF control system (SF CS)). The models describe operation of MIS elements as well as their interaction with objects-in-service (ecological-technological objects) that are sources or recipients of information being processed.

The unified description of various control processes lets synthesize simultaneously both technical and functional structures of MIS. The presented multiple-model complex, as compared with known analogues, has several advantages. It simplifies decision-making in MIS structure dynamics management, for it allows seeking for alternatives in finite dimensional spaces rather than in discrete ones. The complex permits to reduce dimensionality of MIS structure-functional synthesis problems to be solved in a real-time operation mode. Moreover, it lets establish dependence relation between control technology applied to spacecrafts and the results of their use according to the main goal. It is important that the presented approach extends new scientific and practical results obtained in the modern control theory to the field of space programs.