

Б.В. СОКОЛОВ, Р.М. ЮСУПОВ

ПОЛИМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Полиmodelное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами.

Аннотация. Предложен многоmodelный (полиmodelный) подход к описанию и исследованию процессов управления космическими средствами (КСр) в условиях, когда их параметры и структуры изменяются под действием объективных (субъективных), внешних (внутренних) причин. Предлагаемый полиmodelный комплекс позволяет при решении задач управления структурной динамикой СУ КСр осуществлять поиск альтернатив не в дискретных, а в конечномерных пространствах, существенно сократить размерность задач структурно-функционального синтеза СУ КСр, решаемых в каждый момент времени, непосредственно формально связать технологию управления космическими аппаратами с результатами их применения по целевому назначению. Конструктивность разработанного подхода иллюстрируется на примере расчета целевых и информационно-технологических возможностей СУ КСр.

Ключевые слова: динамические модели, комплексное планирование, наземные технические средства, навигационные космические аппараты, полиmodelное описание, теория расписаний, теория оптимального управления.

Sokolov B.V. Yusupov R.M. Multiple-model description and structure dynamics analysis of space-facilities control systems.

Abstract. A multiple-model approach to description and investigation of control processes in space systems is presented to answer the changeability of space-facilities (SF) parameters and structures, which can be caused by objective (subjective) external (internal) reasons. The presented multiple-model complex, as compared with known analogues, has several advantages. It simplifies decision-making in SF control system (CS) 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 SF CS structure-functional synthesis problems to be solved in a real-time operation mode. This statement is exemplified by an analysis of SF CS information-technological abilities and goal abilities.

Keywords: dynamic models, comprehensive scheduling, ground-based technical facilities, navigation spacecrafts, multiple-model description, theory of schedules, optimal control theory.

Список сокращений

АПО	—	активный подвижный объект
ЗВ	—	зона взаимодействия
ИТВ	—	информационно-технологические возможности
КА	—	космический аппарат
КСр	—	космическое средство

НКУ	—	наземный комплекс управления
ОБО	—	объект обслуживания
ОрС КА	—	орбитальная система КА
ПО	—	пункт обслуживания
ПУ	—	пункт управления
ЦВ	—	целевые возможности
СТС	—	сложная техническая система
СУ КСр	—	система управления КСр

1. Введение. Одной из основных особенностей современных сложных технических систем (в том числе орбитальных и наземных космических средств) является то, что их 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 сложных технических систем (СТС) (рис. 1, табл. 1). В этих условиях для повышения (сохранения) требуемого уровня работоспособности и возможностей СТС, либо обеспечения наилучших условий деградации указанных систем необходимо осуществлять управление их структурами (в том числе управление реконfigurацией структур СТС).

Задачи управления структурной динамикой СТС по своему содержанию относятся к классу задач структурно-функционального синтеза облика СТС, формирования и реализации соответствующих программ управления их развитием.

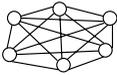
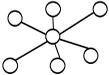
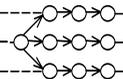
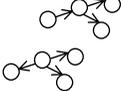
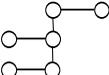
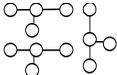
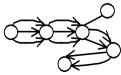
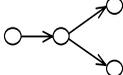
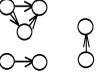
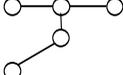
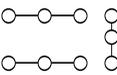
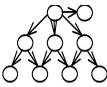
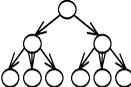
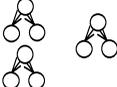
Главная трудность и особенность решения задач рассматриваемого класса состоит в следующем.

Определение оптимальных программ управления основными элементами и подсистемами СТС может быть выполнено лишь после того, как станет 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 СТС зависит от структуры и параметров законов управления данными элементами и подсистемами.

Трудность разрешения данной противоречивой ситуации усугубляется ещё и тем, что под действием различных причин (внутренних либо внешних, объективных либо субъективных) изменяется состав и структура СТС.

Таблица 1. Графики изменения структурных состояний СТС

Варианты много- структурных состояний	<i>j</i> -й уровень СТС			
	$S_0^{(j)}$	$S_1^{(j)}$...	$S_K^{(j)}$
Топологическая структура			...	
Технологическая структура			...	
Техническая струк- тура			...	
Структура програм- мно— математического обеспечения			...	
Структура информа- ционного обеспе- чения			...	
Организационная структура			...	

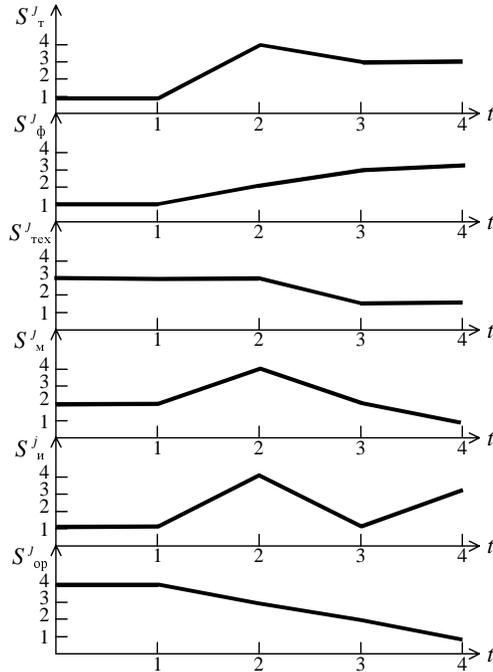


Рис. 1. Возможные варианты структурной динамики сложной технической системы

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

– **синтез технической структуры** СТС при известных законах функционирования основных элементов и подсистем СТС (первое направление исследований) [3,8,30-32];

– **синтез функциональной структуры** СТС или, иначе, синтез законов и программ управления основными элементами и подсистемами СТС при известной технической структуре (второе направление исследований) [1,2,5,6,9,10,13,17,19,24,29];

– **синтез программ создания и развития новых поколений** СТС без учёта этапа совместного функционирования существующей СТС и внедряемой СТС (третье направление исследований) [23,31];

– *одновременный синтез как технической, так и функциональной структур* СТС (четвёртое направление исследований) [20,23,31].

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 СТС различных классов [3,8,30-32]. При этом обобщённая задача синтеза (выбора) структуры (либо структур) СТС сводится, как правило, к постановке и решению следующей оптимизационной задачи [30-32]:

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

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

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

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

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 СТС. Подобными элементами применительно к СТС могут быть средства приёма, регистрации, передачи и обработки 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 СТС.

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 СТС, должны принимать целочисленные значения.

В качестве успешного примера решения задач данного класса можно привести результаты, полученные в работах [30–32]. 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 СТС.

Предлагаемый агрегативно-декомпозиционный подход предполагает реализацию двух взаимосвязанных этапов [30–32]:

- последовательную декомпозицию выполняемых системой целей, функций, задач, а также используемых массивов и процедур;
- агрегирование (объединение) их на соответствующем уровне детализации для генерирования вариантов построения системы в целом на рассматриваемом уровне.

При практической реализации рассматриваемого подхода широко использовались как универсальные, так и специализированные средства автоматизации моделирования [30–32]. В заключение отметим, что особенности формального описания рассматриваемого класса задач синтеза структур СТС позволяют при разной интерпретации переменных и ограничений, используемых при его описании, формулировать и решать не только задачи синтеза технической структуры СТС, но и задачи синтеза других типов структур СТС (например, топологической структуры, организационной и т.п.).

Многочисленные исследования задач синтеза структур СТС вида (1)–(4) показали [30–32], что если при формировании облика СТС для некоторых её элементов и подсистем возникают проблемы ликвидации больших (пиковых) информационных нагрузок, то в этом случае должны уже оптимизироваться сами правила, алгоритмы функционирования

ния 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 [1,2,10,13,19,24,26].

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 СТС. Эволюция исследований данных вопросов определялась эволюцией создания и применения соответствующих СТС с управляемой структурной динамикой.

На рис.2, взятом из работы [5], представлена классификация СТС, в которых к настоящему времени получила практическую реализацию концепция управляемой структурной динамики. На данном рисунке цифрами обозначены следующие классы систем: 1 — СТС с управляемой структурной динамикой; 2 — базовые СТС с реконfigurацией; 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.

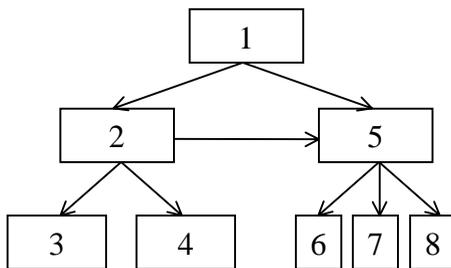


Рис. 2. Классификация СТС с управляемой структурной динамикой.

К настоящему моменту времени задачи управления базовыми СТС с реконfigurацией исследованы в наибольшей степени. Полученные фундаментальные научные результаты: концепции, принципы, спосо-

бы, методы управления данными СТС — позволили в различных предметных областях получить интересные прикладные результаты [2,11,12,25,28].

В отличие от базовых СТС с реконфигурацией, исследования проблем создания и применения интегрированных систем активного управления к настоящему моменту находятся в начальной стадии. Это, в первую очередь, касается СТС 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 СТС, воздействием возмущающих факторов со стороны внешней среды, имеющих целенаправленный и/или нецеленаправленный характер [6,7,12,15,16, 18, 20,24,26,29].

Для указанных систем использование традиционных подходов при формализации и решении задач управления структурной динамикой СТС становится уже малоэффективным. Одним из наиболее перспективных путей конструктивного учёта перечисленных выше факторов сложности в соответствующих задачах управления является направление исследований, получившее название «искусственный интеллект» [7,15, 26]. В рамках данного научного направления применительно к исследованию проблем управления сформировалась отдельная область исследований, связанная с созданием и эксплуатацией систем интеллектуального управления.

На рис. 3 представлена многоуровневая организация процессов управления в СТС. На рис. 4, 5, взятых из работы [26], представлены соответственно два основных источника интеллектуального управления и взаимосвязь основных научных направлений, формирующих область теории интеллектуального управления.

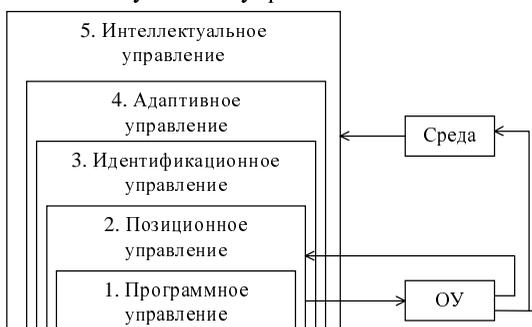


Рис. 3. Многоуровневая организация процессов управления СТС.

В указанной работе [26] 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 СТС, получены на основе применения производственных систем в форме нечётких и других правил, а также применения искусственных нейронных сетей [7,15,26].

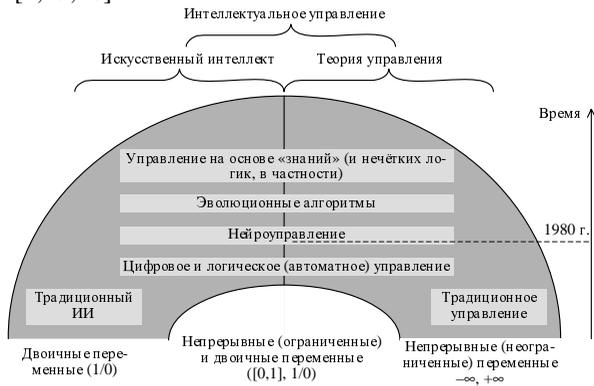


Рис. 4. Два основных источника интеллектуального управления.



Рис. 5. Определение интеллектуального управления как области исследования.

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

К настоящему моменту известен ряд работ [3,8,31], посвящённых созданию теоретических основ управления развитием СТС. В рамках данных исследований разработаны соответствующие методологические и методические основы постановки и решения планирования развития СТС. Известен ряд итерационных процедур получения решения в частных задачах структурно-функционального синтеза облика СТС на ранних этапах их жизненного цикла. Однако, к сожалению, все ранее полученные результаты слабо учитывают динамику изменения внешнего мира СТС (предметной области) на этапах применения данных систем по целевому назначению, когда фактор времени является определяющим [20]. Также в ранее выполненных исследованиях не учитывалась возможная распределённость элементов и подсистем СТС на этапе применения.

Таким образом, в современных условиях назрела острая необходимость в формировании теоретических основ управления структурной динамикой СТС. С нашей точки зрения данная теория будет 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 позволят в дальнейшем осуществлять корректно переход от слабоструктурированной к структурированной постановке задач управления структурной динамикой. В связи с изложенным ранее, приведённый рис.5 можно видоизменить применительно к рассматриваемым в данной статье задачам.

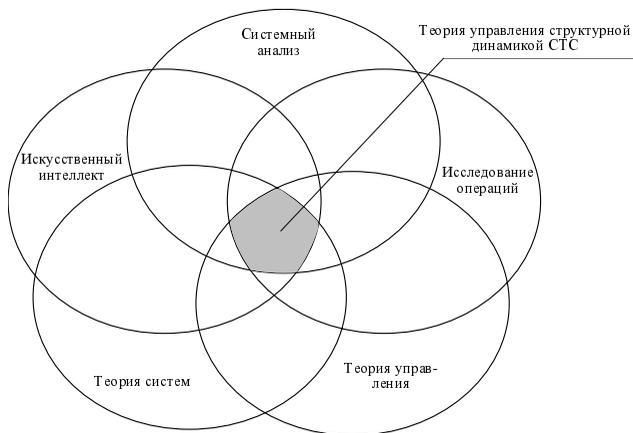


Рис. 6. Определение места теории управления структурной динамикой СТС в междисциплинарных исследованиях.

На рис. 6, исходя из соображений 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 СТС. При этом интерпретацию построенных моделей будем проводить на примере систем управления КСр.

В статье предложен комплекс моделей программного управления КСр, позволяющий с единых позиций подойти к решению задач анализа и оптимизации процессов сбора, хранения, передачи и обработки информации, поступающей с КА, рассмотрены возможные пути учёта факторов неопределённости в указанных моделях, методы анализа возможностей КСр. Главная отличительная черта и достоинство построенных аналитических моделей состоит в том, что в них удаётся в явном виде учитывать как структурные, так и функциональные ограничения, связанные с процессом управления КСр. К настоящему времени указанный комплекс моделей реализован в виде соответствующих макетов программ и использовался при решении задач оценивания возможностей СУ КА, планирования применения её основных элементов и подсистем.

2. Концептуальная модель процессов управления орбитальными и наземными космическими средствами. При построении концептуальной модели управления КСр будем в дальнейшем под орбитальными КСр (ОКСр) понимать совокупность космических аппаратов, решающих общую целевую задачу. В свою очередь, наземными КСр (НКСр) являются программно-технические комплексы, обеспечивающие процессы функционирования КА на этапе орбитального полёта. Пусть организационно указанные комплексы образуют соответствующие наземные комплексы управления (НКУ), включающие в себя: центры управления КА различного целевого назначения (ЦН), пункты управления ОКСр (ПУ), пункты непосредственного информационного взаимодействия с ОКСр [пункты обслуживания (ПО)], центральный пункт управления (ЦПУ), телекоммуникационную систему (ТС), обеспечивающую взаимодействие всех перечисленных элементов НКУ друг с другом. Совокупность ОКСр и НКУ образует систему управления КСр (СУ КСр). На рис. 7 приведена обобщённая структура СУ КСр. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: КСА — унифицированный комплекс средств автоматизации управления соответствующего элемента СУ КСр; символами \bigcirc обозначены КА, входящие в заданную орбитальную систему, выполняющую фиксированную целевую задачу; символами \otimes обозначены объекты обслуживания (ОБО), в качестве которых могут быть подвижные и неподвижные объекты, области наземной и водной поверхности, воздушного и космического пространства, интересующие потребителя космической информации. При этом в процессе взаимодействия ОКСр с ОБО, которое может иметь вещественный, энергетический и информационный характер, состояние ОБО в общем случае может изменяться.

Анализ результатов предварительных исследований показал, что при содержательном описании и последующей формализации процессов управления КСр 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 ОБО [20–22]. На рис. 8 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, про-

цесс функционирования аппаратуры (приборов), процесс расхода (полнения) ресурса.

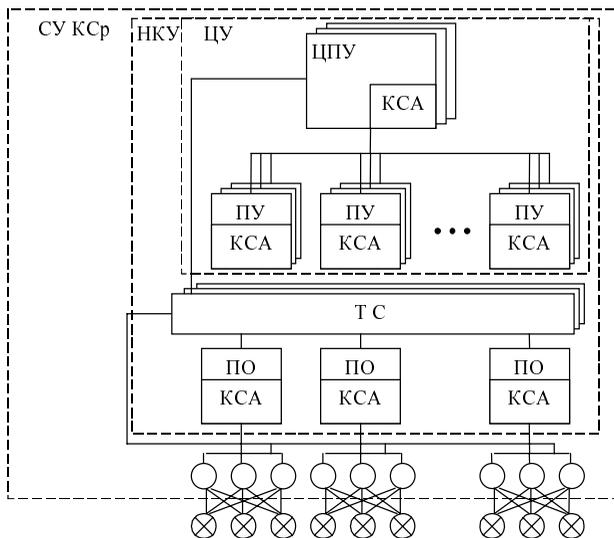


Рис. 7. Обобщённая организационно-техническая структура СУ КСр.



Рис. 8. Обобщённая структурная схема АПО.

Все перечисленные четыре функции существенно 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 СУ КСр описать как ОКСр, так и НКСр, ОБО.

При построении моделей управления АПО (который в дальнейшем будем интерпретировать как некоторое КСр, либо ОБО) 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 находят 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 управления КСр в этом случае являются диаграммы состояний (макросостояний) и диаграммы переходов из состояний (макросостояний). На рис.9 для примера приведён фрагмент диаграммы переходов из макросостояний некоторой системы КСр. Здесь приняты следующие условные обозначения: 1 — выполнение целевых задач КСр; 2 — нахождение КСр в резервном состоянии; 3 — проведение технического обслуживания и ремонта КСр; 4 — перемещение (маневрирование) КСр для выполнения целевых задач; 5 — перемещение КСр после выполнения целевых задач. В работах [20,22] приведены примеры других вариантов диаграмм состояний АПО.

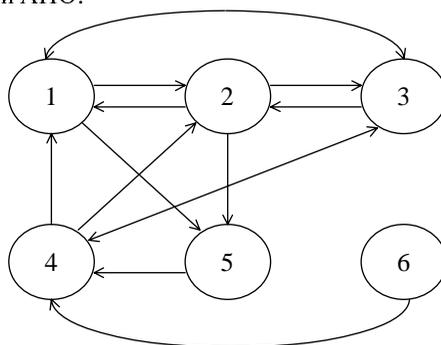


Рис. 9. Фрагмент диаграммы переходов из обобщённых состояний КСр.

Таким образом, на концептуальном уровне процесс функционирования КСр целесообразно интерпретировать как процесс выполнения ими комплексов операций, связанных с переходом КСр из одного состояния в другое. При этом удобно само состояние КСр характеризовать заданной совокупностью параметров соответствующих операций.

При построении конкретных моделей управления КСр воспользуемся динамической интерпретацией процессов выполнения технических операций и ранее построенными частными динамическими моделями функционирования АПО [20].

3. Полимодельное описание процессов управления космическими средствами.

Теоретико-множественная модель. С учётом ранее описанной концептуальной модели управления КСр выделим в качестве основных следующие множества и структуры:

$B = \{B_i, i \in M = \{1, \dots, m\}\}$ — множество объектов (подсистем, элементов), входящих в состав СУ КСр 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 СУ КСр, но с которыми последняя осуществляет взаимодействие (информационное, энергетическое, вещественное);

$\tilde{B} = B \cup \bar{B}$ — множество объектов, рассматриваемых при управлении структурной динамикой СУ КСр;

$\bar{C} = C \cup \bar{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_m\} \cup \{\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_{\bar{m}}\}$ — множество каналов, по которым осуществляется взаимодействие КСр друг с другом, с ОБО;

$\bar{C} = \{\bar{C}_\lambda^{(i)}, \lambda \in \bar{\Lambda}_i, i \in \bar{M}\}$ — множество каналов (технических средств), имеющих на ОБО;

$D = \{D^{(c)} \cup \{D_x^{(i)}\}, i, j \in M, x \in K_i^{(o)}\}$ — множество операций, выполняемых в СУ КСр;

$D^{(i)} = \{D_x^{(i)}, x \in K_i^{(o)} = \{1, \dots, s_i\}\}$ — множество операций взаимодействия с объектом $\tilde{B}^{(i)}$;

$D^{(c,1)} = \{D_{nw\eta_1}^{(c,1)}\} \cup \{D_{nw\eta_1}^{(c,2)}\} \cup \{D_{nw}^{(c,3)}\}, i \in M, w \in NW^{(i)}, f \in NF^{(w)}, \eta_1 \in NH_1\}$ — множество макроопераций, выполняемых при функционировании СУ КСр;

$\{D_{ivf\eta_1}^{(c,1)}\}$ — множество макроопераций, описывающих процесс функционирования объекта B_i в макросостоянии S_{ivf} на η_1 -м цикле управления; $M = \{1, \dots, m\}$, $NW^{(i)} = \{1, \dots, K_W^{(i)}\}$, $NF^{(w)} = \{1, \dots, K_F^{(w)}\}$, $NH_1 = \{1, \dots, E_1\}$ — соответственно множества номеров объектов, номеров макросостояний объекта B_i , номеров мест объектов B_i в макросостоянии с номером « w » номеров циклов управления объекта B_i ;

$\{D_{ivf\eta_1}^{(c,2)}\}$ — множество вспомогательных макроопераций;

$\{D_{ivf}^{(c,3)}\}$ — множество макроопераций, описывающих процесс перехода объекта B_i из текущего макросостояния $S_{ivf'}$ в требуемое макросостояние S_{ivf} ;

$\Phi = \{\{\Phi S_{\pi}^{(i)}\} \cup \{\Phi N_{\mu}^{(i)}\}, i \in M, \pi \in K_i^{(p,1)} = \{1, \dots, k_i^{(p,1)}\},$

$\mu \in K_i^{(p,2)} = \{1, \dots, k_i^{(p,2)}\}\}$ — множество ресурсов, используемых в СУ КСр;

$\Phi S_{\pi}^{(i)} = \{\Phi S_{\pi}^{(i)}, \pi \in K_i^{(p,1)}\}$ — множество нескладируемых ресурсов, используемых на объекте $B^{(i)}$;

$\Phi N_{\mu}^{(i)} = \{\Phi N_{\mu}^{(i)}, \mu \in K_i^{(p,2)}\}$ — множество складированных ресурсов, используемых на объекте $B^{(i)}$;

$P = \{\{P_{<w',p>}^{(i)}\} \cup \{P_{<w,p>}^{(i,j)}\}, i \in M, w' \in K_i^{(o)}, w \in K_{<i,j>}^{(o)}, p \in K_i^{(n)}\}$ — множество потоков, образующихся при функционировании СУ КСр;

$P^{(i)} = \{\{P_{<w,p>}^{(i)}\}, i \in M, w' \in K_i^{(o)}, p \in K_i^{(n)}\}$ — множество потоков (энергетических, вещественных, информационных), образующихся при функционировании объекта $B^{(i)}$;

$P^{(i,j)} = \{P_{<w,p>}^{(i,j)}, i, j \in M, p \in K_i^{(n)}\}$ — множество потоков (энергетических, вещественных, информационных), образующихся при взаимодействии объектов $B^{(i)}$ и $B^{(j)}$;

$G = \{G_{\chi}, \chi \in NS\}$ — множество возможных типов структур СУ КСр, 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 СУ КСр, $\chi \in NS = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ — 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 ; $Z_{\chi}^t = \{z_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ — множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов ДАМГ.

Кроме того, задано множество допустимых (исходя из содержательной постановки каждой конкретной задачи управления структурной динамикой СУ КСр) 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 :

$$M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t = M_{\langle \chi, \chi_1 \rangle}^t \circ M_{\langle \chi_1, \chi_2 \rangle}^t \circ \dots \circ M_{\langle \chi_{k-1}, \chi' \rangle}^t, \quad (7)$$

С учётом вышеизложенного многоструктурное состояние можно определить как подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых строятся соответствующие структуры СУ КСр:

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

Множество многоструктурных состояний СУ КСр запишется следующим образом:

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

Введём ещё множество допустимых операций отображения многоструктурных состояний СУ КСр друг на друга:

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

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

Графовая интерпретация рассматриваемых задач управления структурной динамикой СУ КСр 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 $\Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{t_2} \circ \Pi_{\langle \delta', \delta \rangle}^{t_f}$, при которых обеспечивается выбор и реализация оптимальной (с точки зрения обобщённого показателя эффективности) программы управления структурной динамикой СУ КСр, обеспечивающей её переход из заданного в требуемое многоструктурное состояние.

Наряду с множеством многоструктурных состояний $\{S_\delta\}$ введём ещё два дополнительных множества для последующего описания структурной динамики СУ КСр: множество структурных состояний для каждого типа структур $G_\chi — \{S_{\chi\omega}\}$ и множество макросостояний для каждого объекта $B_i — \{S_{ivf}\}$. При этом, как это уже было показано ранее:

$$\chi \in NS = \{1, \dots, K_S\}, \quad \omega \in N\Omega^{(\chi)} = \{1, \dots, K_\Omega^{(\chi)}\}, \\ w \in NW^{(i)} = \{1, \dots, K_W^{(i)}\}, \quad f \in NF^{(w)} = \{1, \dots, K_F^{(w)}\}.$$

Наряду с указанными множествами и отношениями целесообразно для каждой из пар $\langle \bar{B}_i B_j \rangle, \langle B_i B_j \rangle, i, j \in \{M \cup \bar{M}\}$ ввести следующие функции [22]:

- матричную временную функцию $\varepsilon_{ij}(t)$, задающую пространственно—временные ограничения, связанные с взаимодействием объектов B_i (либо \bar{B}_i) с B_j ; данная функция принимает значение 1, если B_i попадает в зону взаимодействия B_j , 0 — в противном случае;

- матричную временную функцию $\Theta_{ij}(t)$, которая характеризует технические возможности реализации операций взаимодействия; данная функция принимает значение 1, если на объектах B_i и B_j в момент времени $t \in T$ есть работоспособные каналы C_i и C_j , с помо-

щью которых можно выполнить операцию взаимодействия $D_x^{(i)}$, 0 — в противоположном случае;

– матричную временную функцию $\xi_{ij}(t)$, которая принимает значение 0 в том случае, если возможно взаимодействие B_i и B_j в условиях наличия возмущающих воздействий, 1 — в противоположном случае.

С помощью указанных выше матричных временных функций могут конструктивно задаваться варианты структурной динамики СУ КСр. Перейдём к рассмотрению конкретных динамических моделей, описывающих процессы управления структурной динамикой СУ КСр.

Динамическая модель управления движением элементов и подсистем СУ КСр (M_g)

$$\begin{aligned} M_g &= \left\{ \mathbf{u}^{(g)}(t) \mid \dot{\mathbf{x}}_i^{(g)} = f_i^{(g)}(\mathbf{x}_i^{(g)}, \mathbf{u}_i^{(g)}, t), \right. \\ \mathbf{q}^{(g)}(\mathbf{x}^{(g)}, \mathbf{u}^{(g)}, t) &\leq \mathbf{O}, \mathbf{h}_0^{(g)}(\mathbf{x}^{(g)}(T_0)) \leq \mathbf{O}, \\ \left. \mathbf{h}_1^{(g)}(\mathbf{x}^{(g)}(T_f)) \leq \mathbf{O}, i \in \tilde{M} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

где $\mathbf{x}^{(g)} = \left\| \mathbf{x}_1^{(g)\top}, \mathbf{x}_2^{(g)\top}, \dots, \mathbf{x}_{m+m}^{(g)\top} \right\|^\top$ — вектор, характеризующий состояние движения элементов и подсистем СУ КСр и ОБО; $\mathbf{u}^{(g)} = \left\| \mathbf{u}_1^{(g)\top}, \dots, \mathbf{u}_{m+m}^{(g)\top} \right\|^\top$ — вектор управляющих воздействий, включающий в общем случае программные и регулирующие воздействия, $\mathbf{q}^{(g)}(\mathbf{x}^{(g)}, \mathbf{u}^{(g)}, t)$, $\mathbf{h}_0^{(g)}(\mathbf{x}^{(g)}(t_0))$, $\mathbf{h}_1^{(g)}(\mathbf{x}^{(g)}(t_f))$ — известные векторные функции, с помощью которых задаются соответственно ограничения на процесс движения объектов, краевые условия. Из содержательной постановки задачи управления структурной динамикой СУ КСр следует, что операции взаимодействия (ОВ) объектов (КСр, ОБО) друг с другом могут выполняться лишь при попадании указанных объектов в зоны взаимодействия (ЗВ), которые будем задавать с помощью матричной временной функции $\mathbf{E}(t) = \left\| \varepsilon_{ij}(t) \right\|$.

Данная функция в работах [20,22] была названа контактным потенциалом. В этом случае контактный потенциал пары $\langle B_i, B_j \rangle$ может быть вычислен по формуле [22]:

$$\varepsilon_{ij}(t) = \gamma_+ \left\{ \mathbf{R}_j^{(g)} - \left| \mathbf{r}_i^{(g)}(t) - \mathbf{r}_j^{(g)}(t) \right| \right\}, \quad (12)$$

где $i, j \in \tilde{M}$, $\gamma_+(\tilde{\alpha})=1$, если $\tilde{\alpha} \geq 0$, $\gamma_+(\tilde{\alpha})=0$, если $\tilde{\alpha} < 0$; $R_j^{(g)}(t)$ — заданный радиус зоны взаимодействия объекта B_j , $\mathbf{r}_i^{(g)}(t)$, $\mathbf{r}_j^{(g)}(t)$ — в общем случае трёхмерные радиус-векторы, характеризующие положение объектов B_i , B_j в пространстве и входящие вместе с $\dot{\mathbf{r}}_i^{(g)}(t)$, $\dot{\mathbf{r}}_j^{(g)}(t)$ в состав компонент векторов $\mathbf{x}_i^{(g)} = \|\mathbf{r}_i^{(g)}(t), \dot{\mathbf{r}}_i^{(g)}(t)\|^T$, $\mathbf{x}_j^{(g)} = \|\mathbf{r}_j^{(g)}(t), \dot{\mathbf{r}}_j^{(g)}(t)\|^T$.

Из анализа (11)–(12) следует, что стационарные (неподвижные) объекты можно рассматривать как частный случай подвижных объектов, для которых $\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{r}_i(t_0) = \mathbf{r}_{i0}$ — вектор, определяющий местоположение объекта.

Динамическая модель управления операциями взаимодействия (ОВ) в СУ КСр (модель M_o)

$$\begin{aligned}
 M_o \left\{ \mathbf{u}^{(o)}(t) \mid \dot{x}_{i\alpha}^{(o)} &= \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) \cdot u_{i\alpha j}^{(o)}; x_{i\alpha}^{(o)}(t_0) = 0, \right. \\
 x_{i\alpha}^{(o)}(t_f) &= a_{i\alpha}^{(o)}, \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_i} u_{i\alpha j}^{(o)} \leq c_j^{(o,1)}, \sum_{j=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_j} u_{i\alpha j}^{(o)} \leq c_i^{(o,2)}, u_{i\alpha j}^{(o)}(t) \in \{0,1\}, \\
 u_{i\alpha j}^{(o)} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{i\alpha 1}} (a_{i\tilde{\alpha}}^{(o)} - x_{i\tilde{\alpha}}^{(o)}) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{i\alpha 2}} (a_{i\tilde{\beta}}^{(o)} - x_{i\tilde{\beta}}^{(o)}) \right] &= 0, \\
 i, j = 1, \dots, m; i \neq j; \alpha = 1, \dots, s \left. \right\},
 \end{aligned} \tag{13}$$

где $x_{i\alpha}^{(o)}$ — переменная, характеризующая состояние выполнения операции взаимодействия $D_{\alpha}^{(i)}$; $a_{\alpha}^{(o)}, a_{i\tilde{\alpha}}^{(o)}, a_{i\tilde{\beta}}^{(o)}$ — заданные объёмы выполнения операций $D_{\alpha}^{(i)}, D_{\tilde{\alpha}}^{(i)}, D_{\tilde{\beta}}^{(i)}$; $u_{i\alpha j}^{(o)}(t)$, — управляющее воздействие, $u_{i\alpha j}^{(o)}(t) = 1$, если $D_{\alpha}^{(i)}$ выполняется, $u_{i\alpha j}^{(o)}(t) = 0$ — в противоположном случае; $\Gamma_{i\alpha 1}, \Gamma_{i\alpha 2}$ — множество номеров операций взаимодействия, проводимых с объектом B_j , непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией $D_{\alpha}^{(i)}$ с помощью логических операций «И», «ИЛИ» соответственно; $c_j^{(o,1)}, c_i^{(o,2)}$ — заданные константы,

характеризующие технические ограничения, связанные с функционированием СУ КСр в целом.

Динамическая модель управления каналами в СУ КСр (модель M_k)

$$M_k = \left\{ \begin{aligned} &\mathbf{u}^{(k)}(t) | \dot{x}_{ij}^{(k)} = \sum_{l=1}^m \Theta_{lj}(t) \frac{h_{il}^{(j)} - x_{ij}^{(k)}}{x_{lj}^{(k)}} \cdot u_{lj}^{(k)}; \\ &x_{ij}^{(k)}(t_0), x_{ij}^{(k)}(t_f) \in \mathbf{R}^+, x_{ij}^{(k)} \cdot u_{i\bar{a}j}^{(o)} = 0; \sum_{l=1}^m u_{lj}^{(k)} \leq 1, \\ &\sum_{j=1}^m u_{lj}^{(k)} \leq 1, u_{lj}^{(k)}(t) \in \{0,1\}; i, j, l \in \tilde{M} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где $x_{ij}^{(k)}$ — переменная, характеризующая состояние C_j -го канала при переналадке из заданных состояний готовности; $h_{il}^{(j)}$ — заданная величина, численно равная длительности процесса переналадки канала C_j при переходе от работы с объектом B_i к работе с объектом B_l ; \mathbf{R}^+ — множество положительных вещественных чисел; $u_{lj}^{(k)}(t)$ — управляющее воздействие; $u_{lj}^{(k)}(t) = 1$, если C_j находится в состоянии переналадки, $u_{lj}^{(k)}(t) = 0$ — в противоположном случае; $\Theta_{ij}(t) \in \{0,1\}$ — заданная величина, характеризующая потенциальную готовность канала C_j осуществлять взаимодействие с объектом B_i . Анализ ограничений, представленных в формуле, показывает, во-первых, что операция $D_x^{(i)}$ может начаться только после готовности соответствующего канала [$x_{ij}^{(k)}(t) = 0$] и, во-вторых, каждый канал C_j может одновременно осуществлять переналадку в состоянии готовности к работе только с одним объектом B_l ($l \neq j, l = 1, \dots, m$).

Динамическая модель управления ресурсами СУ КСр (модель M_p)

$$\begin{aligned}
 M_p = & \left\{ \begin{aligned}
 & \mathbf{u}^{(p)}(t) \mid \dot{x}_{j\pi\eta}^{(p,1)} = - \sum_{i=1}^m \sum_{\varkappa=1}^{s_i} a_{i\varepsilon j}^{(\pi)} (u_{i\varepsilon j}^{(o)} + u_{i j}^{(k)}) + u_{j\pi(\eta-1)}^{(p,1)}; \\
 & \dot{x}_{j\mu\eta'}^{(p,2)} = - \sum_{i=1}^m \sum_{\varkappa=1}^{s_i} g_{i\varepsilon j}^{(\mu)} (u_{i\varepsilon j}^{(o)} + u_{i j}^{(k)}) + u_{j\mu(\eta'-1)}^{(p,2)}; \\
 & \dot{x}_{j\pi\eta}^{(p,3)} = u_{j\pi\eta}^{(p,1)}; \quad \dot{x}_{j\mu\eta'}^{(p,4)} = u_{j\mu\eta'}^{(p,2)}; \quad \sum_{i,\varepsilon} a_{i\varepsilon j}^{(\pi)} (u_{i\varepsilon j}^{(o)} + u_{i j}^{(k)}) \leq H_j^{(\pi)}(t), \\
 & \sum_{i,\varepsilon} \int_{t_0}^{t_f} g_{i\varepsilon j}^{(\mu)} (u_{i\varepsilon j}^{(o)}(\tau) + u_{i j}^{(k)}(\tau)) d\tau \leq \int_{t_0}^{t_f} \tilde{H}_j^{(\mu)}(\tau) d\tau, \\
 & \sum_{i,\varepsilon} (u_{i\varepsilon j}^{(o)} + u_{i j}^{(k)}) + x_{j\pi(\eta-1)}^{(p,1)} \leq 1, \\
 & u_{j\pi\eta}^{(p,1)} (a_{j\pi(\eta-1)}^{(p,3)} - x_{j\pi(\eta-1)}^{(p,3)}) = 0, u_{j\pi\eta}^{(p,1)} x_{j\pi\eta}^{(p,1)} = 0, u_{j\pi\eta}^{(p,1)}(t) \in \{0,1\}; \\
 & u_{j\mu\eta'}^{(p,2)} (a_{j\mu(\eta'-1)}^{(p,4)} - x_{j\mu(\eta'-1)}^{(p,4)}) = 0, u_{j\mu\eta'}^{(p,2)} x_{j\mu\eta'}^{(p,2)} = 0, u_{j\mu\eta'}^{(p,2)}(t) \in \{0,1\}; \\
 & \mathbf{h}_0^{(p)}(\mathbf{x}^{(p)}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \mathbf{h}_1^{(p)}(\mathbf{x}^{(p)}(t_f)) \leq \mathbf{0}; \\
 & \pi \in K_i^{(p,1)} = \{1, \dots, K_i\}, \mu \in K_i^{(p,2)} = \{1, \dots, \tilde{K}_i\} \},
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \tag{15}$$

где $x_{j\pi\eta}^{(p,1)}(t)$, $x_{j\mu\eta'}^{(p,2)}(t)$ — соответственно переменные, характеризующие текущий объём нескладируемого $\Phi S_{\pi}^{(j)}$ и складируемого ресурса $\Phi N_{\mu}^{(j)}$, пополняемых на этапах η и η' при функционировании канала C_j ; $a_{i\varepsilon j}^{(\pi)}$, $g_{i\varepsilon j}^{(\mu)}$ — заданные интенсивности расхода нескладируемого $\Phi S_{\pi}^{(j)}$ и складируемого ресурса $\Phi N_{\mu}^{(j)}$ при выполнении операции $D_{\varepsilon}^{(i)}$ и переналадке канала C_j ; $H_j^{(\pi)}(t)$, $\tilde{H}_j^{(\mu)}(t)$ — известные интенсивности поступления (пополнения) ресурсов $\Phi S_{\pi}^{(j)}$ и $\Phi N_{\mu}^{(j)}$ соответственно; $x_{j\pi\eta}^{(p,3)}(t)$, $x_{j\mu\eta'}^{(p,4)}(t)$ — вспомогательные переменные, характеризующие текущий объём выполнения операций, связанных с регенерацией соответствующих ресурсов; $u_{j\pi\eta}^{(p,1)}(t)$, $u_{j\mu\eta'}^{(p,2)}(t)$ — управляющие воздействия, регулирующие ход пополнения нескладируемых и складируемых ресурсов, $a_{j\pi(\eta-1)}^{(p,3)}(t)$, $a_{j\mu(\eta'-1)}^{(p,4)}(t)$ — заданные объёмы выполнения опера-

ций пополнения соответствующих ресурсов; $\mathbf{h}_0^{(p)}, \mathbf{h}_1^{(p)}$ — заданные вектор-функции, с помощью которых задаются краевые условия; $\eta = 1, \dots, \tilde{\rho}$; $\eta' = 1, \dots, \tilde{\rho}$ — общее допустимое число циклов регенерации соответствующих ресурсов.

Динамическая модель управления потоками в СУ КСр (модель M_n)

$$\begin{aligned}
 M_n = & \left\{ \mathbf{u}^{(n)}(t) \mid \dot{x}_{i\alpha j\rho}^{(n,1)} = u_{i\alpha j\rho}^{(n,1)}; \dot{x}_{i\alpha j\rho}^{(n,2)} = u_{i\alpha j\rho}^{(n,2)}; \right. \\
 & x_{i\alpha j\rho}^{(n,\xi)}(t_0), x_{i\alpha j\rho}^{(n,\xi)}(t_f) \in \mathbf{R}^+; \xi = 1, 2; \\
 & 0 \leq u_{i\alpha j\rho}^{(n,1)} \leq c_{i\alpha}^{(n,1)} u_{i\alpha j}^{(o)}; u_{i\alpha j\rho}^{(n,2)} (a_{i\alpha j\rho}^{(n,1)} - x_{i\alpha j\rho}^{(n,1)}) = 0; \\
 & u_{i\alpha j\rho}^{(n,2)} x_{i\alpha}^{(o)} = 0; u_{i\alpha j\rho}^{(n,2)}(t) \in \{0, 1\}; \\
 & \left. \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{\rho=1}^{\lambda_i} x_{i\alpha j\rho}^{(n,1)} (u_{i\alpha j}^{(o)} + u_{i\alpha j\rho}^{(n,2)}) \leq P_j^{(1)}; \right. \\
 & \left. \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_i} u_{i\alpha j\rho}^{(n,1)} \leq P_{j\rho}^{(2)}; \sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{\rho=1}^{\lambda_i} u_{i\alpha j\rho}^{(n,1)} \leq P_{ij}^{(3)} \right\},
 \end{aligned} \tag{16}$$

где $x_{i\alpha j\rho}^{(n,1)}(t)$ — переменная, характеризующая текущий объём информации типа «р», полученной объектом B_j от объекта B_i в ходе выполнения операции $D_{\alpha}^{(i)}$; $x_{i\alpha j\rho}^{(n,2)}$ — вспомогательная переменная, характеризующая общую продолжительность (время) нахождения информации типа р на объекте B_j ; $u_{i\alpha j\rho}^{(n,1)}(t)$ — интенсивность передачи информации «р» от объекта B_i к объекту B_j ; $c_{i\alpha}^{(n,1)}$ — заданная константа, характеризующая максимально возможное значение $u_{i\alpha j\rho}^{(n,1)}(t)$; $u_{i\alpha j\rho}^{(n,2)}(t)$ — управляющее воздействие, принимающее значение 1, если закончен приём информации, $u_{i\alpha j\rho}^{(n,2)}(t) = 0$ — в противоположном случае, либо в том случае, когда начинает выполняться операция $D_{\alpha}^{(i)}$, следующая в технологическом цикле управления КСр B_i непосредственно за операцией $D_{\alpha}^{(i)}$; $P_j^{(1)}$, $P_{j\rho}^{(2)}$, $P_{ij}^{(3)}$ — заданные величины, характеризующие соответственно максимально возможный объём информации, который может находиться на КСр B_j , пропускную спо-

способность канала, соединяющего КСр B_i и B_j ; $a_{i\alpha j\rho}^{(n,1)}$ — заданный объём информации типа «р», который может передаваться с КСр B_i на КСр B_j , в ходе выполнения операции $D_{\alpha}^{(i)}$.

Для ряда операций взаимодействия КСр, связанных с проведением измерений и оцениванием компонент вектора состояния КСр, возможно задание дополнительных параметров, характеризующих точность определения состояния соответствующего объекта. В связи с этим может быть предложена следующая модель управления параметрами операции, обобщающая результаты, ранее полученные в работах [2,6].

Динамическая модель управления параметрами операций, проводимых в КСр (модель M_e)

$$M_e = \left\{ \begin{aligned} &\mathbf{u}^{(e)}(t) | \dot{\mathbf{x}}_i^{(g)} = F_i(t)\mathbf{x}_i^{(g)}; y_j^{(i)}(t) = \mathbf{d}_j^T(t)\mathbf{x}_i^{(g)} + \xi_j^{(e)}; \\ &\dot{Z}_i = -Z_i F_i - F_i^T Z_i - \sum_{j=1}^n \sum_{\alpha \in \Gamma_i} u_{i\alpha j}^{(e)} \frac{\mathbf{d}_j \mathbf{d}_j^T}{\sigma_j^2}; \\ &i \neq j; i, j \in \tilde{M}; 0 \leq u_{i\alpha j}^{(e)} \leq c_{j\alpha}^{(e)} u_{i\alpha j}^{(o)} \} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

где $\mathbf{x}_i^{(g)} = \left\| \mathbf{r}_i^{(g)\tau}; \dot{\mathbf{r}}_i^{(g)\tau} \right\|^T$ — вектор состояния движения КСр B_i ; $F_i(t)$ — заданная матрица; $\xi_j^{(e)}$ — некоррелированные ошибки измерений канала C_j , которые подчиняются нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной σ_j^2 ; $D_{\alpha}^{(i)} \in D^{(i)}$; $u_{i\alpha j}^{(e)}(t)$ — управляющее воздействие, задающее интенсивность проведения измерений параметров $y_j^{(i)}(t)$, кинематически связанных с компонентами вектора состояния движения КСр B_i ; $c_{i\alpha}^{(e)}$ — заданные величины, характеризующие технические возможности канала C_j при проведении операции $D_{\alpha}^{(i)}$; Z_i — матрица, обратная по отношению к корреляционной матрице $K_i(t)$ ошибок оценки вектора состояния движения объекта B_i ; Γ_i — множество операций взаимодействия, проводимых с КСр B_i ; $\mathbf{d}_j(t)$ — заданный вектор, определяющий особенности технической реализации уравнения измерителя

(канала C_j); $\mathbf{b}_\gamma = \|0\ 0 \dots 1 \dots 0\ 0\|^T$ — вспомогательный вектор, выделяющий из матрицы K_i требуемый элемент с номером « γ »; K_{i0} — значение K_i в начальный момент времени $t = t_0$; $\sigma_{\gamma i}^2$ — заданная точность определения γ -й компоненты вектора состояния движения $\mathbf{x}_i^{(g)}(t)$.

Динамическая модель управления макросостояниями СУ КСр (модель M_c)

$$\begin{aligned}
 M_c &= \left\{ \mathbf{u}^{(c)}(t) \mid \dot{x}_{iwf\eta_1}^{(c,1)} = u_{iwf\eta_1}^{(c,1)}; \dot{x}_{iwf\eta_1}^{(c,2)} = u_{iwf\eta_1}^{(c,2)} \right. \\
 \dot{x}_{iwf}^{(c,3)} &= \sum_{w'=1}^{K_w} \sum_{f'=1}^{K_f} \frac{\tilde{h}_{w'f'}^{(c)} - x_{iw'f'}^{(c,3)}}{x_{iw'f'}^{(c,3)}} u_{iw'f'}^{(c,3)}; \sum_{i=1}^m \sum_{w=1}^{K_w} u_{iwf\eta_1}^{(c,3)}(t) \leq 1, \forall f; \forall \eta_1; \\
 \sum_{w=1}^{K_w} \sum_{f=1}^{K_f} (u_{iwf\eta_1}^{(c,1)} + u_{iwf}^{(c,3)}) &\leq 1, \forall i; \forall \eta_1; u_{iwf\eta_1}^{(c,1)}(t), u_{iwf\eta_1}^{(c,2)}(t), u_{iwf}^{(c,3)}(t) \in \{0,1\}; \\
 \sum_{\eta_1=1}^{\mathbb{E}_1} u_{iwf\eta_1}^{(c,1)} x_{iwf}^{(c,3)} &= 0, u_{iwf\eta_1}^{(c,1)} (a_{iwf(\eta_1-1)}^{(c,1)} - x_{iwf(\eta_1-1)}^{(c,1)}) = 0; \\
 u_{iwf\eta_1}^{(c,2)} (a_{iwf(\eta_1-1)}^{(c,2)} - x_{iwf(\eta_1-1)}^{(c,2)}) &= 0; \\
 u_{iwf}^{(c,3)} \left[\sum_{\alpha \in \Gamma_{iwf}^{(1)}} (a_{i\alpha}^{(o)} - x_{i\alpha}^{(o)}(t)) + \prod_{\beta \in \Gamma_{iwf}^{(2)}} (a_{i\beta}^{(o)} - x_{i\beta}^{(o)}(t)) \right] &= 0; \\
 x_{iwf\eta_1}^{(c,1)}(t_0) = x_{iwf\eta_1}^{(c,2)}(t_0) = 0; x_{iwf}^{(c,3)}(t_0) &\in \mathbf{R}^+; \\
 x_{iwf\eta_1}^{(c,1)}(t_f) = x_{iwf\eta_1}^{(c,2)}(t_f), x_{iwf}^{(c,3)}(t_f) &\in \mathbf{R}^+ \}
 \end{aligned} \tag{18}$$

где $x_{iwf\eta_1}^{(c,1)}(t)$ — переменная, характеризующая степень выполнения макрооперации $D_{iwf\eta_1}^{(c,1)}$, описывающей процесс функционирования КСр B_i в макросостоянии S_{iwf} на η_3 -м цикле управления; $x_{iwf\eta_1}^{(c,2)}(t)$ — вспомогательная переменная, значение которой численно равно длительности интервала времени, прошедшего с момента окончания макрооперации $D_{iwf\eta_1}^{(c,2)}$; $x_{iwf}^{(c,3)}(t)$ — переменная, характеризующая степень выполнения макрооперации $D_{iwf}^{(c,3)}$, описывающей процесс перехода КСр B_i из текущего макросостояния $S_{iw'f'}$ в требуемое макросостояние

S_{iwf} ; $h_{w'f'w'f}^{(c)}$ — заданная величина, численно равная длительности перехода объекта B_i из макросостояния $S_{iw'f'}$ в макросостояние S_{iwf} (w', w — номера макросостояний объекта B_i , f', f — соответственно номера мест в указанных макросостояниях); $u_{iwf\eta_1}^{(c,1)}(t)$ — управляющее воздействие, принимающее значение 1, если необходимо выполнить макрооперацию $D_{iwf\eta_1}^{(c,1)}$, 0 — в противоположном случае; $x_{iwf\eta_1}^{(c,2)}(t)$ — вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение 1 в момент времени, соответствующий окончанию выполнения макрооперации $D_{iwf\eta_1}^{(c,1)}$, 0 — в противоположном случае; смешанные ограничения в выражении (18) определяют порядок и последовательность включения (выключения) перечисленных ранее управлений; $\Gamma_{iwf}^{(1)}, \Gamma_{iwf}^{(2)}$ — множества номеров операций, проводимых с КСр B_i , непосредственно предшествующих макрооперации $D_{iwf}^{(c,3)}$ и связанных с ней логическими операциями «И», «ИЛИ» (либо альтернативное «ИЛИ»). С помощью данных операций устанавливается связь модели M_o с моделью M_c .

Построенные выше модели должны быть ещё дополнены динамической моделью управления вспомогательными операциями (модель M_b), с помощью которой удаётся учитывать ограничения, связанные с неразрывностью выполнения операций, проводимых в СУ КСр. Подробное описание данной модели приводится в работах [20,21].

Оценивание качества процессов управления КСр с использованием построенных динамических моделей можно проводить, используя калейдоскопическое множество различных целевых функций [20]. Приведём для примера некоторые из них:

$$J_1^{(o)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{s_i} \left\{ \left[a_{i\alpha}^{(o)} - x_{i\alpha}^{(o)}(t_f) \right]^2 + \sum_{j=1}^m \int_{t_0}^{t_f} \xi_{i\alpha j}(\tau) u_{i\alpha j}^{(o)}(\tau) d\tau \right\}, i \neq j; \quad (19)$$

$$J_2^{(n)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{\rho=1}^{\lambda_j} \int_{t_0}^{t_f} x_{i\alpha j\rho}^{(n,2)}(\tau) d\tau, i \neq j; \quad (20)$$

$$J_{3j\pi}^{(p)} = \sum_{\eta=1}^{\tilde{p}} x_{j\pi\eta}^{(p,3)}, J_{4j\mu}^{(p)} = \sum_{\eta=1}^{\tilde{p}} x_{j\mu\eta}^{(p,4)}; \quad (21)$$

$$J_5^{(e)} = \vec{b}_\gamma^T K_i(t_f) \vec{b}_\gamma, J_{6j}^{(e)} = \sum_{i=1}^m \sum_{\mathbb{E} \in D^{(i)}} \int_{t_0}^{t_f} u_{i\mathbb{E}j}^{(e)}(\tau) d\tau; \quad (22)$$

$$J_{7i}^{(c)} = \int_{T_0}^{T_i} \sum_{w=1}^{K_w} \sum_{f=1}^{K_f} u_{ifw}^{(c,3)}(\tau) d\tau, J_{8ivf}^{(c)} = \sum_{\eta_1=1}^{\mathbb{E}_1} x_{ifw\eta_1}^{(c,1)}(t_f), \quad (23)$$

где $\xi_{i\mathbb{E}}(\tau)$ — монотонные функции времени, которые выбираются с учётом заданных директивных сроков начала (конца) выполнения операции взаимодействия с КСР B_i . Показатель (19) вводится в том случае, если необходимо, во-первых, оценить полноту выполнения краевых условий и, во-вторых, оценить величину суммарного штрафа за невыполнение заданных директивных сроков выполнения операций. Функционал (20) оценивает суммарные потери времени в передаче и обработке информации, циркулирующей в СУ КСР. Показатели $J_{3j\pi}^{(p)}$ и $J_{4j\mu}^{(p)}$ соответственно численно равны суммарному времени, в течение которого проводилась регенерация нескладированного и складированного ресурса на объекте B_j . Величина функционала $J_5^{(e)}$ характеризует точность определения γ -й компоненты вектора $\mathbf{x}_i^{(g)}$, а целевая функция вида $J_{6j}^{(c)}$ количественно оценивает суммарные затраты ресурсов объекта B_j ; с помощью показателя $J_{7i}^{(c)}$ можно количественно оценить общую продолжительность времени нахождения объекта B_i в переходном состоянии; показатель $J_{8ivf}^{(c)}$ позволяет определить общую продолжительность нахождения объекта B_i в макросостоянии S_{ivf} .

В целом весь комплекс перечисленных выше моделей можно объединить и представить в виде обобщённой модели.

Обобщённая динамическая модель процессов управления функционированием КСР (модель M)

$$M = \left\{ \mathbf{u}(t) \mid \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \mathbf{h}_0(\mathbf{x}(t_0)) \leq \mathbf{O}, \right. \\ \left. \mathbf{h}_1(\mathbf{x}(t_f)) \leq \mathbf{O}, \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{O}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) < \mathbf{O} \right\}; \quad (24)$$

$$J_\theta = J_\theta(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = \varphi_\theta(\mathbf{x}(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} f_\theta(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), \tau) d\tau, \theta = 1, \dots, \Theta, \quad (25)$$

где

$$\mathbf{x} = \|\mathbf{x}^{(g)\tau}, \mathbf{x}^{(o)\tau}, \mathbf{x}^{(p)\tau}, \mathbf{x}^{(n)\tau}, \mathbf{x}^{(e)\tau}, \mathbf{x}^{(c)\tau}, \mathbf{x}^{(v)\tau}\|^{\tau},$$

$$\mathbf{u} = \|\mathbf{u}^{(g)\tau}, \mathbf{u}^{(o)\tau}, \mathbf{u}^{(p)\tau}, \mathbf{u}^{(n)\tau}, \mathbf{u}^{(e)\tau}, \mathbf{u}^{(c)\tau}, \mathbf{u}^{(v)\tau}\|^{\tau} —$$

обобщённые векторы состояния и управления КСр; $\mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1$ — известные вектор-функции, с помощью которых задаются краевые условия для вектора \bar{x} в моменты времени $t=t_0$ и $t=t_f$; $\mathbf{q}^{(1)}, \mathbf{q}^{(2)}$ — векторные функции задают основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процесс функционирования КСр.

В целом построенная модель M вида (24) представляет из себя детерминированную нелинейную нестационарную конечномерную дифференциальную динамическую систему с перестраиваемой структурой. На рис.10 представлена взаимосвязь моделей $M_g, M_o, M_p, M_n, M_e, M_c, M_v$, входящих в состав обобщённой модели. На данном рисунке дополнительно введена обобщённая вектор-функция возмущающих воздействий $\xi = \|\xi^{(g)\tau}, \xi^{(o)\tau}, \xi^{(p)\tau}, \xi^{(n)\tau}, \xi^{(e)\tau}, \xi^{(c)\tau}, \xi^{(v)\tau}\|^{\tau}$, с помощью которой можно учесть влияние внешней среды на функционирование КСр. Существует множество вариантов конструктивного учёта указанных возмущающих воздействий в динамических моделях управления [2,6,10,16,18,20,24,29]. Так, например, в условиях справедливости предположения о марковости исследуемых процессов возможен вариант аналитического описания моделей функционирования КСр в условиях стохастического воздействия внешней среды. В этом случае агрегированная модель управления структурными состояниями СУ КСр (модель M_c) запишется в следующем виде:

$$\dot{q}_{i\delta\eta_1}^{(c,1)} = -q_{i\delta\eta_1}^{(c,1)} \sum_{\substack{\tilde{p}=1 \\ \delta \neq \tilde{p}}}^{\Delta} \tilde{\lambda}_{i\delta\tilde{p}\eta_1}^{(c,1)} \tilde{v}_{i\delta\tilde{p}\eta_1}^{(c,1)} + \sum_{\substack{\tilde{p}=1 \\ \delta \neq \tilde{p}}}^{\Delta} q_{i\tilde{p}\eta_1}^{(c,1)} \tilde{\lambda}_{i\delta\tilde{p}\eta_1}^{(c,1)} \tilde{v}_{i\delta\tilde{p}\eta_1}^{(c,1)}, \quad (26)$$

$$\sum_{\tilde{p}=1}^{\Delta} \tilde{v}_{i\delta\tilde{p}\eta_1}^{(c,1)}(t) = 1 \quad (27)$$

где $\tilde{\lambda}_{i\delta\tilde{p}}^{(c,1)}$ - интенсивность (плотность потока) переходов КСр B_i из макросостояния S_{δ} в макросостояние $S_{\tilde{p}}$, независящая от времени, при этом предполагается, что поток таких переходов — простейший (пуассоновский); $\tilde{v}_{i\delta\tilde{p}\eta_1}^{(c,1)}(t)$ — управляющее воздействие, которое интерпретируется как вероятность выбора соответствующего значения величины интенсивности перехода КСр B_i из макросостояния S_{δ} в макро-

состояние $S_{\bar{p}}$. Данную модель можно связать (организовать её взаимодействие) с ранее предложенной моделью M_o с помощью следующего соотношения:

$$0 \leq \tilde{v}_{i\bar{p}\eta_1}^{(c,1)}(t) \leq \tilde{u}_{is_i,j}^{(o)}(t), \quad (28)$$

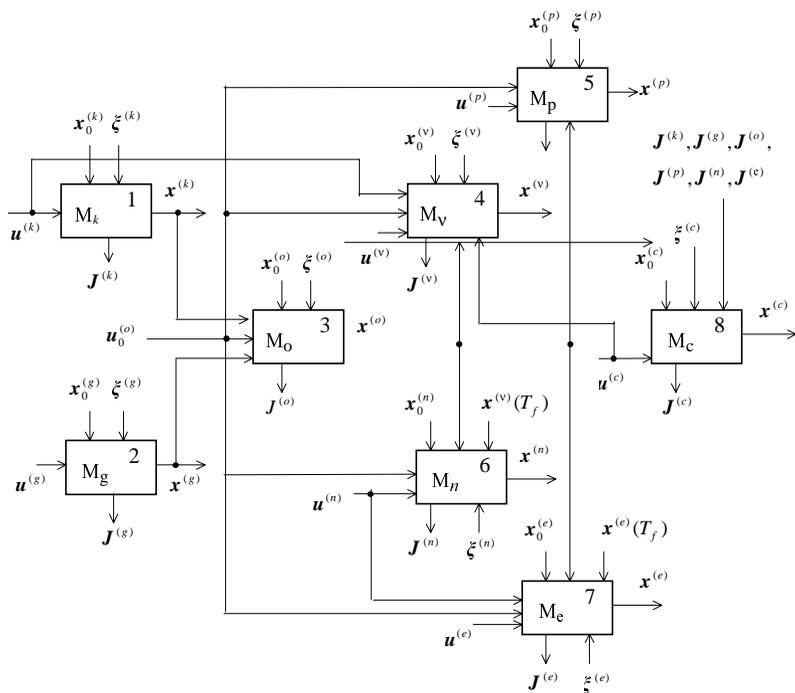
где $\tilde{u}_{is_i,j}^{(o)}(t)$ — управляющее воздействие, принимающее значение 1 при выполнении завершающей операции взаимодействия $D_{s_i}^{(i)}$ с B_i -м КСр, входящим в состав технологического цикла управления макросостояниями указанного объекта, 0 — в противоположном случае.

В этом случае в качестве частных показателей качества управления макросостояниями КСр могут быть выбраны, например, следующие функционалы:

$$J_{9i\eta_1}^{(c)} = \sum_{\delta \in N\Delta} q_{i\delta\eta_1}^{(c,1)}, \quad (29)$$

$$J_{10i\eta_1}^{(c)} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{\tilde{\gamma} \in \Gamma} q_{i\tilde{\gamma}\eta_1}^{(c,1)}(\tau) d\tau, \quad (30)$$

где первый показатель численно равен сумме вероятностей перевода КСр B_i в одно из требуемых агрегированных макросостояний S_{δ} , а второй функционал характеризует среднее время перевода КСр B_i в одно из заданных макросостояний S_{γ} на η_1 -м цикле управления. По аналогии могут быть построены аналитические модели для случаев, когда исходные данные заданы в нечётко-возможностной форме. При интервальном задании значений возмущающих воздействий весьма конструктивным является подход, основанный на построении и исследовании областей достижимости обобщённой динамической системы (24) [1,10,20].



M_g — динамическая модель управления движением СТС; M_k — динамическая модель управления каналами в СТС; M_o — динамическая модель управления операциями, проводимыми в СТС; M_n — динамическая модель управления потоками в СТС; M_p — динамическая модель управления ресурсами СТС; M_e — динамическая модель управления параметрами операций, проводимых в СТС; M_c — динамическая модель управления структурной динамикой СТС; M_v — динамическая модель управления вспомогательными операциями СТС

Рис. 10. Обобщённая схема взаимодействия моделей управления структурной динамикой КСр.

4. Методы и алгоритмы решения задач оценивания целевых и информационно-технологических возможностей СУ КСр. Важную роль при решении задач УСД СУ КСр играет оценка потенциальной способности СУ КСр решать свойственные ей целевые задачи. Так, например, на основе предварительных результатов анализа целевых и информационно-технологических возможностей (Ц и ИТВ) СУ КСр может осуществляться выбор возможных способов применения объектов $B_j, j = 1, \dots, m$, соответствующих различным условиям обстановки, построение множества эквивалентных структурных состояний СУ КСр и выбор вариантов реконфигурации её структур при их деградации.

Для количественной оценки Ц и ИТВ СУ КСр должна вводиться система показателей, которые, как уже указывалось ранее, могут использоваться в качестве показателей потенциальной эффективности СУ КСр. Анализ показывает, что характерной особенностью показателей ЦВ, используемых на различных уровнях СУ КСр, является их иерархическая соподчинённость и взаимосвязь.

Важное место в иерархии показателей ЦВ СУ КСр занимают показатели ИТВ, которые оказывают существенное влияние на показатели ЦВ СУ КСр в целом. Данные показатели можно отнести к группе системотехнических показателей эффективности [3,8,10,14,20].

Ключевая роль показателей ИТВ СУ КСр при оценке её ЦВ вызвана тем, что в создаваемых ныне СУ КСр, которые имеют ярко выраженный интегративный характер, технология управления (или, по-другому, технологическая структура управления) оказывает существенное влияние на остальные виды структур СУ КСр (техническую, организационную и т.п.) и является главной системообразующей компонентой, влияющей в первую очередь на результаты целевого применения объектов СУ КСр. Анализ показывает, что в качестве обобщённых показателей ИТВ СУ КСр в целом целесообразно использовать показатели пропускной способности СУ КСр [20].

Так, например, при детерминированном рассмотрении процесса функционирования СУ КСр показателями ИТВ СУ КСр могут быть выбраны следующие величины: общее число объектов, находящихся в заданном макросостоянии на фиксированном интервале времени, в фиксированный момент времени (данную характеристику можно получить на модели M_c); общее число технологических операций, проведённых с объектами, с системой объектов, на заданном интервале времени $\sigma = (t_0, t_f)$, либо к заданному моменту времени t . Показателями

ЦВ СУ КСр в данном случае будут: общее число объектов обслуживания (ОБО), с которыми объекты СУ КСр могут осуществить взаимодействие на интервале σ ; время, затрачиваемое системой объектов B_j , $j = 1, \dots, m$ на проведение всех запланированных целевых операций по взаимодействию с ОБО. При использовании математических моделей процесса функционирования СУ КСр, учитывающих факторы неопределённости (например, вероятностные, статистические, нечёткие модели), показателями ЦВ СУ КСр могут быть: математическое ожидание числа обслуженных ОБО к заданному моменту времени, вероятность (статистическая оценка вероятности) обслуживания объектами B_j , $j = 1, \dots, m$, заданной совокупности ОБО к заданному моменту времени, нечёткое ожидание общего числа ОБО, обслуженных на фиксированном интервале времени.

Показателями ИТВ СУ КСр в этом случае могут быть следующие величины: математическое ожидание обслуженных по заданной технологии объектов на интервале времени σ , либо на заданном подынтервале времени $\sigma_1 < \sigma$; вероятность (статистическая оценка вероятности) выполнения к заданному моменту времени всех необходимых технологических операций, связанных с обслуживанием объектов; нечёткое ожидание общего числа объектов, находящихся в заданных макросостояниях на фиксированном интервале времени σ_1 , либо в фиксированный момент времени t' .

Конструктивно задачу расчёта, оценки и анализа Ц и ИТВ СУ КСр можно решать, используя ранее построенные динамические модели УСД СУ КСр (модели, входящие в состав M), которые формально представляют из себя нестационарные конечномерные дифференциальные динамические системы (НКДДС) с перестраиваемой структурой. В этом случае задача оценки Ц и ИТВ СУ КСр может быть интерпретирована как задача оценивания управляемости рассматриваемой НКДДС, построения соответствующего множества (области) достижимости $D_i(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$, которое является фундаментальной характеристикой указанной динамической системы. Знание данного множества по существу заменяет собой всю необходимую для решения задач управления СУ КСр информацию о динамике системы (24)—(25), её основных ограничениях. В этом случае значения показателей Ц и ИТВ СУ КСр получаются в результате проектирования множества достижимости динамической модели УСД СУ КСр (модели M) и её частных

вариантов (модели $M_o, M_k, M_n, M_e, M_g, M_v, M_c, M_p$), не соответствующих оси декартовой (полярной) системы координат в пространстве состояний, либо в пространстве целевых (критериальных) функций (в пространстве выходов динамической модели M). Располагая множеством достижимости, можно проанализировать, как зависит разрешимость поставленных ранее краевых задач, к которым были сведены задачи УСД СУ КСр, от структуры и свойств множества начальных состояний X_0 , конечных состояний X_f ($\mathbf{x}(t_0) \in X_0, \mathbf{x}(t_f) \in X_f$) динамической системы (24)–(25), от интервалов времени, на которых происходит управление, от состава и структуры пространственно-временных, технических и технологических ограничений. Кроме того, в этом случае исходные задачи УСД СУ КСр могут быть сформулированы в другом виде, а именно, как задачи отыскания минимума заданной функции по соответствующему множеству достижимости

$$J'_{ог}(\mathbf{x}(\cdot)) \rightarrow \min_{\mathbf{x}(\cdot) \in D_i(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))}, \quad (31)$$

где $D_i(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ — множество достижимости динамической системы (модели) M_i ($i = 1, 2, 3$); $J'_{ог}(\mathbf{x}(\cdot))$ — преобразованный к терминальному виду (виду функционала Майера) исходный функционал (25).

При этом необходимо подчеркнуть, что при изменении вида функции $J'_{ог}(\mathbf{x}(\cdot))$ не требуется повторный расчёт множества достижимости $D_i(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$. В указанной ситуации следует просто заново решить задачу нелинейного программирования (31). Таким образом, предварительный расчёт множества достижимости для динамических моделей (24)–(25) позволяет существенно сократить затраты времени и повысить оперативность решения задач СУ КСр при различных показателях качества УСД СУ КСр. Необходимо отметить, что для задач УСД СУ КСр большой размерности построение множеств (областей) достижимости представляет собой исключительно сложную проблему. Поэтому на практике при решении указанной проблемы проводят различного рода упрощения, связанные с аппроксимацией множеств $D_i(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ [4,10,20].

Применительно к рассматриваемым задачам оценки Ц и ИТВ СУ КСр может быть предложено несколько методов и алгоритмов построения и аппроксимации множеств достижимости динамических систем (24)–(25).

Один из возможных методов (алгоритмов) построения $D(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ основывается на многократном решении задач оптимального программного управления элементами и подсистемами СУ КСр с функционалом вида [10]:

$$J_{\text{об}}''(\mathbf{x}(\cdot)) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t_f) \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in Q_p(\mathbf{x})}, \quad (32)$$

где \mathbf{c} — заданный вектор, удовлетворяющий условиям нормировки $|\mathbf{c}| = 1$. Осуществляя поиск $\mathbf{u}^*(t)$ для каждого фиксированного \mathbf{c} , мы получаем точку $\mathbf{x}^*(t_f)$, лежащую на границе множества достижимости, и опорную гиперплоскость вида $\mathbf{c}^T \mathbf{x}^*(t_f)$ к этому множеству, проходящую через точку $\mathbf{x}^*(t_f)$. Определив $\mathbf{x}_{\bar{\beta}}^*(t_f)$ и опорные гиперплоскости, для которых варианты варьирования компонент вектора $\mathbf{c}_{\bar{\beta}}$, $\bar{\beta} = 1, \dots, \bar{\Delta}$ ($\bar{\Delta}$ — число вариантов варьирования), можно получить как внешнюю ($D^{(+)}$), так и внутреннюю ($D^{(-)}$) аппроксимацию множества достижимости $D(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$. В связи с этим в работе [10] было показано, что в общем случае для НКДДС рассматриваемого класса внешней аппроксимацией $D^+(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ множества $D(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ будет выпуклый многогранник, образованный пересечением опорных гиперплоскостей. Внутренней аппроксимацией $D^-(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ множества $D(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ может служить выпуклый многогранник, вершинами которого являются точки $\mathbf{x}_{\bar{\beta}}^*(t_f)$, т.е. $D^-(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0)) = \text{Co}(\mathbf{x}_1(t_f), \dots, \mathbf{x}_{\bar{\Delta}}(t_f))$. Чем больше $\bar{\Delta}$, тем лучше D^+ и D^- приближают множество достижимости. Можно показать [20], что в рассматриваемом случае величина $\bar{\Delta}$ определяется общим числом возможных прерываний операций взаимодействия в СУ КСр на заданном интервале времени (t_0, t) . При этом в основу алгоритма построения многогранника D^+ , D^- был положен метод Крылова-Черноушко [10]. Вместо варьирования значений компонент вектора \mathbf{c} в функционале (32) следует проводить варьирование значений компонент вектора $\Psi(t_0)$, который представляет собой вектор сопряжённых переменных в начальный момент времени. В этом случае решение исходной сложной

краевой задачи заменяется решением задач Коши для дифференциальных уравнений основной и сопряжённой систем управлений. Достоинство предлагаемого подхода состоит в том, что при УСД КСр компоненты вектора $\psi(t)$ имеют определённую содержательную интерпретацию [20,22], позволяющую упростить процедуру перебора значений указанного вектора, уменьшить общий объём вычислений.

Анализ показывает, что при построении множеств D^+ , D^- наряду с общей динамической моделью УСД КСр (моделью M) могут быть использованы её агрегированные варианты. Проиллюстрируем суть данного подхода на примере моделей M_o , M_k , входящих в состав модели M . В этом случае должна быть проведена замена множества ОВ объекта B_j с другими объектами B_i одной обобщённой операцией. Кроме того, в указанной ситуации будем считать, что $\theta_{ij} = 1 \forall i, j$; снимем требования на непрерывность выполнения ОВ, операций по переналадке канала $C^{(j)}$.

При данном варианте агрегирования игнорируется «тонкая» структура обобщённой ОВ объектов СУ КСр, проявляющаяся в логической взаимосвязи её частных операций и в различных вариантах распределения этих операций по каналам объектов. Вместе с тем, полученные укрупнённые модели M_o , M_k , сохраняя наиболее существенные черты исходных (деагрегированных) моделей, позволяют проводить аппроксимацию множеств достижимости указанных моделей, оценивать выполнимость краевых условий в задаче УСД СУ КСр. Покажем, каким образом это может быть осуществлено. Агрегированные модели ОВ объекта и его каналов, с учётом вышеизложенного, примут следующий вид:

$$\dot{\tilde{x}}_i^{(o)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) \tilde{u}_{ij}^{(o)}, \quad (33)$$

$$\dot{\tilde{x}}_{ij}^{(k)} = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^m \tilde{u}_{lj}^{(k)} \frac{h_{li}^{(j)} - \tilde{x}_{ij}^{(k)}}{\tilde{x}_{ij}^{(k)}} \gamma_{-}(\tilde{x}_{ij}^{(k)}), \quad (34)$$

где $\tilde{x}_i^{(o)} = \sum_{\alpha=1}^{S_i} x_{i\alpha}^{(o)}$, $\tilde{u}_{ij}^{(o)} = \sum_{\alpha=1}^{S_i} u_{i\alpha j}^{(o,2)}$ — функции агрегирования. Классы допустимых управляющих воздействий $\tilde{K}_{\sigma}^{(o)}$, $\tilde{K}_{\sigma}^{(k)}$ определим следующим образом:

$$\tilde{K}_\sigma^{(o)} = \left\{ \tilde{U}_\sigma^{(o)} = \left\| \tilde{u}_{ij}^{(o,2)} \right\| \left\| \sum_{i=1}^m \tilde{u}_{ij}^{(o,2)} \right\| \leq 1, \right. \\ \left. \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij}^{(o)} \leq 1, \tilde{u}_{ij}^{(o)} \tilde{x}_{ij}^{(o)} = 0, \tilde{u}_{ij}^{(o)} \in \{0,1\}; \tilde{s}_\sigma^{(o)} \right\}, \quad (35)$$

$$\tilde{K}_\sigma^{(k)} = \left\{ \tilde{U}_\sigma^{(k)} = \left\| \tilde{u}_{ij}^{(k)} \right\| \left\| \sum_{i=1}^m \tilde{u}_{ij}^{(k)} \right\| \leq 1, \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij}^{(k)} \leq 1, \tilde{u}_{ij}^{(k)} \in \{0,1\}; \tilde{s}_\sigma^{(k)} \right\}, \quad (36)$$

где $\tilde{s}_\sigma^{(o)}, \tilde{s}_\sigma^{(k)}$ — заданные теоретико-функциональные ограничения, накладываемые на класс управляющих воздействий.

Будем предполагать, что указанные управляющие воздействия принадлежат классу кусочно-непрерывных функций. Введём в рассмотрение вектор $\tilde{\mathbf{x}}^{(o)} = \left\| \tilde{x}_1^{(o)}, \dots, \tilde{x}_m^{(o)} \right\|^T$ и вектор $\tilde{\mathbf{x}}^{(k)} = \left\| \tilde{x}_1^{(k)}, \dots, \tilde{x}_m^{(k)} \right\|^T$.

Тогда пусть $\tilde{\mathbf{x}}^{(o)}(t_0) = 0, \tilde{\mathbf{x}}^{(k)}(t_0) = \tilde{\mathbf{x}}_0^{(k)}$. Множество достижимости в пространстве состояний динамической системы (33)–(34) может в этом случае быть представлено как

$$\tilde{D}_{(o,k)} = \left\{ \tilde{\mathbf{x}} \left| \tilde{x}_i^{(o)} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(\tau) \tilde{u}_{ij}^{(o)}(\tau) d\tau, \tilde{U}_\sigma^{(o)} \in \tilde{K}_\sigma^{(o)}, \right. \right. \\ \left. \left. \tilde{x}_{ij}^{(k)} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{l=1}^m \tilde{q}_{ij}(\tau) \tilde{u}_{lj}^{(k)}(\tau) d\tau, \tilde{U}_\sigma^{(k)} \in \tilde{K}_\sigma^{(k)} \right\}, \quad (37)$$

$$\text{где } \mathbf{x} = \left\| (\tilde{x}^{(o)})^T (\tilde{x}^{(k)})^T \right\|^T, \tilde{q}_{ij} = \frac{h_{li}^{(j)} - \tilde{x}_{ij}^{(k)}}{\tilde{x}_{lj}^{(k)}} \gamma_- (\tilde{x}_{lj}^{(k)}).$$

Можно показать [20], что для рассматриваемых ситуаций обслуживания объектов справедлива следующая теорема.

Т е о р е м а 1. Если функции $\varepsilon_{ij}(t)$ неотрицательны, ограничены и имеют на интервале $\sigma = (t_0, t_f]$, $t \in \sigma$ не более чем счётное число разрывов, а классы допустимых управлений заданы в виде (35), (36), то соответствующее множество достижимости $\tilde{D}_{(o,k)}$:

- а) расположено в неотрицательном ортанте пространства $\tilde{X} = \mathbb{R}^{(m+mm)}$, ограничено, замкнуто, выпукло;
- б) удовлетворяет следующему включению

$$D_{(o,k)}^- \subseteq \tilde{D}_{(o,k)} \subseteq D_{(o,k)}^+, \quad (38)$$

в котором

$$\tilde{D}_{(o,k)}^- = \left\{ \tilde{\mathbf{x}} \mid 0 \leq \tilde{x}_i^{(o)} \leq \bar{\xi}_i \tilde{x}_i^{(o)}, 0 \leq \tilde{x}_{ij}^{(k)} \leq \bar{\chi}_i \Phi_{ij}^{(k)}, \bar{\xi}_i \geq 0, \right. \\ \left. \sum_{i=1}^m \bar{\xi}_i = 1; 0 \leq \bar{\chi}_i \leq 1 \right\}, \quad (39)$$

$$\tilde{D}_{(o,k)}^+ = \left\{ \tilde{\mathbf{x}} \mid 0 \leq \tilde{x}_i^{(o)} \leq \tilde{x}_i^{(o)}, 0 \leq \tilde{x}_{ij}^{(k)} \leq \bar{\chi}_i \Phi_{ij}^{(k)}, 0 \leq \bar{\chi}_i \leq 1 \right\}, \quad (40)$$

где $\tilde{x}_i^{(o)} = \int_{t_0}^{t_f} \left[\max_{j=1, \dots, m} \varepsilon_{ij}(\tau) d\tau \right]$ при условии $x_{ij}^{(k)} \equiv 0 \forall t, \forall i$,

$$\Phi_{ij}^{(k)} = \max_{j'=1, \dots, m} \{h_{ij'}^j\} \forall j.$$

Приведённая теорема имеет существенное значение для предварительного качественного анализа задачи управления ОБ объектами СУ КСр, каналами СУ КСр, так как вычисление величин $\tilde{x}_i^{(o)}, \Phi_{ij}^{(k)}$ не вызывает существенных затруднений, а вместе с тем анализ множеств $D_{(o,k)}^-, D_{(o,k)}^+$ позволяет в ряде случаев оценить выполнимость краевых условий, не решая собственно задачу УСД СУ КСр, оценить границы изменения показателей ИТВ СУ КСр. При использовании в процессе УСД СУ КСр динамических моделей появляется возможность в достаточно наглядной форме изображать множества $D, D^{(+)}, D^{(-)}$ как в пространстве состояний соответствующих динамических моделей, так и в пространстве выходов (пространстве целевых, критериальных функций).

Так, например, на рис. 11–15 для двух компонент агрегированной модели управления операциями взаимодействия объектов B_1 и B_2 с объектом B_3 (см. формулы (33), (35)) и для трёх ситуаций обслуживания представлены результаты моделирования ОД в декартовой системе координат. Рассматриваемые ситуации обслуживания интерпретируются следующим образом:

- **для первой ситуации обслуживания** (СиОб) (см. рис. 11) зоны взаимодействия (ЗВ) двух пар объектов B_1 и B_3 и объектов B_2 и B_3 не пересекаются на интервале управления $t = (0, 13]$ у.в.е. В этом случае степень конфликтности СиОб нулевая;

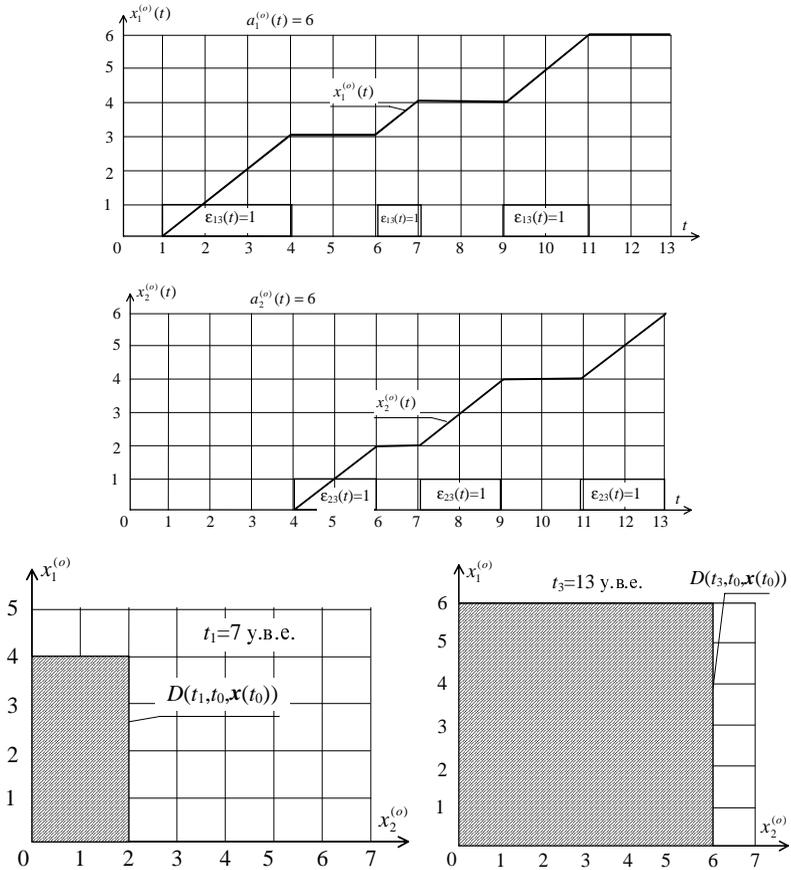


Рис. 11.

- для второй ситуации обслуживания (см. рис. 12) ЗВ двух пар объектов B_1 и B_3 и объектов B_2 и B_3 полностью совпадают на интервале управления t . Для данной ситуации степень конфликтности равна 1 (максимальна);

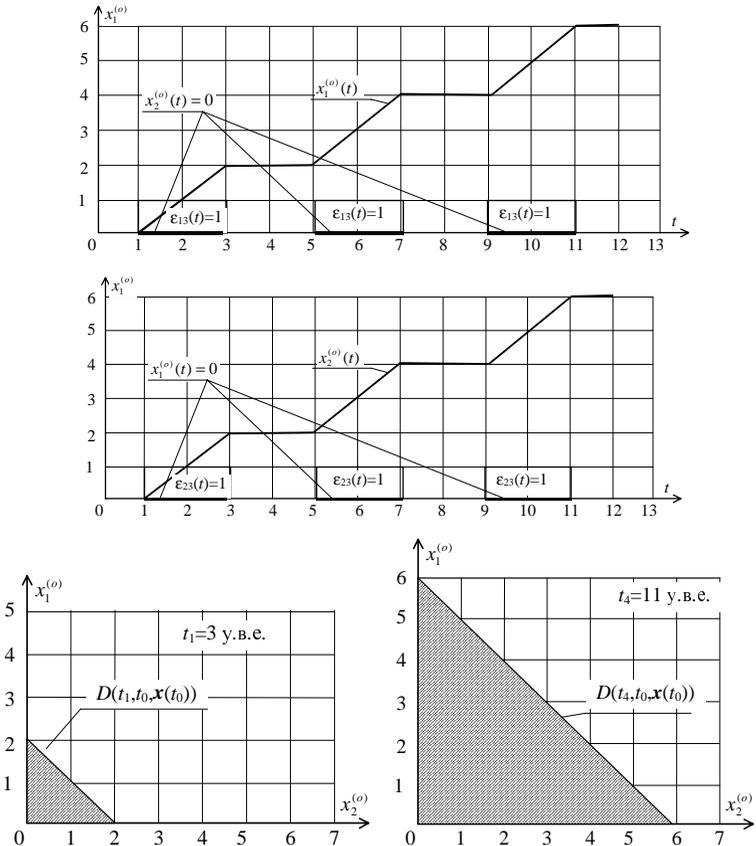


Рис. 12.

- третья ситуация обслуживания** (см. рис. 13–15) занимает (по своим результатам) промежуточное положение между первой и второй СиОб. На рис.13, 14 переменные $\bar{x}_1^{(o)}(t)$, $\bar{x}_2^{(o)}(t)$ [$\bar{\bar{x}}_1^{(o)}(t)$, $\bar{\bar{x}}_2^{(o)}(t)$] в каждый текущий момент времени характеризуют соответственно максимально (минимально) возможный объём выполнения ОВ объекта B_1 с объектом B_3 и объекта B_2 с объектом B_3 .

В том случае, когда число пар взаимодействующих объектов становится большим, возможно совмещение нескольких декартовых систем координат, либо переход к полярным системам координат как в пространстве выходов динамической системы (пространстве показателей качества функционирования СУ КСр), так и в пространстве её состояний.

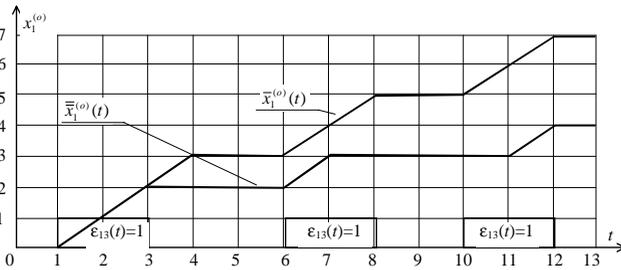


Рис.13.

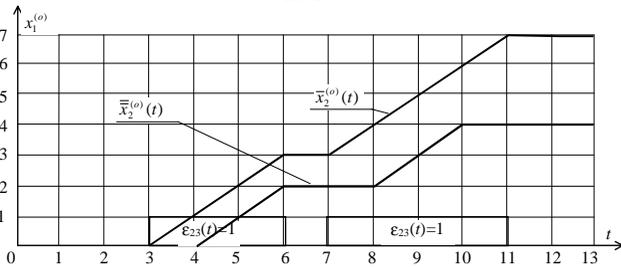


Рис.14.

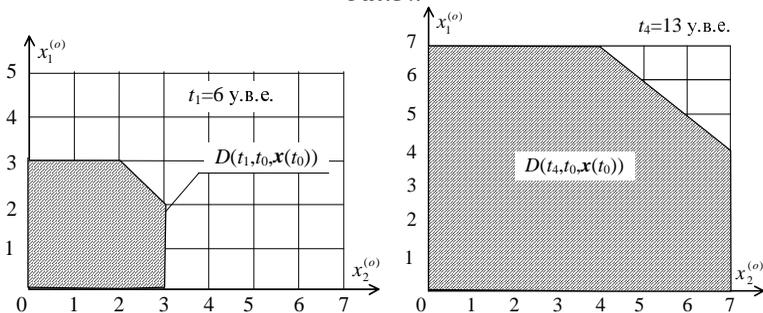


Рис.15.

5. Заключение. В целом построенная модель представляет линейную (либо билинейную при использовании модели M_k) нестационарную конечномерную дифференциальную динамическую систему с перестраиваемой структурой. Взаимосвязь и координации решений в указанном многомодельном комплексе осуществляются с использованием вектора управляющих воздействий $\mathbf{u}^{(o)}(t)$, входящего в модель M_o и определяющего порядок выполнения ОВ и распределения соответствующих ресурсов КСр. В [9,10,23] подобная процедура координации названа ресурсной.

Главная особенность и отличительная черта комплекса моделей M , который по сути расширяет и обобщает предложенные ранее динамические модели теории расписаний [10,27], состоит в том, что основные технологические ограничения, имеющие сугубо нелинейный характер, учитываются не при задании дифференциальных уравнений, описывающих динамику соответствующих процессов (как это было сделано в [10]), а при формировании выпуклой области допустимых управляющих воздействий. В этом случае, используя метод локальных сечений [13], удаётся в явном виде получить множители Лагранжа, с помощью которых в разработанных моделях учитываются технические и технологические ограничения. В [10] указанные множители предлагается искать итерационно численными методами. Кроме того, в рамках предложенного варианта формализации процессов управления КСр можно перейти от исходного класса допустимых управлений K_o^n к расширенному классу $K_{o_p}^n$, в котором условия релейности управления вида $u_v \in \{0,1\}$ (где $v \in \{1, \dots, n_{об}\}$ — множество номеров компонент вектора \mathbf{u}) заменены на менее жёсткие условия вида $u_v \in [0,1]$. Это позволяет на практике при решении разнообразных задач управления КСр (в том числе и задач теории расписаний) широко использовать фундаментальные научные результаты современной теории управления [1, 2, 6, 10, 13].

Проведённые машинные эксперименты показали [20], что при использовании динамических моделей управления КСр существенно сокращается размерность задач управления, решаемых в каждый момент времени, за счёт рекуррентного описания моделей, повышается оперативность их решения на основе декомпозиции и распараллеливания вычислительного процесса, широкого использования оверлейных ре-

жимов работы ЭВМ. В этом случае весьма перспективным становится использование аналого-цифровых вычислительных комплексов.

Оригинальность предложенного варианта формализации процессов управления КСр состоит в том, что удастся в явном виде связать содержательные аспекты функционирования СУ 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 измерений 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 СУ КСр.

Рассматривая различные сочетания и варианты взаимодействия частных моделей управления КСр, входящих в модель M , можно провести всесторонний многокритериальный анализ существенных факторов, влияющих на результаты целевого применения КСр.

Поддержка исследований. Междисциплинарные исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 09-07-00066, 10-07-00311, 08-08-00403, 09-07-11004, 10-08-90027-Бел_а) и Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О-2.3/03).

Литература

1. Athaus, M., *Falb P.L.* 1966. Optimal control: An Introduction to the Theory and Its Applications. McGraw-Hill Book Company. New York, San Francisco, Sidney.
2. Bryson, A.E., and Yo-Chi Ho., 1969. Applied optimal control: Optimization, Estimation and Control. Waltham Massachusetts, Toronto, London.
3. Casti, J.L., 1979. Connectivity, Complexity and Catastrophe in Large-Scale Systems. Wiley-Interscience, New York and London.
4. Chernousko, F.L., Zak, V.L. On Differential Games of Evasion from Many Pursuers // J. Optimiz. Theory and Appl. 1985. Vol.46, N 4, pp.461-470.
5. Дюбановский С.А., Озерянный Н.А. Системы автоматического управления с реконфигурацией // Измерение, контроль, автоматизация, 1990, № 4(76). — С.62-80.
6. Fleming, W.H., Richel R.W., 1975. Deterministic and stochastic optimal control. Springer-verlag, Berlin, New York.
7. Intelligent Control Systems: Theory and Applications / Eds. M.M. Gupta, N.K. Sinka. N.Y.: IEEE Press, 1996.
8. Klir, G.J., 1985. Architecture of Systems Problem Solving. Plenum Press, New York.
9. Mesarovic M.D. and Y. Takahara., 1975. General Systems Theory: Mathematical Foundations. Academic Press, New York, Can Francisco, London.
10. Монсеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. — М.: Наука, 1975.
11. Napolitano M.R., Swaim R.L. A New Technique for Aircraft Flight Control Reconfiguration // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., 1989, Pt 1, pp.1-9.

12. Napolitano M.R., Swaim R.L. An Aircraft Flight Control Reconfiguration Algorithm // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., 1989, pp.323-332.
13. Понтрягин Л., Болтянский В., Гамкрелидзе Р., Мищенко Е. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Физматгиз, 1961.
14. Roy, B., 1996. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
15. Russell, S.J., Norvig, P., 1995. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice-Hall, Inc., A Simon & Schuster Company, Upper Saddle River, New Jersey.
16. Shannon, R.E., 1975. Systems Simulation. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
17. Siliak, D.D., 1990. Decentralized Control of Complex Systems, Academic Press, New York.
18. Simulation and Model-Based Methodologies: An Integrate View/Ed. by T.I. Orey, B.P. Zeigler, M.S. Elzas: NATO Series (F), Vol.10 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1984.
19. Singh, M., and A. Titli, 1978. Systems: Decomposition, Optimization and Control, Pergamon Press, Oxford.
20. Соколов Б.В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. — МО, 1992.
21. Соколов Б.В., Калинин В.Н. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления, 1995, № 1. — С.149-156.
22. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальная и теоретико-множественная модель управления структурной динамикой космических средств // Мехатроника, 2003, № 5. — С.17-25.
23. Цурков В.И. Динамические задачи большой размерности. — М.: Наука, 1988.
24. Tsypkin, Y.Z., 1971. Adaptation and Learning in Automatic System. Academic Press. New York.
25. Van der Velde W.E. Control System Reconfiguration // Proc. American Control Conf., 1984, v.3, pp.1741-1745.
26. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001, № 1. — С.5-22, № 2 — С.5-21.
27. Wanguer, H.M., 1969. Principles of Operations Research. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
28. Weiss J.L., Looze D.P., Eterno J.S. Simulation Results of Automatic Restructurable Flight Control System Concepts // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., 1986, pp.190-197.
29. Yusupov R., Rozenwasser E., 1999. Sensitivity of Automatic Control Systems. CRS. Press, London, New York.
30. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. — М.: Наука, 1982.
31. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И., Филимонов В.А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем: Оптимизационно-имитационный подход. — М.: Наука, 1985.
32. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). — М.: Наука, 1993.

Соколов Борис Владимирович — д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ; зам. директора по научной работе Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН).

Область научных интересов: системный анализ и исследование операций, разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 260. sokol@iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д.39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812) 328–0103, факс +7(812) 328–4450.

Sokolov Boris Vladimirovich — Dr.Sc. in Technical Science, Prof., Honored scientist of Russian Federation; Deputy-Director for Research, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 260. sokol@iias.spb.su; SPIIRAS, 14th Line V.O., 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, директор Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Заслуженный деятель науки и техники РФ. Область научных интересов: теория управления, информатика, теоретические основы информатизации и информационного общества, информационная безопасность. Число научных публикаций — 350. СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; тел.(812)328-33-11, (812)328-34-11, факс(812)328-44-50, E-mail: yusupov@iias.spb.su

Yusupov, Rafael Midkhatovich — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Sciences (Tech.), Professor, Director of Institution of RAS St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS) Honored Scientists of the Russian Federation. Research interests: control theory, informatics, theoretic basics of informatization and information society, information security. Number of research publications — 350. SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-3411; fax: +7(812)328-4450, e-mail: yusupov@iias.spb.su; www.spiiras.nw.ru.

Рекомендовано лабораторией информационных технологий в системном анализе и моделировании, зав. лаб. Б.В. Соколов, д-р техн. наук, проф.
Статья поступила в редакцию 30.11.2010.

РЕФЕРАТ

Соколов Б.В., Юсупов Р.М. **Полиmodelьное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами.**

Предложен многоmodelьный (полиmodelьный) подход к описанию и исследованию процессов управления космическими средствами (КСр) в условиях, когда их параметры и структуры изменяются под действием объективных (субъективных), внешних (внутренних) причин. Данные процессы в статье названы процессами управления структурной динамикой космических средств. На основе разработанной ранее концепции активного подвижного объекта (АПО) проводится содержательная постановка рассматриваемого класса задач управления и её теоретико-множественная формулировка. Единство концептуального описания позволило с помощью предложенного унифицированного комплекса динамических modelей описать как основные аспекты функционирования элементов и подсистем, входящих в состав системы управления (СУ) КСр [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.

В этом случае в рамках единого modelьного описания удаётся осуществить одновременно синтез как технической, так и функциональных структур СУ КСр. Предлагаемый полиmodelьный комплекс позволяет при решении задач управления структурной динамикой СУ КСр осуществлять поиск альтернатив не в дискретных, а в конечномерных пространствах, существенно сократить размерность задач структурно-функционального синтеза СУ КСр, решаемых в каждый момент времени, непосредственно формально связать технологию управления космическими аппаратами с результатами их применения по целевому назначению. Одно из основных достоинств предложенного в статье подхода к описанию процессов управления структурной динамикой СУ КСр 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. Данное положение иллюстрируется на примере расчета целевых и информационно-технологических возможностей СУ КСр.

SUMMARY

Sokolov B.V. Yusupov R.M. Multiple-model description and structure dynamics analysis of space-facilities control systems.

A multiple-model approach to description and investigation of control processes in space systems is presented to answer the changeability of space-facilities (SF) parameters and structures, which can be caused by objective (subjective) external (internal) reasons. The processes considered in this paper were qualified as control processes of space-facilities 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 [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 CS elements as well as their interaction with objects-in-service 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 SF CS. The presented multiple-model complex, as compared with known analogues, has several advantages. It simplifies decision-making in SF CS 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 SF CS 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. This statement is exemplified by an analysis of SF CS information-technological abilities and goal abilities.