

---

## АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКОЙ АКТИВНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Е. М. Зайчик, О. М. Тарасов, Б. В. Соколов (Санкт-Петербург)

Одной из основных особенностей сложных систем (в том числе и сложных технических систем (СТС)) является то, что их параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных причин [3, 6, 7]. Другими словами, на практике мы постоянно сталкиваемся со структурной динамикой СТС. В этих условиях для повышения (сохранения, восстановления) уровня работоспособности и возможностей СТС необходимо управлять их структурами. Широкое распространение на практике получил такой вариант управления структурами СТС, как реконфигурация. Реконфигурация СТС – это процесс изменения структуры СТС в целях сохранения, восстановления (повышения) уровня работоспособности СТС либо обеспечения минимального снижения уровня эффективности применения СТС при деградации её функций [3, 7]. Стандартная технология реконфигурации СТС при отказе одного из её ресурсов включает в себя следующие основные шаги. **Шаг 1.** Определение и анализ момента времени и места отказа ресурса, снятие с решения задачи, выполняемой на данном ресурсе, передача задачи на другой ресурс (с сохранением / без сохранения полученных промежуточных результатов). **Шаг 2.** Исключение отказавшего ресурса из конфигурации СТС, попытка замены его резервным (однотипным) либо резервным другого типа, с близкими функциональными возможностями. **Шаг 3.** Исключение связей с отказавшим ресурсом, запрет доступа к нему, а для самого отказавшего ресурса – попытка его восстановления. В том случае, если на отказавшем ресурсе решалась высокоприоритетная задача, которая при передаче на другие ресурсы начинает конфликтовать с задачами, закреплёнными за данным ресурсом, то в зависимости от дисциплины обслуживания происходит прерывание выполнения менее приоритетных задач либо просто снятие их с решения.

Описанная технология в большинстве существующих СТС реализована на микроуровне (на уровне элементов и блоков СТС) с использованием аппаратно-программных средств). Данную реконфигурацию в ряде случаев называют «слепой реконфигурацией», так как в ходе её реализации, как правило, не проводятся следующие операции: *учёт и анализ текущих характеристик решаемых в СТС задач и выполняемых функций; анализ и оценивание текущего состояния СТС в целом; оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей СТС для обоснованного перераспределения функций СТС между её работоспособными элементами и подсистемами.*

В реальных ситуациях отказ одного вида ресурса может вести к отказу или снижению эффективности функционирования других видов ресурсов. При этом замена отказавшего ресурса другим видом ресурса требует формирования принципиально новых работоспособных конфигураций СТС. Таким образом, применительно к современным СТС реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления структурами СТС для компенсации отказов, но и как технологию управления, направленную на повышение эффективности функционирования СТС; для реализации указанной концепции реконфигурации СТС необходимо разработать такие средства формализации, которые позволили бы на конструктивной основе связывать процессы реконфигурации СТС с процессами её использования на различных этапах жизненного цикла [1, 5–7]. В связи со сказанным мы в своих исследованиях перешли от узкой (традиционной) интерпретации процессов реконфигурации СТС к их широкой интерпрета-

ции в рамках развиваемой нами новой прикладной теории управления структурной динамикой СТС.

При проведении исследований в качестве основных структур СТС рассматривались следующие их типы: структура целей, функции и задач, решаемых СТС; организационная структура; техническая структура; топологическая структура; структура программно-математического и информационного обеспечения; структура технологии управления СТС. *Под управлением структурной динамикой* мы понимали процесс формирования и реализации управляющих воздействий, обеспечивающих переход СТС из текущего многоструктурного состояния в заданное многоструктурное состояние. Решение проблемы управления структурной динамикой СТС предполагает исследование следующих классов задач: *анализ структурной динамики СТС, оценивание (наблюдение) структурных состояний и структурной динамики СТС, синтез оптимальных программ управления структурной динамикой СТС в различных условиях* [8]. С нашей точки зрения, разрабатываемая теория управления структурной динамикой СТС является междисциплинарной теорией и будет 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 корректно перейти от слабоструктурированной к структурированной постановке задач управления структурной динамикой. Предварительные исследования показали, что в качестве первого шага при создании рассматриваемой в проекте теории целесообразно провести концептуальное описание процессов управления структурной динамикой СТС.

Результаты исследований показали, что при описании процессов управления структурной динамикой удобно воспользоваться концепцией активного подвижного объекта (АПО). Согласно указанной концепции, АПО в общем случае представляет собой искусственно созданный материальный объект (аппаратно-программный комплекс), перемещающийся в пространстве и взаимодействующий (информационно, вещественно, энергетически) с другими АПО [2].

АПО как объект управления состоит из четырёх подсистем, которым поставлены в соответствие четыре процесса (четыре функции): движения, взаимодействия с другими АПО и объектами обслуживания (ОБО), функционирования аппаратуры (приборов), расхода (пополнения) ресурсов. Все перечисленные функции различны по 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. При такой интерпретации АПО можно рассматривать как разновидность агента, входящего в состав соответствующей мультиагентной системы [3, 7, 8]. В ходе исследований были формализованы основные классы задач управления структурной динамикой СТС. Среди них, в первую очередь, необходимо выделить следующие задачи: анализ структурной динамики АПО, диагностика и наблюдение за структурной динамикой АПО, выбор оптимальных программ управления структурной динамикой АПО (планирование применения группировок АПО). При этом были разработаны методологические и методические основы теории управления структурной динамикой. В свою очередь, данные методологические основы базировались на результатах, полученных к настоящему времени в обобщенном системном анализе и современной теории управления СТС с перестраиваемыми структурами, и нашли свое конкретное отражение в соответствующих принципах [1, 4, 5, 8]: программно-целевого управления, внешнего дополнения, необходимого разнообразия, полимодельности и многокритериальности, а также принцип новых

задач. Динамическая интерпретация процессов управления структурной динамикой СТС позволила при ее анализе во всей полноте использовать результаты, ранее полученные в теории устойчивости и чувствительности динамических систем [8].

При полимодельном описании процессов управления структурной динамикой СТС нами использовались технологии комплексного моделирования и концепции, положенные в основу построения имитационных систем. Имитационная система (ИС) при этом рассматривалась как специально организованный программно-алгоритмический комплекс, включающий в себя [4, 8]: *имитационные модели (иерархию моделей), аналитические модели (иерархию моделей), дающие упрощенное (агрегированное) описание изучаемых объектов, информационную подсистему, включающую в себя базы данных (а в перспективе и базы знаний), систему управления и сопряжения, обеспечивающую все компоненты ИС и работу пользователя (ЛПП) в интерактивном режиме.*

Перечисленные компоненты ИС были положены в основу созданного комплекса прототипов программ, предназначенных для автоматизированного решения задач управления структурной динамикой СТС. В ходе исследований были предложены следующие основные фазы и этапы решения задачи выбора оптимальных программ управления структурной динамикой СТС. В соответствии с разработанной обобщенной процедурой решения данной задачи **на первой фазе** должны формироваться (генерироваться) допустимые варианты многоструктурных макросостояний СТС или, говоря другими словами, должен проводиться структурно-функциональный синтез нового облика СТС, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке. В указанной ситуации задачи, решаемые на первой фазе, сводятся к задачам структурно-функционального синтеза СТС. **На второй фазе** выбирается конкретный вариант многоструктурного макросостояния СТС с одновременным синтезом (построением) адаптивных планов (программ) управления переходом СТС из текущего макросостояния в множество допустимых макросостояний, сформированных на первой фазе решения исследуемой задачи. При этом рассматриваемые планы должны обеспечивать такое эволюционное развитие СТС, при котором наряду с реализацией программ перехода из соответствующих макросостояний предусматривается одновременно и реализация программ устойчивого управления СТС в промежуточных макросостояниях. Таким образом, на второй фазе исследования задачи выбора оптимальных программ управления структурной динамикой (УСД) СТС приходится решать целую совокупность частных задач многоуровневой и многоэтапной оптимизации. Обобщенный алгоритм решения данных задач должен включать следующие этапы (шаги) [7].

**Шаг 1.** В интерактивном режиме осуществляется автоматизированная подготовка, контроль, анализ и ввод всей исходной информации, необходимой для решения задачи управления структурной динамикой СТС. При этом одновременно проводится адаптация параметров и структур ранее построенных моделей, алгоритмов и соответствующих вычислительных модулей специального программно-математического и информационного обеспечения (СПМО и ИО) имитационной системы к прошлому и текущему состоянию внешней среды, объектов управления и управляющих подсистем, входящих в состав функционирующей и синтезируемой СТС. При отсутствии требуемых исходных данных происходит их генерация с использованием соответствующих имитационных моделей, входящих в состав ИС, либо на основе экспертного опроса.

**Шаг 2.** Планирование проведения комплексного моделирования процессов адаптивного управления функционированием и развитием СТС в текущей и прогнозируемой обстановке, планирование проведения вычислительных экспериментов в ИС, определение состава и структуры моделей, методов и алгоритмов решения частных задач моделирования, расчёт времени, необходимого для решения указанных задач.

**Шаг 3.** Генерирование, на основе комплексного моделирования, допустимых вариантов функционирования СТС в исходном, промежуточных и требуемых многоструктурных

вания СТС в исходном, промежуточных и требуемых многоструктурных макросостояниях, вывод результатов моделирования ЛПР, предварительный интерактивный структурно-функциональный анализ указанных результатов моделирования; формирование классов эквивалентных многоструктурных макросостояний СТС. **Шаг 4.** Автоматизированный ввод допустимых вариантов функционирования СТС, проверка корректности заданной системы ограничений, окончательный выбор необходимого уровня агрегирования при описании моделей УСД СТС, вычислительной схемы и плана вычислительных экспериментов по поиску оптимальных программ УСД СТС. **Шаг 5.** Поиск оптимальных программ управления структурной динамикой СТС, при которых обеспечивается переход из заданного в синтезируемое многоструктурное макросостояние СТС, устойчивое управление функционированием СТС в промежуточных многоструктурных макросостояниях. **Шаг 6.** Имитация условий реализации оптимального плана управления переходом СТС из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние при наличии возмущающих воздействий и с учётом различных вариантов их компенсации на основе методов и алгоритмов оперативного управления. **Шаг 7.** Структурная и параметрическая адаптация плана, СПМО и ИО ИС к возможным (прогнозируемым на имитационных моделях) состояниям СТС, внешней среды. В ходе указанной адаптации, кроме того, вводится необходимый уровень структурной избыточности СТС, обеспечивающий на этапе реализации плана компенсацию не предусмотренных в плане возмущающих воздействий. После проведения требуемого числа вычислительных экспериментов оценивается устойчивость сформированного адаптивного плана УСД СТС. **Шаг 8.** Вывод полученных результатов комплексного адаптивного планирования применения СТС, их интерпретация и коррекция ЛПР.

В результате проведенных исследований были разработаны комбинированные методы и алгоритмы решения задач выбора оптимальных программ УСД СТС в централизованном и децентрализованном режимах её функционирования. В качестве базового комбинированного метода предлагается использовать сочетание метода ветвей и границ и метода последовательных приближений. Теоретическое обоснование данного метода основано на доказанной теореме о свойствах релаксированной задачи выбора оптимальной программы УСД СТС. Особенности реализации предлагаемого комбинированного метода проиллюстрированы на примере аналитико-имитационного моделирования (АИМ) процессов УСД группировкой наземных и орбитальных космических средств (ГКСр), входящих в состав космического комплекса мониторинга состояния окружающей среды (МСОС). При этом для повышения оперативности АИМ было предложено предварительно формировать классы эквивалентных структурных состояний ГКСр. В докладе рассматриваются алгоритмы расчета показателей, характеризующих возможные варианты многоструктурных макросостояний ГКСр, а также алгоритмы их кластеризации и многокритериального упорядочения. Основные особенности и отличия предлагаемых моделей и алгоритма состоят в том, что при динамической интерпретации процессов выполнения комплексов работ, входящих в технологический цикл управления космическими аппаратами МСОС, существенно сокращается размерность решаемых задач планирования и степень связности алгоритма планирования. Данная размерность определяется числом независимых путей в обобщённом сетевом графике работ, выполняемых ГКСр, текущими пространственно-временными, техническими, технологическими ограничениями. В свою очередь, степень связности алгоритмов управления КСр определяется размерностью векторов состояния основной и сопряжённой систем уравнений [2, 3, 7]. Запомнив значение данных векторов, можно возобновить расчёт плана работы ГКСр, как только будут сняты соответствующие ограничения. В докладе приводятся различные варианты взаимодействия аналитических и

имитационных моделей, описывающих процессы УСД ГКСр, варианты параметрической и структурной адаптации указанных моделей.

Таким образом, к настоящему времени разработаны методологические и методические основы теории управления структурной динамикой СТС, которые могут найти широкое применение на практике. Предлагаемое рассмотрение вопросов *управления реконfigurацией* структур СТС в общем контексте *управления её структурной динамикой* позволяет, **во-первых**, непосредственно связать те общие цели, на достижение которых ориентировано функционирование СТС, с теми целями, которые реализуются в ходе управления структурами СТС, **во-вторых**, обоснованно определить и выбрать соответствующие последовательности решаемых задач и выполняемых операций (действий), связанных со структурной динамикой (другими словами, синтезировать технологию управления СТС), и, **в-третьих**, осознанно находить компромиссные решения при распределении ограниченных ресурсов, выделяемых на управление структурной динамикой. Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 05-07-90088), Института системного анализа РАН (проект О-2.5/03), CRDF (RUM-1554-ST-05).

### Литература

1. **Бушенков С. А., Ракитина Е. А.** Моделирование и формализация. Методическое пособие. – М.: Лаборатория базовых знаний, –2002. – 336., ил.
2. **Калинин В. Н.** Теоретические основы управления подвижными объектами и операциями их обслуживания. МО СССР, –1989. 224 с.
3. **Калинин В. Н., Соколов Б.В.** Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами//Теория и системы управления. –1995. – № 1. – С. 149–156.
4. **Павловский Ю.А.** Имитационные модели и системы. – М.: Фазис, 2000. – 132 с.
5. **Пешель М.** Моделирование сигналов и систем. – М.: Мир, 1981. – 300 с.
6. **Скурихин В. И., Забродский В. А., Копейченко Ю.В.** Адаптивные системы управления машиностроительным производством. – М.: Машиностроение, 1989. – 207 с.
7. **Соколов Б. В., Курносков А. Н.** Модель и алгоритм оперативного перераспределения функций управления между техническими комплексами//Приборостроение. – 2000. –№ 8. –С. 66–72.
8. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов//Теория и системы управления. –2004. – № 6. –С. 5–16.