

УДК 519.8

В.В. Бураков, В.А. Зеленцов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов

Оценивание и выбор эффективных технологий автоматизированного управления активными подвижными объектами на основе комплексного моделирования

Рассматриваются методические основы организации и проведения комплексного моделирования технологии автоматизированного управления активными подвижными объектами (АПО) для оценивания ее эффективности. Предложен оригинальный полимодельный комплекс, описывающий процессы автоматизированного проактивного мониторинга и управления и включающий в себя динамические аналитико-имитационные модели управления движением, операциями, каналами, потоками, ресурсами, структурами исследуемой информационной системы.

Ключевые слова: комплексное моделирование, технологии автоматизированного управления, активный подвижный объект.

В рамках данной статьи в качестве первичных объектов управления в исследуемых автоматизированных системах проактивного мониторинга и управления (АСПМУ) выделим подкласс активных подвижных объектов (АПО), которые представляют собой искусственно созданные материальные (либо виртуальные) объекты, перемещающиеся в физическом (либо виртуальном информационном) пространстве и осуществляющие взаимодействие (информационное, вещественное, энергетическое) с объектами обслуживания (ОБО), другими АПО [3–4].

На рис. 1 показана обобщённая структура АПО как объекта управления. Из рис. 1 видно, что АПО состоит из четырёх подсистем, которым поставлены в соответствие четыре процесса (вида функционирования): процесс движения, процессы взаимодействия с ОБО, другими АПО, процессы функционирования целевой и обеспечивающей аппаратуры, процессы расхода и (или) пополнения ресурсов.



Рис. 1. Обобщённая структурная схема АПО

Предлагаемая структура АПО, как показано в работах [1–5, 9–11, 14–18, 20–26], допускает весьма многообразную интерпретацию. Так, например, в качестве АПО может выступать наземное, воздушное, надводное или подводное средство передвижения с установленной на нём аппаратурой, АПО можно интерпретировать и как космическое средство (КСр), как многоагентную программную систему, элементы которой перемещаются по узлам (серверам) глобальных (локальных) информационно-телекоммуникационных систем [2]. В этом случае ОБО могут представлять собой естественные или искусственно созданные материальные объекты или естественную материальную среду, созданную природой [3–4]. Так, в качестве ОБО могут выступать часть наземной или водной поверхности, часть воздушного, подводного, подземного пространства, подвижные объекты. В этом случае природа и формы взаимодействия АПО с ОБО могут носить как активный, так и пассивный характер (т.е. сопровождаться либо не сопровождаться изменением состояния ОБО).

При создании и применении как АПО (группировок АПО), так и соответствующих СПМУ АПО важнейшими задачами были и остаются задачи исследования эффективности технологий автоматизированного управления (ТАУ) АПО, которые можно условно разделить на две большие группы [9–12, 26]:

1) задачи оценивания эффективности ТАУ АПО и соответствующих операций (либо по-другому их называют задачами анализа эффективности);

2) задачи выбора рационального способа (стратегии) применения ТАУ АПО в операциях (либо по-другому – задачи синтеза).

Содержание задач оценивания эффективности ТАУ АПО заключается в анализе результатов функционирования АПО при фиксированных вариантах воздействия внешней среды и фиксированной ТАУ. При этом возможны постановки следующих частных задач оценивания эффективности ТАУ [9, 11]:

– задача выявления вкладов (эффектов) различных факторов в общую эффективность операций, входящих в состав ТАУ;

– задача принятия решения относительно допустимости использования оцениваемого способа действий в той или иной ситуации;

– задача установления путей повышения эффективности операций ТАУ АПО (выявления резервов эффективности);

– задача выявления функциональных возможностей аппаратно-программных средств АСУ АПО, используемых в операциях ТАУ АПО;

– задача сопоставления (сравнения) нескольких альтернативных вариантов действий или технических средств, их ранжирование по уровням эффективности (установление отношения предпочтения на множестве возможных вариантов).

Содержание задач выбора рациональной структуры ТАУ АПО сводится к поиску таких управляющих воздействий для фиксированных классов возмущающих воздействий, при которых результаты функционирования АПО будут совпадать с требуемыми либо будут оптимальными в смысле выбранного критерия эффективности.

В данном случае возможна постановка следующих задач выбора рациональных ТАУ АПО [9]:

– задача выбора целесообразной технологии управления элементами и подсистемами АСУ АПО с заданными функциональными характеристиками;

– задача определения рациональной технологии управления эксплуатацией АСУ АПО;

– задача выработки оптимальной структуры ТАУ АПО;

– задача оптимального распределения ресурсов между подсистемами в АСУ АПО;

– задача выбора рационального варианта структуры проектируемой ТАУ АПО;

– задача формирования программы развития ТАУ АПО.

Таким образом, основным содержанием задач исследования эффективности ТАУ АПО является изучение закономерностей, устанавливающих зависимость результатов применения АПО от условий ее функционирования, которые определяются, в свою очередь, тактико-техническими характеристиками и свойствами АПО, воздействиями внешней среды, управляющими воздействиями (способами применения), формируемыми лицом, принимающим решения (ЛПР). Для решения всех перечисленных задач в настоящее время разрабатывается полимодельный комплекс, создание которого базируется на концепции имитационной системы (ИмС), под которой в общем случае понимается специальным образом организованный моделирующий комплекс, состоящий из следующих элементов: а) имитационных моделей (иерархии имитационных моделей), отражающих определенную проблемную область; б) аналитических моделей (иерархии аналитических моделей), дающих упрощенное (агрегированное) описание различных сторон моделируемых явлений; в) информационной подсистемы, включающей базу (банк) данных, а в перспективе базу знаний, основанную на идеях искусственного интеллекта; г) системы управления и сопряжения, обеспечивающей взаимодействие всех компонент системы и работу с пользователем (лицом, принимающим решения) в режиме интерактивного диалога [6–10]. В предлагаемой статье обосновываются состав и структура ИмС применительно к исследуемому классу задач оценивания и выбора эффективных технологий автоматизированного управления АПО.

Типовые постановки задач исследования эффективности технологий автоматизированного управления активными подвижными объектами. Анализ многочисленных публикаций по теории эффективности систем [6, 9–13, 20, 21] показывает, что обобщенная постановка задач иссле-

дования эффективности ТАУ АПО, задаваемая на теоретико-множественном уровне описания, близка по своей структуре и содержанию к общей постановке задач выбора (принятия решений) в условиях неопределенности и многокритериальности, о которых речь шла в [9, 12–13].

Проиллюстрируем это, взяв за основу подход, предложенный в работе [9]. В указанной работе при описании общей постановки задач исследования эффективности военно-технических систем (ВТС) была введена модель проблемной ситуации, которая имеет следующий вид (с учетом обозначений принятых в [9]):

$$\langle \Delta_{св}, \Omega, \tilde{\Phi}_{об}, G, X, \Psi, W, K, P, \Theta \rangle, \quad (1)$$

где $\Delta_{св}$ – множество стратегий (допустимых альтернатив, способов применения, управляющих воздействий и т.п.) выбираемых ЛПР; Ω – множество неопределенных факторов; G – множество исходов операции; X – множество характеристик (признаков) исхода операции (по-другому – числовое выражение результата операции); $\tilde{\Phi}_{об}$ – обобщенная модель (отображение), ставящая в соответствие множествам $\Delta_{св}$ и Ω множество результатов $X(G)$; W – показатель эффективности; Ψ – оператор соответствия «результат-показатель»; K – критерий эффективности; P – модель предпочтений ЛПР на элементах множества $\{\Delta_{св}, \Omega, G, X, \Psi, W, K\}$; θ – информация ЛПР об элементах проблемной ситуации. Центральную роль в модели (1) играют два ее основных элемента P, θ , так как они, по сути, представляют собой знания ЛПР о предметной области, в рамках которой осуществляется исследование эффективности систем. Используя указанную информацию, ЛПР последовательно формирует множества $\Delta_{св}, \Omega, X, W, K$ и соответствующие отображения $\tilde{\Phi}_{об}, \Delta_{св}$.

Сформулированные выше два основных класса задач исследования эффективности ТАУ АПО, с учетом приведенной модели проблемной ситуации (1), могут быть представлены в следующем виде [9]:

- задачи анализа эффективности ТАУ АПО

$$\Psi : \{X | \tilde{\Phi} : \Delta_{св} \times \Omega \xrightarrow{\theta} X(G)\} \xrightarrow{\theta} W ; \quad (2)$$

- задача выбора рациональной (оптимальной) ТАУ АПО

$$P \xrightarrow{\theta} K : \Delta_{св} \xrightarrow{W} \Delta_{св}^* . \quad (3)$$

В выражении (2) задается не одно, а множество отображений, так как при исследовании эффективности, как правило, необходимо использовать не один, а несколько классов моделей (принцип полимодельности в системных исследованиях). Реализация принципа внешнего дополнения в моделях (2)–(3) находит свое отражение в задании множества исходной информации θ об элементах предметной области.

Результаты сравнения соотношений (1)–(3) с выражениями, приведенными в [10, 12, 13], показывают, что задачи исследования эффективности ТАУ АПО являются важнейшим подклассом задач подготовки и принятия решений в сложных организационно-технических системах (СОТС) (в том числе и в ВТС) для тех ситуаций, когда максимальный уровень детализации описания процессов функционирования вышеперечисленных систем ограничивается уровнем описания комплексов операций, выполняемых данными системами. При этом основным объектом исследования в указанном подклассе задач являются закономерности, определяющие взаимное влияние субъективных и объективных условий выполнения операций на результаты применения рассматриваемых систем непосредственно по целевому назначению.

Таким образом, центральными проблемами при постановке и решении различных задач исследования эффективности, также как и в целом для задач выбора, являются проблемы полимодельности (многомодельности) и многокритериальности при описании каждой конкретной предметной области. При этом среди возможных постановок задач полимодельного многокритериального исследования эффективности систем можно выделить, по меньшей мере, четыре варианта, которые являются в настоящее время наиболее перспективными [6, 9–15, 20–26].

Вариант I. Постановка и решение задачи однокритериальной оптимизации показателя эффективности (ПЭ) на аналитической модели большой размерности как задачи выбора, осуществляемого путем формальной декомпозиции и проведения оптимизации на частных моделях по частным ПЭ с использованием того или иного правила согласования, обеспечивающего сходимость процесса оптимизации к решению исходной задачи. В работах [6, 9, 12] описаны методы и алгоритмы решения указанного класса задач.

Вариант II. Постановка задачи однокритериальной оптимизации ПЭ на имитационной модели большой размерности как задачи выбора, осуществляемого путем неформальной декомпозиции задачи, построения совокупности аналитических моделей, отражающих различные стороны функционирования системы и имеющих приемлемую размерность, согласования аналитических моделей по принципу Парето и проведения имитационных экспериментов с паретовскими альтернативами с целью поиска точки, доставляющей экстремум исходному показателю эффективности системы.

Таким образом, в основу данной постановки задачи положена гипотеза о том, что экстремум по исходному (глобальному внешнему) показателю эффективности достигается в одной из точек множества Парето, определяемых при оптимизации по частным ПЭ, выявленных в результате неформальной декомпозиции. В частности, данная гипотеза выполняется во всех случаях, когда имеет место такая монотонная зависимость, при которой значения внешнего ПЭ не убывают, если не убывают значения частных ПЭ. Свойство монотонности в случае задания всех функций в аналитическом виде может быть установлено в результате соответствующего аналитического исследования. Однако во многих случаях практики внешний ПЭ не может быть представлен через частные ПЭ в аналитическом виде, и его значения могут быть определены лишь посредством имитационных экспериментов. В этих случаях монотонность может быть установлена на основе определенных «физических свойств» моделируемой системы [6–8, 10, 13, 15, 24].

Вариант III. Постановка задачи многокритериальной оптимизации на комплексе моделей как задачи выбора с многими отношениями предпочтения, осуществляемого путем задания множества Парето с помощью основополагающей многокритериальной модели, сужения этого множества на основе машинного анализа его свойств и введения соответствующей информации в ходе интерактивной процедуры, выполняемой ЛПР, лицом, обосновывающим решения (ЛОР) с ЭВМ, а также на основе привлечения дополнительных математических моделей, обеспечивающих последующее уточнение и сужение множества Парето вплоть до принятия единственного решения.

Паретовский принцип согласования при условии дополнения его положениями о сужении множества Парето создает наиболее благоприятные возможности для принятия всесторонне обоснованных решений, основывающихся на анализе поведения различных показателей эффективности внутри этого множества. При этом важное значение имеет правильная разработка стратегии сужения с привлечением компетентных специалистов и математических моделей: аналитических и имитационных [10, 13].

В работе [10] предложен еще один вариант решения рассматриваемого класса задач теории эффективности (*вариант IV*), который базируется на динамической интерпретации процессов многокритериального структурно-функционального анализа и синтеза ТАУ АПО. Каждый из перечисленных вариантов методик исследования эффективности ТАУ АПО имеет свои преимущества и недостатки, а их выбор определяется спецификой конкретной предметной области, где функционирует АПО, ее ограничениями, а также поставленными целями исследований. Важная роль при этом отводится обоснованному выбору соответствующих аппаратно-программных средств, обеспечивающих комплексное моделирование АСПМУ АПО. Рассмотрим состав и структуру ИмС, в рамках которой целесообразно решать задачи анализа и выбора ТАУ АПО для различных условий обстановки.

Состав и структура имитационной системы для решения задач анализа и синтеза эффективных технологий автоматизированного управления АПО. Многочисленные исследования, направленные на поиск разумного компромисса между требованиями универсализации и специализации ИмС, показали, что в настоящее время разработка универсальных формализованных процедур автоматизации моделирования и соответствующих ИмС, ориентированных на широкую предметную область, является трудно разрешимой проблемой. Целесообразно создавать ИмС, специализированные по допустимому классу моделируемых объектов и универсальные по поддерживаемым функциям, связанным с проведением комплексных исследований указанных объектов. При этом ИмС может изначально и не содержать в себе модель конкретного объекта, характеристики которого интересуют ЛПР. Данная система предоставляет ЛПР только математический аппарат (формализованную схему), позволяющий ему легко генерировать желаемую структуру модели объекта, отвечающую целям исследования, наполнять эту структуру количественными соотношениями, описывающими связи между ее элементами, решать разнообразные задачи анализа и выбора. Создание ИмС так же, как и имитационных моделей (моделей имитационного уровня), представляет сложный многоэтапный итерационный процесс, основная особенность которого (по сравнению с

«чисто» имитационным моделированием) состоит в необходимости на каждом из этапов исследования проводить согласование (на концептуальном, алгоритмическом, информационном и программном уровнях) разнородных моделей, описывающих различные стороны функционирования объекта.

В современных ИМС выбор допустимых альтернатив основывается на сужении (сжати) множества рассматриваемых вариантов экзогенных переменных путем отбраковки доминируемых по заданным отношениям предпочтения альтернатив. Указанные процедуры по своему содержанию близки к идеям, реализованным в многочисленных модификациях метода «ветвей и границ». При отбрасывании доминируемых экзогенных переменных в зависимости от этапа решения задачи выбора, обеспеченности исходными данными ЛПП пользуется каждый раз такими моделями и методами получения релаксированных решений исходной задачи, чтобы оценки затрат на реализацию полученных решений (затрат на расход используемого ресурса) не убывали и становились все более и более точными по мере сужения множества допустимых альтернатив.

Исследование процессов управления структурной динамикой разнородных классов АПО, в том числе и исследование задач анализа и синтеза эффективных ТАУ, показало, что данные процессы имеют многоуровневый, многоэтапный и полифункциональный характер.

Данное представление процессов функционирования АСПМУ АПО повлияло на выбор структуры банка моделей разрабатываемого специального программно-математического обеспечения ИМС, в котором необходимо, прежде всего, выделить три основных блока:

- модели функционирования АСПМУ АПО и объектов обслуживания (ОБО) (блок I);
- модели оценки и анализа состояния АПО, АСПМУ АПО, оценки обстановки (блок II);
- модели принятия решений в АСПМУ АПО (блок III).

Блок моделей функционирования АСПМУ АПО, ОБО включает в себя:

- модели функционирования АПО, системы АПО, группировки систем АПО (блоки 1, 2, 3);
- модели функционирования отдельного командно-измерительного комплекса (ОКИК) (блок 4), подсистем наземного комплекса управления (НКУ) (ОКИК, пункты управления (ПУ), блок 5), НКУ (блок 6);
- модели взаимодействия основных элементов и подсистем АСПМУ АПО между собой и ОБО (блок 7);
- модели функционирования ОБО (блок 8);
- модели воздействия внешней среды на АСПМУ АПО (блок 9);
- модели имитации результатов целевого применения АСПМУ АПО (блок 10).

Напомним, что в общем случае функционирование АПО предполагает информационный, вещественный, энергетический обмен с ОБО, с другими АПО, внешней средой, функционирование аппаратуры, расход (пополнение) ресурсов АПО, перемещение АПО.

Блок моделей оценки и анализа состояния АПО, АСПМУ АПО, оценки обстановки включает в себя:

- модели и алгоритмы оценки и анализа состояния движения, аппаратуры, ресурсов и обмена АПО (блок 11);
- модели и алгоритмы оценки и анализа состояния ОБО (блок 12);
- модели и алгоритмы оценки и анализа ситуаций и обстановки (блок 13).

В блок 3 входят:

- модели и алгоритмы долгосрочного и оперативного планирования ОВ в АСПМУ АПО (блок 14);
- модели и алгоритмы управления структурами АСПМУ АПО (блок 15): топологической (блок 16), технической (блок 17), технологической (блок 18), организационной (блок 19); структурой СПМО (блок 20), информационной структурой (блок 21);
- модели и алгоритмы коррекции долгосрочных и оперативных планов проведения ОВ в АСПМУ АПО (блок 22);
- модели и алгоритмы решения задач координации в АСПМУ АПО на этапах планирования (блок 24), коррекции (блок 25), оперативного управления (блок 26);
- модели и алгоритмы оперативного управления элементами и подсистемами АСПМУ АПО (блок 23).

На рис. 2 приняты следующие условные обозначения: $МП_1, \dots, МП_n$, $МК_1, \dots, МК_n$, $МОУ_1, \dots, МОУ_n$ – соответственно модели планирования, коррекции и оперативного управления АПО, входящими в АСПМУ АПО (1, ..., n)-го типов. Кроме того, на структурной схеме изображена система управления, сопряжения и интерпретации, в которую входят: общая диалоговая система управления

СПМО (блок 27), локальные системы управления и сопряжения (блок 28), блок обработки, анализа и интерпретации результатов планирования, управления, моделирования (блок 30), блок формализации сценариев моделирования (блок 31), блок параметрической и структурной адаптации СПМО (блок 32), блок выработки рекомендаций по организации процедур моделирования и принятия решений (блок 29).

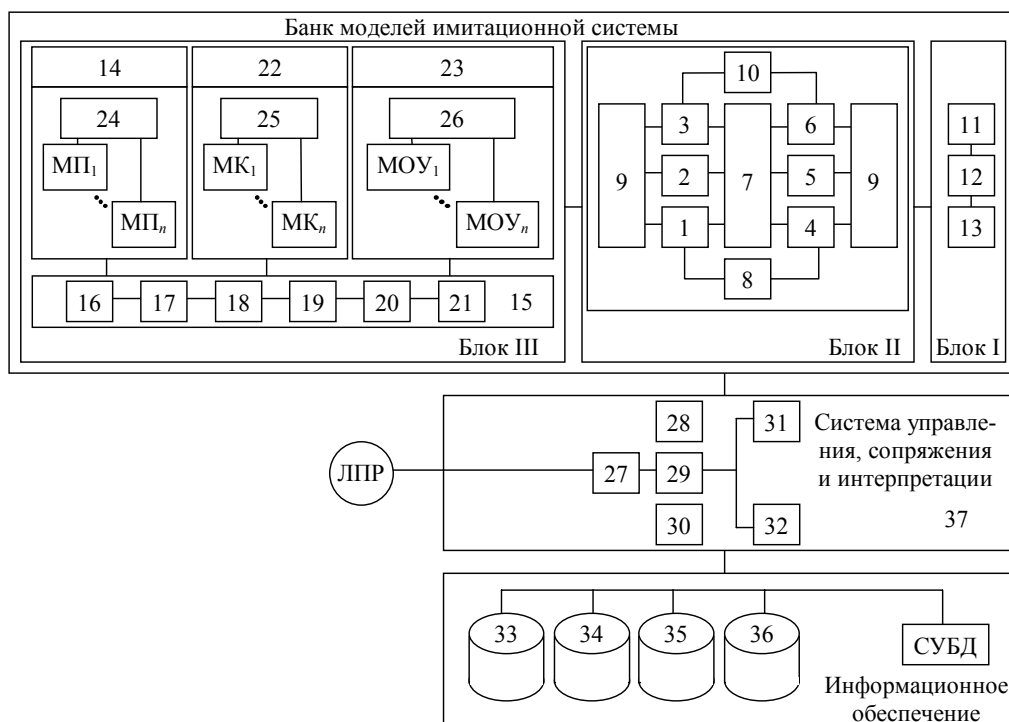


Рис. 2. Обобщенная структура имитационной системы для решения задач анализа и синтеза ТАУ АПО

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

Приведем в качестве примера обобщенную модель и алгоритм решения задачи выбора эффективных вариантов функционирования системы управления орбитальной группировкой (ОГ) навигационных космических аппаратов (НКА), являющихся одной из разновидностей АПО. Данный пример соответствует второму варианту полимодельного многокритериального исследования эффективности систем управления АПО.

Будем предполагать, что обобщенным показателем эффективности СУ НКА является показатель, характеризующий точность навигационных определений, выполняемых заданным классом потребителей (например, наземными потребителями навигационной информации) [11, 19]. Если обозначить через N_1 число наземных точек, в которых проверяется точность навигационных определений, через N_2 – общее число полных проверок (сеансов обсервации), N_3 – общее число точек (во всех сеансах обсервации), в которых точность оказалась выше заданного порога $\sigma_{пр}$, то вероятность обеспечения наземных потребителей навигационной информацией требуемой точности может быть вычислена по следующей формуле [11, 19]:

$$P_H = \frac{N_3}{N_1 N_2}. \quad (4)$$

Данный показатель, по сути, представляет собой внешний (несобственный) показатель эффективности применения СУ НКА. Конкретные его значения определяются как составом и структурой рассматриваемой СУ, так и теми состояниями, в которых могут находиться (либо находятся) её основные элементы и подсистемы. На результаты функционирования СУ НКА также существенное влияние оказывают возмущающие воздействия со стороны внешней среды, связанные с влиянием на НКА нецентральности поля тяготения Земли, влиянием атмосферы, ошибками навигационных измерений, вызванных субъективными и объективными причинами. Велико влияние на значения

показателя (4) таких факторов, как технология управления НКА. Так, например [19], точность навигационных определений наземными потребителями во многом зависит от точности эфемеридной информации и частотно-временных поправок, которые периодически должны закладываться на борт каждого НКА в ходе выполнения соответствующих операций взаимодействия (ОВ) с наземными техническими средствами. Периодичность и порядок выполнения данных ОВ, в свою очередь, определяются программой работы основных элементов и подсистем наземного комплекса управления (программой работы радиотехнических средств, средств обработки и передачи информации и т.п.).

В этом случае формулы, описывающие модель функционирования СУ НКА, запишутся в следующем виде:

$$P_H = P_H(\bar{x}(t), \bar{u}_{pl}(t), \bar{v}(\bar{x}(t), \bar{\xi}), \bar{\xi}) \rightarrow \max_{\bar{u} \in \Delta}, \quad (5)$$

$$\Delta = Q(\bar{x}(t)) \times V(\bar{x}(t), \bar{\xi}, t), \quad \bar{u} = \bar{u}_{pk}(t) \times \bar{v}(\bar{x}(t), \bar{\xi}), \quad (6)$$

где $\bar{x}(t)$, $\bar{u}_{pk}(t)$ – соответственно вектор состояния и вектор управляющих воздействий или, по-другому, программа управления структурной динамикой СУ НКА; \bar{v} – вектор управляющих воздействий, с помощью которых парируются возмущающие воздействия на программу управлений; $Q(\bar{x}(t))$, $V(\bar{x}(t), \bar{\xi}, t)$ – множества допустимых значений векторов $\bar{u}_{pk}(t)$ и $\bar{v}(\bar{x}(t), \bar{\xi})$; $\bar{\xi}(t)$ – вектор возмущающих воздействий на область определения $\Xi(\bar{x}(t), t)$.

Анализ показывает, что для СУ НКА взаимосвязь всех перечисленных величин с обобщенным показателем эффективности вида (5) можно конструктивно задать только на уровне машинных экспериментов, проводимых с соответствующей имитационной моделью функционирования СУ НКА. Однако в этом случае поиск конкретных программ $\bar{u}_{pk}(t)$ становится весьма затруднительным, так как методы поиска экстремума показателя эффективности, основанные на проведении направленных имитационных экспериментов, из-за большой размерности векторов $\bar{x}(t)$, $\bar{u}(t)$, $\bar{v}(\bar{x}(t), \bar{\xi})$ оказываются неприемлемыми. Поэтому для решения рассматриваемой задачи может быть предложена следующая неформальная декомпозиция, основанная на структурных особенностях ранее построенных моделей (см. [3, 4, 10]). В этом случае обобщенную модель функционирования АСПМУ АПО вида M (см. рис. 2, блок III) можно декомпозировать на следующие семь групп моделей: $MM_{<a>} = \langle M_{<v>}, M_{<o>} \rangle$, $MM_{} = \langle M_{<k>}, M_{<o>} \rangle$, $MM_{<c>} = \langle M_{<c>}, M_{<o>} \rangle$, $MM_{<d>} = \langle M_{<n>}, M_{<o>} \rangle$, $MM_{<e>} = \langle M_{<e>}, M_{<o>} \rangle$, $MM_{<p>} = \langle M_{<p>}, M_{<o>} \rangle$, $MM_{<g>} = \langle M_{<g>}, M_{<o>} \rangle$, описывающих соответственно взаимодействие моделей управления целевыми и обеспечивающими операциями $M_{<o>}$ с моделями управления вспомогательными операциями $M_{<v>}$, каналами $M_{<k>}$, структурами $M_{<c>}$, потоками $M_{<n>}$, параметрами операций $M_{<e>}$, ресурсами $M_{<p>}$ и движением $M_{<g>}$ основных элементов и подсистем, входящих в рассматриваемую систему управления.

Используя известные методы и алгоритмы построения и аппроксимации областей достижимости, о которых речь шла в [14, 18], можно для каждой из перечисленных групп моделей построить соответствующие верхние аппроксимации множеств достижимости [14]: $D_{(a)}(T_f, T_0, \bar{x}^{(v)}(T_0), \bar{x}^{(o)}(T_0))$, ..., $D_{(g)}(T_f, T_0, \bar{x}^{(g)}(T_0), \bar{x}^{(o)}(T_0))$, где (T_f, T_0) интервал времени, на котором исследуется процесс функционирования СУ НКА.

Предварительные исследования показали, что оптимальное решение исходной глобальной задачи (5) достигается в некоторой точке множества Парето, определяемой в результате решения частных оптимизационных задач, сформулированных для каждой из перечисленных групп моделей. Для этого необходимо в указанных задачах так задать частные показатели эффективности, чтобы выполнялось свойство монотонности, при котором значения обобщенного показателя эффективности (5) не возрастают, если не возрастают значения частных показателей эффективности.

В этом случае исходная задача управления структурной динамикой СУ НАПО вида (5), (6) заменяется решением следующей совокупности задач:

$$P_H = P_H(\bar{x}(t, \bar{\lambda}'), \bar{u}_{pl}(t, \bar{\lambda}'), \bar{v}(\bar{x}(t, \bar{\lambda}'), \bar{\xi}), \bar{\xi}) \rightarrow \max_{\bar{\lambda}' \in \Delta'}, \quad (7)$$

$$\Delta' = \{ \bar{\lambda}' \mid \bar{u}_{pl}(t, \bar{\lambda}') \times \bar{v}(\bar{x}(t, \bar{\lambda}'), \bar{\xi}) \in Q(\bar{x}(\bar{\lambda}')) \times V(\bar{x}(\bar{\lambda}'), \bar{\xi}) \}, \quad (8)$$

$$\sum_{\gamma' \in \Gamma'} \lambda'_{\gamma'} J_{\gamma'}(\bar{x}_{\gamma'}) \rightarrow \operatorname{extr}_{\bar{x}_{\gamma'} \in D_{\gamma'}(T_f, T_0, \bar{x}_{\gamma'}(T_0))}, \quad (9)$$

$$\sum_{\gamma' \in \Gamma'} \lambda'_{\gamma'} = 1, \lambda'_{\gamma'} \geq 0, \bar{x}_{\gamma'} = \|\bar{x}^{(\gamma')\top} \bar{x}^{(o)\top}\|^{\top}, \gamma' \in \Gamma' = \{a, b, c, d, e, f, g\}. \quad (10)$$

В этом случае при фиксированном значении вектора $\bar{\lambda}'_{(l)}$ ($l = 0, 1, 2, \dots$ – номер текущей итерации) решаются задачи поиска векторов $\bar{x}_{\gamma'}(T_f)$, при которых функции вида (9) получают экстремальные значения. Данные задачи относятся к классу задач математического программирования, характерная особенность которых состоит в том, что поиск компонент вектора $\bar{x}_{\gamma'}^{(l)}$ на частных моделях можно осуществлять не на всём множестве альтернатив, задаваемых с помощью соответствующих аппроксимаций множеств достижимости $D_{\gamma'}(T_f, T_0, \bar{x}_{\gamma'}(T_0))$, а только на подмножествах недоминируемых альтернатив частных моделей, получаемых в результате ортогонального проектирования целевых множеств на множества $D_{\gamma'}(T_f, T_0, \bar{x}_{\gamma'}(T_0))$. При этом в каждую из частных моделей наряду с собственным вектором $\bar{x}^{(g)}$, $\bar{x}^{(k)}$, ..., $\bar{x}^{(c)}$ входит вектор $\bar{x}^{(o)}$, описывающий состояние выполнения комплексов операций в модели $M_{<o>}$. Перечисленные структурные особенности задач (9), (10) позволяют при её решении провести её декомпозицию и тем самым преодолеть проблему размерности.

После получения $\bar{x}_{\gamma'}^{(l)}(T_f)$, используя численные методы решения задач оптимального управления (например, метод Крылова–Черноуьско), можно осуществить в рамках каждой частной модели $MM_{<a>}, \dots, MM_{<g>}$ поиска оптимальных программ управления структурной динамикой СУ НКА – $\bar{u}_{pl}^{(l)}(t, \bar{\lambda}'_{(l)})$. Данные управляющие воздействия используются для поиска очередного приближения вектора $\bar{\lambda}'_{(l+1)}$ в рамках имитационной модели $M_{<u>}$, описывающей процесс функционирования СУ НКА в условиях возмущающих воздействий. Задача поиска $\bar{\lambda}^*$ на модели (7), (8) по своему содержанию близка к задаче оптимального планирования машинных экспериментов. В ней эндогенными переменными являются компоненты вектора $\bar{\lambda}'$, экзогенной переменной служит показатель эффективности (7). При планировании экстремальных машинных экспериментов с $M_{<u>}$ можно использовать метод крутого восхождения, методы случайного поиска, метод « ψ -преобразований», комбинированные методы [9, 10]. В частности, для метода крутого восхождения (метода Бокса-Уилсона) процедура поиска $\bar{\lambda}^*$ описывается следующей формулой:

$$\bar{\lambda}'_{(l)} = \bar{\lambda}'_{(l-1)} + \tilde{k} \frac{\partial P_H(\bar{\lambda}'_{(l)})}{\partial \bar{\lambda}'_{(l)}} \Delta \bar{\lambda}'_{(l)}, \quad (11)$$

где $l = 1, 2, \dots$ – номер итерации; \tilde{k} – коэффициент, определяющий скорость сходимости итерационного алгоритма.

Частные производные в формуле (11) определяются численно при пошаговом исследовании поверхности отклика с помощью ряда небольших (по объёму) полных и неполных факторных экспериментов, направленных на решение двух важных вопросов, состоящих в выборе направления движения в факторном пространстве (пространстве компонент вектора $\bar{\lambda}$) и в определении вида поверхности отклика в точке, близкой к экстремуму.

Использование в указанной процедуре результатов, полученных на аналитических моделях ($\bar{u}_{pl}^{(l)}(t, \bar{\lambda}'_{(l)})$), позволяет значительно сузить область варьирования эндогенных переменных $\bar{\lambda}'_{(l)}$. Данные переменные определяют значимость («вес», приоритет) частных показателей эффективности относительно обобщённого показателя эффективности функционирования СУ НКА. Эти же переменные можно интерпретировать и как параметры, с помощью которых проводится адаптация аналитико-имитационных моделей функционирования СУ НКА к возможным сценариям изменения обстановки на $<k>$ -м цикле управления.

В заключение отметим, что компонентами вектора $\bar{\lambda}'$ могут быть также параметры, определяющие выбор вариантов реализации управляющих воздействий $\bar{v}(\bar{x}(t, \bar{\lambda}'), \bar{\xi})$, компенсирующих

отклонение плановой траектории структурной динамики НКА $\bar{x}_{pl}(t)$ от прогнозируемой на имитационной модели траектории $\bar{x}_u(t)$.

Заключение. В статье предложены методические основы комплексного моделирования автоматизированных систем проактивного мониторинга и управления сложными объектами, в качестве которых рассматриваются АПО, получившие широкое применение на практике в таких прикладных областях, как космонавтика, логистика, транспорт, промышленное производство [3–5, 10, 15–18]. Обоснованы состав и структура ИмС, в рамках которой к настоящему времени решен широкий спектр важных прикладных задач анализа и синтеза эффективных ТАУ АПО [10, 15].

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074–U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг СГ» (проект 1.4.1–1), грантов РФ №14–21–00135, 14–11–00748, РФФИ №12–07–00302, 13–07–00279, 13–08–00702, 13–08–01250, 13–07–12120, 13–06–0087, Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект № 2.11), проекта ESTLATRUS 2.1/ELRI-184/2011/14, проекта ESTLATRUS/1.2/ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

Литература

1. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению / С.Н. Васильев // Теория и системы управления. – 2001. – № 1. – С. 5–22; № 2. – С. 5–21.
2. Городецкий В.И. Информационные технологии и многоагентные системы / В.И. Городецкий // Проблемы информатизации. – 1998. – №1. – С. 3–14.
3. Калинин В.Н. Теоретические основы управления активными подвижными объектами / В.Н. Калинин. – М.: Министерство обороны СССР, 1974. – 130 с.
4. Калинин В.Н. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами / В.Н. Калинин, Б.В. Соколов // Теория и системы управления. – 1995. – №1. – С. 56–61.
5. Князькин Ю.М. Методология автоматизированного проектирования бортовых комплексов управления космических аппаратов связи, ретрансляции. – М.: Министерство обороны СССР, 1992. – 118 с.
6. Краснощеков П.С. Декомпозиция в задачах проектирования / П.С. Краснощеков, В.В. Морозов, В.В. Федоров // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1979. – №2. – С. 7–18.
7. Методологические вопросы построения имитационных систем: Обзор / С.В. Емельянов, В.В. Калашников, В.И. Лутков и др.; под ред. Д.М. Гвишиани, С.В. Емельянова. – М.: МЦНТИ, 1973. – 87 с.
8. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1974.
9. Надежность и эффективность в технике: Справочник: в 10 т. – Т. 3. Эффективность технических систем / ред. совет: Б.С. Авдеевский (пред.) и др.; под общ. ред. А.Ф. Уткина, Ю.Б. Крючкова. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
10. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
11. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов (методология, методы, модели). – Ч. 1. – М.: МО СССР, 1990. – 660 с.
12. Резников Б.А. Анализ и оптимизация сложных систем. Планирование и управление в АСУ: учеб. пособие. – Л.: ВИКИ, 1981. – 148 с.
13. Цвиркун А.Д. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития) / А.Д. Цвиркун, В.К. Акиндиев. – М.: Наука, 1993. – 160 с.
14. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / Ф.Л. Черноусько. – М.: Наука, 1988. – 320 с.
15. Ivanov D. Adaptive Supply Chain Management / D. Ivanov, B. Sokolov. – London: Springer, 2010. – 269 p.
16. Ivanov D. A multi-structural framework for adaptive supply chain planning and operations with structure dynamics considerations / D. Ivanov, B. Sokolov, J. Kaeschel // European Journal of Operational Research. – 2010. – 200(2). – P. 409–420.
17. Ivanov D. Dynamic supply chain scheduling / D. Ivanov, B. Sokolov // Journal of Scheduling. – 2012. – 15(2). – London: Springer. – P. 201–216.
18. Petrosjan L.A. Game Theory / L.A. Petrosjan and N.A. Zenkevich. – Singapore; London: World Scientific Publ., 1996. – 360 p.

19. Milliken R.J. Principle of operation of NAVSTAR and system characteristics / R.J. Milliken, C.J. Zoller // Navigation (USA). – 1978. – Vol. 25, № 2. – P. 95–106.
20. Мещеряков Р.В. Критерий структурной сложности информационных систем // Труды СПИИРАН. – 2010. – № 3 (14). – С. 76–90.
21. Ануфриева Н.Ю. Оценивание результативности работы центра информационного обслуживания / Н.Ю. Ануфриева, Р.В. Мещеряков, Г.А. Шевцова // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 11. – С. 63–66.
22. Мещеряков Р.В. Система цифровой обработки радиометрических сигналов для неразрушающего контроля сложнопрофильных крупногабаритных изделий / Р.В. Мещеряков, А.А. Охотников // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – Т. 2. – С. 153–156.
23. Мещеряков Р.В. Подходы к внедрению ERP-систем на крупных предприятиях / Р.В. Мещеряков, М.В. Савчук // Бизнес-информатика. – 2011. – № 2. – С. 61–64.
24. Соколов Б.В. Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Труды СПИИРАН. – 2010. – № 4 (15). – С. 7–52.
25. Соколов Б.В. Анализ состояния исследований проблем управления жизненным циклом искусственно созданных объектов / Б.В. Соколов, А.И. Птушкин, А.В. Иконникова и др. // Труды СПИИРАН. – 2011. – № 1 (16). – С. 37.
26. Юсупов Р.М. От умных приборов к интеллектуальному пространству / Р.М. Юсупов, А.Л. Ронжин // Вестник Российской академии наук. – 2010. – Т. 80, № 1. – С. 45–51.

Бураков Вадим Витальевич

Вед. науч. сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании (ЛИТСАМ) СПИИРАН, Санкт-Петербург
Тел.: 8(812) 328-01-031
Эл. почта: Burakov@euresa.ru

Зеленцов Вячеслав Алексеевич

Гл. науч. сотрудник ЛИТСАМ СПИИРАН
Тел.: 8(812) 328-01-03
Эл. почта: v.a.zelentsov@gmail.com

Потрясаев Семен Алексеевич

Ст. науч. сотрудник (ЛИТСАМ) СПИИРАН
Тел.: 8(812) 328-01-0381
Эл. почта: spotryasaev@gmail.com

Соколов Борис Владимирович

Зам. директора СПИИРАН по научной работе
Тел.: 8(812) 328-01-03
Эл. почта: sokol@iias.spb.su

Burakov V.V., Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Sokolov B.V.

Evaluation and choice of automatic control technology for active moving objects on the basis of integrated modeling

The study suggests the methodical bases for the problem of automatic control technology for integrated modeling of active moving objects (AMO). The original multiple-model complex for modeling and simulation of AMO proactive automatic control system (ACS) was proposed. The complex includes analytical-simulation models of control processes for operation, flows, resources and structures.

Keywords: integrated modeling, proactive automatic monitoring and control technology, active moving objects.