

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ В ЛОКАЛЬНОЙ АКВАТОРИИ

Б. В. Соколов, Д. И. Назаров, В. А. Палицын (Санкт-Петербург)

## Введение

В настоящее время значительно увеличилась интенсивность разработки и внедрения различных автоматизированных систем мониторинга (АСМ) безопасности надводной обстановки [13–14]. Это обусловлено общим ростом количества судов, в том числе маломерных, интенсивности их движения и, как следствие, усложнением задачи контроля над соблюдением правил судоходства и повышением вероятности чрезвычайных происшествий и бедствий. Внедрение средств автоматизации наблюдения за надводной обстановкой на данный момент носит локальный характер, имеет место разнородность и информационная несогласованность систем, применяемых в различных акваториях. Данные факторы способны значительно затруднить процесс анализа информации, поступающей из разнородных и информационно несогласованных АСМ в единую базу объектов мониторинга. Таким образом, имеет место противоречие между современными требованиями к уровню автоматизации и интеллектуализации процессов оперативного контроля и анализа надводной обстановки, складывающейся в локальной акватории и фрагментарностью и разобщенностью модельно-алгоритмического и методического обеспечения решения соответствующих задач позиционирования и мониторинга состояния судов в указанной акватории.

Задача анализа надводной обстановки в локальной акватории может быть определена как задача классификации объектов мониторинга и текущей обстановки, а также прогнозирования ситуации и определения её потенциальной опасности. Объектами мониторинга в локальной акватории могут считаться различные классы судов, в том числе, маломерных, метеорологическая и экологическая обстановка, порты, диспетчерские станции МЧС, а также станции и комплексные распределённые системы наблюдения за надводной обстановкой в локальной акватории, к которым можно отнести - береговые стационарные и мобильные пункты визуального наблюдения, радиотехнические средства, комплексы средств позиционирования GPS/ГЛОНАСС.

Задача анализа надводной обстановки в локальной акватории может быть декомпозирована следующим образом. На первом этапе осуществляется позиционирование и классификация объектов мониторинга. На выходе первого этапа получаем массив описателей объектов мониторинга. На втором этапе на основе массива описателей объекта мониторинга и данных, полученных от систем наблюдения за метеорологической и экологической обстановкой, формируется таблица-дескриптор ситуации в отдельном квадрате локальной акватории. На третьем этапе осуществляется классификация ситуации и присвоение ей того или иного кода безопасности («ситуация безопасна», «ситуация потенциально опасна», «предкатастрофная ситуация», «катастрофа», и т.п.). На четвертом этапе осуществляется прогнозирование ситуации, т.е. строится таблица-дескриптор, описывающая наиболее вероятную ситуацию на ближайший отрезок времени. На пятом этапе осуществляется классификация спрогнозированной ситуации.

Позиционирование и классификация объектов мониторинга осуществляется на основе данных, поступающих от стационарных, мобильных и распределённых средств наблюдения, имеющих различную природу и функционирующих на различных принципах. Одновременное применение разнородных средств наблюдения необходимо для обеспечения полноты и достоверности поступающей информации, а также для обеспечения отказоустойчивости системы в целом. Также на данном этапе рассматриваются метеорологические данные, так как потенциально они могут оказать влияние на досто-

верность поступающей от средств наблюдения информации. В силу этого подсистему позиционирования и классификации можно определить как мультиагентную подсистему, в которой осуществляется объединение (интеграция) измеренных разнородных данных, поступающих из множества источников и обрабатываемых на основе методов и алгоритмов, разрабатываемых в современной теории коллективных классификаторов. В докладе приводится формальное описание и анализ возможных подходов к структурно-функциональному синтезу облика АСМ состояния движения в локальной акватории, в рамках которой должны быть решены все перечисленные задачи [7–8, 11, 12].

### **Содержательная и формальная постановка задачи моделирования**

Создание и развитие современных АСМ [10], представляет из себя многоэтапный процесс, характеризующийся значительными капиталовложениями, длительным сроком реализации и существенной неопределённостью, связанной с возможными изменениями как целей проектирования и применения, так и воздействий различного рода возмущений внешней среды на АСМ на разных этапах жизненного цикла.

Центральной задачей при разработке и модернизации крупномасштабных АСМ является выбор её структуры, под которой понимается состав элементов, соответствующая система взаимосвязей между элементами и распределение функций, выполняемых АСМ. Применительно к АСМ принято выделять следующие базовые структуры [1,2]: структуру целей, функций и задач АСМ, технологическую структуру, техническую, организационную, топологическую структуры, структуры информационного, математического и программного обеспечения (ИО, МО, ПО) АСМ.

Перечисленные шесть видов структур являются инвариантными для любого класса АСМ и должны рассматриваться в первую очередь при системном исследовании и комплексном моделировании соответствующей АСМ.

Важность задачи синтеза вышеперечисленных структур применительно к АСМ состоит в том, что от того какой окончательный вариант структуры АСМ выбран, во многом зависит эффективность применения указанной АСМ по целевому назначению. Дополнительную особенность рассматриваемая задача синтеза приобретает случае, когда учитывается такой важный аспект как динамика развития структур проектируемой АСМ, которая, в свою очередь, обусловлена большой продолжительностью общего периода создания АСМ, необходимостью учёта изменения и уточнения технических требований к параметрам и характеристикам АСМ по этапам развития; расширением круга решаемых задач; необходимостью учёта пространственно-временных, технических, технологических ограничений, связанных с проектированием, производством, испытанием, поставкой, внедрением и развитием основных элементов и подсистем АСМ [3–6].

Говоря о процессах создания и применения АСМ, необходимо подчеркнуть, что данные процессы, как правило, имеют эволюционный характер, в ходе которого новые поколения аппаратно-программных средств (АПС) (серверы, рабочие станции, новые версии операционных систем и т.п.) совместно используются с существующими АПС, входящими в состав уже действующих АСМ.

В этих условиях особую актуальность приобретает совместная постановка и решение задач синтеза облика АСМ (выбора оптимального варианта её облика) и планирования развития перечисленных видов структур.

Для проведения теоретико-множественного описания указанных задач синтеза и планирования развития структур АСМ воспользуемся их графовой интерпретацией [10]. В рассматриваемых задачах каждая из структур может быть задана своим альтернативным мультиграфом следующего вида:

$$G_{\alpha}^{t_i} = \langle T_{\alpha}^{t_i}, \Gamma_{\alpha}^{t_i}, P_{\alpha}^{t_i} \rangle, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – индекс, характеризующий вид структуры,  $A = \{T, \Phi, Tex, ПМО, ИО, Op\}$  – множество индексов, соответствующих топологической, функциональной, технической структурам, структурам ПМО, МО, ИО, организационной структуре АСМ;  $t_i \in \{t_1, t_2, \dots, t_f\}$  – линейно упорядоченное множество моментов времени перехода АСМ от одного многоструктурного макросостояния  $S_{\delta}$  к другому макросостоянию  $S_{\delta'}$ ;  $\delta, \delta' \in \{1, \dots, \Delta\}$  – множество номеров макросостояний АСМ;  $X_{\alpha}^{t_i} = \{x_{\alpha}^{t_i}\}$ ,  $\Gamma_{\alpha}^{t_i} = \{\gamma_{\alpha}^{t_i}\}$  – множество вершин и дуг графа, соответствующих фиксированному виду структуры « $\alpha$ » в момент времени  $t_i$  и задающих её альтернативные варианты;  $P_{\alpha}^{t_i} = \{p_{\alpha}^{t_i}\}$  – множество «весов» (приоритетов), количественно характеризующих значимость каждой из дуг в соответствующем альтернативном мультиграфе.

Кроме того, задано множество допустимых (исходя из содержательной постановки каждой конкретной задачи) операций отображения указанных выше альтернативных мультиграфов с динамической структурой вида (1) друг на друга:

$$M_{\langle \alpha, \tilde{\alpha} \rangle}^{t_i} : G_{\alpha}^{t_i} \rightarrow G_{\tilde{\alpha}}^{t_i}, \quad (2)$$

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

$$\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^{t_i} : S_{\delta} \rightarrow S_{\delta'}. \quad (3)$$

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

С учётом вышеизложенного, графическая интерпретация рассматриваемой задачи синтеза облика АСМ и планирования его развития сводится к поиску такого макросостояния  $S_{\tilde{\delta}}^* \in \{S_1, \dots, S_{\Delta}\}$  и такой последовательности выполнения операций отображения во времени  $\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^{t_1}, \Pi_{\langle \delta', \delta'' \rangle}^{t_2}, \dots, \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^{t_f}$ , при которых обеспечивается выбор наилучшей (с точки зрения обобщённого показателя эффективности) программы создания и развития АСМ.

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

$$J_{\theta} \left( X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{\langle U^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle \in \Delta_g}{extr},$$

$$\Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle \mid R_{\beta} \left( X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t \right) \leq \tilde{R}_g; U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{t_2} \circ \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^{t_f}; \beta \in \mathbf{B} \right\}, \quad (4)$$

где  $U^t$  – управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуру АСМ, так и процессы ее функционирования;  $J_{\theta}$  – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования АСМ,  $q \in Q = \{1, \dots, l\}$  – множество номеров показателей;  $\Delta_g$  – множество динамических альтернатив (множество структур и параметров АСМ, множество программ их функционирования);  $\mathbf{B}$  – множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограниче-

ний, определяющих процессы создания и функционирования;  $\tilde{R}_g$  – заданные величины;  $T = (t_0, t_f]$  – интервал времени, на котором синтезируются облик АСМ.

### **Методологические и методические основы решения проблем синтеза облика АСМ**

Решение сформулированной проблемы (4) требует, прежде всего, разработки соответствующей методологии, в качестве которой быть выбрана методология обобщённого системного анализа [1–6, 11, 12], в рамках которого на основе гармоничного сочетания формально-математических и логико-эвристических методов осуществляется конструктивное решение разнородных и разноуровневых задач анализа и синтеза АСМ на разных этапах их жизненного цикла. Применительно к современным АСМ в качестве этапов проведения обобщённого системного анализа указанной проблемы синтеза можно выделить: этап ретроспективного критического сравнительного анализа существующих отечественных и зарубежных разработок в области создания и применения АСМ; этап оценивания эффективности существующей АСМ; этап постановки обобщённой задачи синтеза и планирования развития АСМ; этап анализа целей и задач, которые требуется решать АСМ на новом этапе её развития, формирования системы показателей эффективности функционирования создаваемой АСМ; этап анализа основных пространственно-временных, технических, технологических, стоимостных и ресурсных ограничений, связанных с процессом создания и применения АСМ; этап анализа (конструирования) альтернативных вариантов структур перспективной АСМ; этап многокритериального оценивания указанных вариантов структуры АСМ и выбора из них наиболее предпочтительных; этап формирования, оценивания и выбора оптимальных эволюционных планов перехода от существующей АСМ к создаваемой («новой», перспективной) АСМ без снижения эффективности их применения.

Конструктивное решение рассматриваемой проблемы поиска и выбора наилучших вариантов создания и развития АСМ предполагает, во-первых, построение соответствующего полимодельного комплекса, описывающего различные аспекты жизненного цикла существующей и создаваемой АСМ, во-вторых, разработку методов, алгоритмов и методик многокритериального синтеза структуры перспективной АСМ, и, в-третьих, разработку многоэтапной интерактивной процедуры поиска решения задачи синтеза АСМ и программ их развития. Под комплексным (системным) моделированием (КМ) АСМ любой природы (естественных, искусственных, реально существующих и виртуальных и т.п.) будем понимать методологию и технологии полимодельного описания указанных объектов, а также комбинированного использования методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений, связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок

Необходимо отметить, что при комплексном моделировании АСМ приходится, в свою очередь, решать проблему структурно-функционального синтеза облика полимодельного комплекса, описывающего АСМ; проблему глубинного (интегративного) согласования используемых при комплексном моделировании АСМ методов, моделей и алгоритмов; проблему параметрической и структурной адаптации полимодельного комплекса; проблему верификации и валидации полимодельного комплекса; проблему автоматизации процесса комплексного моделирования АСМ.

Анализ многочисленных публикаций по проблемам комплексного (системного)

моделирования сложных организационно-технических систем (СОТС), к числу которых относятся и АСМ, показал [7, 8, 9, 11–14], что реализацию концепции рассматриваемого моделирования целесообразно осуществлять в рамках интегрированной системы поддержки принятия решений (ИСППР). В состав указанной системы в общем случае должны входить [3, 5]: имитационная система, расчётно-логическая система, интеллектуальные пакеты прикладных программ, экспертная система, инструментальные CASE-средства автоматизации проектирования. При этом, исходя из динамической интерпретации процессов, происходящих на различных этапах жизненного цикла АСМ, целесообразно в качестве основной математической структуры, описывающей данные процессы, выбрать динамический альтернативный системный граф [10].

Анализ возможных путей решения задачи полимодельного многокритериального синтеза структур АСМ показывает [7, 12], что наиболее перспективными являются следующие направления исследований.

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 для 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].

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 [6–10].

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 АСМ. Каждый из перечисленных вариантов методик исследования эффективности АСМ имеет свои преимущества и недостатки, а их выбор определяется спецификой конкретной предметной области, где функционируют соответствующие объекты (в нашем случае малоразмерные надводные суда в локальной акватории), ее ограничениями, а также поставленными целями исследований. Важную роль при этом отводится обоснованному выбору соответствующих аппаратно-программных средств, обеспечивающих комплексное моделирование АСМ. В работах [10, 13, 15] предложен состав, структура, варианты функционирования имитационной системы (ИМС), в рамках которой целесообразно решать задачи анализа и выбора ТАУ АПО для разных условий обстановки.

### **Заключение**

В докладе проведена содержательная и формальная постановка задачи структурно-функционального синтеза АСМ надводной обстановки в локальной акватории, отличительной особенностью которой является ее динамическая интерпретация, позволяющая при последующем решении использовать фундаментальные и прикладные результаты современной теории управления.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074–U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ, госзадания Мин. образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, в рамках бюджетных тем №№0073–2014–0009, 0073–2015–0007.

### **Литература**

1. **Васильев С. Н.** От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления. – 2001, № 1. – С. 5–22; №2, С. 5–21.
2. **Городецкий В. И.** Информационные технологии и многоагентные системы // Проблемы информатизации. – 1998. – №1. – С. 3–14.
3. **Калинин В. Н.** Теоретические основы управления активными подвижными объектами. Министерство обороны СССР, 1974. – 130 с.
4. **Калинин В. Н., Соколов Б. В.** Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // 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., Морозов В. В., Федоров В. В.** Декомпозиция в задачах проектирования // 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 научн. ред. Д. М. Гвишиани, С. В. Емельянова. – М.: МЦНТИ, 1973. 87 с.
8. **Моисеев Н. Н.** Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1974.
9. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 томах. 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. **Соколов Б. В., Палицын В. А.** Математическая модель планирования перемещений подвижных объектов в локальной акватории. Информатизация и связь. 2014, № 4., с. 108–115.
14. **Соколов Б. В., Назаров Д. И., Малышева И. В., Палицын В. А.** Алгоритмы оценивания пропускной способности информационной системы мониторинга движения объектов в локальной акватории. Информатизация и связь. 2015, № 4., с. 43–49.