УДК 519.8

С. В. Кокорин, С. А. Потрясаев, Б. В. Соколов

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Предложены обобщенная динамическая модель и комбинированный метод планирования операций и распределения ресурсов системы управления активными подвижными объектами, позволяющие учесть основные ограничения системы управления на основе реализации концепции комплексного моделирования.

Ключевые слова: *комплексное планирование, система управления активными подвижными объектами, комбинированные методы моделирования и оптимизации.*

Введение. Анализ основных направлений развития современных сложных организационно-технических систем (СОТС) позволил выделить ряд их особенностей, к числу которых относятся: многоаспектность и неопределенность поведения; иерархичность; подобие структур и избыточность основных элементов и подсистем и их взаимосвязей; разнообразие функций управления на каждом уровне системы; территориальная распределенность компонентов системы. Предварительные исследования показывают, что в качестве базового элемента при формальном описании процесса управления СОТС может использоваться активный подвижный объект (АПО) [1]. В общем случае это искусственный объект (аппаратно-программный комплекс), перемещающийся в пространстве и взаимодействующий с другими АПО и внешними объектами обслуживания, в ходе которого формируются информационные, энергетические и материальные потоки [2, 3]. На практике, как правило, из-за достаточно низкого уровня автономности АПО создаются распределенные системы управления АПО (СУ АПО). В этом случае на концептуальном уровне процесс функционирования СУ АПО может быть представлен как процесс выполнения соответствующих целевых и технологических (обеспечивающих) операций и распределения ресурсов в рассматриваемой системе управления.

На содержательном уровне задача комплексного планирования функционирования СУ АПО может быть сформулирована следующим образом: необходимо выбрать такой допустимый план выполнения операций и распределения ресурсов системы, в ходе реализации которого, в рамках заданных сценариев воздействия возмущающих факторов, будут выполнены своевременно и полностью все операции, составляющие соответствующие технологические циклы управления, а уровень сервиса (качества) планирования будет удовлетворять заданным требованиям. При этом если будет получено несколько планов, то необходимо выбрать наилучший план относительно принятых критериев и показателей оптимальности.

Формальная постановка задачи. На основе ранее разработанных частных динамических моделей планирования СУ АПО [1—3] запишем обобщенную динамическую модель процессов функционирования указанной системы в условиях возмущающих воздействий:

$$J_G\left(\boldsymbol{x}(t),\mathbf{u}(t),\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\xi}(t),t\right)\to \underset{\mathbf{u}(t)\in\Delta}{\text{extr}}\,; \tag{1}$$

$$\Delta=\begin{cases}\mathbf{u}(t)\mid \mathbf{x}(t)=\boldsymbol{\varphi}\left(t_0,\mathbf{x}(t_0),\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t),\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\xi}(t),t\right);\\ \mathbf{y}(t)=\boldsymbol{\eta}\left(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t),\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\xi}(t),t\right);\\ \mathbf{x}(t_0)\in X_0(\boldsymbol{\beta}),\quad \mathbf{x}(t_f)\in X_f(\boldsymbol{\beta}),\end{cases} \tag{2}$$

где $\mathbf{x}(t)$ — обобщенный вектор состояния СУ АПО; $\mathbf{y}(t)$ — обобщенный вектор выходных характеристик (показатели качества функционирования СУ АПО); $\mathbf{u}(t)$ — вектор программного управления, представляющий план функционирования СУ АПО; $\boldsymbol{\beta}$ — обобщенный вектор параметров СУ АПО, характеризующих основные технические и технологические возможности аппаратно-программных средств, входящих в ее состав; $\boldsymbol{\varphi}$, $\boldsymbol{\eta}$ — соответственно многомерные переходная и выходная функции, задаваемые в общем случае в аналитико-алгоритмическом (имитационном) виде; $X_0(\boldsymbol{\beta})$, $X_f(\boldsymbol{\beta})$ — значение вектора $\mathbf{x}(t)$ в начальный и конечный моменты времени; $t\in\left[t_0,t_f\right]$ — заданный интервал планирования работы СУ АПО; $\boldsymbol{\xi}(t)$ — вектор возмущающих воздействий, имеющих как объективный, так и субъективный характер и задаваемых извне в виде соответствующих сценариев $\boldsymbol{\xi}(t)\in\Xi$.

Для определенности в дальнейшем будем предполагать, что указанные возмущающие воздействия задаются в виде импульсных стохастических случайных процессов [4].

В состав рассматриваемой динамической модели планирования включим вектор показателей качества планирования

$$\mathbf{J}\left(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t),\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\xi}(t),t\right)=\left\|\mathbf{J}^{(o)^T},\mathbf{J}^{(k)^T},\mathbf{J}^{(p)^T}\right\|^T, \tag{3}$$

где $\mathbf{J}^{(o)^T},\mathbf{J}^{(k)^T},\mathbf{J}^{(p)^T}$ — соответствующие векторы показателей качества планирования операций, распределения ресурсов и потоков при различных сценариях реализации возмущающих воздействий.

Примеры конкретного описания данных показателей качества для детерминированного и стохастического вариантов задания исходных данных приведены в работах [1, 2].

Комбинированный метод решения задачи. Предположим, что в задаче векторной оптимизации при решении исходной задачи планирования (см. формулы (1), (2)) будет использоваться простейшая линейная свертка вида

$$J_G=\sum_{\alpha=1}^{h}C_\alpha J_\alpha,\quad C_\alpha\ge 0,\quad \sum_{\alpha=1}^{h}C_\alpha=1. \tag{4}$$

Более сложные варианты построения указанных сверток для рассматриваемого класса задач планирования подробно изложены в работах [1, 5].

Динамическая задача комплексного планирования операций и распределения ресурсов СУ АПО в условиях стохастических возмущающих воздействий (см. формулы (1)—(3)) может рассматриваться как многоэтапная задача стохастического программирования. В данной статье предполагается, что распределение ресурсов СУ АПО в условиях возмущающих воздействий можно конструктивно описать с использованием дискретно-событийных стохастических моделей, исследуемых в современной теории сетей массового обслуживания [6]. При этом в соответствии со структурными особенностями СУ АПО задачу стохастического программирования можно декомпозировать на две взаимосвязанные задачи оптимизации процесса функционирования рассматриваемой системы [5, 7]:

— *подзадачу оптимизации функционала (1) на основе варьирования вектора* ζ *приоритетов операций обслуживания АПО при фиксированном векторе* $\mathbf{p}$ *параметров, характеризующих технические и технологические возможности системы (подвекторе* β: *см. формулы (1)—(2));*

— *подзадачу оптимизации функционала (1) на основе варьирования вектора* $\mathbf{p}$ *при фиксированном векторе* ζ.

Для реализации данного подхода предлагается следующая двухэтапная итерационная процедура.

Этап 1. Оптимизация процесса выполнения операций и распределения ресурсов в СУ АПО с использованием ее аналитико-имитационной (стохастической) модели:

$$f\left(q_0\left(\zeta^{(\nu)}, \mathbf{p}_\nu\right)\right) \to \min_{\mathbf{p}_\nu \in \Omega}, \tag{5}$$

где $q_0(\cdot)$ — аналитико-имитационное описание взаимосвязи оптимизируемых параметров модели планирования; Ω — множество допустимых значений параметров, характеризующих СУ АПО; ν — номер итерации.

Этап 2. Динамическое планирование операций и распределение ресурсов с фиксированным вектором параметров $\mathbf{p}_\nu$, полученным на предыдущем этапе:

$$f\left(q_0\left(\zeta^{(\nu+1)}, \mathbf{p}_\nu\right)\right) \to \min_{\zeta^{(\nu+1)} \in Z}, \tag{6}$$

где Z — множество допустимых значений приоритетов.

Для реализации рассматриваемой процедуры на нулевой итерации ($\nu = 0$) необходимо задать вектор начальных значений приоритетов $\left(\zeta^{(\nu)} = \zeta^{(0)}\right)$ операций, выполняемых в СУ АПО. Его можно сформировать, например, алгоритмически (неявно), используя такие эвристические правила диспетчеризации, как FIFO, LIFO. Итерационный процесс поиска оптимального плана заканчивается в одном из следующих случаев: при достижении заданного уровня разности значений функционалов на двух последовательных итерациях:

$$\left| f\left(q_0\left(\zeta^{(\nu+1)}, \mathbf{p}_{\nu+1}\right)\right) - f\left(q_0\left(\zeta^{(\nu)}, \mathbf{p}_\nu\right)\right) \right| < \tilde{e}, \tag{7}$$

где $\tilde{e}$ — известная величина; либо, если стабильная сходимость не наблюдается, используется эвристическое правило выхода из итерационной процедуры. При этом проверку условия (7) можно проводить, только начиная с первой итерации, так как вектор $\mathbf{p}_0$ в начале итерационной процедуры не определен.

Комбинированный метод оптимизации параметров СУ АПО. Рассмотрим более подробно содержание первого этапа предложенной итерационной процедуры. Для оптимизации вектора параметров $\mathbf{p}$ целесообразно использовать комбинацию метода глобального поиска (метод Ψ-преобразования [8]) и метода численной оптимизации без расчета производных (метод главных осей Брента [9]). Метод Ψ-преобразования — метод поиска глобального экстремума целевой функции (5) — не требует задания начального приближения при решении исходной задачи оптимизации, но характеризуется существенными вычислительными затратами при увеличении размерности вектора оптимизируемых параметров $\mathbf{p}_\nu$. Использование только метода Ψ-преобразования при оптимизации функционала (5) приводит к большим погрешностям. Поэтому предлагается его дополнить методом локальной оптимизации функционала (5). Применительно к рассматриваемой задаче планирования работоспособность данного метода была продемонстрирована при оптимизации систем с сетевой структурой [6].

Главный недостаток метода локальной оптимизации, точнее, его алгоритмической реализации, заключается в необходимости задания начального приближения, которое должно быть рассчитано для каждой задачи отдельно. Однако первое приближение уже известно (в результате оптимизации функционала (5) с использованием метода Ψ-преобразования). Метод характеризуется двумя основными параметрами: показателем точности расчета целевой функции, который определяет момент остановки итерационного цикла, и шагом изменения оптимизируемых параметров, определяющим скорость сходимости алгоритма. Теоретическая сходимость данного метода для случая дважды непрерывно дифференцируемых функций была доказана в работе [9]. Применительно к исследуемой задаче планирования вычислительные эксперименты показали хорошую сходимость для более широкого класса оптимизируемых целевых функций, которые не являются в общем случае дифференцируемыми ((2), (3)).

Метод динамического планирования операций и распределения ресурсов СУ АПО. Данный метод предлагается использовать для формирования собственно плана выполнения операций и распределения ресурсов в СУ АПО. В работах [2, 3, 5] показано, что каждому такому плану может быть поставлен в соответствие комбинированный вектор сопряженной системы уравнений, который в данной задаче может интерпретироваться уже как вектор динамических приоритетов ζ_0. Более того, в указанных работах также данный вектор рассматривается как вектор координирующих воздействий при реализации процедуры интерактивного планирования СУ АПО, оценивании устойчивости планов, а также при выработке корректирующих воздействий, позволяющих адаптировать как детерминированную динамическую модель планирования, так и аналитико-имитационную модель процесса реализации составленных планов с учетом возможных возмущающих воздействий.

Кратко остановимся на общей итеративной схеме формирования вектора динамических приоритетов, основанной на методе локальных сечений и представляющей собой одну из модификаций принципа максимума Понтрягина для случая задания смешанных ограничений [2, 5]. Рассмотрим алгоритм, реализующий данную схему.

Шаг 1. Задание диспетчерского решения (допустимого плана) $\mathbf{u}_{\text{д}}(t), t \in (t_0, t_f]$; в частном случае в качестве допустимого может быть выбран „нулевой“ план — $\mathbf{u}_{\text{д}}(t) \equiv \mathbf{0}$.

Шаг 2. Интегрирование системы уравнений (2), описывающей процесс функционирования СУ АПО, с заданными начальными условиями, характеризующими ее текущее состояние, и $\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{д}}(t)$. В работах [2, 5] был описан один из вариантов преставления системы уравнений (2) в виде детерминированной нестационарной конечномерной дифференциальной динамической системы $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$. В результате интегрирования получаем вектор-функцию $\mathbf{x}_{\text{д}}(t)$. Также в конечный момент времени рассчитываются значение обобщенного показателя качества планирования J_G и значение вектора сопряженной системы уравнений с использованием условия трансверсальности.

Шаг 3. Интегрирование в обратном времени от $t = t_f$ до $t = t_0$ при $\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{д}}(t)$ сопряженной системы уравнений вида

$$\dot{\psi}_l = -\frac{\partial H}{\partial x_l} + \sum_{\delta=1}^{I_1} \lambda_\delta(t) \frac{\partial g_\delta^{(1)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))}{\partial x_l} + \sum_{\tilde{\gamma}=1}^{I_3} \rho_{\tilde{\gamma}}(t) \frac{\partial g_{\tilde{\gamma}}^{(2)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))}{\partial x_l}, l = 1, \ldots, \tilde{n}, \quad (8)$$

где $H = \boldsymbol{\psi}^T(t)\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u},t)$ — гамильтониан, $\lambda_\delta(t)$ и $\rho_{\tilde{\gamma}}(t)$ — динамические множители Лагранжа;

$$\operatorname*{grad}_{\mathbf{u}} H\big(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t),\boldsymbol{\psi}(t)\big) = \sum_{\delta=1}^{I_1}\lambda_\delta(t)\operatorname*{grad}_{\mathbf{u}} g_\delta^{(1)}\big(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t)\big) + \sum_{\tilde{\gamma}=1}^{I_2}\rho_{\tilde{\gamma}}(t)\operatorname*{grad}_{\mathbf{u}} g_{\tilde{\gamma}}^{(2)}\big(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t)\big), \quad (9)$$

где $\boldsymbol{\psi}(t)$ — вектор сопряженной системы уравнений; I_1 — множество индексов для ограничений типа равенства $g_\delta^{(1)}\big(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t)\big) = 0$, $\delta \in I_1$; I_2 — множество индексов для ограничений типа неравенства $g_\gamma^{(2)}\big(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t)\big) \le 0$, $\delta \in I_2$; I_3 — множество активных индексов, для которых ограничения типа $g_\gamma^{(2)}\big(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t)\big) \le 0$ превращаются в равенства.

В момент времени $t = t_0$ (момент окончания интегрирования системы (8)) формируется первое приближение значений сопряженной системы уравнений $\boldsymbol{\psi}_i(t_0)$. На этом завершается итерация $r = 0$.

Далее — повторение шагов 2 и 3 до тех пор, пока не будут выполнены условия $\left|J_G^{(r+1)} - J_G^{(r)}\right| \le \varepsilon$, где ε — заданная точность численного решения рассматриваемой двухточечной краевой задачи.

В результате решения рассматриваемой задачи планирования работы СУ АПО, интерпретируемой как задача оптимального программного управления соответствующей динамической системой вида (2), формируется вектор динамических приоритетов $\boldsymbol{\zeta}(t) = \boldsymbol{\zeta}\big(\boldsymbol{\psi}(t_0)\big)$, который функционально (через функцию Гамильтона) связан с вектором сопряженной системы уравнений (8) и однозначно определяет оптимальный план выполнения операций и распределения ресурсов в СУ АПО.

Заключение. В результате проведенных исследований разработана оригинальная многоэтапная процедура комплексного планирования функционирования системы управления активными подвижными объектами с учетом факторов неопределенности. Главное преимущество предложенного подхода по сравнению с существующими заключается в комбинированном динамическом (контекстном) учете при планировании функционирования СУ АПО как различных типов ограничений, накладываемых на указанный процесс, так и возможных классов возмущающих воздействий, влияющих на устойчивость построенных планов, который осуществляется на основе одновременного использования при формировании планов детерминированных и стохастических моделей.

Другое преимущество предложенного комбинированного подхода заключается в том, что как при итеративном поиске параметров СУ АПО с использованием стохастических моделей и методов глобальной оптимизации, так и при формировании собственно плана функционирования системы обеспечивается монотонная сходимость итеративных процессов за счет интерактивной гибкой настройки программного обеспечения, реализующего разработанные методы на компьютере, на основе использования заранее введенной параметрической и структурной избыточности в соответствующие численные алгоритмы оптимизации.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311-а, 11-08-01016-а, 11-08-00767-а), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.11, 2.12), а также программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI/184/2011/14.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калинин В. Н.* Теоретические основы управления активными подвижными объектами. МО СССР, 1974. 130 с.
2. *Соколов Б. В., Калинин В. Н.* Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 149—156.
3. *Соколов Б. В., Калинин В. Н.* Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1985. № 5. С. 106—114.
4. *Килин Ф. М.* Теория и принципы построения автоматизированных систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1985. 288 с.
5. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
6. *Кокорин С. В., Рыжиков Ю. И.* Оптимизация параметров сетей массового обслуживания на основе комбинированного использования аналитических и имитационных моделей // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 11. С. 61—66.
7. *Краснощёков П. С., Морозов В. В., Федоров В. В.* Декомпозиция в задачах проектирования // Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. 1979. № 2. С. 7—18.
8. *Чичинадзе В. К.* Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. Метод пси-преобразования. М.: Наука, 1983.
9. *Brent R. P.* Algorithms for Minimization without Derivatives. NJ, USA: Prentice-Hall Inc., 1973. 195 p.

Сведения об авторах

Сергей Владимирович Кокорин — СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. науч. сотрудник; E-mail: kokorins@list.ru

Семен Алексеевич Потрясаев — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: spotryasaev@gmail.com

Борис Владимирович Соколов — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; зам. директора по научной работе; E-mail: sokol@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию 10.06.12 г.