

О.В. Кофнов, Б.В. Соколов

**ПОСТАНОВКА И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИ ГРУППОВОМ УПРАВЛЕНИИ РОБОТОТЕХ-
НИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург,
kofnov@mail.ru*

Аннотация

Группа роботов представляет собой сложную организационно-техническую структуру с проактивным управлением. Под проактивным управлением понимается прогнозирование и предупреждение возможных инцидентов в процессе функционирования системы. Основная трудность заключается в многомерности поставленной задачи управления, необходимости многокритериальной оптимизации, что требует значительных вычислительных ресурсов. Решение задачи проактивного управления обеспечивается через моделирование логико-динамических управляемых систем. Логико-динамическое моделирование подразумевает не только моделирование движения роботов, но и моделирование процесса обмена информацией между ними. Разработана новая модификация ранее разработанной авторами вычислительной G-модели, представляющая собой динамический альтернативный системный граф с перестраиваемой структурой, который построен на основе комбинирования математического аппарата сетей Петри с логико-динамическими моделями программного управления движением, каналами, ресурсами, комплексами операций, потоками и структурами группировок активных подвижных объектов. Проблема многомерности решается методом проецирования области допустимых значений параметров системы на двумерные плоскости.

Ключевые слова: робот, управление, многомерность, моделирование, Петри.

O.V. Kofnov, B.V. Sokolov

**FORMULATION AND METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM OF DYNAMIC
REALLOCATION OF FUNCTIONS OF GROUP CONTROL OF ROBOTIC COMPLEXES**

*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg,
kofnov@mail.ru*

Abstract

A group of robots is a complex organizational and technical structure with proactive management. Proactive management means the prediction and prevention of possible incidents during the operation of the system. The multidimensionality of this task and the multi-criteria optimization require significant computing resources. The solution of the proactive management problem is provided by modeling of logical-dynamic controlled systems. Logical-dynamic modeling involves not only modeling the movement of robots, but the information exchange modeling between them. The new modification of the G model representation dynamic system with tunable structure alternative graph is developed. This modification is based on Petri nets mathematical apparatus combinations of logical-dynamic models with software motion control, channels, resources, complexes of transactions, flows, and structures of the groups of active mobile objects. The problem of multidimensionality is solved with projections of the acceptable values area of system parameters onto two-dimensional planes.

Key words: robot, management, multidimensionality, modeling, Petri.

В докладе представлены методологические и методические основы постановки и решения проблем синтеза программ проактивного управления структурной динамикой робототехнических комплексов (РТК), позволившие с единых позиций подойти к автоматизации процессов мониторинга, многовариантного прогнозирования, управления ресурсами и реконфигурацией РТК. В рамках разработанной методологии управления в качестве базовых была выбрана концепция комплексного (системного) моделирования РТК, которая предполагает разработку и реализацию новых принципов, подходов к проведению полимодельного логико-динамического описания различ-

ных вариантов построения и использования РТК, а также разработку и комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных проактивных управленческих решений (в том числе и ориентированных на их реконфигурацию), связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок; концепция проактивного управления структурной динамикой РТК в изменяющихся условиях, вызванных воздействием возмущающей среды. Проактивное управление, в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления РТК, ориентированного на оперативное реагирование на уже произошедшие негативные события и недопущение их последующего развития, предполагает упреждающее предотвращение причин возникновения инцидентов за счёт создания (либо целенаправленного поиска) в соответствующие системе проактивного мониторинга и управления новых системно-функциональных резервов, обеспечивающих динамическое формирование принципиально новых возможностей по парированию возможных расчетных и нерасчетных нештатных и аварийных ситуаций, с использованием методологии и технологий системного (комплексного) моделирования, а также многовариантного ситуационно-адаптивного прогнозирования. В докладе представлены конструктивные пути реализации данной концепции на основе построения и использования многомерных аппроксимированных областей достижимости логико-динамических моделей, описывающих рассматриваемую предметную область в пространстве системотехнических параметров [1,2,3]. Еще одной используемой авторами доклада *концепцией* является концепция интеллектуализации управления, предусматривающая в качестве условий эффективного управления РТК (РТК) необходимость применения интеллектуальных инструментов управления (новых интеллектуальных информационных технологий), носящих ярко выраженный инновационный характер и направленных на достижение комплексной интеграции естественного и искусственного интеллектов.

Основные результаты

Для конструктивного решения задач проактивного мониторинга, прогнозирования и управления (в том числе распределения ресурсов и реконфигурации) РТК в проекте разработана новая модификация ранее разработанной авторами вычислительной G-модели, представляющая собой динамический альтернативный системный граф с перестраиваемой структурой, который построен на основе комбинирования математического аппарата сетей Петри с логико-динамическими моделями программного управления движением, каналами, ресурсами, комплексами операций, потоками и структурами группировок активных подвижных объектов. При этом в отличие от существующих поведенческих (сценарных) моделей РТК, базирующихся на конечно-автоматных и имитационных описаниях, предложенный логико-динамический подход позволил на конструктивном уровне решить задачи оперативного структурно-функционального синтеза как облика РТК, так и СУ ими.

На рис. 1 представлена обобщенная структура разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач проактивного управления РТК.

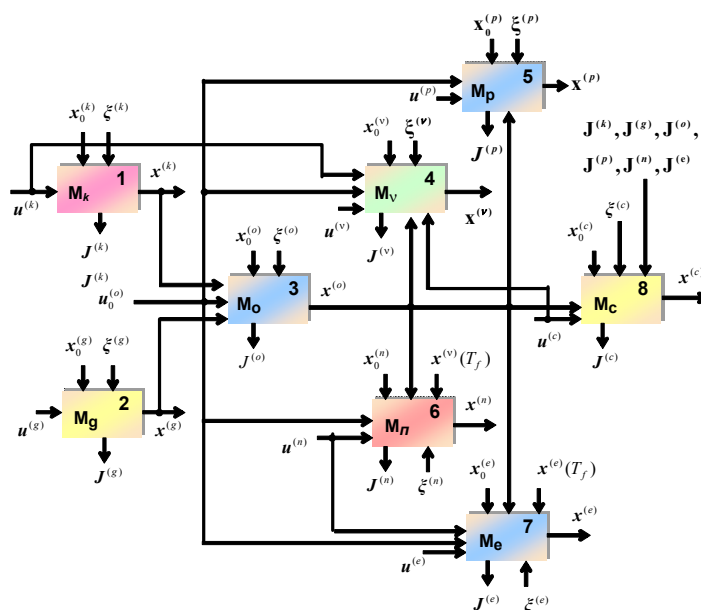


Рисунок 1 – Обобщенная структура и схема взаимодействия моделей управления РТК

На рис. 1 приняты следующие обозначения M_g – динамические модели управления движением РТК; M_k – динамические модели управления каналами РТК; M_o – динамические модели управления операциями в РТК; M_n – динамические модели управления потоками РТК; M_r – динамические модели управления ресурсами РТК; M_e – динамические модели управления параметрами операций в РТК; M_s – динамические модели управления структурной динамикой РТК; M_p – динамические модели управления вспомогательными операциями.

Мы предлагаем новый подход, для описания логико-динамических моделей проактивного управления структурной динамикой РТК [1-4]. В отличие от существующих моделей управления сложными динамическими объектами, предполагающих задание логических ограничений с помощью ступенчатых функций в правых частях дифференциальных уравнений, описывающих структурную динамику, мы предлагаем эти ограничения задавать при описании области допустимых управляющих воздействий, добиваясь, чтобы данная область была выпуклой.

В этом случае управляющие воздействия, позволяющие выбирать технологии взаимодействия роботов как друг с другом, так и внешними объектами обслуживания (ОБО), а также расписание их работы принимают крайние (булевы) значения. Это позволяет дискретно-событийную задачу теории расписаний большой размерности решать с использованием методов оптимального управления [1,2]. На сайте лаборатории ЛИТСАМ имеется множество публикаций и проектов, в которых описано как и где используются предложенные логико-динамические модели проактивного управления групповым поведением РТК [4].

Приведем в качестве примера центральную модель из рассмотренного комплекса, структура которого представлена на рис. 1.

Логико-динамическая модель управления операциями взаимодействия (в том числе и измерительно-вычислительными операциями) в РТК (модель M_o) играет координирующую роль в созданном программно-математическом обеспечении:

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

где $x_{i\gamma}^{(o)}$ — переменная, характеризующая состояние выполнения ОВ $D_{\gamma}^{(i)}$; $a_{\gamma}^{(o)}, a_{i\tilde{\alpha}}^{(o)}, a_{i\tilde{\beta}}^{(o)}$ — заданные объёмы выполнения операций $D_{\gamma}^{(i)}, D_{\tilde{\alpha}}^{(i)}, D_{\tilde{\beta}}^{(i)}$; $u_{i\gamma j}^{(o)}(t)$, — управляющее воздействие, $u_{i\gamma j}^{(o)}(t) = 1$, если операция $D_{\gamma}^{(i)}$ выполняется, $u_{i\gamma j}^{(o)}(t) = 0$ — в противоположном случае; $\Gamma_{i\gamma 1}, \Gamma_{i\gamma 2}$ — множество номеров операций взаимодействия, проводимых с объектом B_i , непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией $D_{\gamma}^{(i)}$ с помощью логических операций «И», «ИЛИ» соответственно; $P_j^{(o,1)}, P_i^{(o,2)}$ — заданные константы, характеризующие технические ограничения, связанные с функционированием РТК в целом; $r_{ij}(t)$ — известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с взаимодействием объектов B_i (либо \bar{B}_k) с B_j , данная функция принимает значение 1, если B_i попадает в заданную зону взаимодействия B_j ; 0 — в противоположном случае.

Показатели качества планирования функционирования РТК

Оценивание качества процессов программного управления операциями и ресурсами РТК можно проводить с использованием различных критериальных (целевых) функций [1-2]. Приведем для примера один из них:

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

где $\eta_{i\gamma}(\tau)$ — известные монотонные функции времени, которые выбираются с учетом заданных директивных сроков начала (конца) выполнения операций взаимодействия (ОВ) объектов обслуживания ОБО с РТК B_i .

Проведенный анализ показал, что в рамках предложенного комплекса моделей группового управления поведением роботов широкое распространение получили идеи динамической декомпозиции, базирующейся на метафорах биоинспирированных подходов, либо агентных технологиях, основанных на организации и проведении аукционов, в рамках которых распределялись ограниченные ресурсы указанных роботов. В докладе предложен принципиально новый вариант динамической декомпозиции задач группового управления РТК, основанный на методе локальных сечений Болтянского В.Г. В этом случае, используя метод локальных сечений, удалось в явном виде получить динамические множители Лагранжа (в качестве которых выступали соответствующие сопряженные переменные). В рамках предложенного варианта алгоритмизации группового управления РТК удалось перейти от исходного класса допустимых импульсных (целочисленных) управлений к расширенному классу, в котором условия релейности управляющих воздействий заменены на интервальные ограничения. Данная особенность позволила на практике при решении разнообразных задач группового управления РТК широко использовать фундаментальные научные результаты современной теории управления.

При многокритериальном анализе поведения РТК неизбежно возникает проблема большой размерности, определяемой количеством параметров, по которым осуществляется оптимизация. Провести такой многомерный анализ можно геометрически, представив область допустимых структурных состояний рассматриваемой системы как некоторое тело в N -мерном пространстве, где N — количество параметров оптимизации. Однако представить такое тело в многомерном пространстве достаточно сложно. Намного проще работать с двумерными изображениями. Поэтому в данном случае целесообразно использовать известные методы начертательной геометрии. Эти методы успешно применяются в инженерной графике для отражения на плоскости трехмерных объектов. Однако те же самые методы успешно подойдут для визуализации объектов любой размерности. На рис. 2 в качестве примера приведены проекции пятимерного тела на взаимно перпендикулярные плоскости, образованные соответствующими осями координат.

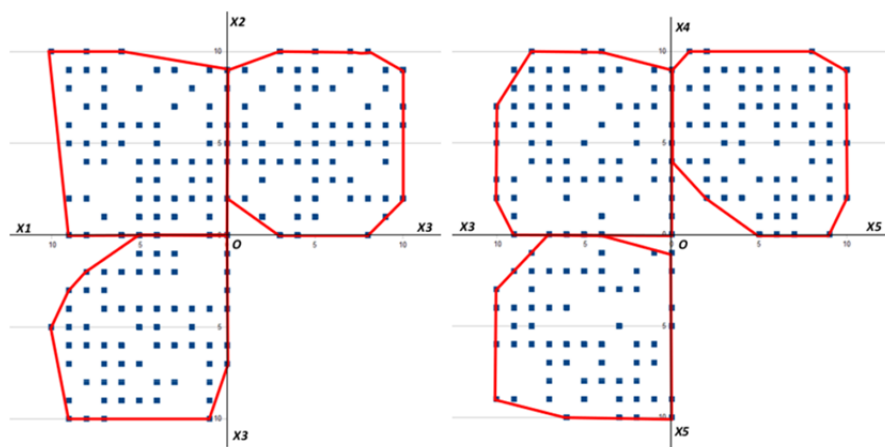


Рисунок 2 – Проекция многомерной области допустимых структурных состояний РТК

Квадратами обозначены рассчитанные точки структурных состояний. Область допустимых состояний всегда выпукла. Благодаря этому свойству можно построить проекции замкнутой границы области. Использование линий проекционной связи между проекциями точки на поверхности позволяет определить координаты всех точек границы области допустимых значений (рис. 3).

Для компьютерной обработки таких областей используются методы выборки из реляционной базы данных и методы обработки цифровых изображений.

Основной научный результат состоит в разработке модельно-алгоритмического обеспечения поиска эталонных (оптимальных) решений в задаче группового управления РТК для различных сценариев их взаимодействия, относительно которых можно уже обоснованно вводить различного

рода эвристики, базируясь на метафорах биоинспирированных подходов, либо агентных технологиях. Конструктивность разработанного модельно-алгоритмического обеспечения была проверена на примере решения задачи динамического перераспределения функций приема, обработки, хранения и передачи данных и информации при групповом управлении РТК космического базирования [1,4].

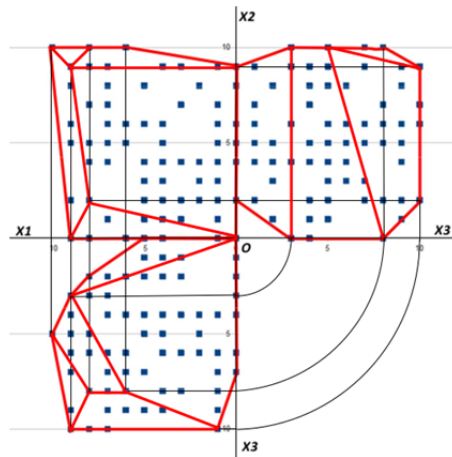


Рисунок 3 – Построение контуров поверхности области с использованием линий проекционной связи

Работа проводилась при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№ 118-07-01272, 18-08-01505, 19-08-00989, 20-08-01046), в рамках бюджетной темы №№0073–2019–0004

Литература

1. Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Охтилев М.Ю. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами. // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. 2015. №1(162). С. 162–174.
2. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
3. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
4. ЛИТСАМ // Сайт лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании. [Электронный ресурс]. URL: <http://litsam.ru> (дата обращения: 02.09.2020).