

О. В. КОФНОВ, Б. В. СОКОЛОВ, В. А. УШАКОВ

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург

МНОГОВАРИАНТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОАКТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ИМИ

В докладе показано, что при проактивном управлении сложными техническими объектами (СТО) очень важно осуществлять многовариантное прогнозирование их состояния. Предлагается новый подход, базирующийся, во-первых, на оригинальном логико-динамическом описании исследуемых процессов, и, во-вторых, на построении и аппроксимации областей достижимости (ОД) исследуемых динамических процессов, которые описывают все множество потенциальных траектории движения СТО многомерном пространстве системотехнических параметров. Приводятся примеры практической реализации в ракетно-космической области.

Введение. Одной из характерных особенностей современных и перспективных сложных технических объектов (СТО) является высокая инерционность (значительные задержки) в подготовке и реализации управляющих воздействий, обеспечивающих требуемое качество их функционирования. При этом за время сбора, обработки, анализа данных и информации о состоянии СТО относительно некоторого заданного момента времени t' , а также планировании и выполнении процессов управления ею, из-за воздействия возмущающих факторов, которые начали действовать на саму СТО уже за t' и никак не учитывались (не прогнозировались). В этом случае СТО может уже оказаться совсем в другом состоянии (в общем случае многоструктурном макросостоянии). Для того, чтобы компенсировать данный недостаток классического реактивного управления для СТО была предложена технология проактивного управления [1].

Одним из конструктивных способов многовариантного описания (многовариантного прогнозирования) возможных сценариев поведения СТО в динамически изменяющихся условиях является способ, базирующийся на построении и аппроксимации многомерных областей достижимости специально сконструированных логико-динамических моделей (ЛДМ), конструктивно описывающих функционирование данных систем. В ранее опубликованных научных статьях приведено достаточно много конкретных примеров указанного варианта формализации соответствующей управляемой структурной динамики СТО [1, 3].

В этом случае задача многовариантного прогнозирования возможных сценариев поведения СТО (в том числе и задача расчета значений показателей целевых и информационно-технологических возможностей (показателей качества управления) может быть интерпретирована как задача оценивания управляемости соответствующей ЛДМ, построения соответствующего множества (области) достижимости $D(t, T_0, x(T_0))$, которое является фундаментальной характеристикой указанной ЛДМ [2]. На рис. 1 приведен пример графического изображения множества достижимости (области достижимости) в пространстве двух показателей качества, характеризующих функционирование СТО. Знание данного множества, по существу, заменяет собой всю необходимую для решения задач проактивного управления СТО информацию о динамике системы, её основных ограничениях. В этом случае прогнозируемые многоструктурные макросостояния СТО, в которых она может оказаться, а также значений показателей качества управления получаются в результате формирования областей и проектирования областей достижимости (ОД) ЛДМ и её частных вариантов на соответствующие оси декартовой (полярной) системы координат в пространстве состояний, либо в пространстве целевых (критериальных) функций (в пространстве выходов ЛДМ). Располагая ОД, можно, во-первых, проанализировать как зависит разрешимость задач проактивного управления СТО от структуры и свойств множества начальных состояний X_0 , конечных состояний X_f ($x(T_0) \in X_0$, $x(T_f) \in X_f$) ЛДМ, описывающих функционирование СТО, от интервалов времени, на котором происходит проактивное управление, от состава и структуры пространственно-временных, технических и технологических ограничений. Во-вторых, используя области достижимости, можно осуществлять многовариантное прогнозирование

состояние СТО, что особенно важно при проактивном управлении ими. Кратко остановимся на алгоритмических особенностях решения перечисленных задач.

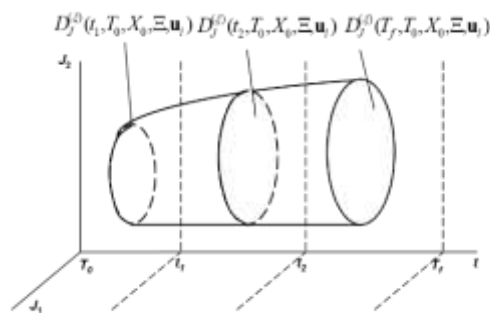


Рис. 1. Пример графического изображения области достижимости в пространстве двух показателей качества и двух моментов времени

Предлагаемое решение исследуемой задачи. Таким образом, из вышеизложенного следует, что задачи многовариантного прогнозирования состояния СТО при их проактивном управлении могут быть сформулированы как задачи отыскания минимума заданной функции по соответствующему множеству достижимости

$$J'_{об}(\mathbf{x}(\cdot)) \rightarrow \min_{\mathbf{x}(\cdot) \in D_i(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))}, \quad (1)$$

где $D_i(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$ – множество достижимости ЛДМ M_i ($i=1,2,3$); $J'_{об}(\mathbf{x}(\cdot))$ – преобразованный к терминальному виду (виду функционала Майера) исходный обобщенный показатель качества функционирования СТО. При этом необходимо подчеркнуть, что при изменении вида функции $J'_{об}(\mathbf{x}(\cdot))$ не требуется повторный расчёт множества достижимости $D_i(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$. В указанной ситуации следует просто заново решить задачу нелинейного программирования (1). Таким образом, предварительный расчёт и аппроксимация ОД для соответствующих ЛДМ, описывающих функционирование СТО позволяет существенно сократить затраты времени и повысить оперативность решения задач многовариантного описания (многовариантного прогнозирования) возможных сценариев поведения СТО в динамически изменяющихся условиях. Необходимо отметить, что для задач многовариантного прогнозирования состояния СТО большой размерности построение множеств (областей) достижимости представляет собой исключительно сложную проблему. Поэтому на практике при решении указанной проблемы проводят различного рода упрощения, связанные с аппроксимацией множеств $D_i(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$ [2–3]. Один из возможных методов (алгоритмов) построения $D_i(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$ основывается на многократном решении задач оптимального программного управления элементами и подсистемами СТО с функционалом вида [2]:

$$J''_{об}(\mathbf{x}(\cdot)) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(T_f) \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in Q_p(\mathbf{x})}, \quad (2)$$

где \mathbf{c} – заданный вектор, удовлетворяющий условиям нормировки $|\mathbf{c}| = 1$. Осуществляя поиск $\mathbf{u}^*(t)$ для каждого фиксированного \mathbf{c} , мы получаем точку $\mathbf{x}^*(T_f)$, лежащую на границе множества достижимости, и опорную гиперплоскость вида $\mathbf{c}^m \mathbf{x}(T_f)$ к этому множеству, проходящую через точку $\mathbf{x}^*(T_f)$. Определив $\mathbf{x}^*_\beta(T_f)$ и опорные гиперплоскости для заданных вариантов варьирования компонент вектора \mathbf{c}_β , $\beta = 1, \dots, \bar{\Delta}$ ($\bar{\Delta}$ – число вариантов варьирования), можно получить как внешнюю ($D(+)$), так и внутреннюю ($D(-)$) аппроксимацию множества достижимости $D_i(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$. В связи с этим в работе [2] было показано, что в общем случае для ЛДМ рассматриваемого класса внешней аппроксимацией $D^+(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$

множества $D_i(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$ будет выпуклый многогранник, образованный пересечением опорных гиперплоскостей. Внутренней аппроксимацией $D^-(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$ множества $D_i(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0))$ может служить выпуклый многогранник, вершинами которого являются точки $\mathbf{x}_\beta^*(T_f)$, т. е. $D^-(T_f, T_0, \mathbf{x}(T_0)) = Co(\mathbf{x}_1(T_f), \dots, \mathbf{x}_\Delta(T_f))$. Чем больше $\bar{\Delta}$, тем лучше D^+ и D^- приближают множество достижимости. В докладе приведены результаты обзора литературы по вопросам визуализации процессов построения и использования ОД при многовариантном прогнозировании состояния СТО. Проведённый обзор показал, что исследуемые задачи компьютерной визуализации многомерных объектов теоретически могут быть решены с помощью следующих расширений геометрии: проективная геометрия, геометрическая алгебра, геометрия Клиффорда, геометрическое программирование. Построенное на этих принципах программное обеспечение представляет собой библиотеки и фреймворки к существующим популярным языкам программирования и предназначено для высокоэффективного моделирования компьютерной графики при отображении на плоский экран монитора, проектора, дисплея и пр. Однако ряд из этих продуктов позволяют работать с объектами в пространстве до 12 и выше измерений, что позволяет надеяться использовать их для решения поставленных выше задач. В докладе предложены возможные направления совершенствования существующих программных средств визуализации многомерных объектов [4].

Заключение. В докладе показано, что при проактивном управлении СТО особую значимость приобретают задачи многовариантного прогнозирования их состояния. Предлагается модельного алгоритмическое обеспечение и прототипы программных модулей решающих данные задачи. В настоящее время практическую реализацию разработанные модели, методы и алгоритмы получили при решении задач проактивного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов [4, 5].

*Работа проводилась при частичной финансовой поддержке грантов
РФФИ (№№ 17-29-07073-офи-м, 18-07-01272, 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. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988.
3. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
4. <http://litsam.ru>
5. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.

O.V. Kofnov, B.V. Sokolov, V.A. Ushakov, (St.Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St.Petersburg)

Multivariate Forecasting of the State of Complex Technical Objects with their Proactive Management

The report shows that during using proactive management of complex technical objects (CTO) it is very important to carry out multivariate forecasting of their state. A new approach is proposed, based, firstly, on the original logical-dynamic description of the processes under study, and, secondly, on the construction and approximation of the reachable regions (RR) of the investigated dynamic processes that describe the entire set of potential trajectories of CTO in the multidimensional space of system-technical parameters. Examples of practical implementation in the rocket and space field are given.