

**КОМБИНИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
ПЛАНОВ ПРИМЕНЕНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ*****Б. В. Соколов, А. В. Иконникова, С. А. Потрясаев, Э. А. Рагиня (Санкт-Петербург)****Введение**

Основная особенность управления сложной технической системой (СТС) состоит в том, что сведения об основных факторах и условиях, влияющих на успешное решение задач автоматизированного управления (АУ) соответствующими объектами, имеют различную степень достоверности и определённости. Кроме того, существенно затрудняет процесс управления СТС отсутствие в большинстве случаев аналитической зависимости между указанными факторами и условиями, определяющими (описываемыми) технологию АУ. Это, в первую очередь, касается факторов и условий, затрудняющих выполнение целевых задач объектами СТС (факторов противодействия внешней среды). Проиллюстрируем сказанное на примере реализации лишь одной из функций управления структурной динамикой СТС, а именно – функции планирования (программного управления). Так, традиционно при решении задач оперативного планирования работы различных классов технических средств, входящих в состав типовых СТС, в соответствующих детерминированных математических моделях не учитывается влияние факторов неопределённости (случайных, нечётких и т.п.), которые могут иметь место на этапе реализации составленных планов. В результате такого подхода устойчивость ранее составленных планов будет низкой, что, в свою очередь, приводит на этапе реализации планов к увеличению общего числа их коррекций, увеличению нагрузки на СТС, снижению её пропускной способности, устойчивости функционирования [17, 21, 22, 29].

Наряду с детерминированными моделями планирования операций и распределения ресурсов СТС существует ряд подходов, при которых в моделях планирования учитываются факторы неопределённости (модели нечёткого, стохастического математического программирования) [1–6]. Однако для решения задач планирования в рамках указанных моделей должны быть приняты довольно «жёсткие» предположения и допущения о параметрах законов распределения случайных (нечётких) величин, с помощью которых проводится описание процесса воздействия внешней среды на элементы и подсистемы СТС. Так, например, в моделях планирования, основанных на моделях стохастического программирования, как правило, делается предположение о том, что в результате воздействия внешней среды на элементы и подсистемы СТС появляются потоки отказов, представляющие собой случайные потоки пуассоновского типа, удобной вероятностной характеристикой которых является их интенсивность.

В том случае, если оказывается справедливой гипотеза о марковскости исследуемых процессов, становится возможным аналитическое описание моделей управления структурной динамикой СТС в условиях стохастического воздействия внешней среды.

Однако следует подчеркнуть, что даже при условии, когда известны все необходимые числовые характеристики случайной булевой функции, описывающей возможный сценарий возмущающих воздействия внешней среды, а также числовые характеристики законов распределения длительностей выполнения операций взаимодействия и соответствующих макроопераций, выполняемых в СТС, в конечном итоге процедуры

* Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05–07–90088, № 10-07-00311, 10-08-90027-Бел_а, 11-08-01016, 11–08-00641), Института системного анализа РАН (проект 2.3).

поиска аналитических решений, как в задачах анализа функционирования СТС, так и в задачах выбора управляющих воздействий, значительно усложняются, особенно в условиях существенного увеличения размерности рассматриваемых задач УСД.

Многочисленные исследования, проведённые в данной области, показали [5–10], что учёт факторов неопределённости в моделях УСД СТС, вызванных различными причинами (критериальная неопределённость, возмущающие воздействия внешней среды и т.п.), целесообразно осуществлять в рамках полимодельной многоэтапной интерактивной процедуры в рамках соответствующей интегрированной системы поддержки принятия решений (ИСППР) [1, 7, 9, 12].

В указанных условиях выход из создавшегося положения связан с разработкой специального программно-математического обеспечения (СПМО) УСД СТС в рамках соответствующей ИСППР, которая представляет собой многомодельный иерархический комплекс, описывающий с требуемой степенью детализации процесс функционирования СТС и позволяющий решать разнообразные задачи анализа и оптимального выбора в различных условиях обстановки. Проводимая в ИСППР «сильная» интеграция аналитических, имитационных, логико-алгебраических, логико-лингвистических моделей, при которой происходит взаимная компенсация недостатков каждого из указанных выше классов моделей, позволяет получать качественно новые результаты при УСД СТС по сравнению с ранее существовавшими подходами.

Алгоритмы оценивания устойчивости программ управления СТС

Важная роль в решении перечисленных задач адаптационного планирования применения СТС отводится этапу оценивания устойчивости сформированных программ управления (планов применения) СТС. Анализ показывает, что в зависимости от состава и структуры исходных данных, их достоверности и определённости может быть предложено несколько вариантов процедур оценивания устойчивости программ управления (ПрУ) СТС. Рассмотрим три наиболее характерных варианта задания исходных данных (ИД): детерминированные ИД (вариант 1); стохастические ИД (вариант 2); ИД, заданные интервально (вариант 3).

В работах [4–9] было показано, что при задании стохастических ИД (вариант ИД 2), как и в варианте 1, для каждого полученного плана $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$ имитируются варианты целенаправленного воздействия внешней среды на элементы и подсистемы СТС, а также имитируются процессы оперативного управления в СТС на этапе применения. Однако в этом случае с максимальной полнотой воссоздаются все факторы неопределённости, связанные с действиями внешней среды. При этом для получения статистически значимых характеристик устойчивости планов применения СТС необходимо проведение многократных машинных экспериментов. В целях сокращения времени реализации указанных экспериментов предлагается в рамках создаваемой ИС и соответствующего СПМО использовать разработанные к настоящему времени высокоэффективные методы понижения дисперсии результатов моделирования [9–11].

Анализ показывает, что для стохастических ИД в качестве основного показателя, с помощью которого оценивается устойчивость комплексных планов применения СТС, целесообразно принять статистическую оценку вероятности выполнения целевой задачи, стоящей перед СТС на интервале планирования $(T_0, T_f]$:

$$\tilde{P}\left(\left\|\mathbf{x}_i^{(s)}(T_f) - \mathbf{x}_i^{(p)}(T_f)\right\| < \varepsilon_3^{(p)}\right), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_i^{(s)}(T_f)$ – случайный вектор, характеризующий состояние выполнения целевых задач СТС в конце интервала планирования в случае стохастических целенаправленных воздействий внешней среды на $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$.

В этом случае в соответствии с принципом допустимой гарантии [7, 10] условие устойчивости планов применения СТС может быть записано в следующем виде:

$$\tilde{P} \left\{ \left\| \mathbf{x}_i^{(s)}(T_f) - \mathbf{x}_i^{(p)}(T_f) \right\| < \varepsilon_3^{(p)} \right\} \geq \tilde{P}_g^{(1)}, \quad (2)$$

$$\tilde{\tilde{P}} \left\{ \left| \hat{J}_{il}^{(s)} - J_{il}^{(p)} \right| < \varepsilon_{4l}^{(p)} \right\} \geq \tilde{\tilde{P}}_{gl}^{(2)}, \quad (3)$$

где $\tilde{P}_g^{(1)}$, $\tilde{\tilde{P}}_{gl}^{(2)}$, $\varepsilon_3^{(p)}$, $\varepsilon_{4l}^{(p)}$ – заданные величины.

При проведении комплексного планирования возможны ситуации, когда ещё до решения задачи планирования может заранее задаваться необходимый уровень устойчивости планов в виде следующих условий [7, 10]:

$$P\{\hat{z}_n \geq z_\alpha\} = \alpha, \quad (4)$$

где z_α , α – заданные величины; $\hat{z}_n = \rho(\hat{\mathbf{x}}_i^{(s)}(T_f), \hat{\mathbf{x}}_i^{(p)}(T_f))$ – функция случайного вектора, позволяющая оценить отклонение возмущённой фазовой траектории (её i -го варианта) $\mathbf{x}_i^{(s)}(t)$ от плановой траектории $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$ в конце интервала планирования. Из соотношения (4) следует, что

$$z_\alpha = F_z^{-1}(1 - \alpha), \quad (5)$$

где $F_z^{-1}(1 - \alpha)$ – обратная функция к функции распределения $F_{z_i}(z_i)$ при значении аргумента, равного $(1 - \alpha)$ (квантиль распределения $F_{z_i}(z_i)$).

Тогда при оценке и выборе устойчивых к возмущающим воздействиям планов применения СТС необходимо наиболее пригодную альтернативу выбирать исходя из условия

$$z_\alpha(\mathbf{u}_i(t)) \geq z_g, \quad (6)$$

где z_g – допустимый уровень гарантированного (с вероятностью α) результата, связанного с отклонением $\mathbf{x}_i^{(s)}(T_f)$ от $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$.

Наряду с вышеперечисленными показателями устойчивость программ управления структурной динамикой СТС можно косвенно оценить, используя следующую целевую функцию [7, 10]:

$$M(J_{gi}^{(p)} - J_{fi}^{(s)}), \quad (7)$$

где M – математическое ожидание оценочной функции $(J_{gi}^{(p)} - J_{fi}^{(s)})$; $J_{gi}^{(p)}$ – обобщённый показатель эффективности применения СТС, полученный в результате свёртки

$J_{gi}^{(p)} = \left\| J_{1i}^{(p)}, \dots, J_{8i}^{(p)} \right\|_{t=T_f}^T$; $J_{fi}^{(s)}$ – показатель, с помощью которого оцениваются потери,

образуемые на этапе имитации функционирования СТС и обусловленные влиянием возмущающих воздействий на $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$ и необходимостью выбора регулирующих воздействий (дополнительным расходом ресурсов СТС), направленных на устранение указанных возмущений. В этом случае среди альтернативных планов применения СТС $\langle \mathbf{x}_i^{(p)}(t), \mathbf{u}_i^{(p)}(t) \rangle$, $i = 1, \dots, n$, удовлетворяющих условиям (2), (3), в качестве наилучшего плана (с точки зрения устойчивости к возмущающим воздействиям) следует выбрать тот план, у которого показатель (6) принимает максимальное значение.

Наряду с показателем (6) в качестве косвенных показателей оценки устойчивости планов могут быть приняты [7, 10]: вероятность того, что к некоторому моменту времени план не придётся корректировать; математическое ожидание момента времени, когда возникает необходимость коррекции плана; математическое ожидание числа коррекций плана на некотором временном промежутке.

Следует отметить, что в том случае, когда компоненты вектора $x_i^{(p)}(t)$ являются нечёткими переменными с заданными функциями принадлежности, по аналогии с вышеизложенным могут быть предложены соответствующие показатели устойчивости планов [7, 9, 10].

При интервальном задании ИД (вариант 3) будем предполагать, что область допустимых возмущающих воздействий $\Xi(x(t), t)$ будет описываться следующими соотношениями:

$$\xi_j^{(1)}(t) \leq \xi_j(t) \leq \xi_j^{(2)}(t), \quad j = 1, \dots, m, \quad (8)$$

где $\xi_j^{(1)}$, $\xi_j^{(2)}$ – соответственно заданные векторные функции, определяющие минимальные и максимальные значения возмущающих воздействий, которые могут появиться на этапе реализации каждого фиксированного плана применения СТС ($u_i(t)$, $t \in (T_0, T_f]$, $i = 1, \dots, n$) в рамках того или иного сценария воздействия внешней среды на СТС ($\xi_j(t)$, $t \in (T_0, T_f]$, $j = 1, \dots, m$). Пусть задано некоторое начальное состояние СТС $x(T_0)$ (см. (8)) и рассматривается некоторый фиксированный план её функционирования $u_i(t)$. Тогда указанным векторам и области возмущающих воздействий (23) для фиксированного сценария $\xi_j(t)$ соответствует область (множество) возможных значений фазовых переменных модели (1)–(2), т.е. множество различных фазовых траекторий.

Назовём эту область (множество) областью (множеством) достижимости динамической системы (СТС) вида (1)–(2) под воздействием возмущений и обозначим её следующим образом:

$$D_x^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i). \quad (9)$$

Множеству $D_x^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i)$ в пространстве состояний соответствует множество точек (область) в пространстве значений показателей, оценивающих эффективность и устойчивость функционирования СТС, которое мы обозначим как

$$D_j^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i). \quad (10)$$

Для удобства и наглядности дальнейшего изложения рассмотрим только два компонента векторного показателя (10), которые соответствуют показателям результативности (J_1) и ресурсоёмкости (J_2) процесса функционирования СТС. В этом случае можно при геометрическом описании области достижимости (9) перейти от полярной системы координат к декартовой (см. рис. 1).

На рис. 1 показана область достижимости (9) для сокращённого вектора показателей эффективности и устойчивости функционирования СТС вида

$$J = \|J_1, J_2\|^T. \quad (11)$$

Пусть заданы допустимые границы изменений значений частных показателей результативности и ресурсоёмкости процесса функционирования СТС в виде следующих соотношений:

$$J_{a1} \leq J_1 \leq J_{b1}; \quad (12)$$

$$J_{a2} \leq J_2 \leq J_{b2}, \quad (13)$$

определяющих в пространстве показателей некоторую область P_J (см. рис. 1).

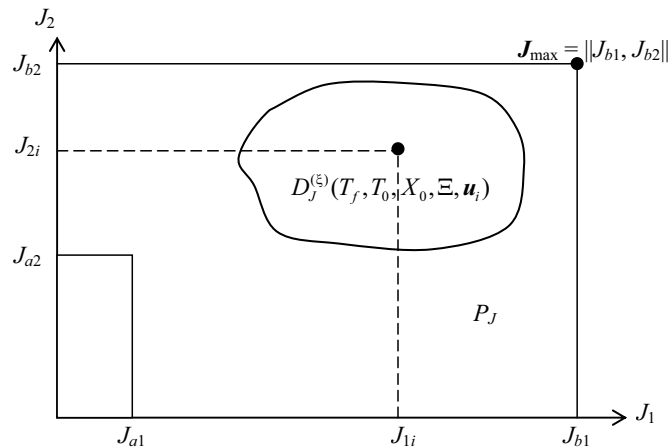


Рис. 1

В работах [1, 3, 4, 9, 11] показано, что если для некоторого фиксированного плана функционирования $u_i(t)$, ($i = 1, \dots, n$), подверженного влиянию возмущающих воздействий $\xi_j(t)$ вида (13), выполняются условия

$$D_J^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i) \subset PJ, \quad (14)$$

то программа управления $u_i(t)$ (план функционирования СТС) устойчива к воздействию возмущений $\xi_j(t)$. Другими словами, возможные отклонения значений показателей качества функционирования СТС вида J_1, J_2 , вызванные возмущениями $\xi_j(t)$, являются допустимыми.

Таким образом, для того чтобы оценить устойчивость $u_i(t)$ плана работы СТС к воздействию тех или иных возмущений $\xi_j(t)$, в случае их интервального задания, необходимо научиться строить соответствующие этим возмущениям области достижимости (ОД). В докладе представлены основные методики построения и аппроксимации ОД применительно к задаче оценивания устойчивости планов применения космических средств, осуществляющих управление системой "ГЛОНАСС".

Заключение

Исследования показали, что в целом учёт факторов неопределённости при управлении СТС должен осуществляться в несколько этапов и включать в себя [2, 7, 10, 12, 17]: адаптацию параметров и структуры моделей, алгоритмов УСД СТС к прошлому и текущему состоянию объектов управления (ОУ), управляющих подсистем (УП) и внешней среды; имитацию условий реализации плана с учётом различных вариантов организации оперативного управления элементами и подсистемами СТС в конкретных ситуациях; структурную и параметрическую адаптацию плана, моделей и алгоритмов СПМО УСД СТС к возможным (прогнозируемым на имитационных моделях) состояниям ОУ, УП и среды. В этом случае уже имеются основания говорить не об оптимизационном, а об адапционном планировании применения СТС. Важную роль при реализации указанной технологии должны играть разработанные комбинированные алгоритмы оценивания устойчивости программ управления СТС.

Литература

1. **Васильев С. Н.** От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001. № 1. С. 5–22; № 2. С. 5–24.
2. **Воробьев С. Н., Уткин В. Б., Балдин К. В.** Управленческие решения: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003.
3. **Воронов А. А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука, 1985.
4. **Жук К. Д., Тимченко А.А., Доленко Т. И.** Исследование структур и моделирование логико-динамических систем. Киев: Наукова думка, 1975.
5. Имитационное моделирование производственных систем / **А.А. Вавилов, Д.Х. Имаев, В.И. Плескунин и др.** М.: Машиностроение, 1983.
6. **Калинин В. Н., Соколов Б. В.** Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 56 – 61.
7. Методы организации адаптивного планирования и управления в экономико-производственных системах / **В.А. Забровский, Ю.В. Копейченко, В.И. Скурихин и др.** Киев: Наукова думка, 1980. 272 с.
8. Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдусевский (пред.) и др. Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988.
9. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
10. **Полляк Ю. Г.** Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. М.: Сов. радио, 1971.
11. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. №5. С. 103–117.
12. Технология системного моделирования / **Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.**; Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. М.: Машиностроение, 1988.
13. **Тятюшкин А. И.** Многометодная технология для расчета оптимального управления // Теория и системы управления. 2003. №3. С. 45–51.
14. **Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К.** Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993.