УДК 629.7.036.54-63

МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ФОРМАЛЬНОГО УЧЕТА НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ В ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.К. Завадский, В.П. Иванов, Е.Б. Каблова, Л.Г. Кленовая

Для класса терминальных систем управления рассмотрены два подхода к заданию априорной информации и формальному учету неопределенности априорных данных. В первом из них задается стохастическая модель системы байесовского типа с частично неизвестными вероятностными характеристиками случайных возмущений, во втором — для задач управления, в которых неизвестны порядок уравнений объекта и класс случайных возмущений, задается семейство моделей системы, ранжированных по уровню сложности,

Ключевые слова: неопределенность априорных данных, терминальное управление, бортовые системы.

ВВЕДЕНИЕ

Классические методы синтеза систем автоматического управления базируются на учете априорной информации о проектируемой системе — уравнений объекта, канала измерения и исполнительной части, уравнений, описывающих класс возмущающих факторов, вероятностных характеристик возмущений и помех. При проектировании реальной системы разработчик, как правило, сталкивается с тем, что необходимая априорная информация известна лишь частично, т. е. наблюдается неопределенность информации об отдельных частях системы или некоторых характеристиках.

В настоящей работе рассматриваются методы и способы формального учета неполноты априорной информации о характеристиках объекта управления, возмущающих факторов и помех в каналах измерения применительно к системам терминального управления. Основное назначение терминальных систем состоит в приведении объекта управления в заданное конечное состояние. Наиболее широко терминальные системы применяются в ракетно-космической технике. Априорная информация об условиях эксплуатации бортовых терминальных систем, как правило, содержит элементы неопределенности.

1. ХАРАКТЕР АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ПОНЯТИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЕЕ ЗАДАНИЯ В ОСНОВНЫХ ПОДХОДАХ К СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В теории управления развивается ряд подходов к синтезу систем в условиях неопределенности априорных данных. Характер используемой априорной информации, неполнота ее задания и понятие неопределенности априорных данных трансформируются в зависимости от классов рассматриваемых систем и аппарата, применяемого для их описания. Соответствующие формальные постановки задач отличаются способами учета неопределенности априорной информации в описании системы.

В теории инвариантности ставится задача обеспечения независимости выхода системы управления от внешнего возмущающего воздействия в предположении, что внешнее возмущение может описываться любой функцией времени [1]. Решение задачи абсолютной инвариантности возможно при наличии двух каналов передачи возмущающего воздействия [2] и в случаях, когда возмущающее воздействие измеряется. В одноконтурных системах, если внешнее воздействие не измеряется, полная компенсация возмущения требует реализации в обратной связи бесконечно большого коэффициента усиления [3].

Использование информации о классе возмущающих функций, описывающих возмущения, дает возможность сформировать условия избирательной или селективной инвариантности системы к возмущению заданного класса на основе метода $K(D)$-изображения возмущающей функции [4, 5].

Внешнее возмущение может также описываться в виде предсказывающего фильтра и полинома поглощения — дискретного аналога $K(D)$-изображения [6], однородным дифференциальным уравнением либо его решением в виде линейных комбинаций базисных функций (см., например, работу [7]).

Физическая основа достигаемого эффекта селективной инвариантности состоит в возможности восстановления вида функции, описывающей возмущение, по наблюдениям выходной координаты и парирования воздействия возмущения на систему.

В условиях, когда произвольно, в широких пределах, изменяются характеристики объекта, свойство инвариантности может быть обеспечено на основе принципов построения беспоисковых самонастраивающихся систем [8].

В стохастических задачах управления для случайных параметров уравнений объекта, возмущений и помех могут быть заданы априорные законы распределения вероятностей и параметры этих законов распределений (математические ожидания, дисперсии, параметры, характеризующие зависимость значений случайного процесса и нестационарность его изменения во времени). Задание такого рода априорной информации позволяет формулировать байесовские стохастические постановки задач синтеза [9]. Неопределенность априорной информации в стохастических задачах управления может быть связана с неизвестными распределениями случайных реализаций возмущений и помех [10], а также с параметрами этих распределений. Физическая основа раскрытия неопределенностей заключается в идентификации неизвестных случайных характеристик систем. Методы идентификации развиваются как в стохастической теории управления, так и в теории адаптивных систем.

Широкий круг задач адаптации позволяет решать класс алгоритмов, построенных на основе известного в статистике метода стохастической аппроксимации [11]. В таких алгоритмах используется минимальный уровень априорных знаний о системе, налагаются нежесткие ограничения на класс адаптируемых стохастических процессов, однако скорость их сходимости низкая.

В ряде ситуаций, когда идентификация системы невозможна, при описании системы можно исходить из пессимистической оценки в условиях функционирования системы и использовать минимаксный подход при синтезе алгоритма управления. Минимаксные и минимаксно-статистические принципы разрешения неопределенности в априорной информации используются при решении задач робастного синтеза [12].

Для класса бортовых терминальных систем, объекты управления которых весьма инерционны, а процессы на выходе таких систем принадлежат к типу низкочастотных случайных процессов, наиболее адекватен следующий подход в задании априорной информации и определении характера ее неопределенности.

Предполагается, что полная априорная информация может быть задана для стохастической модели системы байесовского типа, относительно которой реальная система может флюктуировать. Флюктуация вызывается неопределенными факторами, относительно которых имеются сведения только общего типа.

Возможны также более сложные ситуации, когда для описания системы не удается однозначно задаться формальной моделью динамического объекта, возмущений и помех. Для этих ситуаций требуется другой подход в задании априорной информации, предусматривающий формирование возможных вариантов формального описания системы.

2. ОПИСАНИЕ ТЕРМИНАЛЬНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.1. Априорное описание, используемое при проектировании системы, и основные факторы неопределенности априорной информации

Объект управления терминальной системы, как правило, описывается в фазовом пространстве системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = f(x, w, \nu, t), \quad t \in [0, t_{J+1}], \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где x — вектор фазовых координат объекта управления; x_0 — вектор их начальных значений; t — текущее время; w — вектор управляющих воздействий; ν — вектор возмущений, представляемый векторным случайным процессом; f — заданная вектор-функция; t_{J+1} — терминальный момент времени, соответствующий окончанию работы терминальной системы.

Управляющие воздействия в терминальных системах, как правило, выбираются из класса кусочно-непрерывных вектор-функций вида

$$w = w(u_j, t) + \nu_{ju}, \quad t \in [t_j, t_{J+1}], \quad (2)$$

где u_j — вектор параметров программы управления (2), значения которых остаются неизменными на интервале $[t_j, t_{J+1})$, $j = 1, 2, ..., J + 1$, — последовательность дискретных моментов времени, ν_{ju} — векторный дискретный белый шум, характеризующий ошибки реализации управления.

Случайные возмущения аппроксимируются моделью тренда, аддитивно дополненной дискретным белым шумом:

$$\nu(t) = \eta_\nu(t)V_\nu + \nu_{j\text{об}}, \quad t \in [t_j, t_{j+1}], \tag{3}$$

где $\eta_\nu(t)$ — матрица известных функций, V_ν — вектор случайных параметров модели тренда, $\nu_{j\text{об}}$ — векторный дискретный белый шум в объекте.

В задачах управления выведением ракет-носителей с помощью уравнений (3) описываются, например, возмущения, возникающие из-за аэродинамических воздействий, случайных отклонений удельной тяги двигательной установки, коэффициента соотношения расходов компонентов топлива, начальной и конечной массы ступени, изменения температуры компонентов и других факторов.

Исполнительная часть терминальной системы содержит, как правило, несколько исполнительных органов, реализующих векторное управление $w(u_j, t)$, и описывается статическим звеном. Обозначим через V_u вектор случайных отклонений коэффициентов усиления исполнительных органов системы.

Устройства измерения в терминальных системах являются значительно более быстродействующими, чем объекты управления терминальных систем, и обычно представляются статическими звеньями $y_j = Y_{jæ}(x_j, æ_j)$, $j = 1, 2, ..., J$, где y_j — вектор измеренных значений фазовых координат объекта в дискретный момент времени j; $Y_{jæ}$ — заданная вектор-функция; $æ_j$ — значение случайного вектора ошибок измерения в дискретный момент времени j.

Последовательность случайных ошибок измерения $æ_j$, $j = 1, 2, ..., J$, представляется моделью, сформированной в виде суммы тренда и дискретного белого шума:

$$æ_j = \eta_h(t_j)\theta + h_j, \tag{4}$$

где $\eta_h(t_j)$ — матрица известных функций, θ — вектор случайных параметров модели тренда, h_j — векторный дискретный белый шум.

С учетом модели (4) уравнение измерительной части системы записывается в виде:

$$y_j = Y_j(x_j, \theta, h_j), \quad j = 1, 2, ..., J. \tag{5}$$

В связи с дискретностью управления и измерений для синтеза управления используется описание объекта (1) в виде конечно-разностных уравнений:

$$x_j = F_j(x_{j-1}, u_{j-1}, V, \nu_{j-1}), \quad j = 1, 2, ..., J + 1. \tag{6}$$

Здесь x_j — вектор координат состояния объекта; F_j — известная вектор-функция своих аргументов; $V = (V_\nu, V_u)$ — расширенный вектор случайных параметров; ν_{j-1} — вектор случайных последовательностей типа белого шума, включающий в себя $\nu_{(j-1)\text{об}}$, $\nu_{(j-1)u}$.

В терминальных системах цель управления задается краевыми условиями $\phi_l(x(t), t) = 0$, $l = 1, 2, ..., L + 1$, где ϕ_l — заданная скалярная функция.

В качестве терминального момента t_{J+1} принимается момент выполнения одного, например, последнего из краевых условий. Для остальных краевых условий в момент t_{J+1} определяется вектор невязок $z = \{z_l = \phi_l(x(t_{J+1}), t_{J+1}), l = 1, 2, ..., L\}$.

Основная задача синтеза терминального управления заключается в минимизации вектора невязок. Принцип действия терминальной системы состоит в следующем. В каждый дискретный момент j прогнозируется вектор невязок при известном значении вектора фазовых координат $x(t_j)$ или его оценки по результатам измерений и фиксированном управлении $w(u_{j-1}, t)$, $t \in [t_j, t_{J+1}]$. По результатам этого прогноза формируется скорректированная программа управления $w(u_j, t)$, $t \in [t_j, t_{J+1}]$, приводящая систему в заданное конечное состояние. По сути дела, каждый раз коррекции подвергается вектор параметров u_j программы управления, с учетом новой информации о состоянии системы, содержащейся в векторе текущих измерений фазовых координат объекта.

Задача синтеза терминальной системы состоит в выборе формального правила (алгоритма) определения вектора параметров u_j в соответствии с изложенным принципом действия. Значения u_j выбираются из допустимого множества U, учитывающего ограничения по эффективности регулирующих органов системы. Ограничения накладываются также на координаты системы $x(t) \in X(t)$. При постановке задачи синтеза терминальной системы учитывается случайный характер возмущающих факторов и ошибок измерения. Качество работы системы, максимизируемое в процессе синтеза, определяется вероятностными характеристиками невязок краевых условий.

Полная априорная информация о системе заключена в правых частях уравнений объекта и каналов измерения, краевых условиях, ограничениях на управление и координаты, моделях возмущающих факторов и погрешностей измерения, законах распределения случайных начальных условий x_0 и величин V, ν_j, θ и h_j.

Модели функционирования системы и принятые законы распределения случайных факторов позволяют сформулировать байесовскую постановку стохастической задачи синтеза системы.

Для упрощения задачи синтеза искомый алгоритм принудительно разбивается на алгоритмы оценивания фазовых координат в соответствии с принципом фильтрации погрешностей измерения, прогнозирования вектора невязок и формирования параметров u_j программы управления. Соответственно принятому допущению, общая задача синтеза распадается на самостоятельные подзадачи. При синтезе алгоритма оценивания фазовых координат используются дискретные модели объекта и измерительной части системы. Непрерывная модель объекта используется при прогнозировании конечного состояния системы на основе процедуры численного интегрирования.

Однако при проектировании бортовых систем, как правило, не удается получить априорную информацию в полном объеме. Практически каждая новая разработка, направленная на совершенствование характеристик системы, связана с малоизученными нововведениями. Неопределенность априорной информации порождается сложностью динамических процессов, например, для объектов ракетно-космической техники, сложностью процессов, определяющих колебания жидкости в баках ракеты-носителя, процессов, протекающих в жидкостных ракетных двигателях, неточностью знания гравитационного поля, неполнотой знаний физико-химических процессов, вызывающих погрешности измерения уровней криогенных жидкостей в баках и др. Законы распределения и их параметры, которые задаются на основании экспериментальных данных, полученных при эксплуатации прототипов проектируемой системы, также содержат элементы неопределенности. Область реализаций неопределенных факторов может быть ограничена сведениями более общего типа.

В данной работе рассматриваются методы учета неопределенности априорных данных в формальных постановках задач синтеза, которые основываются на следующих двух подходах.

В соответствии с первым из них предполагается, что для описания объекта управления, каналов измерения и исполнения могут быть заданы приближенные уравнения и модели случайных процессов, описывающих возмущающие факторы и ошибки измерения. В модельное описание системы могут быть введены дополнительные неопределенные факторы, воздействие которых на объект и каналы измерения позволяет получать на выходе модели процессы, протекающие в реальной системе. Формальное описание неопределенных факторов ограничивается сведениями общего типа. Для каждого выбранного варианта построения алгоритма управления показатели качества оцениваются при наихудших реализациях неопределенных факторов.

Во втором подходе рассматриваются ситуации, когда в синтезируемой системе неизвестны или могут изменяться порядок уравнений объекта, класс случайных возмущающих процессов в объекте и в каналах измерения. В этих случаях для описания системы задается такая совокупность различных по сложности моделей функционирования системы, из которой всегда может быть выбрано априорное описание, адекватное реальной системе.

2.2. Методы формального учета неопределенных факторов с ограниченной областью изменений

Рассмотрим методы формального учета неопределенности априорных данных в рамках первого из сформулированных выше подходов применительно к задаче синтеза алгоритмов оценивания фазовых координат объекта. Пусть правые части в уравнениях системы (5) и (6) известны не полностью. В них могут быть выделены известные функции, приближенно описывающие объект управления и каналы измерения, и аддитивно дополняющие их составляющие, относительно которых могут быть заданы сведения более общего типа.

Для лучшего понимания метода формального учета неопределенных факторов рассмотрим линейную систему вида:

$$x_{j+1} = \sum_{n=1}^{N} a_{jn} V^{(n)} + \sum_{r=0}^{j} b_{jr} u_r + \phi_{j+1}^{0}(V^0),$$
$$j = 0, 1, ..., J, \qquad (7)$$
$$y_{j+1} = x_{j+1} + h_{j+1} + h_{j+1}^{0},$$

где x_{j+1}, y_{j+1}, h_{j+1}, h_{j+1}^{0} — скаляры, $V^{(n)}$ — случайные параметры.

Неопределенность описания системы вызывается возмущающим воздействием, описываемым неизвестной функцией $\phi_{j+1}^{0}(V^0)$ дискретного времени j и вектора параметров V^0, и дополнительными погрешностями h_j^0, $j = 1, 2, ..., J$, в канале измерения с неизвестными статистическими характеристиками.

Решается задача оценивания вектора параметров $V^{(n)}$, $n = 1, ..., N$ по результатам всех измерений, полученных к текущему моменту времени $j + 1$, и известных u_r, $r = 0, ..., j$. На основе оценок параметров $V^{(n)}$ определяется оценка текущего значения координаты объекта и прогнозируется ее конечное значение $\hat{x}_{J+1}$.

Рассмотрим различные случаи формального задания априорных сведений относительно неопределенных факторов $\phi^0_{j+1}(V^0)$ и h^0_j и учета этих сведений при синтезе алгоритмов оценивания.

1. Сведения о реакции объекта на эти возмущения ограничиваются данными о дисперсии и математическом ожидании $\phi^0_{j+1}(V^0)$. Пусть

$$D[\phi^0_{j+1}(V^0)] \leqslant D_{J+1}, \quad M[\phi^0_j(V^0)] = 0,$$
$$D(\Delta\phi^0_j) \leqslant D_j, \quad D_j > D_{j+1}, \tag{8}$$
$$\Delta\phi^0_j = \phi^0_{j+1}(V^0) - \phi^0_j(V^0), \quad j = 1, 2, ..., J.$$

Присутствие в правой части уравнения объекта члена $\phi^0_{j+1}(V^0)$ приводит к искажению оценок координаты объекта. При синтезе алгоритма оценивания будем исходить из наихудшего варианта влияния величины $\phi^0_{j+1}(V^0)$ на ошибку оценивания. Будем полагать, что при заданных ограничениях на дисперсию величины $\phi^0_{j+1}(V^0)$ неизвестная корреляционная матрица величин $\Delta\phi^0_j$, $j = 1, 2, ..., J$, максимизирует дисперсию ошибки прогнозирования конечного состояния $M(x_{J+1} - \hat{x}_{J+1})^2$ для каждого выбранного алгоритма вычисления оценки $\hat{x}_{J+1}$. Можно заранее предсказать, что учет неопределенных факторов в рассмотренной системе (7), (8) приведет к тому, что в искомом алгоритме оценивания увеличится удельный вес текущего измерения благодаря снижению весовых коэффициентов при измерениях, предшествующих текущему.

2. Рассмотрим случай, когда неопределенность содержится в данных о плотности распределения вероятностей $P(V^0)$. Пусть величина ϕ^0_{j+1} — известна, $P(V^0)$ — унимодальная функция и принадлежит классу усеченных распределений. Решение задачи оценивания параметров V^0 слабо зависит от выбора закона распределения в классе унимодальных распределений. В итоге, можно принять, что $P(V^0)$ — усеченное нормальное распределение.

Сведения о принадлежности распределения $P(V^0)$ к классу усеченных распределений оказывают существенное влияние на определение вида оптимальных оценок V^0 [13]. Учет ограничений в априорном распределении при синтезе алгоритмов оценивания даже для линейных задач и гауссовых возмущений приводит к нелинейным оценкам, которые приближенно могут быть представлены в виде последовательного соединения линейного алгоритма оценивания и нелинейного звена типа насыщения.

3. Пусть относительно последовательности ошибок измерения h^0_j, $j = 1, 2, ..., J$ заданы следующие сведения общего характера. Значения этих ошибок в моменты $j - K$, j — не коррелированны. Ограничена дисперсия величин h^0_j для всех j. При синтезе алгоритма оценивания параметров $V^{(n)}$ объекта (7) будем исходить из наихудшего варианта влияния ошибок h^0_k, $k = j - K + 1, ..., j - 1$, на ошибку оценивания. При наихудших сочетаниях корреляционной зависимости величин h^0_k, $k = j - K + 1, ..., j - 1$, использование в оценке параметров предыстории измерений $y_{i+1}, y_{i+2}, ..., y_{j-1}$, содержащих коррелированные дополнительные помехи, приведет к ухудшению точности оценивания. Рациональным может стать следующее решение — использовать в оценках возмущений только такие измерения, которые отделены друг от друга интервалами, большими K. Содержащиеся в этих измерениях погрешности измерения являются случайными независимыми величинами и могут быть отфильтрованы. Таким образом, наличие неопределенных факторов в канале измерения вносит свою особенность в построение алгоритма фильтрации.

4. Рассмотрим еще один способ формализации неопределенности априорной информации о возмущениях и погрешностях измерения. Пусть V^0 — скаляр. Будем считать, что значения V^0 и ошибок измерения h^0_j, $j = 1, 2, ..., J$, по абсолютной величине не превосходят, соответственно, некоторых известных величин V^0 и H_j, $j = 1, 2, ..., J$: $|V^0| \leqslant V_0$, $|h^0_j| \leqslant H_j$.

Будем условно рассматривать процесс синтеза системы (7) как некоторую игру между «природой», воздействующей на процесс синтеза выбором значений V^0 и h^0_j, $j = 1, 2,..., J$, и «конструктором», определяющим функцию оценок параметров $V^{(n)}$ от измеренных координат $y_1, y_2, ..., y_{j+1}$ и известных u_r, $r = 1, 2, ..., j$.

Изложенный минимаксный способ учета неопределенности априорной информации позволяет получить гарантированный результат при любых априорно допустимых сочетаниях возмущений и погрешностей измерения. Минимаксный подход правомочен для тех систем, работа которых связана с жизнеобеспечением человека в космосе или безаварийностью функционирования объекта в целом.

В бортовых системах терминального управления выведением ракет-носителей возможность воздействия непредвиденных заранее возмущающих факторов учитывается путем назначения менее напряженных по энергетике краевых условий, при которых обеспечивается гарантированное решение задачи. Могут ужесточаться ограничения на управление и координаты, гарантирующие безаварийность работы двигательной установки.

2.3. Описание терминальной системы семейством моделей, ранжированных по уровню сложности

В рассматривавшихся до сих пор случаях предполагалось, что проектировщику может быть задана модель основных структурных элементов разрабатываемой системы, относительно которой имеется полная априорная информация. Возможны ситуации, в которых не удается однозначно построить формализованную динамическую модель объекта управления и модель каналов измерения. В качестве примера можно привести задачи управления жидкостным водородным двигателем с многократным включением и задачи измерения запасов водорода в баке, которые характеризуются сложностью и неопределенностью моделей поведения жидкости и газа, усугубляющимися в условиях невесомости на пассивных участках полета разгонного блока. Другие примеры неоднозначности формального описания системы — нештатные ситуации, порождаемые аппаратными отказами [14].

Рассмотрим систему управления (5), (6), в которой векторы V и θ расширены включением параметров, позволяющих учитывать структурные изменения в описании системы (изменения порядка объекта, структуры каналов измерения). Некоторые из компонент векторов V и θ могут принимать целочисленные значения. Неопределенность описания системы связана с неизвестными значениями векторов параметров $V \in \omega_\nu$, $\theta \in \omega_\theta$. Пусть $\omega_{\nu m}$ и $\omega_{\theta n}$ — подмножества множеств ω_ν и ω_θ. Указанные подмножества могут образовываться, например, путем задания значений отдельных компонент векторов V и θ. Каждому подмножеству $\omega_{\nu m}$ и $\omega_{\theta n}$ поставим в соответствие вектор-функции F_{mj} и Y_{nj}, представляющие собой сужения вектор-функций F_j и Y_j на указанных подмножествах:

$$F_{mj}(x_{j-1}, u_{j-1}, V_m, \nu_{j-1}) = \\ = F_j(x_{j-1}, u_{j-1}, V, \nu_{j-1})|V \in \omega_{\nu m},$$

$$Y_{nj}(x_j, \theta_n, h_j) = Y_j(x_j, \theta, h_j)|\theta \in \omega_{\theta n},$$

где V_m и θ_n — подвекторы векторов V и θ. На основе последовательного сужения функций может быть сформировано семейство моделей системы, описываемых уравнениями:

$$x_j = F_{mj}(x_{j-1}, u_{j-1}, V_m, \nu_{j-1}), \quad j = 1, 2, ..., J + 1, \\ m = 1, 2, ..., M, \quad (9)$$

$$y_j = Y_{nj}(x_j, \theta_n, h_j), \quad j = 1, 2, ..., J, \\ n = 1, 2, ..., N_0. \quad (10)$$

Отметим, что в модели объекта (9) разностные уравнения для отдельных координат вектора x_j могут вырождаться в известные функции дискретного времени и параметров V_m. В этом случае уравнение объекта (9) может быть записано для вектора фазовых координат меньшей размерности. В модели измерительной части системы (10) измерения могут зависеть только от части фазовых координат x_j. При описании системы могут задаваться различные классы возмущающих воздействий в объекте (3) и в измерительной части системы (4).

Поясним, каким образом производится разделение моделей системы по уровням сложности. Рассмотрим две модели системы с порядковыми номерами m_1, m_2 для объекта и n_1, n_2 для измерителя. Пусть

$$\omega_{\nu m1} \subset \omega_{\nu m2} \text{ и } \omega_{\theta n1} \subset \omega_{\theta n2}. \quad (11)$$

В этом случае первая модель системы может быть получена из второй модели путем сужения подмножеств $V \in \omega_{\nu m2}$ и $\theta \in \omega_{\theta n2}$ до подмножеств $\omega_{\nu m1}$ и $\omega_{\theta n1}$.

Вторая модель системы более общая и в этом смысле более сложная по отношению к вытекающей из нее, как частный случай, первой модели системы.

В указанном смысле условие (11) задает отношение сложности на множестве моделей системы. На основе условия (11) семейство моделей системы может быть проранжировано по уровню сложности.

Не давая формального определения уровня сложности модели, можно связывать его с порядком уравнений объекта (размерностью вектора фазовых координат x_j) и моделей тренда возмущающих факторов, зависящих от векторов параметров V и θ. При фиксированном уровне сложности можно задавать различные модели системы, для которых не выполняется условие (11).

Предполагается, что в семействе моделей (9), (10) существует модель, адекватная реальной системе. Одна из задач синтезируемого алгоритма управления заключается в выявлении такой модели по результатам измерения фазовых координат объекта. Для каждой модели системы (9), (10) должны быть синтезированы алгоритмы оценивания фазовых координат, прогнозирования невязок краевых условий и управления.

Синтезируемую систему можно определить как систему с многоуровневой по сложности структурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование исходных данных для проектирования бортовых систем управления объектов ракетно-космической техники представляет собой один из важнейших этапов их разработки, определяющий структуру и формальное содержание алгоритмов управления. Практически каждая новая разработка, направленная на совершенствование характеристик системы, связана с малоизученными нововведениями. При формировании математических моделей систем, необходимых для синтеза, разработчик неизбежно сталкивается с проблемой неполноты априорной информации, неопределенности в задании характеристик объекта и элементов аппаратуры, используемых при построении алгоритмов управления и оценке динамики и точности систем. Проблема неполноты априорных данных особенно актуальна при синтезе отказоустойчивых систем управления.

В статье рассмотрены два подхода к проблеме синтеза в условиях неопределенности априорных данных. В рамках одного из них предложены методы и способы формального учета неопределенных факторов в математической моделе системы, основанные на представлении неизвестных возмущений случайными процессами с частично неизвестными вероятностными характеристиками. Предложенные методы позволяют синтезировать алгоритмы, которые сохраняют высокое качество управления, гарантированное при неблагоприятных статистических характеристиках неопределенных факторов.

В рамках другого подхода рассмотрены задачи управления, в которых неизвестны или могут изменяться порядок уравнений объекта, класс случайных возмущающих процессов в объекте и в каналах измерения. В этих случаях для формального описания системы предложено использовать семейство моделей, ранжированных по уровню сложности, из которого всегда может быть выбрано априорное описание, адекватное реальной системе. Описание разрабатываемой системы семейством моделей приводит к новой постановке задачи синтеза системы с многоуровневой по сложности структурой.

Изложенные подходы использовались при синтезе ряда бортовых систем управления средств выведения на орбиту космических аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Щипанов Г.В.* Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. —1939. — № 1. —С. 4—37.
2. *Кухтенко А.И., Петров Б.Н.* Структура абсолютно инвариантных систем и условия их физической осуществимости // В кн.: Петров Б.Н. Избранные труды. Т. I. Теория автоматического управления. — М.: Наука, 1983. — С. 197—223.
3. *Проскурников А.В., Якубович В.А.* Синтез регуляторов, обеспечивающих инвариантность системы управления // Тр. Научного семинара «70 лет теории инвариантности». Москва 2 июня 2008 г. — М., 2008, — С. 102—116.
4. *Кулебакин В.С.* О поведении непрерывно возмущаемых автоматизированных линейных систем // Доклады АН СССР. — 1949. — Т. 68. — № 5. — С. 73—79.
5. *Кулебакин В.С.* Операторное $K(D)$ изображение функций и его практическое применение // Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского. — 1958. — Вып. 695. — С. 59.
6. *Цыпкин Я.З.* Синтез робастных оптимальных систем управления объектами в условиях ограниченной неопределенности // Автоматика и телемеханика. — 1992. — № 9. — С. 139—159.
7. *Джонсон С.* Теория регуляторов, приспосабливающихся к возмущениям / В кн.: Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах. — М.: Мир, 1980. — С. 253—320.
8. *Принципы* построения и проектирования самонастраивающихся систем / Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова, С.Д. Земляков. — М.: Машиностроение, 1972. — 260 с.
9. *Стратонович Р.Л.* Существует ли теория синтеза оптимальных адаптивных, самообучающихся и самонастраивающихся систем // Автоматика и телемеханика. — 1968. — № 1. — С. 96—107.
10. *Васильев В.А., Добровидов А.В., Кошкин Г.М.* Непараметрическое оценивание функционалов от распределений стационарных последовательностей. — М.: Наука, 2004.
11. *Цыпкин Я.З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. — М.: Наука, 1968. — 399 с.
12. *Поляк Б.Т., Щербаков П.С.* Робастная устойчивость и управление. — М.: Наука, 2002.
13. *Бортовые* терминальные системы управления / Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов. — М.: Машиностроение, 1983. — 200 с.
14. *Иванов В.П., Каблова. Е.Б.* Принципы и методы построения отказоустойчивых алгоритмов бортовых систем управления. — Третья Междунар. конф. по проблемам управления / CD ROM. — М.: ИПУ, 2006. — С. 892—900.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Завадский Владимир Константинович — канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник,

Иванов Владимир Петрович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник,

Каблова Елена Борисовна — науч. сотрудник,

Кленовая Людмила Григорьевна — науч. сотрудник,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-87-60, ✉ vladguc@ipu.ru.