ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 10 (115)
октябрь
2010

Редакционный совет:
КУЗНЕЦОВ Н. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:
ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:
ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Выпускающий редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:
ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:
АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КАЛЯЕВ И. А.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛЕОНОВ Г. А.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАССАДКИН Ю. И.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Сельвесюк Н. И. Синтез управления для множества объектов на основе прямых и обратных задач оптимизации 2

Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Учет априорной информации при вариационном оценивании состояния нелинейных динамических систем и гауссовских ошибках измерений 7

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Часть II. Агентные решения в задачах контроля и управления 11

К 80-летию МЭИ (ТУ): МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Державин О. М., Сидорова Е. Ю. Исследование неавтономной сингулярно возмущенной динамической модели нелинейной системы на основе уравнений первого приближения 22

Колосов О. С., Лепешкин С. Н., Сухецкий А. П., Зимин В. А. Специфика параллельной работы динамических объектов и систем на общую нагрузку 27

Зверьков В. П., Кузищин В. Ф., Тощев М. С. Автоматизированная настройка каскадной системы регулирования с одновременной настройкой контуров 33

Павлюк Г. П., Шихин В. А. Построение областей заданного качества управления на основе статистического подхода: метод отсекающих моделей 39

Анисимов Д. Н., Колосов О. С., Вершинин Д. В., Зуева М. В., Цапенко И. В. Диагностика динамических объектов методами нечеткой логики с использованием параметров имитационных моделей 45

Журнал в журнале "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами. Часть I 52

Парамонов П. П., Сабо Ю. И., Шукалов А. В., Матвеев В. В., Распопов В. Я. Интегрированная навигационная система для малоразмерного летательного аппарата . 60

Сильвестров М. М., Котицын Л. О., Ползик В. П., Бегичев Ю. И. Формирование и исследование эргатического интерфейса информационно-управляющего комплекса перспективного многоцелевого вертолета 68

Пономаренко А. В., Кулабухов В. С., Халтобин В. М., Ключников А. А., Левин Д. Н. Исследования и испытания автоматизированных систем обучения для подготовки инженерно-технического и летного состава самолетов и вертолетов 74

Contents 79

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу: http://novtex.ru/mech, e-mail: mech@novtex.ru

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2010

УДК 517.938

Н. И. Сельвесюк, д-р техн. наук, нач. кафедры,
Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
г. Москва
selvesyuk@yandex.ru

Синтез управления для множества объектов на основе прямых и обратных задач оптимизации[1]

Предложен подход, позволяющий осуществлять синтез линейно-квадратичных регуляторов, обеспечивающих необходимое качество управления для множества объектов с различной динамикой. При этом параметры квадратичного функционала определяются решением обратной задачи оптимизации с использованием ограниченной специальной выборки из множества объектов. Все множество весовых матриц функционала описывается аналитически. Значение весовых матриц определяется как пересечение данных множеств путем численного решения задачи выпуклой оптимизации. Приведен пример синтеза управления для группы беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: *линейно-квадратичная задача оптимизации, обратная задача оптимизации, линейные матричные неравенства, уравнение Лурье-Риккати, канонизация матриц*

Введение

Одним из наиболее распространенных методов синтеза стабилизирующих регуляторов в классе линейных стационарных многомерных систем управления является оптимизация с использованием интегральных квадратичных функционалов [1]. Однако при практическом решении линейно-квадратичной задачи оптимизации возникает известная проблема выбора весовых матриц квадратичного функционала [2]. Выбор весовых матриц осуществляется путем их подбора на основании имеющихся сведений об объекте и последовательного уточнения на основе результатов моделирования или испытаний.

В предыдущих работах [3—4] предложены подходы, позволяющие избежать необходимости подбора весовых матриц функционала качества при условии, что имеется объект, для которого они известны. Один из подходов [3] основан на построении инвариантных множеств объектов, позволяющих использовать адаптирующие внутренние регуляторы вместо пересчета оптимальных регуляторов. Второй подход [4] предполагает прямой пересчет вариаций параметров объекта управления в вариации параметров управления без решения оптимизационной задачи. Однако множества объектов управления, допускающих подобные пересчеты параметров управления, имеют достаточно жесткую структуру. Поэтому они не всегда могут быть использованы на практике.

В статье предложен подход, позволяющий в ряде случаев избежать необходимости неформализованного подбора параметров линейно-квадратичного функционала. Пусть для линейного стационарного объекта с известными параметрами путем моделирования определены коэффициенты линейного закона управления регулятором, реализуемого в виде обратной связи по состоянию, стабилизирующего объект и обеспечивающего требуемое качество управления. Как правило, стабилизирующий линейный регулятор может быть представлен как результат решения линейно-квадратичной задачи с определенными параметрами функционала качества. Тогда путем решения обратной оптимизационной задачи из уравнений синтеза можно определить весовые матрицы функционала. Использование методов решения матричных алгебраических уравнений на основе канонизации матриц позволяет получить аналитическое решение обратной оптимизационной задачи. При этом существует множество решений (параметров весовых матриц), удовлетворяющих условиям существования линейно-квадратичной задачи. При наличии нескольких однотипных (одного порядка) объектов с известными регуляторами решение обратной оптимизационной задачи позволяет определить общие для данного семейства объектов параметры функционала, который характеризует желаемое качество управления. Полученные параметры функционала могут быть использованы при синтезе оптимального управления некоторым расширенным множеством однотипных объектов.

[1] Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-08-00012-а.

Постановка задачи

Дано некоторое множество $\Re^N$ автономных объектов управления одинакового порядка. Математическая модель каждого объекта управления описывается уравнениями линейной стационарной детерминированной многомерной системы

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i = \mathbf{A}_i\boldsymbol{x}_i + \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_i,\ \boldsymbol{x}_i(t_0) = \boldsymbol{x}_{i_0},\ \boldsymbol{x}_i \in \Re^n,\ \boldsymbol{u} \in \Re^m,$$

$$i = \overline{1, N}, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{x}_i$ — вектор состояния i-го объекта; $\boldsymbol{x}_{i_0}$ — начальное состояние i-го объекта; $\mathbf{A}_i$, $\mathbf{B}_i$ — известные постоянные вещественные матрицы, характеризующие динамику i-го объекта.

Для подмножества $\Re^M \in \Re^N$ полагается известной матрица передачи линейного регулятора по состоянию в обратной связи

$$\boldsymbol{u}_j = -\mathbf{K}_j\boldsymbol{x}_j,\ j = \overline{1, M}, \qquad (2)$$

который стабилизирует j-й объект и обеспечивает требуемое качество управления.

Также делается предположение, что регулятор (2) автономного объекта из множества $\Re^M$ принадлежит классу линейно-квадратичных регуляторов. Тогда его матрица передачи определяется выражением (индекс j далее опущен)

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}. \qquad (3)$$

Регулятор (3) стабилизирует любой объект из множества $\Re^M$ и обеспечивает минимум квадратичного функционала

$$J = 0{,}5\int_{t_0}^{\infty}[\mathbf{x}^{\mathrm{T}}(\tau)\mathbf{Q}\boldsymbol{x}(\tau) + \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(\tau)\mathbf{R}^{-1}\boldsymbol{u}(\tau)]d\tau, \qquad (4)$$

где $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ — весовые матрицы переменных состояния и сигналов управления соответственно, удовлетворяющие условиям: $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^{\mathrm{T}} \geqslant \mathbf{0}$, $\mathbf{R} = \mathbf{R}^{\mathrm{T}} > \mathbf{0}$; $\mathbf{P} = \mathbf{P}^{\mathrm{T}} > \mathbf{0}$ — единственное решение матричного алгебраического уравнения Лурье-Риккати

$$\mathbf{PA} + \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P} - \mathbf{PGP} + \mathbf{Q} = \mathbf{0},\ \mathbf{G} = \mathbf{BR}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}. \qquad (5)$$

Необходимо по известным параметрам управления объектами из множества $\Re^M \in \Re^N$ определить общие для множества параметры функционала (4) и применить их для синтеза управления другими объектами из множества $\Re^N$.

Решение обратной задачи оптимизации для автономного объекта

Решение обратной задачи оптимизации позволяет при известных параметрах автономного объекта управления ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$) и матрицы передачи регулятора $\mathbf{K}$ определить весовые матрицы $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ функционала (4), обеспечивающего требуемое качество управления.

В работе [4] приведено решение обратной задачи оптимизации для автономного объекта вида (1) при фиксированной матрице $\mathbf{R}$. Решение получено с использованием методов решения матричных алгебраических уравнений на основе канонизации матриц [5; 6, пункт 1.6.3]. Установлено, что при выполнении необходимых условий

$$(\overline{\mathbf{B}}^R)^{\mathrm{T}}\mathbf{RK} = \mathbf{0}; \qquad (6)$$

$$\mathbf{RKB} = \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}^{\mathrm{T}}\mathbf{R} \qquad (7)$$

существует множество матриц весовых коэффициентов $\mathbf{Q}$ квадратичного функционала (4), удовлетворяющих решению обратной задачи оптимизации для автономного объекта.

Условие (6) выполняется всегда, если матрица $\mathbf{B}$ имеет полный столбцевой ранг, что обычно имеет место на практике. Условие (7) требует проверки. Обеспечить его выполнение можно путем варьирования диагональными элементами матрицы $\mathbf{R}$.

Множество матриц весовых коэффициентов как результат решения обратной оптимизационной задачи описывается выражением

$$\{\mathbf{Q}\}_{\boldsymbol{\mu}} = -\{\mathbf{P}\}_{\boldsymbol{\mu}}\mathbf{A} - \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\{\mathbf{P}^{\mathrm{T}}\}_{\boldsymbol{\mu}} + \{\mathbf{P}\}_{\boldsymbol{\mu}}\mathbf{BR}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\{\mathbf{P}^{\mathrm{T}}\}_{\boldsymbol{\mu}}, \quad (8)$$

где $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}$ — симметричная матрица соответствующего размера, а множество симметричных решений $\mathbf{P} = \mathbf{P}^{\mathrm{T}}$ уравнения (5) при выполнении условий (6)—(7) имеет вид

$$\{\mathbf{P}\}_{\boldsymbol{\mu}} = (\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\widetilde{\ })\mathbf{RK} + \mathbf{K}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\widetilde{\mathbf{B}} - (\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\widetilde{\ })\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\widetilde{\mathbf{B}} + (\overline{\mathbf{B}}^L)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}\overline{\mathbf{B}}^L. \qquad (9)$$

Выше $\overline{\mathbf{M}}^L$, $\overline{\mathbf{M}}^R$, $\widetilde{\mathbf{M}}$ означают левый и правый делители нуля и сводный канонизатор матрицы $\mathbf{M}$ соответственно [6, пункт 1.6.1]. Данные матрицы удовлетворяют равенствам

$$\begin{bmatrix}\widetilde{\mathbf{M}}^L\\ \overline{\mathbf{M}}^L\end{bmatrix}\mathbf{M}[\widetilde{\mathbf{M}}^R\ \ \overline{\mathbf{M}}^R] = \begin{bmatrix}\mathbf{I}_r & \mathbf{0}_{r\times(n-r)}\\ \mathbf{0}_{(m-r)\times r} & \mathbf{0}_{(m-r)\times(n-r)}\end{bmatrix},$$

$$\widetilde{\mathbf{M}}^R\widetilde{\mathbf{M}}^L = \widetilde{\mathbf{M}},\ \mathbf{M}\widetilde{\mathbf{M}}\mathbf{M} = \mathbf{M}, \qquad (10)$$

из которых следуют их основные свойства. Здесь и далее $\mathbf{I}$ — единичная матрица соответствующего размера.

Определение пересечения множеств весовых матриц

Таким образом, для автономного объекта вида (1) с заданными параметрами ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$) линейный регулятор (2) с фиксированной матрицей передачи (3) может обеспечивать минимум некоторого множества квадратичных функционалов, порождаемого множеством весовых матриц $\{\mathbf{Q}\}_{\boldsymbol{\mu}}$. Возникновение данного множества обусловлено взаимосвязями между элементами вектора состояния объекта. Любой представитель данного множества удовлетворяет исходной оптимизационной задаче.

При наличии M объектов с известными параметрами управления решение обратной оптимизационной задачи для каждого из них позволяет получить совокупность множеств $\{\mathbf{Q}_j\}_{\boldsymbol{\mu}_j}$, $j = \overline{1, M}$. Пересечение данных множеств (при его существовании) дает матрицу весовых коэффициентов $\mathbf{Q}_0$ квадратичного функционала (4), который обеспечивает стабилизацию и некоторые общие показатели качества для каждого объекта из множества M с учетом его динамики.

Кроме того, в выражениях (8)—(9) симметричная матрица $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}$ должна выбираться таким образом, чтобы одновременно выполнялись условия

$$\{\mathbf{Q}\}_{\boldsymbol{\mu}} \geqslant 0 \text{ и } \{\mathbf{P}\}_{\boldsymbol{\mu}} > 0. \qquad (11)$$

Ввиду сложной структуры множеств (8) и (9), а также из-за наличия ограничений в виде неравенств (11) аналитическое решение задачи определения пересечения множеств $\{\mathbf{Q}_j\}_{\boldsymbol{\mu}_j}$ является затруднительным.

Однако с учетом того, что условия (11) представляют собой линейные матричные неравенства относительно симметричных матриц $\mathbf{P}$ и $\mathbf{Q}$, решение указанной задачи возможно с использованием численных методов выпуклой полуопределенной оптимизации [7].

Задачу численной оптимизации можно сформулировать следующим образом:

$$\min_{\boldsymbol{\mu}_j}\left\{\tau + \sum_{j=1}^{M}\|\mathbf{P}_j\| + \sum_{j=1}^{M}\|\mathbf{Q}_j\|\right\}. \qquad (12)$$

Здесь $\tau > 0$ — скалярная переменная, определяющая смысл оптимизации, т. е. характеризующая близость множеств $\{\mathbf{Q}_j\}_{\boldsymbol{\mu}_j}$ путем проверки основных условий задачи оптимизации

$$\sum_{i,j=1}^{M}(\mathbf{Q}_i - \mathbf{Q}_j) \leqslant \tau\mathbf{E},\ i \neq j, \qquad (13)$$

где $\mathbf{E}$ — матрица с единичными элементами размера $n \times n$.

Второе и третье слагаемые в критерии (12) представляют собой сумму квадратичных норм матриц $\mathbf{P}$ и $\mathbf{Q}$ соответственно. Использование этих слагаемых позволяет ограничить сигналы управления, формируемые квадратичными регуляторами.

Выполнение условий (11) обеспечивается введением в оптимизационную задачу (12) дополнительных линейных матричных неравенств

$$\mathbf{Q}_j \geqslant \mathbf{0},\ \mathbf{P}_j > \alpha\mathbf{I},\ j = \overline{1, M}, \qquad (14)$$

где $\alpha > 0$. Параметр α используется для повышения обусловленности решения при расчете квадратичных регуляторов.

Получение симметричных матриц $\mathbf{P}$ и $\mathbf{Q}$ в соответствии с выражениями (8) и (9) обеспечивается путем введения в оптимизационную задачу (12) условия

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}. \qquad (15)$$

Таким образом, численное решение оптимизационной задачи (12)—(15) позволяет определить точку пересечения $\mathbf{Q}_0$ множеств $\{\mathbf{Q}_j\}_{\boldsymbol{\mu}_j}$, $j = \overline{1, M}$, аналитические выражения для которых получены путем решения обратной задачи оптимизации (8)—(9). Так как множества $\{\mathbf{Q}_j\}_{\boldsymbol{\mu}_j}$ являются выпуклыми, отсутствие решения оптимизационной задачи (12)—(15) однозначно определяет отсутствие точки пересечения данных множеств. В этом случае необходимо рассматривать другое множество объектов с известными параметрами управления.

Оптимизационная задача (12)—(15) является задачей выпуклого полуопределенного программирования (SDP). Для численного решения таких задач разработан ряд вычислительных пакетов (SeDuMi, Yalmip, SDPT3, LMI Control Toolbox), реализуемых на базе математической системы MatLab. Новой и весьма эффективной разработкой в данной области является прикладной пакет cvx [8]. Он обладает высокой вычислительной эффективностью по отношению к задачам выпуклой оптимизации за счет использования ядра SDPT3. Простой интерфейс пакета позволяет формулировать задачи в виде, близком к их естественному математическому описанию. Пакет ориентирован на матричные вычисления и позволяет просто задавать симметричную структуру матриц при описании линейных матричных неравенств.

Пример 1 (методический). Выбор матрицы весовых коэффициентов $\mathbf{R}$ для обеспечения выполнения условия разрешимости (7).

Рассмотрим объект управления с известными параметрами и заданной матрицей передачи линейного регулятора по состоянию:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},\ \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0{,}2 & 1{,}4 & 0{,}2 \\ 0{,}38 & 0{,}1 & 2{,}48 \end{bmatrix}. \qquad (16)$$

Используемый регулятор обеспечивает стабилизацию объекта и следующее распределение полюсов замкнутой системы:

$$\lambda(\mathbf{A} - \mathbf{BK}) = \{-0{,}32\ \ -1{,}14\ \ -1{,}43\}.$$

Необходимо для объекта (16) определить элементы весовой матрицы $\mathbf{R}$ функционала (4) диагональной структуры

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & r_{22} \end{bmatrix},$$

обеспечивающие выполнение тождества (7).

Непосредственная подстановка показывает, что условие разрешимости (7) не выполняется и принимает вид уравнения

$$\begin{bmatrix} 0 & 0{,}2r_{11} - 0{,}1r_{22} \\ -0{,}2r_{11} + 0{,}1r_{22} & 0 \end{bmatrix} = 0. \qquad (17)$$

Решение уравнения (17) принимает вид условия $r_{22} = 2r_{11}$, выполнение которого обеспечивает удовлетворение тождества (7).

Пример 2. Синтез управления для множества однотипных объектов. Рассматриваются два легких беспилотных летательных аппарата (БЛА) массой 110 кг и 180 кг соответственно с известными математическими моделями. Уравнения движения для вертикального канала на режиме полета со скоростью 50 м/с имеют следующий вид:

- для первого БЛА

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\alpha}_1 \\ \dot{\omega}_{z1} \\ \Delta\dot{\vartheta}_1 \\ \Delta\dot{H}_1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -1{,}5 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1{,}8 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -50 & 0 & 50 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_1} \begin{bmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \omega_{z1} \\ \Delta\vartheta_1 \\ \Delta H_1 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -0{,}5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_1} \delta_{ст1}; \quad (18)$$

- для второго БЛА

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\alpha}_2 \\ \dot{\omega}_{z2} \\ \Delta\dot{\vartheta}_2 \\ \Delta\dot{H}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -1{,}2 & 1 & 0 & 0 \\ 0{,}2 & -0{,}3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -50 & 0 & 50 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_2} \begin{bmatrix} \Delta\alpha_2 \\ \omega_{z2} \\ \Delta\vartheta_2 \\ \Delta H_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -0{,}3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_2} \delta_{ст2}. \quad (19)$$

Здесь $\Delta\alpha$ и $\Delta\vartheta$ — приращения углов атаки и тангажа; ω_z — угловая скорость тангажа; ΔH — приращение высоты полета; $\delta_{ст}$ — отклонение стабилизатора (руля высоты).

Для каждого БЛА известно линейное управление по состоянию, обеспечивающее апериодические переходные процессы при управлении высотой полета. Матрицы передачи соответствующих регуляторов имеют значения

$$\mathbf{K}_1 = [2{,}41 \ \ -2{,}71 \ \ -8{,}14 \ \ -0{,}045];$$
$$\mathbf{K}_2 = [1{,}22 \ \ -6{,}32 \ \ -8{,}51 \ \ -0{,}045]. \qquad (20)$$

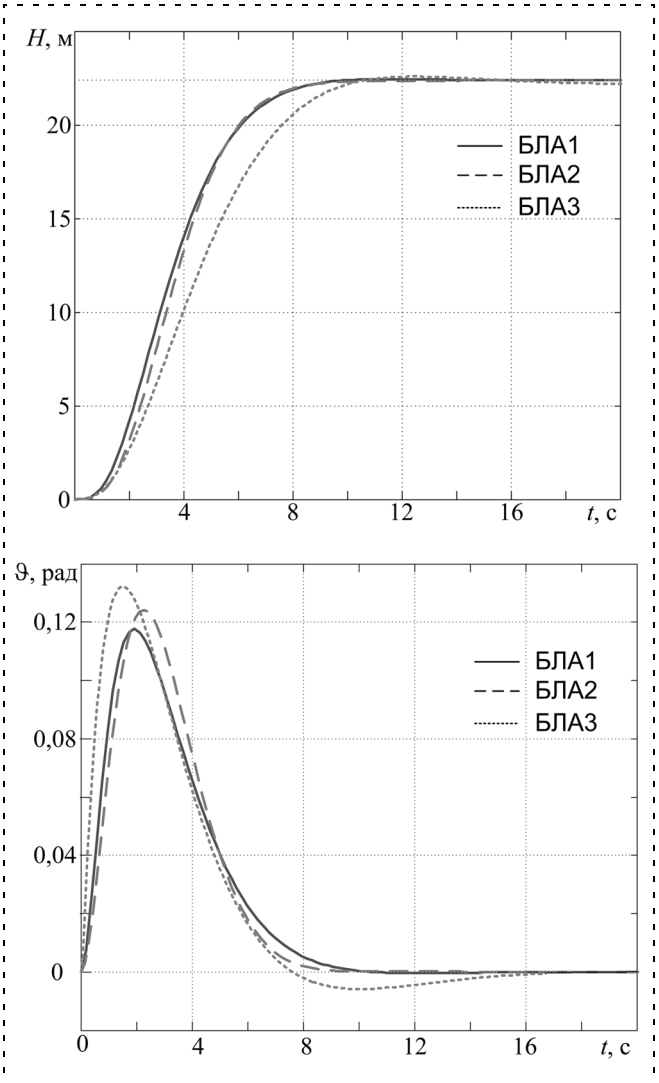
Проверка условий разрешимости (6)—(7) показывает их выполнение при произвольных значениях матрицы весовых коэффициентов **R**. Далее принимаем $\mathbf{R} = 1$.

Решение оптимизационной задачи (12)—(15) для объектов (18)—(19) существует и дает следующее значение общей матрицы весовых коэффициентов $\mathbf{Q}_0$ функционала (4):

$$\mathbf{Q}_0 = \begin{bmatrix} 2 & 0{,}15 & 3 & 0{,}025 \\ 0{,}15 & 4 & 3{,}15 & 0{,}05 \\ 3 & 3{,}15 & 10{,}3 & 0{,}02 \\ 0{,}025 & 0{,}05 & 0{,}02 & 0{,}002 \end{bmatrix}. \qquad (21)$$

Рассмотрим еще одну модель БЛА массой 500 кг с известной математической моделью. Уравнения движения для вертикального канала на режиме полета со скоростью 50 м/с имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\alpha}_3 \\ \dot{\omega}_{z3} \\ \Delta\dot{\vartheta}_3 \\ \Delta\dot{H}_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -0{,}41 & 1 & 0 & 0 \\ -1{,}64 & -14{,}07 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -50 & 0 & 50 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_3} \begin{bmatrix} \Delta\alpha_3 \\ \omega_{z3} \\ \Delta\vartheta_3 \\ \Delta H_3 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -4{,}07 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_3} \delta_{ст3}. \quad (22)$$



Графики переходных процессов

Для модели (22) рассчитаем линейно-квадратичный регулятор с использованием полученных выше матриц квадратичного функционала (4) $\mathbf{R}$ и $\mathbf{Q}_0$. Матрица передачи регулятора имеет значения

$$\mathbf{K}_3 = [4{,}44 \quad -0{,}86 \quad -9{,}86 \quad -0{,}045]. \qquad (23)$$

Графики переходных процессов трех БЛА по высоте и углу тангажа приведены на рисунке.

Из графиков следует, что использование известных регуляторов (20) и рассчитанного предложенным способом регулятора (23) обеспечивает апериодический характер переходного процесса по высоте и совпадение установившегося значения высоты. Различие в динамике (время регулирования) обусловлено различной массой рассматриваемых БЛА.

Заключение

Предложенный выше подход к определению параметров функционала оптимизации для линейно-квадратичной задачи позволяет решить важную практическую задачу. Для некоторого множества разнотипных объектов одинакового порядка с заданными параметрами и известным линейным управлением, обеспечивающим заданное качество управления, можно определить общее множество весовых матриц $\{\mathbf{Q}\}_{\boldsymbol{\mu}_0}$ или отдельный его элемент. Найденные параметры функционала качества затем можно использовать для синтеза оптимального управления объектами с другими параметрами, что позволит избежать процедуры неформализованного выбора параметров функционала качества путем многократного моделирования.

Список литературы

1. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 т. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
2. **Квакернаак Х., Сиван Р.** Линейные оптимальные системы управления / Пер. с англ. М.: Мир, 1977.
3. **Сельвесюк Н. И.** Использование адаптирующих регуляторов для синтеза оптимального управления множеством динамических объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 11. С. 8—12.
4. **Сельвесюк Н. И.** Адаптация параметров оптимального управления на основе прямых и обратных задач оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 8—12.
5. **Буков В. Н., Рябченко В. Н., Косьянчук В. В., Зыбин Е. Ю.** Решение линейных матричных уравнений методом канонизации // Вестник Киевского университета, сер. физико-математические науки. Вып. 1. Киев: Изд. Киевского нац. ун-та, 2002. С. 19—28.
6. **Буков В. Н.** Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во научной литературы Н. Ф. Бочкаревой, 2006.
7. **Баландин Д. В., Коган М. М.** Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: Физматлит, 2007.
8. **Grant M., Boyd S.** CVX: MatLab software for disciplined convex programming (web page and software). http://stanford.edu/~boyd/cvx, June 2009.

Издательство "Новые технологии"
начинает выпускать
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале будут освещаться состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваться достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Журнал распространяется только по подписке.
Оформить подписку можно через подписные Агентства
или непосредственно в редакции журнала.
Подписные индексы по каталогам:
"Роспечать" — **22765**; *"Пресса России"* — **39795**.

УДК 629.191

В. И. Миронов,
д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр.,
Ю. В. Миронов,
д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., директор,
Санкт-Петербургский институт
информатики и автоматизации РАН
mironov@yandex.ru

Учет априорной информации при вариационном оценивании состояния нелинейных динамических систем и гауссовских ошибках измерений

Рассматривается применение вариационного подхода для решения задач статистического оценивания параметров состояния нелинейных динамических систем по критерию максимума апостериорной вероятности при нормально распределенных ошибках измерений.

Ключевые слова: *статистическое оценивание, нелинейные динамические системы, априорная информация*

Введение

В процессе разработки, испытаний и эксплуатации образцов авиационной и ракетно-космической техники, а также других сложных автоматических и автоматизированных систем и комплексов различного целевого назначения часто приходится решать задачи оценивания параметров состояния и характеристик динамических систем по результатам измерений.

Наиболее сложные задачи оценивания возникают, в частности, при навигационно-баллистическом обеспечении полетов космических аппаратов (КА), при разработке систем автономной навигации, в ходе летных испытаний и т. д.

В настоящее время основными методами определения орбит КА являются методы, основанные на совместной обработке результатов наблюдений по полной выборке.

Созданная методология в основном базируется на непосредственном применении в динамических задачах оценивания прямых условий метода максимального правдоподобия (ММП) и метода наименьших квадратов [1—4, 7—9 и др.].

Вместе с тем, необходимо отметить, что методы теории оптимальной обработки измерений, как и методы теории оптимального управления, могут строиться и развиваться на основе использования вариационных условий оптимальности статистических оценок.

В работах авторов [5, 6] были рассмотрены вопросы обоснования указанного вариационного подхода к задачам статистического оценивания нелинейных динамических систем по критериям максимального правдоподобия и наименьших квадратов.

Данная статья посвящена применению вариационного подхода для учета априорной информации при решении задач статистического оценивания параметров состояния нелинейных динамических систем по критерию максимума апостериорной вероятности. Предполагается, что ошибки измерений имеют нормальное распределение.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу оценивания параметров движения динамического объекта, которая заключается в наилучшем в некотором смысле определении n-мерного вектора его исходного состояния $\boldsymbol{x}_0$ на заданный начальный момент времени $t = t_0$ по результатам измерений, проводимых в N точках t_i, заданных на интервале измерений $\tau = T - t_0$.

Задача. Пусть динамика объекта описывается векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \varphi(\boldsymbol{x}, t),\ \boldsymbol{x}(t_0) = \boldsymbol{x}_0,\ t \in [t_0,\ T].$$

Измерениям подвергается m-мерный вектор

$$\psi(t) = \psi[\boldsymbol{x}(t)].$$

Измеренное значение вектора ψ в момент t_i обозначим $\boldsymbol{y}(t_i) = \boldsymbol{y}_i$ и представим модель измерений в виде

$$\boldsymbol{y}(t_i) = \psi[\boldsymbol{x}(t_i)] + \boldsymbol{\delta}_i,\ i = 1(1)N;\ t_i \in [t_0,\ T].$$

Здесь $\boldsymbol{\delta}_i$ — m-мерный вектор случайных ошибок измерений, распределенный нормально с нулевым вектором математического ожидания и корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}$:

$$f(\boldsymbol{\delta}_i) = (2\pi)^{-1/2}|\mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}|^{-1/2}\exp\Big[-\frac{1}{2}\{\boldsymbol{y}(t_i) -$$

$$- \psi[\boldsymbol{x}(t_i)]\}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}^{-1}\{\boldsymbol{y}(t_i) - \psi[\boldsymbol{x}(t_i)]\}\Big].$$

Пусть также известна некоторая априорная информация о возможных значениях неизвестного вектора $\tilde{\boldsymbol{x}}_0$. Будем также считать, что эта информация задается априорной плотностью нормального распределения с математическим ожиданием $\boldsymbol{x}_0$ и корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\boldsymbol{x}_0}$:

$$f(\delta\boldsymbol{x}_0) =$$

$$= (2\pi)^{-1/2}|\mathbf{K}_{\boldsymbol{x}_0}|^{-1/2}\exp\Big[-\frac{1}{2}(\tilde{\boldsymbol{x}}_0 - \boldsymbol{x}_0)^{\mathrm{T}}\mathbf{K}_{\boldsymbol{x}_0}^{-1}(\tilde{\boldsymbol{x}}_0 - \boldsymbol{x}_0)\Big].$$

Составим далее выражение для условной апостериорной плотности вероятности возможных значений вектора $\boldsymbol{x}_0$. Согласно правилу Байеса имеем

$$f(\boldsymbol{x}_0/\boldsymbol{y}) = \frac{f(\boldsymbol{x}_0)\, W(\boldsymbol{y}/\boldsymbol{x}_0)}{f(\boldsymbol{y})},$$

где $f(\boldsymbol{y})$ — плотность вероятности случайного вектора измерений; $W(\boldsymbol{y}/\boldsymbol{x}_0)$ — функция максимального правдоподобия.

При принятых условиях о законе ошибок измерений

$$W(\boldsymbol{y}/\boldsymbol{x}_0) = \prod_{i=1}^{N} f_i(\boldsymbol{\delta}_i).$$

В качестве оптимальной оценки примем такое значение $\boldsymbol{x}_0$, которое максимизирует апостериорную плотность вероятности.

Если учесть, что плотность вероятности $f(\boldsymbol{y})$ не зависит от оцениваемых параметров, то в качестве критерия можно принять условие максимума показателя

$$I = f(\boldsymbol{x}_0)\, W(\boldsymbol{y}/\boldsymbol{x}_0)$$

или же условие максимума его логарифма

$$I_1 = \ln f(\boldsymbol{x}_0) + \ln W(\boldsymbol{y}/\boldsymbol{x}_0). \qquad (1)$$

В рамках рассмотренной выше задачи принятый показатель качества оценок (1) имеет смысл логарифмической функции правдоподобия. Поэтому выражение (1) можно записать как

$$I_1 = \ln f(\boldsymbol{x}_0) + I_2(\boldsymbol{x}_0),$$

где

$$I_2(\boldsymbol{x}_0) = \sum_{i=1}^{N} \rho_i\{\boldsymbol{y}(t_i),\, \psi[\boldsymbol{x}(t_i)]\},$$

$$\rho_i = \frac{1}{2}\{\boldsymbol{y}(t_i) - \psi[\boldsymbol{x}(t_i)]\}^{\mathrm{T}} \mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}^{-1}\{\boldsymbol{y}(t_i) - \psi[\boldsymbol{x}(t_i)]\},\ i = 1, ..., N,$$

или

$$I_1 = \sum_{i=0}^{N} \rho_i\{\boldsymbol{y}(t_i),\, \psi[\boldsymbol{x}(t_i)]\}, \qquad (2)$$

где

$$\rho_0 = \frac{1}{2}(\tilde{\boldsymbol{x}}_0 - \boldsymbol{x}_0)^{\mathrm{T}} \mathbf{K}_{\boldsymbol{x}_0}^{-1}(\tilde{\boldsymbol{x}}_0 - \boldsymbol{x}_0).$$

Оценка вектора $\boldsymbol{x}_0$, удовлетворяющая указанным условиям, является оптимальной по критерию максимума апостериорной вероятности.

Функции $\varphi(\boldsymbol{x}, t)$ и $\psi[\boldsymbol{x}(t_i)]$ будем считать однозначными, ограниченными, непрерывными и дифференцируемыми по всем своим аргументам во всей области их определения.

Вариационные условия оптимальности оценок

Для решения поставленной задачи воспользуемся результатами работы авторов [5], посвященной обоснованию вариационного подхода к оцениванию состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия. Повторяя рассуждения и выкладки этой работы с учетом специфики критерия оптимальности (2), в котором учитывается априорная информация об оцениваемых параметрах, а также принимая во внимание дискретность измерений, приходим к следующим вариационным условиям оптимального апостериорного оценивания.

Оптимальная оценка вектора $\boldsymbol{x}_0$ доставляет решение краевой задачи для сопряженной системы

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \varphi(\boldsymbol{x}, t);\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \overline{\varphi}^{\mathrm{T}}}{\partial \boldsymbol{x}}\boldsymbol{\lambda}; \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \frac{\partial \psi^{\mathrm{T}}(t_i)}{\partial \boldsymbol{x}_i}\mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}^{-1}\{\boldsymbol{y}_i - \psi[\boldsymbol{x}(t_i)]\};$$

$$i = 1, ..., N;$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \mathbf{K}_{\boldsymbol{x}_0}^{-1}(\boldsymbol{x}_0 - \tilde{\boldsymbol{x}}_0);\ \boldsymbol{\lambda}(T) = 0.$$

Краевая задача (3) выражает необходимые условия оптимальности оценок вариационного типа по критерию максимума апостериорной вероятности.

При наличии непрерывных или дискретно-непрерывных измерений в приведенные выше вариационные условия оптимальности оценок вносятся соответствующие изменения.

Так, например, если помимо дискретных измерений проводятся и непрерывные измерения согласно модели

$$\boldsymbol{y}_1(t) = \psi_1[\boldsymbol{x}(t)] + \boldsymbol{\delta}_1(t),$$

где $\boldsymbol{\delta}_1(t)$ — вектор ошибок измерений, и если ошибки этих измерений задаются моделью белого шума с матрицей интенсивности $\mathbf{R}(t)$, то краевая задача апостериорного оценивания принимает вид

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \varphi(\boldsymbol{x}, t);$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \varphi^{\mathrm{T}}}{\partial \boldsymbol{x}}\boldsymbol{\lambda} + \frac{\partial \psi_1^{\mathrm{T}}}{\partial \boldsymbol{x}}\mathbf{R}(t)\{\boldsymbol{y}_1(t) - \psi_1[\boldsymbol{x}(t)]\};$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \mathbf{K}_{\boldsymbol{x}_0}^{-1}(\boldsymbol{x}_0 - \tilde{\boldsymbol{x}}_0);\ \boldsymbol{\lambda}(T) = 0;$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \frac{\partial \psi^{\mathrm{T}}(t_i)}{\partial \boldsymbol{x}_i}\mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}^{-1}\{\boldsymbol{y}_i - \psi[\boldsymbol{x}(t_i)]\};\ i = 1, ..., N.$$

Согласно этим условиям для получения оптимальной оценки вектора $\boldsymbol{x}_0$ необходимо решить краевое уравнение

$$\boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{x}_0,\ T) = 0,$$

заданное неявно на процедурах интегрирования сопряженных систем дифференциальных уравнений. Для этого можно применить известные численные методы поиска корней нелинейных уравнений, например метод Ньютона, его модификации и другие.

Определение параметров орбиты космического аппарата по результатам измерений

Рассмотрим особенности применения изложенного выше вариационного варианта байесовского оценивания на примере решения задачи статистического оценивания параметров движения КА по результатам текущих позиционных навигационных измерений над вектором координат объекта $\boldsymbol{r}(t)$. Движение КА будем рассматривать в центральном гравитационном поле Земли. Соответствующие уравнения движения в абсолютной геоцентрической системе координат имеют вид

$$\dot{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{v};\ \dot{\boldsymbol{v}} = -\frac{\pi_0}{r^3}\boldsymbol{r};\ r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

где $\boldsymbol{r} = [x,\ y,\ z]^{\mathrm{T}}$ и $\boldsymbol{v} = [v_x,\ v_y,\ v_z]^{\mathrm{T}}$ — векторы координат и скорости движения КА соответственно; $\pi_0 = 398600{,}44$ км^3/с^2 — постоянная притяжения Земли.

Проводятся прямые измерения элементов вектора $\boldsymbol{r}$, так что модель измерений принимает вид

$$\boldsymbol{y}_i = \boldsymbol{r}(t_i) + \delta\boldsymbol{r}_i,$$

где $\delta\boldsymbol{r}_i$ — ошибки измерений вектора координат.

Составим соответствующую сопряженную систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}_r = \frac{\pi_0}{r^3}\left[\boldsymbol{\lambda}_V - \frac{3}{r^2}(\boldsymbol{r}\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{\lambda}_V\right];\ \dot{\boldsymbol{\lambda}}_V = -\boldsymbol{\lambda}_r;$$

$$\boldsymbol{\lambda} = [\boldsymbol{\lambda}_r,\ \boldsymbol{\lambda}_v]^{\mathrm{T}} = [\boldsymbol{\lambda}_x,\ \boldsymbol{\lambda}_y,\ \boldsymbol{\lambda}_z,\ \boldsymbol{\lambda}_{v_x},\ \boldsymbol{\lambda}_{v_y},\ \boldsymbol{\lambda}_{v_z}]^{\mathrm{T}}.$$

В соответствии с изложенным выше для оптимального апостериорного оценивания вектора начального состояния КА $\boldsymbol{q}_0 = [\boldsymbol{r}_0,\ \boldsymbol{v}_0]^{\mathrm{T}}$ необходимо решить двухточечную краевую задачу для приведенных уравнений движения и сопряженных уравнений с учетом следующих граничных условий:

$$\boldsymbol{\lambda}_r(t_0) = \mathbf{K}_{r_0}^{-1}(\boldsymbol{r}_0 - \tilde{\boldsymbol{r}}_0);\ \boldsymbol{\lambda}_v(t_0) = \mathbf{K}_{v_0}^{-1}(\boldsymbol{v}_0 - \tilde{\boldsymbol{v}}_0);\ \boldsymbol{\lambda}(T) = 0;$$

$$\boldsymbol{\lambda}_r(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}_r(t_i^-) + \mathbf{K}_{r_1}^{-1}[\boldsymbol{y}_i - \boldsymbol{r}(t_i)];\ i = 1,\ \ldots,\ N,$$

где $\mathbf{K}_{r_0}$, $\mathbf{K}_{v_0}$ — корреляционные матрицы априорных оценок начальных значений векторов координат и скорости КА соответственно; $\mathbf{K}_{r_i}$ — корреляционные матрицы ошибок измерений векторов координат КА.

Таким образом, решение задачи сводится к поиску корней краевого уравнения

$$\boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{q},\ T) = 0;\ \boldsymbol{q}_0 = \boldsymbol{x}_0.$$

Применение метода Ньютона приводит к следующему итерационному алгоритму:

$$\boldsymbol{q}_{k+1} = \boldsymbol{q}_k - \left[\frac{\partial\boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{q},\ T)}{\partial\boldsymbol{q}}\right]_k^{-1}\boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{q}_k,\ T),\ k = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots\ .$$

Приведем некоторые результаты вычислений.

Расчеты проводили для спутника, находящегося на орбите с высотой $h = 900$ км и эксцентриситетом $e = 0{,}003$. С помощью датчика случайных величин по нормальному закону распределения на мерном интервале $T = 100$ с моделировали с шагом $\Delta t = 1$ с статистическую выборку прямых измерений векторов текущих координат КА. При этом предельные ошибки измерений задавали значениями 100 м по всем элементам вектора координат. Априорные оценки вектора исходного состояния КА даны в табл. 1. Априорные значения среднеквадратических отклонений принимали равными 500 м по элементам вектора координат и 2 м/с — по элементам вектора скорости.

Интегрирование сопряженных систем проводили методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом 1 с. Матрицу частных производных $\frac{\partial\boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{q},\ T)}{\partial\boldsymbol{q}}$ вычисляли односторонним методом конечных разностей. Принимали, что ошибки измерений всех элементов вектора состояния статистически независимы.

Таблица 1

Результаты оптимального оценивания

Оцениваемые параметры	x_0, км	y_0, км	z_0, км	V_{x_0}, км/с	V_{y_0}, км/с	V_{z_0}, км/с
Точные значения	441,77	−6278,62	3597,94	0,78406	3,70781	6,38566
Априорные оценки	448,77	−6274,62	3602,94	0,78906	3,71081	6,39166
Оптимальные оценки	441,76	−6278,61	3597,93	0,78422	3,70766	6,38581
Ошибки оценивания	−0,011	0,007	−0,006	0,00016	−0,0001	0,00015

Таблица 2

Сходимость вычислительного процесса оценивания

Номер итерации	Ошибки оценивания					
	δx_0, м	δy_0, м	δz_0, м	δV_{x_0}, м/с	δV_{y_0}, м/с	δV_{z_0}, м/с
0	7000	4000	5000	5	3	6
1	−0,004	0,011	−0,001	0,00006	−0,00021	0,00009
2	−0,011	0,007	−0,006	0,00016	−0,00015	0,00015
3	−0,011	0,007	−0,006	0,00016	−0,00015	0,00015

Таблица 3

Изменение начальных значений сопряженных переменных по итерациям

Номер итерации	$\lambda_{x,0}$	$\lambda_{y,0}$	$\lambda_{z,0}$	$\lambda_{V_{x,0}}$	$\lambda_{V_{y,0}}$	$\lambda_{V_{z,0}}$
0	0	0	0	0	0	0
1	−175,09	−99,71	−125,03	−1234,96	−801,92	−1478,05
2	−175,27	−99,81	−125,14	−1210,58	−788,05	−1462,68
3	−175,27	−99,81	−125,14	−1210,58	−788,05	−1462,68

В табл. 1 даны точные значения параметров начального фазового состояния КА в абсолютной геоцентрической системе координат, принятое начальное приближение элементов уточняемого вектора, полученные в результате вариационной обработки измерений оптимальные оценки, а также характеристики точности оценивания.

В табл. 2 представлены значения ошибок оценивания по итерациям.

В табл. 3 даны начальные значения сопряженных переменных по итерациям.

Эти данные свидетельствуют о достаточно высокой точности и скорости сходимости вычислительного процесса.

В заключение отметим, что предлагаемые методические средства могут быть использованы при разработке и модернизации алгоритмов оптимального статистического оценивания нелинейных динамических объектов различных типов в составе автоматизированных комплексов обработки наблюдений. Они могут также применяться для решения задач тестирования приближенных алгоритмов навигационного оценивания, для выбора эффективного состава и программы измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 09-08-00259).

Список литературы

1. **Аким Э. Л., Энеев Т. М.** Определение параметров движения космических аппаратов по данным траекторных измерений // Космические исследования. 1963. Т. 1. № 1. С. 5—50.

2. **Брандин Н. К., Разоренов Г. Н.** Определение траекторий КА. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.

3. **Космические** траекторные измерения / Под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. М.: Сов. радио, 1969. 504 с.

4. **Линник Ю. В.** Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. 350 с.

5. **Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М.** Вариационное оценивание состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 2—6.

6. **Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М.** Метод наименьших квадратов в задачах вариационного оценивания состояния нелинейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6. С. 2—6.

7. **Основы** теории полета космических аппаратов / Под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.

8. **Статистические** методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р. М. Юсупова. МО СССР, 1984. 563 с.

9. **Эльясберг П. Е.** Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976. 416 с.

ИНФОРМАЦИЯ

В 2011 г. в Санкт-Петербурге на базе ОАО "Концерн "Электроприбор" состоятся:

- **с 30 мая по 1 июня XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам;**
- **с 1 по 4 марта XIII конференция молодых ученых "Навигация и управление движением (XIII КМУ 2011)"**

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
http://www.elektropribor.spb.ru/rufrset.html

УДК 004.8:004.323

Е. Д. Теряев, чл.-корр. РАН, науч. рук. лаб.,
К. В. Петрин, зав. лаб.,
А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва
mech@novtex.ru

Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах*.

Часть II. Агентные решения в задачах контроля и управления

Анализируется функциональность современных автоматизированных информационно-управляющих систем. Излагается методология ситуационно-целевого управления. Формулируются базисные положения агентно-ориентированного проектирования автоматизированных систем. Предлагается агентная модель потока работ. Обсуждаются перспективные технологии интеллектуализации агентов.

Ключевые слова: *автоматизация, информационно-управляющие системы, иерархия функций управления, ситуационно-целевое управление, мультиагентная архитектура, агентно-ориентированное проектирование, агентная модель потока работ*

Целью настоящей статьи является анализ перспектив компьютерной интеллектуализации информационно-управляющих систем на базе мультиагентных технологий. К рассматриваемому классу систем относятся системы автоматизации процессов контроля и управления, обладающие следующими свойствами: система является человеко-машинной, работает в реальном масштабе времени и имеет развитые информационные функции. Сюда относятся автоматизированные системы управления техническими объектами и системы диспетчерского управления, используемые в сфере материального производства (промышленность, энергетика, транспорт, ЖКХ, инженерные коммуникации и т. п.), а также системы автоматизированного мониторинга материальных (технических и природных) объектов.

В первой части статьи изложены концептуальные основы агентного подхода, а во второй части рассматривается проблематика его применения в области интеллектуализации процессов контроля и управления в сложных автоматизированных системах.

Иерархическая структура АИУС

Для широкого класса *автоматизированных информационно-управляющих систем* (АИУС) характерны многообъектность, распределенность, иерархическая организация системы, многоплановость решаемых задач контроля и управления, сложность процессов принятия решений, режим работы в масштабе реального времени. К данному классу систем относятся многие системы автоматизации в сферах материального производства, природопользования и экологического контроля.

Среда действия АИУС включает комплекс объектов внешнего мира — объекты контроля и управления. В состав АИУС входят измерительная (сенсорная) и исполнительная среды. Под *измерительной средой* понимается совокупность технических средств, служащих для получения информации о внешнем мире. Она включает датчики, оборудование мониторинга состояния объектов, устройства неразрушающего контроля, каналы связи и т. д. *Исполнительная среда* — совокупность технических средств для воздействия на объекты управления.

Как правило, АИУС имеет двухуровневую иерархическую структуру (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Нижний уровень — уровень локальной автоматики. Он образован средствами локальной автоматики (СЛА) — датчиками, исполнительными устройствами и управляющими контроллерами — и служит для непосредственного автоматического управления объектами автоматизации. Здесь осуществляется сбор первичной информации, формирование и реализация управляющих воздействий. На этом уровне замыкаются самые "короткие" контуры управления объектами.

Верхний уровень — уровень контроля и управления. Образован оперативным информационно-управляющим вычислительным комплексом (ОИУВК). Здесь выполняются функции мониторинга и анализа со-

*) Работа выполнена в рамках исследований, проводимых при поддержке РФФИ (грант РФФИ 10-08-01139-а).

Часть I опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", № 7, 2010.

стояния объектов и внешней среды, принятия решений и автоматизированного управления.

Информационное взаимодействие уровней осуществляется посредством информационно-коммуникационной среды системы.

Примером могут служить современные промышленные АИУС. Их программно-аппаратные комплексы верхнего уровня строятся на базе технологии автоматизации SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). SCADA-системы дают возможность диспетчеру осуществлять оперативный контроль, анализ и управление технологическими процессами [1]. SCADA-системы имеют архитектуру "клиент—сервер". Уровень локальной автоматики реализуется контроллерами, связанными с технологическим сервером локальной промышленной сетью класса Fieldbus.

Базовые функции АИУС

Система в необходимых объемах должна автоматизированно выполнять информационные, контрольные и управляющие функции.

Термин "автоматизированный" применительно к функциям системы означает их частичную автоматизацию с участием человека-оператора. Это функции либо наиболее общего, целеполагающего характера, либо не поддающиеся полной автоматизации.

Информационные функции — это функции системы, содержанием которых является сбор, обработка и представление информации для последующей обработки.

К базовым информационным функциям относятся:

- организация единого информационного пространства для всех компонентов АИУС;
- автоматический сбор данных с датчиков;
- первичная обработка информации от датчиков;
- запись, накопление и хранение оперативной информации;
- поддержка человеко-машинного информационного взаимодействия;
- поддержка интерактивного режима работы с базами данных системы;
- обмен информацией с внешними системами.

Функции контроля. Безопасность эксплуатации ответственных объектов промышленности, энергетики и транспорта требует наличия оперативной и достоверной информации об их текущем техническом состоянии. С этой целью в системе реализуются процессы оперативного контроля и технического диагностирования.

К базовым функциям контроля относятся:

- мониторинг динамического и технического состояния объектов;
- регистрация тревожных событий в системе и внешней среде;
- диагностирование неисправностей в системе;
- обнаружение, распознавание и прогнозирование нештатных (критических — предаварийных и аварийных) ситуаций в системе;
- технологическая и аварийная сигнализация.

Сигнализация предназначена для оповещения персонала об опасных ситуациях или требующих контроля событиях путем подачи световых или звуковых сигналов. Как правило, звуковой сигнал служит для информирования о факте возникновения ситуации или события, а световой указывает его место и характер (на электронной или графической мнемосхеме системы).

Различают следующие виды сигнализации:

- *предупредительная* — служит для фиксирования отклонений контролируемых параметров от нормы (выхода параметров за допустимые пределы);
- *аварийная* — служит для фиксирования критических значений контролируемых параметров и аварийного состояния объектов;
- *позиционная* — предназначена для фиксации состоянии "включено — выключено" механизмов и машин, а также информирования о предельных рабочих положениях исполнительных органов.

В SCADA-системах информационную основу процессов оперативного контроля составляют особые состояния *"События"* (Events) и *"Тревоги"* (Alarms). Первые фиксируют штатные ситуации (например, включение исполнительного механизма), а вторые являются сообщениями о нештатных ситуациях (к примеру, достижение контролируемым параметром предупредительного порога), причем оператор должен подтвердить ("квитировать") факт получения данного сообщения.

Управляющие функции — это функции, результатами которых является выработка и реализация управляющих воздействий на объекты управления. Конкретизируем данные функции для промышленных АИУС. Здесь объектами управления является технологическое оборудование (механизмы, машины и аппараты) и технологические процессы.

К базовым управляющим функциям относятся:

- логическое управление оборудованием;
- динамическое управление объектами и процессами;
- технологические блокировки в цепях управления;
- противоаварийная защита оборудования;
- оперативная оптимизация режимов.

Логическое управление — управление переключательного типа. Описывается логическими алгоритмами. Направлено на автоматизацию процессов пуска и останова технологического оборудования, переключение режимов работы оборудования, согласование совместной работы группы оборудования, автоматизацию дискретных технологических процессов.

Целью *динамического управления* является изменение состояния динамических объектов. Виды динамического управления: программное управление, т. е. управление по разомкнутому циклу, регулирование (стабилизация), терминальное управление по замкнутому циклу.

Технологические блокировки обеспечивают заданную последовательность операций управления, исключая возможность неправильных операций, предотвращают недопустимые, ошибочные действия оперативного персонала.

Противоаварийная защита действует в случаях возникновения аварийной или предаварийной ситуации и обеспечивает безопасную работу технологического оборудования и персонала путем экстренного автоматического перевода защищаемого оборудования в безопасное состояние.

Оперативная оптимизация касается штатных установившихся и переходных режимов работы оборудования по динамическим, эксплуатационным и технико-экономическим показателям. Действительно, оптимальный технологический регламент производственных участков не остается постоянным, а зависит от ряда возмущающих факторов и поэтому должен динамически формироваться средствами ОИУВК и автоматики.

Автоматизация современных информационно-управляющих систем осуществляется на компьютерной основе. Поэтому автоматизированное управление формируется в результате взаимодействия человека и компьютера, т. е. управляющим субъектом является тандем "человек — компьютер". При этом процесс управления осуществляется либо в диалоговом режиме, либо в режиме супервизорного управления.

Под *диалоговым* (интерактивным) режимом выполнения функции автоматизированной системы понимается режим непосредственного взаимодействия человека и компьютера.

Под *супервизорным управлением* понимается процесс управления, при котором оператор не включен в контур прямого цифрового управления, а осуществляет наблюдение за работой локальной автоматики и оперативное вмешательство в целях ее коррекции.

Функциональность современных АИУС

Разработка программного обеспечения даже для небольших по масштабу АИУС очень трудоемка. Необходимо запрограммировать низкоуровневые операции обмена с периферийным оборудованием и контроллерами, алгоритмы контроля и управления, отображение информации, архивирование и обработку измерительных данных и заставить все это работать в реальном времени.

Положение усугубляется для АИУС большого масштаба: такие системы могут содержать тысячи единиц разнообразного оборудования, которым необходимо согласованно управлять в режиме реального времени. Сюда входит большое число различных датчиков, исполнительных механизмов и контроллеров, рассредоточенных на значительных расстояниях и объединенных разнообразными каналами связи.

Управление в классических организациях базируется на следующей иерархии функций управления:

- *анализ* — изучение объекта управления и внешней среды, оценка результатов и перспектив;
- *планирование* — разработка последовательности действий, направленных на достижение поставленных целей;
- *организация* — формирование организационной структуры системы;
- *координация* — согласование действий компонентов организационной структуры;
- *контроль* — определение фактического состояния объекта, проверка соответствия фактических и планируемых результатов;
- *регулирование* — поддержание требуемого состояния объекта и устранение возможных отклонений от плановых заданий.

В процессах управления эти первичные функции объединяются связующими процессами коммуникации и принятия решений.

При синергетическом взгляде на организацию ей дополнительно придаются свойства целеполагания и самоорганизации. *Целеполагание* — постановка или выбор целей действий. *Самоорганизация* — целенаправленный процесс, в ходе которого создается, воспроизводится или совершенствуется внутренняя структура сложной системы.

Аналогичную иерархию функций управления можно выстроить и для АИУС с учетом их специфики. Эффективность АИУС во многом определяется уровнем компьютерной поддержки высших уровней этой иерархии. Важнейшей особенностью функциональных задач данных уровней является невозможность их полной формализации вследствие действия факторов неопределенности.

Заметим, что *неопределенность* по объему отсутствующей информации можно разделить на три большие группы [2]: 1) неизвестность; 2) неполнота (недостаточность, неадекватность); 3) недостоверность.

Системотехнический аспект учета факторов неопределенности выражает *принцип внешнего дополнения* С. Бира [3], согласно которому априорная неопределенность в задаче управления порождает структурное изменение контура управления — его внешнее дополнение "черным ящиком", представляющим неопределенность решения и те резервы, с помощью которых должны компенсироваться неучтенные факторы внешней и внутренней среды. Степень реализации данного принципа и определяет качество процессов управления.

АИУС в целом должны удовлетворять следующим требованиям:

1) функциональность системы должна гарантировать достижение установленных целей ее функционирования при заданных условиях применения;

2) система должна располагать механизмами адаптации к неопределенности и возможным изменениям условий ее применения;

3) система в целом и все виды ее обеспечения должны быть приспособлены к модернизации, развитию и наращиванию.

Под *наращиванием* понимается совокупность мер, принимаемых в системе при расширении среды ее действия без изменения состава выполняемых функций.

Современный теоретический базис создания сложных автоматизированных систем включает концепции многоцелевого и ситуационного управления. Их объединение расширяет возможности функционального проектирования АИУС.

Методология ситуационно-целевого управления

Управление сложной системой является многоцелевым: главная цель разбивается на промежуточные подцели 1-го ранга, которые, в свою очередь, разбиваются на подцели 2-го ранга и т. д. В результате декомпозиции получается "древовидная" иерархическая структура системы целей. Каждая цель в данной системе целей является *агрегированной* по отношению к подчиненным целям, имеющим более дифференцированное представление.

Ситуационный подход находит широкое применение в сфере организационного управления, а также в системах искусственного интеллекта. Стоит выделить работу Дж. Маккарти [4], в которой развивается *ситуационное исчисление* — формальный аппарат для построения модели мира и выполнения рассуждений о воздействиях на мир.

Ситуация — конкретный набор обстоятельств, которые влияют на систему в данное конкретное время. Ситуационная модель дает формальное описание мира с помощью ситуаций, в которых предстоит действовать системе. В модели учитываются те факторы, которые действительно влияют на развитие ситуаций. Сюда относятся релевантные характеристики объекта и внешнего мира: пространственное положение, режим и условия движения объекта, его техническое и динамическое состояния. В условиях действия многообразия факторов как в самой системе, так и в окружающей среде не существует единой "лучшей" стратегии управления. Самой эффективной стратегией в конкретной ситуации является та, которая, во-первых, более всего соответствует данной ситуации и, во-вторых, является прогностической, т. е. учитывает возможные сценарии будущего развития ситуации.

Успех ситуационного подхода в значительной мере зависит от точного определения наиболее значимых факторов, влияющих на процесс управления. Классическое ситуационное управление подчиняется схеме "ситуация — действие". Алгоритм управления явно не задается, а реализуется на *ситуационной сети*.

Под ситуационной сетью понимается ориентированный взвешенный граф переходов по эталонным ситуациям, определяемый исходной и целевой ситуациями. Дуги графа отражают смену ситуаций и вызывающие ее информационно-управляющие процессы. Заметим, что понятие дискретной сети проблемных ситуаций было введено в работе Д. А. Поспелова и В. Н. Пушкина [5].

Место контура ситуационного управления в функциональной структуре АИУС поясняет схема на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Контур реализуется алгоритмически в ОИУВК. Выше него в пирамиде управления расположен уровень планирования. Ниже действует локальная автоматика.

Задание определяет оперативную цель действий АИУС в ближайшей перспективе. Функционирование АИУС направлено на выполнение задания, и для его выполнения формируется *оперативный план действий*.

Компьютеризация процесса ситуационно-целевого управления сводится к решению цепочки следующих задач: 1) мониторинг ситуаций, 2) генерация локальной цели, 3) формирование стратегии управления, выходом которых являются соответственно диагноз текущей ситуации, новая локальная цель управления в случае изменения ситуации и стратегия управления, направленная на достижение новой цели. Особое значение имеет задача диагностирования критических ситуаций.

На нижнем уровне функциональной иерархии АУИС (рис. 2) действует аппаратный слой системы. Здесь осуществляются процессы ввода-вывода сигналов и реализуются в конкретные *действия* на объект в соответствии со сформированной стратегией управления, причем применяются системотехнические решения классической автоматики.

Таким образом, вместо двухступенчатой схемы "ситуация — действие" классического ситуационного управления в приведенной функциональной структуре (рис. 2) воплощается четырехступенчатая схема

"ситуация — цель —
стратегия управления — действие".

Подчеркнем, что ситуационный подход органично сочетается с многоцелевым принципом управления в сложных системах: главная цель системы разбивается на подцели, которые формализуются как локальные (рабочие) цели применительно к отдельным ситуациям. В итоге процесс управления

ориентирован на оценку ожидаемого развития ситуации, принятие решений и действия, ведущие к достижению локальных целей.

Конструкция ситуационного пространства

Формат определения ситуаций должен позволять гибко приспосабливать структуру применяемых ситуационных моделей к условиям задач управления. В связи с этим представляет интерес описываемый ниже подход к формализации понятия ситуационного пространства, при котором имеют смысл операции агрегирования и дробления ситуаций.

Прежде всего, необходимо задать ситуационный *универсум* Ω — множество, элементы которого $\omega \in \Omega$ будем называть *элементарными ситуациями*. Конкретное ситуационное пространство S — это некоторое семейство подмножеств универсума:

$$S = \{s_i\}_{i \in I},$$

$s_i \subset \Omega$, являющееся *покрытием* Ω [6]:

$$\bigcup_{i \in I} s_i = \Omega.$$

Элементы пространства S будем именовать *ситуациями*. Таким образом, каждая ситуация $s \in S$ является суммой элементарных ситуаций $\omega \in \Omega$.

В рамках этих определений операции агрегирования и дробления ситуаций трактуются как теоретико-множественные операции объединения и разбиения множеств.

Для ряда задач необходимо, чтобы семейство подмножеств $\{s_i\}_{i \in I}$ было *дизъюнктивным*, т. е. чтобы его элементы попарно не пересекались:

$$\forall i, j \in I,\ i \neq j \Rightarrow s_i \cap s_j = \varnothing.$$

Такое ситуационное пространство S является *разбиением* Ω [6]. Данная модель ситуационного пространства отвечает логике ситуационного управления, предполагающей возможность идентификации текущей ситуации для применения правил "ситуация — действие".

Пусть ситуационное пространство S является *разбиением* Ω. Положим, что к нему добавлены новые множества, образованные посредством выполнения ряда операций объединения имеющихся множеств, и в результате получено *расширенное* ситуационное пространство $\hat{S}$. Оно является частично упорядоченным множеством, причем отношение частичного порядка в нем задается включением: $s_1 \supset s_2$. Такое пространство представимо корневым деревом — *деревом ситуаций*, которое оказывается весьма полезным конструктом при разработке алгоритмов ситуационного управления.

Сущность ситуационного подхода становится более прозрачной при сопоставлении его с формализмом пространства состояний.

М. Месарович, Д. Мако и И. Такахара [7] ввели принцип стратифицированного описания функционирования сложных систем, означающий представление системы семейством моделей, каждая из которых описывает поведение системы с точки зрения различных уровней абстрагирования. Выбор *страт*, в терминах которых описывается система, зависит от исследователя, его знаний и заинтересованности в деятельности системы. В общем случае стратификация неразрывно связана с интерпретацией производимых системой действий.

Для класса динамических систем понятия "ситуации" и "состояния" относятся к разным стратам — первое отвечает более высокому уровню абстрагирования. Ситуация идентифицирует не отдельное состояние системы, а некоторую область в пространстве состояний. К примеру, в штатном режиме полета самолета ситуация остается низменной при возмущениях в допустимых пределах его угловых и пространственных координат.

Общие положения агентно-ориентированного проектирования АИУС

Поскольку верхние иерархические уровни пирамиды управления АИУС отвечают плохоформализуемым областям знаний, то связанные с ними задачи автоматизации выходят за рамки возможностей классических методов и технологий проектирования систем. Поэтому применительно к данным уровням необходимы принципиально новые подходы, базирующиеся на идеях, методах и технологиях систем искусственного интеллекта. Здесь наибольшие перспективы открывает мультиагентный подход.

Агентные решения не укладываются в рамки традиционной методологии проектирования систем. Они кардинально меняют функционально-алгоритмическую и информационную структуры создаваемых систем. В связи с этим весьма актуальной является проблема разработки теоретических основ агентно-ориентированного проектирования АИУС.

Функциональные требования к системе определяют действия системы, которые она должна выполнять, и реализуются через функции системы. Под *функцией* АИУС подразумевается совокупность действий системы, направленная на достижение определенной цели или аспект определенного поведения системы, а под *задачей* — функция или часть функции АИУС, представляющая собой формализованную совокупность автоматических действий, выполнение которых приводит к результату заданного вида [8].

Выполнение каждой функциональной задачи связано с решением некоторой цепочки базовых

подзадач по обработке информации, анализу данных или принятию решений. В то же время решение каждой такой подзадачи порождает базовые процедуры по управлению информационными потоками, вычислительными процессами и аппаратными ресурсами АИУС.

В рамках мультиагентного подхода система строится как совокупность агентов, между которыми распределяется весь комплекс задач. Для этого в агентной среде системы формируются соответствующие агентные *задачно-ориентированные* структуры. Каждая функциональная задача выполняется отдельным агентом или группой агентов. В группах осуществляется ролевая специализация агентов и структуризация ролей агентов, гарантирующая достижение результата.

Архитектуру мультиагентной системы поясняет схема на рис. 3 (см. третью сторону обложки). На границе системы действуют сенсорные, эффекторные и интерфейсные агенты.

Сенсорные и эффекторные агенты обеспечивают взаимодействие системы с внешним миром: первые формируют входные информационные потоки от датчиков, а вторые формируют выходные информационные потоки на исполнительные органы. Интерфейсные агенты обеспечивают взаимодействие агентов с человеком-оператором, а также обеспечивают их доступ к базе данных (БД) и базе знаний (БЗ) системы.

В БЗ содержатся знания о предметной области АИУС: о мире, свойствах объектов, закономерностях автоматизируемых процессов, а также структуре функциональных задач. БЗ содержит онтологии предметной области и библиотеку алгоритмов решения задач и, в конечном счете, служит источником знаний для программных агентов системы.

Важнейшим новым свойством мультиагентных систем является способность к самоорганизации, которая проявляется как *функция организации/реорганизации* мультиагентных структур.

В агентной среде можно формировать виртуальные функциональные подсистемы и виртуальные каналы взаимодействия подсистем. Фактически речь идет о принципиально новом подходе к построению АИУС, позволяющем разделять программно-аппаратные и функциональные аспекты разработки системы, существенно увеличивая роль последних. При этом достигается функциональная гибкость АИУС: образование новых и изменение структуры старых подсистем сопряжено с созданием, копированием, обучением и ликвидацией отдельных агентов.

Следует отметить, что в адаптивных АИУС должно осуществляться не жесткое, а гибкое распределение информационно-управляющих функций между человеком и ЭВМ. В рамках агентных решений этот результат достигается рационализацией распределения эргатических функций между оператором и сетью агентов.

Многоступенчатая декомпозиция функциональных задач на подзадачи порождает иерархическую подчиненность подзадач, что отражается в иерархической организации создаваемых агентных структур и воплощается формированием в агентной среде схем "менеджер — агент".

Агентная модель потока работ

В системах с мультиагентной архитектурой задачи разбиваются на типовые подзадачи, выполняемые командой программных агентов. Каждая из них инициируется либо периодически, либо при возникновении определенных ситуаций в системе. Для анализа и организации работы сети агентов целесообразно применять методологию параллельного программирования [9]. В качестве инструмента анализа реактивности системы, планирования и диспетчеризации задач может быть использована модель потока работ WorkFlow [10].

Согласно точке зрения консорциума WFMC (WorkFlow Management Coalition) технология WorkFlow создает поток работ и управляет им аналогично конвейеру с потоком обрабатываемых изделий.

Как известно, WorkFlow-модели применяются в случае, если требуется связать в единый процесс несколько заданий [11]. Зависимости между заданиями удобно представлять в виде ориентированного графа, ребра которого определяют порядок выполнения заданий и потоки данных между заданиями. Система осуществляет запуск отдельных заданий, передачу данных между ними и контроль за выполнением процесса в соответствии с его описанием.

Модель потока работ описывает типовые шаблоны поведения и взаимодействия процессов: передачу управления, обмен информацией, общий доступ к ресурсам, обработку исключений. Она является эффективным инструментом компьютерных параллельных технологий и применяется в распределенных информационных системах: для управления и координации объектов, представляющих некоторый рабочий процесс, управления бизнес-транзакциями, организации поэтапного выполнения сложных приложений и т. п.

Итак, положим, что исходная целевая задача G разбита на ряд подзадач (модулей, заданий, процедур), именуемых работами w_i, объединенных в комплекс работ W:

$$G \to W = \{w_1, w_2, ..., w_m\}.$$

Считаем известными оценки (временные и другие ресурсные) трудоемкости работ. Такие оценки могут быть получены как экспериментально — в результате набора и обработки статистики, так и тео-

ретически — на основе анализа алгоритмической сложности вычислений.

Алгоритм решения целевой задачи G удобно представлять (рис. 4, см. третью сторону обложки) информационным графом IGraph(G), отражающим обязательный порядок следования работ и их информационную взаимосвязь [9].

Агентный подход к решению задачи заключается в создании сети агентов для выполнения работ. Комплекс всех работ W возлагается на множество агентов-исполнителей

$$A = \{a_1, a_2, ..., a_m\}$$

в соответствии со структурой информационного графа IGraph(G).

Оперативное планирование направлено на оптимизацию загрузки агентов для каждого комплекса работ и осуществляется *агентом-планировщиком*. Последний задает расписание работ агентов-исполнителей. Наряду с вычислениями необходимо учитывать обслуживание потока запросов к базам данных. Возможно применение двух критериев оптимизации: времени выполнения всего комплекса работ и коэффициента загрузки исполнителей.

Для реализации одновременного выполнения нескольких действий агентская система должна включать в себя поддержку параллельного выполнения функций агентами и поддержку средств синхронизации.

Агент-диспетчер осуществляет распараллеливание и распределение работ между агентами-исполнителями. Он также контролирует ход работ посредством обратных связей от агентов-исполнителей и отвечает за оперативное перераспределение ресурсов между работами.

Важную роль в АИУС играют приложения реального времени. В связи с этим весьма актуальны вопросы агентной организации вычислительных процессов реального времени.

Положим, что даны временные оценки выполняемых работ:

$$T = \{t_1, t_2, ..., t_m).$$

Тогда время выполнения задачи t_G рассчитывается по критическому пути в информационном графе этой задачи. Реактивность же системы в целом определяется временем ее реакции на некоторую тестовую смесь целевых задач.

Большинство базовых задач АИУС должны выполняться в режиме реального времени. Их подразделяют на задачи жесткого и мягкого реального времени: для первых задач темп их инициирования и время ответа (длительность получения результатов вычислений) жестко регламентируются, а для вторых своевременное их выполнение желательно, хотя и не критично.

В этих условиях возникает необходимость оптимального планирования задач с учетом ресурсных ограничений аппаратно-программной части АИУС. В частности, оптимизация может осуществляться по критерию минимизации времени выполнения задачи: $t_G \rightarrow \min$.

Технологии интеллектуализации агентов

Для определенного круга задач, выполняемых агентами, имеются стандартные алгоритмы решения, и нет необходимости прибегать к интеллектуальным технологиям. Вне данного круга находятся неформализованные задачи, решение которых невозможно без привлечения методов ИИ.

Собственно, целесообразное поведение появляется только на уровне интеллектуальных агентов, обладающих знаниями о себе и окружающем мире, оно определяется этими знаниями, а также используемыми интеллектуальными технологиями.

Кратко остановимся на некоторых перспективных технологиях интеллектуализации агентов.

1. Представление знаний. Общая проблема представления знаний включает ряд частных проблем: представление декларативных знаний, представление процедурных знаний и представление метазнаний.

Модель представления знаний — форма описания знаний в базе знаний. Наиболее распространены продукционные, сетевые, фреймовые и логические модели представления знаний. Сегодня в области представления знаний также развиваются модальные логики [12], дескрипционные логики [13] и онтологический инжиниринг [14].

Модальная логика — логическая система, изучающая структуру рассуждений, в состав которых входят модальности (модальные операторы). Модальность — это оценка высказывания, данная с той или иной точки зрения. Примеры модальностей: "необходимо", "возможно", "действительно", "случайно", "убежден", "сомневается", "отвергает", "допускает", "хорошо", "плохо" и т. п.

Темпоральные логики (от англ. temporal — временной) — это модальные логики, учитывающие причинно-следственные связи в условиях времени. Они строятся добавлением к логике высказываний новых знаков, отражающих свойства времени. Примеры темпоральных модальностей: "было", "есть", "будет", "раньше", "одновременно", "позже", "когда-то в будущем", "всегда в прошлом", "всегда" и т. д.

Пространственные логики [15] позволяют описывать пространственные объекты и пространственные отношения между ними. Рассуждения о пространстве имеют все возрастающее прикладное значение в связи с работами по созданию автономных мобильных устройств, анализу изображений (в частности, аэрофотоснимков), задачами синтеза вербального (формального) описания сцен по их изображениям.

Дескрипционные логики — это семейство языков представления терминологического знания о предметной области. Базовыми терминами дескрипционных логик являются концепты и роли, соответствующие в других разделах математической логики понятиям "одноместный предикат" (или множество, класс) и "двуместный предикат" (или бинарное отношение). В стандартных системах логики первого порядка предсказание времени выработки решения часто оказывается невозможным. Дескрипционная логика является некоторым вариантом логики предикатов первого порядка, ограниченной таким образом, чтобы гарантированно выполнялась любая процедура логического вывода на компьютере.

2. Рассуждения в условиях неопределенности. Для алгоритмизации рассуждений в условиях неопределенности интерес представляют следующие подходы: немонотонные модели рассуждений, вероятностные рассуждения, абдуктивные выводы, выводы на основе прецедентов.

Немонотонные модели рассуждений. Традиционная математическая логика является монотонной. Монотонная логика — это логика замкнутого мира, некоторая формальная система. Она основана на множестве аксиом, принимаемых за истинные, из которых выводятся следствия. Свойство монотонности заключается в том, что если на каком-либо шаге вывода получено утверждение, то оно действует и на последующих шагах.

Немонотонная логика — это логика открытого мира. При рассуждениях в условиях неопределенности выводы делаются на основе текущей информации и степени доверия к ней, которые могут изменяться при поступлении в систему новой информации [16].

Вероятностные рассуждения. Здесь подразумеваются два вероятностных подхода к описанию неопределенности — применение правила Байеса и Байесовские сети доверия.

Байесовские рассуждения основаны на формальной теории вероятностей, а именно на формуле Байеса, которая позволяет вычислять апостериорные вероятности событий через априорные вероятности.

Применение полной байесовской модели к реальным предметным областям проблематично: с ростом числа параметров экспоненциально возрастает объем необходимой вероятностной информации и сложность применяемых вычислительных процедур. В этих условиях весьма эффективным способом стохастического моделирования предметных областей оказываются байесовские сети [17].

Байесовские сети (байесовские сети доверия) — это статистический метод описания закономерностей в данных. *Байесовской сетью* называется направленный ациклический граф, вершины которого представляют переменные, а ребра кодируют условные вероятностные зависимости между переменными. На такой сети можно использовать так называемый байесовский вывод для вычисления вероятностей следствий событий.

Методологии абдуктивного вывода. Известный американский ученый Ч. Пирс выделял три вида элементарных рассуждений: дедукция, индукция и абдукция [18].

Дедукция (от общего к частному) — переход от общего к частному согласно логическим правилам. *Индукция* (от частного к общему) — процесс логического вывода на основе перехода от частного положения к общему. *Абдукция* (от частного к частному) — умозаключение от следствия к причине, от случая к правилу, от эмпирических фактов к объясняющей их гипотезе.

В отличие от дедукции, обеспечивающей достоверный вывод, абдукция, так же, как и индукция, дает правдоподобный вывод, т. е. может давать результаты, которые являются неправильными в пределах формальной системы.

Классическая логика формализует строго корректные рассуждения. В ней предметом изучения являются формы дедуктивных умозаключений. Однако она не годится в условиях неполной, неточной или изменчивой информации. Напротив, человеческий интеллект может вырабатывать разумные рассуждения в этих условиях. С точки зрения моделирования человеческих рассуждений, абдуктивный вывод является более гибким инструментом, чем дедуктивный.

Кратко прокомментируем три методологии абдуктивного вывода [16]: теорию свидетельств Демпстера-Шафера, стэнфордскую алгебру факторов уверенности и нечеткие рассуждения.

Байесовским вероятностным рассуждениям присущи два недостатка: необходимость заранее устанавливать априорные вероятности каждого свидетельства и отсутствие механизма описания ненадежности информации, зависящей от субъективного мнения человека. Данные недостатки преодолеваются в теории свидетельств Демпстера—Шафера [19]. Подход Демпстера—Шафера вводит различия между неопределенностью и незнанием путем создания функций доверия. Количественная оценка уверенности в истинности определенного набора гипотез выражается с помощью доверительного интервала [Bel, Pl], где Bel (Belief) — оценка доверия, а Pl (Plausability) — оценка привлекательности. Ширина доверительного интервала служит оценкой неуверенности в справедливости гипотез при имеющемся наборе свидетельств (см., например, [20]).

Система, предназначенная для работы со знаниями, должна иметь возможность аргументации с показателями недостоверности значений фактов. К таким показателям относится фактор уверенности.

Фактор уверенности CF (Certainty Factor) — это неформальная оценка уверенности в надежности знаний. Значение фактора лежит между 1 и −1.

С приближением CF к 1 усиливается доверие, а с приближением к −1 — недоверие к высказываниям [16]. Стенфордская алгебра факторов уверенности предлагает назначение степени уверенности CF исходным высказываниям и комбинирование этих значений в ходе движения к цели в процессе рассуждений. Она используется в экспертной системе MYCIN.

Нечеткая логика — это метод формирования рассуждений с помощью логических выражений, описывающих принадлежность элементов к нечетким множествам. Важной характеристикой нечеткой логики является то, что любая теория T может быть *фаззифицирована* (fuzzified) и, следовательно, обобщена путем замены понятия четкого множества в T понятием нечеткого множества. Выигрышем от фаззификации является большая общность и лучшее соответствие модели действительности.

Нечеткая логика лежит в основе методов работы с неточностью, гранулированием информации посредством лингвистических переменных, приближенными рассуждениями и вычислениями со словами (Computing with Words, CW). *Гранулирование информации* — это сжатие данных с помощью слов. Оно является ключевым аспектом человеческих рассуждений, взаимодействий и формирования понятий.

Вывод на основе прецедентов (Case-Based Reasoning, CBR) — это метод принятия решений, в котором используются знания о предыдущих ситуациях или случаях (прецедентах) [21].

Прецедент — это описание проблемы или ситуации в совокупности с подробным указанием действий, предпринимаемых в данной ситуации или для решения данной проблемы.

При рассмотрении новой проблемы (текущего случая) находится похожий прецедент в качестве аналога. Можно попытаться использовать его решение, возможно, адаптировав к текущему случаю, вместо того, чтобы искать решение каждый раз сначала. После того, как текущий случай будет обработан, он вносится в базу прецедентов вместе со своим решением для его возможного последующего использования.

Важной проблемой CBR является проблема выбора подходящего прецедента. Естественно искать подходящий прецедент в той области пространства поиска, где находятся решения сходных проблем.

3. Интеллектуальный анализ данных. Интеллектуализация промышленных автоматизированных систем связана с решением плохоформализуемых задач и извлечением имплицитных (т. е. скрытых) знаний из баз данных реального времени. В связи с этим весьма полезными могут быть инструменты Data Mining [2].

Data Mining ("добыча данных") — интеллектуальный анализ данных, направленный на автоматическое извлечение скрытых знаний (hidden knowledge) в статистических данных, накопленных в хранилищах данных (Data Warehousing). Data Mining — это альтернатива традиционному подходу в инженерии знаний, ориентированному на извлечение знаний из памяти эксперта.

В основе технологии Data Mining лежит концепция шаблонов, отражающих ранее неизвестные регулярности в анализируемых данных. Основные решаемые задачи данной технологии:

- *классификация* — отнесение объектов к одному из известных классов;
- *кластеризация* — группировка объектов в кластеры (группы схожих объектов);
- *регрессия* — установление статистической зависимости причинного характера между количественными переменными;
- *ассоциация* — выявление закономерностей между связанными событиями;
- *последовательные шаблоны* — установление закономерностей между связанными во времени событиями;
- *анализ отклонений* — выявление наиболее нехарактерных шаблонов.

4. Деревья решений (Decision Tree) — это способ представления правил в иерархической, последовательной структуре [22]. Узлы дерева представляют собой объекты анализа и момент выбора направления действий, ветви дерева изображают события, которые могут иметь место, а листья — альтернативные решения. Деревья решений оказываются эффективным средством описания и хранения информации, классификации и кластеризации данных, построения иерархических нелинейных регрессионных моделей. Они широко используются в задачах интеллектуального анализа данных и принятия решений. Преимущества использования аппарата деревьев решений: генерация правил в областях, где эксперту трудно формализовать свои знания; интуитивно понятная классификационная модель; возможность построения непараметрических моделей.

Укажем на два способа применения деревьев решений в АИУС. Во-первых, это иерархическая декомпозиция целей управления: глобальная цель системы представляется деревом локальных целей. Во-вторых, деревья решений удобны для реализации механизмов логического вывода и формализации баз знаний продукционного типа.

5. Мягкие вычисления. В арсенале средств разработки прикладных интеллектуальных систем одно из центральных мест занимает сформулированная Л. Заде концепция мягких вычислений — Soft Computing. Термин "мягкие вычисления" введен Л. Заде в 1994 году.

Мягкие вычисления в отличие от *жестких вычислений* нацелены на приспособление к всеобъемлющей неточности реального мира. Это понятие объединяет такие области интеллектуальных техноло-

гий, как нечеткая логика, нейронные сети, деревья решений, вероятностные рассуждения, эволюционные вычисления и ряд других — они дополняют друг друга и используются в различных комбинациях или самостоятельно для создания интеллектуальных систем. Постепенно круг этих областей с течением времени расширялся и в настоящее время оформился в отдельное направление в теории искусственного интеллекта, известное как "вычислительный интеллект" (Computational Intelligence).

Термин *эволюционные вычисления* обычно используется для общего описания алгоритмов поиска, оптимизации и обучения, основанных на некоторых формализованных принципах естественного эволюционного процесса. Разновидностью эволюционных вычислений являются генетические алгоритмы поиска, в которых моделируются базовые положения теории биологической эволюции — популяция, процессы отбора, мутации и воспроизводства. В настоящее время активно изучаются и развиваются три группы эволюционных методов — генетические алгоритмы (Genetic Algorithms, GA), методы поведения "толпы" (Particles Swarm Optimization, PSO) и методы "муравьиной колонии" (Ant Colony Optimization, ACO).

6. Интеллектуальное планирование. Планирование поведения, или интеллектуальное планирование (AI Planning), — это область ИИ, которая в настоящее время привлекает значительный интерес [16, 17, 23, 24].

Планированием называется поиск последовательности действий, ведущих к намеченной цели. Формально интеллектуальное планирование основано на аппарате математической логики, а рассуждения, необходимые для формирования плана, сводятся к логическому выводу.

Выполнение всякого плана окружено контекстом, в котором этот план выполняется. Модель контекста, в котором выполняются действия, называется *моделью мира*.

В зависимости от условий, в которых происходит процесс планирования, выделяют несколько разновидностей *сред планирования*. Они определяются рядом свойств исполнителя и мира, в котором он оперирует [23]:

- наблюдаемость мира (полностью или не полностью);
- статичность мира (статичен или динамичен);
- детерминированность действий исполнителя (детерминированность, недетерминированность);
- длительность действий (непрерывные или дискретные);
- параллелизм действий (допустим или не допустим).

В *классической среде планирования* мир полностью наблюдаем и статичен, а действия детерминированы, дискретны и недопустимо их параллельное исполнение. Планирование в такой среде называется *классическим планированием*. Все остальные виды сред называются неклассическими, а планирование, соответственно, неклассическим.

К методам неклассического планирования относятся: планирование с учетом ресурсов, темпоральное планирование, параллельное планирование, вероятностное планирование, планирование в открытых средах.

В [15] выделяются следующие виды интеллектуального планирования:

- классическое планирование;
- динамическое планирование, т. е. планирование в условиях изменяющейся среды;
- иерархическое планирование, когда действия абстрактного плана высокого уровня конкретизируются более детальными планами нижнего уровня;
- монотонное планирование, где *монотонность* — это такое свойство плана, когда каждое его действие уменьшает различия между текущим состоянием и целью поведения.

Перспективы приложений агентных технологий

Современный этап эволюции автоматики характеризуется стремительным ростом сложности эргономической, технической и информационной среды автоматизируемых систем, значительным расширением состава и степени сложности задач контроля и управления. В этих условиях обеспечить необходимый уровень эффективности и безопасности создаваемых систем невозможно без их интеллектуализации, причем здесь наибольшие перспективы правомерно связывать именно с мультиагентным подходом.

Разумеется, специфика объектов автоматизации проявляется в особенностях применяемых к ним проектных решений. Тем не менее, можно попытаться обозначить круг таких задач автоматизации, которые в качестве аналогов могут быть применимы к достаточно широкому классу систем автоматизации в сферах материального производства, природопользования и экологического контроля. С этой точки зрения представляют интерес приложения мультиагентного подхода в следующих проблемных областях:

- автоматизированные поточно-транспортные системы (для элеваторов, угольных шахт, обогатительных фабрик, цементных заводов и т. п.);
- мобильные транспортные роботы (робокары);
- автоматизация погрузочно-разгрузочных комплексов и терминалов портов;
- автоматизированные складские комплексы;
- гибкие автоматизированные производства;
- автоматизация систем жизнеобеспечения интеллектуальных зданий;
- системы промышленного видеонаблюдения;

- автоматизированное управление системами электроснабжения;
- аэрокосмический мониторинг техногенных и природных объектов;
- автоматизация управления сетями радиолокационного наблюдения;
- автоматизированный мониторинг инженерных сетей;
- системы спутникового мониторинга транспорта.

Агентный подход, несомненно, должен стать базисным для интеллектуализации систем автоматизированного управления объектами производственной сферы (энергетики, промышленности, транспорта), а также систем автоматизированного мониторинга природных и техногенных объектов. Однако приходится констатировать, что мультиагентные технологии пока еще довольно слабо проникают в сферу реальных инженерных разработок. Во многом данное обстоятельство объясняется отсутствием сформировавшейся теории и методологии агентно-ориентированного проектирования автоматизированных систем — серьезные успехи здесь могут быть получены лишь в результате расширения и углубления фронта фундаментальных и прикладных исследований в данной области науки.

Список литературы

1. **Олссон Г., Пиани Дж.** Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с.
2. **Технологии** анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А. А. Барсегян и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 384 с.
3. **Бир С.** Кибернетика и менеджмент. М.: Изд. ЛКИ, 2010. 280 с.
4. **McCarthy J.** Situations, Actions and Causal Laws // Stanford University Artificial Intelligence Project: Memo 2, Stanford. CA. 1963.
5. **Поспелов Д. А., Пушкин В. Н.** Мышление и автоматы. М.: Сов. радио, 1972. 222 с.
6. **Новиков Ф. А.** Дискретная математика для программистов. СПб.: Питер, 2003. 304 с.
7. **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
8. **ГОСТ 34.003—90.** Автоматизированные системы. Термины и определения.
9. **Гергель В. П.** Теория и практика параллельных вычислений. М.: БИНОМ; Лаборатория базовых знаний, 2007. 424 с.
10. **Workflow** Management Coalition documentation: Glossary, 1996; The Workflow Reference Model, 1995; Workflow API Specification, 1995; Workflow Interoperability Specification, 1996; Process Definition Interchange Specification (draft), 1998. URL: http://www.wfmc.org.
11. **Лазарев И. В., Сухорослов О. В.** Использование workflow-методологии для описания процесса распределенных вычислений // Проблемы вычислений в распределенной среде: Модели обработки и представления данных. Динамические системы. Труды ИСА РАН. Т. 14. М.: КомКнига, 2005. С. 26—70.
12. **Chagrov A., Zakharyaschev M.** Modal Logic. Oxford University Press, 1997.
13. **Baader F.** The Description Logic Handbook. New York: Cambridge University Press, 2003.
14. **Гаврилова Т. А.** Онтологический инжиниринг. URL: http://big.spb.ru/publications/bigspb/km/ontolog_engeneermg.shtml.
15. **Осипов Г.** Искусственный интеллект: состояние исследований и взгляд в будущее. URL: http://www.raai.org/about/persons/osipov/pages/ai/ai.html.
16. **Люгер Дж. Ф.** Искусственный интеллект: стратегия и методы решения сложных проблем. М.: Изд. дом "Вильямс", 2005. 864 с.
17. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход. М.: Изд. дом "Вильямс", 2007. 1408 с.
18. **Hintikka J.** Inquiry as Inquiry: a Logic of Scientific Discovery. Kluwer, Dordrecht, 1999. P. 480.
19. **Shafer G.** A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press, 1976.
20. **Бабкин Э. А., Козырев О. Р., Куркина И. В.** Принципы и алгоритмы искусственного интеллекта. Н. Новгород: Изд. НГТУ, 2006. 132 с.
21. **Althoff K.-D., Auriol E., Barletta R., Manago M.** A Review of Industrial Case-Based Reasoning Tools. AI Intelligence, Oxford, 1995.
22. **Murthy S. K.** Automatic construction of decision trees from data: A multi-disciplinary survey // Data Mining and Knowledge Discovery. 1998. V. 2. N 4. P. 345—389.
23. **Теоретические** основы планирования. URL: http://ai-center.botik.ru/planning.
24. **Искусственный** интеллект. URL: http://ar-int.ru.

Читайте в следующих номерах журнала

В рубрике

"ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ",

посвященной 20-летию основания самарской научной школы в области мультиагентных технологий

Смирнов С. В. Состояние и перспективы развития исследований Института проблем управления сложными системами РАН в области использования интеллектуальных технологий в задачах управления и обработки информации.

Виттих В. А. Проблемы управления и моделирования в сложных искусственных системах.

Ржевский Г. А. Теория сложных систем и мультиагентные технологии: методология для практического использования.

Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях.

К 80-летию МЭИ (ТУ): МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.5

О. М. Державин, д-р техн. наук, проф.,
Е. Ю. Сидорова, аспирант,
Московский энергетический институт
(технический университет)
elena_s84@mail.ru

Исследование неавтономной сингулярно возмущенной динамической модели нелинейной системы на основе уравнений первого приближения

Показывается, что вопрос о возможности понижения порядка неавтономной сингулярно возмущенной динамической модели нелинейной системы на основе теоремы Тихонова о предельном переходе может быть сведен к вопросу о выполнении условий теоремы для линеаризованной модели.

Ключевые слова: *сингулярное возмущение, сингулярно возмущенная модель, понижение порядка модели, теорема Тихонова, линеаризованная модель*

Введение и постановка задачи

Интерес к исследованию сингулярно возмущенных моделей динамических систем определяется возможностью их упрощения с сохранением высокой точности описания процессов. При выявлении факта принадлежности модели к классу сингулярно возмущенных исследователем могут быть использованы различные подходы, облегчающие получение результатов (понижение порядка модели, ее декомпозиция на модели меньшей размерности и др.).

Рассмотрим модель описания процессов в нелинейной динамической системе, заданную в нормальной форме Коши:

$$\frac{d\boldsymbol{x}}{dt} = \varphi(\boldsymbol{x}),\ \boldsymbol{x} \in R^n,\ t \in [t_0,\ T] \qquad (1)$$

с начальными условиями $\boldsymbol{x}_0$, принадлежащими заданной области исследования $\boldsymbol{x}_0 \in X_0 = \{\|\boldsymbol{x}\| \leqslant c\}$.

Функции φ_i, $i = \overline{1, n}$, в правой части системы (1) предполагаются зависящими от конечного числа параметров $\boldsymbol{\omega} = \{\omega_1, ..., \omega_p\}$ из области их допустимых значений $\boldsymbol{\Omega}$.

Модель будем рассматривать как сингулярно возмущенную, если в пространстве параметров $\boldsymbol{\Omega}$ системы (1) имеется область $\boldsymbol{\Omega}_k$, такая, что при $\boldsymbol{\omega}^k = \{\boldsymbol{\omega} \in \boldsymbol{\Omega}_k\}$ порядок системы становится меньше n, т. е. модель становится вырожденной. При этом в остальной части пространства $\boldsymbol{\Omega}$ порядок модели сохраняется равным n.

Практический интерес представляет ответ на вопрос, стремятся ли процессы возмущенной модели к процессам вырожденной в смысле некоторой оценки их близости при стремлении возмущения к нулю. Под возмущением понимается разница между значениями $\boldsymbol{\omega}$ и $\boldsymbol{\omega}^k$. При положительном ответе вырожденная модель становится адекватной моделью описания процессов физической системы с разумной точностью при значениях $\boldsymbol{\omega}$, близких к $\boldsymbol{\omega}^k$.

Сингулярно возмущенные модели описания динамических систем можно разделить на два класса: с неявным и с явным представлением возмущения в модели. При описании реальных динамических систем их математические модели естественным образом обычно получаются в виде модели Коши (1), т. е. содержат сингулярное возмущение в неявной форме. Это же относится и к модели "вход—выход", соответствующей системе (1). Канонические формы моделей с вхождением в них сингулярных возмущений в явном виде предполагают представление возмущения как малого параметра при старших производных в уравнении высокого порядка или при части производных в системе уравнений первого порядка. Исследование модели с сингулярным возмущением в неявной форме представляет собой отдельную малоизученную задачу.

Наиболее развитой является теория сингулярно возмущенных моделей с явным представлением возмущения. Она основывается на теореме Тихонова о предельном переходе [1]. Однако применение этой теоремы на практике наталкивается на ряд трудностей. Самой существенной из них является сложность проверки условий теоремы для нелинейных систем, связанная с необходимостью исследования свойств решений нелинейных дифференциальных уравнений. В работах авторов [2, 3] предлагается подход, позволяющий свести проверку условий теоремы Тихонова для нелинейной стационарной

сингулярно возмущенной модели к проверке аналогичных условий для модели первого приближения, что может быть проведено хорошо разработанными методами теории линейных систем. Целью настоящей статьи является распространение данного подхода на случай неавтономных моделей динамических систем с малым параметром при нескольких производных.

Рассмотрим задачу Коши для модели процесса в неавтономной нелинейной динамической системе:

$$\begin{cases} \dfrac{d\boldsymbol{y}}{dt} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t),\ 0 \leqslant t \leqslant T, \\ \mu \dfrac{d\boldsymbol{z}}{dt} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t), \end{cases} \tag{2}$$

при

$$\boldsymbol{y}(0) = \boldsymbol{y}_0,\ \boldsymbol{z}(0) = \boldsymbol{z}_0, \tag{3}$$

где

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{y}(t, \mu) \in R^n,\ \boldsymbol{z} = \boldsymbol{z}(t, \mu) \in R^m;$$

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t) = (f_1(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t), \ldots, f_n(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t))^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t) = (F_1(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t), \ldots, F_m(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t))^{\mathrm{T}};$$

$\mu > 0$ — малый параметр.

Порядок системы (2) равен $k = n + m$.

Функции $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)$ и $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)$ будем предполагать непрерывными вместе с производными по $\boldsymbol{z}$ и $\boldsymbol{y}$ в некоторой области $G = \{\|\boldsymbol{z}\| \leqslant a;\ \|\boldsymbol{y}\| \leqslant a;\ 0 \leqslant t \leqslant T\}$.

Рассмотрим вырожденную систему, получаемую формально из (2) при $\mu = 0$:

$$\begin{cases} \dfrac{d\bar{\boldsymbol{y}}}{dt} = \boldsymbol{f}(\bar{\boldsymbol{z}}, \bar{\boldsymbol{y}}, t),\ 0 \leqslant t \leqslant T \\ 0 = \boldsymbol{F}(\bar{\boldsymbol{z}}, \bar{\boldsymbol{y}}, t), \end{cases} \tag{4}$$

при

$$\bar{\boldsymbol{y}}(0) = \boldsymbol{y}_0. \tag{5}$$

Порядок этой системы на величину m ниже, чем исходной, поскольку второе уравнение не является дифференциальным. Поэтому для решения задачи Коши здесь задаются лишь n начальных условий относительно переменных $\bar{y}_i(t)$, совпадающих с начальными значениями $y_i(t)$ из (3).

Введем так называемую присоединенную систему

$$\frac{d\tilde{\boldsymbol{z}}}{d\tau} = \boldsymbol{F}(\tilde{\boldsymbol{z}}, \boldsymbol{y}, t)\ (\tau \geqslant 0), \tag{6}$$

в которой независимой переменной является новая переменная $\tau = t/\mu$, а $\boldsymbol{y}$ и t входят в систему (6) как параметры, т. е. эта система рассматривается при любых фиксированных значениях $\boldsymbol{y}$ и t из области $D = \{\|\boldsymbol{y}\| \leqslant a;\ 0 \leqslant t \leqslant T\}$.

Корень $\tilde{\boldsymbol{z}}^0 = \varphi(\boldsymbol{y}, t)$ уравнения

$$\boldsymbol{F}(\tilde{\boldsymbol{z}}, \boldsymbol{y}, t) = 0 \tag{7}$$

является точкой покоя присоединенной системы. Таких корней уравнения (7) может быть несколько. Теорема Тихонова устанавливает условия, выполнение которых является достаточным для утверждения факта, что при $\mu \to 0$ решения $\boldsymbol{y}(t)$, $\boldsymbol{z}(t)$ исходной задачи (2), (3) стремятся к решениям вырожденной задачи (4), (5). Приведем условия и формулировку теоремы Тихонова, следуя работам [1, 4].

Условие I. *Пусть уравнение* $F(\bar{\boldsymbol{z}}, \bar{\boldsymbol{y}}, t) = 0$ *имеет изолированный корень относительно* $\bar{\boldsymbol{z}}$: $\bar{\boldsymbol{z}}^0 = \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}, t)$, $(\bar{\boldsymbol{y}}, t) \in D$, *а задача (4), (5) имеет единственное решение на отрезке* $0 \leqslant t \leqslant T$, *соответствующее этому корню.*

Условие II. *Пусть точка покоя* $\tilde{\boldsymbol{z}}^0 = \varphi(\boldsymbol{y}, t)$ *присоединенной системы является асимптотически устойчивой по Ляпунову при* $\tau \to \infty$ *равномерно относительно* $(\boldsymbol{y}, t) \in D$.

Условие III. *Пусть решение* $\tilde{\boldsymbol{z}}(\tau)$ *системы (6) при* $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{y}_0$, $t = 0$ (*т. е. при начальных значениях параметров* $\boldsymbol{y}$, t) *и* $\tilde{\boldsymbol{z}}(0) = \boldsymbol{z}_0$ *существует при* $\tau \geqslant 0$ *и стремится к точке покоя* $\varphi(\boldsymbol{y}_0, 0)$ *при* $\tau \to \infty$.

Теорема Тихонова. *Если выполнены условия I—III, то при достаточно малых* μ *задача (2), (3) имеет единственное решение* $\boldsymbol{y}(t)$, $\boldsymbol{z}(t)$ и *справедливы предельные равенства*

$$\lim_{\mu \to 0} \boldsymbol{y}(t, \mu) = \bar{\boldsymbol{y}}(t)\ \textit{при}\ 0 \leqslant t \leqslant T,$$

$$\lim_{\mu \to 0} \boldsymbol{z}(t, \mu) = \bar{\boldsymbol{z}}(t)\ \textit{при}\ 0 < t \leqslant T.$$

Будем предполагать, что решения полной, вырожденной и присоединенной систем существуют и единственны при заданных начальных условиях, что соответствует исходным предположениям в [1].

Введем в рассмотрение линеаризованную модель системы (2) для корня $\bar{\boldsymbol{z}}^0 = \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}, t)$ уравнения $\boldsymbol{F}(\bar{\boldsymbol{z}}, \bar{\boldsymbol{y}}, t) = 0$. Для этого найдем решение вырожденной задачи (4), (5): $\bar{\boldsymbol{y}}(t)$, $\bar{\boldsymbol{z}} = \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t)$, а затем перейдем от системы (2) к системе уравнений в отклонениях от решения вырожденной задачи и рассмотрим линейное приближение этой системы:

$$\begin{cases} \dfrac{d\Delta\boldsymbol{y}}{dt} = \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\right|_L \Delta\boldsymbol{z} + \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\right|_L \Delta\boldsymbol{y},\ 0 \leqslant t \leqslant T, \\ \mu \dfrac{d\Delta\boldsymbol{z}}{dt} = \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\right|_L \Delta\boldsymbol{z} + \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\right|_L \Delta\boldsymbol{y} - \\ - \mu\left(\dfrac{\partial \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t)}{\partial t} + \dfrac{\partial \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t)}{\partial \bar{\boldsymbol{y}}} \dfrac{\partial \bar{\boldsymbol{y}}}{\partial t} \right), \end{cases} \tag{8}$$

где $L = L(t) = \{(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)$: $\bar{\boldsymbol{z}} = \bar{\boldsymbol{z}}(t) = \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t); \boldsymbol{y} = \bar{\boldsymbol{y}}(t);$ $0 \leqslant t \leqslant T\}$ — кривая, соответствующая решению вырожденной системы;

$$\Delta \boldsymbol{z} = \boldsymbol{z} - \bar{\boldsymbol{z}},\ \Delta \boldsymbol{y} = \boldsymbol{y} - \bar{\boldsymbol{y}};$$

$$\left.\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\right|_L = \left[\left.\frac{\partial F_i(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial z_j}\right|_L\right]_{j=\overline{1,m}}^{i=\overline{1,m}};$$

$$\left.\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\right|_L = \left[\left.\frac{\partial F_i(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial y_j}\right|_L\right]_{j=\overline{1,n}}^{i=\overline{1,m}};$$

$$\left.\frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\right|_L = \left[\left.\frac{\partial f_i(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial z_j}\right|_L\right]_{j=\overline{1,m}}^{i=\overline{1,n}};$$

$$\left.\frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\right|_L = \left[\left.\frac{\partial f_i(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial y_j}\right|_L\right]_{j=\overline{1,n}}^{i=\overline{1,n}}.$$

Коэффициенты при неизвестных переменных $\Delta \boldsymbol{z}$ и $\Delta \boldsymbol{y}$ в линеаризованной модели (8) зависят от времени и выбора корня $\varphi(\boldsymbol{y}, t)$ уравнения (7), определяющего решение вырожденной системы.

Начальные условия для системы (8), которую в дальнейшем будем называть линеаризованной моделью, примут вид:

$$\Delta \boldsymbol{y}(0) = \Delta \boldsymbol{y}_0 = \boldsymbol{y}(0) - \bar{\boldsymbol{y}}(0) = \boldsymbol{y}(0) - \boldsymbol{y}_0;$$

$$\Delta \boldsymbol{z}(0) = \Delta \boldsymbol{z}_0 = \boldsymbol{z}(0) - \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}(0), 0). \qquad (9)$$

Вырожденная система для линеаризованной модели (8) имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d\Delta \bar{\boldsymbol{y}}}{dt} = \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\right|_L \Delta \bar{\boldsymbol{z}} + \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\right|_L \Delta \bar{\boldsymbol{y}}, 0 \leqslant t \leqslant T, \\ 0 = \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\right|_L \Delta \bar{\boldsymbol{z}} + \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\right|_L \Delta \bar{\boldsymbol{y}}, \end{cases} \qquad (10)$$

при

$$\Delta \bar{\boldsymbol{y}}(0) = \Delta \boldsymbol{y}_0. \qquad (11)$$

Присоединенная система

$$\frac{d\Delta \bar{\boldsymbol{z}}}{d\tau} = \left.\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\right|_L \Delta \tilde{\boldsymbol{z}} + \left.\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\right|_L \Delta \boldsymbol{y} \qquad (12)$$

($\Delta \boldsymbol{y}$ и t рассматриваются как параметры) имеет точку покоя, являющуюся корнем уравнения

$$0 = \left.\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\right|_L \Delta \bar{\boldsymbol{z}} + \left.\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\right|_L \Delta \bar{\boldsymbol{y}}. \qquad (13)$$

Условия теоремы Тихонова применительно к линеаризованной модели (8) можно сформулировать следующим образом.

Условие Iа. *Уравнение (13) имеет изолированный корень относительно* $\Delta \bar{\boldsymbol{z}}$: $\Delta \bar{\boldsymbol{z}}^0 = \Psi(\Delta \bar{\boldsymbol{y}}, t)$, $(\Delta \bar{\boldsymbol{y}}, t) \in D^1 = \{\|\Delta \boldsymbol{y}\| \leqslant b; 0 \leqslant t \leqslant T\}$, *а задача (10), (11) имеет единственное решение на отрезке* $0 \leqslant t \leqslant T$, *соответствующее этому корню.*

Условие IIа. *Точка покоя* $\Delta \tilde{\boldsymbol{z}}^0 = \Psi(\Delta \boldsymbol{y}, t)$ *присоединенной системы (12) является асимптотически устойчивой по Ляпунову при* $\tau \to \infty$ *равномерно относительно* $(\Delta \boldsymbol{y}, t) \in D^1$.

Условие IIIа. *Решение* $\Delta \tilde{\boldsymbol{z}}(\tau)$ *системы (12) при* $\Delta \boldsymbol{y} = \Delta \boldsymbol{y}_0$, $t = 0$ *и* $\Delta \tilde{\boldsymbol{z}}(0) = \Delta \boldsymbol{z}_0$ *существует при* $\tau \geqslant 0$ *и стремится к точке покоя* $\Delta \tilde{\boldsymbol{z}}^0 = \Psi(\Delta \boldsymbol{y}_0, 0)$ *при* $\tau \to \infty$.

Выполнение условий Iа—IIIа гарантирует близость решений задач (8), (9) и (10), (11) в смысле приведенной выше теоремы Тихонова.

Сформулируем утверждение, позволяющее решать вопрос о выполнении условий теоремы Тихонова для нелинейной модели (2) на основе исследования аналогичного вопроса для ее линеаризованной модели (8).

Утверждение

1. Достаточность.

Пусть для линеаризованной модели (8) выполнены условия Iа—IIIа теоремы Тихонова. Тогда для исходной нелинейной модели (2) существует область начальных значений переменных, при которых выполняются условия I—III данной теоремы, а фигурирующая в этих условиях точка покоя $\tilde{\boldsymbol{z}}^0 = \varphi(\boldsymbol{y}, t)$ нелинейной присоединенной системы совпадает с корнем уравнения $\boldsymbol{F}(\bar{\boldsymbol{z}}, \bar{\boldsymbol{y}}, t) = 0$, с учетом которого строилась линеаризованная модель.

2. Необходимость.

Если собственные значения матрицы Якоби $\bar{\mathbf{F}}_z(t) \equiv \mathbf{F}_z(\varphi(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t), \bar{\boldsymbol{y}}(t), t) = \left[\left.\dfrac{\partial F_i(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial z_j}\right|_L\right]_{j=\overline{1,m}}^{i=\overline{1,m}}$ имеют ненулевую вещественную часть при $\forall\, t \in [0, T]$ (t — параметр), то из выполнения условий I—III теоремы Тихонова для нелинейной модели (2) при начальных условиях (3) следует выполнение условий Iа—IIIа данной теоремы для линеаризованной модели (8).

Доказательство достаточности условий утверждения

Требуется доказать, что при сделанном предположении о существовании и единственности решения задач Коши для полной (2), (3), вырожденной (4), (5) и присоединенной (6) нелинейных моделей из

выполнения условий Iа—IIIа для системы (8) следует выполнение условий I—III для системы (2). Рассмотрим последовательно условия для системы (2).

Условие I.

Покажем, что из выполнения условия Iа следует изолированность корня $\bar{z}^0 = \varphi(\bar{y}, t)$ от других корней уравнения $\boldsymbol{F}(\bar{z}, \bar{y}, t) = 0$.

Так как корень уравнения (13)

$$\Delta\bar{z}^0 = \Psi(\Delta\bar{y}, t) = -\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\bigg|_L\right]^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\bigg|_L \Delta\bar{y}$$

существует, то во всех точках кривой $L(t)$ якобиан $\det \bar{\mathbf{F}}_z(t)$ не равен нулю. А значит, по теореме о неявной функции [5] в некоторой окрестности каждой точки кривой $L\{t)$ система уравнений

$$\begin{cases} F_1(\bar{z}, \bar{y}, t) = 0; \\ \vdots \\ F_m(\bar{z}, \bar{y}, t) = 0 \end{cases}$$

имеет единственное решение $\bar{z}^0 = \varphi(\bar{y}, t)$, т. е. корень $\bar{z}^0$ изолирован.

Единственность решения нелинейной вырожденной задачи (4), (5) на отрезке $0 \leqslant t \leqslant T$, соответствующего корню $\bar{z}^0 = \varphi(\bar{y}, t)$, имеет место в силу исходного предположения.

Таким образом, условие I выполнено.

Условие II.

Требование II теоремы Тихонова заключается в том, что изолированная точка покоя $\tilde{z}^0 = \varphi(\boldsymbol{y}, t)$ присоединенной системы (6) должна быть асимптотически устойчивой по Ляпунову при $\tau \to \infty$ равномерно относительно $(\boldsymbol{y}, t) \in D$ (напомним, что независимой переменной в системе (6) является τ, а $\boldsymbol{y}$ и t рассматриваются как параметры).

Как показано в [6], при выполнении условия

$$\operatorname{Re}\bar{\lambda}_i(t) < 0 \text{ при } 0 \leqslant t \leqslant T \ (t \text{ — параметр}),\ i = \overline{1, m}, \quad (14)$$

где $\bar{\lambda}_i(t) = \bar{\lambda}_i(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t)$ — собственные значения матрицы Якоби $\bar{\mathbf{F}}_z(t) \equiv \mathbf{F}_z(\varphi(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t), \bar{\boldsymbol{y}}(t), t) = \left[\frac{\partial F_i(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial z_j}\bigg|_L\right]_{j=\overline{1,m}}^{i=\overline{1,m}}$, существует область $D_1 = \{(\boldsymbol{y}, t) : \|\boldsymbol{y} - \bar{\boldsymbol{y}}\| \leqslant \eta,\ \eta > 0 \text{ — const};\ 0 \leqslant t \leqslant T\}$, такая что для собственных значений матрицы $\mathbf{F}_z(\varphi(\boldsymbol{y}, t), \boldsymbol{y}, t) = \left[\frac{\partial F_i(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial z_j}\bigg|_{z=\varphi(\boldsymbol{y}, t)}\right]_{j=\overline{1,m}}^{i=\overline{1,m}}$ выполняется $\operatorname{Re}\lambda_i(\boldsymbol{y}, t) < -\alpha < 0$ при параметрах $(\boldsymbol{y}, t) \in D_1$, $i = \overline{1, m}$ ($\alpha > 0$ — const).

Отсюда следует, что $\tilde{z}^0 = \varphi(\boldsymbol{y}, t)$ является асимптотически устойчивой точкой покоя присоединенной системы (6) равномерно относительно D_1 (т. е. требование II теоремы Тихонова выполнено).

Вместе с тем, условие (14) является необходимым и достаточным условием асимптотической устойчивости по Ляпунову точки покоя $\Delta\tilde{z}^0 = \Psi(\Delta\boldsymbol{y}, t)$ присоединенной системы (12) — линейной системы с постоянными коэффициентами (t в системе (12) рассматривается как параметр). Значит, из выполнения условия IIа следует выполнение условия II.

Условие III.

Требуется показать, что из выполнения условий теоремы Тихонова для линеаризованной системы вытекает наличие области начальных значений переменной $\boldsymbol{z}$, при которых решение $\tilde{z}(\tau)$ присоединенной системы (6) при $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{y}_0$, $t = 0$ существует при $\tau \geqslant 0$ и стремится к точке покоя $\varphi(\boldsymbol{y}_0, 0)$ при $\tau \to \infty$.

Из выполнения условий Iа и IIа для линеаризованной системы следует асимптотическая устойчивость "в малом" точки покоя $\tilde{z}^0 = \varphi(\boldsymbol{y}, t)$, а также ее изолированность от других корней уравнения $\boldsymbol{F}(\bar{z}, \bar{y}, t) = 0$. Данный факт означает наличие требуемой области начальных значений переменной $\boldsymbol{z}$.

Таким образом, первая часть утверждения доказана.

Перейдем к доказательству второй части утверждения.

Доказательство необходимости условий утверждения

Требуется доказать, что при указанных в формулировке утверждения ограничениях из выполнения условий I—III для нелинейной модели (2) следует выполнение условий Iа—IIIа для линеаризованной модели (8).

Рассмотрим последовательно условия теоремы Тихонова для модели (8).

Условие Iа.

Так как собственные значения матрицы Якоби $\bar{\mathbf{F}}_z(t)$ по условию утверждения имеют ненулевую вещественную часть при $\forall t \in [0, T]$ (t рассматривается как параметр), то якобиан $\det \bar{\mathbf{F}}_z(t) = \prod_{i=1}^{m} \bar{\lambda}_i(t)$ ($\bar{\lambda}_i(t) = \bar{\lambda}_i(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t)$) отличен от нуля, т. е. матрица $\bar{\mathbf{F}}_z(t)$ для $\forall t$ не вырождена. Поэтому уравнение (13) имеет единственный и, следовательно, изолированный корень

$$\Delta\bar{z}^0 = \Psi(\Delta\bar{y}, t) = -\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\bigg|_L\right]^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\bigg|_L \Delta\bar{y}, \quad (15)$$

что является требованием условия Ia. Заметим, что само предположение о неравенстве нулю $\mathrm{Re}\,\overline{\lambda}_i(t)$, а также линеаризованная модель (8) теряют смысл при невыполнении требования I, подразумевающего наличие корня $\bar{\boldsymbol{z}}^0 = \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}, t)$.

Подставляя корень (15) в дифференциальное уравнение вырожденной системы (10), получаем последнюю в виде:

$$\frac{d\Delta\bar{\boldsymbol{y}}}{dt} = \left[-\frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\bigg|_L \left(\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\bigg|_L\right]^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial y}\bigg|_L\right) + \frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial y}\bigg|_L\right]\Delta\bar{\boldsymbol{y}}. \quad (16)$$

Система уравнений (16) — линейная, а значит, для выполнения требований теоремы существования и единственности ее решения $\Delta\bar{\boldsymbol{y}}(t)$ на отрезке $0 \leqslant t \leqslant T$ достаточно, чтобы правая часть этой системы являлась непрерывной функцией времени на указанном отрезке. Так как якобиан $\det\overline{\mathbf{F}}_{\boldsymbol{z}}(t)$ не равен нулю, а функции $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)$ и $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)$ предполагаются непрерывно дифференцируемыми по $\boldsymbol{z}$ и $\boldsymbol{y}$, то система (16) имеет единственное решение, соответствующее корню (15), при начальном условии (11) на отрезке $0 \leqslant t \leqslant T$.

Таким образом, все требования условия Ia выполнены.

Условие IIa.

Покажем, что при сделанном предположении о неравенстве нулю $\mathrm{Re}\,\overline{\lambda}_i(t)\ \forall\ t \in [0, T]$ (t в присоединенной системе рассматривается как параметр, $\overline{\lambda}_i(t) = \overline{\lambda}_i(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t)$ — собственные значения матрицы $\overline{\mathbf{F}}_{\boldsymbol{z}}(t) \equiv \mathbf{F}_{\boldsymbol{z}}(\varphi(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t), \bar{\boldsymbol{y}}(t), t), i = \overline{1, m}$) из выполнения условия II следует выполнение условия IIa.

По условию II изолированная точка покоя $\tilde{\boldsymbol{z}}^0 = \varphi(\boldsymbol{y}, t)$ присоединенной системы (6) должна быть асимптотически устойчивой по Ляпунову при $\tau \to \infty$ равномерно относительно параметров $(\boldsymbol{y}, t) \in D$. Если это так, то, как следует из теоремы об устойчивости и теоремы о неустойчивости по первому приближению, собственные значения $\lambda_i(\boldsymbol{y}, t)$ матрицы $\mathbf{F}_{\boldsymbol{z}}(\varphi(\boldsymbol{y}, t), \boldsymbol{y}, t)$ имеют неположительную вещественную часть при всех $(\boldsymbol{y}, t) \in D$. Поэтому и $\overline{\lambda}_i(t) = \overline{\lambda}_i(\bar{\boldsymbol{y}}(t), t), i = \overline{1, m}$, не могут иметь положительную вещественную часть, поскольку параметры $\bar{\boldsymbol{y}}$ также принадлежат D. Но так как по условию утверждения $\mathrm{Re}\,\overline{\lambda}_i(t) \neq 0$ при $\forall\ t \in [0, T]$, $i = \overline{1, m}$, то отсюда следует, что $\mathrm{Re}\,\overline{\lambda}_i(t) < 0$ при $\forall\ t \in [0, T]$. А значит, точка покоя $\Delta\tilde{\boldsymbol{z}}^0 = \Psi(\Delta\boldsymbol{y}, t)$ присоединенной системы (12) — линейной системы с постоянными коэффициентами ($\Delta\boldsymbol{y}$ и t рассматриваются как параметры) — асимптотически устойчива по Ляпунову равномерно относительно $(\Delta\boldsymbol{y}, t) \in D$[1].

Условие IIIa.

Уравнение присоединенной системы (12) имеет решение

$$\Delta\tilde{\boldsymbol{z}}(\tau) = C\mathbf{e}^{\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\Big|_L \tau} - \left[\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\bigg|_L\right]^{-1} \times \frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{y}}\bigg|_L \Delta\boldsymbol{y} = C\mathbf{e}^{\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, t)}{\partial \boldsymbol{z}}\Big|_L \tau} + \Psi(\Delta\boldsymbol{y}, t), \quad (17)$$

где C — постоянная интегрирования, $(\Delta\boldsymbol{y}, t)$ рассматриваются как параметры.

Рассмотрим присоединенную систему (12) при $\Delta\boldsymbol{y} = \Delta\boldsymbol{y}_0$, $t = 0$ (т. е. при начальном значении параметров $\Delta\boldsymbol{y}$ и t):

$$\frac{d\Delta\tilde{\boldsymbol{z}}}{d\tau} = \frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, 0)}{\partial \boldsymbol{z}}\bigg|_{\hat{L}} \Delta\tilde{\boldsymbol{z}} + \frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}, 0)}{\partial \boldsymbol{y}}\bigg|_{\hat{L}} \Delta\boldsymbol{y}_0, \quad \text{где } \hat{L} = L(t)|_{t=0}, \quad (18)$$

с начальным значением $\Delta\tilde{\boldsymbol{z}}(0) = \Delta\boldsymbol{z}_0$, которое входит в начальные условия (9). Так как $\mathrm{Re}\,\overline{\lambda}_i(t) < 0$ при $\forall\ t \in [0, T]$, то, как видно из выражения (17), решение $\Delta\tilde{\boldsymbol{z}}(\tau)$ системы (18) стремится к асимптотически устойчивой точке покоя $\Delta\tilde{\boldsymbol{z}}^0 = \Psi(\Delta\boldsymbol{y}_0, 0)$ при любых начальных условиях, в том числе и при $\Delta\tilde{\boldsymbol{z}}(0) = \Delta\boldsymbol{z}_0$. Условие IIIa выполняется, таким образом, вторая часть утверждения также доказана.

Заключение

Резюмируем полученные результаты. В статье доказано утверждение, позволяющее при $\mathrm{Re}\,\overline{\lambda}_i(t) \neq 0$ $\forall\ t \in [0, T]$ (где $\overline{\lambda}_i(t)$ — собственные значения матрицы $\overline{\mathbf{F}}_{\boldsymbol{z}}(t) = \mathbf{F}_{\boldsymbol{z}}(\varphi(\bar{\boldsymbol{y}}, t), \bar{\boldsymbol{y}}, t)$, t — параметр) судить о выполнении условий теоремы Тихонова для сингулярно возмущенной модели описания процесса в нелинейной неавтономной динамической системе по ее линеаризованной модели. Указанный случай неравенства нулю $\mathrm{Re}\,\overline{\lambda}_i(t)$ имеет наибольший практический интерес.

Условия теоремы Тихонова, вообще говоря, предполагают перебор корней $\bar{\boldsymbol{z}}^0 = \varphi(\bar{\boldsymbol{y}}, t)$ уравнения $\boldsymbol{F}(\bar{\boldsymbol{z}}, \bar{\boldsymbol{y}}, t) = 0$ — точек покоя присоединенной системы (6) — и проверку их асимптотической устойчивости. Доказательство устойчивости некоторой

особой точки φ^i гарантирует существование конечной области начальных значений переменной z, при которых решения присоединенной системы сходятся к φ^i. Вместе с имеющейся свободой выбора y_0 это позволяет сделать вывод о выполнении требований теоремы Тихонова для конечной области начальных условий $X_0' \subseteq X_0$, что влечет за собой понижение порядка не только модели конкретного динамического процесса, но и модели системы для определенной области начальных условий. В работе [2] для случая, когда малый параметр входит только в одно уравнение модели (2), приведено правило точного определения границ областей начальных значений переменной z, при которых решения присоединенной системы сходятся к выбранной асимптотически устойчивой особой точке.

Список литературы

1. **Тихонов А. Н.** Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных // Математический сборник. 1952. Т. 31 (73). № 3. С. 575—586.
2. **Державин О. М., Сидорова Е. Ю.** О решении задачи понижения по Тихонову порядка модели нелинейной динамической системы на основе ее линейного приближения // Вестник МЭИ. 2007. № 2. С. 141—147.
3. **Державин О. М., Сидорова Е. Ю.** О понижении порядка по первому приближению сингулярно возмущенной модели нелинейной динамической системы с несколькими малыми параметрами // Тр. междунар. научно-технической конференции "Информационные средства и технологии". М.: МЭИ, 2008. Т. 3. С. 97—99.
4. **Васильева А. Б., Бутузов В. Ф.** Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений: науч.-теор. пособие. М.: Высшая школа, 1990.
5. **Фихтенгольц Г. М.** Основы математического анализа. М.: Наука, 1964. Т. 2.
6. **Васильева А. Б., Бутузов В. Ф.** Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973.

УДК 621.398-501

О. С. Колосов, д-р техн. наук, проф.,
С. Н. Лепешкин, аспирант,
А. П. Сухецкий, аспирант,
Московский энергетический институт
(технический университет)
В. А. Зимин, канд. техн. наук, ген. директор,
ООО Внедренческая фирма ЭЛНА
kolosovOS@mpei.ru

Специфика параллельной работы динамических объектов и систем на общую нагрузку

На основе предлагаемой математической модели параллельной работы динамических объектов и систем на общую нагрузку находятся условия, при которых устойчивость такой структуры не зависит от числа объектов и их параметров. В качестве динамических объектов и систем рассматриваются газоперекачивающие агрегаты и приводные двигатели синхронных генераторов.

Ключевые слова: *динамические объекты и системы, устойчивость, параллельная работа, общая нагрузка, газоперекачивающий агрегат, приводной двигатель синхронного генератора*

Введение

Объекты и системы автоматического управления, работающие на общую нагрузку, находят широкое распространение на практике. Сюда можно отнести работу силовых приводов синхронных генераторов, включенных на общую нагрузку; работу газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на общий трубопровод и т. д. Важной особенностью рассматриваемых объектов и систем является их относительно большая инерционность. Здесь следует отметить, что описание динамики объектов в виде апериодических звеньев обычно получается путем целенаправленного синтеза управляющей части приводов, которые сами собой представляют замкнутые структуры. При этом динамика приводных двигателей в них описывается гораздо более сложными зависимостями [1], чем дифференциальное уравнение первого порядка. Настройка приводов под апериодический характер переходных процессов является общепринятой и представляется естественной.

Как правило, организация управления параллельной работой подобных однотипных устройств не вызывает затруднений. Однако в настоящее время начинают выдвигаться новые, дополнительные требования к качеству управления параллельной работой динамических объектов и систем на общую нагрузку. Так, например, быстродействие ГПА компрессорных цехов на газопроводах оказывается недостаточным при резких скачках давления газа в трубопроводе, что приводит к необходимости байпассирования, а это, в свою очередь, вызывает большие энергетические потери при перекачке газа. Начинают разрабатываться системы, в которых параллельно должны работать разнотипные агрегаты. Например, на газоперекачивающих станциях возможна в отдельных случаях параллельная работа неуправляемых (по частоте вращения приводного двигателя) и управляемых ГПА. Проектируются малые тепловые электростанции для удаленных поселков в районах месторождений газа и нефти, использующие транспортируемое сырье, с разнотипными генераторами, работающими параллельно. Разрабатываются системы гарантированного питания, для которых включение и отключение одного из генераторов

в зависимости от потребляемой нагрузки является штатным режимом.

Для этих завязанных на общую нагрузку систем важным фактором является качество процессов управления и устойчивость. Для решения подобных задач требуется разработка математической модели, описывающей параллельную работу динамических объектов и систем на общую нагрузку как объекта управления системы более высокого уровня. Знание особенностей динамики подобного объекта обеспечивает возможность исследования динамики всей системы как аналитические, так и путем цифрового моделирования.

Анализируемый объект в виде параллельно работающих на общую нагрузку динамических объектов или систем может быть отнесен к одному из видов многосвязных систем с внутренними перекрестными связями, обусловленными наличием общей нагрузки. Существующие методы исследования многосвязных систем [2] позволяют проводить аналитические исследования получаемых структур в целях выявления их особенностей.

В данной статье

- предлагается математическая модель произвольного числа параллельно работающих на общую нагрузку динамических объектов;
- проводится анализ динамики параллельной работы двух однотипных динамических объектов или систем на общую нагрузку с последующим обобщением на произвольное число таких элементов;
- полученные результаты далее развиваются на варианты динамических объектов или систем с отличающимися друг от друга параметрами. При этом используются подходы, применяемые в методе корневого годографа [3].

Динамическое представление одного из параллельно работающих объектов или систем

Динамика рассматриваемых объектов или систем (далее будем их называть объектами) в зависимости от настройки управляющей части приводов в окрестности рабочего режима достаточно полно описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка. При этом корни его характеристического уравнения могут быть как действительными и отрицательными, так и комплексно-сопряженными с отрицательными действительными частями. На практике (за счет настройки приводов) это обычно бывают два действительных отрицательных корня, один из которых много меньше другого, т. е. подобный объект в первом приближении может рассматриваться как объект первого порядка. Назовем подобные объекты инерционными и проведем исследования для них с последующим обобщением результатов на общий случай.

В операторной форме динамика инерционного объекта представлена системой уравнений:

$$\begin{aligned} y(s) &= \frac{1}{Ts+1}\,(x(s)+z(s));\\ x(s) &= K_U U(s) - K_f f(s);\\ z(s) &= K_\delta \delta(s), \end{aligned} \qquad (1)$$

где s — оператор дифференцирования; $y(s)$ — выходная координата объекта (частота вращения приводного двигателя синхронного генератора или степень сжатия для ГПА); $x(s)$ — входная координата объекта, зависимая от управляющего воздействия $U(s)$ (уставки для приводного двигателя генератора или относительных оборотов электродвигателя ГПА) и от нагрузки $f(s)$ (момента нагрузки для приводного двигателя генератора или приведенного расхода газа для ГПА); $z(s)$ — моменты самовыравнивания, возникающие при параллельной работе объектов на общую нагрузку; T — постоянная времени объекта, которая, в общем случае, определяется нагрузкой и является зависимой от входных воздействий, но в окрестности рабочего режима может считаться постоянной; K_U, K_f, K_δ — коэффициенты пересчета координат к входу объекта с соответствующими размерностями; $\delta(s)$ — интегральный показатель (для приводных двигателей синхронных генераторов и для двигателей ГПА — фазовое смещение вращающихся роторов относительно друг друга) [5, 6].

Устойчивость и качество параллельной работы на общую нагрузку двух инерционных объектов

Пусть работающий нагруженный первый объект описывается уравнением вида

$$\begin{aligned} y_1(s) &= \frac{1}{T_1+1}\,(K_{U_1} U_1(s) - K_f f(s)) =\\ &= W_1(s)(K_{U_1} U_1(s) - K_f f(s)), \end{aligned} \qquad (2)$$

где $W_1(s) = \dfrac{1}{T_1 s+1}$ — передаточная функция первого объекта.

В установившемся режиме при постоянных значениях управляющего воздействия и нагрузки выходная величина объекта определяется как

$$y_1 = K_{U_1} U_1 - K_f f, \qquad (3)$$

причем в (3) слагаемое $K_f f$ определяет статизм объекта (уменьшение управляемой координаты y_1 под воздействием нагрузки f).

Подключение второго объекта к общей нагрузке (например, после ввода второго синхронного генератора или подключения к общей трубе ГПА после выравнивания давлений) описывается системой

уравнений, в которой для сокращения записей оператор s опущен:

$$y_1 = W_1(K_{U_1} U_1 - K_f f + K_{\delta_1} \frac{c}{s}(y_2 - y_1));$$

$$y_2 = W_2(K_{U_2} U_2 + K_{\delta_2} \frac{c}{s}(y_1 - y_2)), \qquad (4)$$

где c — коэффициент передачи общего интегрирующего элемента, влияющего на моменты самовыравнивания; $W_2 = \frac{1}{T_2 s + 1}$ — передаточная функция второго объекта.

Заметим, что модель (4) справедлива и для общего случая, когда $W_1(s)$, $W_2(s)$ имеют более высокий порядок.

Для нахождения выходных координат объектов систему (4) удобнее представить в ином виде:

$$\left(1 + K_{\delta_1} \frac{c}{s} W_1\right) y_1 - K_{\delta_1} \frac{c}{s} W_1 y_2 = W_1(K_{U_1} U_1 - K_f f) -$$

$$- K_{\delta_2} \frac{c}{s} W_2 y_1 + \left(1 + K_{\delta_2} \frac{c}{s} W_2\right) y_2 = W_2 K_{U_2} U_2. \quad (5)$$

Решение (5) дает:

$$y_1(s) = \\ = W_1 \frac{s(K_{U_1} U_1 - K_f f) + c W_2(K_{\delta_2}(K_{U_1} U_1 - K_f f) + K_{\delta_1} K_{U_2} U_2)}{s + c(W_1 K_{\delta_1} + W_2 K_{\delta_2})};$$
$$y_2(s) = \\ = W_2 \frac{s K_{U_2} U_2 + c W_1(K_{\delta_2}(K_{U_1} U_1 - K_f f) + K_{\delta_1} K_{U_2} U_2)}{s + c(W_1 K_{\delta_1} + W_2 K_{\delta_2})}. \qquad (6)$$

Проанализируем результат (6) для идеально одинаковых параметров объектов и одинаковых входных условий:

$$W_1 = W_2 = W;\ T_1 = T_2 = T;$$
$$K_{U_1} = K_{U_2} = K_U;\ K_{\delta_1} = K_{\delta_2} = K_\delta; \qquad (7)$$
$$U_1 = U_2 = U.$$

С учетом (7) решения (6) принимают следующий вид:

$$y_1(s) = \frac{s(K_U U - K_f f)(Ts + 1) + c K_\delta(K_U 2U - K_f f)}{(Ts + 1)(Ts^2 + s + 2c K_\delta)};$$
$$y_2(s) = \frac{s K_U U(Ts + 1) + c K_\delta(K_U 2U - K_f f)}{(Ts + 1)(Ts^2 + s + 2c K_\delta)}. \qquad (8)$$

Из (8) следует, что в установившихся режимах при постоянных и равных управляющих сигналах U выходные сигналы y_i также равны:

$$y_1 = y_2 = y = K_U U - K_f \frac{f}{2}.$$

При этом статизм по сравнению с (3) уменьшился в два раза, что свидетельствует о равномерном распределении нагрузки между объектами. Характеристическое уравнение такой системы содержит три левых корня, причем один из них отрицательный и действительный, а два других могут быть как действительными и отрицательными, так и комплексно-сопряженными с отрицательными действительными частями. Отметим, что ни при каких коэффициентах c и K_δ такая система устойчивость не теряет.

Вывод об уменьшении статизма, очевидно, сохраняется и для случаев более высоких порядков дифференциальных уравнений, описывающих динамику объектов.

Несложно показать, что и в общем случае (6), когда параметры инерционных объектов отличаются друг от друга, корни системы остаются всегда левыми и система всегда устойчива. В самом деле, непосредственно из (6) получаем характеристическое уравнение системы в виде

$$A(s) = s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + \\ + c(K_{\delta_1} + K_{\delta_2})\left(\frac{K_{\delta_1} T_2 + K_{\delta_2} T_1}{K_{\delta_1} + K_{\delta_2}} s + 1\right). \qquad (9)$$

В соответствии с приемами, используемыми в методе корневого годографа [3], характеристическое уравнение (9) может быть представлено как характеристическое уравнение замкнутой одноконтурной системы третьего порядка, передаточная функция которой в разомкнутом виде $W_p(s)$ содержит отрицательный нуль $\left(-\frac{1}{T_0}\right)$:

$$W_p(s) = k \frac{T_0 s + 1}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \qquad (10)$$

где $k = c(K_{\delta_1} + K_{\delta_2})$; $T_0 = \frac{K_{\delta_1} T_2 + K_{\delta_2} T_1}{K_{\delta_1} + K_{\delta_2}}$.

На комплексной плоскости корневой годограф замкнутой системы, у которой передаточная функция в разомкнутом состоянии представлена соотношением (10), при $k = 0$ имеет два действительных отрицательных полюса $\left(-\frac{1}{T_1}; -\frac{1}{T_2}\right)$ и отрицательный нуль $\left(-\frac{1}{T_0}\right)$. Отметим, что этот нуль на действительной оси всегда будет находиться в промежутке между полюсами $-\frac{1}{T_1}$ и $-\frac{1}{T_2}$. Получающийся корневой годограф замкнутой системы с характеристи-

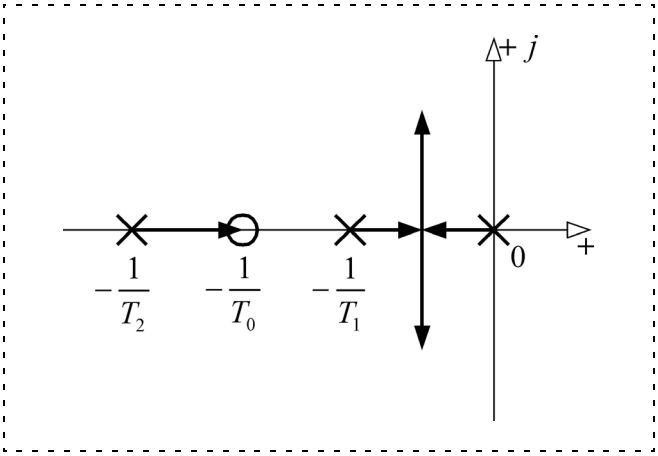


Рис. 1. Корневой годограф замкнутой системы с разомкнутой передаточной функцией (10)

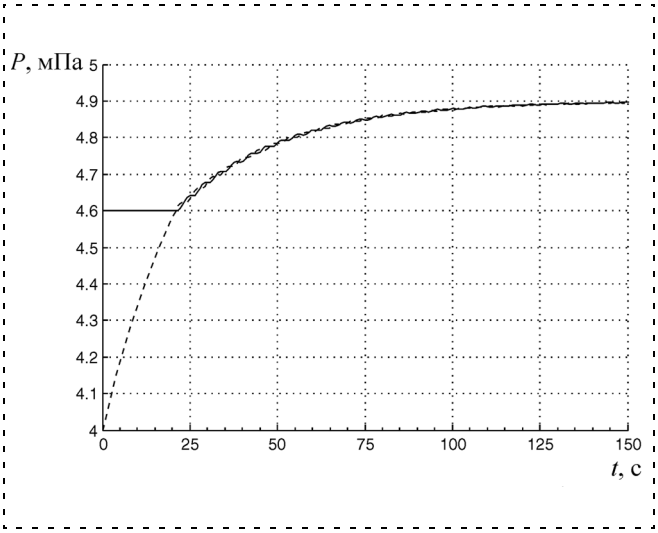


Рис. 2. Моделирование подключения второго ГПА к работающему первому

ческим уравнением (9) при изменении $0 \leqslant k \prec \infty$ показан на рис. 1.

Непосредственное построение корневого годографа [3] показывает, что при любых значениях k корни замкнутой системы не оказываются в правой полуплоскости, и система не теряет своей устойчивости.

На рис. 2 представлены результаты моделирования процесса изменения давления газа в общей трубе при подключении упрощенной модели второго ГПА к уже работающей упрощенной модели первого. (Упрощенная модель ГПА подразумевает подачу на вход ГПА приведенного объемного расхода газа. Пересчет этого расхода на коммерческий выполняется по известным соотношениям [4], учитывающим параметры перекачиваемого газа.) Параметры и управляющие воздействия системы (5) в соответствии с (7) имели значения: постоянная времени $T = 30$ с; относительные обороты $U = 1$; приведенный расход газа $f = 3$ м^3/с; $K_U = 1{,}3$; $K_f = 0{,}05$ с/м^3; $K_\delta = 1$; $c = 30$ с$^{-1}$; входное давление $P_{\text{вх}} = 4{,}0$ МПа; y — степень сжатия; выходное давление $P_{\text{вых}} = yP_{\text{вх}}$.

На рис. 2 в начальный момент времени первый ГПА работает в стационарном режиме ($Y_1(0) = 1{,}15$; $P_{\text{вых1}} = 4{,}6$ МПа), а второй с номинальными оборотами подключен к входной трубе ($y_2(0) = 1{,}0$; $P_{\text{вых2}} = 4{,}0$ МПа). Каждый ГПА функционирует независимо, и давление на выходе второго растет по экспоненциальному закону. В момент времени $t \approx 21$ с, когда $P_{\text{вых1}} = P_{\text{вых2}}$, система начинает функционировать в соответствии с (5). Рис. 2 достаточно хорошо отражает эффект увеличения давления в трубе, наблюдаемый в реальных условиях, а также наличие высокочастотных затухающих колебаний (характерных для данной математической модели), параметры которых целиком зависят от коэффици-

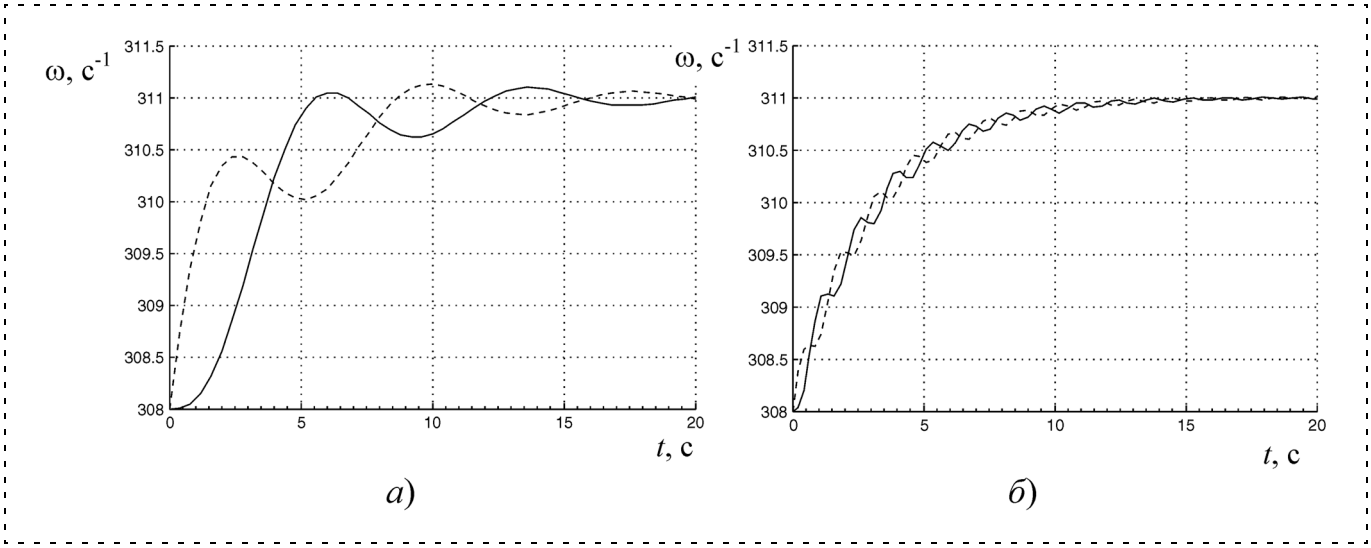


Рис. 3. Переходные процессы изменения частот вращения моделей приводных двигателей синхронных генераторов в процессе выравнивания нагрузки для разных коэффициентов *c*

ента интегратора c. Эти колебания практически не просматриваются для относительно большого коэффициента c, что характерно для изменения давления в трубе при подключении очередного ГПА.

Влияние коэффициента c хорошо просматривается на переходных процессах выравнивания нагрузки между синхронными генераторами после вхождения второго из них в синхронизм. На рис. 3 представлены результаты моделирования процесса изменения частот вращения приводных двигателей синхронных генераторов при подключении модели второго приводного двигателя к уже работающей модели первого. Для наглядности номинальная частота вращения двигателя приводится к частоте сети 50 Гц. Параметры и управляющие воздействия системы (5) были взяты одинаковыми и в соответствии с (7) имели значения: постоянная времени $T = 3$ с; относительные уставки $U = 1$; момент нагрузки $f = 30$ Н · м; $K_U = 314$ с$^{-1}$; $K_f = 0{,}2$ с$^{-1}$ · Н · м; $K_\delta = 1$ с$^{-1}$. На рис. 3, *а* показаны переходные процессы при $c = 1$ с$^{-1}$, а на рис. 3, *б*, соответственно, при $c = 30$ с$^{-1}$.

В случае, показанном на рис. 3, *а*, наблюдаются колебательные процессы, характерные для подключения второго синхронного генератора к уже работающему нагруженному первому. Подобные переходные процессы наблюдаются в системах гарантированного питания с несколькими синхронными генераторами [1, 6, 7]. Вариант, показанный на рис. 3, *б*, более характерен для случая подключения второго ГПА к общей трубе (см. рис. 2). Во всяком случае, для каждых конкретных систем коэффициент интегратора (c) в модели подбирается индивидуально. Следует отметить также, что в системе (5) внешняя нагрузка (f) прикладывается только к одному из объектов (неважно, с каким номером).

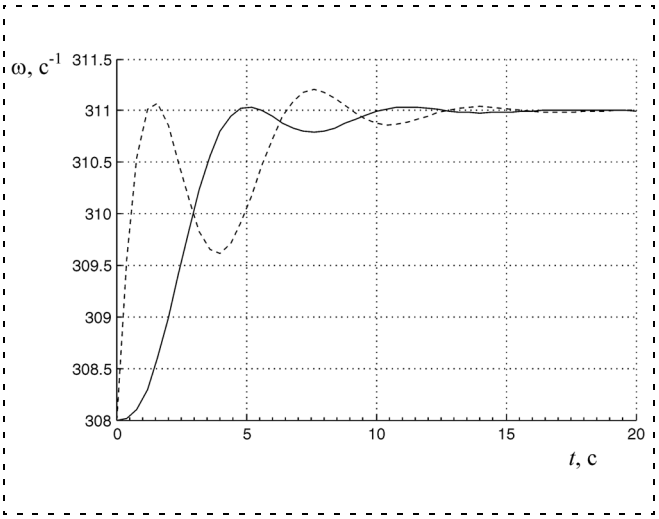


Рис. 4. Изменение частот вращения моделей приводных двигателей синхронных генераторов в процессе выравнивания нагрузки при разных постоянных времени двигателей

На рис. 4 демонстрируется устойчивая работа системы при подключении модели второго приводного двигателя к уже работающей модели первого в процессе выравнивания нагрузки между синхронными генераторами после вхождения второго из них в синхронизм для разных постоянных времени приводных двигателей ($T_1 = 3$ с; $T_2 = 1{,}5$ с).

Несложно показать, что при произвольном порядке передаточных функций динамических объектов $W_1(s)$, $W_2(s)$ статизм системы (6) при равенстве параметров объектов также уменьшается в два раза. Вместе с тем, приведение характеристического уравнения в (6) к характеристическому уравнению замкнутой одноконтурной системы с изменяющимся свободным членом показывает, что передаточная функция такой системы в разомкнутом состоянии всегда имеет порядок числителя, меньший порядка знаменателя на величину $n + 1$ (где n — порядок характеристического уравнения динамического объекта). В самом деле, для инерционного объекта (первого порядка), как было показано выше, такая разность равна двум, и корневой годограф системы третьего порядка при любых k находится в правой полуплоскости. Если динамические объекты имеют характеристические уравнения второго порядка и различаются параметрами, то эквивалентная передаточная функция разомкнутой одноконтурной системы будет иметь согласно (6) знаменатель пятого порядка, а числитель — второго. Корневой годограф такой системы при стремлении к бесконечности, согласно [3], обязательно при определенном k переходит в правую полуплоскость, и система теряет устойчивость. Таким образом, если рассматривать в качестве единого динамического объекта некоторой системы управления более высокого уровня анализируемые структуры (в виде параллельно работающих на общую нагрузку динамических приводов), то необходимо учитывать, что как устойчивость самого этого сложного динамического объекта, так и устойчивость всей системы верхнего уровня всецело зависят от динамики составляющих приводов и от их числа [1, 6, 7]. Последнее утверждение вполне согласуется с результатами, полученными в следующем разделе. В этом смысле естественным оказывается стремление обеспечить динамику силового привода в первом приближении как объекта первого порядка.

Устойчивость и качество параллельной работы на общую нагрузку *n* инерционных объектов

Предложенная выше модель в виде системы уравнений (4), описывающая динамику совместной работы двух динамических объектов на общую нагрузку, может быть распространена на произволь-

ное число (n) объектов и представляется в виде системы n уравнений:

$$\begin{aligned}
&y_1 = W_1(K_{U_1}U_1 - K_f f + K_{\delta_1}\frac{c}{s}((y_2 - y_1) + \\
&+ (y_3 - y_1) + ... + (y_n - y_1)));\\
&y_2 = W_2(K_{U_2}U_2 + K_{\delta_2}\frac{c}{s}((y_1 - y_2) + \\
&+ (y_3 - y_2) + ... + (y_n - y_2)));\\
&.....\\
&y_n = W_n(K_{U_n}U_n + K_{\delta_n}\frac{c}{s}((y_1 - y_n) + \\
&+ (y_2 - y_n) + ... + (y_{n-1} - y_n))).
\end{aligned} \qquad (11)$$

Заметим, что (11) носит общий характер, т. е. справедливо для любых видов передаточных функций объектов (в том числе и для объектов первого порядка).

Для нахождения решений систему (11) удобнее привести к виду

$$\begin{aligned}
&(1 + (n-1)K_{\delta_1}\frac{c}{s}W_1)y_1 - K_{\delta_1}\frac{c}{s}W_1y_2 -\\
&- K_{\delta_1}\frac{c}{s}y_3 - ... - K_{\delta_1}\frac{c}{s}y_n = W_1(K_{U_1}U_1 - K_f f);\\
&-K_{\delta_2}\frac{c}{s}W_2y_1 + (1 + (n-1)K_{\delta_2}\frac{c}{s}W_2)y_2 -\\
&- K_{\delta_2}\frac{c}{s}W_2y_3 - ... - K_{\delta_2}\frac{c}{s}W_2y_n = W_2K_{U_2}U_2;\\
&.....\\
&-K_{\delta_n}\frac{c}{s}W_ny_1 - K_{\delta_n}\frac{c}{s}W_ny_2 - K_{\delta_n}\frac{c}{s}W_ny_3 - ... +\\
&+ (1 + (n-1)K_{\delta_n}\frac{c}{s}W_n)y_n = W_nK_{U_n}U_n.
\end{aligned} \qquad (12)$$

Проанализируем результат решения (12) для идеально одинаковых параметров инерционных объектов и одинаковых входных условий:

$$\begin{aligned}
&W_1 = W_2 = ... = W_n = W;\\
&T_1 = T_2 = ... = T_n = T;\\
&K_{U_1} = K_{U_2} = ... = K_{U_n} = K_U;\\
&K_{\delta_1} = K_{\delta_2} = ... = K_{\delta_n} = K_\delta;\\
&U_1 = U_2 = ... = U_n = U.
\end{aligned} \qquad (13)$$

Подставив (13) в (12), получаем решение в виде

$$\begin{aligned}
&y_1(s) = \frac{s(K_UU - K_f f)(Ts+1) + cK_\delta(K_UnU - K_f f)}{(Ts+1)(Ts^2 + s + ncK_\delta)};\\
&y_2(s) = y_3(s) = ... = y_n(s) =\\
&= \frac{sK_UU(Ts+1) + cK_\delta(K_UnU - K_f f)}{(Ts+1)(Ts^2 + s + ncK_\delta)}.
\end{aligned} \qquad (14)$$

Анализ (14) показывает, что при постоянных входных воздействиях в установившемся режиме все выходные сигналы становятся равными друг другу, а статизм оказывается в n раз меньше, чем при работе одного объекта:

$$y_1 = y_2 = y_3 = ... = y_n = y = K_UU - K_f\frac{f}{n}.$$

Как и для двух объектов, этот вывод сохраняется и для случаев более высоких порядков дифференциальных уравнений, описывающих динамику объектов.

Другим важным результатом является то, что характеристическое уравнение системы из n объектов (14) осталось уравнением третьего порядка и схоже с характеристическим уравнением системы из двух объектов (8). В силу этого все рассуждения и выводы, приводимые для системы из двух инерционных объектов, работающих на общую нагрузку, оказываются справедливыми и для системы с n инерционными объектами. В общем случае, когда параметры каждого из n инерционных объектов, образующие систему (12), работающую на общую нагрузку, оказываются разными, характеристическое уравнение имеет порядок $n + 1$. Однако анализ устойчивости такой системы можно проводить так же, как и для системы их двух объектов, воспользовавшись методом построения корневого годографа [3]. В самом деле, можно показать, что характеристическое уравнение системы (12) может быть представлено как характеристическое уравнение замкнутой одноконтурной системы с передаточной функцией в разомкнутом состоянии, имеющей один нулевой корень знаменателя, n отрицательных действительных корней знаменателя (полюсов) и $n - 1$ корень в числителе (нули числителя). При этом нули в числителе могут быть как отрицательными действительными, так и комплексно-сопряженными с отрицательными действительными частями. Используя свойства корневого годографа, можно показать, что с ростом свободного члена характеристического уравнения замкнутой системы $n - 1$ нули числителя разомкнутой передаточной функции компенсируют $n - 1$ отрицательный действительный корень знаменателя. Таким образом, корневой годограф сохраняет практически тот же вид, что и годограф для системы из двух объектов, показанный на рис. 1. Таким образом, система из n инерционных объектов, работающая на общую нагрузку, сохраняет свою устойчивость при любых параметрах объектов.

Отметим, что рассуждения и выводы для двух динамических объектов произвольного порядка, сделанные выше, остаются справедливыми и для случая n параллельно работающих динамических объектов произвольного порядка.

Заключение

В данной статье

1) предложена модель, описывающая динамику параллельно работающих на общую нагрузку динамических объектов произвольного порядка;

2) показано, что статизм системы из n параллельно работающих на общую нагрузку одинаковых динамических объектов при равенстве управляющих сигналов в n раз меньше статизма, чем при работе одного объекта на ту же нагрузку;

3) показано, что устойчивость системы из n параллельно работающих на общую нагрузку инерционных объектов не зависит от их числа и от параметров самих объектов;

4) устойчивость системы из n параллельно работающих на общую нагрузку объектов (приводов) порядка выше первого будет зависеть как от числа параллельно работающих объектов, так и от их динамики, что следует учитывать при выборе параметров общего регулятора объектов, вырабатывающего единую уставку для этих объектов.

Список литературы

1. **Колосов О. С., Подольский Д. С.** Разработка и исследование динамической модели параллельно работающих электромеханических систем гарантированного питания // Известия Тульского государственного университета. 2006. № 9. С. 100—114.
2. **Мееров М. В.** Системы многосвязного регулирования. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967.
3. **Удерман Э. Г.** Метод корневого годографа в теории автоматических систем. М.: Наука, 1972.
4. **Алиев Р. А., Белоусов В. Д., Немудров А. Г.** Трубопроводный транспорт нефти и газа. М.: Недра, 1988.
5. **Веников В. А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985.
6. **Колосов О. С., Подольский Д. С.** Устойчивость и качество параллельно работающих электромеханических систем гарантированного питания // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 1. С. 54—56.
7. **Колосов О. С., Подольский Д. С., Сухецкий А. П.** Динамика параллельно работающих на общую нагрузку автоматических систем // Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП: Тр. Междунар. науч. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. С. 66—71.

УДК 681.51

В. П. Зверьков, канд. техн. наук, доц.,
В. Ф. Кузищин, канд. техн. наук, доц.,
М. С. Тощев, инженер,
Московский энергетический институт
(технический университет)
zverkovvp@mpei.ru

Автоматизированная настройка каскадной системы регулирования с одновременной настройкой контуров

Предлагается алгоритм автоматизированной динамической настройки двухконтурной (каскадной) автоматической системы регулирования, позволяющий настраивать оба контура одновременно. Приводятся результаты имитационного моделирования процесса автоматизированной настройки двухконтурной системы с использованием частотного метода идентификации и итерационного алгоритма достижения оптимума. Рассмотрена реализация алгоритма в программно-техническом комплексе для управления непрерывными технологическими процессами.

Ключевые слова: *автоматическая система регулирования, алгоритм динамической настройки, имитационное моделирование, передаточная функция, оптимизация, критерий оптимальности*

Введение

Современные системы автоматического управления непрерывными технологическими процессами являются распределенными и реализуются на базе программируемых логических контроллеров. Алгоритмы управления, как правило, реализуют стабилизацию значений управляемых величин, или программное управление. На практике используют типовые законы управления, такие как ПИД-закон и его частные случаи.

Одноконтурные системы, основанные на принципе управления по отклонению управляемой величины от заданного значения, часто не обеспечивают требуемое качество управления. Для повышения качества управления используют дополнительные информационные каналы, инерционность которых меньше, чем основного канала. В этом случае автоматическая система управления становится многоконтурной системой передачи управляющего воздействия, в каждом контуре которой необходимо обеспечить запас устойчивости.

Технологические объекты управления в энергетике, химии и других отраслях промышленности являются динамическими, нелинейными, нестационарными и стохастическими. Системы автоматического управления такими объектами должны выполняться адаптивными. Построению адаптивных систем уделяется большое внимание и посвящено много работ. Алгоритмы, разработанные в МЭИ под руководством проф. В. Я. Ротача [1], основаны на выполнении последовательной процедуры "идентификации—оптимизации" с оценкой вектора комплексной частотной характеристики (КЧХ) замкнутой системы. Предложено несколько модификаций алгоритма с различными методами идентификации системы. Для многоконтурных систем предлагается

последовательная настройка регуляторов каждого контура. Настоящая статья посвящена проблеме практической реализации алгоритма динамической настройки регуляторов двухконтурных систем с одновременной настройкой всех регуляторов, позволяющего сократить время настройки и длительность вмешательства в режим нормальной эксплуатации технологического объекта управления.

Показатели оптимальности настройки систем

Классическим решением в части формулировки *прямого* (исходного) критерия оптимальности настройки автоматических систем регулирования (АСР) можно считать минимум дисперсии ошибки регулирования $D\{\varepsilon(t)\} = \min$ при условии, что обеспечивается степень затухания свободных колебаний системы ψ не хуже заданного значения $\psi_{зд}$, т. е. при $\psi \geqslant \psi_{зд}$.

При низкочастотном характере возмущений минимум дисперсии $D\{\varepsilon(t)\}$ в системе с типовым ПИД-регулятором достигается при максимуме величины $K_п/T_и$ на границе области заданного запаса устойчивости, где $K_п$ и $T_и$ — коэффициент пропорциональности и постоянная времени интегрирования регулятора, а условия оптимальности приобретают следующий вид:

$$K_п/T_и = \max;\ \psi = \psi_{зд}.$$

Для настройки действующих систем регулирования предложены более удобные для текущего контроля и последующего расчета косвенные условия оптимальности, которые сводятся к определенным требованиям к параметрам комплексной частотной характеристики замкнутой системы в окрестности ее резонансной частоты [1].

Анализ одноконтурных автоматических систем регулирования с ПИ-регулятором для широкого класса объектов регулирования с передаточными функциями вида

$$W_{об}(p) = \frac{K\mathrm{e}^{-Tp}}{(T_1p+1)^n(T_2p+1)} \qquad (1)$$

показал, что комплексные частотные характеристики замкнутой системы $W(i\omega)$ при оптимальной настройке обладают общими свойствами, а именно: векторы КЧХ замкнутой системы имеют достаточно узкую общую область в окрестности резонансной частоты $\omega_{рез}$, а величина $\omega T_и$ (или отношение $T/T_и$, где $T = 2\pi/\omega$ — период колебаний) при этом изменяется в небольших пределах.

С использованием выявленных свойств КЧХ систем в [1] сформулированы следующие *косвенные условия оптимальности*: настройка системы является оптимальной с достаточной для практики точностью, если частотная характеристика замкнутой системы $W(i\omega)$ по каналу задающего воздействия удовлетворяет условиям

$$R_{з.с}(\omega,\ K_п,\ T_и) = R_{op};$$
$$F_{з.с}(\omega,\ K_п,\ T_и) = F_{op};\ \frac{T}{T_и} = B_{op}, \qquad (2)$$

где $R_{з.с}(\omega)$ и $F_{з.с}(\omega)$ — модуль и фаза вектора КЧХ замкнутой системы для установленных значений параметров регулятора $K_п$, $T_и$; R_{op}, F_{op}, B_{op} — заданные числа (значения косвенных показателей оптимальности).

В первом приближении (при отсутствии информации о динамических свойствах объекта управления) можно принять усредненные для указанного класса объектов значения:

$$R^*_{op} = 1{,}5;\ F^*_{op} = -90^\circ;\ B_{op} = 3{,}5. \qquad (3)$$

Первые два условия (2) приближенно обеспечивают заданную степень затухания свободных колебаний системы, так как определяют значение АЧХ (модуля КЧХ) замкнутой системы в окрестности резонансной частоты (вблизи максимума АЧХ). Третье из условий (2) приближенно обеспечивает оптимальное соотношение между интегральной и пропорциональной составляющими регулирующего воздействия (вблизи максимума отношения $K_п/T_и$). При использовании итерационного алгоритма настройки системы с идентификацией с применением генератора синусоидальных колебаний (ГСК) это условие выполняется за счет соответствия периода колебаний генератора $T_г$ постоянной интегрирования $T_и$ на каждом шаге настройки $T_г = T_и B$.

Алгоритм настройки двухконтурных систем регулирования

На рис. 1 приведена схема подключения узла автоматической настройки регуляторов (АНР) к двухконтурной АСР с двумя регуляторами, которая, в частности, может быть использована для стабилизации температуры перегретого пара или экономичности паровых котлов тепловых электрических станций. В этих системах регулятор внутреннего контура $W_{р2}(S)$, осуществляющий непосредственное воздействие на исполнительный механизм и регулирующий орган системы, называют стабилизирующим, а регулятор внешнего контура $W_{р1}(S)$, осуществляющий изменение задания стабилизирующему регулятору, — корректирующим регулятором. В силу различной инерционности каналов объекта рабочие частоты регуляторов, как правило, значительно различаются.

Предлагаемая процедура настройки регуляторов такой двухконтурной схемы и, соответственно, подключение узла АНР проводятся *одновременно для обоих контуров*. Значения косвенных показателей оптимальности вводятся в блоки вычислительных

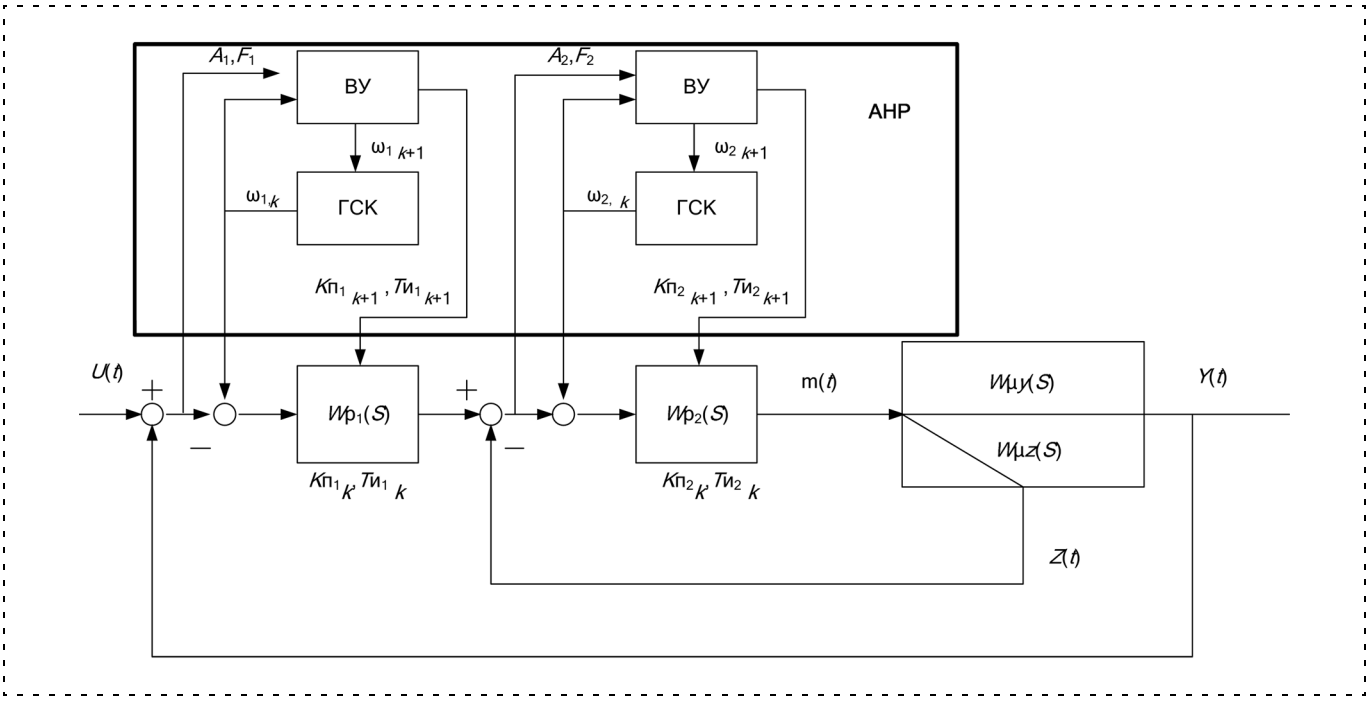


Рис. 1. Структурная схема подключения узла АНР для настройки двухконтурной системы с двумя регуляторами:
$Y(t)$, $Z(t)$ — основная и вспомогательная регулируемые величины; $U(t)$, $\mu(t)$ — управляющее и регулирующее воздействия; A_1, F_1, A_2, F_2 — амплитуды и фазовые сдвиги колебаний регулируемых величин, определяемых в процессе идентификации; $W\mu y(S)$, $W\mu z(S)$ — передаточные функции объекта регулирования по каналам основной и вспомогательной величин; $Wp_1(S)$, $Wp_2(S)$ — передаточные функции корректирующего и стабилизирующего регуляторов; $K\text{п}_k$, $T\text{и}_k$, $K\text{п}_{k+1}$, $T\text{и}_{k+1}$ — значения параметров настройки регуляторов на предыдущем и последующем шагах процедуры настройки

устройств (ВУ), которые реализуют алгоритм настройки регуляторов каждого контура. Особенностью предлагаемого алгоритма является подача одновременно двух гармонических сигналов с разными частотами в систему регулирования и последующее выделение каждой гармоники из суммарного сигнала изменения контролируемых технологических величин.

В алгоритме настройки используется процедура "идентификации—оптимизации" системы с оценкой значений вектора КЧХ замкнутого контура при подаче в него синусоидального сигнала от внешнего ГСК.

По полученному вектору КЧХ замкнутого контура определяют числовые значения коэффициентов математической модели объекта (1). Для полученной модели объекта рассчитывают значения коэффициентов параметров настройки регулятора и соответствующую резонансную частоту контура, что позволяет определить амплитуду и период колебаний синусоидального воздействия для следующего шага. После установки этих параметров в регуляторе и ГСК эксперимент и расчет повторяются. В результате возникает итерационная процедура, которая продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто выполнение косвенных показателей оптимальности настройки.

Расчет параметров регулятора и ГСК для очередного шага итерационной процедуры настройки контура ведется по безразмерным параметрам: относительной частоте $Z = \omega T_\mu$ (где T_μ — постоянная времени передаточной функции объекта) и коэффициенту пропорциональности разомкнутой системы $K_{\text{р.с}} = K_\text{п} K_\mu$. Вычисления выполняют с использованием математической модели объекта, задаваемой передаточной функцией следующего вида:

а) для объектов с самовыравниванием

$$W_\mu(p) = \frac{K_\mu}{(T_\mu p + 1)^n} \exp(-\beta T_\mu p); \qquad (4)$$

б) для объектов без самовыравнивания (с интегрирующим звеном)

$$W_\mu(p) = \frac{K_\text{и}}{p(T_\mu p + 1)^n} \exp(-\beta T_\mu p). \qquad (5)$$

Для регулятора в алгоритме настройки рассматривается ПИД-закон с демпфером второго порядка при дифференциальной (Д) составляющей (по аналогии с контроллером Р-130):

$$W_r(p) = K_\text{п}\left[1 + \frac{1}{pT_\text{и}} + pT_\text{д}\frac{1}{(1 + T_f p)^2}\right],$$

где $T_\text{д} = T_\text{и} K_\text{д}$; $K_\text{д} = T_\text{д}/T_\text{и} = \alpha$ — отношение постоянных времени дифференцирования и интегрирования (обычно $K_\text{д} = 0...0{,}5$); $T_f = T_\text{д} K_f = T_\text{и} K_\text{д} K_f$ — постоянная времени фильтра при Д-составляющей;

$K_f = T_f/T_д$ — отношение постоянных времени демпфирования и дифференцирования (в контроллере Р-130 принято $K_f = 0{,}125$).

Входными данными при расчете являются:

R_{op}, F_{op} и B_{op} — оптимальные значения косвенных показателей; $K_п$, $T_и$, $K_д$, K_f, $T_г$ — установленные значения параметров ПИД-регулятора и периода колебаний сигнала ГСК; $R_{yu}(\omega_г)$, $F_{yu}(\omega_г)$ — текущие значения модуля и фазового сдвига КЧХ системы регулирования относительно задающего воздействия; $T_г/T_и$ — косвенный показатель; n, β — параметры модели объекта (4) или (5).

Для удобства расчетов частотные характеристики объекта и регулятора выражаются через безразмерные переменные: $Z = \omega T_μ$ — относительная частота; $C = 1/(\omega T_и)$; $X = \omega T_и K_д K_f$ и представляются следующим образом:

- для объектов с самовыравниванием

$$F_μ(Z) = -\beta Z - n\,\mathrm{arctg}\,Z; \qquad (6)$$

$$R_μ(Z) = \frac{K_μ}{\sqrt{(Z^2+1)^n}}; \qquad (7)$$

- для объектов без самовыравнивания

$$F_μ(Z) = -\beta Z - n\,\mathrm{arctg}\,Z - \pi/2; \qquad (8)$$

$$R_μ(Z) = \frac{T_μ K_и}{Z\sqrt{(Z^2+1)^n}}; \qquad (9)$$

- для ПИД-регулятора с демпфером второго порядка для дифференциальной составляющей

$$W_r(j\omega) = K_п\left[1 - jC + \frac{jK_д}{C(1+jX)^2}\right] = K_п(A_r + jB_r),$$

где $A_r = 1 + \dfrac{2K_д X}{C(1+X^2)^2}$; $B_r = \dfrac{K_д(1-X^2)}{C(1+X^2)^2} - C$;

$F_r = \mathrm{arctg}(B_r/A_r)$; $R_r = \sqrt{A_r^2 + B_r^2}$.

Вычисления осуществляются в следующем порядке [2].

Этап I. *Расчет значений безразмерных параметров Z (относительной частоты) и $K_{р.с}$ (коэффициента пропорциональности разомкнутой системы $K_{р.с} = K_п K_μ$) по заданным оптимальным значениям косвенных показателей R_{op}, F_{op} и B_{op}.*

1. Вычисляются величины $C_{op} = B_{op}/(2\pi)$; $X = K_д K_f/C_{op}$ и рассчитываются значения модуля R_r и фазы F_r вектора КЧХ регулятора с подстановкой $C = C_{op}$.

2. Вычисляются модуль $R_{р.с}$ и фаза $F_{р.с}$ вектора КЧХ разомкнутой системы через параметры замкнутой системы R_{op} и F_{op}:

$$R_{р.с} = \frac{R_{op}}{\sqrt{1 - 2A + R_{op}^2}}; \; F_{р.с} = F_{op} + \mathrm{arctg}\left[\frac{B}{1-A}\right],$$

где $A = R_{op}\cos F_{op}$, $B = R_{op}\sin F_{op}$.

3. Вычисляется значение фазы вектора КЧХ объекта: $F_μ = F_{р.с} - F_r$.

4. Определяется значение Z из уравнения аргументов математической модели объекта:

$$G(Z) = F_μ - F_μ(Z) = 0,$$

где $F_μ(Z)$ — функция относительной частоты, определяемая по (6) или (8).

Корень Z_{op} уравнения находится методом итераций:

$$Z_{n+1} = Z_n - \frac{G(Z)}{G'(Z)},$$

где $G'(Z) = \beta + \dfrac{n}{1+Z^2}$, до выполнения условия $|G(Z)/G'(Z)| \leqslant 0{,}01$.

5. Вычисляется коэффициент пропорциональности разомкнутой системы $K_{р.с}$:

- для объектов с самовыравниванием $K_{р.с} = K_п K_μ$;
- для объектов без самовыравнивания $K_{р.с} = K_п K_и T_μ$

при найденных значениях Z_{op}, C_{op}, X по формуле $K_{р.с,\,op} = R_{р.с}/(R_μ R_r)$.

Полученные в п. 4 и п. 5 величины Z_{op} и $K_{р.с,\,op}$ определяют оптимальные значения относительной частоты и коэффициента пропорциональности разомкнутой системы.

Этап II. *Расчет величин Z_k и $K_{р.с,\,k}$ по текущим значениям косвенных показателей $R_{yu}(\omega_г)$, $F_{yu}(\omega_г)$ и $T_г/T_и$, полученным на k-м шаге настройки.*

Вычисления осуществляются так же, как на этапе I, с тем отличием, что вместо оптимальных значений косвенных показателей R_{op}, F_{op} и C_{op} подставляются соответствующие текущие значения $R_{yu}(\omega_г)$, $F_{yu}(\omega_г)$ и $C = (T_г/T_и)/(2\pi)$.

В результате определяются текущие значения относительной частоты $Z_k = (\omega T_μ)_k$ и коэффициента передачи разомкнутой системы $K_{р.с,\,k}$ по данным экспериментального определения вектора КЧХ замкнутой системы на частоте сигнала ГСК для k-го шага настройки регулятора.

Этап III. *Вычисление новых значений параметров настройки $K_{п,\,k+1}$, $T_{и,\,k+1}$ и периода колебаний $T_{г,\,k+1}$ сигнала ГСК.*

Расчет ведется из условия соответствия этих параметров косвенному критерию оптимальности по следующим формулам:

$$T_{г,k+1} = \frac{Z_k}{Z_{op}} T_{г,k};$$

$$T_{и,k+1} = \frac{T_{г,k+1}}{B_{op}};$$

$$K_{п,k+1} = K_{п,k} \frac{K_{р.с,op}}{K_{р.с,k}}.$$

При настройке ПИД-регулятора параметр $T_д/T_и = K_д = \alpha$ остается постоянным, т. е.

$$T_{д,k+1} = K_д T_{и,k+1}.$$

Анализ эффективности алгоритма автоматизированной настройки двухконтурной системы

Анализ эффективности алгоритма автоматизированной настройки двухконтурной системы проводили путем сравнения времени достижения оптимума при раздельной и одновременной настройках контуров системы регулирования с помощью моделирования процесса настройки динамики системы на ПЭВМ.

Если система близка к линейной, то при подаче на ее вход одной синусоиды через некоторое время на выходе системы установятся синусоидальные колебания той же частоты. Эти колебания будут иметь свою амплитуду $A_у$ и окажутся сдвинутыми во времени относительно входных колебаний на интервал Δt, что соответствует сдвигу по фазе $\varphi = \omega\Delta t$.

При подаче двух синусоид одновременно на входы корректирующего и стабилизирующего регуляторов оценивать векторы КЧХ контуров становится сложнее. Для решения этой задачи (определения вектора КЧХ системы по колебаниям выходной величины) воспользуемся разложением периодического сигнала в ряд Фурье и выделим из него первую гармонику колебаний. Модули и фазы вектора КЧХ определяем по следующим формулам:

$$P(\omega) = a_1 = \frac{2}{A_г L T_г} \int_0^{L T_г} A(\omega)\cos\varphi(\omega)dt;$$

$$Q(\omega) = b = \frac{2}{A_г L T_г} \int_0^{L T_г} A(\omega)\sin\varphi(\omega)dt,$$

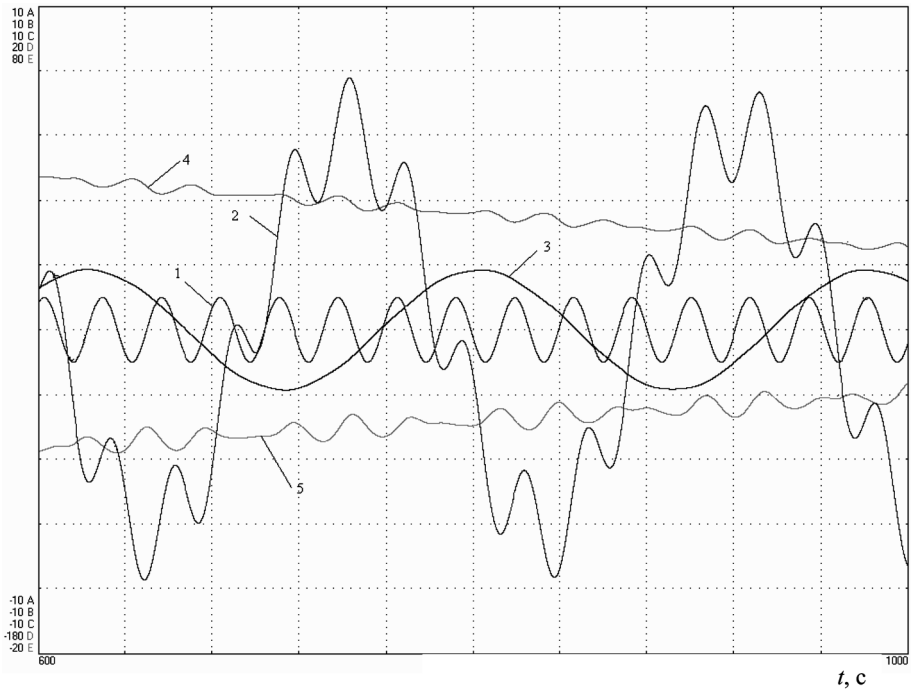


Рис. 2. Графики изменения сигналов при одновременной настройке стабилизирующего и корректирующего регуляторов двухконтурной системы:
1 — сигнал ГСК на входе стабилизирующего регулятора; *2* — процесс изменения вспомогательной регулируемой величины; *3* — процесс изменения основной регулируемой величины; *4* — изменение оценки действительной части вектора КЧХ замкнутой системы $P(\omega)$; *5* — изменение оценки мнимой части вектора КЧХ замкнутой системы $Q(\omega)$

где L — число периодов; $T_г$, $A_г$ — соответственно период и амплитуда колебаний;

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (10)$$

Очевидно, что для определения значения вектора КЧХ на каждой частоте по значениям суммарного сигнала с достаточной точностью требуется несколько периодов колебаний наименьшей частоты. Поэтому идентификация проводится до достижения текущими значениями относительной погрешности оценок модуля и фазы вектора КЧХ допустимого значения [1]. Если погрешность не превосходит допустимого предела (10 %), то процедура оценивания вектора КЧХ с подачей сигнала от ГСК заканчивается, а в противном случае продолжается.

На рис. 2 представлены графики, полученные при моделировании процесса настройки динамики системы на одном из шагов приближения к оптимуму. Траектории изменения значений параметров настройки регуляторов замкнутых контуров при движении к оптимуму в координатах коэффициентов регулятора показаны на рис. 3 и рис. 4, соответственно. Там же приведены линии границ областей заданного запаса устойчивости контура ($m = 0{,}366$) с корректирующим и стабилизирующим регулятором.

Рис. 3. Область настроек корректирующего регулятора

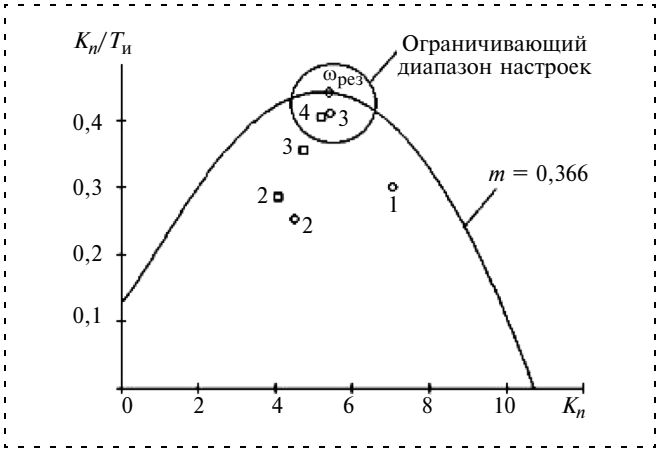


Рис. 4. Область настроек стабилизирующего регулятора

Вычисление значений параметров регуляторов и периода ГСК с использованием вышеприведенных формул для модели объекта занимает значительный объем памяти микропроцессорных контроллеров (МК) и требует значительных вычислительных ресурсов. Для уменьшения загрузки процессора МК можно использовать приближенные формулы [3], которые позволяют определить значения параметров регуляторов и периода ГСК на очередном шаге процедуры настройки.

Для сравнения выполнена также итерационная процедура настройки рассматриваемой системы по приближенным аппроксимирующим формулам

$$(K_{\text{П}})_{k+1} = \frac{(K_{\text{П}})_k}{f_k};\ (T_{\text{И}})_{k+1} = \frac{(T_{\text{И}})_k}{g_k},$$

где коэффициенты f_k и g_k рассчитываются по формулам

$$f = 1{,}9 - \frac{2{,}3}{R_{\text{з.с}} + 1} + \left|1{,}2 + \frac{F_{\text{з.с}}}{100}\right|^3;$$

$$g = 0{,}73 + \frac{0{,}47}{R_{\text{з.с}} + 0{,}2}\left(\frac{11{,}9}{1{,}7 - \dfrac{F_{\text{з.с}}}{100}} - 3{,}4\right).$$

На рис. 3 и рис. 4 кружками обозначены траектории изменения значений параметров регуляторов при настройке с расчетом по безразмерным параметрам, а квадратиками — путь движения при настройке по аппроксимирующим формулам. Там же приведены области допустимых настроек (ограничивающий диапазон настроек), при которых обеспечивается допустимое качество процессов регулирования.

На рис. 5 для сравнения приведены графики изменения регулируемых величин, показанных на рис. 1, при ступенчатом воздействии со стороны регулирующего органа для различных настроек регуляторов.

Сравнение графиков процессов регулирования показывает, что они различаются незначительно. Это позволяет сделать вывод, что алгоритм автонастройки по косвенным неэкстремальным условиям оптимальности дает приемлемые результаты для рассмотренной двухконтурной АСР.

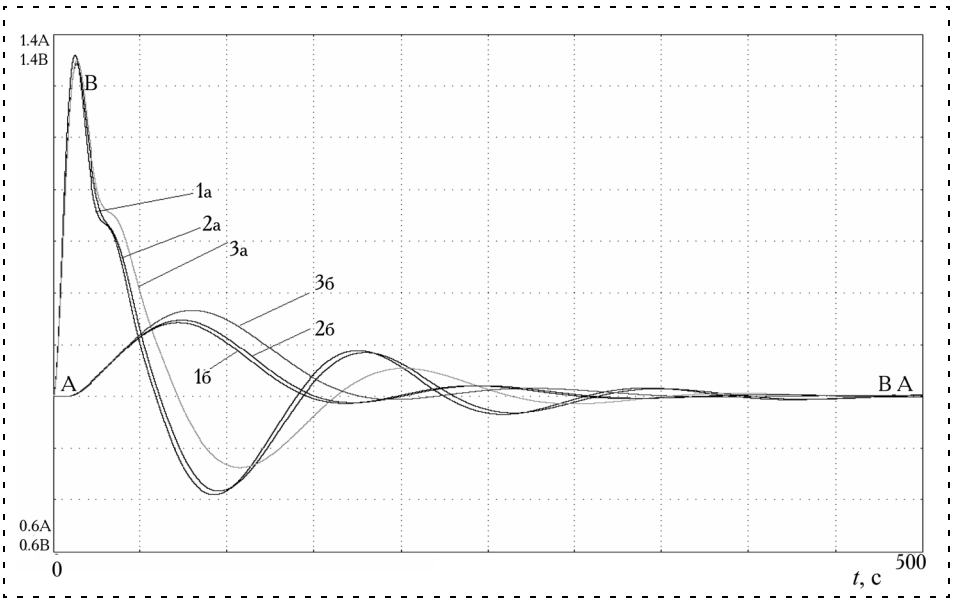


Рис. 5. Графики процессов регулирования при ступенчатом воздействии со стороны регулирующего органа:
1а, *1б* — процессы во внутреннем и внешнем контурах регулирования при настройках регуляторов, найденных точным расчетом по исходному показателю оптимальности; *2а*, *2б* — процессы во внутреннем и внешнем контурах регулирования при настройках регуляторов по косвенным показателям оптимальности с помощью безразмерных параметров; *3а*, *3б* — процессы во внутреннем и внешнем контурах регулирования при настройках регуляторов, найденных по косвенным показателям оптимальности с помощью аппроксимирующих формул. Буквой "*а*" обозначены процессы во внутреннем контуре регулирования (изменение $Z(t)$), буквой "*б*" — процессы во внешнем контуре (изменение $Y(t)$)

Выводы

Моделирование процесса настройки каскадной АСР на основе итерационной процедуры "идентификация — оптимизация" с подачей синусоидального входного сигнала одновременно для двух контуров показало возможность и целесообразность использования такого метода настройки системы.

Достоинство рассматриваемого метода (по сравнению с поочередной настройкой контуров) заключается в уменьшении общей длительности настройки двухконтурной АСР, которая в данном случае определяется продолжительностью переходных процессов только во внешнем контуре. Другими словами, за время настройки корректирующего регулятора проводится настройка и стабилизирующего регулятора.

Список литературы

1. **Автоматизация** настройки систем управления / В. Я. Ротач, В. Ф. Кузищин, А. С. Клюев и др.; под ред. В. Я. Ротача. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 272.
2. **Кузищин В. Ф., Зверьков В. П.** Алгоритм расчета оптимума для итерационной процедуры автоматизированной настройки регуляторов // Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП. М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 70—79.
3. **Исследование** эффективности итерационного метода настройки каскадных систем регулирования / В. Ф. Кузищин, В. П. Зверьков и др. // Тр. МЭИ. Вып. 338. М.: Изд-во МЭИ, 1977. С. 77—85.
4. **Ротач В. Я.** Теория автоматического регулирования. — Учебник для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 400 с.

УДК 681.518.001.5

Г. П. Павлюк, зам. директора,
МЭИ (технический университет),
Институт безопасности бизнеса,
В. А. Шихин, канд. техн. наук, доц.,
МЭИ (технический университет)
v.shikhin@ant-inform.ru

Построение областей заданного качества управления на основе статистического подхода: метод отсекающих моделей

Представлены результаты разработки нового метода построения областей заданного качества управления (областей заданного уровня) на основе статистического подхода, названного методом отсекающих моделей. Сформулированы ограничения, допущения и предпосылки относительно свойств и классов рассматриваемых динамических систем, допускающих применение данного метода в качестве инструмента исследования. Предложена и исследована вычислительная процедура метода.

Ключевые слова: *система управления, анализ качества, моделирование, статистические методы*

Введение

При проектировании систем управления с заданными свойствами в ряде случаев допустимо перейти к анализу лаконичных математических моделей, связывающих показатели качества управления с системными параметрами, допускающими варьирование в процессе проектирования или настройки [1]. Такие модели можно строить, если использовать представление показателей качества управления в виде достаточно простых алгебраических функций от настраиваемых (системных) параметров. Наглядность конечных результатов анализа с использованием алгебраических зависимостей значительно повышает эффективность процесса проектирования и обеспечивает переход от решения задач точечной оптимизации к решениям многомерных оптимизационных задач с оценкой окрестных областей допустимых проектных решений (назовем их областью проектирования).

Определение 1. Под областью заданного качества управления (ОЗК) понимается область S в пространстве параметров Ω_x, где заданный показатель качества $J(x)$ отвечает заранее поставленным условиям:

$$S = \{x \in \Omega_x | J(x) \leqslant c\}, \qquad (1)$$

а вне области S имеем $J(x) > c$, где c — некоторая заданная константа, x — m-мерный вектор системных параметров. Считаем, что показатель качества $J(x)$ носит количественный характер и задается в соответствии с вектором целевых функций y.

Закономерным требованием при проектировании систем управления является необходимость гарантирования однородности области проектирования, т. е. недопущения попадания в область ОЗК заведомо неудовлетворительных точек по назначенному уровню показателя качества управления (например, точек с нарушениями устойчивости процессов управления). Попытки заведомо искать форму представления области ОЗК в виде некоторой геометрической фигуры, например эллипсоида, приводят к значительному сужению области допустимых настроек. Для таких случаев предлагается отчасти пожертвовать ясностью геометрической интерпретации в виде заданной фигуры и перейти к представлению границ области ОЗК в несколько более сложной геометрической форме — в форме многогранника, но сохраняя лаконичность математического описания искомой границы.

Вместе с тем, известные многочисленные результаты практического применения метода статистических испытаний Монте-Карло [2] для решения прикладных задач в области моделирования и

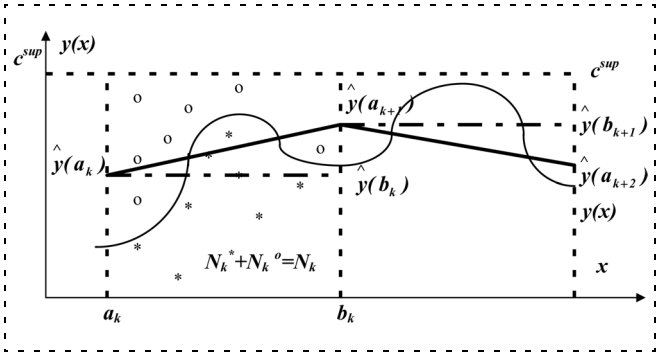


Рис. 1. Графическая иллюстрация *k*-го шага сканирования

исследования динамических систем управления посредством машинного моделирования позволяют предложить новую математическую формулировку задачи на построение искомой области ОЗК. При этом область ОЗК представляется в ясной для конечного пользователя графической форме сопрягающихся линейных плоскостей.

Указанные предпосылки легли в основу разработки нового метода построения областей заданного качества управления (областей заданного уровня) на основе статистического подхода, названного методом отсекающих моделей.

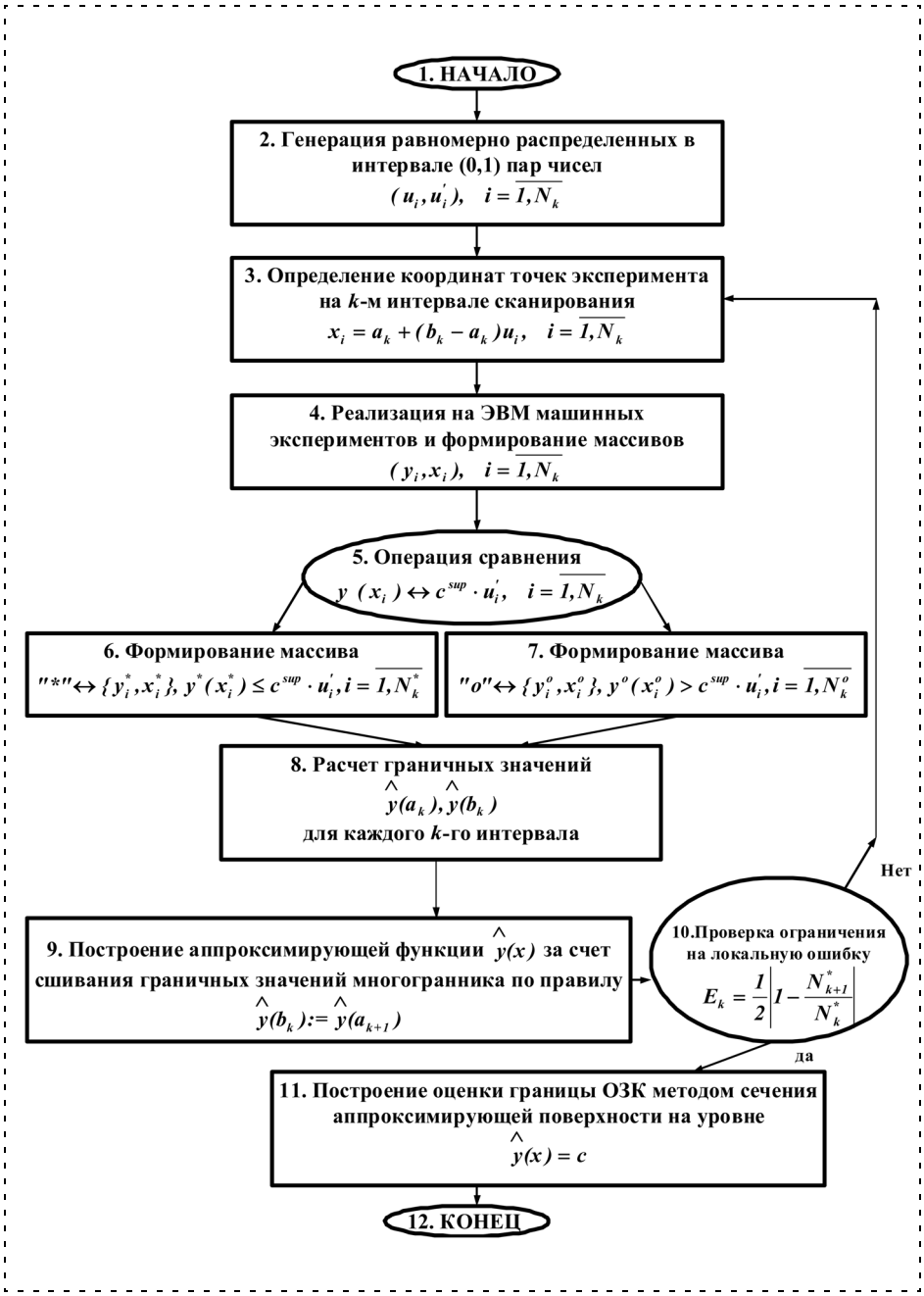


Рис. 2. Блок-схема алгоритма метода отсекающих моделей с построением границы ОЗК в форме многогранника (двумерный случай, $m = 1$)

Метод отсекающих моделей в форме многогранника

Считаем, что показатель качества $J(x)$ носит количественный характер и задается в соответствии с целевой функцией $y(x)$. Поскольку полагаем, что функция $y(x)$ является ограниченной и положительно-определенной, то для некоторого k-го интервала $[a_k, b_k]$ (шага сканирования) параметрического m-мерного пространства всегда найдется константа $c_k^{\sup}$, для которой будет выполняться условие

$$y(x) \leqslant c_k^{\sup}, \ \forall x \in [a_k, b_k]. \quad (2)$$

Можно определить такое значение $c^{\sup}$, что условие (2) будет выполняться для всех $k = \overline{1, K}$ интервалов сканирования области ОЗК. Без потери общности результатов перейдем к рассмотрению скалярного случая, когда $m = 1$. Идея метода при этом допускает ясную графическую интерпретацию (рис. 1).

Блок-схема алгоритма метода представлена на рис. 2. На единичном интервале генерируются пары равномерно распределенных чисел (u_i, u_i'), $i = \overline{1, N_k}$, и пересчитываются на интервал (a_k, b_k) следующим образом:

$$x_i = a_k + (b_k - a_k)u_i, \quad i = \overline{1, N_k}. \quad (3)$$

В соответствующих точках $\{x_i\}$, $i = \overline{1, N_k}$, рассчитываются значения целевой функции и формируются пары, помечаемые нуликами и звездочками:

$$"*" \leftrightarrow \{y_i^*,\ x_i^*\},\ y^*(x_i^*) \leqslant c^{\sup} u_i',\ i = \overline{1, N_k^*}\ ; \quad (4)$$

$$"o" \leftrightarrow \{y_i^0,\ x_i^0\},\ y^0(x_i^0) > c^{\sup} u_i',\ i = \overline{1, N_k^0}. \quad (5)$$

При этом $N_k^* + N_k^0 = N_k$.

Истинная граница области ОЗК, определяемая уравнением $f(x) = c$, является неизвестным решением. Заданная константа c здесь по-прежнему трактуется как пороговое значение критерия качества в смысле постановки задачи в виде (1). Отношение числа "звездных" точек N_k^* к общему числу экспериментов N_k представляет собой оценку пропорции части области S_k^* к площади прямоугольника со сторонами $c^{\sup}$ и $(b_k - a_k)$:

$$S_k^{sup} = c^{\sup}(b_k - a_k). \quad (6)$$

В качестве аппроксимации неизвестной области S_k^* на k-м шаге сканирования, определяемой как

$$S_k^* = \{(y_i, x_i) : x_i \in [a_k, b_k],\ y_i \in (0, \hat{y})\}, \quad (7)$$

предлагается взять прямоугольник со сторонами $\hat{y}(a_k)$ и $(b_k - a_k)$, как это представлено на рис. 1, где

$$\hat{y}(a_k) = \frac{N_k^*}{N_k^* + N_k^0} c^{\sup}, \quad (8)$$

и с соответствующей площадью

$$\hat{S}_k^* = \frac{N_k^*}{N_k^* + N_k^0} c^{\sup}(b_k - a_k). \quad (9)$$

Следующее утверждение касается несмещенности оценки $\hat{S}_k^*$ истинной области S_k^*.

Утверждение 1. Оценка $\hat{S}_k^*$, рассчитываемая согласно методу статистических испытаний Монте-Карло и формулам (3)—(9), является несмещенной статистической оценкой неизвестной истинной области S_k^*, определяемой в соответствии с (8) на каждом k-м шаге сканирования искомой области.

Доказательство. Вероятность появления "звездной" точки в результате машинного эксперимента равна

$$p_k^* = \frac{S_k^*}{S_k^{\sup}} = \frac{S_k^*}{(b_k - a_k)c^{\sup}}. \quad (10)$$

В результате подстановки $N_k^* = N_k p_k^*$ в выражение (9) для математического ожидания имеем:

$$\mathrm{Ex}\{\hat{S}_k^*\} = \frac{N_k p_k^*}{N_k}(b_k - a_k)c^{\sup}. \quad (11)$$

После подстановки (10) в (11) имеем:

$$\mathrm{Ex}\{\hat{S}_k^*\} = \frac{S_k^*}{(b_k - a_k)c^{\sup}}(b_k - a_k)c^{\sup} = S_k^*, \quad (12)$$

что и требовалось доказать.

Алгоритм метода отсекающих моделей с построением поверхности целевой функции

Для получения непрерывной аппроксимирующей функции $\hat{y}(x)$ можно предложить достаточно простое правило сшивания соседних интервалов сканирования по правилу замещения правых граничных условий:

$$\hat{y}(b_k) := \hat{y}(a_{k+1}), \quad (13)$$

т. е. прямоугольники заменяются на трапеции. Возможное искажение информации о реальной области связано, как это видно из рис. 1, с площадью S_k^{Δ} треугольника, образованного вершинами $\hat{y}(b_k)$, $\hat{y}(a_k)$, $\hat{y}(a_{k+1})$:

$$S_k^{\Delta} = \frac{1}{2}(b_k - a_k)|y(a_k) - y(a_{k+1})| =$$

$$= \frac{1}{2}(b_k - a_k)\left|\frac{N_k^*}{N_k} c^{\sup} - \frac{N_{k+1}^*}{N_{k+1}} c^{\sup}\right|. \quad (14)$$

Если положить равное число испытаний на каждом k-м шаге сканирования ($N_k = N_{k+1} = N$) то для оценки локальной ошибки имеем соотношение:

$$E_k = \frac{S_k^{\Delta}}{S_k^*} = \frac{\frac{1}{2}(b_k - a_k)\frac{c^{\sup}}{N_k}\left|N_k^* - N_{k+1}^*\right|}{\frac{N_k^*}{N_k} c^{\sup}(b_k - a_k)} =$$

$$= \frac{1}{2}\left|1 - \frac{N_{k+1}^*}{N_k^*}\right| = \frac{1}{2}\left|1 - \frac{p_{k+1}^*}{p_k^*}\right|. \quad (15)$$

Нетрудно заметить, что локальная ошибка непосредственно связана с разностью вероятностей появления "звездных" точек в соседних интервалах p_k^*, p_{k+1}^* и может в отдельных случаях принимать недопустимо большое значение. Как правило, это связано с тремя обстоятельствами: резкими изменениями в поведении неизвестной целевой функции

$y(x) = f(x)$, выбором слишком большого интервала сканирования $(a_k,\ b_k)$ и непредставительностью выборки из N_k результатов статистических испытаний. Кроме того, очевидно ограничение на наличие хотя бы одной "звездной" точки на каждом интервале сканирования.

Важно отметить, что накопление ошибок аппроксимации по ходу процесса сканирования границы не происходит. Вместе с тем, предложенная процедура метода обладает возможностью управления значением локальной ошибки аппроксимации, во-первых, за счет включения механизма адаптации размера текущего шага сканирования, что может быть реализовано многочисленными известными методами [3], а во-вторых, за счет введения в процедуру порогового значения локальной ошибки в качестве правила останова.

Блок-схема алгоритма метода (рис. 2) отражает случай рассмотрения скалярной целевой функции от скалярного аргумента $y(x)$. Однако при рассмотрении векторного аргумента x, уже начиная с размерности $m = 2$, правило сшивания соседних интервалов сканирования (блок 9) требует пересмотра. Как это видно из рис. 3, в каждой точке сканируемой поверхности $y(x) = y(x_1, x_2)$ сходятся два луча сканирования. Соответственно, если сохранить введенное ранее правило сшивания интервалов (13), то компромиссную координату точки сшивания можно определить как

$$\hat{y}(b_k) := \hat{y}(a_{k+1}) = \frac{\hat{y}(b_k)\big|_{x_1} + \hat{y}(b_k)\big|_{x_2}}{2} \qquad (16)$$

или для общего m-мерного случая

$$\hat{y}(b_k) := \hat{y}(a_{k+1}) = \frac{\sum_{i=1}^{m} \hat{y}(b_k)\big|_{x_i}}{m}. \qquad (17)$$

В этом случае проверку выполнения ограничения локальной ошибки E_k (блок 10) также необходимо несколько изменить:

$$E_k = \max_i \{E_k\big|_{x_i}\}. \qquad (18)$$

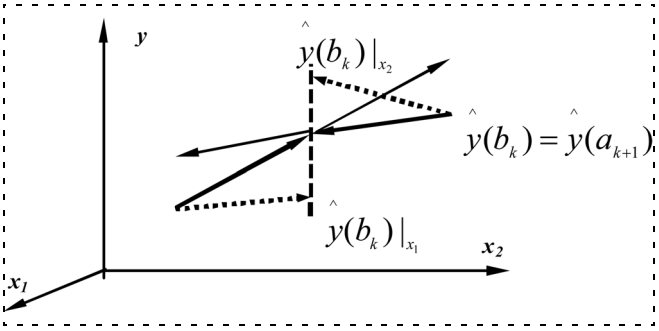


Рис. 3. Операция сшивания соседних интервалов сканирования

С целью избавиться от проблемы сшивания линейных плоскостей в многомерном пространстве предлагается ввести дополнительное ограничение. Это ограничение предлагается связать с рассмотрением только равного числа шагов сканирования (при возможных различных размерах интервалов сканирования) по каждой из составляющих вектора x. Данное ограничение не следует считать существенным в смысле усложнения вычислительной процедуры, так как хранение массивов данных осуществляется в пределах одного шага сканирования, и увеличение числа шагов не приводит к перерасходу машинных ресурсов. Вместе с тем, изменение шага сканирования в сторону уменьшения принципиально не приводит к снижению точностных свойств получаемых оценок, так как отсутствует механизм накопления ошибок.

Оперируя с построенной таким образом в виде многогранника оценкой целевой функции $\hat{y}(x)$, можно заметить, что сечение данной поверхности на уровне $\hat{y}(x) = c$, где c — заданный уровень показателя качества в смысле (1), приводит к формированию оценки ОЗК также в форме многогранника.

Необходимо отметить, что рассмотренный метод отсекающих моделей для построения границы ОЗК в форме многогранника позволяет описывать как выпуклые, так и выпукло-вогнутые поверхности. Вместе с тем, после построения многогранника допустима постановка задачи на вписание в многогранник эллипсоида максимального объема в известной математической постановке [4]. Естественно, что точность аппроксимации ОЗК в этом случае снижается, что есть "плата" за возможность описать границу области в виде ясной и компактной математической формулы, а именно — в виде уравнения эллипсоида.

Однако на практическое использование метода отсекающих моделей для построения ОЗК есть существенное ограничение, связанное с необходимостью введения в алгоритм информации о константе $c^{\sup}$ согласно (2). Так, в случае построения областей заданной устойчивости предложенный механизм задания $c^{\sup}$ будет непригоден, поскольку движение динамической системы может оказаться неограниченным по амплитуде.

Пример построения границы области заданного качества управления синхронным генератором с тиристорной системой возбуждения

На рис. 4 представлена структурная схема, в соответствии с которой строилась модель унифицированного автоматического регулятора возбуждения сильного действия (АРВСД) с регулированием по напряжению, по первой и второй производным напряжения, по производной тока ротора, по отклонению частоты и по его производной. Адекват-

ность предложенной модели оценивали по точности воспроизведения таких типовых режимов, как форсирование возбуждения и режимы возмущающих воздействий со стороны статора турбогенератора. Результаты моделирования сопоставляли с данными ОАО "ОРГРЭС".

Качество переходных процессов при работе мощных синхронных генераторов, снабженных тиристорными бесщеточными системами возбуждения с регуляторами возбуждения типа АРВСД, зависит не только от значений коэффициентов усиления по каждому из каналов регулирования, но и существенным образом от их комбинации. Заводские рекомендации по выбору настроек носят самый общий характер. Вместе с тем, практика эксплуатации систем с АРВСД показывает необходимость тщательной настройки каналов при работе системы в каждом конкретном случае. Однако определить параметры настроек в условиях активной эксплуатации оборудования практически невозможно. Поэтому в большинстве случаев на реальном оборудовании используются, как правило, один или два канала регулирования при отключенных или фактически произвольно выбранных настройках из указанных в заводских инструкциях диапазонов варьирования.

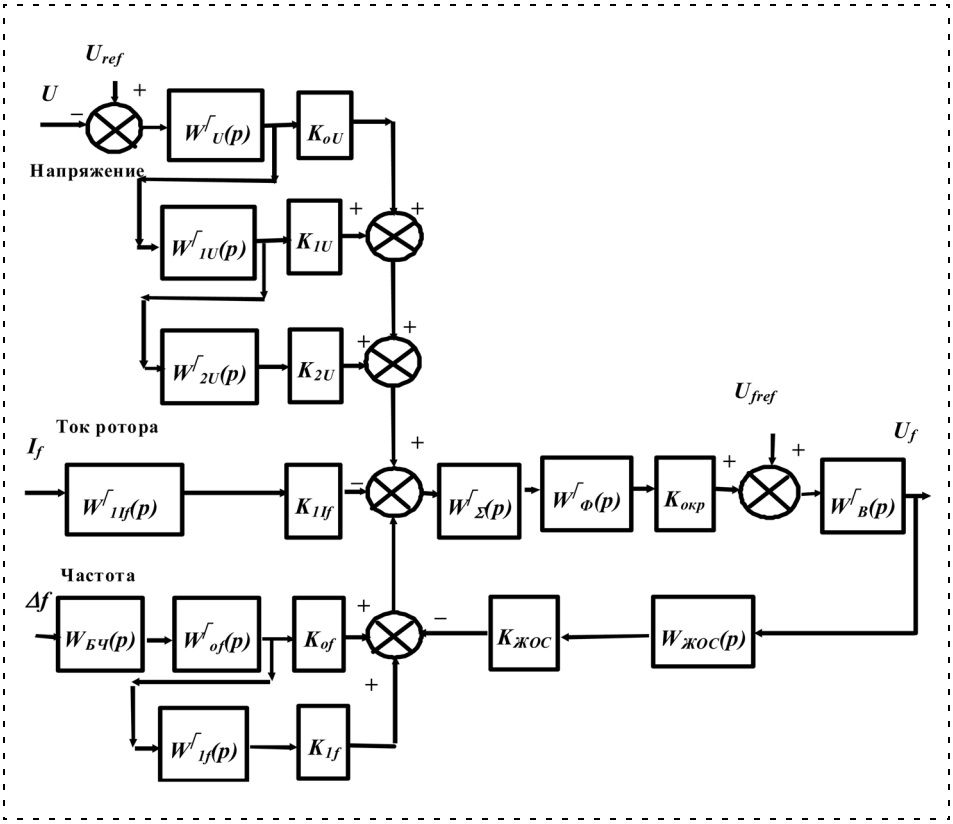


Рис. 4. Структурная схема унифицированного АРВСД

В соответствии с разработанной процедурой (см. рис. 2) проведено исследование качества регулирования возбуждения посредством тиристорной бесщеточной системы возбуждения с АРВСД по заданным целевым функциям: отклонению электрического угла $|\Delta\delta|_{\max}$, отклонению напряжения $|\Delta U_G|_{\max}$, отклонению частоты $|S|_{\max}$, выдаваемой активной мощности $P_{\min}$. Исследование проводили в пространстве четырех настраиваемых параметров: коэффициента усиления по отклонению напряжения K_{oU}, коэффициента усиления по первой производной отклонения напряжения K_{1U}, коэффициента усиления по отклонению частоты K_{of}, коэффициента усиления по первой производной отклонения частоты K_{1f}.

На рис. 5 в качестве примера представлена полученная поверхность целевой функции $|\Delta U_G|_{\max}$ в пространстве параметров K_{1U}, K_{oU} при штатных настройках K_{of}, K_{1f}. Заметим, что из всех исследованных методом отсекающих моделей четырех показателей качества $|\Delta\delta|_{\max}$, $|\Delta U_G|_{\max}$, $|S|_{\max}$, $P_{\min}$ данный случай оказался наиболее сложным для работы численной процедуры метода, поскольку, как это видно из рис. 5 и соответствующей таблицы, область изменения целевой функции $|\Delta U_G|_{\max}$ на установленных эксплуатационных интервалах физических регулировок настраиваемых параметров составила лишь немногим более 10 % (по четырем варьируемым параметрам — 20 %), что определило высокую чувствительность результатов к точностным характеристикам исследования. Этим фактором объясняется также выбор достаточно большого числа статистических экспериментов N_k на каждом

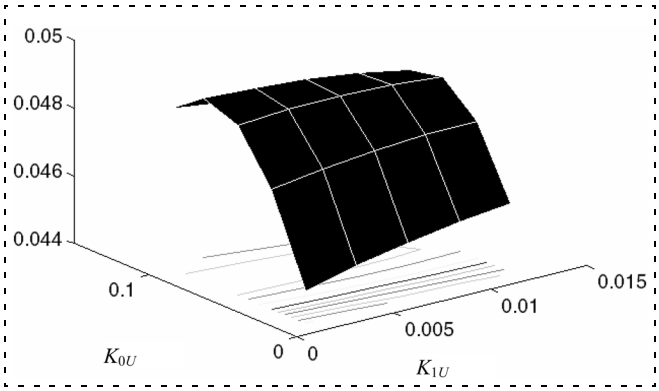


Рис. 5. Метод отсекающих моделей. Линейная аппроксимация целевой функции $|\Delta U_G|_{\max}$ от K_{1U}, K_{oU} и при штатных настройках $K_{of\text{баз}}$, $K_{1f\text{баз}}$

из k интервалов сканирования поверхности. На горизонтальной плоскости (рис. 5) показаны примеры сечений построенной поверхности целевой функции для заданных значений c.

В соответствии с вычислительной процедурой метода (см. рис. 2) для его реализации необходимо выполнение ряда операций, включая генерацию равномерно-распределенных пар чисел (u_i, u_i'), машинное экспериментирование и формирование соответствующих определенным условиям файлов данных, их последующая статистическая обработка, выполнение графических построений. В качестве универсального инструмента для реализации в полном объеме указанной вычислительной процедуры использовалась программная система MatLab + Simulink.

Для получения приведенной на рис. 5 поверхности размер интервалов сканирования $[a_k, b_k]$ выбирался постоянным по каждому из варьируемых факторов K_{1U}, K_{oU}. Выборки x_i^*, x_i^0, $i = \overline{1, N_k}$, из "*"-точек и "o"-точек оказались достаточно представительными. При этом варьировали число испытаний N_k на отдельных интервалах сканирования, как это видно из таблицы. Для расчета отсекающих уровней $\hat{y}(a_k)$ использовали формулу (8), а для расчета локальной ошибки E_k соответствующая формула (15) была обобщена на случай $N_k \neq N_{k+1}$:

$$E_k = \frac{1}{2}\left|1 - \frac{N_{k+1}^*/N_{k+1}}{N_k^*/N_k}\right|. \qquad (19)$$

Данные по работе вычислительной процедуры построения линейной аппроксимации целевой функции $|\Delta U_G|_{\max}$ от K_{1U}, K_{0U} при штатных настройках $K_{0f\,баз}$, $K_{1f\,баз}$ при назначении c_{sup} = (150 %) U_G^{ref}

Номер интервала (шага)	Число испытаний	Число "*"-точек	Число "o"-точек	Локальная ошибка	Относительная локальная ошибка	Уровень
[1; 1]	15	5	10	0,026316	5,847953	0,45
[1; 2]	19	6	13	−0,010753	−2,263724	0,475
[1; 3]	31	10	21	−0,016667	−3,401361	0,49
[1; 4]	30	10	20	0,016129	3,225806	0,5
[1; 5]	31	10	21	0,023077	4,709576	0,49
[2; 1]	26	8	18	−0,017045	−3,705534	0,46
[2; 2]	22	7	15	−0,006912	−1,440092	0,48
[2; 3]	31	10	21	−0,016667	−3,401361	0,49
[2; 4]	36	12	24	0,02	4	0,5
[2; 5]	25	8	17	0,024457	5,095109	0,48
[3; 1]	23	7	16	−0,022727	−4,940711	0,46
[3; 2]	22	7	15	−0,009653	−2,01094	0,48
[3; 3]	37	12	25	0,002688	0,548607	0,49
[3; 4]	31	10	21	0,006818	1,391466	0,49
[3; 5]	22	7	15	0,021739	4,528986	0,48
[4; 1]	23	7	16	−0,022727	−4,940711	0,46
[4; 2]	22	7	15	−0,009653	−2,01094	0,48
[4; 3]	37	12	25	0,002688	0,548607	0,49
[4; 4]	31	10	21	0,006818	1,391466	0,49
[4; 5]	22	7	15	0,016484	3,434066	0,48
[5; 1]	26	8	18	−0,02	−4,347826	0,46
[5; 2]	25	8	17	−0,006757	−1,407658	0,48
[5; 3]	37	12	25	0,001225	0,2501	0,49
[5; 4]	34	11	23	0,011962	2,466335	0,485
[5; 5]	19	6	13	0,025205	5,736842	0,475

Данные по локальной ошибке сшивания соседних интервалов в единую поверхность, которая представлена на рис. 5, приведены в таблице и показывают приемлемую точность построения многогранника.

Существенным достоинством рассмотренного способа построения ОЗК методом отсекающих моделей является достаточно низкая трудоемкость процедуры метода (практически отсутствуют аналитические выкладки, не требуется статистический анализ данных, исключена чувствительность к нарушению статистических предпосылок) при приемлемой, контролируемой вычислительной процедурой точности конечных результатов анализа. Для производственного персонала, в силу известных причин в настоящее время оперирующего главным образом с номограммами, перечисленные факторы также являются позитивными.

Выводы

1. На основе метода статистических испытаний Монте-Карло разработан метод отсекающих моделей для целей построения границы ОЗК в виде многогранника, позволяющего описывать как выпуклые, так и выпукло-вогнутые поверхности.

2. Для получения непрерывной аппроксимации целевой функции предложено сшивать соседние интервалы сканирования по правилу замещения правых граничных условий. Определены три основных фактора, влияющих на точность правила сшивания граней: наличие резких изменений в поведении неизвестной целевой функции; выбор слишком большого интервала сканирования; непредставительность выборки результатов статистических испытаний.

3. Доказано, что рассчитываемая по предложенным формулам оценка границы искомой области является несмещенной статистической оценкой неизвестной истинной области.

4. Разработан соответствующий механизм вычислительной процедуры. Предложенная процедура исключает накопление ошибок аппроксимации и, в то же время, обладает возможностью управления значением локальной ошибки аппроксимации как за счет включения механизма адаптации размера

текущего шага сканирования, так и за счет введения в процедуру порогового значения локальной ошибки в качестве правила останова. Исследование ошибок аппроксимации позволило сформулировать ограничения на применимость метода.

5. Разработанный способ построения области ОЗК (с построением поверхности целевой функции) на основе предложенного метода отсекающих моделей позволил провести анализ качества регулирования, осуществляемого регулятором АРВСД в составе тиристорной бесщеточной системы возбуждения. Результаты выполненных прикладных исследований показали достаточно высокую эффективность использования предложенного и разработанного метода и соответствующего алгоритма. Решение прикладной задачи позволило также оценить высокую степень формализуемости метода, когда все расчеты проводили, главным образом, в автоматическом режиме и средствами лишь одной программной системы.

Список литературы

1. **Шихин В. А., Павлюк Г. П.** Классификация способов построения границ областей заданного качества (заданного уровня) с позиции применяемых математических инструментов // Тр. XV междунар. науч.-техн. сем. "Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации", Алушта 18—25 сентября 2006.
2. **Maindonald T. H.** Statistical computation. N. Y.: John Wiley & Sons, 1984. 370 p.
3. **Математическая** энциклопедия. В 5 т. / Гл. ред. И. М. Виноградов. М.: Советская энциклопедия, 1977—1985.
4. **Тарасов С. П., Хачиян Л. Г., Эрлих И. И.** Метод вписанных эллипсоидов // Докл. АН СССР. 1988. Т. 298. № 5.

УДК 621.398-501

Д. Н. Анисимов, канд. техн. наук, доц.,
О. С. Колосов, д-р техн. наук, проф.,
Д. В. Вершинин, аспирант,
Московский энергетический институт
(технический университет)
dvershinin@mail.ru,
М. В. Зуева, д-р биол. наук, руководитель лаб.,
И. В. Цапенко, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.,
ФГУ "Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца Федерального агентства по высокотехнологичной медицинской помощи"

Диагностика динамических объектов методами нечеткой логики с использованием параметров имитационных моделей*

Разрабатывается метод построения систем диагностики динамического объекта с использованием нечеткой логики на примере построения системы диагностики патологий сетчатки глаза. При построении систем используются параметры электроретинограммы пациента и параметры его динамической модели сетчатки. Показывается, что при параллельной работе нескольких систем с различным набором признаков (предпосылок) достигается высокое качество диагностики.

Ключевые слова: *система диагностики, динамический объект, патология, сетчатка глаза, нечеткая логика, функции принадлежности, нечеткий логический вывод, динамическая модель сетчатки, электроретинограмма*

* Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (шифр гранта 10-01-00049).

Диагностика неисправностей в функционирующих сложных динамических объектах и системах является хорошо известной проблемой и, как правило, не имеет четких алгоритмов поиска. Во многих случаях опыт и интуиция обслуживающего персонала играют ключевую роль в своевременном выявлении и устранении неисправностей. На основании такого опыта делаются попытки создания алгоритмов поиска неисправностей сложной техники для менее квалифицированных работников (например, инструкции и алгоритмы поиска и нахождения неисправностей теле- и радиоаппаратуры). Однако наборы неформализованных признаков часто характеризуют целые наборы возможных неисправностей. Что касается формализованных признаков, характеризуемых средними значениями и областями отклонений, то во многих случаях эти области пересекаются для разного рода неисправностей.

Диагностика неисправностей подобных объектов и систем часто проводится с использованием набора специальных тестовых сигналов. Отклики испытуемого объекта на них пытаются сгруппировать по отличительным признакам, связываемым с видами неисправностей. Если статистические методы здесь оказываются неприменимыми в силу ограниченности соответствующих выборок, то и использование нейронных сетей оказывается неэффективным из-за ограниченного числа характерных признаков неисправностей, выявляемых в откликах объекта.

Одним из возможных способов получения дополнительных признаков, характеризующих состояние объекта, является построение адекватной математической модели объекта, на которой с помощью подстраиваемых параметров, по возможности, точно

воспроизводится реакция реального объекта на тестовый сигнал. Для каждого конкретного случая состояния объекта числовые значения этой группы параметров могут помочь выявить вид неисправности. Во всяком случае, к объективным признакам, получаемым из конкретных временных зависимостей, добавляются параметры динамической модели, адаптированной под результаты реальных испытаний. Следует отметить, что для сложных по структуре объектов параметры модели могут оказаться более информативными, чем признаки, извлекаемые из временных зависимостей, являющихся реакциями объекта на тестовые воздействия. Это утверждение относится, в первую очередь, к тем объектам, у которых реакция на тестовое воздействие представляет собой сумму (или комбинацию) реакций внутренних подсистем. Например, движение схвата манипулятора робота в пространстве определяется совместной работой нескольких следящих систем и зависит не только от программ управления для каждой степени подвижности, но и от технического состояния приводов манипулятора.

Как структура модели объекта, так и ее параметры обычно ищутся с использованием методов теории идентификации. Однако сложные объекты, модель которых представляется в виде параллельного соединения динамических звеньев, требуют специального рассмотрения.

Конечно, не всякий наблюдаемый процесс на выходе объекта поддается математическому описанию, но, если это возможно, то существенно увеличивающееся число признаков может позволить построить эффективную диагностическую систему с использованием методов нечеткой логики. К подобным диагностируемым сложным динамическим объектам относятся не только технические объекты, но и некоторые биологические. Например, патология сетчатки глаза человека диагностируется как врачами-офтальмологами визуально по виду глазного дна, так и физиологами по откликам сетчатки в форме электроретинограмм (ЭРГ) на различные световые раздражители.

Ниже рассматривается задача создания диагностической системы патологий сетчатки глаза методами искусственного интеллекта с использованием как признаков, извлекаемых из ЭРГ, так и параметров подстраиваемой динамической модели сетчатки.

Диагностика глазных заболеваний — одно из важнейших направлений в офтальмологии. Существуют различные методы диагностики. Некоторые из них основаны на анализе зрительных таблиц, другие связаны с изучением состояния сетчатки по ЭРГ. Как метод объективного изучения состояния сетчатки ЭРГ получила значительное распространение в клинике глазных болезней для диагностики ряда болезней. Но оценка состояния зрительного анализатора по электроретинограммам — трудоемкое дело и требует специальной подготовки медицинского персонала и индивидуального подхода к каждому пациенту. Поэтому разработка и внедрение в офтальмологические учреждения методов автоматизации изучения состояния сетчатки по ЭРГ были бы очень полезны для диагностики глазных заболеваний.

На основании результатов исследований физиологов [1, 2] вводится эмпирическая четырехкомпонентная линейная динамическая модель, представляемая в виде параллельного соединения четырех линейных динамических блоков, описываемых своими передаточными функциями:

$$W(s) = -W_1(s) + W_2(s) - W_3(s) + W_4(s), \qquad (1)$$

где

$$W_1(s) = \frac{K_1(1 + sT_3)}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)};$$

$$W_2(s) = \frac{K_2(1 + sT_7)\exp(-s\tau)}{(1 + sT_4)(1 + sT_5)(1 + sT_6)};$$

$$W_3(s) = \frac{K_3}{(1 + sT_8)(1 + sT_9)};$$

$$W_4(s) = \frac{K_4}{(1 + sT_{10})(1 + sT_{11})}.$$

K_1 — коэффициент усиления *a*-волны (4-й компоненты); K_2 — коэффициент усиления *b*-волны (3-й компоненты); K_3, K_4 — коэффициенты усиления медленных составляющих (1-й и 2-й компонент); τ — запаздывание 3-й компоненты; T_1, T_2 и т. д. — постоянные времени соответствующих компонент. Параметры модели отыскиваются путем сравнения переходных процессов на выходе модели при имитации световых раздражителей и исследуемых ЭРГ.

С помощью (1) решается задача разложения реальной ЭРГ на составляющие компоненты в целях диагностики патологий по получаемым параметрам передаточных функций компонентов ЭРГ.

Для моделирования используется среда MatLab (Simulink), с помощью которой модель (1) представляется в виде параллельного соединения линейных динамических звеньев. Пример такой модели, построенной в модуле Simulink, приведен на рисунке, где модель разбита на компоненты, причем номера компонент соответствуют номерам составляющих ЭРГ, приведенных на графиках. Модель содержит в своем составе апериодические и упругие (интегродифференцирующие) звенья. Помимо параллельной структуры другой важной особенностью данной модели является наличие запаздывания, находящегося в третьей компоненте.

Модель с подобранными коэффициентами была испытана при воздействии основных световых тестовых сигналов. Параметры входных сигналов зависят

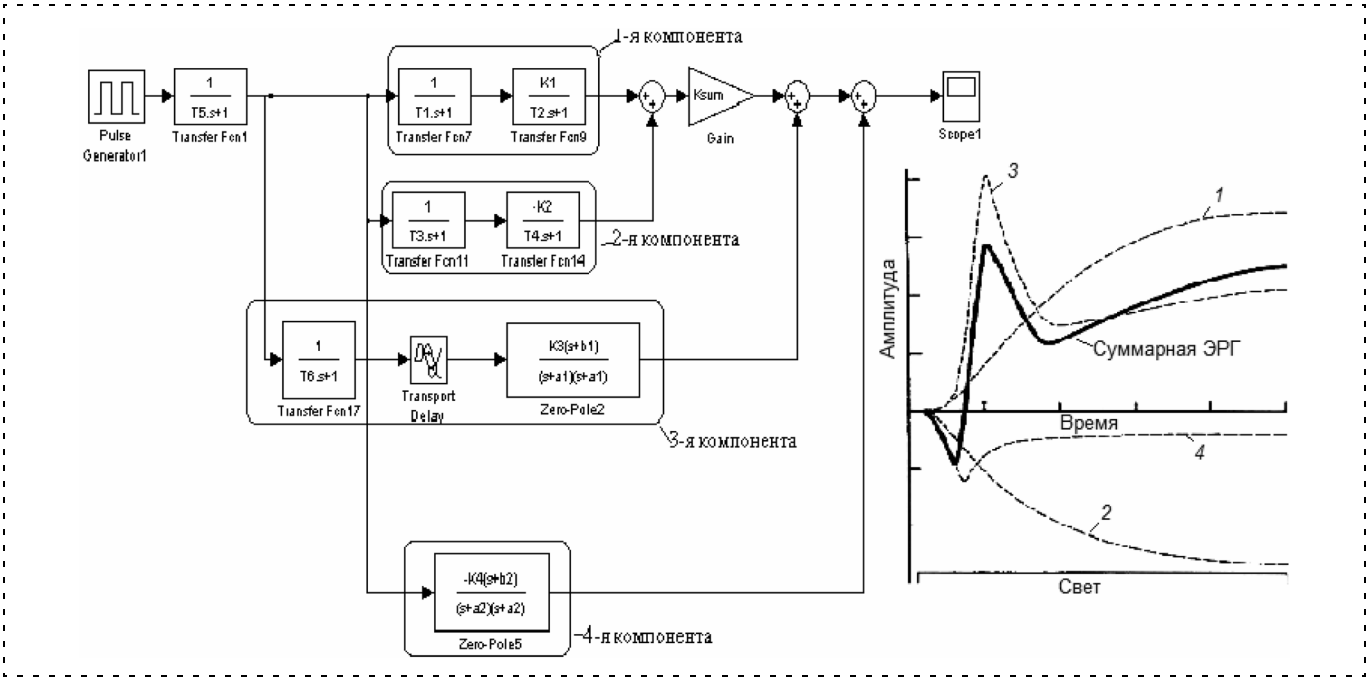


Схема модели и разложение ЭРГ с выделенными компонентами

от установки, на которой проводится исследование. Однако моделирование показало зависимость результатов только от площади световых импульсов. Этот фактор позволяет существенно расширить банк данных по оцифрованным ЭРГ с разных установок для целей исследований.

Модель должна подстраиваться под ЭРГ с определенной степенью точности. Метод подстройки связан с оценкой значений коэффициентов модели. В качестве критерия используется минимум СКО между выходным сигналом модели и имеющимися в наличии цифровыми файлами ЭРГ. Но кроме минимума СКО еще необходимо учитывать совпадение экстремумов модели и ЭРГ. В модели (1) задаются 16 параметров, включая запаздывание. Необходимо решить задачу по их подбору. Процедура подстройки может проводиться с использованием стандартных процедур оптимизации. При решении такой задачи было выявлено наличие множества локальных минимумов.

При сравнительном анализе и моделировании порядка 200 ЭРГ пациентов с различными патологиями сетчатки было установлено, что 10 параметров модели (1) из 16, будучи один раз найденными, остаются практически неизменными для любого конкретного пациента. Кроме этого, можно рассматривать общий коэффициент усиления разности первой (W_1) и второй (W_2) компонент как один параметр. Таким образом, в модели (1) можно выделить пять параметров, в том числе и запаздывание, которые характеризуют ЭРГ и вносят основной вклад в форму компонент ЭРГ. В число неизменных параметров входят постоянные времени медленных составляющих (1-й и 2-й компонент), постоянные времени 4-й компоненты (*a*-волна) и постоянная времени в числителе передаточной функции 3-й компоненты (*b*-волна). Таким образом, в подстройке участвует сочетание значений коэффициентов усиления и постоянных времени *a*- и *b*-волн (4-й и 3-й компонент), а также существенный вклад вносит суммарный коэффициент усиления 1-й и 2-й компонент. Все это значительно упрощает процесс подстройки модели, так как надежнее воспользоваться методом перебора всех возможных комбинаций значений параметров и выявить среди них оптимальный. Эти пять параметров, значения которых зависят от видов патологий, могут быть использованы для целей диагностики как дополнительные признаки, характеризующие ЭРГ пациента.

При наличии современного ПК время поиска оптимального сочетания значений параметров составляет 10...15 минут, а в дальнейшем планируется снизить это время до 5...10 минут. Но при этом такой подход позволяет надежно находить наиболее точные оценки значений параметров модели.

С помощью подстраиваемой модели было обработано около 200 ЭРГ. Для всех анализируемых ЭРГ удалось найти соответствующие параметры, минимизирующие СКО между выходом модели и ЭРГ пациента. Полученные результаты соответствуют существующим представлениям о функционировании соответствующих клеток.

Специфика и сложность диагностики глазных заболеваний по ЭРГ, а именно по общей ЭРГ, заключаются в довольно широком разбросе параметров ЭРГ для различных патологий, в том числе и для нормы. В клинической практике используются

четыре параметра ЭРГ — значения абсцисс и ординат точек минимума и максимума. Использование параллельной динамической подстраиваемой модели позволяет добавить еще пять параметров, характеризующих конкретные компоненты. При этом можно заметить, что эти модельные параметры дополняют основные электроретинограммные, при этом конкретизируя состояние отдельных компонент.

Таким образом, имеющиеся девять признаков (предпосылок), характеризующих патологии сетчатки, позволяют искать решение задачи диагностики. К сожалению, статистические методы пока применить не удается в силу недостаточного объема экспериментальных результатов для разных видов патологий. В данной статье рассматривается задача построения системы диагностики с использованием нечеткого множества. При этом каждому диагнозу приписываются некоторые степени принадлежности. Иными словами, строится нечеткая ситуационная советующая система, в которой пространству предпосылок ставится в соответствие пространство заключений (множество предположительных диагнозов) [2].

При решении данной задачи были отобраны группы ЭРГ, соответствующие тому или иному диагнозу, и для каждой группы были определены усредненные значения признаков и оценены области их отклонений.

Для построения алгоритма нечеткого логического вывода формируются девять лингвистических переменных (по числу выявляемых патологий, включая норму), содержащие терм-множества. Число термов в терм-множествах, в основном, не превышает двух из-за очень большого разброса параметров по каждому признаку (предпосылке). Число термов в общем случае не превышает трех, что позволяет вполне уверенно различать те или иные ретинальные патологии. На основе данных строятся функции принадлежности для каждого терма. При этом, как показывают исследования, для функций принадлежности может быть выбрана самая простая форма — треугольная.

Алгоритм нечеткого логического вывода строится с использованием реляционных моделей. Для этого составляется нечеткое соответствие $\widetilde{\Gamma} = (X, Y, \widetilde{F})$, где X — область отправления (множество типовых ситуаций), Y — область прибытия (множество возможных диагнозов), $\widetilde{F}$ — график нечеткого соответствия.

Обобщенная нечеткая ситуация характеризуется нечетким множеством $\widetilde{G} = \{<\mu_G(x_i)|x_i>\}$, $x_i \in X$, $\widetilde{G} \subset X$. Мощность этого нечеткого множества равна произведению числа термов всех лингвистических переменных. Элементы множества $\widetilde{G}$ представляют собой все возможные сочетания термов.

Для построения графика нечеткого соответствия $\widetilde{F}$ удобно воспользоваться усредненными данными предпосылок, поскольку они характеризуют некоторые типовые ситуации. Нечеткий график нечеткого соответствия представляется в виде реляционной матрицы $\widetilde{F} = \|f_{ij}\|$. Нечеткое множество возможных патологий $\widetilde{H} \subset Y$ определяется как композиция входной нечеткой ситуации $\widetilde{G}$ и нечеткого графика $\widetilde{F}$:

$$\widetilde{H} = \widetilde{G} \circ \widetilde{F},\ \mu_H(y_j) = \mathop{\mathrm{S}}_{i=1}^{12} \mu_G(x_i) \mathrm{T} f_{ij}. \qquad (2)$$

В выражении (2) символами "T" и "S" обозначены T- и S-нормы, которые являются нечеткими расширениями операций "И" и "ИЛИ" соответственно. В большинстве практических приложений используется максминный логический базис, для которого нечетким расширением "И" является операция взятия минимума, а расширением "ИЛИ" — операция взятия максимума:

$$\begin{aligned} c_1 \mathrm{T} c_2 &= \min(c_1, c_2); \\ c_1 \mathrm{S} c_2 &= \max(c_1, c_2). \end{aligned} \qquad (3)$$

Диагностика ведется по девяти категориям (норма + восемь патологий). Система по трем признакам оказывается недостаточной для диагностики. Ведь важно не только верное диагностирование пациентов, но и отсутствие ложноположительных результатов. Система, которая диагностирует по более чем пяти признакам, оказывается избыточной в силу значительного разброса параметров признаков (предпосылок). Расчеты на такой системе громоздки и приводят к плохой различимости патологий.

При исследовании диапазонов разброса параметров признаков были выявлены признаки, разброс значений параметров которых весьма четко характеризует отдельные патологии. Однако использование таких признаков в диагностической системе нередко приводит к ложноположительным оценкам видов других патологий, т. е. не любые сочетания признаков (предпосылок) следует использовать в диагностической системе для выявления конкретной патологии. Поэтому ниже показывается эффективность работы диагностической системы, базирующейся на одновременном использовании групп (ансамблей) более простых подсистем, в каждой из которых используются не более трех признаков для различения определенных видов патологий.

При разбиении девяти признаков на группы по три получаем 84 сочетания признаков для построения соответствующих подсистем. И из этих подсистем формируются группы, наиболее успешно диагностирующие определенные виды патологий. Фактически одновременная работа группы таких подсистем представляется как изучение проблемы под разными углами, с разным сочетанием признаков. В результате мы можем увидеть суммарную степень близости к предполагаемому диагнозу. В итоге были сформированы четыре группы подсистем диагностирования, в каждой группе — по 13...17 подсистем со своими сочетаниями признаков. Системы в эти группы подбирались таким образом, чтобы можно было различать конкретный диагноз (в некоторых случаях и не один) и при этом наличие ложноположительных результатов было бы минимальным.

В качестве иллюстрации рассмотрим работу одной диагностической подсистемы на основе трех признаков, а далее — одновременную работу группы подсистем.

С точки зрения экспертов-физиологов наибольшую информацию о характере патологии несут ординаты и абсциссы первых двух экстремумов ЭРГ:

$$U_a = \min U_{\text{ЭРГ}}(t);$$

$$t_a = \arg\min U_{\text{ЭРГ}}(t);$$

$$U_b = \max U_{\text{ЭРГ}}(t);$$

$$t_b = \arg\max U_{\text{ЭРГ}}(t).$$

Анализ значительного числа ЭРГ пациентов, полученных в разное время и с разных установок, показывает, что при построении экспертных систем диагностики в качестве факторов целесообразно брать не сами значения максимумов и минимумов ЭРГ, а их отношения, например $\frac{U_a}{U_b}$ или $\frac{U_a}{U_b - U_a}$.

Построение диагностической подсистемы на основе указанных трех признаков базируется на построении нечеткого множества, при этом каждому диагнозу должны приписываться некоторые степени принадлежности. Иными словами, необходимо построить нечеткую ситуационную советующую систему [3], в которой пространству предпосылок (набору значений $\frac{U_a}{U_b}$, t_a, t_b) ставится в соответствие пространство заключений (множество предположительных диагнозов).

При решении данной задачи были отобраны группы ЭРГ, соответствующие тому или иному диагнозу, и для каждой группы были определены усредненные значения $\frac{U_a}{U_b - U_a}$, t_a, t_b (табл. 1).

Для того чтобы проверить работоспособность рассмотренного выше алгоритма, в качестве декларативных знаний рассмотрим типовые ситуации, составленные по данным, приведенным в табл. 1, и оценим соответствие полученных нечетких множеств диагнозам, поставленным экспертами-физиологами. Полученные результаты приведены в табл. 2 (нечеткие множества пронормированы).

Таблица 1

Усредненные значения отношений экстремумов ЭРГ и координаты времен их наступления для различных патологий сетчатки

Шифр	Диагноз	$Q = \frac{U_a}{U_b}$	t_a, мс	t_b, мс
N	Норма	3,76	17	36
GL	Глаукома	0,412	20	56
DRP	Ретинопатия	0,145	23	74
RD	Отслойка	0,832	20	45
RP	Ретинит	1,571	25	55
XR_R	Ретиношизис	23,51	18	34
M	Миопия	1,299	19	41
SD	Склероз	1,409	18	37

Таблица 2

Соответствие полученных нечетких множеств поставленным диагнозам при использовании максминного логического базиса

Диагноз, поставленный экспертом	Нечеткое множество возможных патологий							
	N	GL	DRP	RD	RP	XR_R	M	SD
N	1	0,16	0,047	0,33	0,24	0,18	0,51	0,55
GL	0,20	1	0,58	0,48	0,43	0	0,44	0,44
DRP	0,067	0,67	1	0,55	0,78	0	0,33	0,11
RD	0,41	0,49	0,49	1	0,45	0	0,84	0,79
RP	0,38	0,57	0,90	0,57	1	0	0,38	0,38
XR_R	0,17	0	0	0	0	1	0	0
M	0,76	0,54	0,335	1	0,35	0	1	0,93
SD	0,89	0,58	0,12	1	0,38	0	1	1

Таблица 3

Значения признаков ЭРГ пациентов, используемых для диагностики экспертной системы № 1

Пациенты с известными диагнозами	U_a/U_b	t_a, мс	t_b, мс
N_009L	3,46	17,5	39
N_008L	3,52	19	33,5
RD_10R	0,71	17,5	45
RD_003	0,55	17	40
SD_002L	1,55	19,5	35
SD_005L	1,88	19	40,3
XR_R003L	8,33	17,5	34,5
XR_R006L	6,58	18,5	31,5
GL_004R	0,07	22	61,8

Таблица 4

Тестовая проверка работы диагностической системы № 1

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий							
	N	GL	DRP	RD	RP	XR	M	SD
N_009L	1	0,16	0,047	0,33	0,24	0,106	0,51	0,55
N_008L	1	0,17	0	0,35	0,25	0,125	0,54	0,59
RD_10R	0,35	0,49	0,49	1	0,30	0	0,85	0,79
RD_003	0,27	0,46	0,25	1	0,30	0	0,85	0,79
SD_002L	1	0,59	0	0,94	0,48	0	0,94	0,91
SD_005L	1	0,49	0,28	0,60	0,32	0	0,69	0,75
XR_003L	0,17	0	0	0	0	1	0	0
XR_006L	0,21	0,19	0	0,28	0,28	1	0,40	0,40
GL_004R	0,046	1	1	0,66	0,94	0	0,40	0,23

Таблица 5

Результат работы системы из 17 подсистем для выявления нормы, ретиношизиса и рассеянного склероза

	N	RD	XR	SD	GL	GL2a	GL3a	M
N003L	1,00	0,29	0,17	0,24	0,02	0,01	0,04	0,81
N004R	1,00	0,39	0,17	0,29	0,16	0,06	0,13	0,92
N004L	1,00	0,36	0,17	0,25	0,07	0,04	0,07	0,89
N008R	0,99	0,75	1,00	0,82	0,35	0,13	0,31	0,92
N008L	1,00	0,81	0,52	0,88	0,53	0,24	0,46	0,85
N009R	0,50	1,00	0,53	0,85	0,33	0,09	0,25	0,34
SD002R	0,20	0,67	0,42	1,00	0,19	0,05	0,14	0,32
SD002L	0,20	0,66	0,42	1,00	0,20	0,05	0,14	0,31
SD003R	0,25	0,61	0,53	1,00	0,19	0,05	0,14	0,30
SD003L	0,33	0,73	0,55	1,00	0,25	0,06	0,18	0,36
SD005R	0,26	0,74	0,41	1,00	0,23	0,06	0,16	0,34
SD005L	0,25	0,69	0,44	1,00	0,21	0,06	0,16	0,34
XR_R002R	0,11	0,40	1,00	0,61	0,19	0,10	0,17	0,16
XR_R02L	0,13	0,42	1,00	0,64	0,19	0,10	0,17	0,18
XR_R03R	0,60	0,82	1,00	0,89	0,32	0,11	0,27	0,56
XR_R03L	0,15	0,45	1,00	0,52	0,20	0,08	0,20	0,15
XR_R04R	0,06	0,44	1,00	0,41	0,28	0,08	0,22	0,05
XR_R05R	0,51	0,31	1,00	0,58	0,28	0,12	0,29	0,43
XR_R05L	0,32	0,38	1,00	0,57	0,32	0,11	0,28	0,30
XR_R06R	0,17	0,27	1,00	0,49	0,19	0,09	0,26	0,14
XR_R06L	0,17	0,27	1,00	0,49	0,17	0,09	0,24	0,14

Результаты, приведенные в табл. 2, следует расценивать как самотестирование системы диагностики по средним значениям признаков патологий из табл.1. Очевидно, что большинство ретинальных патологий распознаются достаточно хорошо. Исключение составляют диагнозы "рассеянный склероз" ("SD") и "миопия" "M". Это обусловлено, с одной стороны, тем, что координаты экстремумов ЭРГ, характерных для склероза, близки к серединам базовых шкал, с другой стороны, спецификой максминного логического базиса, который не позволяет значительной части данных влиять на результат нечеткого вывода.

Проверим качество получившейся системы (присвоим ей № 1) для оценки патологий конкретных пациентов.

В табл. 3 представлены отношения экстремумов девяти пациентов с известными диагнозами, которые используются для проверки системы № 1 с максминным логическим базисом.

В табл. 4 в первом столбце приведены известные диагнозы девяти пациентов, а в соответствующих строках даются степени соответствия возможных диагнозов, определяемых системой № 1.

Отметим, что экспертная система № 1, несмотря на то, что при ее построении используется малое число признаков, дает неплохие результаты. Однако наблюдается плохая различимость для диагнозов "SD" и "N", а также неразличимость по диагнозам "GL" и "DRP".

Проверка ее на большем числе пациентов с известными диагнозами приводит к увеличению процента плохо различаемых случаев.

Значительно лучше работает система диагностики, состоящая из 17 подсистем, каждая из которых использует сочетания трех признаков. В табл. 5 приведены результаты работы такой системы при оценке патологий 63 пациентов. Данная система настраивалась на выявление нормы, рассеянного склероза и ретиношизиса.

Исследования показывают, что система в виде ансамбля одновременно используемых 17 подсистем, работающих по сочетаниям трех признаков, с уверенностью 0,90 диагностирует три вида патологий. Еще два вида других патологий с уверенностью 0,96 диагностирует система из шести подсистем и т. д. Следует отметить, что патологии примерно 15 % пациентов оказываются плохо различимыми. Однако специалисты-физиологи в большинстве таких особых случаев находят этому рациональное объяснение и не относят подобные результаты к неудовлетворительным. Дальнейшие работы в этой области предполагают получение новых признаков, которые могут позволить уточнять особые случаи.

Список литературы

1. **Анисимов Д. Н., Вершинин Д. В., Зуева М. В., Колосов О. С., Хрипков А. В., Цапенко И. В.** Использование подстраиваемой динамической модели сетчатки глаза в компонентном анализе для диагностики патологий методами искусственного интеллекта // Вестник МЭИ. 2008. № 5. С. 70—74.

2. **Гранит Р.** Электрофизиологическое исследование рецепции / Пер. с англ. А. Л. Бызова и Д. А. Сахарова. Под ред. и с предисл. Т. Д. Смирнова. М.: Иностранная литература, 1957. 339 с.

3. **Анисимов Д. Н., Астахова Ю. Ю., Вершинин Д. В., Колосов О. С., Зуева М. В., Цапенко И. В.** Дифференциация патологий сетчатки глаза на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 56—60.

МЕХАТРОНИКА УПРАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИЯ

Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 10 (115)
ОКТЯБРЬ
2010

Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М.
Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами. Часть I 52

Парамонов П. П., Сабо Ю. И., Шукалов А. В., Матвеев В. В., Распопов В. Я.
Интегрированная навигационная система для малоразмерного летательного аппарата 60

Сильвестров М. М., Котицын Л. О., Ползик В. П., Бегичев Ю. И.
Формирование и исследование эргатического интерфейса информационно-управляющего комплекса перспективного многоцелевого вертолета 68

Пономаренко А. В., Кулабухов В. С., Халтобин В. М., Ключников А. А., Левин Д. Н.
Исследования и испытания автоматизированных систем обучения для подготовки инженерно-технического и летного состава самолетов и вертолетов 74

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2010.

УДК 517.977.5:629.78 (PACS 07.05.Dz)

В. Ю. Рутковский, д-р техн. наук, зав. лаб.,
В. М. Суханов, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
В. М. Глумов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН, Москва
rutkov@ipu.ru
suhv@ipu.ru
vglum@ipu.ru

Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами. Часть I

Представлен краткий обзор зарубежной и отечественной научной литературы за более чем двадцатилетний период исследований в области динамики и теории управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами (КМР), предназначенными для оказания помощи космонавтам или для их замены при выполнении различных сервисных работ в открытом космосе. Сформулированы некоторые проблемные задачи в области управления этими сложными объектами нового класса космической техники. Приведены уравнения движения КМР, пригодные как для исследования динамики, так и для синтеза алгоритмов управления в ряде основных режимов функционирования. Рассмотрены особенности динамики манипуляторов на подвижном основании при использовании приводов с принудительным механическим торможением. Сформулировано понятие и определены необходимые и достаточные условия технической управляемости КМР.

Ключевые слова: *космический манипуляционный робот, многорежимность, математические модели, алгоритмы управления, техническая управляемость*

Введение

Свободнолетающий космический манипуляционный робот (КМР) представляет собой объект маломерной космической техники, который как механическая система состоит из несущего (основного) тела и шарнирно присоединенных к нему одного или двух многозвенных (чаще — трехзвенных) манипуляторов с концевыми схватами. КМР могут использоваться для выполнения разнообразных операций, связанных с обслуживанием пилотируемых орбитальных станции (для инспектирования и ремонта наружных поверхностей и элементов станции, спасения несанкционированно удалившихся от станции полезных грузов, космонавтов при обрыве страховочного фала и т. д.). КМР могут применяться для удаления с рабочей орбиты космического мусора, для ремонта космических аппаратов с длительным сроком активного существования (например, аппаратов на геостационарной орбите), для сборки на орбите больших космических конструкций (радиотелескопов, солнечных энергетических станций, размер которых может превышать размеры футбольного поля, космических рефлекторов, позволяющих освещать отраженным светом Солнца обитаемые районы Заполярья в период полярной ночи или подсвечивать в ночное время участки мирового океана для ускорения роста планктона, являющегося кормовой базой промысловой рыбы) и т. д.

В настоящее время предполагается, что КМР могут выполнять транспортные, ремонтные, спасательные и обслуживающие работы в удаленной от места базирования точке. Навигация и наведение КМР может осуществляться с помощью телекамер, связанных с корпусом КМР. Роль человека при решении задач навигации и ориентации КМР может быть сведена к минимуму, если системы управления движениями КМР будут иметь достаточно высокий искусственный интеллект, позволяющий самостоятельно выполнять различного вида космические операции, чему благоприятствуют устанавливаемые на "запястья" концевых схватов мини-телекамеры со встроенными лазерными дальномерами, поставляющие дополнительную информацию о процессах в операционном поле.

Отметим, что достаточно полный обзор последних работ по рассматриваемой проблематике приведен в [1]. Указывается, что свободнолетающие космические манипуляционные системы, в которых автоматизированные манипуляторы установлены на свободноперемещающейся в пространстве космической платформе, предназначаются для сборки, обслуживания, ремонта и других непредвиденных операций, возникающих при проведении работ в космосе. Отмечается, что даже в системах с неподвижным основанием управление механическим манипулятором представляет собой достаточно непростую задачу, что объясняется наличием существенно нелинейных зависимостей в уравнениях движения манипулятора, учет которых, начиная с раннего периода исследований, привел к появлению различных алгоритмов управления движением концевого звена или силой. В работе сначала приведен краткий обзор фундаментальных концепций, используемых при синтезе различных алгоритмов управления роботизированными космическими манипуляторами. Далее рассмотрены специфические проблемы, связанные с применением подобных систем в космосе и при исследовании микрогравитации окружающей среды. Рассмотрены важные вопросы моделирования кинематики и динамики таких систем, вопросы планирования траектории и стратегий управления манипулятором на подвижном основании, затронуты проблемы взаимодействия дополняющих друг друга манипуляторов свободнолетающего робота. В заключение обсуждены некоторые экспериментальные исследования и технологические аспекты таких систем с учетом их специфических ограничений.

В первой части данной статьи приводится краткий обзор работ (в том числе работ авторов данной статьи), посвященных задачам управления движениями КМР на множестве штатных и нештатных режимов его существования. Приводится ряд математических моделей КМР, отображающих те или иные специфические особенности динамики объекта, характерные для исследуемого режима функционирования космического робота.

Для выполнения запланированного множества задач КМР должен обладать свойством технической управляемости, которое считается имеющимся в наличии, если заданное для некоторого режима множество требований реализовано. Таким образом, обеспечение свойства технической управляемости КМР на множестве режимов функционирования можно рассматривать как решение задачи выбора значений основных параметров системы, обеспечивающих работоспособность КМР в целом.

Краткий анализ зарождения и развития работ по созданию КМР

По-видимому, первые сведения о необходимости создания свободноперемещающейся в пространстве, дистанционно управляемой кибернетической системы (телеоператора) — в некотором смысле прототипа космического манипуляционного робота ETS-VII, запущенного в рамках реализации совместного японо-германского проекта [2], — появились в работах [3, 4], опубликованных в 1972 г. Предполагалось, что управлять подобной системой с помощью кабельной линии или по радио должен человек-оператор, находящийся в обитаемом отсеке корабля. Рассматривались два типа роботов-телеоператоров. В первом случае манипуляторы устанавливаются на транспортном корабле и выполняют работы во внешнем, геометрически ограниченном пространстве по сигналам оператора. Во втором случае телеоператоры обладают возможностью свободно перемещаться в космическом пространстве благодаря собственной системе передвижения независимо от пилотируемого космического аппарата, которым они должны выводиться в заданную точку пространства. Подобные аппараты получили в зарубежной литературе название Free-flying robot (или короче — Free-flyer). Предпочтительность разработки именно этого типа объектов космической робототехники была заявлена в 1974 г. на 6-м Симпозиуме ИФАК по управлению в пространстве в работе [5], в которой указано, что в Космической программе США большое внимание уделяется разработке космических манипуляторов, имеющих возможность свободно перемещаться в космическом пространстве на достаточно большие расстояния (до 10 км и более) с помощью маломощных двигателей, работающих на гидразиновом топливе. Конструктивно такой объект выполняется в виде платформы с присоединенным к ней манипулятором (или с несколькими манипуляторами). Кроме того, платформа содержит устройства управления и совокупность исполнительных органов, обеспечивающих требуемую ориентацию и желаемую траекторию движения платформы в космическом пространстве.

В работе отечественных ученых [6] предложена методика анализа динамики манипулятора на подвижном основании и приведены результаты решения задачи захвата в инерциальном пространстве полезного груза (в виде фиксированной материальной точки) с помощью свободнолетающего манипуляционного робота. Указанная задача решена для случая стабилизируемого и нестабилизируемого корпуса космического робота.

Оставшийся вне поля зрения работы [6] вопрос захвата манипуляционным роботом перемещающегося в пространстве груза был исследован в [7]. Использовалась обобщенная модель КМР, полученная с учетом неголономных связей, характерных для рассматриваемого класса механических систем. Для управления манипулятором применено управление по вектору скорости, при котором закон управления формируется с помощью инверсии матрицы Якобиана, как это принято в наземной робототехнике. В качестве прикладной задачи рассмотрен случай плоского движения КМР и предложен способ координированного управления с помощью системы ориентации корпуса и системы управления звеньями манипулятора. Автор работы [7] приводит результаты экспериментальных исследований двух моделей КМР. Один из них имел единственный манипулятор с двумя степенями свободы, второй — два аналогичных манипулятора. Показана возможность повышения точности управления во втором случае за счет компенсации возмущения от движения захватывающего груз манипулятора путем соответствующего изменения момента количества движения второго манипулятора.

В работе [8] была рассмотрена задача идентификации с помощью КМР массы, координат центра масс и тензора инерции захваченного манипулятором постороннего объекта с неизвестными масс-инерционными характеристиками, что необходимо для оптимального решения задачи последующего удаления этого объекта как космического мусора с занимаемого на орбите положения. Недостатком работы является то, что предложенный алгоритм управления в режиме идентификации пригоден лишь для класса КМР, в котором перемещения манипулятора не оказывают существенного влияния на движение основного тела, что физически соответствует необходимости выдерживать пропорции между моментами инерции КМР и идентифицируемого объекта в отношении 10/1. Тем не менее, полученные результаты были апробированы в космическом эксперименте при реализации запуска спутника

EST-VII, предназначенного для демонстрации процессов сближения, стыковки и манипуляций летающего робота [2, 9].

Исследованию проблемы планирования траектории манипулятора КМР посвящено достаточно много работ (см., например, [10—13]). В [10—12] эта задача решается для случая, когда приложенные к корпусу КМР управляющие воздействия и другие внешние возмущения отсутствуют. Свободнолетающий робот в этом случае обычно называют свободноплавающим (free-floating robot). Однако, по крайней мере, для случая низких орбит это предположение неправомерно [14]. С учетом внешних возмущений и влияния движений звеньев манипулятора на динамику основного тела КМР задача рассмотрена в [13]. Планирование движения концевого схвата манипулятора изучалось как при отсутствии управления положением корпуса КМР, так и в случае его стабилизации в инерциальном пространстве. При синтезе алгоритма управления манипулятором использовался метод оптимизации по одному из критериев: либо минимального расхода топлива, либо минимального времени выполнения требуемой операции. Динамика исполнительных органов как в системе стабилизации основного тела КМР, так и в шарнирах звеньев манипулятора не учитывалась.

Помимо отмеченной во введении обзорной работы [1] подробное обсуждение большого числа важных вопросов, возникающих при разработке робототехнических систем, связанных с условиями работы в открытом космосе с учетом жестких требований к долговечности, надежности и безопасности функционирования, минимизации энергопотребления и т. д., можно найти в работах [15, 16]. Очень важные и теоретически сложные вопросы этого ряда проблем, вызванные необходимостью учета нежесткости космических манипуляторов, рассмотрены, например, в [17—19].

Некоторые проблемные задачи теории управления КМР

К настоящему времени опубликовано более 200 работ, посвященных решению тех или иных проблем управления КМР [1]. Анализ этих работ показывает, что пока можно говорить лишь о начальном периоде формирования общей теории и методов решения задач управления этими сложными, многорежимными объектами роботизированной космической техники нового типа.

К видимым нами проблемным задачам, решение которых пока недостаточно глубоко проработано для практического применения при создании КМР, укрупнено можно отнести следующие.

1. Проблема формирования аппаратурного и измерительно-информационного комплекса, обеспечивающего высокоточное функционирование КМР при решении задач, связанных, например, с процессами обслуживания пилотируемой орбитальной станции или возникающих при сборке на орбите больших космических конструкций и межпланетных кораблей. Сложность вопроса связана, с одной стороны, со множественностью и разнообразием функций, возлагаемых на КМР и вытекающей отсюда необходимостью иметь высокий уровень информационного обеспечения, и, с другой стороны, с почти полным отсутствием практического опыта создания и использования этого нового класса объектов космической техники. Представляется, что в качестве отправной точки при решении задачи можно применять приборные конфигурации систем управления летающим роботом, предложенные, например, в [7, 14, 20].

2. Определение оптимальной структуры и параметров КМР как механической системы, обеспечивающей выполнение множества разнообразных задач с учетом подвижности корпуса робота. Заметим, что некоторые из задач данного направления уже рассматривались в работах [21, 22].

3. Синтез алгоритмов высокоточного и экономичного управления на множестве режимов функционирования КМР, включая режимы манипуляционного выполнения операций "в состоянии зависания" над рабочей зоной (например, при смене поврежденной панели солнечной батареи), в которых с максимальной остротой проявляются известные сложности управления манипулятором на подвижном основании [13, 23]. Следует отметить, что целый ряд алгоритмов управления свободно летающим манипуляционным роботом был предложен и исследован в работах, обсужденных в обзоре [1]. Несомненно, что результаты этих работ могут быть использованы как исходные при синтезе алгоритмов оптимального управления КМР.

4. Оптимизация вектора управления с учетом избыточности числа управляющих воздействий, формируемых управляющими органами подсистем управления основным телом робота и приводами звеньев манипулятора при проведении сборочных работ в космосе. В постановочной части эта задача была изложена в [24]. В [11] рассмотрен вопрос формирования управления манипулятором дрейфующего КМР на основе использования инверсной матрицы Якоби, применяемой в наземной робототехнике. И вообще, в [11] предпринята попытка показать, что практически любой из известных алгоритмов управления наземными манипуляторами (с неподвижным основанием) при некоторых ограничениях может быть применен для управления манипуляторами КМР.

5. Синтез алгоритмов энергосберегающего управления движениями КМР в различных режимах его функционирования. В ряде работ [10—13] эта задача решается за счет реализации управления движением манипулятора путем планирования траек-

тории схвата в режиме свободного дрейфа КМР при условии отсутствия внешних возмущений. В [25] задача энергосберегающего управления в режиме транспортировки груза решается за счет использования подвижности манипуляторов, не задействованных по прямому назначению. Эффект экономии расходуемого запаса топлива на траекторных перемещениях при этом достигается за счет стабилизации углового положения корпуса робота путем обмена движениями между корпусом и звеньями манипулятора.

6. Синтез алгоритмов управления поступательным движением КМР в режиме транспортировки груза. В этом режиме измененная конфигурация КМР порождает смещение центра масс системы относительно точки приложения управляющих сил. При этом возникает возмущающий момент, дестабилизирующий угловое положение объекта, что требует особого рассмотрения при проектировании системы управления полным движением КМР [26].

7. Синтез алгоритмов оценивания параметров и координат КМР с учетом нежесткости конструкции как самого робота, так и различных грузов, переносимых с помощью КМР. Первые результаты в этом направлении получены в работе [27].

Об уравнениях движения КМР и их особенностях при использовании самотормозящихся передач

КМР представляет собой достаточно сложную механическую систему. Для описания динамики КМР как объекта управления целесообразно использовать уравнения Лагранжа 2-го рода. При составлении уравнений необходимо учитывать режим функционирования робота, места размещения исполнительных органов, наличие или отсутствие упругости в сочленениях манипулятора или его звеньев, а также возможную нежесткость груза. Аналитический вывод уравнений плоского движения КМР с ограниченным числом степеней свободы и с учетом нежесткости груза приведен в [28]. В [29, 30] предложен метод компьютерного вывода уравнений общего (в том числе и пространственного) движения КМР без ограничений на число степеней манипулятора, а также разработана процедура компьютерной декомпозиции полученных уравнений на систему поступательного и углового движения корпуса КМР и систему движений манипулятора.

В качестве примера приведем описание полученной в [28] (и использованной при анализе динамики в режиме управления конфигурацией трехзвенного манипулятора с грузом [33]) математической модели плоского движения КМР. При этом учитывается собственная динамика используемых электромеханических приводов.

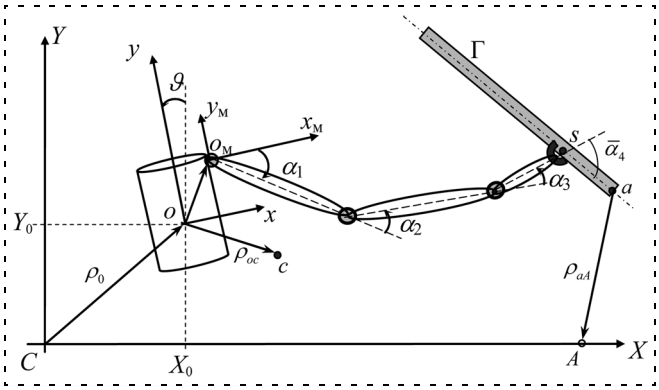
Кинематическая схема КМР с грузом (Г) изображена на рис. 1. Здесь: *CYX* — инерциальная система координат (СК); *oyx* — связанная с корпусом КМР система координат; α_i, $i = \overline{1, 3}$, — координаты манипулятора; X_0, Y_0, ϑ — координаты, определяющие положение корпуса КМР в инерциальной СК; точка *c* — центр масс КМР с грузом, *s* — точка захвата груза манипулятором; *a* — концевая точка груза; *A* — точка установки груза в инерциальном пространстве (на поверхности ОС).

Уравнения движения КМР с грузом в векторно-матричной форме записываются в следующем виде [33]:

$$\left\{ \begin{bmatrix} A_{11}(q) & A_{12}(q) \\ A_{21}(q) & A_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}^0 \\ \ddot{q}^\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_{\dot\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^0 \\ \dot{q}^\alpha \end{bmatrix} - \right.$$

$$\left. - \begin{bmatrix} f^0(q, \dot{q}) \\ f^\alpha(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & \varphi(\varepsilon_\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^0(q^0, \dot{q}^0) \\ i_\text{р}(k_u u - M_\text{т} - M_\text{т}^+(\varepsilon_\alpha)) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $q = (q^0, q^\alpha)^\text{т}$; $q^0 = (q_1 \doteq X_0, q_2 \doteq Y_0, q_3 \doteq \vartheta)^\text{т}$; $q^\alpha = (q_4 \doteq \alpha_1, q_5 \doteq \alpha_2, q_6 \doteq \alpha_3)^\text{т}$; $k_u = \text{diag}\{k_{ur}\}$, $k_{\dot\alpha} = \text{diag}\{k_{\dot\alpha r}\}$, $r = 1, 2, 3$ — коэффициенты усиления сигнала u_r, управляющего приводом *r*-го звена манипулятора и динамического торможения двигателя; $A_{11}(q)$ — (3 × 3)-симметричная матрица собственных коэффициентов, определяющих движение несущего тела КМР; $A_{22}(q)$ — (3 × 3)-симметричная матрица собственных коэффициентов, определяющих движение манипулятора с учетом моментов инерции приводов; $A_{12}(q) = A_{21}(q)$ — (3 × 3)-матрицы коэффициентов взаимовлияния двух механических подсистем КМР — груз; E — единичная матрица; 0 — (3 × 3)-нулевая матрица; $\varphi(\varepsilon_\alpha)$ — раскрытая ниже матрица торможения звеньев манипулятора. Коэффициенты матриц $A_{ij}(q)$, $i, j = 1, 2, 3$, векторов управляющих воздействий и векторов $f^0(q, \dot{q})$, $f^\alpha(q, \dot{q})$ приведены в приложении работы [33].



Конфигурация КМР и основные системы координат

Для снижения энергопотребления при управлении манипулятором космического робота в качестве электроприводов звеньев целесообразно использовать часто применяемые в робототехнике самотормозящиеся передачи. Специфика таких передач заключается в том, что при достижении требуемого положения звена, т. е. при отсутствии управляющего сигнала ($|u_r| \leqslant \varepsilon_u$), шарнир соответствующего звена "омертвляется" вследствие наложения импульсной связи вида $\dot{\alpha}_r = 0$, которой соответствует действие большой силы в течение малого промежутка времени. Подобную силу можно организовать с помощью некоторого устройства силового механического торможения, которое формирует релейный момент сухого трения $M_{\text{т}}^{+}$, прикладываемый к выходному валу привода.

Чтобы привод оставался в заторможенном состоянии ($\omega_{\text{д}} = 0$, $\dot{\alpha} = 0$) сколь угодно долго, действующее значение тормозного момента $M_{\text{т}}^{+} = \text{const}$ должно удовлетворять известному требованию:

$$M_{\text{т}}^{+} \geqslant |i_{\text{р}} M_{\text{д}}(t) + M_{\text{т}}(t)|. \qquad (4)$$

При этом $M_{\text{т}} = \text{const}$, а динамический момент $M_{\text{дин}}^{r}$, создаваемый инерционностью нагрузки, равен нулю.

Тормозное воздействие прикладывается к валу двигателя одновременно с отключением управляющего напряжения $u(t)$ в момент приведения соответствующего звена в заданное положение α^* с требуемой точностью $\varepsilon_\alpha = |\alpha(t) - \alpha^*| \leqslant \varepsilon_\alpha^*$. Алгоритм управления i-м звеном манипулятора в этом случае доопределяется нелинейной функцией вида

$$\varphi_r(\varepsilon_\alpha) = \begin{cases} 1 \text{ при } |\varepsilon_\alpha(t)| > \varepsilon_\alpha^* \Rightarrow \{k' = 1,\ M_{\text{т}}^{+}(\varepsilon_\alpha) = 0\}_r; \\ 0 \text{ при } |\varepsilon_\alpha(t)| \leqslant \varepsilon_\alpha^* \Rightarrow \{k' = 0,\ M_{\text{т}}^{+}(\varepsilon_\alpha) = M_{\text{т}}^{+}\}_r, \end{cases} \qquad (5)$$

где k' — коэффициент обнуления управляющего напряжения в цепи якоря двигателя; $|\varepsilon_\alpha(t)| \leqslant \alpha(t) - \alpha^*|$; $M_{\text{т}}^{+}(\varepsilon_\alpha)$ — релейный тормозной момент. Содержимое фигурных скобок $\{\cdot\}_r$, $r = \overline{1, 3}$, в (5) определяет требуемое состояние подсистемы управления торможением, зависящее от текущего состояния объекта управления $\alpha_r(t)$, отображаемого в (3) тем или иным значением функции $\varphi_r(\varepsilon_\alpha)$.

Если в некоторый момент времени $t = t_-$ в системе (3) для одной из координат α_r, $r = 1, 2, 3$, при $\alpha(t) \approx \alpha^*$ оказывается выполненным условие $|\varepsilon_\alpha(t_-)| \leqslant \varepsilon_\alpha^*$, которому соответствует соотношение по управляющему сигналу $|u_r| \leqslant \varepsilon_u$, то в соответствии с алгоритмом (5) по сигналу $\varphi_r(\varepsilon_{\alpha r}) = 0$ к r-му звену манипулятора прикладывается тормозной момент $M_{\text{т}r}^{+}$, вызывающий обнуление скорости и ускорения привода r-го звена ($\dot{\alpha}_r = 0$, $\ddot{\alpha}_r = 0$). Из уравнений (3) видно, что указанному состоянию системы ($\varphi_r = 0$, $k'_r = 0$) соответствует временная "потеря" уравнения для α_r, осуществляемая "вычеркиванием" этого уравнения путем умножения его левой части на $\varphi_r = 0$, при одновременном обнулении ($k'_r = 0$) входного напряжения привода u_r в правой части уравнения. При этом в остальных уравнениях системы слагаемые, содержащие $\dot{\alpha}_r$ и $\ddot{\alpha}_r$, также становятся равными нулю.

Очевидно, что подобное "вычеркивание" уравнения моделирует потерю одной из степеней свободы КМР, происходящую вследствие "омертвления" сустава манипулятора при наложении на него сильной импульсной связи со стороны тормозного воздействия $M_{\text{т}}^{+}$. Математически этому соответствует понижение порядка системы (3) как минимум на две единицы.

В момент появления на входе системы управляющего сигнала на изменение координаты ($\alpha_r^* \to \alpha_r^{**}$) в соответствии с (5) имеем $\varphi_r(\varepsilon_\alpha) = 1$ и, как следствие, $M_{\text{т}r}^{+} = 0$, $k'_r = 1$. При этом "потерянное" уравнение для α_r восстанавливается ("оживает"), отображая возобновленный процесс изменения конфигурации КМР. Очевидно, что при этом начальными условиями интегралов "ожившего" при $t = t_0$ уравнения являются: $\dot{\alpha}_r = 0$, $\ddot{\alpha}_r = 0$ и $\alpha_r(t_0) = \alpha_r(t_-)$ — конечное значение координаты $\alpha_r(t)$, соответствующее моменту $t = t_-$ наложения импульсной связи при предшествующем торможении.

Отмеченная особенность указывает на то, что математическая модель КМР соответствует системе с дискретно изменяющейся в произвольные моменты времени структурой. С точки зрения теоретической механики эти изменения структуры имеют вид уменьшения или увеличения одной или нескольких степеней свободы, что математически выражается в соответствующем изменении порядка системы дифференциальных уравнений объекта управления.

Приведенные математические модели КМР могут использоваться не только для режима транспортировки полезного груза или управления конфигурацией манипуляторов, но и для многих других режимов функционирования рассматриваемых роботов. В частности, приведенная выше методика описания модели самотормозящейся передачи в шарнирах манипулятора носит общий характер для всех режимов работы КМР.

О технической управляемости КМР

Характерной особенностью КМР является изменение его масс-инерционных характеристик, связанное с необходимостью работы с различными грузами и с изменением конфигурации манипуляторов. В режиме транспортировки груза и при неизменном положении звеньев манипулятора коэффициенты математической модели КМР будут постоянными, но при замене переносимого груза параметры системы будут претерпевать значительные изменения. Учет подвижности основания КМР порождает проблему технической управляемости, заключающуюся в том, что движение несущего тела КМР и звеньев манипулятора должно быть управляемым, т. е. при подаче управления на изменение их положения в инерциальном пространстве эти изменения осуществлялись бы в требуемом направлении и со скоростью не менее заданной.

Дадим аналитическую трактовку сформулированной проблеме технической управляемости.

В общем случае математическую модель (ММ) движения КМР как механической системы можно записать в виде [34]

$$A(q)\ddot{q} + B\dot{q} + Cq + H(q, \dot{q}) = M(q), \qquad (6)$$

где $q \in R^n$ — вектор обобщенных координат КМР, $M(q)$ — вектор управления.

Далее будем предполагать, что для каждой координаты q_i, $i = \overline{1, n}$, существует компонента вектора M_i, т. е. $M = (M_1, M_2, ..., M_n)^{\mathrm{T}}$ и $|M_i| \leqslant M_i^{\max} > 0$. Будем также предполагать, что желаемой реакцией на положительное управление, например $|M_i| = M_i^{\max}$, $M_j = 0$, $i, j = \overline{1, n}$, $j \neq i$, в момент времени $t = t^*$ при $q_i(t) = 0$, $\dot{q}_i(t) = 0$, $\ddot{q}_i(t) = 0$ $(t < t^*)$ является положительное изменение координаты q_i, т. е. $q_i(t) \geqslant 0$ при $t > t^*$.

По виду полной нелинейной ММ (6) трудно аналитически сделать какие-либо выводы о КМР как объекте управления, поэтому от модели (6) перейдем к упрощенной ММ. В частности, предполагая обобщенные скорости $\dot{q}$ достаточно малыми, можно пренебречь вектором $H(q, \dot{q})$, зависящим от произведений скоростей несущего и носимых тел КМР. Пренебрегая диссипацией энергии от взаимодействия КМР с внешней средой, примем $B = 0$. Считая звенья манипулятора, межзвенные сочленения и груз недеформируемыми, допустимо принять также $C = 0$.

Несмотря на заметно упростившийся вид уравнения (6)

$$A(q)\ddot{q} = M(q), \qquad (7)$$

ММ из-за переменности матрицы $A(q)$ сохраняет существенно нелинейный характер.

Дальнейшим упрощением является линеаризация ММ (7) относительно некоторого положения

$$q = q^*, \ q^* = (q_1^*, q_2^*, ..., q_n^*)^{\mathrm{T}},$$
$$q_i^* = \mathrm{const}, \ i = \overline{1, n}. \qquad (8)$$

В линеаризованном виде ММ (7) записывается следующим образом:

$$A(q^*)\Delta\ddot{q} = D(q^*)M, \qquad (9)$$

где $\Delta q = q - q^*$; элементы постоянных матриц $A(q^*)$, $D(q^*)$ зависят от точки линеаризации q^*. Несмотря на ограниченную область адекватности, ММ (9) позволяет провести анализ КМР как динамического звена системы управления и выявить особенности его функционирования.

Поскольку (9) описывает динамику КМР в малой окрестности точки q^*, то далее следует говорить лишь о локальной технической (ЛТ) управляемости.

Известно, что в ММ движения КМР матрицы $A(q)$ и $A(q^*)$ являются положительно определенными, т. е. для скалярного произведения $(A(q^*)x, x)$, $x \in R^n$ и $x \neq 0$, справедливо неравенство

$$(A(q^*)x, x) > 0. \qquad (10)$$

Будем называть КМР с ММ вида (7) ЛТ-управляемым по координате Δq_i $(i = \overline{1, n})$ в положении $q = q^*$, если при нулевых начальных условиях

$$\Delta q_i(t) = 0, \ \Delta\dot{q}_i(t) = 0, \ \Delta\ddot{q}_i(t) = 0 \ (t < t^*) \qquad (11)$$

и при подаче в момент времени $t = t^*$ максимального по модулю управления

$$|M_i(t)| = M_i^{\max} \ (t \geqslant t^*) \qquad (12)$$

возникает ускорение

$$|\Delta\ddot{q}_i(t)| \geqslant \rho_i \neq 0 \qquad (13)$$

одного знака с $M_i(t)$, причем это происходит независимо от присутствия или отсутствия других управляющих воздействий $M_j(t)$ $(j = \overline{1, n}; j \neq i)$.

Если в точке $q = q^*$ КМР является ЛТ-управляемым по координате Δq_i $(i = \overline{1, n})$ и в условии (13) имеет место соотношение

$$\rho_i \geqslant \rho_i^0, \ \rho_i^0 = \mathrm{const} > 0, \qquad (14)$$

то КМР будем называть ЛТ-управляемым по координате Δq_i со степенью технической управляемости ρ_i^0.

Будем называть КМР с ММ вида (9):

1) ЛТ-управляемым в положении $q = q^*$, если КМР ЛТ-управляем по всем координатам Δq_i $(i = \overline{1, n})$;

2) ЛТ-управляемым в положении $q = q^*$ с вектором степени технической управляемости ρ^0, где

$$\rho^0 = (\rho_1^0,\ \rho_2^0,\ ...,\ \rho_n^0)^{\mathrm{T}}, \qquad (15)$$

если он в этом положении ЛТ-управляем по всем координатам $\Delta q_i\ (i = \overline{1, n})$ со степенью технической управляемости ρ_i^0.

Введем в рассмотрение n-мерное пространство $\{q\}$ с декартовой системой координат, начало которой соответствует вектору $q = 0$, а по оси $0q_i$ откладывается значение компоненты q_i вектора $q = (q_1, q_2, ..., q_n)^{\mathrm{T}}$.

Область $G(q)$ в пространстве обобщенных координат $\{q\}$, в каждой точке которой КМР является ЛТ-управляемым, будем называть областью ЛТ-управляемости КМР.

Область $G_\rho(q) \subset G(q)$, в каждой точке которой КМР обладает ЛТ-управляемостью $\rho(q^*)$, $q^* \in G_\rho(q)$, не меньшей заданной степени ρ^0, т. е. $\rho(q^*) \geqslant \rho^0$, будем называть областью ЛТ-управляемости КМР с заданной степенью ρ^0.

$G_W(q)$ обозначим область в пространстве $\{q\}$, которая по тем или иным техническим причинам выбрана в качестве рабочей для функционирования КМР. Будем считать, что рабочая область $G_W(q)$ охватывается областью ЛТ-управляемости КМР

$$G_W(q) \subset G(q), \qquad (16)$$

что вполне естественно при желании ЛТ-управляемости КМР в рабочей зоне его функционирования.

С учетом условия (10) ММ движения КМР (9) представим в виде

$$\Delta\ddot{q} = R(q^*)M, \qquad (17)$$

где $R(q^*) = A^{-1}(q^*)D(q^*)$. Матрицу $R(q^*) = (R_{ij}(q^*))$ $(i, j = \overline{1, n})$ будем называть матрицей эффективности управления.

Введем в рассмотрение матрицу $S(q^*) = (S_{ij}(q^*))$ $(i,\ j = \overline{1, n})$, которую определим по следующему правилу:

$$S_{ii}(q^*) = |R_{ii}(q^*)|,\ S_{ij}(q^*) = -|R_{ij}(q^*)|,$$
$$i = \overline{1, n};\ j = \overline{1, n};\ j \neq i, \qquad (18)$$

где $R_{ij}(q^*)$ — элементы матрицы эффективности $R(q^*)$.

В [34] доказана теорема:

Теорема. *Необходимыми и достаточными условиями ЛТ-управляемости КМР с ММ вида (9) или (17) в положении $q = q^*$ являются*:

1) неособенность матрицы $S(q^*)$, т. е. равенство

$$\mathrm{rank}S(q^*) = n; \qquad (19)$$

2) существование хотя бы одного положительного решения неравенства

$$S(q^*)\gamma > 0, \qquad (20)$$

где $\gamma \in R^n$.

Обратим внимание, что в соответствии с теоремой наличие ЛТ-управляемости КМР в окрестности точки (8) определяется чисто конструктивными параметрами объекта, а не вектором ограничений на управление $M^{\max}$. Иными словами, в положении $q = q^*$ КМР или ЛТ-управляем, или не ЛТ-управляем, и тогда, в последнем случае, изменением компонентов вектора $M^{\max}$ добиться ЛТ-управляемости невозможно: ЛТ-управляемость может быть реализована только за счет изменения конструктивных параметров объекта.

Если в положении $q = q^*$ КМР является ЛТ-управляемым, то выбором соответствующего вектора $M^{\max} = M_0^{\max}(q^*, \rho^0)$ КМР можно в этой точке сделать ЛТ-управляемым с заданной степенью технической управляемости ρ^0.

В работе [34] показано, что условия полной управляемости по Калману являются необходимыми условиями ЛТ-управляемости КМР. Здесь также рассмотрены вопросы определения минимально необходимого управления, которое обеспечивает в точке q^* степень технической управляемости не менее ρ^0. Кроме того, рассмотрены вопросы отыскания области ЛТ-управляемости КМР, выбора минимально необходимого вектора ограничений на управление, обеспечивающего заданную степень ЛТ-управляемости КМР в рабочей области. Рассмотрена задача отыскания области ЛТ-управляемости КМР при заданном векторе ограничений на управление.

Отметим, что решение задачи реализации технической управляемости КМР на множестве режимов функционирования можно рассматривать как решение задачи выбора значений основных параметров системы, обеспечивающих работоспособность КМР в целом.

Заключение

Представленный в статье обзорный материал вводит читателей в проблематику теории и методов управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами. Приведенные в первой части конкретные результаты могут быть использованы при решении задач, связанных с формированием технического облика КМР как мехатронной системы, являющейся многорежимным объектом автоматического управления.

Во второй части статьи будут рассмотрены некоторые задачи обеспечения в том или ином смысле оптимального функционирования КРМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E.** Free-flying robots in space: an overview of dynamics modeling, planning and control // Robotica. 2007. 25 (5). P. 537—547.

2. **Oda M.** ETS-VII, A rendezvous & docking and space robot technology experiment satellite // Froc. 4-th Intern. Symposium on AI, Robotics and automation in space (I-SAIRAS'97), 1997, Tokyo. P. 59—62.

3. **Onego G. T., Clingman J. H.** Free-Flying Teleoperator Requirements and Conceptual Design // Proc. First Nat. Conf. on Remotely Manned Systems. California Inst. Technol. 1972.

4. **Faile G. C., Counter D. N., Bourgeoise E. J.** Dynamic Passivation of a Spinning and Tumbling Satellite Using Free-Flying Teleoperators // Proc. First Nat. Conf. on Remotely Manned Systems. California Inst. Technol. 1972.

5. **Ханг Д., Ирвин Д., Мур Ф.** Выполнение космических операций с помощью свободноперемещающихся телеоператоров // Тр. 6-го Междунар. симпозиума ИФАК по автоматическому управлению в пространстве. Управление в пространстве. Т. 2. М.: Наука, 1976. С. 173—180.

6. **Popov E. P., Medvedev V. S., Yusciienko A. S.** Free-flying manipulation robot computer control // Pros. of the 8-th IFAC Symposium on automatic control in space, Oxford, UK, 1979. Preprints, Pergamon Press. 1979. P. 295—301.

7. **Yoshida K.** Space structure capturing and assembling by experimental free-floating robot satellite (EFFORTS) simulators // Dynamics and control of structures in space II. (Kirk, C. ed.) Proc. of the second International conference on dynamics and control of structures in space. Computational Mechanics Publications. Southampton Boston, 1993. P. 141—160.

8. **Lampariello R., Hirzinger G.** Free-flying robot — inertial parameters identification and control strategies // 6-th ESA Workshop on "Advanced Space Technologies for Robotics and Automation", "ASTRA 2000" ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. 2000, P. 2.2—3.

9. **Landzettel K., Brunner B., Hirzinger G., Lampariello R., Schreiber G., Steinmetz B.-M.** A Unified Ground Control and Programming Methodology for Space Robotics Applications — Demonstrations on ETS-VII. International Symposium on Robotics (ISR 2000), Montreal, Canada. 2000. P. 422—427.

10. **Nakamura Y., Mukherjee R.** Nonholonomic path planning of space robots via a bi-directional approach // Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Cincinnati, OH, 1990.

11. **Papadopoulos E., Dubowsky S.** On the nature of control algorithms for free-floating space manipulators // IEEE Trans. Robot. Autom. 7 (6). 1991. P. 750—758.

12. **Nakamura Y., Suzuki T.** Planning Spiral motions of Nonholonomic free-flying space robots // Journal of Spacecraft and Rockets. 1997. V. 34. N 1.

13. **Lampariello R., Agrawal S., Hirzinger G.** Optimal Motion Planning for Free-Flying Robots // "international Conference on Robotics and Automation (ICRA 2003). Taipei, Taiwan. 2003.

14. **Landzettel K., Brunner B., Hirzinger G., Lampariello R., Scyreiben G., Steinmetz B.-M.** A unified ground control and programming methodology for space robotics applications —Demonstrations on ETS-VII // Intern. Symposium on Robotics (ISR 2000). Montreal, Canada. 2000.

15. **Pulz P.** Space Robotics P. Ehrenfreund et all (Eds.) Laboratory Astrophysics and Space Research. Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 547—596.

16. **Skaar S. B., C. F. Ruoff (eds.).** Teleoperation and robotics in Space. Programs in Astronautic and Aeronautic. 161, Washington: AIAA, 1994.

17. **Murotsu Y., Tsujio S., Senda K., Hayashi M.** Trajectory Control of Flexible Manipulators on a Free-Flying Space Robot // SICE Annual Conference, Yonezawa, Japan, 1991. P. 51—57.

18. **Meirovitch L., Lim S.** Maneuvering and control of flexible space robot // Guidance, Control and Dynamics. 1994. V. 17. N 3.

19. **Яскевич А. В.** Математическая модель космического манипулятора для полунатурной отработки операций причаливания полезного груза // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. № 4. С. 157—176.

20. **Yoshida K., Umetani Y.** Control of Space Free-Flying Robot // Proc. of 29-th IEEE Conference on Decision and Control. 1990. P. 97—102.

21. **Богомолов В. П., Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Проектирование оптимальной механической структуры свободнолетающего космического робототехнического модуля как объекта автоматического управления. I, II // АиТ. 1998. № 5. С. 27—40. № 6. С. 75—88.

22. **Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Техническая управляемость автоматизированного космического модуля // АиТ. 2001. № 3. С. 31—44.

23. **Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Управление посадкой космического робота на орбитальную станцию из режима "зависания" // Сб. трудов XI-го междунар. науч.-техн. семинара — Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Алушта. 2002. М.: Изд. МАИ, С. 291—296.

24. **Суханов В. М., Глумов В. М.** Управление движениями космического робота при сборке БКК на орбите при избыточном числе управляющих воздействий // Тр. 10-го Междунар. семинара "Устойчивость и колебания нелинейных систем управления". Москва, ИПУ, 3—6 июня 2008. С. 298—300.

25. **Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M., Zemlyakov S. D. and Kirchhoff U.** Combined control by space robotic module motion with using manipulator's mobility // 15-th Congress IFAC, Barcelona, Spain. 2002.

26. **Суханов В. М., Земляков С. Д.** Об одном подходе к снижению энергозатрат на управление поступательным движением свободнолетающего космического робота в режиме захвата полезного груза // Тез. докл. 3-й междунар. конф. по проблемам управления. Москва, ИПУ, 2006. С. 184.

27. **Борисов В. Г., Ермилов А. С., Ермилова Т. В., Суханов В. М.** Совместное оценивание координат и параметров космического робототехнического модуля и переносимого им упругого груза // АиТ. 2002. № 11. С. 99—113.

28. **Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Динамическая модель свободнолетающего космического робототехнического модуля // АиТ. 2000. № 5. С. 39—57.

29. **Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Некоторые особенности компьютерного вывода уравнений движения связки механических систем и их декомпозиции // АиТ. 2005. № 5. С. 83—96.

30. **Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Оперативный компьютерный вывод и декомпозиция уравнений движения космического модуля // АиТ. 2006. № 1. С. 89—116.

31. **Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Управление угловым движением космического роботизированного модуля в режиме транспортировки нежесткого груза // АиТ. 2001. № 11. С. 121—135.

32. **Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Модально-физическая модель пространственного углового движения деформируемого космического аппарата и ее свойства // АиТ. 1998. № 12. С. 38—50.

33. **Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М.** Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // АиТ. 2009. № 1. С. 80—98.

34. **Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М.** Техническая управляемость автоматизированного космического модуля // АиТ. 2001. № 3. С. 31—44.

УДК 629.7.05

П. П. Парамонов, д-р техн. наук, проф.,
ген. директор и гл. конструктор,
Ю. И. Сабо, д-р техн. наук, проф.,
гл. конструктор направления,
А. В. Шукалов,
зам. ген. директора и гл. конструктор,
ФГУП "ОКБ "Электроавтоматика" им. П. А. Ефимова",
В. В. Матвеев, канд. техн. наук, доц.,
В. Я. Распопов, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
Тульский государственный университет
tgupu@yandex.ru

Интегрированная навигационная система для малоразмерного летательного аппарата*

Рассмотрена интегрированная навигационная система для беспилотного летательного аппарата, включающая инерциальную, магнитометрическую и пирометрическую системы навигации, и выполнен анализ схем их комплексирования.

Ключевые слова: *навигационная система, беспилотный летательный аппарат, ситема ориентации, гироскоп*

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) — это разновидность летательного аппарата, управление которым осуществляется при отсутствии пилота на его борту. Чаще всего под БПЛА понимают дистанционно управляемый (пилотируемый) летательный аппарат, способный совершать полет и в автоматическом режиме. БПЛА является частью комплекса, в который входит наземный пункт управления с его центральным звеном — человеком-оператором.

Значительный интерес представляют БПЛА категорий Nano, Micro, Mini со взлетной массой от десятка грамм до килограммов, которые можно определить как малоразмерные БПЛА. Их число приближается к 40 % от общего числа БПЛА всех категорий.

Авионика БПЛА — комплекс аппаратно-программных средств, располагаемых на его борту, т. е. бортовая аппаратура управления (БАУ), которая обеспечивает реализацию всех режимов полета и выполнение функциональной задачи [9, 13]. Авионика имеет радиоканал связи с наземной аппаратурой управления (НАУ).

БПЛА как объект управления, рулевые приводы органов управления, БАУ и НАУ образуют систему автоматического управления (САУ) БПЛА.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-08-00230 "Научные основы построения малогабаритных систем ориентации и навигации для беспилотных вращающихся по крену летательных аппаратов".

Большинство современных САУ выполняется по трехканальной схеме. Как правило, каналы носят название соответствующего рулевого органа: канал руля высоты (стабилизатора), канал руля направления, канал элеронов.

Сущность процесса интеграции

Одним из путей совершенствования бортового оборудования БПЛА является создание комплексных систем ориентации и навигации, в которых обрабатывается информация от нескольких измерителей, определяющих одни и те же либо функционально связанные параметры. При этом каждый измеритель в отдельности не удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляются к измерению этих параметров. Задачей комплексирования является объединение отдельных измерителей в интегрированную систему, которая позволяет повысить точность и надежность определения параметров ориентации и навигации. Максимальный выигрыш от комплексирования достигается в результате решения задачи синтеза, при котором находится оптимальная структура системы комплексной обработки информации. В настоящее время в интегрированных навигационных системах применяются оптимальные алгоритмы оценивания, базирующиеся на разностных уравнениях, полученных на основе методов калмановской фильтрации [16].

Структура и состав интегрированной навигационной системы

Интегрированная навигационная система включает бортовую и наземную аппаратуры управления, которые должны обеспечить следующие режимы полета БПЛА:

- взлет и посадку в ручном режиме с управлением по радиоканалу оператором (возможны также автоматические взлет и посадка);
- полет в полуавтоматическом режиме с управлением по радиоканалу с корректировкой действий оператора бортовой аппаратурой управления;
- полет в автоматическом режиме по контрольным точкам с одновременной посылкой телеметрической информации на наземную аппаратуру управления.

Все режимы полета БПЛА обеспечиваются бортовой и наземной аппаратурами управления, включающими функциональные модули (блоки), структура которых показана на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) [13].

Измерительный модуль включает приемник спутниковой навигационной системы Navstar|ГЛОНАСС, триады гироскопов и акселерометров, блоки магнитометров и пирометров. Блоки "Пилот" и "Штурман" представляют собой отдельные платы, включающие микроконтроллеры (МК) и радиомоде-

мы (РМ). Возможна реализация блоков "Пилот" и "Штурман" и на одном МК.

МК "Пилот" непрерывно управляет БПЛА по данным системы ориентации (СО), вырабатывающей информацию об углах тангажа ϑ, курса ψ, крена γ, формируя сигналы управления на рулевые машинки (РМ). СО может быть построена только на основе показаний гироскопов, т. е. быть бесплатформенной, а также магнитометрического, пирометрического типов и др. Возможно и желательно в одном блоке комплексирование нескольких систем ориентации (КСО).

МК "Штурман" отслеживает соответствие полета заданному полетному заданию, следит за радиоэфиром, накапливаемыми ошибками, а также вычисляет поправки для КСО. Данные о географической широте φ, долготе λ текущей точки нахождения БПЛА, высоте H и скорости полета V, а также текущем курсе ψ вырабатываются в блоке комплексной системы навигации (КСН), включающем бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС) и спутниковую навигационную систему (СНС). Таким образом, если в бортовом вычислителе реализован двухядерный процессор, то одно ядро (МК "Штурман") занято преимущественно вычислениями навигационных параметров, а другое (МК "Пилот") — задачами управления (пилотирования).

Связь модулей "Пилот" и "Штурман" с наземной аппаратурой управления обеспечивает модуль "Радист".

НАУ включает аппаратуру управления и связи и персональный компьютер (ПК), обмен информацией между которыми происходит по интерфейсам телеметрии протоколов USB и RS-232.

Создание авионики с малыми массой, габаритными размерами и энергопотреблением стало возможным только благодаря достижениям микросистемной техники.

Современные технологии позволяют создавать микросистемную авионику, включающую однокристальные гироскопы, акселерометры, датчики давления, приемники спутниковой навигации; импульсные приемопередатчики, схемы управления с широтно-импульсной модуляцией для РМ и других исполнительных устройств; микроконтроллеры с энергонезависимой памятью.

Авионика может быть простейшей в случае, если управление БПЛА осуществляется оператором. Например, на БПЛА FIU-301 (США) (взлетная масса менее 4 кг, размах крыла — 1,9 м) установлен инфракрасный "автопилот", помогающий оператору выдерживать заданное положение планера во время выполнения маневра, например набора высоты.

Наиболее полно оценка состояния БПЛА осуществляется с помощью навигационной системы, состоящей из БИНС, комплексированной с системой воздушных сигналов (датчиком высоты и скорости), трехосным магнитометром и системой GPS (ГЛОНАСС) [2, 4, 6, 7].

Системы ориентации

Системы ориентации служат для определения углового положения летательного аппарата относительно опорной системы координат. В БПЛА могут применяться следующие типы систем ориентации: бесплатформенная, магнитометрическая, пирометрическая, видеосистема и др. [1, 2, 3, 6, 9, 10, 15].

Датчиками бесплатформенной системы ориентации (БСО) являются гироскопические датчики угловых скоростей (ДУС) вращения БПЛА, с помощью которых определяется угловое отклонение БПЛА относительно опорной системы координат. В качестве опорной системы координат наиболее часто применяется географическая система координат, центр которой помещается в центр масс БПЛА, а ее оси направлены по сторонам света: на север, по вертикали вверх и на восток.

В качестве ДУС для БСО БПЛА можно применять кориолисовые вибрационные гироскопы, волновые твердотельные гироскопы с кольцевым резонатором, а также роторные вибрационные, волоконно-оптические и твердотельные гироскопы, если они подходят по массогабаритным параметрам [6, 11, 12].

Для запуска алгоритма работы БСО необходимо осуществлять ее начальную выставку, под которой понимается определение начальных углов курса, тангажа и крена (ψ_0, ϑ_0, γ_0). Угол ψ_0 может быть определен с помощью магнитометрической системы. Углы ϑ_0, γ_0 могут быть определены по показаниям акселерометров, оси чувствительности которых параллельны одноименным осям связанной системы координат.

На рис. 2 показана схема подготовки начальных данных для работы БСО, где блоки акселерометров

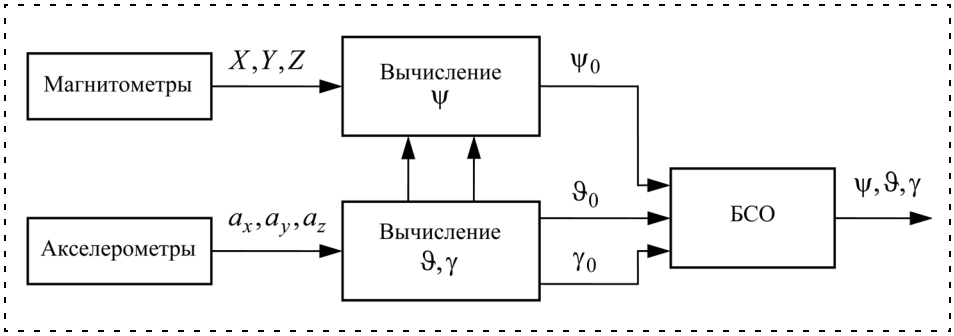


Рис. 2. Подготовка начальных данных для бесплатформенной системы ориентации

и магнитометров служат для выработки начальных значений ψ_0, ϑ_0, γ_0.

В МБПЛА чаще используются микромеханические гироскопы, обладающие большим дрейфом, поэтому требуется коррекция алгоритма вычисления угловых параметров. При работе БСО без коррекции происходит накопление ошибок углов ориентации со скоростью 0,02...0,03 % (для микромеханических гироскопов). В случае использования коррекции ошибка БСО остается ограниченной и определяется точностью нахождения угла акселерометрами.

В магнитометрической системе ориентации в качестве чувствительных элементов применяются магнитометры магниторезистивного типа (магниторезисторы). Источником информации для магнитометрической системы ориентации являются изменения составляющих вектора напряженности H магнитного поля Земли по отношению к летательному аппарату, изменяющему свою угловую ориентацию.

Точность определения угловых координат в магнитометрической системе ориентации существенным образом зависит от присутствия магнитных аномалий, имеющих различную физическую природу, в том числе обусловленную собственным магнитным полем летательного аппарата.

Применение трехосевого датчика позволяет усреднить неточность показаний датчика в направлении его осей чувствительности, выполнив операцию нормирования.

Путевой угол Ψ, вырабатываемый модулем GPS/ГЛОНАСС для малых углов скольжения БПЛА, можно принять в качестве угла курса относительно географического севера. Пересчет из географического курса в магнитный осуществляется на основании информации об угле магнитного склонения D. Выработка значений угла наклонения I осуществляется по информации о долготе λ и широте φ, получаемой от модуля GPS/ГЛОНАСС.

В общем случае движения БПЛА возможно расположение его продольной оси ниже вектора напряженности магнитного поля Земли. В этом случае для вычисления углов тангажа и крена необходимо определять, в каких квадрантах находятся составляющие вектора напряженности H.

Пирометрические системы ориентации в качестве чувствительных элементов используют пирометры, которые реагируют на разность температур между небосводом и земной поверхностью. Этот источник информации зависит в условиях открытого пространства, главным образом, от времени года и погодных условий [13, 15].

Интеграция систем ориентации

Для повышения точности определения угловой ориентации БПЛА возможно комплексирование систем ориентации различного типа [7, 14]. На рис. 3 приведена схема объединения модуля трехосевого магнитометра, пирогоризонта и модуля спутниковой навигационной системы (СНС) GPS/ГЛОНАСС.

Трехосный магнитометр вырабатывает по каждому каналу нормированные показания $\bar{X}$, $\bar{Y}$, $\bar{Z}$. Пирогоризонт определяет углы тангажа ϑ_n и крена γ_n. Модуль GPS/ГЛОНАСС принимает сигналы спутниковой навигационной системы и передает в блок расчета углов ориентации значения географических координат φ, λ, путевого угла Ψ и углов магнитного склонения D и наклонения I.

На основании определенных по пирометрическим датчикам углов тангажа и крена в блоке расчета вычисляется угол курса.

Таким образом, имеются значения углов курса, вычисленные по показаниям пирометров и магнитных датчиков, и курс, выдаваемый модулем GPS. Это позволяет реализовать фильтр Калмана для оценки систематических ошибок магнитных датчиков. Такой способ комплексирования повышает точность определения углов тангажа и крена и устраняет ошибки, связанные с наличием остаточных некомпенсированных магнитных помех, и ошибку, обусловленную углом скольжения БПЛА.

Графики, характеризующие работу фильтра Калмана (ФК) при наличии угла скольжения в 10° и воздействий внешнего перемагничивающего магнитного поля с интенсивностью 0,02 мТл, приведены на рис. 4.

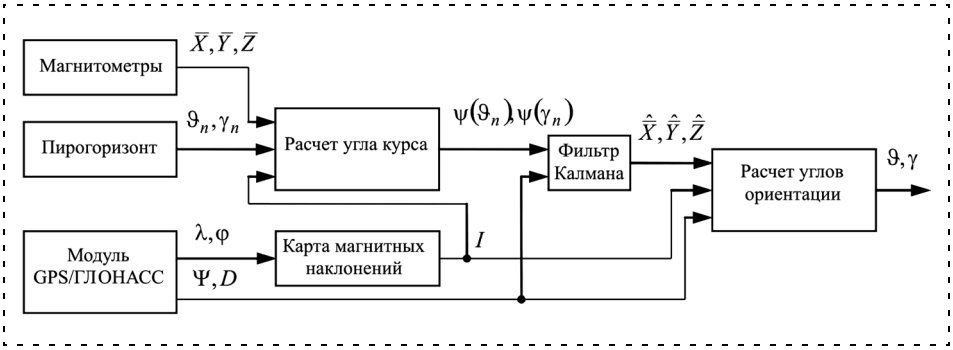


Рис. 3. Схема комплексирования модуля магнитометров, пирогоризонта и модуля GPS/ГЛОНАСС

Комплексирование магнитометрической, пирометрической систем ориентации и СНС с применением фильтра Калмана уменьшает ошибку определения углов тангажа и крена и позволяет добиться точности 0,5° для принятой элементной базы.

В рассматриваемом случае, как и в предыдущем, возможна коррекция БСО. Разностные значения показаний БСО и магнитометров могут

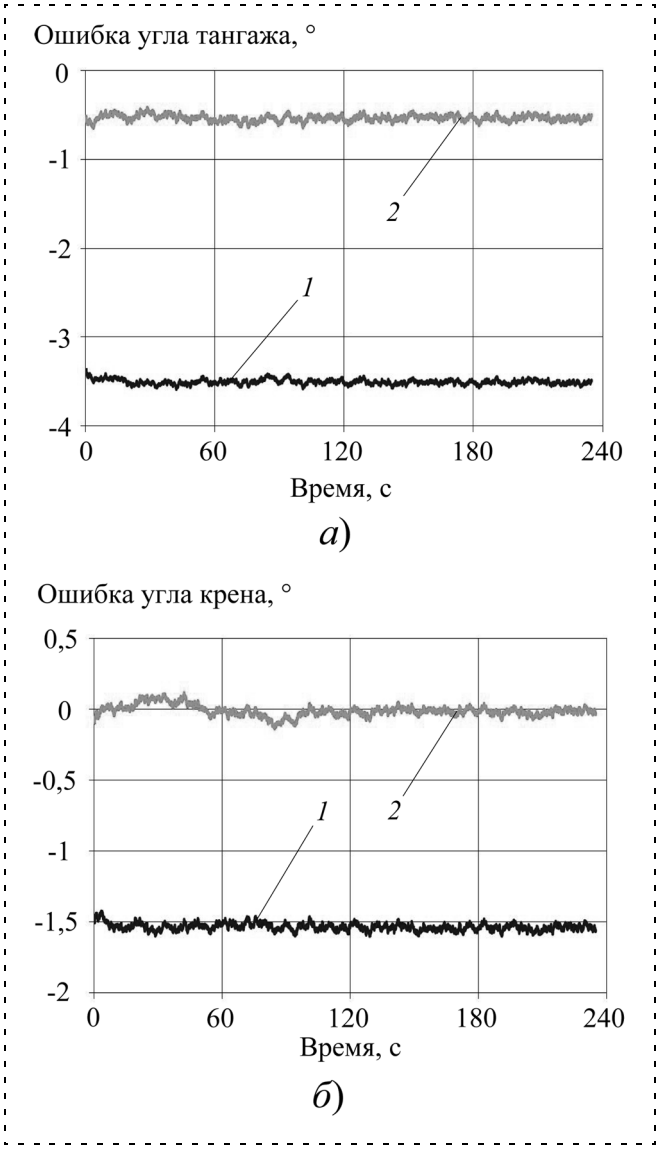


Рис. 4. Графики ошибок определения углов:
а — тангаж; *б* — крен; *1* — ошибка без ФК; *2* — ошибка с ФК

Рис. 5. Ошибки БСО с коррекцией от датчиков магнитного поля:
1 — ошибка угла крена; *2* — ошибка угла курса; *3* — ошибка угла тангажа

быть получены, например, при условии, что магнитометрические значения углов курса и тангажа вычисляются для значений углов γ, вырабатываемых блоком акселерометров.

Графики ошибок БСО с коррекцией от датчиков магнитного поля, полученные в результате моделирования работы системы в среде MatLab, с учетом типичных ошибок датчиков серии HMC1053 компании Honeywell и микромеханических ДУС ADXRS610 производства Analog Devices, приведены на рис. 5. Моделирование проводилось для угла наклона вектора напряженности магнитного поля Земли, соответствующего 50...60° северной широты с учетом динамики полета БПЛА.

По результатам моделирования ошибки в определении углов ориентации составили: 1,5° по курсу, и менее 1° по углам тангажа и крена.

Системы навигации

Системы навигации служат для определения координат местоположения летательного аппарата (географических широты и долготы, высоты полета), линейных скоростей полета и угловой ориентации. Системы угловой ориентации являются неотъемлемой частью систем навигации.

Для реализации алгоритмов БИНС необходимы кинематические элементы движения БПЛА: проекции абсолютной угловой скорости вращения географического трехгранника на его оси и проекции абсолютного линейного ускорения его вершины [5, 8].

Проекции кажущегося ускорения можно измерить с помощью акселерометров, жестко установленных на борту БПЛА, т. е. в связанной системе координат. В связи с этим необходимо пересчитывать показания акселерометров из связанной системы координат в нормальную. Это возможно при условии, что известна ориентация связанной системы координат относительно нормальной. Для описания взаимного положения связанной и нормальной систем координат могут быть использованы различные кинематические параметры: углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, параметры Родрига-Гамильтона, параметры Кейли-Клейна и др.

Параметров Родрига-Гамильтона всего четыре, в отличие от девяти направляющих косинусов, и, кроме того, они подчиняются всего одному уравнению связи [5, 8]. Параметры Родрига-Гамильтона значительно упрощают численное интегрирование кинематических уравнений, поэтому для описания алгоритмов БИНС используются именно эти параметры и их гиперкомплексная конструкция — кватернион.

Для реализации алгоритмов БИНС необходимо в каждый момент времени иметь информацию о положении связанной системы координат относительно нормальной. Эта информация может быть

получена из кватерниона Λ, являющегося аналогом матрицы направляющих косинусов. Зная Λ, можно пересчитать кажущееся ускорение БПЛА, измеренное в связанной с БПЛА системе координат, в нормальную систему координат и определить параметры ориентации ψ, ϑ, γ.

После пересчета параметров ориентации и навигации в нормальную систему координат навигационный алгоритм БПЛА реализуется на основе соотношений инерциальной навигации [5, 6, 8].

Для повышения точности автономной работы бесплатформенной системы ориентации и навигации необходимо осуществлять калибровку инерциальных чувствительных элементов, под которой понимается процесс уточнения различного рода систематических составляющих погрешностей.

Калибровка гироскопов

В сигналах микрогироскопов (МГ), помимо случайных погрешностей, присутствует систематическая составляющая, так называемое смещение нуля. Постоянное смещение нуля в выходном сигнале микрогироскопа приводит к накапливанию погрешностей при вычислении параметров ориентации. Если пренебречь марковской составляющей шума, то выходной сигнал микрогироскопа при отсутствии вращения можно представить как сумму систематической и белошумной составляющих. Тогда задачу калибровки можно сформулировать как оценку систематической составляющей по "зашумленным" измерениям. Достаточно точно калибровку осуществляют с помощью фильтра Калмана.

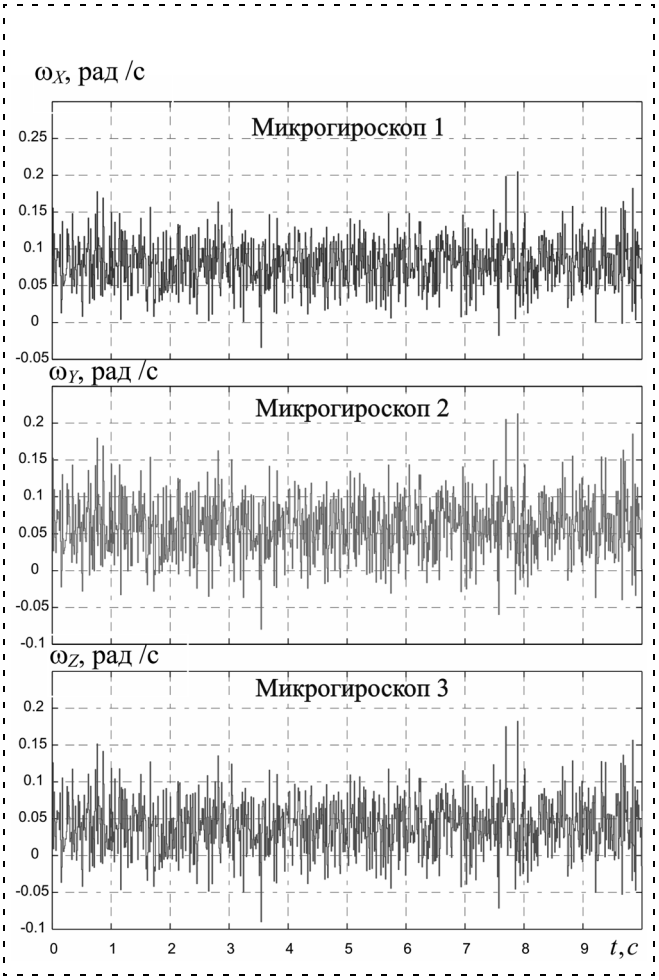


Рис. 6. Реализации дрейфов микрогироскопов

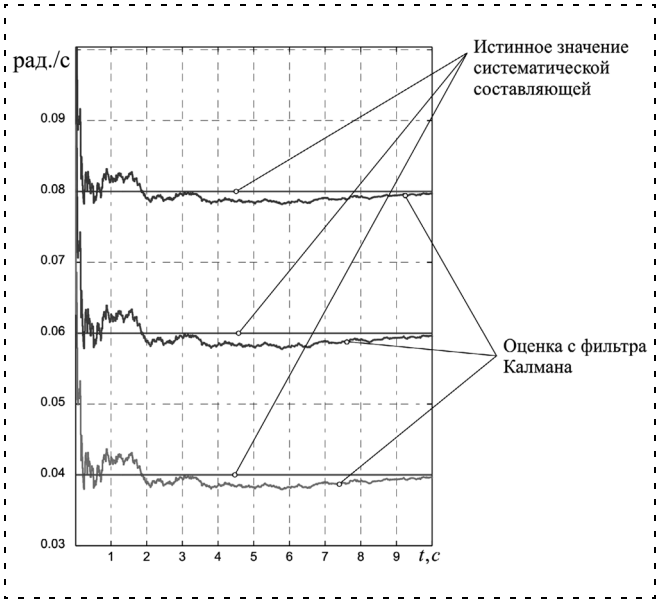


Рис. 7. Оценка систематической составляющей погрешностей микрогироскопов с помощью фильтра Калмана

На рис. 6 приведены реализации дрейфов микромеханических гироскопов типа ADXRS150.

На рис. 7 представлен процесс калибровки с помощью фильтра Калмана.

Из рис. 7 можно заключить, что фильтр Калмана выдает достаточно точную оценку систематической составляющей. Найденная оценка систематической погрешности будет исключаться из показаний микрогироскопов при работе БИНС.

Начальная выставка БИНС

Начальной выставкой (ориентированием) называется определение углового положения БПЛА по отношению к нормальной системе координат в период подготовки БИНС к запуску. Начальная выставка может быть автономной или с привлечением информации от других навигационных систем (магнитометров, систем спутниковой навигации, оптических систем и др.).

В начальный момент времени БПЛА занимает произвольное положение относительно нормальной системы координат, определяемое углами ψ_0, ϑ_0, γ_0.

Если гироскопы обладают чувствительностью, при которой они реагируют на вертикальную и горизонтальную составляющие вращения Земли, то

их показания могут быть использованы для определения угла ψ_0.

Гироскопы, оси чувствительности которых параллельны осям связанной системы координат, формируют сигналы в соответствии с проекциями угловой скорости вращения Земли на эти оси, из которых, с учетом значения ψ_0, могут быть найдены значения углов ϑ_0, γ_0.

Интеграция БИНС и СНС

При интеграции БИНС и СНС принята слабосвязанная схема комплексирования, которая является надежной и простой с точки зрения реализации. В этой схеме комплексирования информация о местоположении летательного аппарата, полученная в БИНС и СНС, сравнивается, и разностный сигнал подается в фильтр Калмана, который вырабатывает оценку ошибок БИНС (рис. 8).

Известна также сильносвязанная (рис. 9) схема комплексирования, характеризующаяся тем, что при построении фильтра Калмана разностное измерение формируется путем сопоставления вычисленных в БИНС ($D_j^{\text{БИНС}}$, $\dot{D}_j^{\text{БИНС}}$) и измеренных в СНС псевдодальностей и псевдоскоростей. В этом случае в векторе состояния Z содержатся ошибки, содержащиеся в вычислениях БИНС и в измерениях для каждого из спутников. Особенность данной схемы заключается в том, что она работоспособна, даже если в СНС проводится измерение только от одного спутника.

Сильносвязанная схема комплексирования хотя и позволяет осуществлять коррекцию БИНС даже по одному спутнику, но выход из строя одной из систем влечет за собой выход из строя и всей интегрированной системы в целом. Более того, реализация сильносвязанной схемы комплексирования, а тем более и глубоко интегрированной, возможно при значительном быстродействии бортового вычислительного устройства. В связи с этим интеграция БИНС с СНС осуществляется по слабосвязанной схеме комплексирования.

В фильтре Калмана закладывается модель погрешностей БИНС, учитывающая погрешности микромеханических гироскопов и акселерометров. Для определения шумовых характеристик гироскопов целесообразно использовать вариации Аллана (рис. 10).

Из анализа вариаций Аллана следует:

- прямолинейный участок с наклоном −0,5 при малых значениях среднего времени τ характеризует белый шум в выходном сигнале гироскопа. Для определения случайного блуждания угла (*ARW*) необходимо найти значение $\sigma(1)$;
- стабильность нуля гироскопа определяется в области кривой отклонения Аллана с нулевым наклоном. Числовое значение отклонения Аллана,

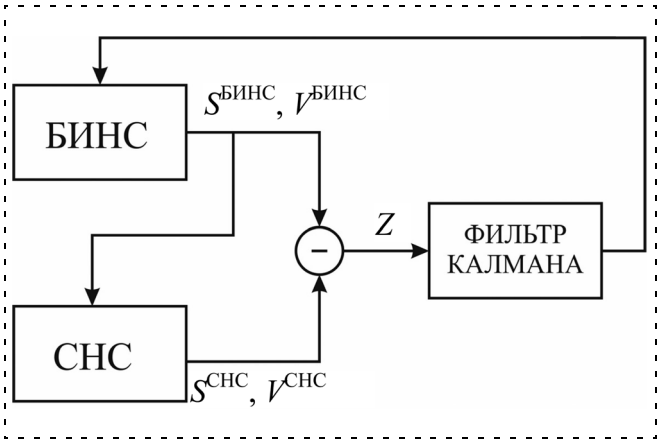


Рис. 8. Слабосвязанная схема комплексирования

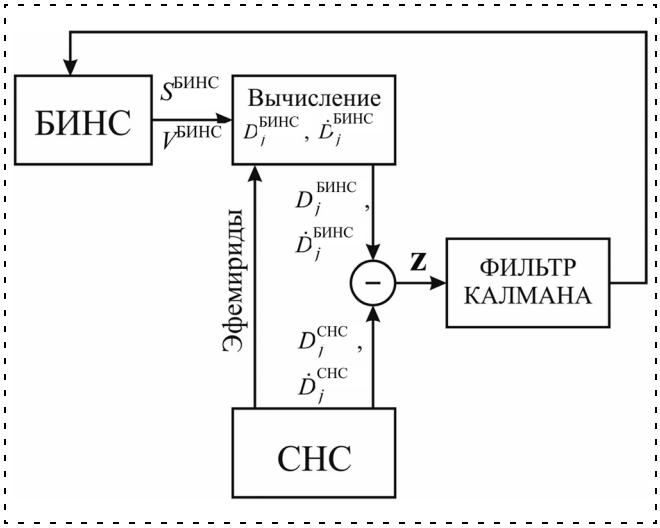


Рис. 9. Сильносвязанная схема комплексирования

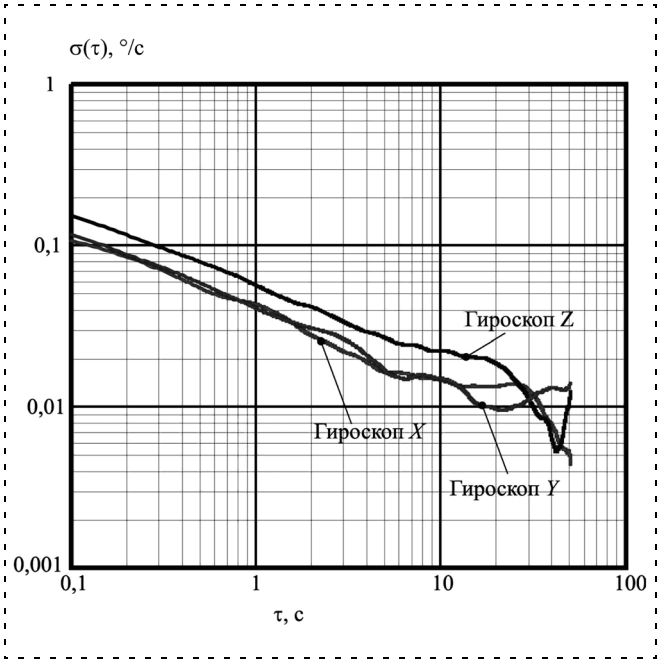


Рис. 10. Вариации Аллана для трех микромеханических гироскопов

соответствующее минимуму кривой, дает значение стабильности нуля гироскопа;

- участок кривой отклонения Аллана с положительным наклоном показывает, что в выходном сигнале гироскопа содержится случайная погрешность типа случайного блуждания угловой скорости.

Характеристики шума гироскопов сведены в таблицу.

Шумовые характерстики гироскопов

Гироскоп	ARW, °/с $\sqrt{\text{Гц}}$	Нестабильность нуля, °/с
Гироскоп X	0,040	0,022144
Гироскоп Y	0,055	0,015639
Гироскоп Z	0,042	0,013795

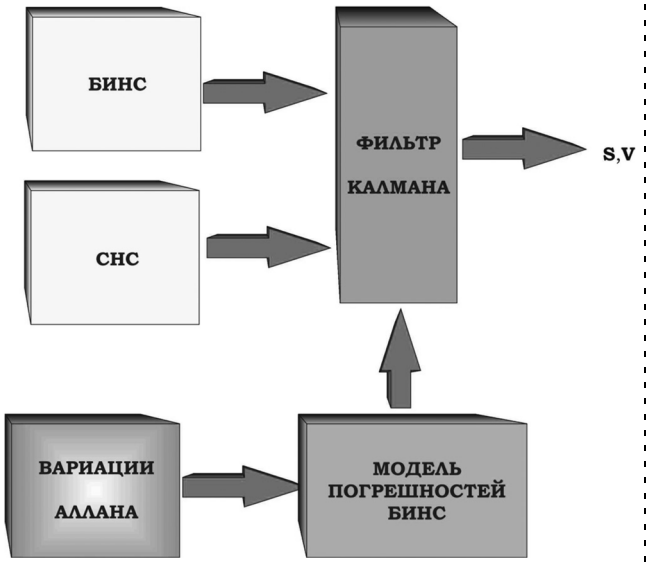


Рис. 11. Интеграция БИНС и СНС

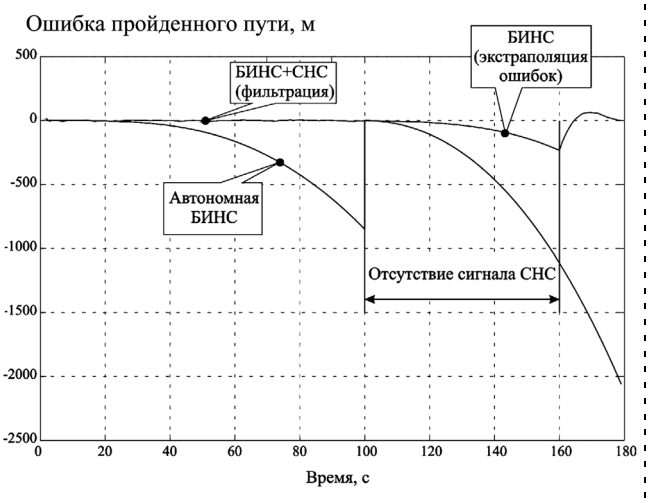


Рис. 12. Функционирование интегрированной инерциально-спутниковой системы

Полученные характеристики шумов гироскопов описывались с помощью соответствующих формирующих фильтров и вводились в фильтр Калмана, объединяющий БИНС и СНС (рис. 11).

В моменты отсутствия сигнала СНС необходимо переводить фильтр Калмана в режим экстраполяции ошибок БИНС. В этом случае точность определения навигационных параметров увеличивается в несколько раз по сравнению с автономным режимом работы БИНС (рис. 12).

Возможна модификация инерциально-спутниковой системы, в которой в отличие от традиционной схемы оценки ошибок линейной скорости подаются после первых интеграторов алгоритма БИНС. Это позволяет уменьшить ошибки интегрированной системы в моменты отсутствия сигнала СНС.

Эксперименты

На рис. 13 (см. четвертую сторону обложки) приведены фотоснимки, полученные с БПЛА "Беркучи" (рис. 14, см. четвертую сторону обложки) при съемке фруктовых садов в г. Мичуринске.

Заключение

В настоящее время существуют две основные проблемы проектирования БПЛА — создание эффективной аэродинамической компоновки и создание микросистемной авионики, способной решать все задачи пилотирования.

Аэродинамика БПЛА непосредственно влияет на летные характеристики, определяет его продольную и боковую устойчивость, управляемость автопилота для различных режимов полета БПЛА.

Существующая микросистемная элементная база, пока в основном зарубежного производства, позволяет создать аппаратную часть всех модулей бортовой и наземной аппаратур управления, а также аппаратуру связи.

Управление малоразмерными БПЛА — особо трудная задача. Например, при выполнении аэрофотосъемок БПЛА совершает полет по линиям с интервалом 50...70 метров. При этом отклонение от маршрута не должно превышать 10...15 метров при скорости ветра до 7 м/с. При полете в автоматическом режиме БПЛА должен летать на малых высотах с огибанием рельефа местности. При этом должна быть обеспечена точность поддержания высоты в пределах 5 метров.

Создание адаптивной системы автоматического управления БПЛА, ядром которой является бортовая аппаратура управления (авионика), возможно только при использовании в автопилоте в качестве системы для оценки состояния БПЛА интегрированной навигационной системы и настройки коэффициентов автопилота на конкретные режимы полета БПЛА. В частности, должны быть предусмот-

рены варианты выхода из критических режимов полета, например из критического крена, который может возникнуть вследствие порыва ветра при совершении маневра по развороту БПЛА.

Необходимо отметить некоторые из проблем, связанных с разработкой БПЛА, которая сопряжена с решением целого ряда принципиально новых задач, прежде всего связанных с удовлетворением жестким требованиям технических характеристик.

Основной проблемой при разработке БПЛА является снижение его массогабаритных характеристик и повышение функциональных возможностей. При этом необходимо иметь в виду возможность унификации планера для выполнения разнообразных задач: проведения разведывательных операций с помощью фото- и видеокамер не только в военных целях, но и гражданских — ледовой разведки, мониторинга технических объектов и т. д.

Поскольку основной проблемой развития БПЛА является поиск технического компромисса между снижением его массогабаритных характеристик и повышением функциональных возможностей при ограничениях на себестоимость разработки производства и эксплуатации, особую актуальность приобретает разработка САУ с авионикой, имеющей программное обеспечение, способное при отказах каких-либо систем выбирать альтернативные алгоритмы управления для продолжения полета. При этом необходимо также, чтобы САУ оказывала противодействие внешним факторам, в особенности погодным условиям.

Важнейшей задачей при разработке авионики является создание систем ориентации и навигации. Навигация с помощью СНС была бы почти идеальным решением, но существующие системы (GPS/ГЛОНАСС) достаточно энергозатратны, имеют относительно большую стоимость, а главное — подвержены различным помехам, вплоть до отключения каналов связи с навигационными спутниками. Инерциальная навигация для малоразмерных БПЛА может быть эффективной после достижения микрогироскопами и микроакселерометрами требуемых технических характеристик.

Список литературы

1. **Алалуев Р. В., Иванов Ю. В., Матвеев В. В., Орлов В. А., Распопов В. Я.** Измерительный модуль микросистемной бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 9. С. 61—64.
2. **Алешин Б. С., Афонин А. А., Веремеенко К. К., Кошелев Б. В., Плеханов В. Е., Тихонов В. А., Тювин А. В., Федосеев Е. П., Черноморский А. И.** Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. Б. С. Алешина, К. К. Веременко, А. И. Черноморского. М.: Физматлит, 2006. 424 с.
3. **Афанасьев П. П.** и др. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов (дистанционно-пилотируемые летательные аппараты) / Под ред. И. С. Горбунова и Ю. И. Янкевича. М.: Изд-во МАИ, 2006. 528 с.
4. **Бабич О. А.** Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
5. **Бранец В. Н., Шмыглевский И. П.** Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1992. 280 с.
6. **Веременко К. К., Желтов С. Ю., Ким Н. В., Козорез Д. А., Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г., Сыпало К. И., Черноморский А. И.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2009. 556 с.
7. **Дмитриев С. П., Степанов О. А., Кошаев Д. А.** Исследование способов комплексирования данных при построении инерциально-спутниковых систем. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Сб. статей и докл.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2001. С. 43—60.
8. **Матвеев В. В., Распопов В. Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Под ред. В. Я. Распопова. СПб.: ГНЦ ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 280 с.
9. **Парамонов П. П., Распопов В. Я., Сабо Ю. И., Товкач С. Е.** Микросистемная авионика для мини-БПЛА // Известия вузов. Приборостроение. 2006. № 6. С. 51—56.
10. **Парамонов П. П., Сабо Ю. И., Распопов В. Я., Товкач С. Е., Шведов А. П.** Вертикали для беспилотных летательных аппаратов различного назначения // Матер. XVII С. Петербур. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 2010. С. 130—132.
11. **Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П., Грязин Д. Г.** и др. Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний // Матер. XV Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 9—15.
12. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы. М.: Машиностроение. 2007. 399 с.
13. **Распопов В. Я., Товкач С. Е.** Авионика малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Мир авионики. 2009. № 3. С. 39—47.
14. **Степанов О. А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. I. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2009. 496 с.
15. **Товкач С. Е., Ладонкин А. В., Распопов В. Я.** Автопилот пирометрического типа // Мир авионики. 2009. № 5. С. 29—34.
16. **Ярлыков М. С.** Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь. 1985. 344 с.

УДК 004.3 + 629.7

М. М. Сильвестров,
д-р. техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,
IASO@inbox.ru,
Л. О. Котицын, нач. лаборатории,
burlenka@list.ru,
В. П. Ползик, нач. научно-исслед. отделения,
polzik@niiao.com,
"НИИ авиационного оборудоования", г. Жуковский,
Ю. И. Бегичев,
канд. техн. наук., доц., ст. преподаватель,
begichevy@mail.ru,
ВУНЦ ВВС "ВВА
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина"

Формирование и исследование эргатического интерфейса информационно-управляющего комплекса перспективного многоцелевого вертолета

Рассматривается концепция построения информационно-управляющего комплекса многоцелевого вертолета с модулями "эталонного траекторного маневрирования", "эталонного" функционирования общевертолетного оборудования, интеллектуальной поддержки экипажа, для которой сформированы мнемокадры эргатического интерфейса с новым авиагоризонтом.

Ключевые слова: *информационно-управляющий комплекс, эргатический интерфейс, речевой информатор, синтезатор речи, командно-лидерная информация, модуль интеллектуальной поддержки экипажа, информационно-управляющее поле, образ цели управления, мнемокадр*

Для создания и отработки эргатического интерфейса информационно-управляющего комплекса перспективного многоцелевого вертолета в данной статье используется эргономическая методология [1, 2, 4], основанная на принципах обеспечения рационального согласования совокупных свойств взаимодействия человека-оператора, техники и образа цели управления, которые могут реконфигурироваться в зависимости от изменения задач, условий и факторов, определяющих эффективность эргатического комплекса управления. Для формирования заданных сигналов, параметров и динамики изменения образа цели управления, командно-лидерной информации и для сигнализации предупреждения опасных состояний методологией предусматривается использование в эргатическом информационно-управляющем комплексе перспективного многоцелевого вертолета (ПМВ) модулей "эталонного траекторного маневрирования", "эталонного" функционирования общевертолетного оборудования" и модуля "интеллектуальной поддержки экипажа".

Формирование структуры информационно-управляющего комплекса

Информационно-управляющий комплекс предназначен для информационного и командно-лидерного обеспечения экипажа ПМВ на режимах взлета, маршрутного полета, высокоточного маневрирования, галсирования, посадки, висения и выполнения работ по перегрузке и разгрузке грузов в сложных метеоусловиях. Он обеспечивает:

- создание экипажу условий простоты определения пространственного положения управляемого объекта и легкости одновременного формирования управляющих воздействий органами управления по основным каналам;
- формирование у экипажа образа цели управления по наблюдаемому изображению лидера;
- выдачу летчику командно-лидерной информации о заданных параметрах движения по принципу "делай, как я";
- улучшение условий безопасности полета и точности траекторного маневрирования за счет сосредоточения информации о критических состояниях в лидерном изображении и наличия в нем командной информации об управляющих воздействиях по коррекции параметров процесса управления и о направлении парирования опасных отклонений.

Комплексное решение задачи построения эргатического информационно-управляющего комплекса базируется на построении эргатического комплекса в соответствии с принципами:

- иерархического построения архитектур комплекса;
- рационального взаимодействия экипажа, комплекса бортового оборудования и модулей формирования образа цели управления, "эталонного" маневрирования и интеллектуальной поддержки экипажа;
- аппаратной, функциональной и алгоритмической интеграции составляющих комплекса с учетом рационального использования ресурсов при решении текущей задачи и полетного задания в целом.

Эргатический информационно-управляющий комплекс содержит программные модули:

- эргатического интерфейса;
- предупреждения опасных состояний траекторного маневрирования;
- интеллектуальной поддержки экипажа;
- преобразования, комплексной обработки и прогнозирования информации;
- формирования командно-лидерной индикации;
- формирования навигационно-тактической обстановки;
- формирования управляющих сигналов;
- синтезатора речевых сообщений и команд;
- бортовой геоинформационной системы;
- ввода и вывода информации.

Кратко рассмотрим назначение этих модулей.

Модуль эргатического интрфейса предназначен для обеспечения:

- ✓ информационной связи информационно-управляющего комплекса с экипажем через многофункциональные индикаторы, средства сигнализации и речевой информатор;
- ✓ управляющих воздействий экипажа и управляющих сигналов на объект управления через командные органы управления вертолета, пульты управления бортовым оборудованием, курсорно-кнюппельное и сенсорное управление индикацией и отображением информации.

В процессе решения всего многообразия задач полета летчик судит о процессе пилотирования и ходе выполнения полетных задач по информационной модели эргатического интерфейса, дающей совокупность текущей информации о состоянии объекта управления, образе цели управления, положении органов управления и их воздействии на управляемый процесс, а также по воспринимаемой неинструментальной информации.

Информационная модель описывает общую информационную картину, построенную на основе использования пилотажно-навигационной, уведомительной и предупреждающей информации, поступающей от системы отображения информации, и неинструментальной информации, получаемой в процессе пилотирования, при систематическом обзоре внекабинного пространства, при ощущении усилий на органах управления, а также непосредственном восприятии акселерационных ощущений и акустических шумов. В процессе управления используется также информация о цели управления, формируемая информационно-управляющей системой, информация, получаемая летчиком при подготовке к полету и во время полета, поступающая по каналам связи в систему отображения информации или непосредственно летчику в виде заданных значений скорости, курса полета, указаний об изменении маршрута и профиля полета и т. д. Сравнивая информационную модель с желаемым образом полета, экипаж добивается их совпадения путем воздействия на командные органы управления, педали, пульты.

Таким образом, при управлении пространственным движением летательного аппарата оценка летчиком сигналов обратной связи, прием, хранение, переработка информации, принятие решения, формирование летчиком управляющих воздействий зависят от цели его деятельности, от представления будущего результата. Для обеспечения высокой эффективности деятельности при управлении полетом вертолета у летчика формируется образ полета, содержащий представления о:

- ➢ пространственном положении по шести координатам и времени;
- ➢ кинематике и динамической модели управляемого процесса;
- ➢ наиболее рациональном в данный момент управляющем воздействии;
- ➢ заданном угловом положении вертолета и скорости полета.

Кроме того, образ полета должен включать в себя образ конечной цели и прогнозируемого движения к ней.

Модуль предупреждения опасных состояний траекторного маневрирования предназначен для информационного обеспечения при решении задачи повышения уровня безопасности и эффективности полета, для индикации опасных состояний траекторного управления и сигнализации об опасном сближении с землей и объектами "угрозы" в полете. Модуль осуществляет формирование пилотажной и траекторной информации для применения на режимах траекторного маневрирования по текущей и прогнозируемой информации, а также сигналов для вывода из опасных состояний полета. Таким образом, на основе оценки прогнозируемых состояний траекторного маневрирования модуль предупреждает экипаж об угрозе попадания в опасные состояния и вырабатывает сигналы управления по предотвращению попадания в опасные состояния.

Модуль интеллектуальной поддержки экипажа обеспечивает:

- экспертную оценку прогнозируемых состояний общевертолетного оборудования и выработку подсказок для парирования его отказов;
- интеллектуальную поддержку летчика в особых случаях полета и при выводе объекта из опасных состояний полета в соответствии с эталонной моделью управления для этих условий, выдаваемой на пилотажный индикатор командно-лидерной информации, а также в соответствии с сообщениями речевого информатора и сигнализаторов о целесообразных действиях экипажа.

Модуль преобразования, комплексной обработки и прогнозирования информации обеспечивает определение пространственного местоположения вертолета, которое проводится путем преобразования и комплексной обработки информации от автономных инерциальных средств счисления координат, корреляционно-экстремальных систем навигации по геоинформационным полям Земли, аэрометрических систем, радиотехнических средств навигации и посадки, а также спутниковых навигационных систем. Прогнозирование обработанных данных позволяет судить об угловом и пространственном положении ПМВ в упрежденный момент времени, тем самым обеспечивая *предупреждение опасных состояний траекторного маневрирования*, а также выход из этих состояний.

Кроме того, здесь же осуществляется обработка информации от общевертолетного оборудования и

прогноз его состояния для обеспечения работы модуля интеллектуальной поддержки экипажа.

Модуль формирования командно-лидерной информации предназначен для информационного обеспечения решения пилотажно-навигационных задач, управления высокоточным маневрированием, предупреждения опасных состояний траекторного управления с использованием пилотажной командно-лидерной индикации.

Модуль формирования навигационно-тактической обстановки предназначен для информационного обеспечения построения мнемокадра отображения навигационно-тактической обстановки с псевдообъемным (2D+) изображением текущих и прогнозируемых опасных состояний траекторного маневрирования вблизи поверхности Земли над сложным рельефом местности.

Модуль формирования управляющих сигналов предназначен для командно-лидерного и векторно-директорного управления высокоточным маневрированием и выводом вертолета из опасных состояний траекторного маневрирования, а также выдачи в комплексную систему управления сформированного заданного вектора скорости и заданного крена для управления полетом вертолета на предельно малой высоте над сложным рельефом местности.

Модуль синтезатора речевых сообщений и команд предназначен для обеспечения звуковой сигнализации и речевых сообщений в кабине экипажа. Речевой информатор в кабине современного многоцелевого вертолета служит для автоматического оповещения членов экипажа о возникшей на борту ситуации в виде тональных звуковых сигналов и речевых сообщений. Звуковые сигналы и речевые сообщения при выполнении полета относятся к сигналам сильного привлекающего действия наряду с тактильными сигналами и светосигнальными устройствами, работающими в проблесковом режиме. Поэтому применение звуковой и речевой сигнализации требует тщательно разработанных алгоритмов и программного обеспечения. Одним из важнейших требований авиационных правил АП-25 является то, что сигнальная информация должна представляться в обработанном виде, освобождая экипаж от выполнения логических операций. Звуковая сигнализация и речевые сообщения в кабине экипажа применяются совместно с визуальными средствами.

Модуль синтезатора речи, разработанный в НИИ авиационного оборудования, эксплуатируется на самолетах Бе-200ЧС, Ил-114-100, Ил-96-300 и может использоваться на ПМВ.

Модуль бортовой геоинформационной системы предназначен для информационного обеспечения построения мнемокадров электронной аэронавигационной карты, системы корреляционно-экстремальной навигации, модуля формирования навигационно-тактической обстановки, хранения и оперативного перепланирования маршрутов полета, а также расширения и пополнения базы геоинформационных данных.

Модуль ввода и вывода информации предназначен для обеспечения ввода и вывода информации в эргатический информационно-управляющий комплекс посредством съемной флеш-карты, сенсорных экранов, цифро-буквенной клавиатуры и манипулятора типа "трек-бол".

Разработка информационных кадров многофункциональных индикаторов перспективного многоцелевого вертолета

Разработаны и исследованы информационные кадры рабочих мест экипажа, которые дают возможность одновременно видеть главные пилотажные параметры, внешнюю обстановку и опасные состояния траекторного маневрирования и позволяют экипажу формировать адекватные управляющие воздействия при полетах на режимах высокоточного маневрирования в маловысотном полете над сложным рельефом местности, захода на посадку и посадки на необорудованное место посадки в сложных условиях, обеспечить управление групповым взаимодействием ПМВ, обеспечить оперативный маневр вертолетов, а также позволяют контролировать исправность и правильность функционирования бортовых комплексов ПМВ (обнаруживать сбои в алгоритмическом и программном обеспечении) на протяжении всего этапа применения ПМВ.

Использование цифровой карты местности позволяет повысить качество управления группой ПМВ, а также избежать потерь при выполнении заданий над сложными участками местности.

На рис. 1 представлен первоначально сформированный информационный кадр (мнемокадр) ПМВ для режимов траекторного управления ПМВ, висения, захода на посадку и посадки.

На этом информационном кадре ПМВ представлен новый вид авиагоризонта, использующий принцип "вид управляемого вертолета с другого вертолета, находящегося сзади на одной и той же высоте и скорости" и связанного с земной системой координат, оси которой определяются вектором путевой скорости и местной вертикалью. Символы дистанционно-управляемого вертолета и "лидера" представляются в виде треугольников, каждый из которых символизирует "летающее крыло". Символ дистанционно-управляемого вертолета содержит также символ шасси в виде двух небольших равносторонних треугольников на основании символа "летающего крыла" (вблизи середины основания).

Символ управляемого вертолета меняет свою конфигурацию в зависимости от изменения угла тангажа и угла скольжения и поворачивается относительно центра экрана в зависимости от фактического угла крена.

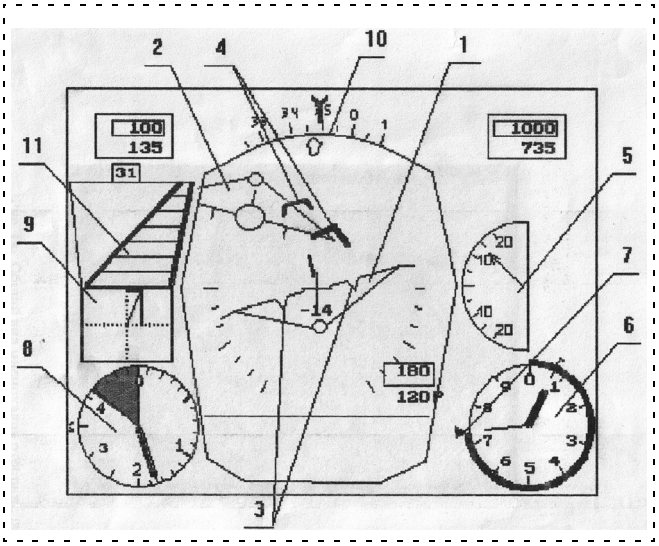


Рис. 1. Мнемокадр "Пилотаж" эргатической информационно-командной системы: символ летательного аппарата (*1*), символ образа цели управления — "лидера" (*2*), шасси символа ЛА (*3*), символы векторно-директорного принципа управления (*4*), шкала вариометра (*5*), шкала барометрической высоты (*6*), шкала радиовысоты (*7*), шкала скорости полета (*8*), индикатор висения (*9*), шкала курсовых углов (*10*), паравизуальный индикатор малых скоростей ("бегущая дорожка") (*11*)

Символ "лидера" несет информацию о заданных параметрах по принципу "делай, как я" и информацию о критических состояниях в виде изменения конфигурации, требующей снижения критических состояний и мигания соответствующих элементов лидерного изображения. Лидерный треугольник в режиме автоматизированного управления меняет форму в зависимости от заданных углов тангажа и скольжения, поворачивается в зависимости от отклонения заданного крена, перемещается по экрану в зависимости от отклонения по высоте и бокового отклонения от заданной траектории, а размеры треугольника меняются в зависимости от отклонения скорости полета от заданной. Если скорость полета меньше заданной, то "лидер" уходит вперед и его видимые размеры становятся меньше.

Информационная командно-лидерная индикация в режиме "свободного пилотажа" (ручного управления) имеет одно изображение управляемого объекта. При этом символ лидерного объекта находится под символом управляемого объекта до тех пор, пока "свободный пилотаж" осуществляется в пределах ограничений, установленных для данного ЛА. При выходе ЛА в процессе пилотирования за пределы ограничений символ лидерного объекта появляется на информационном поле, указывая, какими должны быть действия по вводу управляемого объекта в пределы ограничений, и привлекая внимание летчика миганием.

Информационная командно-лидерная индикация, предложенная сотрудниками УВЗ им. Н. И. Камова (в настоящее время — ОАО "Камов") И. А. Эрлихом, Н. П. Бездетновым и Э. А. Петросяном, доработана и исследована на диалоговом моделирующем комплексе.

Инженерно-психологические исследования по оценке информационной командно-лидерной индикации (ИКЛИ) вертолета проводили на диалоговом моделирующем комплексе с участием летчиков-испытателей: Н. П. Бездетного, Н. Н. Мельника, С. С. Сучужкина, В. И. Костина, А. И. Четверика, А. М. Климова и летчиков Ю. В. Куликова, В. Е. Тагина, В. А. Скрипко.

В основе исследований лежала разработанная и экспериментально апробированная методика инженерно-психологической оценки ИКЛИ и штатной приборной доски вертолета.

Данная методика позволяет оценивать взаимодействие летчика с информационно-командной системой при моделировании деятельности летчика, выполняющего типовые режимы полета на вертолете в ручном и директорном режимах управления. Отработаны следующие режимы полета: взлет, висение, разгон в горизонтальном полете, боевой разворот, пикирование, горизонтальный полет, торможение со снижением.

Усложнение условий полета создавалось пилотированием на фоне выполнения дополнительной работы с тестом "Резерв", выполнением сложных режимов полета, пилотированием в условиях отказов отдельных параметров индикации.

Экспериментальные данные по управлению вертолетом показали, что при сравнительной оценке предложенной ИКЛИ и штатной приборной доски явное преимущество остается за разработанной новой системой индикации. Повысились показатели качества пилотирования, резерв внимания увеличился в 2,6 раза. По отзывам летчиков, участвовавших в инженерно-психологических экспериментах, основными преимуществами ИКЛИ перед штатными приборами являются:

- сосредоточение всей пилотажной информации на одном экране с достаточно простым определением пространственного положения ЛА и его пилотированием по авиагоризонту, использующему принцип "вид лидерного вертолета с другого вертолета, находящегося сзади на одной и той же высоте и летящего с той же скоростью";
- предъявление летчику наглядной лидерной информации о заданных параметрах движения по символу лидерного объекта, аналогичному символу управляемого объекта, с использованием принципа "делай, как я", что облегчает формирование у летчика образа цели по наблюдаемому изображению лидера;
- сосредоточение информации о критическом состоянии в лидерном изображении и наличие в нем командной информации о направлении парирования опасных отклонений, что повышает безопасность полета.

Для обеспечения возможности и безопасности пилотирования в сложных метеоусловиях на экране авиагоризонта была синтезирована решетка в системе координат, привязанной к месту посадки, или к системе координат места проведения работ. Визуализация этой структуры была реализована следующим образом. В узлах решетки поместили светящиеся точки, размер и яркость которых соответствовали расстоянию от глаза оператора. При этом линейные перемещения внутри решетки сопровождались взаимным смещением светящихся узлов друг относительно друга, угловые же смещения представляли собой синхронное перемещение узлов по экрану либо их вращение относительно линии визирования. Достаточно четко дифференцировались и совместные линейные и угловые перемещения.

Экспериментальные исследования показали, что при использовании такого вида индикации у пилотов восстанавливалось ощущение окружающего пространства, образ полета оставался устойчивым, снижалось психологическое напряжение, повышались показатели качества деятельности при выполнении режимов висения и посадки в сложных метеоусловиях.

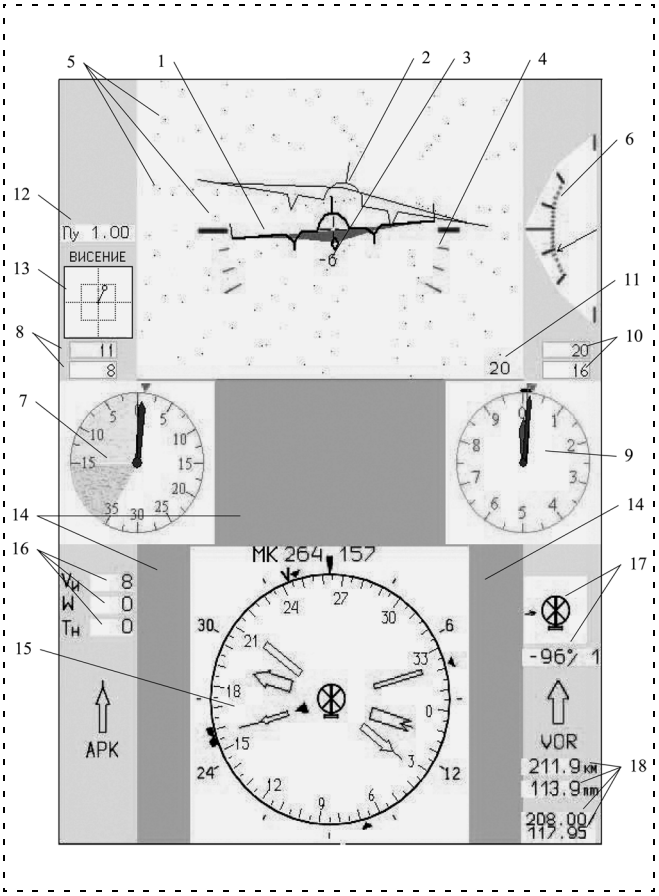


Рис. 2. Мнемокадр с командно-лидерной индикацией для режимов траекторного управления ПМВ, висения, захода на посадку и посадки: символ летательного аппарата (*1*), символ образа цели управления — "лидера" (*2*), счетчик тангажа (*3*), шкала крена (*4*), символы имитации кристаллической решетки (*5*), вариометр (*6*), индикатор скорости полета (*7*), счетчики заданной и текущей скорости (*8*), высотомер (*9*), счетчики заданной и барометрической высоты (*10*), счетчик радиовысоты (*11*), счетчик вертикальной перегрузки (*12*), индикатор висения (*13*), индикация расстояния до земли (*14*), пилотажно-навигационный прибор (*15*), счетчики скорости и наземной температуры (*16*), индикатор параметров ветра (*17*), счетчики параметров VOR (*18*)

Дальнейшая доработка пилотажного кадра электронной индикации привела к созданию мнемокадра ИКЛИ, представленного на рис. 2. Особенностью данного кадра является то, что навигационная составляющая усилена и вынесена в нижнюю часть кадра, оставаясь при этом в едином поле экрана. Благодаря этому более четко расставлены акценты на пилотажный и навигационный аспекты деятельности при минимальных потерях на переключение внимания пилота. Паравизуальный индикатор "бегущая дорожка" заменен на встроенную в авиагоризонт "кристаллическую решетку" и индикатор висения, индицируемые на режимах малых скоростей, висения и посадки. Наглядная индикация расстояния до земли на маловысотных режимах полета растянута практически на весь кадр и разбита на три поддиапазона.

На высотах от 200 до 50 м земля индицируется коричневыми столбами по бокам навигационно-пилотажного индикатора, при значениях радиовысоты от 50 до 20 метров — продолжением индикации в виде коричневого столба между круговыми шкалами высоты и скорости, а при значениях радиовысоты менее 20 метров — наползанием индикации земли на авиагоризонт под колеса силуэта вертолета с миганием линии уровня земли.

Данный кадр успешно прошел эргономические испытания и рекомендован к применению в современных и перспективных комплексах вертолетного оборудования.

В эргатическом интерфейсе используется также индикатор (рис. 3, см. вторую сторону обложки) общевертолетного оборудования, предназначенный для выдачи операторам текстовых предупреждающих и уведомляющих сообщений и информации о состоянии общевертолетного оборудования (силовой установки, положения шасси, гидро- и пневмосистем, топливной системы, систем электропитания).

Разработанные мнемокадры отображения состояния общевертолетного оборудования для перспективных вертолетов представлены на рис. 4 и 5 (см. вторую сторону обложки).

Эти мнемокадры предназначены для:

- контроля состояния вспомогательной силовой установки;
- отображения параметров двигателей и несущих винтов;
- контроля параметров редукторов;
- отображения параметров топливной системы;
- отображения состояния гидро- и пневмосистемы.

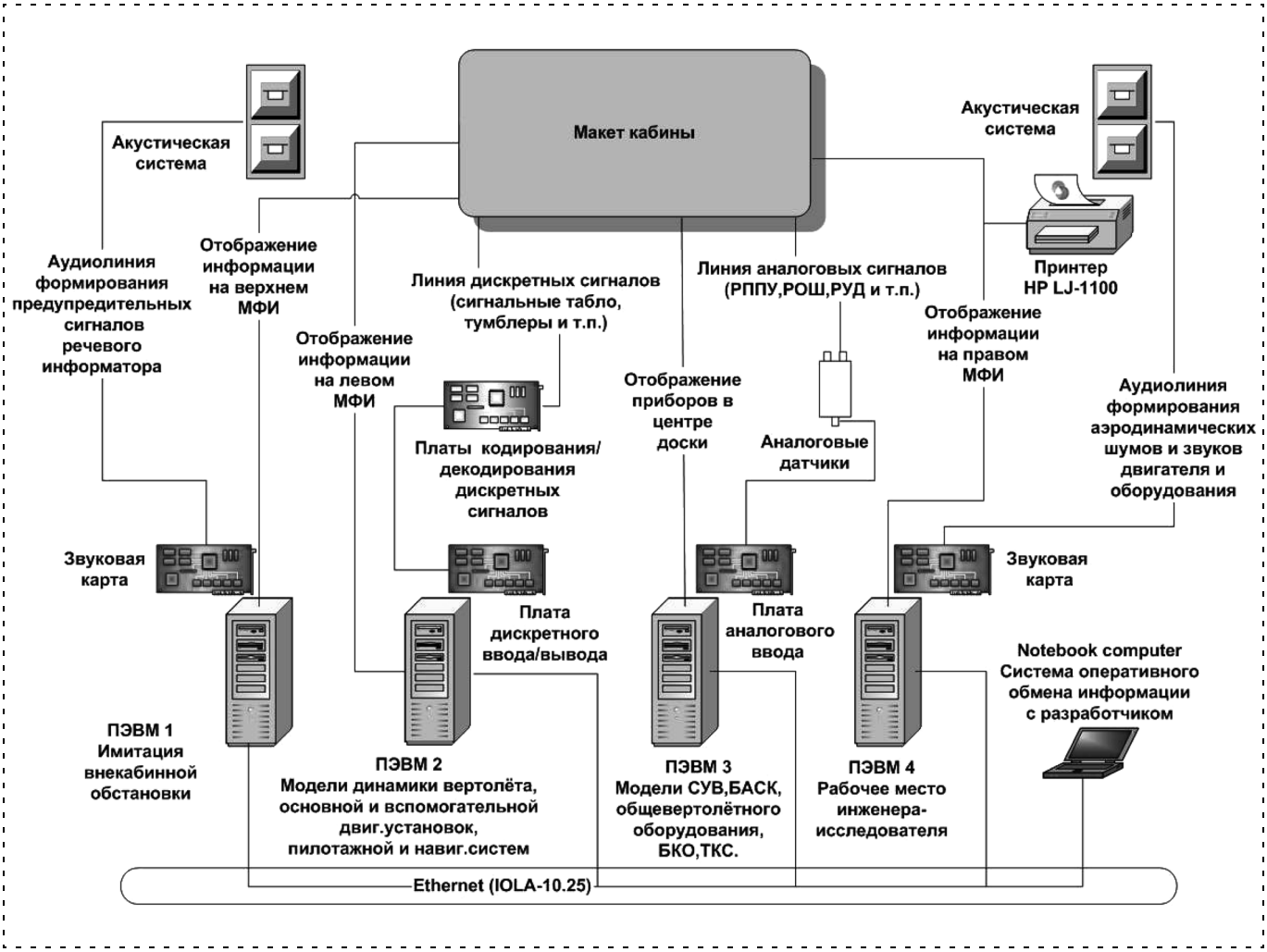


Рис. 6. Диалоговый моделирующий комплекс для отработки эргатического интерфейса бортового оборудования перспективного многоцелевого вертолета

Инженерно-психологические исследования и отработку эргатического интерфейса информационно-управляющего комплекса перспективного многоцелевого вертолета проводили на диалоговом моделирующем комплексе, представленном на рис. 6, с макетом кабины перспективного многоцелевого вертолета, представленным на рис. 7 (см. вторую сторону обложки).

В целом исследования показали, что вертолетовождение с использованием эргатического информационно-управляющего комплекса перспективного многоцелевого вертолета и разработанных мнемокадров обеспечивается на режимах взлета, маршрутного полета, траекторного маневрирования, висения и посадки в сложных метеоусловиях.

Список литературы

1. **Сильвестров М. М., Бегичев Ю. И., Варочко А. Г., Наумов А. И.** и др. Эргатические интегрированные комплексы летательных аппаратов / Под ред. М. М. Сильвестрова. М.: Филиал воениздата, 2007. 510 с.

2. **Сильвестров М. М., Чернышов В. А.** Современная методология и концептуальные основы построения эргатического интегрированного комплекса управления многоцелевого маневренного самолета // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 7.

УДК 37.01.004: (06)

А. В. Пономаренко, д-р техн. наук, нач. отделения,
ОАО " РСК "МиГ", Москва,
IASO@inbox.ru,
В. С. Кулабухов, канд. техн. наук, гл. конструктор,
ОАО МНПК "Авионика", Москва,
nit@mnpk.ru,
В. М. Халтобин, канд. техн. наук, доц.,
А. А. Ключников, преподаватель,
ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
Москва,
aklyuchnikov@bk.ru,
Д. Н. Левин, зам. начальника отдела,
ОАО "ОКБ Сухого", Москва

Исследования и испытания автоматизированных систем обучения для подготовки инженерно-технического и летного состава самолетов и вертолетов

Рассматриваются проблемы электронного обучения, статистическая обработка результатов педагогических экспериментов, проводимых в целях сравнения и апробации новых информационных учебных технологий в виде автоматизированных систем обучения. В качестве примера автоматизированной системы обучения рассматривается интерактивная автоматизированная система обучения ИАСО-29, разработанная конструкторским бюро А. И. Микояна в сотрудничестве с ВВИЛ им. проф. Н. Е. Жуковского.

Ключевые слова: *педагогические исследования, педагогическое воздействие, статистические критерии, электронное дистанционное обучение, автоматизированные системы обучения, автоматизированный учебный курс, измерительные шкалы*

В настоящее время в России и за рубежом уделяется большое внимание педагогическим исследованиям в связи с широким внедрением компьютерных методов и технологий обучения. Ежегодно проводятся многочисленные конференции и выставки с обсуждением концептуальных основ новых подходов к обучению и эффективности применения информационных технологий в образовании.

Компьютерные технологии, учебно-компьютерные классы, автоматизированные учебные курсы (АУК) и автоматизированные системы обучения (АСО) все большее применение находят при подготовке операторов и персонала, обслуживающего сложные технические комплексы, например самолеты и вертолеты, космические объекты, электростанции, наземные транспортные средства и другие комплексы. Для вузовского и школьного образования по многим учебным дисциплинам разработаны автоматизированные системы и курсы обучения. Для примера в табл. 1 приведены наименования некоторых современных систем и комплексов обучения летного и инженерно-технического состава ВВС [6].

Таблица 1

Системы и комплексы обучения летного и инженерно-технического состава ВВС

Наименование средства обучения	Тип летательного аппарата
Комплексы технических средств обучения для самолетов	МиГ
Интерактивная автоматизированная система обучения ИАСО-29	МиГ-29
Пилотажный стенд отработки бортового оборудования самолета	МиГ-29К
Учебно-компьютерные классы подготовки летного состава	Су-27СМ, -30МК2
Автоматизированная обучающая система самолета	Су-25
Рабочее место отработки процедур боевого применения самолета	Су-30МК2
АСО летного и инженерно-технического состава учебно-боевого самолета	Як-130
Комплекс учебных средств вертолета	Ми-8МТ
Учебный компьютерный класс учебно-тренировочного вертолета	Ансат-У

Актуальность педагогических исследований, их методы и принципы

В России были проведены педагогические исследования и эксперименты в области электронного дистанционного обучения с участием ведущих государственных и частных вузов [2], в ходе которых решались следующие важные задачи:

- апробация и развитие разнообразных информационных учебных технологий при использовании средств вычислительной техники и телекоммуникаций;
- разработка и проверка новых учебных материалов и методики их применения при дистанционном учебном процессе с использованием сети Интернет;
- исследование эффективности обучения в зависимости от доступности электронного дистанционного образования, качества предметно-ориентированного контента и применения прогрессивных образовательных технологий, опирающихся на мировые достижения в области информационных систем, телекоммуникаций и электронной дидактики.

Из перечисленного очевидны объем и сложность экспериментальных и теоретических исследований, которые необходимо выполнять при разработке и внедрении систем электронного обучения. Рассмотрим интерактивную автоматизированную систему обучения ИАСО-29 [1]. Эта система разработана в "РСК "МиГ" и состоит из систем группового и индивидуального обучения (СГО, СИО); процедурного тренажера (ПТ) и справочно-информационной системы (СИС). ИАСО-29 обеспечивает профессиональную подготовку летного и инженерно-тех-

нического (ИТ) состава к использованию и обслуживанию самолетов МиГ-29. Эта сложная система содержит более 50 автоматизированных учебных курсов (например: Авиадвигатель, Радиолокатор, Аэродинамика, Кабина самолета и т. д.) с тысячами страниц текста, фотографий, анимированных схем и рисунков, сотнями видео- и аудиосюжетов. ИАСО-29 разворачивается в компьютерном классе, где обучаемые под руководством преподавателя или самостоятельно с использованием комплекса автоматизированных учебных курсов получают необходимые дидактические материалы для изучения и освоения авиационной техники. Процедурный тренажер представляет собою действующий макет кабины ЛА и предназначен для изучения и освоения использования и проверок различных систем самолета и его оборудования при имитации их функционирования. СИС состоит из электронной технической документации (ЭТД), электронных каталогов анимированных технологических карт (АТК) обслуживания самолета, поиска и устранения неисправностей. Использование АУК, ПТ и СИС позволяет повысить качество обучения и эксплуатации самолетов. Создание и функционирование ИАСО-29 обеспечивается комплексом авторских программ (оболочкой) "КОСМОС", разработанных в ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского совместно с "РСК "МиГ", где развернут в настоящее время технологический комплекс для разработки и исследований автоматизированных систем обучения ИТ и летного состава самолетов МиГ. ИАСО-29 с ПТ успешно демонстрировали на авиакосмических салонах в Ле Бурже (Франция) и МАКС (Россия). На рис. 1 представлена схема типового АУК.

Целью исследований и испытаний ИАСО-29 являлись: определение технических и эксплуатационных характеристик ИАСО-29, оценка их соответствия требованиям технического задания (ТЗ), выдача рекомендаций о поставке ИАСО-29 на серийное производство и на внедрение этой системы в учебный процесс авиационных предприятий АП и вузов. В процессе испытаний были оценены: работоспособность системы, достоверность учебного материала. К испытаниям были привлечены преподаватели ВВИА им. Н. Е. Жуковского, специалисты НИО и НИУ ВВС МО России, РСК "МиГ". Испытания проводили в соответствии с требованиями руководств по испытаниям авиационной техники. На основе результатов испытаний были сформулированы замечания и предложения по корректировке ИАСО-29, разработаны предложения по совершенствованию и дальнейшему развитию оболочки "КОСМОС". Планируемое развитие оболочки "КОСМОС" основано на концепции "Библиотека учебных фрагментов" и на задаче подготовки единой системы дистанционного авиационного обучения. Концепция "Библиотека учебных фрагментов" предусматривает создание глобальной базы учебных материалов по различным самолетам и отдельным системам и компоновку из них необходимых АУК. Фрагменты учебных материалов объединяют в древовидные структуры, которые образуют различные учебные курсы.

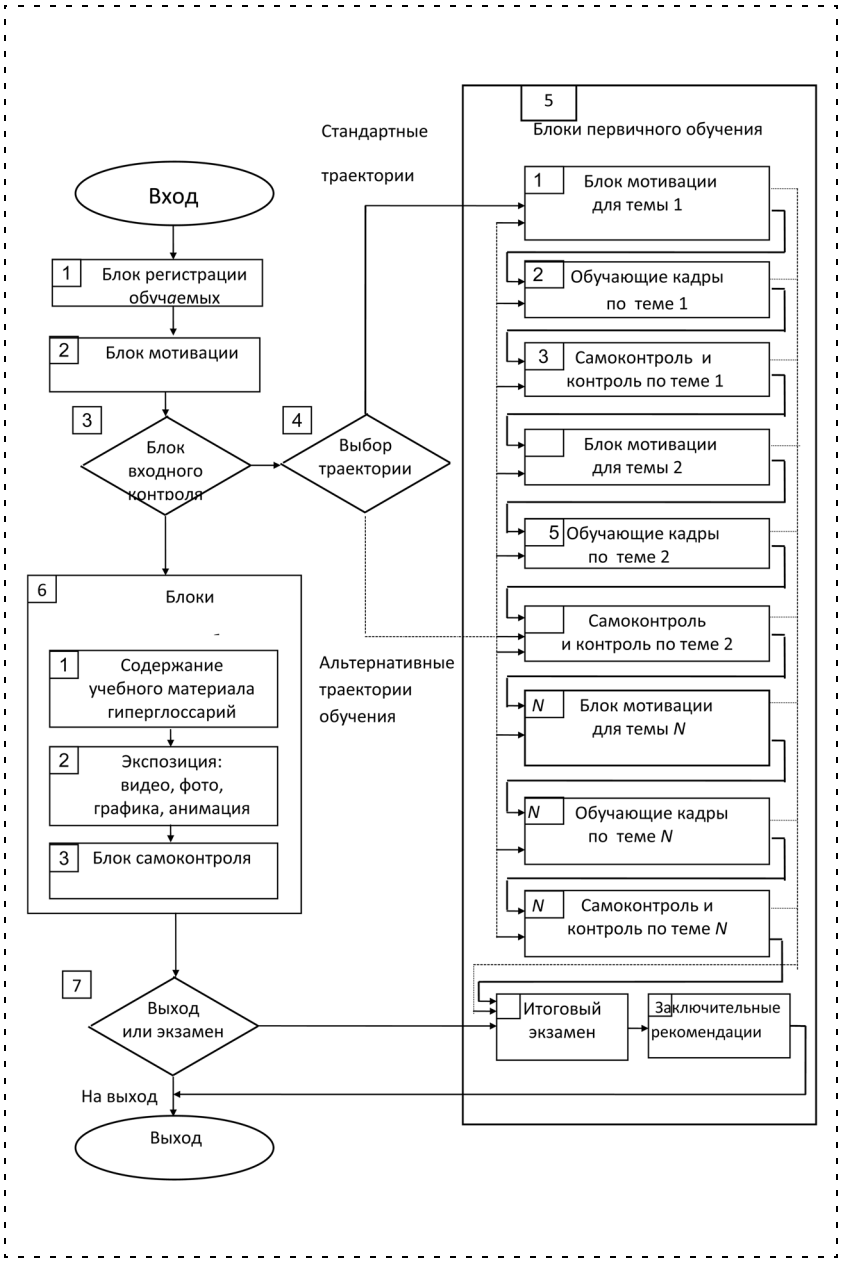


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированного учебного курса

Сравнение эффективности АСО на основе метода анализа иерархий

При сравнении и оценке многоуровневых иерархических систем, какими являются современные ИАСО, удобно использовать метод анализа иерархий (МАИ) (метод Саати) [7]. В работе [1] изложена методика сравнения нескольких АСО или АУК при использовании этого метода. Мощным достоинством метода анализа иерархий является использование: заключений экспертов, параметров сравниваемых систем и результатов их попарных сравнений, современного математического аппарата матричного анализа. На рис. 2 приведен алгоритм решения задачи в случае сравнения эффективности АСО.

При решении задачи используются известные и очевидные показатели качества АСО: число АУК, число анимаций, число обучающих кадров, число видеосюжетов и др. Вектор оценок $У$ АСО формируется в виде

$$У = MX,$$

где M — матрица, столбцы которой представляют собой собственные векторы матриц попарного сравнения АСО по введенным параметрам для их максимальных собственных чисел; X — вектор весов выбранных параметров.

Для нахождения вектора весов параметров АУК используется матрица весов данных параметров, которая формируется в результате статистической обработки заключений экспертов о весах конкретных параметров АУК и на основе попарного сравнения весов этих параметров. Далее вычисляются собственные значения матрицы P и собственный вектор матрицы P, соответствующий ее максимальному собственному значению. После нормировки полученного вектора получаем X — вектор весов (приоритетов) параметров. На основе вычисленного вектора приоритетов видно, какие веса (приоритеты) имеет каждый параметр АСО. Формирование матрицы M проводится на основе таблиц результатов попарного сравнения АСО по выбранным параметрам. Таким образом, предлагаемая методика позволяет количественно сравнить различные АСО на основе их объективных параметров и на основе опыта экспертов. Можно рекомендовать использовать этот метод при проектировании АСО, АУК, при сравнительной оценке различных вариантов АУК, для предварительной оценки выполненных АУК. Окончательной оценкой разработанных АСО или АУК должна быть экспериментальная оценка знаний обучаемых.

Рис. 2. Алгоритм решения задачи МАИ при оценке эффективности АСО

Методы исследований и критерии оценок полученных результатов

Важное значение при проведении, планировании и оценке результатов педагогических исследований АСО имеет выбор соответствующих методов исследований и критериев оценок полученных результатов. Методы педагогических исследований подробно рассмотрены в работах [4, 5]. Целью педагогического эксперимента является подтверждение или опровержение того, что предлагаемые педагогические воздействия (например, новые формы, методы, средства обучения и т. д.) более эффективны или, наоборот, менее эффективны, чем традиционные. В итоге появляется возможность определить, какая АСО более эффективна. При проведении педагогического эксперимента из учебного отделения или потока выделяются экспериментальная и контрольная группы обучаемых. На рис. 3 в общем виде представлена схема эксперимента. Алгоритм действий исследователя заключается в следующем.

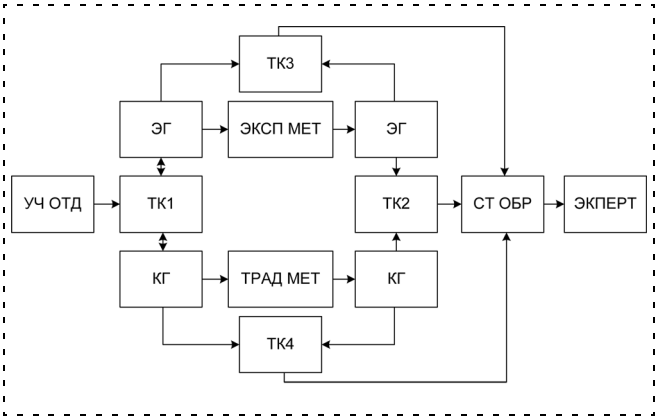


Рис. 3. Схема педагогического эксперимента:
ТК1...4 — тест-контроль, КГ — контрольная группа; ЭГ — экспериментальная группа; ЭКСП МЕТ —экспериментальная методика обучения; ТРАД МЕТ — традиционная методика обучения; СТ ОБР — статистическая обработка результатов тестирования

1. Формируются экспериментальная и контрольная группы с равными начальными состояниями, определяемыми в результате ТК1.

2. Реализуются обучаемые воздействия на экспериментальную и контрольную группы.

3. На основании сравнения результатов ТК2 устанавливается различие конечных состояний экспериментальной и контрольной групп.

Результаты педагогического эксперимента. Измерительные шкалы

После выполнения педагогического эксперимента начинается обработка данных и изучение влияния новых технологий обучения на характеристики обучаемых. Так как объектом педагогического эксперимента являются люди и число случайных факторов, влияющих на результаты обучения, велико, то судят о различии характеристик экспериментальной и контрольной групп на основе данных, полученных в результате статистической обработки результатов эксперимента. Выбор методов обработки результатов зависит от того, в какой измерительной шкале проводились измерения [5].

Измерительная шкала — это числовая система, в которой отношения между различными свойствами изучаемых явлений, процессов переведены в свойства множества чисел. Различают несколько типов шкал. Рассмотрим в качестве примера шкалу отношений и порядковую шкалу, часто используемые при педагогических исследованиях. Шкала отношений в педагогических исследованиях имеет место, когда определяется, например, время выполнения того или иного задания, число ошибок или число правильно решенных задач и т. п. Рассмотрим пример. Пусть имеются экспериментальная группа (ЭГ), состоящая из 15 обучаемых ($n = 15$), и контрольная группа (КГ), состоящая из 14 обучаемых ($m = 14$). В общем случае n и m не равны. Измерение заключается в определении уровня знаний каждого обучаемого до и после эксперимента путем проведения теста, включающего, например, 20 задач. Примем, что характеристикой обучаемого (признаком) является число правильно решенных им задач ($K_{\text{пр}}$). Результаты измерений уровня знаний в контрольной и экспериментальной группах до и после эксперимента приведены в табл. 2.

Результаты эксперимента могут быть представлены и при использовании порядковой шкалы. В этом случае результаты будут иметь следующий вид. Пусть для рассматриваемого примера (табл. 2) преподаватель выделил четыре уровня знаний ($L = 4$ — четырехбалльная шкала): неудовлетворительный, удовлетворительный, хороший и отличный уровни знаний. В табл. 3 представлены: признак уровня знаний при использовании порядковой шкалы и результаты измерений уровня знаний в КГ и ЭГ до и после эксперимента.

При обработке результатов измерений используются различные статистические показатели: максимальный и минимальный элементы выборки, средние значения; показатели разброса данных относительно среднего значения (выборочная дисперсия); гистограмма и др. Информативным показателем описательной статистики является гистограмма, которая используется для наглядного представления и первичного (визуального) анализа результатов измерений характеристик ЭГ и КГ (рис. 4).

Таблица 2

Результаты измерений уровня знаний обучаемых (число правильно решенных задач) в контрольной и экспериментальной группах до и после эксперимента (шкала отношений)

Характеристика	№ обучаемого п/п														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
КГ до эксп-та	15	13	11	18	10	8	16	5	11	12	15	16	16	14	
КГ после эксп-та	16	13	14	17	11	9	15	8	8	13	17	19	15	15	
ЭГ до эксп-та	12	11	15	17	13	7	12	10	16	12	15	14	19	13	18
ЭГ после эксп-та	15	18	12	20	16	10	13	11	14	17	19	16	19	15	19

Таблица 3

Результаты измерений уровня знаний в контрольной и экспериментальной группах до и после эксперимента (порядковая шкала)

Уровень знаний	Признак уровня знаний	КГ до эксп-та (чел.)	КГ после эксп-та (чел.)	ЭГ до эксп-та (чел.)	ЭГ после эксп-та (чел.)
Неудовлетворительный	$K_{\text{пр}} \leqslant 5$	1	0	0	0
Удовлетворительный	$5 < K_{\text{пр}} \leqslant 10$	2	3	2	1
Хороший	$10 < K_{\text{пр}} \leqslant 15$	7	7	9	6
Отличный	$15 < K_{\text{пр}} \leqslant 20$	4	4	4	8
Число обучаемых	—	14	14	15	15

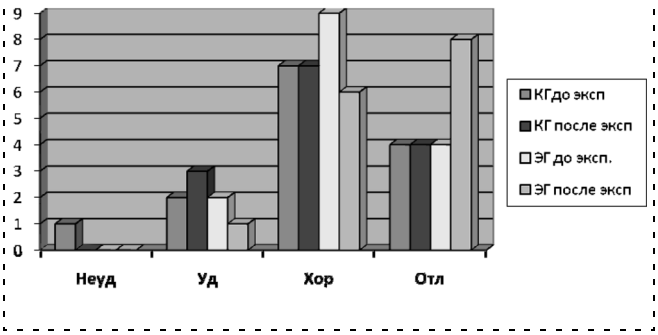


Рис. 4. Пример гистограммы для экспериментальной и контрольной групп:
по оси ординат — число обучаемых, по оси абсцисс — уровень знаний

Определение степени достоверности совпадений и различий характеристик экспериментальной и контрольной групп

Рассмотрим центральную задачу анализа данных — определение степени достоверности совпадений и различий характеристик ЭГ и КГ. Выдвинем две статистические гипотезы: гипотезу об отсутствии различий (нулевая гипотеза) и гипотезу о значимости различий (альтернативная гипотеза). Для принятия решения о том, какую из гипотез (нулевую или альтернативную) следует принять, используют статистические критерии [5]. На основе результатов наблюдений при использовании выражения для критерия вычисляется число, называемое *эмпирическим* (*наблюдаемым*) *значением* критерия. Это число сравнивается с известным (заданным таблично) числом, называемым *критическим значением* критерия. Критические значения приводятся, как правило, для нескольких *уровней значимости*. Уровнем значимости (α) называется вероятность ошибки, заключающейся в отклонении истинной нулевой гипотезы, т. е. вероятность того, что различия сочтены существенными. Если полученное эмпирическое значение критерия оказывается меньше критического, то принимается нулевая гипотеза — считается, что на заданном уровне значимости характеристики ЭК и КГ совпадают. В противном случае, если эмпирическое значение критерия оказывается больше или равным критическому, то нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная гипотеза.

Для данных, измеренных в шкале отношений, для проверки гипотезы о совпадении характеристик двух групп целесообразно использование либо *критерия Крамера-Уэлча*, либо *критерия Вилкоксона-Манна-Уитни*. Для данных, измеренных в порядковой шкале, целесообразно использование критерия согласия χ^2 (хи-квадрат) Пирсона [5]. Рассмотрим, например, использование критерия χ^2. Введем порядковую шкалу с баллами от 1 до L. Тогда можно ввести векторы баллов $n = (n_1, n_2, ..., n_L)$ — для ЭГ и $m = (m_1, m_2, ..., m_L)$ — для КГ, где n_k, m_k — число членов ЭГ и КГ соответственно, получивших балл k, $k = 1, 2, ..., L$.

Эмпирическое значение $\chi^2_{\text{эмп}}$ вычисляется по формуле:

$$\chi^2_{\text{эмп}} = NM \sum_{i=1}^{L} \frac{\left(\frac{n_i}{N} - \frac{m_i}{M}\right)^2}{n_i + m_i},$$

где N и M — число обучаемых в ЭГ и КГ соответственно. Критические значения критерия χ^2 приведены в таблицах критических значений статистических критериев для различных уровней значимости во многих учебниках по статистическим методам.

Следует отметить, что критерий χ^2 применим при условии, что для любого значения балла в любой из сравниваемых выборок должно быть не менее пяти ее членов, которые получили данный балл. Знание статистических методов позволяет планировать педагогический эксперимент на стадии его подготовки. Например, формулы, определяющие эмпирические значения критериев, совместно с фиксированными критическими их значениями позволяют заранее (до проведения эксперимента) оценивать необходимый объем выборки и другие важные параметры. Использование в педагогических исследованиях статистических методов заключается в том, что они позволяют разрабатывать научно-обоснованные методики планирования и количественной обработки результатов экспериментов. При рассмотрении технологии обучения в целом статистические критерии используются для получения оценок эффективности компьютерных АСО. При необходимости проводится коррекция АСО, изменение содержания учебного материала и процедур его предъявления обучаемым.

В статье рассмотрены актуальность экспериментальных и теоретических педагогических исследований, выполняемых при разработке и внедрении систем электронного обучения. В качестве примера АСО рассмотрена интерактивная автоматизированная система обучения ИАСО-29 [1] (разработчик — ОКБ "МиГ" им. А. И. Микояна) для летного и инженерно-технического состава самолетов серии МиГ-29. Изложены вопросы оценки эффективности новых технологий обучения при использовании измерительных шкал и статистических критериев.

Список литературы

1. **Пономаренко А. В., Василец В. М., Михайлов В. В.** и др. Интеллектуальные интерактивные учебно-тренировочные комплексы. М.: Воениздат, 2006. 255 с.

2. **Российский** портал открытого образования: обучение, опыт, организация / Под ред. В. И. Солдаткина. М.: МГИУ, 2003. 508 с.

3. **Кулабухов В. С., Михальченко С. В., Халтобин В. М.** Комплекс авторских программ "КОСМОС" для сетевых мультимедийных обучающих систем // Матер. научно-метод. конф. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2007.

4. **Анисимов В. В., Грохольская О. Г., Никандров Н. Д.** Общие основы педагогики. М.: Просвещение, 2007.

5. **Михеев В. И.** Моделирование и методы теории измерений в педагогике. М.: КомКнига, 2006.

6. **Энциклопедия** "Оружие и технологии России. 21 век". Т. 18. Тренажеры и технические средства обучения. 2009.

7. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993.

CONTENTS

Selvesyuk N. I. Synthesis of Regulators for Object Set Based on Direct and Inverse Optimization Problems 2

In article the approach for synthesis of linear-quadratic regulators is introduced which provide given performance for set of control objects with various dynamics. Besides parameters of linear-quadratic functional determined from solving the inverse optimization problem with used limited special selection from object set. All set of weighting matrix of linear-quadratic functional has the analytical description. The value of weighting matrix defined as intersection of this set by numerical solution the convex optimization task. The example of synthesis regulators for set of pilotless vehicle is presented.

Keywords: *linear-quadratic optimization task, inverse optimization task, linear matrix inequality, Lourie-Riccati equation, matrix canonization*

Mironov V. I., Mironov Yu. V., Yusupov R. M. The Account of the Aprioristic Information at Variation Estimation of the Condition of Nonlinear Dynamic Systems and Gauss Errors of Measurements. 7

One considers the application of the variation approach for the decision of problems of statistical estimation of condition parameters of nonlinear dynamic systems taking into account the aprioristic information at normally distributed errors of measurements.

Keywords: *statistical estimation, nonlinear dynamic systems, the aprioristic information*

Teryaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Agent Technologies for Automated Information-Control Systems. Part II. The Agent Decision in Problems of Control and Management 11

Functionaling of modern automated information-control systems is analyzed. The methodology of situation-goal control is stated. Base positions of agent-oriented design of automated systems are expressed. The agent model of works flow is suggested. The perspective technologies of intellectualization of agents are discussed.

Keywords: *automation, information-control functions, hierarchy of control functions, situation-goal control, multi-agent design, agent-oriented design, agent model of work flow*

Derzhavin O. M., Sidorova E. Yu. Investigation of Nonautonomous Singularly Perturbed Dynamic Model of Nonlinear System Using the First Approximation Equations 22

It is shown that a question of the opportunity of singularly perturbed nonlinear dynamic system model order reduction using Tikhonov's theorem can be reduced to a question of the fulfillment of the theorem's conditions for its linearized model.

Keywords: *singular perturbation, singularly perturbed model, model order reduction, Tikhonov's theorem, linearized model.*

Kolosov O. S., Lepeshkin S. N., Suhetsky A. P., Zimin V. A. Intertial Objects or System Simultaneous Operation on Common Load 27

There is proving a control stability of inertial objects or systems simultaneous operation on common load independence from number of objects and their parameters. There are discussing gascompressor units and synchronous generator driving motors as inertial objects or systems.

Keywords: *inertial objects or systems, control stability, simultaneous operation, common load, gascompressor unit, synchronous generator driving motor.*

Zverkov V. P., Kuzischin V. F. Automated Tuning of Cascade Control System with the Simultaneous Tuning of Outlines 33

Is proposed the algorithm of the automated dynamic tuning by the two-circuit (cascade) control system, which makes it possible to tune both outlines simultaneously. The results of the imitation simulation of the process of the automated tuning of two-circuit system with the use of a frequency response method of identification and iterative algorithm of reaching optimum and the realization of algorithm in the software-and-hardware complex for control of continuous technological vrocesses are given.

Keywords: *automatic control system, the algorithm of dynamic tuning, imitation simulation, transfer function, optimization, the criterion of optimality*

Pavljuk G. P., Shikhin V. A. Statistical Approach for the Regions of Required Control Quality Construction: the Cut-off Models Method 39

The results of the new method for the required control quality areas construction elaboration are presented. The method called Collapsed Ellipsoid Method is based on the statistical approach. The introduced restrictions, conditions and assumptions about the properties and the class of dynamic systems admit the application of this method as a research tool. Proposed and investigated the appropriate numerical procedure.

Keywords: *control systems, quality analysis, simulation, statistics*

Anisimov D. N., Kolosov O. S., Vershinin D. V., Zueva M. V., Tsapenko I. V. Dynamic Plants Diagnostics by Fuzzy Logic Methods Using Simulation Model Parameters 45

This article views fuzzy logic dynamic object retina pathology diagnosis systems. As example views retina pathology diagnosis systems. Fuzzy statements of such systems have patient electroretinogram parameters and parameters his self-turning dynamic model of retina. Good quality retina pathology diagnosis achieves by simultaneous operation more than one fuzzy logic systems with different parameters assortment.

Keywords: *diagnostics system, dynamic object, pathology, eye retina, fuzzy logic, accessory function, fuzzy logic conclusion, dynamic model of a retina*

Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M. Some Problems of Control by Free-Flying Space Manipulation Robots. Part I. 52

Short survey of foreign and native literature that is devoted to dynamics and control theory by free-flying space manipulation robot (SMR) for last twenty years is presented. The robots are intended for assistance to cosmonauts or for their substitution at carrying out some servicing operations in open space. Some perspective problems in the control by these complicated objects of new class of space technique are formulated. Equations of the SMR's motion are presented. These equations can be used both for the objects dynamics investigation and for algorithms synthesis of the control system. Peculiarities of manipulators dynamics on the moving base are considered taking into consideration using of the drives with positive mechanical braking. Concept of the SMR technical controllability is introduced. The necessary and sufficient conditions of the SMR technical controllability are obtained.

Keywords: *space manipulation robot, multimode, mathematical model, control algorithm, technical controllability*

Paramonov P. P., Sabo Yu. I., Shukalov A. V., Matveev V. V., Raspopov V. Ya. Integrated Navigational for Unmanned Airborne Vehicle. 60

Integrated navigational for the unmanned airborne vehicle which including inertial, magnetometric and pyrometric navigation systems is considered and analysis their integration schemes is executed.

Keywords: *navigating system, the pilotless flying machine, orientation system, gyroscope*

Silverstov M. M., Kotitsyn L. O., Polzik V. P., Begichev Yu. I. Generating and Investigating an Ergatic Interface of an Information-Management System for an Advanced Utility Helicopter 68

The concept of developing an information-management system for a utility helicopter with "reference track maneuvering", helicopter utilities "reference" operation and intellectual crew support modules, for which mnemonic frames of an ergatic interface have been generated, including a new attitude direction indicator, based on the use of the display, such as "controlled helicopter and control object ("leader") icon view from another helicopter flying behind at the same height and speed" in the geocentric coordinate system, where the axes are defined by the ground speed vector and the local vertical; information frames of command-leading indication, an electronic map with flight and navigation information and a terrain pseudovolume image, as well as mnemonic frames of helicopter utilities status and warning alerts.

Keywords: *information-management system, ergatic interface, voice message system, voice synthesizer, command-leading information, intellectual crew support module, information management field, control object icon, mnemonic frame*

Ponomarenko A. V., Kulabukhov V. S., Haltobin V. M., Klyuchnikov A. A., Levin D. N. Educational Research and Statistical Criteria of Pedagogical Experiments in the Preparation of Aviation Personnel 74

The problem of electronic education, its planning and results of pedagogical experiments, which were made at different educational institution, is being analyzed. As an example of automatized educational system, the interactive educational system IASO-29 (developed by "MiG" Design bureau about A. I. Mikoyan) is considered. Based on use of ratio scale and ordinal scale, there are a methods of characteristics differences authenticity determination, which are studied by experimental and test educational groups.

Keywords: *educational research, pedagogical impact, statistical criteria, electronic distance learning, automated training systems, automated training, measuring the scale*

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*
Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 03.08.2010. Подписано в печать 13.09.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,58. Заказ 802. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15