

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 11 (104)

ноябрь

2009

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.
ЧГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.** Вариационное оценивание состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия 2
- Клодина Т. В., Межирицкий Е. Л., Погорелов В. А., Сапожников А. И.** О применении распределения Пирсона для синтеза плотности вероятности марковского вектора состояния динамической системы 6
- Арановский С. В., Бобцов А. А., Николаев Н. А.** Синтез адаптивного наблюдателя для хаотической системы Дуффинга 9

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- Афонин С. М.** Исследование характеристик шагового пьезодвигателя нано- и микроперемещений 16
- Бухгольц Ю. Г., Новокрещенов О. И., Приступ А. Г., Шевченко А. Ф.** Разработка отрезка серии магнитоэлектрических синхронных электродвигателей с дробными зубцовыми обмотками 24
- Иванчура В. И., Суханов В. В., Никулин Н. А.** Электропривод с многофазным линейным асинхронным двигателем поперечного потока 29

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Володин Ю. С.** Метод кодирования структурной подсветки для телевизионной системы объемного зрения робототехнического комплекса 35

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Аветисян Ю. А., Кушников В. А., Резчиков А. Ф., Родичев В. А.** Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций 43
- Безродный А. А.** Оптимизация обслуживания автотранспортных средств на автозаправочных станциях с использованием автоматизированных автозаправочных терминалов 47

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

- Крыжановский Г. А., Солодухин В. А.** Методологические и прикладные аспекты обратной задачи оптимизации в процессах принятия решений при управлении воздушным движением 54
- Лебедев Г. Н., Мирзоян Л. А., Ефимов А. В.** Нейросетевое планирование групповых действий летательных аппаратов при наблюдении заданной группы подвижных наземных объектов 60
- Хахулин Г. Ф., Новиков С. А., Посадский А. И., Ескин В. И.** Задачи формирования и динамической корректировки плана наблюдений в системе космического мониторинга подвижных морских объектов 65
- Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В.** Проблемы обеспечения сбое- и отказоустойчивости бортовой аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли от воздействия излучений космического пространства 72
- 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: mec@novtex.ru

УДК 629.191

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

Вариационное оценивание состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия

Рассматривается применение вариационного подхода для решения задач статистического оценивания параметров состояния нелинейных динамических систем по критерию максимального правдоподобия.

Ключевые слова: статистическое оценивание, нелинейные динамические системы, критерий максимального правдоподобия.

Введение

Задачи оценивания параметров состояния и характеристик динамических систем по результатам измерений имеют широкое распространение на практике. Особенно важное место они занимают на всех этапах создания, экспериментальной отработки и эксплуатации объектов ракетно-космической, авиационной, корабельной техники, а также других сложных автоматических и автоматизированных систем, комплексов различного назначения и видовой принадлежности. Наиболее сложные задачи оценивания приходится, в частности, решать при навигационно-баллистическом обеспечении полетов космических аппаратов (КА), при разработке систем автономной навигации, в ходе летных испытаний и др.

В настоящее время основными методами определения орбит КА являются методы, основанные на совместной обработке результатов наблюдений по полной выборке, с помощью которых успешно решают широкий круг важных и сложных прикладных задач. Они широко освещены в отечественной и зарубежной литературе [1–5, 7–11 и др.], однако вопросы улучшения их точностных и вычислительных характеристик продолжают оставаться актуальными.

Созданная методология в основном базируется на непосредственном применении в динамических задачах оценивания условий метода максимального правдоподобия (ММП) и метода наименьших квадратов. По смыслу они представляют собой необходимые условия оптимальности, характерные для прямых методов оптимизации.

Вместе с тем, необходимо отметить, что методы теории оптимальной обработки измерений, как и методы теории оптимального управления, могут строиться и развиваться на основе использования различных форм и принципов формирования условий оптимальности — как прямых, так и вариационных. Вариационные условия оптимальности создают новую базу для решения данного класса задач.

Каждая форма условий оптимальности имеет свою область наиболее рационального применения. Теоретический анализ и накопленный опыт практического применения методов теории оптимального управления убедительно показывает, что там, где удастся реализовать вариационные условия оптимальности (принцип максимума), обеспечиваются лучшие точностные и вычислительные характеристики алгоритмов по сравнению с алгоритмами управления, основанными на прямых методах оптимизации. Поэтому можно ожидать, что разработка и применение вариационного подхода к задачам оценивания параметров состояния нелинейных динамических систем также позволит улучшить вычислительные и точностные характеристики соответствующих алгоритмов.

Некоторые вопросы применения указанного вариационного подхода к задачам статистического оценивания нелинейных динамических систем были рассмотрены в работе авторов [6].

В данной статье определяются и конкретизируются необходимые условия оптимальности оценок вариационного типа применительно к моделям дискретных и дискретно-непрерывных измерений как для нормального закона распределения ошибок измерений, так и для законов, отличных от него.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу оценивания параметров движения динамического объекта, которая заключается в наилучшем в некотором смысле определении n -мерного вектора его исходного состояния 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

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, t \in [t_0, T]. \quad (1)$$

Измерениям подвергается m -мерный вектор

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

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

$$\mathbf{y}(t_i) = \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] + \boldsymbol{\delta}_i; \quad (2)$$

$$i = \overline{1, N}; t_i \in [t_0, T].$$

Здесь $\boldsymbol{\delta}_i$ — m -мерный вектор случайных ошибок измерений, стохастическое изменение которого зададим некоторым многомерным непрерывным дифференцируемым распределением $f(\boldsymbol{\delta}_i, \boldsymbol{\alpha}_i)$ с параметрами $\boldsymbol{\alpha}_i$, отличающемся в общем случае от нормального распределения.

Требуется найти такую оценку вектора \mathbf{x}_0 , которая обеспечивает минимальное значение функционала

$$I = \sum_{i=1}^N \rho_i \{ \mathbf{y}(t_i), \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)], \boldsymbol{\alpha}_i \}, \quad (3)$$

где

$$\rho_i = \ln f_i \{ \mathbf{y}(t_i) - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i), \boldsymbol{\alpha}_i] \}; i = \overline{1, N}.$$

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

Нетрудно видеть, что функционал (3) есть не что иное, как логарифмическая функция правдоподобия.

Предполагается выполнение известных условий наблюдаемости.

Вариационные условия оптимальности оценок

Для решения поставленной задачи представим функционал (3) в эквивалентной интегральной форме. Для этого введем функцию

$$\rho \{ \mathbf{y}(t), \boldsymbol{\psi}[\mathbf{z}(t)], \boldsymbol{\alpha}(t) \} = \ln f \{ \mathbf{y}(t) - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t)], \boldsymbol{\alpha}(t) \},$$

где $\mathbf{y}(t)$ и $\boldsymbol{\alpha}(t)$ — произвольные непрерывные дифференцируемые вектор-функции, принимающие в моменты t_i , соответственно, значения \mathbf{y}_i и $\boldsymbol{\alpha}_i$ (например, полиномы Лагранжа).

Тогда для функционала (3) получим выражение

$$I = \int_{t_0}^T \rho \{ \mathbf{y}(t), \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t)] \} \sum_{i=1}^N \delta(t - t_i) dt,$$

где $\delta(t - t_i)$ — импульсная дельта-функция.

Получим необходимые условия оптимальности \mathbf{x}_0 . Поскольку оптимальному значению \mathbf{x}_0 соответствует и оптимальная траектория $\mathbf{x}(\mathbf{x}_0, t)$, то и условия оптимальности этой траектории можно рассматривать в качестве условий оптимальности \mathbf{x}_0 . Для определения таких условий, следуя известной процедуре вариационного исчисления, введем функцию

$$H(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, t) = \sum_{j=1}^n \lambda_j \boldsymbol{\varphi}_j(\mathbf{x}, t) + \rho[\mathbf{y}(t), \boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}, t)] \sum_{i=1}^N \delta(t - t_i)$$

и составим расширенный функционал

$$I^* = \int_{t_0}^T \left[- \sum_{j=1}^n \lambda_j(t) \frac{\partial x_j}{\partial t} + H \right] dt,$$

где $\lambda_j(t)$ — неопределенные множители Лагранжа.

Рассмотрим далее первую вариацию этого функционала:

$$\delta I^* = \int_{t_0}^T \left[- \sum_{j=1}^n \lambda_j(t) \delta \left(\frac{\partial x_j}{\partial t} \right) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial H}{\partial x_j} \delta x_j \right] dt.$$

После интегрирования по частям это выражение принимает следующий вид:

$$\delta I^* = \sum_{j=1}^n \lambda_j(t_0) \delta x_j(t_0) + \sum_{j=1}^n \lambda_j(T) \delta x_j(T) + \int_{t_0}^T \left(- \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial \lambda_j}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) \delta x_j \right) dt. \quad (4)$$

Необходимые условия оптимальности оценки вектора \mathbf{x}_0 определяются из условия равенства нулю первой вариации функционала:

$$\delta I^* = 0. \quad (5)$$

Поэтому из (4) и (5) получаем следующие необходимые условия оптимальности траектории $\mathbf{x}(\mathbf{x}_0, t)$ в виде известных уравнений Эйлера:

$$\frac{d\lambda_j}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial x_j}, j = \overline{1, n},$$

и граничных условий

$$\lambda_j(t_0) = 0, \lambda_j(T) = 0, j = \overline{1, n}.$$

Эти условия вместе с уравнениями движения (1) образуют систему уравнений, решение которой относительно неизвестного значения \mathbf{x}_0 и определяет как оптимальную оценку \mathbf{x}_0 , так и порождаемую ею траекторию $\mathbf{x}(\mathbf{x}_0, t)$.

Сформулируем данный результат в виде следующей теоремы.

Теорема. Оптимальная оценка вектора \mathbf{x}_0 и порождаемая ею оптимальная траектория $\mathbf{x}(\mathbf{x}_0, t)$ дос-

тавляют решение двухточечной краевой задаче для канонической системы

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\lambda}}; \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}$$

при граничных условиях

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = 0; \boldsymbol{\lambda}(T) = 0.$$

Здесь $\boldsymbol{\lambda}$ — n -мерная вектор-функция.

Заметим, что к решению краевых задач аналогичного типа сводятся и некоторые задачи оптимального управления. Это обстоятельство характеризует единство математической природы задач оптимального оценивания и управления, а также свидетельствует о возможности их численного решения с помощью одностипных методов.

Конкретизируем условия теоремы в обозначениях исходной задачи.

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

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t); \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}^T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} + \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y}, \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{x}), t] \sum_{i=1}^N \delta(t-t_i); \end{cases} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \boldsymbol{\lambda}(T) = 0.$$

Краевая задача (6) выражает необходимые условия оптимальности оценок вариационного типа по критерию максимального правдоподобия.

Отметим особенность интегрирования сопряженной системы, которая определяется наличием в правых частях дифференциальных уравнений импульсных дельта-функций. Это вызывает в моменты t_i скачкообразное изменение соответствующих сопряженных переменных на величину производной от критериальной функции ρ по вектору текущего состояния динамического процесса

$$\boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \Delta \boldsymbol{\lambda}(t_i);$$

$$\Delta \boldsymbol{\lambda}(t_i) = \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} \{\mathbf{y}_i, \boldsymbol{\Psi}[\mathbf{x}(t_i)]\}; \quad i = \overline{1, N}.$$

С учетом этого обстоятельства, вводя гамильтониан

$$\tilde{H} = \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t),$$

краевую задачу (6) можно представить в эквивалентной канонической форме

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \tilde{H}}{\partial \boldsymbol{\lambda}}; \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \tilde{H}}{\partial \mathbf{x}};$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y}_i, \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{x}_i), t_i];$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = 0; \boldsymbol{\lambda}(T) = 0.$$

Таким образом, рассматриваемую задачу можно интерпретировать как двухточечную краевую задачу с промежуточными ограничениями на сопряженный вектор $\boldsymbol{\lambda}(t)$.

Заметим, что аналогичные промежуточные условия возникают и в задачах оптимального управления с ограничениями на фазовые координаты.

Приведенные выше условия оптимального оценивания нетрудно конкретизировать применительно к заданному виду распределения вектора случайных ошибок измерений.

Так, если для вектора $\boldsymbol{\delta}_i$ принимается нормальное распределение $N(0, K_{\boldsymbol{\delta}_i})$ с нулевым вектором математического ожидания и корреляционной матрицей $K_{\boldsymbol{\delta}_i}$, что, как правило, имеет место на практике, решение задачи оптимального оценивания сводится к решению краевой задачи

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t); \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}^T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda};$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = 0; \boldsymbol{\lambda}(T) = 0;$$

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

$$i = \overline{1, N}.$$

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

Так, например, если помимо дискретных измерений (2) проводятся и непрерывные измерения согласно модели

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

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

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

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

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \boldsymbol{\lambda}(T) = 0;$$

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

$$i = \overline{1, N}.$$

Определение параметров орбиты космического аппарата по результатам измерений

Рассмотрим особенности применения вариационного метода наименьших квадратов на примере решения задачи статистического оценивания параметров движения КА по результатам текущих навигационных измерений, проводимых его бортовой аппаратурой, работающей по сигналам спутниковой навигационной системы. Движение КА будем рассматривать в центральном гравитационном поле Земли. Соответствующие уравнения движения в абсолютной геоцентрической системе координат имеют вид

$$\mathbf{r} = \mathbf{v}; \dot{\mathbf{v}} = -\frac{\pi_0}{r^3} \mathbf{r};$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

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

Проводятся прямые полные измерения элементов векторов \mathbf{r} и \mathbf{v} , так что модель измерений принимает вид

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{r} + \delta\mathbf{r}; \mathbf{y}_2 = \mathbf{v} + \delta\mathbf{v},$$

где $\delta\mathbf{r}, \delta\mathbf{v}$ — ошибки измерений.

Составим соответствующую сопряженную систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{\lambda}_r = \frac{\pi_0}{r^3} \left[\lambda_v - \frac{3}{r^2} (\mathbf{r}\mathbf{r}^T) \lambda_v \right]; \dot{\lambda}_v = -\lambda_r;$$

$$\lambda = [\lambda_r, \lambda_v]^T = [\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \lambda_{v_x}, \lambda_{v_y}, \lambda_{v_z}]^T.$$

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

$$\lambda(t_0) = 0; \lambda(T) = 0;$$

$$\lambda_r(t_i^+) = \lambda_r(t_i^-) + \mathbf{K}_r^{-1} [\mathbf{y}_1 - \mathbf{r}(t_i)];$$

$$\lambda_v(t_i^+) = \lambda_v(t_i^-) + \mathbf{K}_v^{-1} [\mathbf{y}_2 - \mathbf{v}(t_i)]; i = \overline{1, N},$$

где \mathbf{K}_r и \mathbf{K}_v — корреляционные матрицы ошибок измерений векторов координат и скорости движения КА, соответственно.

Таким образом, решение задачи сводится к поиску корней краевого уравнения

$$\lambda(\mathbf{q}, T) = 0.$$

Применение метода Ньютона приводит к следующему итерационному алгоритму:

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

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 вектора текущего состояния КА. При этом предельные ошибки измерений задавали значениями 100 м по элементам вектора координат и 1 м/с — по элементам вектора скорости. Интегрирование сопряженных систем проводили методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом 1 с. Матрицу частных производных $\frac{\partial \lambda(\mathbf{q}, T)}{\partial \mathbf{q}}$ вычисляли односторонним методом конечных разностей. Принимали, что ошибки измерений всех элементов вектора состояния статистически независимы.

Некоторые результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

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.

Таблица 1

Результаты оптимального оценивания

Характеристика	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	0	-7249,926	0	0,90495	0,00575	7,37023
Начальное приближение	50	-7199,926	50	0,95495	0,05575	7,82023
Оптимальные оценки	-0,006	-7249,928	-0,007	0,90497	0,00580	7,37030
Ошибки оценивания	-0,006	-0,002	-0,006	-0,00001	0,00005	0,00006

Таблица 2

Сходимость вычислительного процесса

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	50 000	50 000	50 000	50	50	50
1	-7,6	-2,8	-7,9	0,05	0,04	-0,01
2	-6,3	-1,9	-6,5	0,02	0,05	0,06
3	-6,3	-1,9	-6,5	0,02	0,05	0,06

В табл. 2 представлены значения ошибок оценивания 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 на-

вигационного 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. Бажинов И. К., Алешин В. И., Почукаев В. И., Поляков В. С. Космическая навигация. М.: Машиностроение, 1975. 352 с.
3. Брандин Н. К., Разоренов Г. Н. Определение траекторий КА. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
4. Космические траекторные измерения / Под ред. Агаджанова П. А., Дулевича В. Е., Коростелева А. А. М.: Сов. радио, 1969. 504 с.
5. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. 350 с.
6. Миронов В. И., Миронов Ю. В. Вариационный метод максимального правдоподобия // Труды СПИИРАН. Вып. 1. Т. 3. СПб.: СПИИРАН, 2003. С. 148—176.
7. Мудров В. И., Кушко В. П. Методы обработки измерений. М.: Сов. радио, 1976. 190 с.
8. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.
9. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р. М. Юсупова. МО СССР, 1984. 563 с.
10. Шапиро Н. Н. Расчет траекторий баллистических снарядов по данным радиолокационных наблюдений. М.: ИЛ, 1968. 319 с.
11. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976. 416 с.

УДК 621.37

Т. В. Клодина¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Е. Л. Межирицкий², ген. директор,
В. А. Погорелов³,
 канд. техн. наук, доц., нач. кафедры,
А. И. Сапожников², первый зам. ген. конструктора,
¹ Ростовский государственный университет
 путей сообщения
² НПЦ автоматики и приборостроения, Москва
³ Ростовский военный институт ракетных войск
 locman@ctsnet.ru

О применении распределения Пирсона для синтеза плотности вероятности марковского вектора состояния динамической системы

Рассмотрен метод построения замкнутой системы моментов, аппроксимирующих с требуемой для практики точностью плотность вероятности марковского вектора состояния динамической системы.

Ключевые слова: плотность вероятности, распределение Пирсона, моменты распределения.

Введение

Функционирование реальных динамических систем происходит в условиях помех, вызванных как естественными электромагнитными процессами в атмосфере и космическом пространстве, так и возникающими из-за действия специальных средств, применяемых противником. Кроме внешних источников помех имеются внутренние, наиболее существенными из которых являются флуктуационные шумы полупроводниковых приборов, нестабильность питающего напряжения, дрейф масштабных коэффициентов чувствительных элементов и др. [1—4].

В настоящее время в динамических системах, функционирующих в условиях помех, нашли широкое применение алгоритмы, синтез которых основывается на гауссовской аппроксимации априорной плотности вероятности (АПВ) вектора состояния [2—4]. В то же время в большинстве практических приложений приходится сталкиваться с задачами, в которых АПВ не является гауссовской [5—7]. В случае нелинейных уравнений, описывающих ди-

намику изменения вектора состояния системы, АПВ не будет гауссовской [5]. Также предположение о гауссовости АПВ не будет выполняться, если параметры динамической системы заранее точно не известны или ошибки измерения имеют негауссовскую плотность распределения [1, 6].

Нахождение такой плотности, как и соответствующих ей оптимальных оценок, представляется сложной задачей, основанной на решении уравнения Фокера—Планка—Колмогорова (ФПК).

Из всего многообразия существующих в настоящее время методов решения уравнения ФПК можно выделить следующие [4, 7, 8]:

- метод линейного интегрального преобразования (Лапласа, Фурье и т. д.);
- метод преобразования переменных;
- метод аппроксимации решения функциональными рядами;
- метод конечных разностных схем;
- метод гауссовской аппроксимации.

Общим недостатком первых трех методов является их эффективность лишь при условии независимости коэффициентов сноса и диффузии от пространственной или временной координаты [4]. Для метода аппроксимации функциональными рядами, кроме того, характерна возможность появления отрицательных значений плотности из-за невозможности априорного определения числа членов этого ряда, достаточного для обеспечения заданной точности [7]. Метод конечно-разностных схем требует интегрирования большого числа обыкновенных дифференциальных уравнений, что резко ограничивает его практическое применение в реальном масштабе времени функционирования динамического объекта [4]. Существенным недостатком гауссовской аппроксимации являются значительные погрешности аппроксимации несимметричных, эксцессных и финитных плотностей, а также принципиальная невозможность ее использования при изменении вида плотности распределения [8].

Перечисленные недостатки существующих методов делают актуальной необходимость разработки новых подходов к решению уравнения ФПК, а, следовательно, и к построению оценок вектора состояния динамической системы. Исследуем приближенный метод синтеза плотности вероятности динамической системы, основанный на том, что в некоторых задачах на основании физических соображений можно заранее ожидать определенный вид АПВ. В качестве такой АПВ будем рассматривать распределение Пирсона.

Постановка задачи

Пусть объект описывается нелинейным дифференциальным уравнением в симметризованной форме

$$\dot{Y} = f_1(Y, t) + f_0(Y, t)V_t, \quad Y(0) = Y_0, \quad (1)$$

где Y — функция, описывающая динамику системы; $f_i(Y, t)$, $i = \overline{0, 1}$ — известные нелинейные функции, удовлетворяющие условию Липшица по Y равномерно относительно t и N -дифференцируемые на интервале времени от 0 до t (величина N выбирается исходя из требуемой точности представления конкретной функции и на дальнейшие построения принципиального влияния не оказывает); V_t — нормированный белый гауссовский шум.

Априорная плотность вероятности $\rho = \rho(Y, t)$ уравнения (1) описывается уравнением ФПК [4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Y}[q(Y, t)\rho] + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial Y^2}[b(Y, t)\rho], \quad (2)$$

где $q(Y, t) = f_1(Y, t) + \frac{1}{2}f_0(Y, t)\frac{\partial f_0(Y, t)}{\partial Y}$, $b(Y, t) = f_0^2(Y, t)$.

Теорема

Пусть априорная плотность $\rho(Y, t)$ вектора состояния (1) может быть описана уравнением ФПК (2), коэффициенты сноса $q(Y, t)$ и диффузии $b(Y, t)$ которого допускают разложение в степенной ряд, а функция $\rho(Y, t)$ и скорость ее изменения по Y на бесконечности стремятся к нулю. Тогда уравнение (2) можно представить системой центральных моментов

$$\begin{aligned} \dot{m}_j = & j \int \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{q^{(n)}(m_1, t)}{n!} (Y - m_1(t))^{n+j-1} \rho(Y, t) dY + \\ & + \frac{1}{2} (j-1) j \int \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{b^{(k)}(m_1, t)}{k!} \times \\ & \times (Y - m_1(t))^{k+j-2} \rho(Y, t) dY, \\ & j \in N. \end{aligned} \quad (3)$$

Доказательство

Подставим разложения функций $q(Y, t)$ и $b(Y, t)$ в ряд Тейлора в окрестностях математического ожидания $m_1(t)$

$$\begin{aligned} q(Y, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{(n)}(m_1, t)}{n!} (Y - m_1(t))^n, \\ b(Y, t) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{b^{(k)}(m_1, t)}{k!} (Y - m_1(t))^k \end{aligned}$$

в уравнение (2) и умножим обе его части на $(Y - m_1(t))^j dY$. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho(Y, t)}{\partial t} (Y - m_1(t))^j dY = & -\frac{\partial}{\partial Y} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{(n)}(m_1, t)}{n!} \times \right. \\ & \left. \times (Y - m_1(t))^n \rho(Y, t) \right] (Y - m_1(t))^j dY + \\ & + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left[\sum_{k=0}^{\infty} \frac{b^{(k)}(m_1, t)}{k!} (Y - m_1(t))^k \rho(Y, t) \right] \times \\ & \times (Y - m_1(t))^j dY. \end{aligned} \quad (4)$$

Проинтегрировав выражение (4) на интервале $(-\infty; +\infty)$, получим систему уравнений (3).

При интегрировании (4) было сделано допущение о возможности замены порядка интегрирования и дифференцирования. Справедливость данного допущения вытекает из того, что в уравнении ФПК Y является параметром и не меняется во времени [8].

Теорема доказана.

Анализ (3) показывает, что система априорных моментов не замкнута. Однако в ряде практических приложений исходя из физики процесса можно ожидать определенный вид плотности распределения. Учитывая это, будем полагать, что АПВ $\rho(Y, t)$ может быть с требуемой точностью аппроксимирована распределением Пирсона [8]

$$\frac{\partial \rho(Y, t)}{\partial Y} = \frac{Y + a_0}{b_0 + b_1 Y + b_2 Y^2} \rho(Y, t), \quad (5)$$

где $a_0 = b_1$, $b_0 = \frac{C_0}{d}$, $b_1 = \frac{C_1}{d}$, $b_2 = \frac{C_2}{d}$ — постоянные параметры распределения, однозначно определяемые первыми четырьмя центральными моментами m_j , $j = \overline{1, 4}$;

$$C_0 = -m_2(4m_2m_4 - 3m_3^2); \quad C_1 = -m_3(4m_4 + 3m_2^2); \quad (6)$$

$$C_2 = -2m_2m_4 + 6m_2^3 + 3m_3^2;$$

$$d = 10m_2m_4 - 18m_2^3 - 12m_3^2.$$

Высказанное предположение о принадлежности $\rho(Y, t)$ к классу распределений Пирсона (5) позволяет преобразовать бесконечную систему (3) в замкнутую систему уравнений с помощью рекурсии [8]

$$m_{n+1} = -n \frac{C_0 m_{n-1} + C_1 m_n}{(n+2)C_2 + d}, \quad (7)$$

связывающей первые четыре момента АПВ с высшими моментами распределения. Проиллюстрируем эту возможность на примере.

Пример

Пусть функциональные зависимости $q(Y, t)$ и $b(Y, t)$ с достаточной для практики точности могут быть получены разложением в ряд Тейлора до $N=2$.

Тогда система моментов, вытекающая из (3), имеет вид

$$\dot{m}_1 = q(m_1, t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q(m_1, t)}{\partial m_1^2} m_2; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_2 = & 2 \frac{\partial q(m_1, t)}{\partial m_1} m_2 + \frac{\partial^2 q(m_1, t)}{\partial m_1^2} m_3 + \\ & + b(m_1, t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 b(m_1, t)}{\partial m_1^2} m_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_3 = & 3 \left[q(m_1, t) m_2 + \frac{\partial q(m_1, t)}{\partial m_1} m_3 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q(m_1, t)}{\partial m_1^2} m_4 + \right. \\ & \left. + b(m_1, t) m_1 + \frac{\partial b(m_1, t)}{\partial m_1} m_2 + \frac{\partial^2 b(m_1, t)}{\partial m_1^2} m_3 \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_4 = & 2 \left[2q(m_1, t) m_3 + 2 \frac{\partial q(m_1, t)}{\partial m_1} m_4 + \frac{\partial^2 q(m_1, t)}{\partial m_1^2} m_5 + \right. \\ & \left. + 3b(m_1, t) m_2 + 3 \frac{\partial b(m_1, t)}{\partial m_1} m_3 + \frac{3}{2} \frac{\partial^2 b(m_1, t)}{\partial m_1^2} m_4 \right]. \end{aligned}$$

Неизвестный центральный момент m_5 , входящий в четвертое уравнение системы (8), может быть найден из рекурсии (7) в виде

$$m_5 = \frac{2m_3(7m_2^2m_4 - 3m_2m_3^2 + 4m_4^2)}{3m_3^2 + 9m_2^3 - m_2^4}. \quad (9)$$

Подстановка (9) в (8) позволяет получить замкнутую систему моментов, решение которой можно найти при следующих начальных условиях:

$$\dot{m}_j(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} [Y - m_1(t_0)]^j \rho dY, \quad j = \overline{1, 4}.$$

Найденные моменты могут быть использованы для определения любого из двенадцати возможных распределений Пирсона.

Заключение

Предложенный метод построения АПВ уравнения (1) является более предпочтительным по сравнению с гауссовской аппроксимацией, рассмотренной в [4]. Это связано с тем, что данный подход к решению обеспечивает формирование априорных центральных моментов из условия точного совпадения аппроксимирующего решения с выбранной формой $\rho(Y, t)$, а не минимума его отклонения, как, например, при использовании метода интегральной аппроксимации [4, 7]. Кроме того, данный метод оказывается релевантным в случае изменения вида закона распределения системы в процессе ее функционирования в рамках 12 возможных классов распределения Пирсона [8]. Данное обстоятельство делает его применение эффективным не только в традиционных динамических системах, но и в системах со случайной структурой, имеющих дискретный ряд вероятностей смены структур [2, 3].

Список литературы

1. **Погорелов В. А.** Решение задачи стохастического управления гиросtabilизированной платформой с параметрически неопределенной моделью дрейфа // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2003. № 2. С. 152—160.
2. **Лысенко Л. Н., Нгуен Танг Кыонг.** Теоретические и прикладные аспекты синтеза мультиструктурных схем рекуррентной обработки информации в навигационных системах летательных аппаратов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1991. № 6. С. 38—48.
3. **Соколов С. В., Погорелов В. А.** Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных навигационных систем. М.: Физматлит, 2009. 182 с.
4. **Тихонов В. И., Харисов В. Н.** Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 347 с.
5. **Степанов О. А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2003. 369 с.
6. **Тертычный-Даури В. Ю.** Стохастическая механика. М.: Факториал Пресс, 2001. 350 с.
7. **Хуторцев В. В., Соколов С. В., Шевчук П. С.** Современные принципы управления и фильтрации в стохастических системах. М.: Радио и связь, 2001. 807 с.
8. **Тихонов В. И.** Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 247 с.

УДК 681.51.095

С. В. Арановский, науч. сотр.,

А. А. Бобцов, д-р техн. наук, проф.,

Н. А. Николаев, канд. техн. наук, науч. сотр.,

СПбГУ ИТМО

bobtsov@mail.ru

Синтез адаптивного наблюдателя для хаотической системы Дуффинга

С использованием процедуры синтеза адаптивного наблюдателя для хаотической системы Дуффинга решается задача восстановления неизвестного закодированного параметра. Данная задача в отличие от известных аналогов решается только по измерениям выходного сигнала хаотической системы, а также в условиях полной параметрической неопределенности.

Ключевые слова: хаотические системы, адаптивные наблюдатели.

Введение

Проблема построения адаптивных наблюдателей для нелинейных динамических систем находится в центре внимания в течение последних лет. Одна из причин подобного интереса состоит в возможности применения адаптивных наблюдателей для кодирования и передачи информации. Это одно из новых направлений передачи данных, когда информация кодируется в параметрах динамической системы "передатчика". Сигнал выхода этой системы передается "приемнику", в задачу которого вхо-

дит восстановление неизмеряемых сигналов "передатчика" и параметров модели "передатчика". Структурная схема подобной системы приведена на рис. 1, где θ — вектор параметров модели системы "передатчика", кодирующий передаваемую информацию; y — передаваемый по каналу связи выход "передатчика"; $\hat{\theta}$ — оценка вектора θ , вырабатываемая приемником.

Особенно перспективным представляется использование хаотических динамических систем в качестве моделей "передатчиков", так как сигнал выхода хаотической системы, с одной стороны, имеет широкий частотный диапазон, а с другой стороны, решения подобных систем демонстрируют слабую зависимость от начальных условий, что повышает защищенность системы от несанкционированного восстановления информационной составляющей сигнала. В этом случае в задачу "приемника" входит построение адаптивного наблюдателя хаотической системы [1].

Для синтеза адаптивных наблюдателей обычно используется несколько групп методов [2, 3], большинство из которых основываются на возможно-

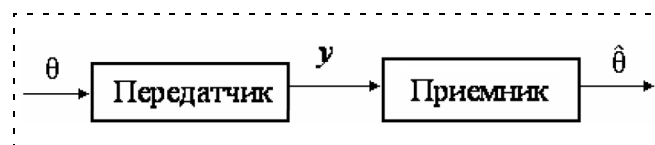


Рис. 1. Структурная схема системы передачи данных

сти пассивации обратной связью модели системы "передатчика" в предположении, что эта модель имеет нулевую или единичную относительную степень. Другие решения предполагают доступность для измерения всего вектора состояния системы "передатчика" [4, 5]. В [6] было предложено решение, позволяющее синтезировать адаптивные наблюдатели для моделей "передатчика", имеющих высокую (выше единичной) относительную степень и не допускающих пассивацию обратной связью по выходу. В [6] рассматривались нелинейные автономные системы вида

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + \varphi_0(y) + b\varphi^T(y)\theta; \\ y &= c^T x,\end{aligned}$$

где $x \in R^n$ — неизмеримый вектор переменных состояния; переменная $y \in R$ измеряется; $\varphi_0(y)$ и $\varphi(y)$ — известные функции; $\theta \in R^m$ — вектор неизвестных параметров; коэффициенты матрицы A и векторов b и c полагаются известными.

Для данной системы в [6] с использованием новой канонической формы нелинейных адаптивных наблюдателей была решена задача восстановления вектора неизвестных параметров $\theta \in R^m$, а также вектора переменных состояния $x \in R^n$. Однако результат, опубликованный в [6], без существенных изменений не позволяет решать задачу адаптивного наблюдения для неавтономных систем. В этом легко убедиться, рассматривая случай неавтономной системы с внешним гармоническим сигналом неизвестной частоты $\omega > 0$

$$\dot{x} = Ax + \varphi_0(y) + b(\varphi^T(y)\theta + w),$$

где сигнал $w = A \sin \omega t$ может быть представлен в виде простейшего осциллятора вида

$$\dot{v} = \Gamma v, \quad w = h^T v,$$

где $v \in R^2$, $\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}$ и $h = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$.

Очевидно, что дополнение рассматриваемой нелинейной системы моделью осциллятора приведет к рассмотрению автономной системы

$$\begin{aligned}\dot{x}_p &= A_p x_p + \varphi_{0p}(y) + b_p \varphi^T(y)\theta; \\ y &= c_p^T x_p,\end{aligned}$$

где $x_p = \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix}$, $A_p = \begin{bmatrix} A & bh^T \\ 0 & \Gamma \end{bmatrix}$, $\varphi_{0p} = \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $b_p = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix}$, $c_p = \begin{bmatrix} c \\ 0 \end{bmatrix}$.

Однако для применения результатов работы [6] необходимо, чтобы коэффициенты матрицы A_p были известны.

Результат работы [6] был усилен в [7–9], где рассматривалась задача построения адаптивных на-

блюдателей по части переменных для неавтономных нелинейных динамических систем. Использование внешнего возбуждающего сигнала является одним из подходов к созданию хаотических режимов движения в нелинейных системах. Примерами таких систем являются модель Дуффинга и модель брусслелятора [9, 10], демонстрирующие хаотическое поведение только в присутствии соответствующего гармонического возмущения. Распространение классических результатов на задачу построения адаптивных наблюдателей для неавтономных систем, во-первых, позволяет существенно расширить класс допустимых моделей для системы "передатчика", а во-вторых, увеличивает защищенность системы от несанкционированного доступа.

В данной статье рассматривается задача синтеза адаптивного наблюдателя для хаотических сигналов, генерируемых хаотической системой Дуффинга. Эта задача связана с выделением из хаотического сигнала полезной информации, передаваемой по каналу связи. В отличие от известных результатов (см., например, [9]) в данной статье будет рассмотрена задача синтеза наблюдателя только по измерению выходной переменной хаотического сигнала при полной параметрической неопределенности его модели.

Постановка задачи

Рассмотрим хаотическую систему Дуффинга, описываемую уравнением вида (см., например, [9])

$$\ddot{y}(t) + c_1 \dot{y}(t) + c_2 y(t) - \bar{\theta} f(y) - w(t) = 0, \quad (1)$$

где c_1 , c_2 и $\bar{\theta}$ — неизвестные числа; $f(y) = y^3$ — нелинейная функция; $w(t) = A \sin(\omega t + \phi)$ — неизмеримый гармонический сигнал.

Ставится задача синтеза наблюдателя, обеспечивающего восстановление неизвестного параметра $\bar{\theta}$ модели (1) (см., например, [9]).

Будем допускать, что измеряется только выходная переменная $y(t)$ модели (1). Также предполагается, что параметры хаотической системы (1) c_1 , c_2 , $\bar{\theta}$, A , ω и ϕ являются неизвестными числами.

Синтез адаптивного наблюдателя

Для вывода основного результата перепишем модель (1) следующим образом:

$$y(t) = \frac{1}{a(p)} [\bar{\theta} y^3 + w(t)], \quad (2)$$

где полином $a(p) = p^2 + c_1 p + c_2$ и $p = d/dt$.

Переходя к изображениям Лапласа для уравнения (1), имеем

$$Y(s) = \frac{\bar{\theta} F(s)}{s^2 + c_1 s + c_2} + \frac{W(s)}{s^2 + c_1 s + c_2} + \frac{D(s)}{s^2 + c_1 s + c_2}, \quad (3)$$

где s — комплексная переменная; $Y(s) = L\{y(t)\}$, $F(s) = L\{f(y(t))\}$, $W(s) = L\{w(t)\}$ — образы Лапласа, соответственно, функций $y(t)$, $f(y(t))$ и $w(t)$; полином $D(s)$ обозначает сумму всех членов, содержащих ненулевые начальные условия.

Преобразуем модель (3) следующим образом:

$$Y(s) = \frac{\bar{\theta}F(s)}{s^2 + c_1s + c_2} + \frac{W(s)}{s^2 + c_1s + c_2} + \frac{D(s)}{s^2 + c_1s + c_2};$$

$$(s + 1)^2 Y(s) = a_1(s)Y(s) + \bar{\theta}F(s) + W(s) + D(s),$$

откуда

$$Y(s) = \frac{a_1(s)}{(s + 1)^2} Y(s) + \frac{\bar{\theta}F(s)}{(s + 1)^2} + \frac{W(s)}{(s + 1)^2} + \frac{D(s)}{(s + 1)^2}, \quad (4)$$

где полиномы $a_1(s) = (s + 1)^2 - a(s)$ и $a(s) = s^2 + c_1s + c_2$.

Из уравнения (4) имеем

$$y(t) = \frac{a_1(p)}{(p + 1)^2} y(t) + \frac{\bar{\theta}}{(p + 1)^2} y^3(t) + \frac{1}{(p + 1)^2} w(t) + \varepsilon_y, \quad (5)$$

где $f(y) = y^3$ и $\varepsilon_y(t) = L^{-1}\left\{\frac{D(s)}{(s + 1)^2}\right\}$ — экспоненци-

ально затухающая функция времени, которая определяется ненулевыми начальными условиями.

Пренебрегая экспоненциально затухающим сла-
гаемым $\varepsilon_y(t) = L^{-1}\left\{\frac{D(s)}{(s + 1)^2}\right\}$, проведем параметри-

зацию модели (5). Для этого рассмотрим вспомо-
гательные фильтры вида

$$\xi_1(t) = \frac{1}{(p + 1)^2} y(t); \quad (6)$$

$$\xi_2(t) = \frac{1}{(p + 1)^2} y^3(t). \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в уравнение (5), получаем

$$y(t) = a_1(p)\xi_1(t) + \bar{\theta}\xi_2(t) + \bar{w}(t), \quad (8)$$

где функция $\bar{w}(t) = \frac{1}{(p + 1)^2} w(t)$.

Из уравнения (8) имеем

$$y(t) = \delta(t) + \bar{w}(t), \quad (9)$$

где функция $\delta(t) = a_1(p)\xi_1(t) + \bar{\theta}\xi_2(t)$.

Рассмотрим фильтр (6):

$$\xi_1(t) = \frac{1}{(p + 1)^2} y(t) = \frac{1}{(p + 1)^2} \delta(t) + \frac{1}{(p + 1)^2} \bar{w}(t),$$

откуда

$$\frac{1}{(p + 1)^2} \bar{w}(t) = \xi_1(t) - \frac{1}{(p + 1)^2} \delta(t). \quad (10)$$

Поскольку сигнал $w(t) = A\sin(\omega t + \phi)$, то в силу гурвицевости полинома $(p + 1)^2$ функцию $\bar{w}(t)$ можно представить следующим образом:

$$\bar{w}(t) = \sigma\sin(\omega t + \varphi);$$

$$p^2\bar{w}(t) = -\sigma\omega^2\sin(\omega t + \varphi) = \theta\bar{w}(t),$$

где $\theta = -\omega^2$.

Запишем последнее уравнение следующим об-
разом:

$$(p + 1)^2\bar{w}(t) = p^2\bar{w}(t) + 2p\bar{w}(t) + \bar{w}(t) = \theta\bar{w}(t) + 2p\bar{w}(t) + \bar{w}(t) = (2p + 1)\bar{w}(t) + \theta\bar{w}(t),$$

$$(p + 1)^2\bar{w}(t) = (2p + 1)\bar{w}(t) + \theta\bar{w}(t).$$

Поскольку $\bar{w}(t) = y(t) - \delta(t)$, то

$$\begin{aligned} & (p + 1)^2(y(t) - \delta(t)) = \\ & = (2p + 1)(y(t) - \delta(t)) + \theta(y(t) - \delta(t)) = \\ & = (p + 1)^2\left[\frac{(2p + 1)}{(p + 1)^2}(y(t) - \delta(t)) + \frac{\theta}{(p + 1)^2}(y(t) - \delta(t))\right]. \end{aligned}$$

Из последнего уравнения получаем

$$\begin{aligned} \bar{w}(t) = y(t) - \delta(t) & = \left[(2p + 1)\xi_1 + \theta\xi_1 + \right. \\ & \left. + \frac{(2p + 1)}{(p + 1)^2}(-\delta(t)) + \frac{\theta}{(p + 1)^2}(-\delta(t))\right] = \\ & = \left[(2p + 1 + \theta)\xi_1 + \frac{(2p + 1)}{(p + 1)^2}(-\delta(t)) + \right. \\ & \left. + \frac{\theta}{(p + 1)^2}(-\delta(t))\right] = \left[(2p + 1 + \theta)\xi_1 + \right. \\ & \left. + \frac{(-p^2 - 2p - 1)}{(p + 1)^2}\delta(t) + \frac{p^2 - \theta}{(p + 1)^2}\delta(t)\right] = \\ & = [(2p + 1 + \theta)\xi_1 - \delta(t) + \bar{\delta}(t)], \quad (11) \end{aligned}$$

где функция

$$\begin{aligned} \bar{\delta}(t) & = \frac{p^2 - \theta}{(p + 1)^2}\delta(t) = \frac{p^2}{(p + 1)^2}\delta(t) - \frac{\theta}{(p + 1)^2}\delta(t) = \\ & = \frac{p^2 a_1(p)}{(p + 1)^2}\xi_1(t) - \frac{\theta a_1(p)}{(p + 1)^2}\xi_1(t) + \\ & + \frac{p^2 \bar{\theta}}{(p + 1)^2}\xi_2(t) - \frac{\theta \bar{\theta}}{(p + 1)^2}\xi_2(t). \quad (12) \end{aligned}$$

Преобразуем модель (11):

$$\theta \xi_1(t) + \bar{\delta}(t) = \bar{w}(t) + \delta(t) - 2\dot{\xi}_1(t) - \xi_1(t) = y(t) - 2\dot{\xi}_1(t) - \xi_1(t). \quad (13)$$

Обозначим

$$z(t) = \theta \xi_1(t) + \bar{\delta}(t) = y(t) - 2\dot{\xi}_1(t) - \xi_1(t), \quad (14)$$

где в силу измеримости сигналов $y(t)$, $\xi_1(t)$ и $\dot{\xi}_1(t)$ функция $z(t)$ также измеряется.

Подставляя в (14) уравнение (12), получаем

$$z(t) = \theta \xi_1(t) + \frac{p^2 a_1(p)}{(p+1)^2} \xi_1(t) - \frac{\theta a_1(p)}{(p+1)^2} \xi_1(t) + \frac{\bar{\theta} p^2}{(p+1)^2} \xi_2(t) - \frac{\bar{\theta} \theta}{(p+1)^2} \xi_2(t) = \theta \left(1 - \frac{a_1(p)}{(p+1)^2} \right) \xi_1(t) + \frac{\bar{\theta} p^2}{(p+1)^2} \xi_2(t) - \bar{\theta} \theta \frac{1}{(p+1)^2} \xi_2(t) + \frac{p^2 a_1(p)}{(p+1)^2} \xi_1(t). \quad (15)$$

Учитывая, что $a_1(p) = a_1 p + a_0$, имеем

$$\theta \left(\frac{p^2 + 2p + 1 - a_1 p - a_0}{(p+1)^2} \right) \xi_1(t) = \theta \frac{p^2}{(p+1)^2} \xi_1(t) + (2\theta - a_1 \theta) \frac{p}{(p+1)^2} \xi_1(t) + (\theta - a_0 \theta) \frac{1}{(p+1)^2} \xi_1(t); \quad (16)$$

$$\frac{p^2 (a_1 p + a_0)}{(p+1)^2} \xi_1(t) = a_1 \frac{p^2}{(p+1)^2} \dot{\xi}_1(t) + a_0 \frac{p^2}{(p+1)^2} \xi_1(t). \quad (17)$$

Подставляя (16), (17) в уравнение (15), получаем

$$z(t) = (\theta + a_0) \frac{p^2}{(p+1)^2} \xi_1(t) + \bar{\theta} \frac{p^2}{(p+1)^2} \xi_2(t) - \bar{\theta} \theta \frac{1}{(p+1)^2} \xi_2(t) + a_1 \frac{p^2}{(p+1)^2} \dot{\xi}_1(t) + (2\theta - a_1 \theta) \frac{p}{(p+1)^2} \xi_1(t) + (\theta - a_0 \theta) \frac{1}{(p+1)^2} \xi_1(t). \quad (18)$$

Из уравнения (18) имеем параметризованную модель вида

$$z(t) = \psi_1(t) \theta_1 + \psi_2(t) \theta_2 + \psi_3(t) \theta_3 + \psi_4(t) \theta_4 + \psi_5(t) \theta_5 + \psi_6(t) \theta_6, \quad (19)$$

в которую входят неизвестные параметры

$$\theta_1 = \theta + a_0, \theta_2 = \bar{\theta}, \theta_3 = -\bar{\theta} \theta, \theta_4 = a_1, \theta_5 = 2\theta - a_1 \theta, \theta_6 = \theta - a_0 \theta$$

и известные функции

$$\begin{aligned} \psi_1(t) &= \frac{p^2}{(p+1)^2} \xi_1(t); \quad \psi_2(t) = \frac{p^2}{(p+1)^2} \xi_2(t); \\ \psi_3(t) &= \frac{1}{(p+1)^2} \xi_2(t); \quad \psi_4(t) = \frac{p^2}{(p+1)^2} \dot{\xi}_1(t); \\ \psi_5(t) &= \frac{p}{(p+1)^2} \xi_1(t); \quad \psi_6(t) = \frac{1}{(p+1)^2} \xi_1(t). \end{aligned}$$

Для оценки неизвестных параметров модели (19) будем использовать адаптивный наблюдатель вида

$$\hat{z}(t) = \psi_1(t) \hat{\theta}_1 + \psi_2(t) \hat{\theta}_2 + \psi_3(t) \hat{\theta}_3 + \psi_4(t) \hat{\theta}_4 + \psi_5(t) \hat{\theta}_5 + \psi_6(t) \hat{\theta}_6; \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_i = k_i \psi_i(t) e(t) = k_i \psi_i(t) (z(t) - \hat{z}(t)), \quad (21)$$

где постоянный коэффициент $k_i > 0$, $i = \overline{1, 6}$.

Т е о р е м а. Пусть для восстановления параметров модели (19) используется алгоритм (20), (21), тогда при возникновении хаоса в системе (1) будут выполнены следующие соотношения:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t) - \hat{z}(t)| = 0; \quad (22)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\theta_i - \hat{\theta}_i(t)| = 0. \quad (23)$$

Доказательство теоремы представлено в Приложении.

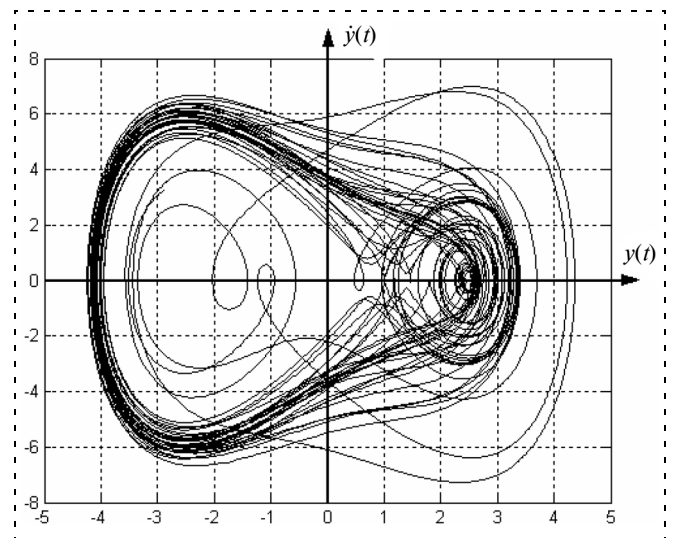
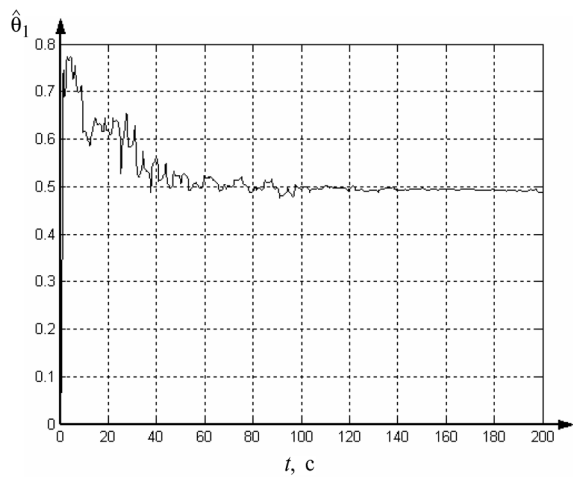
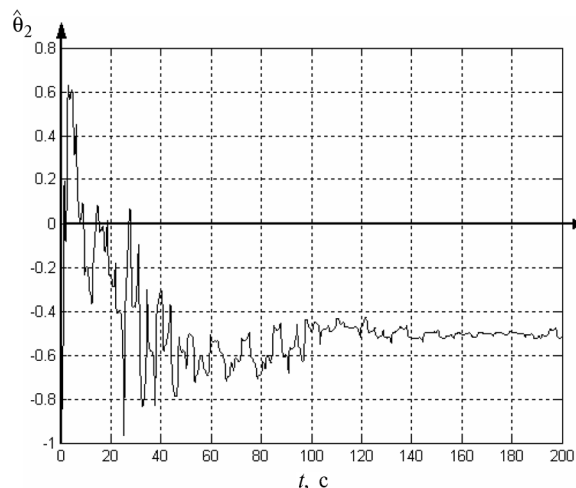


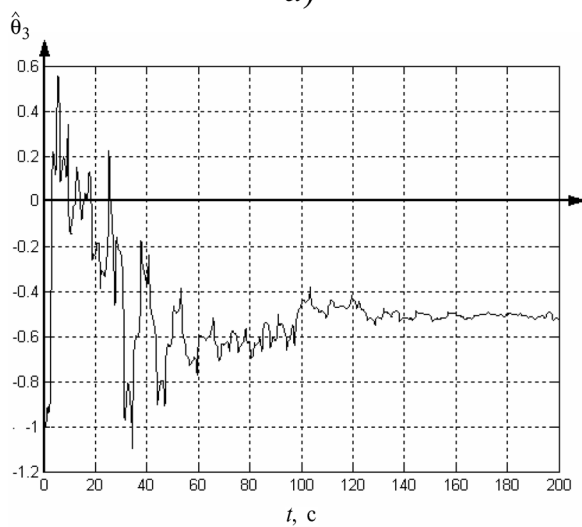
Рис. 2. Фазовая траектория системы Дуффинга



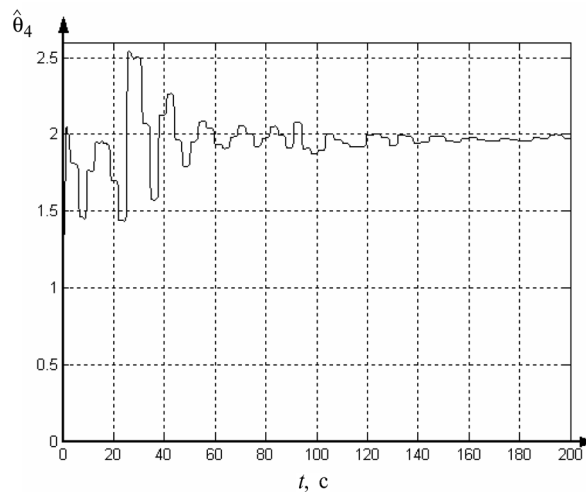
a)



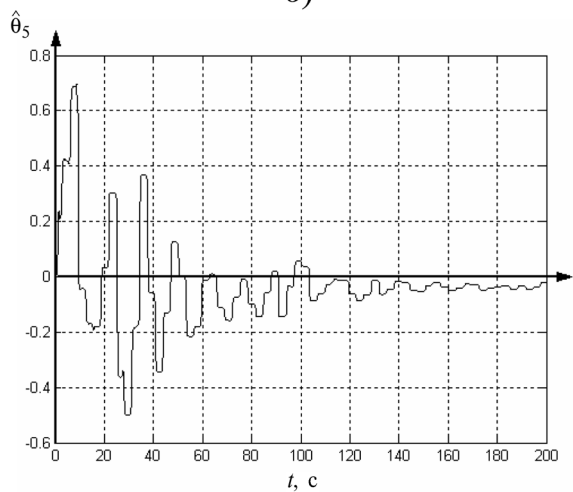
b)



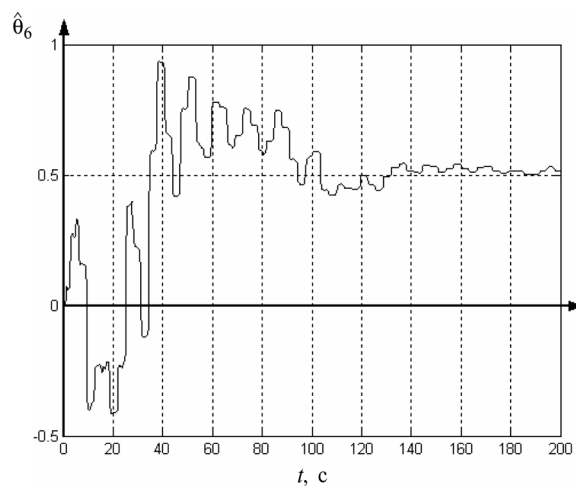
c)



d)



e)



f)

Рис. 3. Переходные процессы в системе (20), (21)

З а м е ч а н и е. Несмотря на то, что в данной работе ставилась задача восстановления только одного неизвестного параметра $\bar{\theta}$, очевидно, что предложенный алгоритм также позволяет оценить значения неизвестных параметров c_1, c_2 , и ω . Таким образом, использование хаотической системы Дуффинга в качестве передатчика при использовании предложенного в работе алгоритма (20), (21) позволяет передавать одновременно до четырех закодированных параметров.

Результаты моделирования

Проведем моделирование предлагаемой схемы адаптивного восстановления неизвестного параметра $\bar{\theta}$ при следующих параметрах хаотической системы Дуффинга (1): $c_1 = -0,5, c_0 = 0, w(t) = 7\sin t$. Алгоритм настройки параметров имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_1 &= 18\psi_1(t)(\xi_1 - \hat{z}(t)); \quad \dot{\hat{\theta}}_2 = 14\psi_2(t)(\xi_1 - \hat{z}(t)); \\ \dot{\hat{\theta}}_3 &= 14\psi_3(t)(\xi_1 - \hat{z}(t)); \quad \dot{\hat{\theta}}_4 = 14\psi_4(t)(\xi_1 - \hat{z}(t)); \\ \dot{\hat{\theta}}_5 &= 14\psi_5(t)(\xi_1 - \hat{z}(t)); \quad \dot{\hat{\theta}}_6 = 14\psi_6(t)(\xi_1 - \hat{z}(t)). \end{aligned}$$

Результаты компьютерного моделирования для параметра $\bar{\theta} = -0,5$ приведены на рис. 2, 3.

Из результатов моделирования видно, что $\hat{\theta}_1 \rightarrow 0,5, \hat{\theta}_2 = -0,5, \hat{\theta}_3 = -0,5, \hat{\theta}_4 = 2, \hat{\theta}_5 \rightarrow 0, \hat{\theta}_6 \rightarrow 0,5$.

Таким образом, приведенные результаты моделирования иллюстрируют работоспособность предлагаемой схемы адаптивной оценки неизвестного параметра $\bar{\theta}$. Однако, как следует из графиков, качество параметрической сходимости оставляет желать лучшего и это является недостатком данного подхода. В настоящее время продолжаются работы по улучшению характеристик предложенного алгоритма, в том числе работы по сокращению времени переходных процессов.

Заключение

С использованием адаптивного наблюдателя вида (20), (21) для хаотической системы Дуффинга решена задача восстановления неизвестного закодированного параметра $\bar{\theta}$. Данный результат в отличие от известных аналогов не предусматривает измерений выходного сигнала хаотической системы, а также позволяет находить неизвестный закодированный параметр $\bar{\theta}$ в условиях полной параметрической неопределенности модели (1).

Запишем уравнения (19)–(21) в виде

$$z(t) = \psi^T(t)\theta; \tag{П1}$$

$$\hat{z}(t) = \psi^T(t)\hat{\theta}(t); \tag{П2}$$

$$\dot{\hat{\theta}} = K\psi(t)e(t), \tag{П3}$$

где $K = K^T$ — диагональная матрица, составленная из элементов $k_i > 0$;

$$\psi(t) = \text{col}\{\psi_1(t), \dots, \psi_6(t)\}, \theta(t) = \text{col}\{\theta_1(t), \dots, \theta_6(t)\},$$

$$\hat{\theta}(t) = \text{col}\{\hat{\theta}_1(t), \dots, \hat{\theta}_6(t)\}.$$

Рассмотрим выражение для ошибки

$$\begin{aligned} e(t) &= z(t) - \hat{z}(t) = \\ &= \psi^T(t)\theta - \psi^T(t)\hat{\theta}(t) = \psi^T(t)\tilde{\theta}(t), \end{aligned} \tag{П4}$$

где $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ — вектор параметрических ошибок.

Для доказательства выполнения соотношений (22), (23) рассмотрим функцию Ляпунова вида

$$V = \tilde{\theta}^T K^{-1} \tilde{\theta}. \tag{П5}$$

Дифференцируя (П5), получаем

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\tilde{\theta}}^T K^{-1} \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^T K^{-1} \dot{\tilde{\theta}} = \\ &= -(\psi^T \tilde{\theta})^2 = -(z - \hat{z})^2 \leq 0, \end{aligned} \tag{П6}$$

где в силу уравнений (П3) и (П4)

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}} = -K\psi e = -K\psi\psi^T \tilde{\theta}.$$

Из выражения (П6) следует ограниченность $e(t)$ и $\tilde{\theta}(t)$, а также квадратичная интегрируемость функции $e(t)$, т. е.

$$\int_{t_0}^{\infty} e^2(\tau) d\tau < \infty. \tag{П7}$$

Из (П6) и (П7) в силу известной леммы Барбалата (см., например, [11]) следует

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t) - \hat{z}(t)| = 0.$$

Как показано в работах [1, 9], хаотическая природа обеспечивает "частотно богатый" сигнал $y(t)$, что, в свою очередь, гарантирует предельную ин-

тегральную невырожденность вектора $\psi(t)$, т. е. выполнение неравенства (см., например, [11])

$$\int_t^{t+L} \psi(\tau)\psi^T(\tau)d\tau \geq L_0 I,$$

где I — единичная матрица, L и L_0 — любые положительные числа.

Известно [11], что выполнение условия предельной интегральной невырожденности гарантирует выполнение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\theta_i - \hat{\theta}_i(t)| = 0.$$

Теорема доказана.

Список литературы

1. Фрадков А. Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003.
2. Fradkov A. L., Nijmeijer H., Markov A. Yu. Adaptive observer-based synchronization for communications // Int. J. Bifurcations and Chaos. 1997. 10, 12. P. 2807—2814.

3. Markov A. Yu., Fradkov A. L. Adaptive synchronization of coupled chaotic system // Proc. Int. Conf. "Fractals and Chaos in Chemical Engineering", Rome, 1996. P. 153—154.

4. Fradkov A. L., Hill D. Exponential feedback passivity and stabilizability of nonlinear systems // Automatica. 1998. 6. P. 697—703.

5. Huijberts H., Nijmeijer H., Willems R. System identification in communication with chaotic system // IEEE trans. Circ. Syst. I. 2000. Vol. 47, P. 800—808.

6. Fradkov A. L., Nikiforov V. O., Andrievsky B. R. Adaptive observers for nonlinear nonpassifiable systems with applications to signal transmission // Proc. 41th IEEE Conf. Decision and Control, Las Vegas, 2002, 10—13 Dec.

7. Efimov D. V. Robust adaptive nonlinear partial observers for time-varying chaotic systems // Proc. IEEE CDC 2004, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 13—15 Dec.

8. Efimov D. V., Fradkov A. L. Adaptive partial observers with applications to time-varying chaotic systems // Proc. IUTAM symp. On chaotic dynamics and control of systems and processes in mechanics, Springer, 2005. P. 27—35.

9. Ефимов Д. В. Робастное и адаптивное управление нелинейными колебаниями. СПб.: Наука, 2005.

10. Nikolis G., Prigogine I. R. Self-organization in non-equilibrium systems. Wiley, New York, 1977.

11. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.

С 16 по 18 марта 2010 г. в Санкт-Петербурге
в ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор" состоится

XII конференция молодых ученых "Навигация и управление движением" (ХІІКМУ2010)

Председатель конференции — академик РАН В. Г. Пешехонов

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Гироскопические системы
- Спутниковые навигационные системы
- Интегрированные системы навигации
- Теория и системы управления
- Обработка информации в навигационных системах
- Электронные и электромеханические устройства систем навигации и управления
- Чувствительные элементы систем навигации и управления
- Информационные технологии на предприятиях навигационного приборостроения
- Микромеханические датчики, системы и технологии
- Навигация и управление движением

Конференция будет проходить *в три этапа*:

- ◆ первый этап (**март 2010 г.**) — выступление с докладами в ЦНИИ "Электроприбор"
- ◆ второй этап (**июнь—сентябрь 2010 г.**) — обсуждение докладов в Интернете
- ◆ третий этап (**сентябрь—октябрь 2010 г.**) — подведение итогов Интернет-форума и подготовка докладов для публикации в сборнике.

Адрес и контактные телефоны Организационного комитета конференции:

ГНЦ РФ-ЦНИИ "Электроприбор"
Ул. Малая Посадская, 30
197046, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 499-82-10; Факс: (812) 232-33-76
E-mail: kmu@eprib.hi office@eprib.ru
<http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/kmu12/rindex.html>

УДК 62-50:621.3

С. М. Афонин, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр.,
Московский государственный институт
электронной техники (ТУ)
stat1@mail.ru

Исследование характеристик шагового пьезодвигателя нано- и микроперемещений

Получены характеристики составного пьезофиксатора и центрального составного пьезопреобразователя шагового пьезодвигателя. Определено влияние геометрических и физических параметров составного пьезопреобразователя и внешней нагрузки на его статические и динамические характеристики. Найдены передаточные функции составного пьезопреобразователя как электромеханической системы с распределенными или сосредоточенными параметрами. Исследованы статические и динамические характеристики шагового пьезодвигателя.

Ключевые слова: шаговый пьезодвигатель, пьезофиксатор, деформация пьезопреобразователя, нано- и микроперемещения, статические и динамические характеристики, передаточные функции.

Введение. Использование пьезодвигателя нано-перемещений перспективно для прецизионного совмещения в оборудовании микроэлектроники и нанотехнологии, компенсации температурных и гравитационных деформаций, коррекции волнового фронта при атмосферной турбулентности [1–6]. Пьезодвигатель (пьезопреобразователь, пьезоактюатор) работает на основе обратного пьезоэффекта, в котором перемещение достигается за счет деформации пьезодвигателя в диапазоне от единиц нанометров до единиц микрометров с погрешностью до десятых долей нанометра под действием внешнего электрического напряжения. Увеличение диапазона перемещения пьезопревода до десятков микрометров обеспечивается за счет использования составного пьезодвигателя (многослойного пьезоактюатора). Дальнейшее расширение диапазона перемещения до миллиметров с погрешностью позиционирования порядка десятых долей нанометра возможно при применении шагового пьезодвигателя.

При использовании нанотехнологий предъявляются требования изоляции оборудования от внешних вибраций, обеспечения работы сканирующего зондового микроскопа в условиях вакуума при перемещении зонда и образца [7]. Поэтому в зондо-

вых микроскопах используются шаговые пьезодвигатели, удовлетворяющие этим требованиям и позволяющие дистанционно управлять сближением зонда и образца в сканирующем зондовом микроскопе.

В статье рассмотрено использование структурно-параметрической модели и параметрических структурных схем пьезопреобразователя для расчета шагового пьезодвигателя. Шаговые пьезодвигатели находят широкое применение в точном машиностроении, энергетике, микроэлектронике, нанотехнологии и нанобиологии для прецизионного перемещения объектов управления с шагом от нанометров до десятков микрометров в диапазоне от нанометров до миллиметров. Проблема расчета деформации исполнительного составного пьезопреобразователя и определения статических и динамических характеристик шагового пьезопреобразователя как электромеханической системы с сосредоточенными или распределенными параметрами [6–9] в зависимости от параметров пьезопреобразователя и нагрузки является актуальной для механики таких систем.

Статические характеристики центрального составного пьезопреобразователя и составного пьезофиксатора. Кинематические схемы для двух вариантов шагового пьезодвигателя приведены на рис. 1, 2. Рис. 1 иллюстрирует кинематическую схему шагового пьезодвигателя при продольном пьезоэффекте, когда направление деформации совпадает с направлением напряженности электрического поля (P — вектор поляризации). Рис. 2 соответствует поперечному пьезоэффекту, когда направление деформации перпендикулярно направлению напряженности электрического поля.

На рис. 1 и 2 приняты следующие обозначения: E_3 — напряженность электрического поля по оси; Δl — перемещение составного преобразователя; M — перемещаемая масса нагрузки; C_a — жесткость армирующего элемента; C_e — жесткость упругой нагрузки; P — вектор поляризации; $F(t)$ — сила; $\xi(t)$ — смещение сечения пьезопреобразователя; δ — толщина пьезопластины; l — длина составного преобразователя; h — высота пьезопластины. На рис. 1 для каждого пьезопреобразователя шагового пьезодвигателя ось 3 направлена по его центральной оси, ось 1 перпендикулярна его центральной оси. Соответственно, на рис. 2 ось 1 направлена по

где $\xi(x, t)$ — смещение сечения пьезопреобразователя; x — координата; t — время; c^E — скорость звука при $E = \text{const}$; α — коэффициент затухания волны, учитывающий затухание колебаний из-за рассеивания энергии на тепловые потери при распространении волны в пьезопреобразователе.

Для пьезопреобразователя с закрепленным торцом при продольном пьезоэффекте для $x=0$ имеем $\xi(x, t) = 0$ и при инерционной нагрузке на пьезопреобразователь для $x=l$ получаем уравнение сил, действующих на его торец, в виде

$$T_3 S_0 = -M \partial^2 \xi(x, t) / \partial t^2,$$

где M — перемещаемая масса нагрузки.

Используем преобразование Лапласа

$$\Xi(x, p) = L\{\xi(x, t)\} = \int_0^\infty \xi(x, t) e^{-pt} dt,$$

где p — оператор Лапласа. Соответственно, при $x=l$ преобразование Лапласа выражения перемещения торца пьезопреобразователя (рис. 1, 2) имеет вид

$$\Xi(p) = L\{\xi(t)\} = \int_0^\infty \xi(t) e^{-pt} dt.$$

В результате преобразования волнового уравнения (5) имеем линейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с параметром p в виде

$$\frac{d^2 \Xi(x, p)}{dx^2} - \left[\frac{1}{(c^E)^2} p^2 + \frac{2\alpha}{c^E} p + \alpha^2 \right] \Xi(x, p) = 0.$$

Следовательно, из уравнения обратного пьезоэффекта с учетом действующих на торец пьезопреобразователя сил получаем

$$\left. \frac{d \Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = d_{33} E_3(p) - \frac{s_{33}^E M p^2 \Xi(p)}{S_0},$$

где $\Xi(p)$, $\Xi(x, p)$ — преобразования Лапласа перемещения торца пьезопреобразователя и перемещения сечения пьезопреобразователя при нулевых начальных условиях. Учитывая, что один торец пьезопреобразователя жестко закреплен при $x=0$, имеем

$$\Xi(x, p) = \frac{\Xi(p) \text{sh}(x\gamma)}{\text{sh}(l\gamma)}, \quad \left. \frac{d \Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = \frac{\Xi(p) \gamma}{\text{th}(l\gamma)},$$

$$\gamma = \frac{p}{c^E} + \alpha.$$

В результате выражение для составного пьезопреобразователя, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и инерционной нагрузке принимает вид

$$\frac{\Xi(p) \gamma}{\text{th}(l\gamma)} + \frac{\Xi(p) s_{33}^E M p^2}{S_0} = d_{33} E_3(p).$$

Из этого выражения определяем передаточную функцию составного пьезопреобразователя в виде

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}}{\frac{s_{33}^E M p^2}{S_0} + \frac{\gamma}{\text{th}(l\gamma)}}.$$

С учетом равенства $\frac{m(c^E)^2}{l} = \frac{S_0}{s_{33}^E}$ представим передаточные функции [3, 5] в виде

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33} l \text{th}(l\gamma)}{\frac{M l^2}{m(c^E)^2} \text{th}(l\gamma) p^2 + l\gamma}; \quad (6)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi(p)}{F(p)} = - \frac{l^2 \text{th}(l\gamma) / (m(c^E)^2)}{\frac{M l^2}{m(c^E)^2} \text{th}(l\gamma) p^2 + l\gamma}, \quad (7)$$

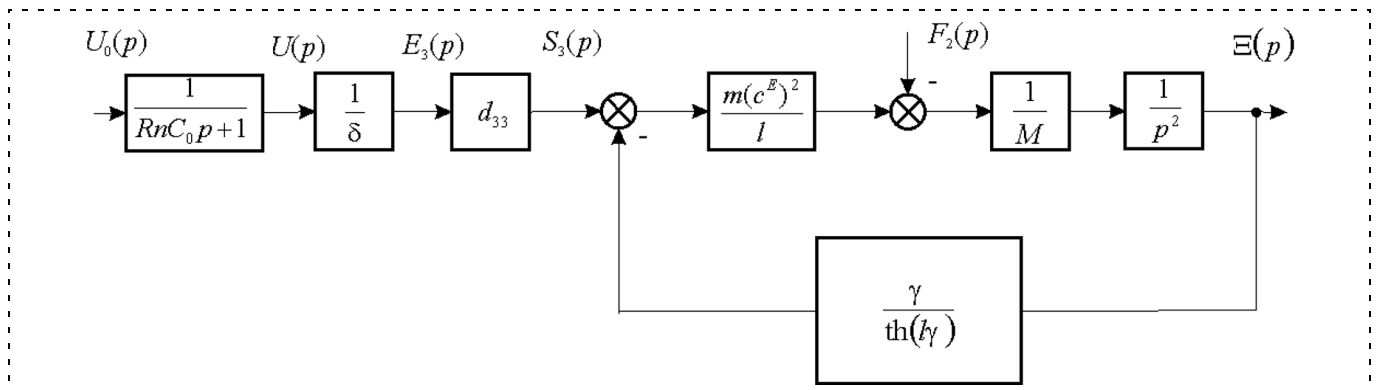


Рис. 3. Параметрическая структурная схема составного пьезопреобразователя, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте

где $E_3(p)$, $F(p)$ — соответственно преобразования Лапласа напряженности электрического поля в составном пьезопреобразователе и силы при нулевых начальных условиях; m — масса составного пьезопреобразователя. Этим уравнениям соответствует параметрическая структурная схема на рис. 3.

Если за входную величину принять изображение Лапласа напряжения источника питания $U_0(p)$, то

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = \frac{nd_{33}\text{th}(l\gamma)}{(T_a p + 1) \left[\frac{Ml^2}{m(c^E)^2} \text{th}(l\gamma)p^2 + l\gamma \right]};$$

$$T_a = RnC_0,$$

где T_a , R , C_0 — соответственно постоянная времени аperiodического звена, сопротивление согласующих цепей, емкость пьезопластины в составном пьезопреобразователе.

При поперечном пьезоэффекте, если одна из грани пьезопреобразователя жестко закреплена при $x = 0$, получаем передаточную функцию

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{31}\text{th}(l\gamma)}{\frac{Ml^2}{m(c^E)^2} \text{th}(l\gamma)p^2 + l\gamma}.$$

Если за входную величину принять изображение Лапласа напряжения источника питания $U_0(p)$, то

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = \frac{nhd_{31}\text{th}(l\gamma)/\delta}{(T_a p + 1) \left[\frac{Ml^2}{m(c^E)^2} \text{th}(l\gamma)p^2 + l\gamma \right]}.$$

Рассмотрим работу пьезопреобразователя для жестко закрепленной одной грани пьезопреобразо-

вателя при $M/m \gg 1$. Представим (6), (7) в удобном для преобразования виде:

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}l}{\frac{Ml^2}{m(c^E)^2} p^2 + l\gamma \text{cth}(l\gamma)}; \quad (8)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi(p)}{F(p)} = -\frac{l^2/(m(c^E)^2)}{\frac{Ml^2}{m(c^E)^2} p^2 + l\gamma \text{cth}(l\gamma)}. \quad (9)$$

Используя аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда, получаем в диапазоне частот $0 < \omega < 0,01c^E/l$ следующие выражения:

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}l}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1}; \quad (10)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi(p)}{F(p)} = -\frac{s_{33}^E l / S_0}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1}; \quad (11)$$

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = \frac{nd_{33}}{(T_a p + 1)(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1)}, \quad (12)$$

где $T_t = l\sqrt{M/m}/c^E$, $\xi_t = \alpha l\sqrt{m/M}/3$ — соответственно постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена для составного пьезопреобразователя при продольном пьезоэффекте. Этим передаточным функциям соответствует параметрическая структурная схема на рис. 4.

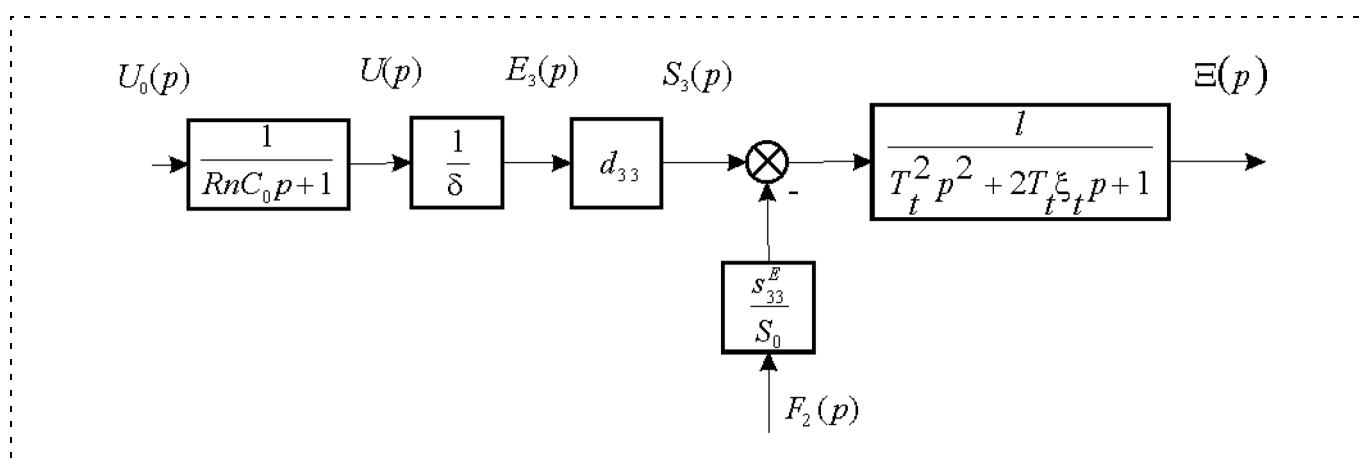


Рис. 4. Параметрическая структурная схема составного пьезопреобразователя при продольном пьезоэффекте и массе нагрузки, существенно превышающей массу пьезопреобразователя

Следовательно, передаточные функции составного пьезопреобразователя, закрепленного одной гранью, при $M/m \gg 1$ и поперечном пьезоэффекте могут быть представлены в виде

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{nd_{31}h}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1}; \quad (13)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi(p)}{F(p)} = -\frac{s_{11}^E l / S_0}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1}; \quad (14)$$

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = \frac{nhd_{31}/\delta}{(T_a p + 1)(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1)}, \quad (15)$$

где $T_t = nh\sqrt{M/m}/c^E$, $\xi_t = \alpha nh\sqrt{m/M}/3$ — соответственно постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена составного пьезопреобразователя при поперечном пьезоэффекте.

Аналогично при закрепленном торце пьезопреобразователя при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке при $x = l$ имеем уравнение сил, действующих на торце пьезопреобразователя, в виде

$$T_3 S_0 = -M\delta^2 \xi(x, t) / \delta t^2 - (C_a + C_e) \xi(x, t),$$

где M — перемещаемая масса; C_a , C_e , C_c — жесткости армирующего элемента, упругой нагрузки и составного пьезопреобразователя.

Из уравнения обратного пьезоэффекта с учетом действующих на торец пьезопреобразователя сил получаем

$$\left. \frac{d\Xi(p)}{dx} \right|_{x=l} = d_{33} E_3(p) - \frac{s_{33}^E M p^2 \Xi(p)}{S_0} - \frac{s_{33}^E (C_a + C_e) \Xi(p)}{S_0}.$$

Следовательно, получаем выражение для пьезопреобразователя, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке

$$\frac{\Xi(p)\gamma}{\text{th}(l\gamma)} + \frac{\Xi(p)s_{33}^E M p^2}{S_0} + \frac{\Xi(p)s_{33}^E (C_a + C_e)}{S_0} = d_{33} E_3(p).$$

Из этого выражения определяем передаточную функцию составного пьезопреобразователя в виде

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}}{\frac{s_{33}^E M p^2}{S_0} + \frac{\gamma}{\text{th}(l\gamma)} + \frac{s_{33}^E (C_a + C_e)}{S_0}}.$$

Обозначим $C_c = \frac{S_0}{s_{33}^E l}$ — жесткость составного

пьезопреобразователя при продольном пьезоэффекте. Тогда передаточная функция пьезопреобразователя, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке принимает вид

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33} l}{\frac{M p^2}{C_c} + l\gamma \text{cth}(l\gamma) + \frac{(C_a + C_e)}{C_c}}.$$

Соответственно

$$W_1(p) = \Xi(p)/U(p) = d_{33} n / \{M p^2 / C_c + l\gamma \text{cth}(l\gamma) + (C_a + C_e) / C_c\}, \quad (16)$$

где $\Xi(p)$ — преобразование Лапласа перемещения торца составного пьезопреобразователя по оси 3 и $U(p)$ — преобразование Лапласа напряжения на обкладках составного пьезопреобразователя при нулевых начальных условиях.

Следовательно, получаем выражение для статического перемещения $\xi(l, \infty)$ армированного составного пьезопреобразователя в установившемся режиме при подаче напряжения $U(t) = U_m \cdot 1(t)$ (где $1(t)$ — единичная функция) при упругоинерционной нагрузке, где U_m — максимальная величина (амплитуда) напряжения,

$$\xi(l, \infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi(l, t) = \lim_{p \rightarrow \infty} p W(p) U_m / p.$$

Отсюда получаем

$$\xi(l, \infty) = \lim_{\substack{p \rightarrow \infty \\ \alpha \rightarrow 0}} d_{33} n U_m / \{l(p/c^E + \alpha) / \text{th}[l(p/c^E + \alpha)] + (C_a + C_e) / C_c\}$$

и в окончательном виде

$$\xi(l, \infty) = d_{33} n U_m / [1 + (C_a + C_e) / C_c]. \quad (17)$$

Соответственно, передаточная функция $W_1(p)$ составного пьезопреобразователя на рабочих частотах при упругоинерционной нагрузке в диапазоне рабочих частот $0 < \omega < 0,01 c^E / l$ записывается в виде

$$W_1(p) = \Xi(p)/U(p) = \{d_{33} n / [1 + (C_a + C_e) / C_c]\} / (T_t^2 p + 2T_t \xi_t p + 1),$$

где $T_t = \sqrt{M / (C_a + C_e + C_c)}$, $\xi_t = \alpha l^2 C_c / [3c^E \times \sqrt{M / (C_a + C_e + C_c)}]$ — соответственно, постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Динамические характеристики шагового пьезодвигателя. Рассмотрим различные режимы работы шагового пьезодвигателя. В течение периода тактирующих импульсов T торец центрального электро-механического пьезопреобразователя перемещается в рабочее время шага $T_s = \gamma_s T$, где γ_s — скважность, а во время паузы длительностью $T(1 - \gamma_s)$ удерживается пьезоэлектрическим фиксатором, причем текущее рабочее время равно εT , причем $0 \leq \gamma_s \leq 1$ и $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Для расчета динамических характеристик применяем схему импульсной электромеханической системы [10] шагового пьезодвигателя с передаточными функциями фиксирующего элемента $W_f(p)$ и центрального составного пьезопреобразователя $W(p)$ и эквивалентной передаточной функцией шагового пьезодвигателя $W_e(p)$, имеющими следующий вид:

$$W_f(p) = \frac{1 - e^{-p\gamma_s T}}{p},$$

$$W_e(p) = W_f(p)W(p) = \frac{1 - e^{-p\gamma_s T}}{p} W(p).$$

Следовательно, модифицированное Z-преобразование эквивалентной передаточной функции шагового пьезодвигателя записывается в виде

$$W_e(z, \varepsilon) = Z_\varepsilon \left\{ \frac{1 - e^{-p\gamma_s T}}{p} W(p) \right\} =$$

$$= Z_\varepsilon \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} - Z_\varepsilon \left\{ \frac{e^{-p\gamma_s T} W(p)}{p} \right\}. \quad (18)$$

Из этого выражения в зависимости от условий работы центрального составного пьезопреобразователя, определяемых электрической схемой вклю-

чения центрального пьезопреобразователя и внешней механической нагрузкой, получаем расчетные временные диаграммы перемещения шагового пьезодвигателя (рис. 5), учитывающие электрическую и механическую нагрузки центрального составного пьезопреобразователя.

При работе центрального составного пьезодвигателя в режиме интегратора, когда центральный пьезопреобразователь включен как элемент отрицательной обратной связи интегратора, и постоянная времени интегратора $T_i \gg T_t \gg T_a$, где $T_a = RnC_0$ — постоянная времени апериодического звена, передаточная функция центрального составного пьезопреобразователя в этой системе управления имеет вид

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = \frac{k_c}{T_i p}, \quad (19)$$

где k_c — коэффициент передачи составного пьезопреобразователя, причем

$$k_c = \begin{cases} nd_{33}/[1 + (C_a + C_e)/C_c] & \text{— при продольном пьезоэффекте;} \\ (nhd_{31}/\delta)/[1 + (C_a + C_e)/C_c] & \text{— при поперечном пьезоэффекте.} \end{cases}$$

Получаем временную диаграмму перемещения шагового пьезодвигателя (рис. 5, а) с линейно увеличивающимся рабочим перемещением центрального составного пьезопреобразователя в течение длительности шага T_s .

Если с учетом емкости центрального пьезопреобразователя и сопротивления согласующей цепи импульсной системы управления постоянная времени апериодического звена $T_a \gg T_t$, то передаточная функция центрального составного пьезопреобразователя в режиме апериодического звена имеет вид

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = \frac{k_c}{T_a p + 1}. \quad (20)$$

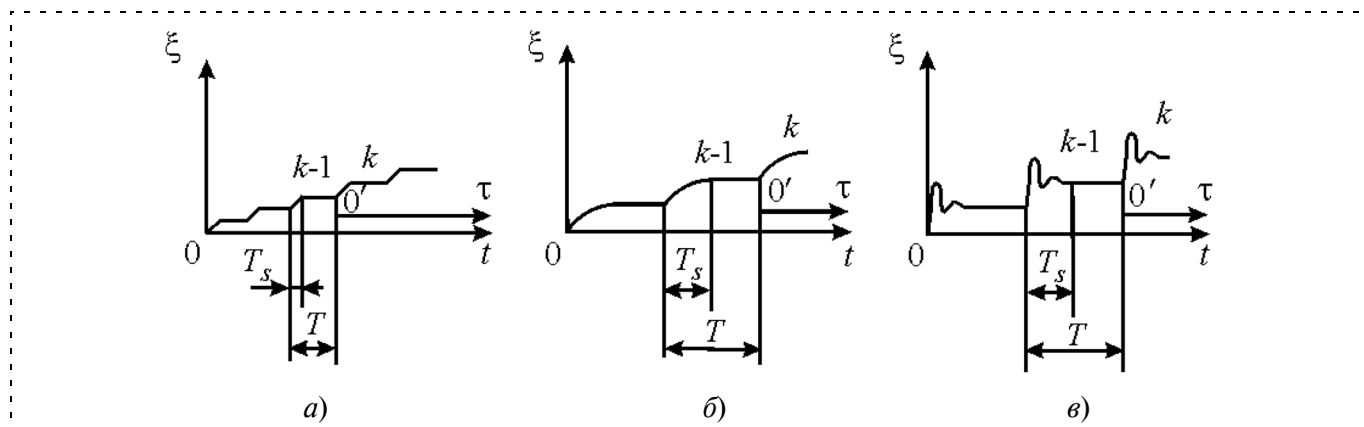


Рис. 5. Временные диаграммы перемещения шагового пьезодвигателя при работе центрального пьезопреобразователя в режимах: а — интегратора; б — периодического звена; в — колебательного звена

Следовательно, получаем временную диаграмму перемещения шагового пьезодвигателя (рис. 5, б) с получением максимального шага при условии $T_s = \gamma_s T \geq 3T_a$.

При работе центрального составного пьезопреобразователя при малом сопротивлении согласующей цепи при $T_t \gg T_a$ и $M \gg m$ в режиме колебательного звена передаточная функция центрального составного пьезопреобразователя имеет вид

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = \frac{k_c}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1}. \quad (21)$$

На временной диаграмме (рис. 5, в) наблюдается перерегулирование в шаге шагового пьезодвигателя.

Найдем предельные аналитические выражения для перемещения торца центрального составного пьезопреобразователя как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами [8, 10] на k -м шаге с учетом длительности шага $T_s = \gamma_s T$, текущего времени τ на последнем шаге ($0 \leq \tau \leq T_s$) и при жестком удержании пьезоэлектрическим фиксатором торца центрального составного пьезопреобразователя.

Соответственно, для центрального составного пьезопреобразователя в режиме интегратора при $T_s \gg T_i \gg T_t \gg T_a$, коэффициенте наклона k_m , шаге β_m пьезопреобразователя в k -м шаге перемещение шагового пьезодвигателя равно

$$\xi(\tau) = \beta_m(k - 1) + k_m \tau = \beta_m(k - 1 + \tau/T_s), \quad (22)$$

где β_m — шаг для шагового пьезопреобразователя, причем

$$\beta_m = \begin{cases} nd_{33}U_m/[1 + (C_a + C_e)/C_c] — \text{при продольном пьезоэффекте;} \\ (nhd_{31}U_m/\delta)/[1 + C_a + C_e)/C_c] — \text{при поперечном пьезоэффекте.} \end{cases}$$

Для центрального пьезопреобразователя в режиме апериодического звена при $T_s \gg T_a \gg T_t$ перемещение шагового пьезодвигателя

$$\xi(\tau) = \beta_m\{k - 1 + (1 - e^{-\tau/T_a})\}. \quad (23)$$

Для центрального составного пьезопреобразователя в режиме колебательного звена при $T_s \gg T_t \gg T_a$ и $M \gg m$ при рассмотрении электромеханической системы с сосредоточенными параметрами перемещение шагового пьезодвигателя имеет вид

$$\xi(\tau) = \beta_m\{k - 1 + [1 - (e^{-\xi_t \tau/T_t} / \sqrt{1 - \xi_t^2}) \sin(\omega_t \tau + \varphi_t)]\}; \quad (24)$$

$$\omega_t = \sqrt{1 - \xi_t^2}/T_t; \quad \varphi_t = \arctg(\sqrt{1 - \xi_t^2}/\xi_t).$$

Заключение. Полученные передаточные функции позволяют учитывать свойства составных пьезопреобразователей при продольном и поперечном пьезоэффектах и расчете электромеханической деформации, статических и динамических характеристик шагового пьезодвигателя с учетом физических параметров пьезопреобразователей, внешней нагрузки и электрического сопротивления согласующих цепей.

Список литературы

1. Вардан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.
2. Афонин С. М. Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений // Приборы и системы управления. 1998. № 2. С. 41–42.
3. Афонин С. М. Параметрическая структурная схема пьезопреобразователя // Известия РАН. Механика твердого тела. 2002. № 6. С. 101–107.
4. Афонин С. М. Абсолютная устойчивость системы управления деформацией пьезопреобразователя // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 2. С. 112–119.
5. Афонин С. М. Исследование абсолютной устойчивости системы управления деформацией пьезопреобразователя для нано- и микроперемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 1. С. 10–16.
6. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. 832 с.
7. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.
8. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. М.: Мир, 1978. 285 с.
9. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с распределенными параметрами. М.: Энергоиздат, 1982. 472 с.
10. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Профессия, 2004. 752 с.

Ю. Г. Бухгольц, канд. техн. наук, доц.,
О. И. Новокрещенов, ст. преподаватель,
А. Г. Приступ, канд. техн. наук, доц.,
А. Ф. Шевченко, д-р техн. наук, зав. кафедрой,
 Новосибирский государственный
 технический университет
 em_nstu@em.power.nstu.ru

Разработка отрезка серии магнитоэлектрических синхронных электродвигателей с дробными зубцовыми обмотками

Рассмотрены вопросы создания отрезка серии синхронных электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов и дробными зубцовыми обмотками. Описаны подходы к разработке, принятые решения, методы расчета, моделирования, результаты экспериментальных исследований. Проведено сравнение и показаны преимущества разработанного отрезка серии с аналогичными асинхронными электродвигателями серии АИ.

Ключевые слова: синхронные электродвигатели, постоянные магниты, дробные зубцовые обмотки, серия, разработка, методы моделирования.

Введение

Развитие промышленного производства, его эффективность и экономичность непосредственно определяются системами высокоэффективных электроприводов, основным элементом которых является электродвигатель, что определяет актуальность разработки высокоэффективных электродвигателей с широким диапазоном регулировки для электроприводов, применяемых в современных технологических процессах, и обеспечение их совместимости с системами программного управления.

Современные электродвигатели зарекомендовали себя как удобные и эффективные электромеханические преобразователи. Основные требования к электрическим машинам следующие:

- минимальные масса и габаритные размеры;
- высокие энергетические показатели;
- высокая перегрузочная способность;
- высокий пусковой момент;
- широкий диапазон регулировки частоты вращения.

Первые управляемые электроприводы реализованы на базе коллекторных двигателей постоянного и переменного тока. Данные двигатели имеют наибольшую массу, габаритные размеры и стоимость по сравнению с асинхронными и синхронными при одинаковых номинальных данных. Коллекторные двигатели имеют существенный недостаток, определяемый наличием щеточно-коллекторного узла, требующего постоянного обслуживания и снижающего надежность работы электропривода.

Развитие элементной базы в промышленной электронике обусловило разработку частотно-регулируемых электроприводов с использованием асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, обладающих наименьшими массогабаритными и стоимостными показателями, простой технологией изготовления и высокой надежностью в эксплуатации. Однако применение серийных асинхронных двигателей типа АИ общепромышленного назначения не позволило обеспечить требуемую эффективность работы частотно-регулируемых электроприводов. Это обстоятельство обусловило разработку специализированной модификации частотно-регулируемых двигателей типа АИ и методик их расчета с учетом питания от преобразователей частоты [1]. Применение этой модификации позволило обеспечить требуемую эффективность электропривода несмотря на то, что энергетические показатели разработанных двигателей (КПД и $\cos\phi$) ниже на 2...3 % по сравнению с асинхронными двигателями общепромышленного назначения.

Таким образом, использование асинхронных электродвигателей, питаемых от преобразователей частоты, позволяет частично реализовать приведенные выше требования, однако необходимость поддерживать в таких машинах намагничивающий ток снижает эффективность их применения. Более полно обеспечить выполнение приведенных выше требований можно путем замены общепромышленных асинхронных электродвигателей магнитоэлектрическими машинами, работающими как вентильные электродвигатели совместно с преобразователем частоты.

Поэтому актуальной является задача разработки серий синхронных магнитоэлектрических машин общепромышленного применения.

Управляемые электроприводы с использованием синхронных двигателей традиционно находили ограниченное применение вследствие того, что синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением имеют большие массогабаритные и стоимостные показатели и невысокую надежность из-за наличия щеточно-коллекторного узла, а в двигателях с возбуждением от постоянных магнитов с низкими энергетическими показателями не представлялось возможным обеспечить конкурентность по сравнению с асинхронными двигателями.

В последние годы разработаны и освоены промышленностью постоянные магниты с высокой энергией на базе композиций самарий—кобальт и неодим—железо—бор (NeFeB). Основные параметры таких магнитов достигают значений: остаточная индукция $B_r = 1,4...1,5$ Тл, коэрцитивная сила $H_c = 900...1000$ кА/м, максимальная энергия $(BH)_{\max} = 390...400$ кДж/м³, рабочая температура $t = 180...200$ °С. Достаточная доступность этих магнитов обусловила применение их в синхронных двигателях при обеспечении конкурентоспособно-

сти по отношению к асинхронным двигателям как за счет параметров самих магнитов, позволяющих повысить уровень электромагнитных нагрузок и, следовательно, использовать активный объем, так и за счет отсутствия обмотки возбуждения, исключая потери в роторе и наличие щеточно-коллекторного узла.

Питание обмоток вентильных электрических машин от преобразователя частоты снимает необходимость жесткой привязки числа полюсов машины к частоте питающей сети для обеспечения требуемой частоты вращения. Это позволяет использовать при заданной частоте вращения многополюсные электрические машины, реализующие более высокие моменты на валу при тех же габаритных размерах, чем машины низкой полюсности. Однако использование высокой полюсности ($2p = 10$ и более) в машинах обычных габаритных размеров упирается в технологические ограничения на выполнение зубцово-пазовой зоны машины.

Одним из эффективных путей создания многополюсных электрических машин является применение обмоток с числом пазов на полюс и фазу, меньшим 1 ($q < 1$). Такие обмотки получили название "зубцовые" [3].

На кафедре электромеханики Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) в течение ряда лет выполняются разработки и исследования синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов и дробными зубцовыми обмотками ($q < 1$) [3].

Принципиальная возможность повышения эффективности электрических машин при использовании в системе возбуждения постоянных магнитов и дробных зубцовых обмоток обусловлена:

- отсутствием намагничивающего тока, что позволяет повысить активную составляющую потребляемого тока и тем самым увеличить момент и мощность машины при сохранении электромагнитных нагрузок, например, как в асинхронном электродвигателе;
- отсутствием обмоток и токов в роторе, снижающим общий уровень потерь в машине, что позволяет повысить ее электромагнитные нагрузки и, тем самым, снизить габаритные размеры и массу машины;
- существенным увеличением полюсности, позволяющим уменьшить высоту ярма статора и за счет этого увеличить диаметр расточки статора электродвигателя и повысить развиваемый момент без увеличения внешних габаритных размеров машины;
- использованием дробных зубцовых обмоток, позволяющим реализовать высокую полюсность машины, о преимуществах которой говорилось выше, а также существенно сократить вылет и длину лобовых частей обмотки и упростить технологию ее укладки.

В свете рассмотренных положений на кафедре электромеханики Новосибирского государственного технического университета разработан отрезок серии синхронных двигателей для частотно-регулируемого электропривода промышленных установок — насосов, вентиляторов и др.

Особенности проектирования

Принятые технические решения

Разработанный отрезок серии синхронных электродвигателей соответствует по диапазонам мощностей и частот вращения отрезку серии асинхронных электродвигателей АИ, представленному в табл. 1.

Двигатели АИ выполнены в закрытом исполнении IP-44 с внешним обдувом вентилятором на валу двигателя.

При разработке отрезка серии синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов, работающих в электроприводах с частотным регулированием при питании от блока управления (включающего преобразователь частоты, управляющий контроллер и датчик положения ротора), решались следующие задачи:

- габаритно-установочные размеры синхронных двигателей не должны быть больше, чем у аналогов серии АИ;
- энергетические показатели (КПД и $\cos\phi$) должны быть выше, чем у аналогов;
- требуется разработать методику расчета на базе научно-теоретических и экспериментальных исследований с учетом применения на роторе магнитов высоких энергий и влияния питания синхронного двигателя от преобразователя частоты.

Определенные трудности были обусловлены выбором системы охлаждения, так как при работе с регулированием частоты вращения в диапазоне 0,5...1,2 от номинальной частоты вращения реализация самовентиляции не обеспечивает требуемой эффективности во всем диапазоне частот вращения, а применение независимой вентиляции в раз-

Таблица 1

Распределение по мощностям, частотам вращения и высоте оси вращения электродвигателей серии АИ

Высота оси вращения	Частота вращения, 1500 мин ⁻¹	Частота вращения, 3000 мин ⁻¹
63 мм	0,37 кВт	0,37 кВт 0,55 кВт
71 мм	0,55 кВт 0,75 кВт	0,75 кВт 1,1 кВт
80 мм	1,1 кВт 1,5 кВт	1,5 кВт 2,2 кВт
90 мм	2,2 кВт	—

работанном отрезке нецелесообразно. В соответствии с вышесказанным в разрабатываемом отрезке синхронных двигателей реализовано естественное охлаждение.

Реализация поставленных задач достигнута за счет комплекса решений, обеспечивающих повышенное использование активных материалов, а именно:

1) в синхронных двигателях разработанного отрезка применена однозубцовая обмотка с числом пазов на полюс и фазу $q < 1$. Применение такой обмотки позволяет уменьшить расход меди за счет уменьшения длины лобовой части (ее длина практически равна зубцовому делению), осевую длину корпуса двигателя и упростить технологию укладки, так как каждая катушка охватывает один зубец статора;

2) ротор имеет "коллекторный" тип (тангенциальное размещение магнитов в пазах сердечника ротора), что обеспечивает концентрацию магнитного потока в воздушном зазоре;

3) все двигатели с частотой вращения 3000 мин^{-1} и двигатели мощностью $0,37...0,75 \text{ кВт}$ с частотой вращения 1500 мин^{-1} выполнены с числом полюсов $2p = 10$, а двигатели мощностью $1,1...2,2 \text{ кВт}$ с частотой вращения 1500 мин^{-1} — с $2p = 16$. Выбранная полюсность позволила значительно уменьшить высоту ярма сердечника статора по сравнению с двигателями-аналогами серии АИ (в разработанном отрезке значение ярма статора принято из обеспечения механической жесткости сердечника, а не из допустимого значения индукции в ярме). При одинаковом активном объеме $D^2 l_1$ (где D — диаметр расточки статора, l_1 — длина сердечника) уменьшение высоты ярма позволило уменьшить внешний диаметр D_a и увеличить площадь паза под обмотку, что, соответственно, реализовано за счет уменьшения высоты оси вращения (габаритных размеров) и электрических потерь в обмотке статора, что важно при естественном охлаждении;

4) корпус двигателя с продольно-поперечным оребрением из алюминиевого сплава, выводное устройство двигателя размещается на заднем подшипниковом щите и выполняется с использованием стандартных разъемов. Данное решение позволило выполнять корпус для каждого двигателя в соответствии с длиной сердечника статора и увеличить коэффициент оребрения, что дало возможность обеспечить допустимый нагрев обмотки статора при естественном охлаждении.

Важной задачей при разработке отрезка серии синхронных двигателей с постоянными магнитами для частотно-регулируемых электроприводов является проведение научно-технических исследований. Методики расчета электрических машин, разработанные для электрических машин нормального исполнения с классической обмоткой статора с числом пазов на полюс и фазу, большим единицы, как

правило, позволяют для машин нетрадиционных конструкций и машин с нетрадиционными обмоточными структурами получить лишь качественную оценку рабочих характеристики, не обеспечивая достаточную для практики точность.

Питание двигателей от преобразователя частоты, применение однозубцовых обмоток и магнитов высоких энергий потребовали разработки методики расчета с учетом всех этих факторов.

Расчеты и моделирование

Разработанная серия электрических машин имеет следующие конструктивные особенности и особенности работы:

- в индукторе (роторе) используются высококоэрцитивные магниты. Такие магниты обеспечивают требуемое магнитное поле машины, хорошо противостоят размагничивающему действию реакции якоря в любых возможных режимах работы и аварийных режимах электродвигателя. Однако сравнительно высокая стоимость требует решения задач минимизации объема магнитов, унификации их размеров либо в рамках всей серии, либо в рамках отрезков серии;
- внутреннее расположение магнитов ротора, обеспечивая их надежное крепление, защиту от механических воздействий и защиту от размагничивающего действия реакции якоря, требует при проведении проектных расчетов точного учета эффектов насыщения стали магнитопровода;
- дробные зубцовые обмотки, несмотря на безусловную их эффективность в многополюсных электрических машинах, создают в воздушном зазоре машины широкий спектр пространственных гармоник поля реакции якоря. Эти гармоники, вращаясь не синхронно с ротором, при неблагоприятном сочетании геометрии и конструкции ротора могут создавать существенные добавочные потери при нагрузке, вызывая снижение КПД и повышение нагрева машины, что требует учета при проектировании. Кроме того, наличие высших пространственных гармоник поля реакции якоря обуславливает повышенное значение сопротивления дифференциального рассеяния статорной обмотки, учет которого необходим как при расчете характеристик машины, так и для разработки системы управления.

Практически применяемые методики проектирования как асинхронных, так и синхронных электрических машин ориентированы на традиционно выпускаемые машины и содержат ряд упрощений и поправочных коэффициентов, полученных на основе статистики, собранной в результате многочисленных испытаний и эксплуатации серийных машин. Применение таких методов для новых конструкций и нетрадиционных обмоточных структур дает только качественную оценку, приводя к суще-

ственным погрешностям, требует большого объема экспериментальных исследований для получения достоверных результатов. Эти обстоятельства могут существенно увеличивать сроки и стоимость проектирования и опытно-конструкторских работ, что привело к необходимости использования других подходов к разработке серии вентильных электродвигателей.

При разработке серии синхронных электродвигателей эффективно сочетались как современные аналитические и численные методы моделирования электрических машин, так и традиционные подходы к разработке. В частности, реализованы следующие принципы:

- для моделирования магнитного поля в активном объеме разрабатываемых электродвигателей применялись современные методы численного моделирования, использующие математический аппарат метода конечных разностей. В частности, были использованы программы 2D-моделирования [5], сочетающие в себе высокую производительность, необходимую при проведении многовариантных расчетов, с точностью получаемых решений. Такой подход позволил провести моделирование большого числа вариантов конструкции электродвигателей при корректном учете влияния на параметры и характеристики машины эффектов насыщения отдельных участков магнитопровода, что особенно важно для конструкций с внутренним расположением магнитов ротора;
- численное моделирование результирующего магнитного поля машины (поля возбуждения и поля реакции якоря) и анализ полученных законов изменения индукции в воздушном зазоре машины на базе двумерного преобразования Фурье позволили определить основные временные и пространственные гармоники магнитного поля, вращающиеся не синхронно с ротором и вызывающие добавочные потери при нагрузке машины;
- для анализа добавочных потерь в роторе электродвигателя от несинхронно вращающихся полей реакции якоря использовано моделирование ротора машины на базе каскадных E-H схем замещения [4] и аналитические решения для полей вихревых токов в конструктивных элементах машины, находящиеся под воздействием бегущего магнитного поля. Эти модели и решения позволили провести расчет добавочных потерь и при необходимости ми-

Таблица 2

Распределение спроектированного отрезка серии синхронных электродвигателей по мощностям, высотам оси вращения и частотам вращения

Высота оси вращения	Частота вращения 1500 мин ⁻¹	Частота вращения 3000 мин ⁻¹
56 мм	—	0,37 кВт 0,55 кВт 0,75 кВт
63 мм	0,37 кВт 0,55 кВт 0,75 кВт	1,1 кВт 1,5 кВт 2,2 кВт
71 мм	1,1 кВт 1,5 кВт 2,2 кВт	—

нимизировать до приемлемого уровня этот вид потерь;

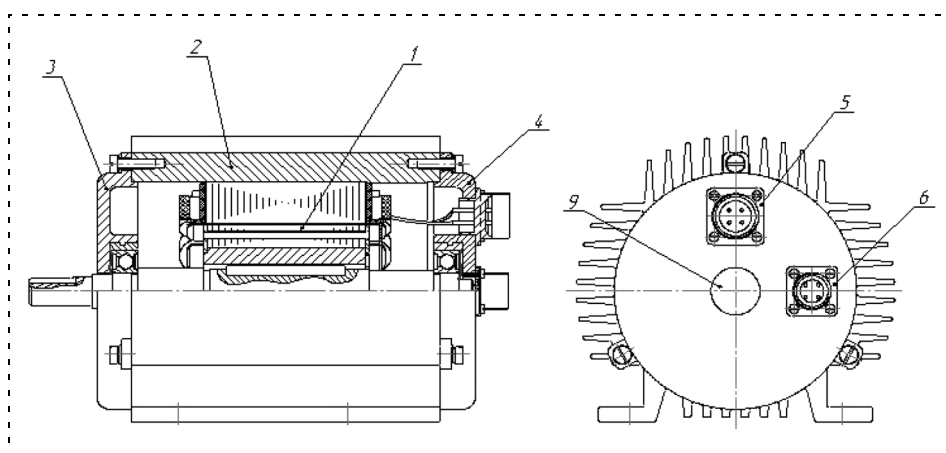
- использование при анализе теплового состояния машины как собственных методик, основанных на тепловых схемах замещения в сочетании с численным конечно-разностным моделированием тепловых полей в активном объеме машины, так и специализированного программного пакета MotorCAD позволило с достаточной для практики точностью вести оценку теплового состояния проектируемых машин и получить приемлемые температуры нагрева элементов конструкции разработанной серии электродвигателей.

Результаты проектирования

В результате проведенных работ спроектирован отрезок серии электродвигателей, распределение которых по мощностям и частотам вращения представлено в табл. 2.

Спроектированные электродвигатели не имеют вентилятора на валу, т. е. работают с естественным охлаждением.

О конструкции электродвигателей дает представление рисунок.



Электродвигатель основного исполнения:

1 — ротор с постоянными магнитами; 2 — статор; 3 — передний подшипниковый щит; 4 — задний подшипниковый щит; 5 — силовой разъем; 6 — информационный разъем

Проверку расчетных данных проводили по результатам экспериментальных исследований двух макетных образцов мощностью 2,2 кВт и 0,75 кВт при частоте вращения 1500 мин⁻¹.

Программа испытаний:

1. Определение электромагнитного момента в статическом режиме ($n = 0$) при питании обмотки статора постоянным током, соответствующим амплитуде действующего значения тока статора.

2. Характеристики холостого хода: $I_1, U_1, P_{xx} = f(n)$.

3. Определение зависимости $E_0 = f(n)$ в режиме синхронного генератора.

4. Рабочие характеристики при $n = \text{const}$: $P_1, I_1, M, \eta = f(P_2)$.

5. Регулировочные характеристики при $M = \text{const}$ и $I_1 = \text{const}$: $P_1, P_2, U, \eta = f(n)$.

Здесь I_1 — ток статора; U_1 — фазное напряжение; P_{xx} — потери холостого хода; E_0 — электродвижущая сила холостого хода; M — момент на валу двигателя; P_2 — полезная мощность на валу; P_1 — потребляемая мощность; η — коэффициент полезного действия; n — частота вращения.

Экспериментальные исследования проводили при питании двигателя от блока управления (преобразователя частоты и датчика положения ротора). Нагрузка электродвигателей, измерение развиваемых моментов, мощности, а также подводимых токов, напряжения и мощности выполнялось на оборудовании фирмы MAGTROL (нагрузочные динамометры, датчики момента, анализаторы мощности). Использование указанного оборудования позволило проводить высокоточные измерения требуемых параметров и исключить погрешности измерений, вызванные несинусоидальностью питания и погрешностями тарировки обычных нагрузочных машин.

Выводы и перспективы

1. Разработанные двигатели выполнены с меньшими габаритными размерами по сравнению с двигателями-аналогами серии АИ. Как видно из табл. 2, разработанные двигатели мощностью 0,37...0,75 кВт при частоте вращения 1500 мин⁻¹ имеют высоту оси вращения $h = 63$ мм, двигатели мощностью 1,1...2,2 кВт при частоте вращения 1500 мин⁻¹ — высоту оси вращения $h = 71$ мм. Таким образом, синхронные двигатели разработанного отрезка серии выполнены в габаритных размерах на ступень ниже, чем двигатели-аналоги серии АИ (табл. 1, 2).

2. Масса двигателей меньше в среднем на 17...20 % по сравнению с двигателями-аналогами серии АИ.

3. Коэффициент полезного действия разработанного отрезка синхронных двигателей находится в пределах 84...88 % (меньшие значения относятся

Сравнительные данные расчета и экспериментальных исследований

Мощность, Вт		Номинальный ток, А	Потери холостого хода, Вт	Коэффициент полезного действия, %
2200	Расчет	9,2	142,6	88
	Опыт	9,5	98	90
750	Расчет	3,8	41	83
	Опыт	3,8	20	87

к меньшей мощности) в то время, как у двигателей АИ — в пределах 70...86 %.

4. Результаты экспериментальных исследований, проведенных в целях проверки расчета отрезка серии синхронных электродвигателей, выполненных на двух макетных образцах, представлены в табл. 3.

5. Разработанные электродвигатели, имея естественное охлаждение, позволяют по сравнению со своими аналогами серии АИ обеспечить более высокие моменты на низких частотах вращения. Это обусловлено именно естественной системой охлаждения, эффективность которой при уменьшении частоты вращения не снижается по сравнению с системой охлаждения электродвигателей серии АИ, имеющих вентилятор на валу электродвигателя.

6. Дальнейшее развитие разработанного отрезка серии синхронных электродвигателей предполагается путем более полной интеграции в единую конструкцию электромеханического преобразователя, силового полупроводникового преобразователя, требуемого набора датчиков и управляющего контроллера. Такая интеграция позволит в итоге реализовать высокоэффективную альтернативу асинхронному электродвигателю, обладающую такими качественными отличиями, как энергетическая эффективность, управляемость, наличие встроенных систем защиты и контроля, возможность оптимизации рабочих параметров под конкретную область применения и т. д.

Список литературы

1. Унифицированная серия асинхронных двигателей Информ-электро / В. И. Радин, Й. Лондин, В. Д. Розенкноп и др.; Под ред. В. И. Радина. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
2. Балагуров В. А., Галгеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
3. Шевченко А. Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными $q < 1$ зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов // Электротехника. 2007. № 9. С. 3—8.
4. Литвинов Б. В., Давыденко О. Б. Типовые звенья и каскадные схемы замещения электрических машин. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 215 с.
5. Meeker D. C. Finite Element Method Magnetics, Version 4.0.1 (02Apr2007 Build), <http://femm.foster-miller.net>.

В. И. Иванчура¹, д-р техн. наук, проф.,

В. В. Суханов², канд. техн. наук, доц.,

Н. А. Никулин¹, аспирант,

¹ Политехнический институт Сибирского федерального университета, г. Красноярск

² Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск

nik_nick@mail.ru

Электропривод с многофазным линейным асинхронным двигателем поперечного потока

Определяются тяговые и подъемные усилия многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока, нелинейно зависящие от потребляемого тока, скольжения и изменяющегося зазора между индуктором и вторичным элементом. Описана комплексная имитационная модель электропривода с частотно-токовым управлением, позволяющая проводить исследования установившихся и переходных процессов, а также осуществлять синтез системы автоматического регулирования, обеспечивающей требуемые показатели качества управления электропривода.

Ключевые слова: электропривод, многофазный линейный двигатель, поперечный поток, число фаз, высшие пространственные гармоники, тяговое и подъемное усилия, частотно-токовое управление, инвертор тока.

Линейные асинхронные двигатели (ЛАД) во многих случаях наилучшим образом удовлетворяют требованию максимального сочленения, сращивания электромеханического преобразователя энергии и исполнительного механизма. За счет бесконтактной передачи усилия линейные двигатели обеспечивают такие дополнительные преимущества, как отсутствие потерь на трение и износ механических передач. Кроме того, линейный асинхронный двигатель с поперечным магнитным потоком (ЛАДПП) развивает усилия левитации, достаточные для левитации индуктора в собственном магнитном поле машины.

Вопросами исследования линейных асинхронных двигателей поперечного потока и их применения для высокоскоростного наземного транспорта и металлургии посвящены работы Т. В. Щурской, Т. К. Калниня, В. А. Соломина. В них не учитывались высшие пространственные гармоники и число фаз, а также не были рассмотрены вопросы исследования электропривода на основе этих двигателей.

Другой важной составляющей повышения эффективности электропривода является решение проблемы повышения качества асинхронного инверторного электропривода (АИП). В последние годы все большее внимание исследователей при-

влекает улучшение характеристик электропривода за счет увеличения числа фаз системы "автономный инвертор (АИ) — асинхронный двигатель (АД)". Автономность структуры асинхронного инверторного электропривода (наличие собственного источника регулируемого переменного напряжения или тока) не накладывает принципиальных ограничений на число фаз системы АИ—АД.

В ходе дальнейшего развития машин с поперечным потоком возникла необходимость в более глубоком изучении свойств этих машин в составе электропривода, а также в создании теории, описывающей происходящие в них физические явления. Потребовалось исследование установившихся и переходных режимов электропривода на базе многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока и создание методики расчета в системе асинхронного инверторного электропривода.

Математическая модель многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока

Стремление эффективно использовать активный объем электрической машины требует совершенствования методов ее расчета, в максимальной степени базирующихся на аналитических соотношениях, позволяющих наиболее полно исследовать взаимосвязи между геометрией машины и ее выходными характеристиками. Определение дифференциальных параметров электромагнитного поля (E , H) во всем объеме электрической машины с учетом ее конструктивной анизотропии дает более точные расчеты.

При аналитическом исследовании электромагнитного поля в линейных асинхронных машинах используется математическая модель машины в установившемся режиме. Для большинства линейных асинхронных двигателей могут быть определены следующие характерные зоны: активный слой индуктора; воздушный зазор; сплошная проводящая среда [1, 2, 3]. Размеры зон при выбранной системе координат не зависят от числа фаз моделируемой машины.

Реальный m -фазный индуктор состоит из mn отдельных электромагнитов, где m — число фаз, n — число элементов в одной фазе. Каждый электромагнит может иметь обмотку в виде катушек, охватывающих сердечник только одного элемента (сосредоточенная обмотка), или в виде отдельных катушек, охватывающих несколько элементов (распределенная обмотка). Бегущее магнитное поле создается с помощью подключения обмотки к соответствующим фазам сети (инвертора). Число фаз многофазных линейных асинхронных двигателей можно представить как $m = m(\delta, h) = 2^\delta(2h + 1)$; $\delta, h = 0, 1, 2, \dots$,

и выделить три вида числа фаз: $m(\delta = 0, h \neq 0)$ — нечетное; $m(\delta \neq 0, h = 0)$ — четное; $m(\delta \neq 0, h \neq 0)$ — четно-нечетное [4].

Для индуктора с $q = 1$ характерно то, что токи, текущие в любых рядом расположенных элементах, различаются по фазе на постоянный угол. Этот угол в принципе может быть произвольным, но, поскольку ширина фазной зоны в реальных индукторах может составлять только 60° , 90° и 120° , будем считать, что упомянутый угол сдвига фазы равен $2\pi/m$.

Токовый слой имеет пространственно-периодическое распределение линейной нагрузки по двум взаимно перпендикулярным направлениям, распределен синусоидально, бежит вдоль оси x и имеет синусоидальное распределение вдоль оси z . Он представляет собой суперпозицию из m подсистем при условии, что каждая следующая подсистема сдвинута вдоль оси x на расстояние $2\tau/m$ и переменный ток, протекающий в относящихся к ней проводниках, сдвинут по фазе на угол $2\pi/m$:

$$\Delta = \frac{wIk_p e^{j\omega t}}{p\tau} \sum_{k=1}^m e^{j\frac{2\pi(k-1)(n\pm 1)}{m}} \times \left(\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^m \cos n\beta_x \left(x + \frac{2k\tau}{m} \right) \right) \cos \beta_z z, \quad (1)$$

где w — число витков; p — число пар полюсов; τ — полюсное деление; I — амплитудное значение силы тока; k_p — коэффициент распределения обмотки;

$\beta_x = \frac{\pi}{\tau_x}$ — пространственная частота вдоль оси x ;

$\beta_z = \frac{\pi}{\tau_z}$ — пространственная частота вдоль оси Z .

Выражение (1) можно упростить:

$$\Delta = \frac{wmI}{p\tau} e^{j\omega t} \left(e^{-j\beta_x x} + \sum_{v=1}^{\infty} \left(e^{-j(1-vm)\beta_x x} + e^{-j(1+vm)\beta_x x} \right) \right) \cos \beta_z z. \quad (2)$$

Как видно, разложение линейной токовой нагрузки рассматриваемого индуктора в ряд Фурье содержит пространственные гармоники не со всеми номерами, а только с номерами $vm - 1$ и $vm + 1$ ($v \geq 1$). Показатель степени у экспоненты в (2) для гармоник с номерами $vm - 1$ отрицательный. Это означает, что данные гармоники бегут в положительном направлении оси x . Гармоники с номерами $vm + 1$ бегут в отрицательном направлении оси x , поскольку показатель степени для них положительный.

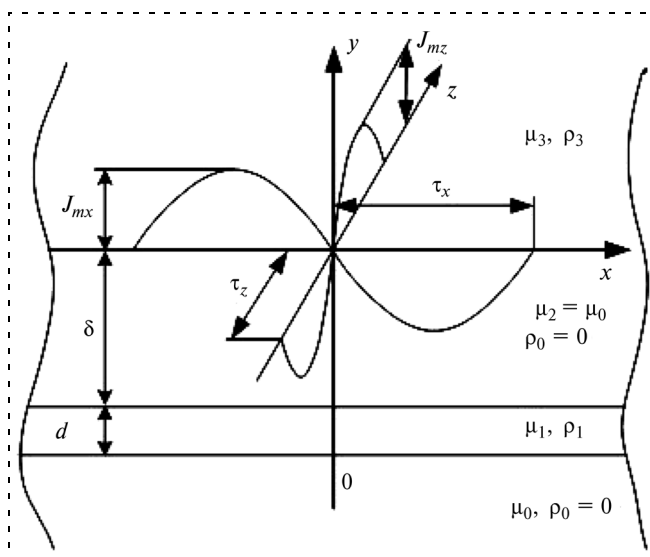


Рис. 1. Расчетная модель одностороннего ЛАДПП

Расчетная модель линейной индукционной машины с поперечным магнитным потоком представлена на рис. 1. При построении расчетной модели приняты следующие основные допущения: сердечник индуктора моделируется бесконечно длинной в поперечном и продольном направлениях средой с магнитной проницаемостью μ_3 и удельным электрическим сопротивлением ρ_3 ; на поверхности сердечника расположен бесконечно тонкий токовый настил с линейной плотностью тока; система координат жестко связана с индуктором, который отстоит от электропроводного рабочего тела на расстояние δ ; вторичный элемент представлен как твердое тело с параметрами μ_1 и ρ_1 толщиной d , которое движется со скоростью v в направлении бегущего электромагнитного поля, создаваемого индуктором; воздушный зазор определен параметрами $\mu_2 = \mu_0$ и $\rho_2 = 0$.

При заданном пространственно-временном законе изменения линейной токовой нагрузки электромагнитное поле в любой области машины описывается уравнениями Максвелла. В результате их решения получены выражения напряженностей электрических и магнитных составляющих электромагнитного поля в любой из сред принятой расчетной модели одностороннего линейного асинхронного двигателя с поперечным потоком, учитывающей гармонический состав и число фаз. Постоянные интегрирования определены по принятым граничным условиям на границах моделируемых сред. Функциональная зависимость полученных решений от геометрических размеров, обмоточных данных и скольжения двигателя позволяет проводить анализ процессов, происходящих в двигателе, с учетом его конструктивных и технологических особенностей, что дает возможность найти пути улучшения характеристик двигателя.

Для каждой гармоники будет свое скольжение, поскольку скорость распространения поля, соответствующего различным гармоникам, различна. Для гармоник, движущихся в сторону первой гармоники (в основном направлении) и в противоположную сторону, скорости движения будут равны соответственно

$$v_{fv} = \frac{\omega}{\beta_{x_{vm+1}}}; v_{bv} = \frac{\omega}{\beta_{x_{mv-1}}}.$$

Выражения для y - и z -составляющих магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_{2y} = j \frac{wmIk_p}{2p\tau} e^{j\omega t \mu_2} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{1}{\beta_{2n}} \frac{V_n}{K_n} \times \left[\frac{n^2 \beta_x^2 + \beta_z^2}{n^2 \beta_x} e^{-jn\beta_x x} \right]_{n=vm \pm 1} \cos \beta_z z;$$

$$B_{2z} = -j \frac{wmIk_p}{2p\tau} e^{j\omega t \mu_2} \sum_{v=0}^{\infty} \left[\frac{1}{\beta_{2n}} \frac{V'_n}{K_n} \times \frac{\beta_z}{n\beta_x} e^{-jn\beta_x x} \right]_{n=vm \pm 1} \sin \beta_z z.$$

Выражения для x - и z -составляющих линейной плотности тока во вторичном элементе:

$$J_{1x} = \sigma_1 \omega \frac{wmIk_p}{2p\tau} e^{j\omega t \mu_2} \sum_{v=0}^{\infty} \left[\frac{1}{\beta_{2n}} \frac{U_n}{K_n} \times \frac{\beta_z}{n\beta_x} e^{-jn\beta_x x} \right]_{n=vm \pm 1} \sin \beta_z z;$$

$$J_{1z} = -\sigma_1 j \omega \frac{wmIk_p}{2p\tau} e^{j\omega t \mu_2} \sum_{v=0}^{\infty} \left[\frac{1}{\beta_{2n}} \frac{U_n}{K_n} \times e^{-jn\beta_x x} \right]_{n=vm \pm 1} \cos \beta_z z,$$

где

$$U_n = \operatorname{ch} \beta_{1n} y + \frac{\beta_{0n} \mu_1}{\beta_{1n} \mu_0} \operatorname{sh} \beta_{1n} y;$$

$$K_n = \left(\operatorname{sh} \beta_{2n} \delta + \frac{\beta_{0n} \mu_2}{\beta_{2n} \mu_0} \right) \operatorname{ch} \beta_{1n} d_{se} + \left(\frac{\beta_{0n} \mu_1}{\beta_{1n} \mu_0} \operatorname{sh} \beta_{2n} \delta + \frac{\beta_{1n} \mu_2}{\beta_{2n} \mu_1} \operatorname{ch} \beta_{2n} \delta \right) \operatorname{sh} \beta_{1n} d_{se};$$

$$V_n = \left(\operatorname{ch} \beta_{2n} (y - d_{se}) + \frac{\beta_{0n} \mu_2}{\beta_{2n} \mu_0} \operatorname{sh} \beta_{2n} (y - d_{se}) \right) \operatorname{ch} \beta_{1n} d_{se} + \left(\frac{\beta_{0n} \mu_1}{\beta_{1n} \mu_0} \operatorname{ch} \beta_{2n} (y - d_{se}) + \frac{\beta_{1n} \mu_2}{\beta_{2n} \mu_1} \operatorname{sh} \beta_{2n} (y - d_{se}) \right) \operatorname{sh} \beta_{1n} d_{se};$$

$$\beta_{0n} = \sqrt{n^2 \beta_x^2 + \beta_z^2 + j\omega_n \mu_0 \gamma_0};$$

$$\beta_{1n} = \sqrt{n^2 \beta_x^2 + \beta_z^2 + j\omega_n \mu_1 \gamma_1 s_n};$$

$$\beta_{2n} = \sqrt{n^2 \beta_x^2 + \beta_z^2 + j\omega_n \mu_2 \gamma_2}.$$

Тяговое и подъемное усилия, создаваемые при взаимодействии составляющих магнитной индукции и тока вторичного элемента, определяются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} f_{x1} &= \frac{1}{2\rho_1} \operatorname{Re}[E_{z1} B_{y1}^*]; \\ f_{y1} &= \frac{1}{2\rho_1} \operatorname{Re}[E_{x1} B_{z1}^*] \end{aligned} \right\}$$

(здесь * — символ комплексного сопряжения).

На рис. 2, 3 приведены результаты расчетов, выполненных для номинального режима при пересчете параметров ЛАДПП при сохранении потребляемой мощности. Электромеханическая характеристика тягового усилия похожа на характеристику

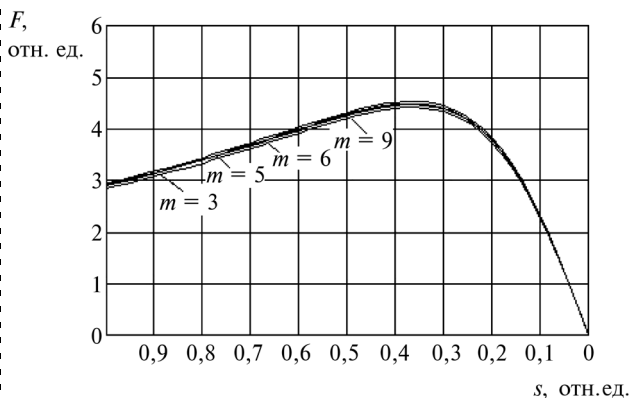


Рис. 2. Электромеханические характеристики для различных m

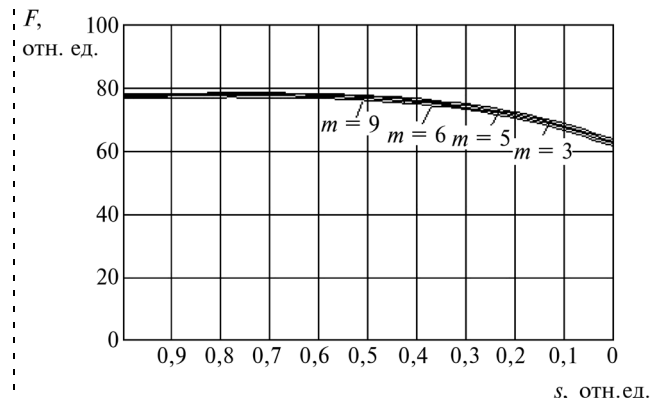


Рис. 3. Подъемные усилия для различных m

асинхронного двигателя. Увеличение числа фаз приводит к улучшению механических характеристик двигателя при неизменном исполнении вторичного элемента.

Высшие гармоники создают как тяговое, так и тормозное усилия, пульсации усилий, причем тяговые и тормозные усилия, создаваемые высшими гармониками, имеют несущественное значение, но пульсации усилий, создаваемые ими, оказывают значительное отрицательное влияние на качество работы двигателя. Поэтому для уменьшения пульсаций усилия ЛАДПП целесообразно исключение из обмена энергией между статором и вторичным элементом наиболее низкочастотных высших гармоник. С увеличением числа фаз системы возрастает частота, а, следовательно, уменьшается амплитуда как гармоник ЭДС и токов, так и пульсаций тягового усилия.

Математическая модель электропривода с частотно-токовым управлением на основе многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока

В подразделе проводится исследование переходных процессов в схемах с автономными многофазными инверторами, при которых связываются в единую систему дифференциальные уравнения как звена постоянного тока, так и нагрузки на входе инвертора. При этом система рассматривается как непрерывная, хотя она содержит вентильные дискретные преобразователи: инвертор и выпрямитель.

Ток нагрузки однозначно определяется током инвертора i_d и программой работы коммутатора (рис. 4). Фазные токи запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_d F_1(t); \\ i_2 &= i_d F_2(t); \\ &\dots\dots\dots; \\ i_m &= i_d F_m(t), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

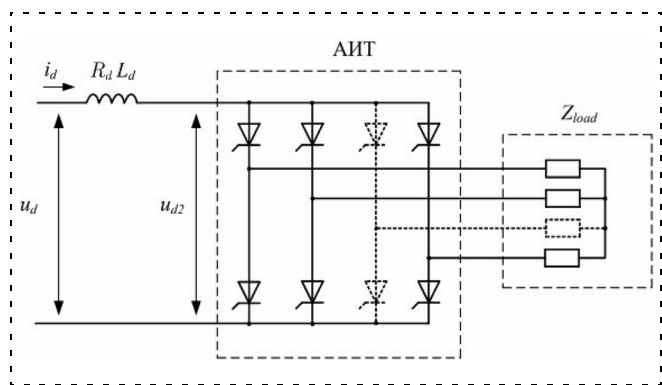


Рис. 4. Схема многофазного инвертора тока

где $F_1(t), F_2(t), \dots, F_m(t)$ — функции времени (коммутационные функции), определяющиеся программой работы ключей и представляющие последовательность разнополярных единичных импульсов, соответствующих включенному состоянию ключей.

Формулы (3) выражают основное отличительное свойство автономных инверторов тока. При фиксированной частоте, принимая за начало отсчета момент $t = 0$, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} F_1(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=2mk+1} \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{3}\right)}{n} \cos n\omega t; \\ F_2(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=2mk+1} \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{3}\right)}{n} \cos\left(n\omega t - \frac{2\pi}{m}\right); \\ &\dots\dots\dots; \\ F_m(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=2mk+1} \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{3}\right)}{n} \cos\left(n\omega t - \frac{2(m-1)\pi}{m}\right), \end{aligned} \right\}$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Учитывая, что в любой момент времени $i_1 + i_2 + \dots + i_m = 0$, запишем выражение для результирующего вектора тока нагрузки:

$$i = \frac{2}{m} i_d [F_1(t) + aF_2(t) + \dots + a^{(m-1)}F_m(t)] = i_d F_T(t),$$

где $F_T(t)$ — результирующий вектор коммутационной функции инвертора тока; $a = e^{j\frac{2\pi}{m}}$ — оператор поворота.

Результирующий вектор коммутационной функции АИ тока представляет собой вектор постоянной амплитуды, перемещающийся на фазовой плоскости скачками таким образом, что средняя скорость вращения равна ω [5]. При увеличении числа фаз величина скачков уменьшается, а средняя скорость вращения остается неизменной. При $m \rightarrow \infty$ величина скачка стремится к нулю, и перемещение результирующего вектора коммутационной функции превращается в равномерное вращение со скоростью ω .

При $m \rightarrow \infty$

$$F_T(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{j\omega t}.$$

В системе координат, вращающейся со скоростью ω , направив вектор $F_T(t)$ вдоль действительной оси, получим:

$$F_T(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} = F_T.$$

Система уравнений, устанавливающая взаимосвязь между входными и выходными величинами АИ с m — числом фаз, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} i_{load} &= F_T i_d; \\ u_{d2} &= \frac{m}{2} F_T \operatorname{Re}[u_{load}]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для исследования динамики системы "АИ—нагрузка" уравнения (4) необходимо решать совместно с уравнением нагрузки, устанавливающим взаимосвязь между результирующими векторами i_{load} и u_{load} нагрузки. Рассмотрим случай, когда процессы в нагрузке описываются линейной системой дифференциальных уравнений, и инвертор работает при фиксированной частоте. В этом случае остается линейной и полная система уравнений, описывающая переходные процессы в системе "АИ—нагрузка" [6]:

$$\left. \begin{aligned} i_{load}(p) &= F_T i_d(p); \\ u_{load}(p) &= Z(p + J\omega) i_{load}(p); \\ u_{d2}(p) &= \frac{m}{2} F_T \operatorname{Re}[u_{load}(p)]. \end{aligned} \right\}$$

Тяговое усилие определяется в равной степени потоком и током. Однако в подавляющем большинстве регулируемых приводов при любом типе двигателя управление моментом осуществляется током. Поток как более инерционную величину, ограниченную сверху условиями насыщения магнитной системы, в процессе работы поддерживают неизменным или изменяют по сравнению с током в значительно более узких пределах, причем не для регулирования момента, а для улучшения использования силового оборудования привода (двигателя и преобразователя).

Пользуясь результатами математической модели двигателя в установившемся режиме, программируем блок формирования усилия (БФУ) (рис. 5), характеризующий усилия, возникающие в ЛАДПП с учетом скольжения s и воздушного зазора y (рис. 6, 7). На рис. 5: v_{task} — скорость задания; F_c — статическое усилие, действующее на вторичный элемент; m — масса вторичного элемента.

На рис. 8 представлена структурная схема регулируемого электропривода с частотно-токовым управлением. Выходной сигнал регулятора скорости является заданием тягового усилия двигателя. При управлении с неизменным током статора машина приобретает неблагоприятные свойства, заключающиеся в том, что с увеличением нагрузки (скольжения) резко падает магнитный поток. Поэтому система должна быть замкнута таким образом, чтобы с увеличением нагрузки по определенному закону увеличивался и ток статора, так, чтобы

поток машины поддерживался постоянным. При всех частотах ток двигателя пропорционален скольжению. Сигнал, преобразованный в функциональном построителе, рассчитанном на основе математической модели двигателя в установившемся режиме, выполняет данное условие. Этот сигнал задает амплитуду тока и обрабатывается замкнутой систе-

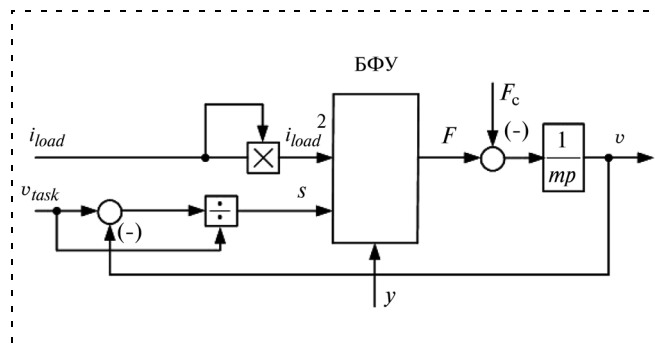


Рис. 5. Структурная схема ЛАДПП

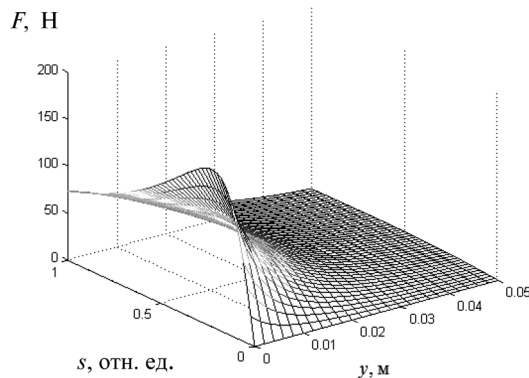


Рис. 6. Зависимость тягового усилия от скольжения и зазора

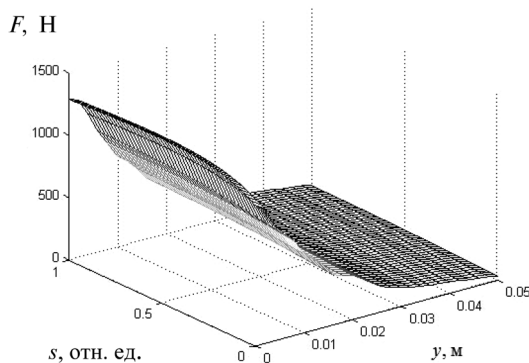


Рис. 7. Зависимость подъемного усилия от скольжения и зазора

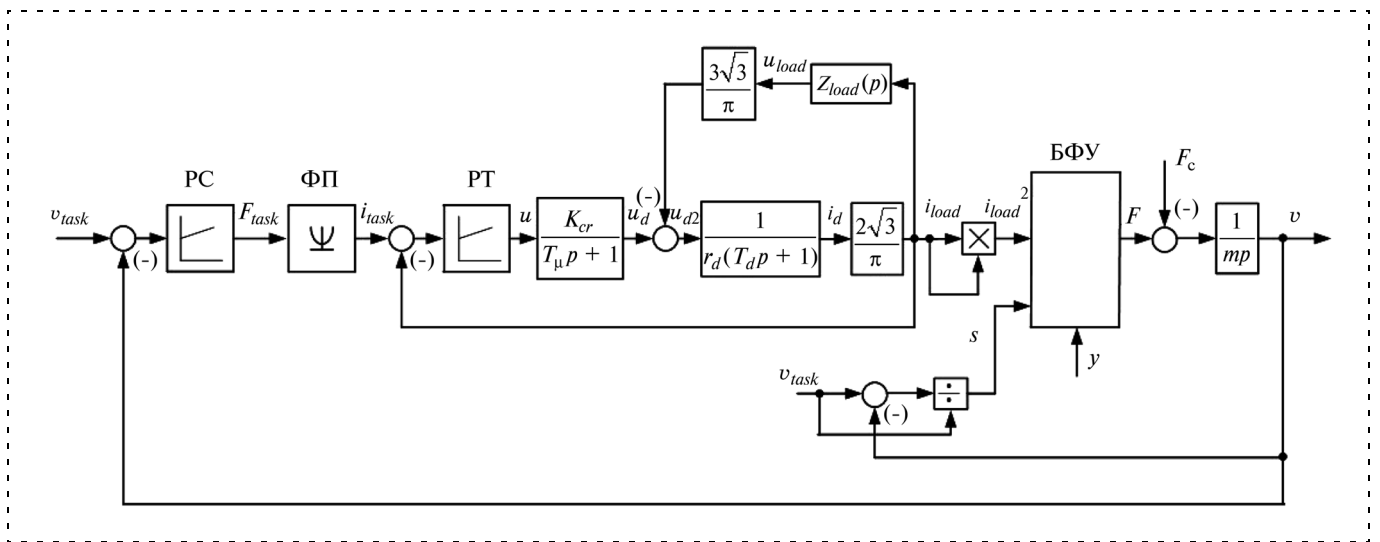


Рис. 8. Структурная схема электропривода с частотно-токовым управлением

мой автоматического управления. Быстродействие в обработке задания тягового усилия определяется быстродействием системы регулирования амплитуды тока статора. На рис. 8 K_{cr} — коэффициент усиления преобразователя; T_{μ} — постоянная времени преобразователя; r_d — сопротивление обмотки индуктора; T_d — постоянная времени индуктора.

Модель представляет собой двухконтурную систему подчиненного регулирования и позволяет оценить динамику, а также рассчитать регуляторы тока и скорости. Настройка контуров регулирования проведена по критерию модульного оптимума [7]. При требуемых показателях качества в контуре тока получен ПИ-регулятор. В контуре регулирования скорости используется ПИ-регулятор, параметры которого подобраны экспериментально ввиду того, что модель содержит нелинейные блоки.

На основе математической модели многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока в установившихся режимах с учетом высших пространственных гармоник и числа фаз получены соотношения для определения основных величин, характеризующих электромагнитное поле в реальной машине, а также тягового и подъемного усилий. Выявлено, что увеличение числа фаз приводит к улучшению механических характеристик двигателя при неизменном исполнении вторичного элемента. Рациональное число фаз равно 9.

На основе имитационной модели электропривода с многофазным линейным асинхронным двигателем поперечного потока проведен расчет характеристик электропривода с частотно-токовым управлением в установившихся и переходных ре-

жимах. В математической модели использован расчет цепей переменного тока методом приведения к цепи постоянного тока. Настройка контуров регулирования проведена по критерию модульного оптимума. Запас устойчивости по фазе в контуре тока увеличился с 23° до 65° . При единичном ступенчатом воздействии перерегулирование составило 4,3 %. Система является устойчивой к возмущающим воздействиям, таким как наброс нагрузки, а также синусоидальное воздействие.

При построении моделей в пакете программ MatLab используются программируемые блоки, полученные с помощью математической модели двигателя в установившемся режиме на основе уравнений Максвелла.

Список литературы

1. **Веселовский О. Н., Коняев А. Ю., Сарапулов Ф. Н.** Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
2. **Ямамура С.** Теория линейных асинхронных двигателей. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1983. 180 с.
3. **Калнинь Т. К.** Линейные индукционные машины с поперечным магнитным потоком. Рига: Зинатне, 1980. 170 с.
4. **Бражников В. Ф., Иванчура В. И., Соустин Б. П.** Метод анализа асинхронных многофазных двигателей с произвольным расположением обмоток при несинусоидальном напряжении питания // Автоматизированные электромеханические системы. Новосибирск.: НЭТИ., 1980. С. 56—69.
5. **Эпштейн Н. И.** Автоматизированный электропривод переменного тока. М.: Энергоатомиздат, 1982. 192 с.
6. **Кривицкий С. О., Кривицкий С. О., Эпштейн И. И.** Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами. М.: Энергия, 1970. 152 с.
7. **Шаталов А. С.** Теория автоматического управления. М.: Высшая школа, 1977. 448 с.

УДК 004.932:681.586.5

Ю. С. Володин, аспирант,
Научно-учебный центр "Робототехника"
МГТУ им. Н. Э. Баумана
yanoscuni@mail.ru

Метод кодирования структурной подсветки для телевизионной системы объемного зрения робототехнического комплекса

Рассматривается телевизионная система объемного технического зрения (ТСОЗ) со структурной подсветкой. Предложен новый метод кодирования структурной подсветки, описаны алгоритмы детектирования структуры подсветки и вычисления координат объектов сцены. Приведены результаты экспериментального исследования ТСОЗ, дано сравнение технических характеристик системы с характеристиками сканирующего лазерного дальномера.

Ключевые слова: система объемного зрения, метод кодирования структурной подсветки, алгоритмы детектирования, обнаружение препятствий.

Введение

Непременным компонентом системы оцувствления современных мобильных робототехнических комплексов является техническое зрение. От полноты описания и адекватности модели внешнего мира робота, формируемой системой технического зрения, существенным образом зависят возможность оперативного реагирования на изменения окружающей обстановки и успех выполнения роботом текущей задачи. При дистанционном управлении роботом в сложных условиях видимости оператор, управляющий мобильным роботом по визуальной информации телевизионной системы, сталкивается с серьезными трудностями из-за недостаточной информативности получаемого описания сцены. Эта проблема стоит еще более остро при создании робототехнических систем, предназначенных для автономной работы в условиях частично или полностью недетерминированной среды. Одним из перспективных путей решения этой проблемы является использование систем объемного технического зрения. Системы объемного зрения являются эффективным средством регистрации обстановки в рабочей зоне робота благодаря их возможности измерять дальность до объектов рабочей сцены и формировать объемное описание сцены

для визуализации на посту оператора или автоматического анализа.

В настоящее время известно достаточно большое число методов измерения дальности и формы трехмерных объектов [1, 2]. В задачах робототехники и управления мобильными роботами наибольшее применение находят следующие типы систем: дальнометрические (лазерные дальномеры) [3, 4], стереосистемы и системы со структурной подсветкой. В данной статье обсуждаются телевизионная система объемного технического зрения со структурной подсветкой, способ структурной подсветки, адаптированный к особенностям применения в робототехнических системах, а также использование этой системы для управления движением мобильного робота.

Метод структурной подсветки широко применяется в системах технического зрения для получения трехмерной координатной информации [5–8]. Под структурной подсветкой понимают контролируемое освещение сцены, облегчающее решение задачи стереосоответствия. Проблема установления пространственного соответствия между элементами изображений (пикселями) для пары стереоизображений не возникает в методе структурной подсветки благодаря освещению объекта детерминированной структурной картиной. Установление соответствия между координатами проекции точки на матрице телекамеры и положением ее в системе координат проекционной системы решается здесь декодированием сигнала подсветки. Для того чтобы однозначно идентифицировать элемент структуры на изображении, используют различные методы кодирования подсветки. Метод кодирования сигнала опорной подсветки является ключевым аспектом при разработке систем со структурной подсветкой, поскольку тип структуры и свойства кодирующей последовательности в значительной мере определяют характеристики системы и обуславливают методы и алгоритмы детектирования и декодирования подсветки, спроецированной на трехмерный объект.

Метод кодирования сигнала опорной подсветки

Целью кодирования несущего сигнала подсветки является идентификация фрагмента структуры подсветки вне зависимости от наличия на изображении всех элементов структуры. Пропадание фрагментов структуры подсветки происходит в обла-

тях геометрической тени из-за резкого изменения рельефа поверхности либо загромождения одних объектов другими. Структурная подсветка может быть модулирована пространственно, во времени, по интенсивности или спектру излучения. Соответственно, по типу модуляции сигнала различают: временное кодирование, амплитудную модуляцию, спектральное кодирование и пространственное кодирование (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

На рис. 1, а показан пример временного кодирования подсветки из работы [5], здесь подсветка состоит из нескольких структур с увеличивающимся разрешением. Структура, изображенная на рис. 1, б [6], характерна для методов, использующих амплитудную модуляцию несущего сигнала. На рис. 1, в и 1, г даны примеры пространственного кодирования без расширения кода с помощью спектральной или амплитудной модуляции; здесь необходимая для определения координат информация закодирована пространственным расположением элементов структуры подсветки. Рис. 1, д и е — примеры комбинирования нескольких принципов кодирования, в случае д — это совместное использование временного кодирования и амплитудной модуляции [9], е — амплитудная модуляция и спектральное кодирование [10]. В зависимости от числа координат, определяемых для элементов структуры в системе координат проекционной системы, различают одномерное и двумерное кодирование. На рис. 1, а, б, д, е — примеры одномерного кодирования; в, г — двумерное кодирование символьной [7] и линейчатой структур [11].

В данной статье предложен метод кодирования подсветки, предназначенной для анализа рабочей сцены мобильного робота при его движении в условиях недетерминированной среды при отсутствии априорной информации о классе измеряемых объектов. Для достижения поставленной цели использовалось двумерное пространственное кодирование сигнала опорной подсветки. Поскольку для работы мобильного робота необходимо обеспечить съемку в процессе движения, требуется минимизировать время получения объемного описания сцены. По этой причине использовался однокадровый метод без временного кодирования. Так как специфика применения мобильного робота не позволяет делать предположения о классе измеряемых объектов, то для снижения зависимости декодирования от отражающих свойств поверхности использовалась подсветка в широком спектральном диапазоне. При проектировании структуры подсветки основное внимание уделялось повышению пространственного разрешения системы.

Структура подсветки

Внешний вид и параметры разработанной структуры показаны на рис. 2. Остановимся подробнее на способе генерации подсветки данного вида. Чтобы добиться максимальной помехозащищенности опорной подсветки, будем использовать два уровня сигнала. Таким образом, каждый кодовый символ принимает одно из двух значений $q = \{L_1, L_2\}$ — реализуется двоичное кодирование. Для облегчения детектирования помимо кодовых символов в состав структуры введены *символы синхронизации*. Символы синхронизации также принимают свои значения из алфавита q . Периоды следования символов синхронизации C_x, C_y и их размеры C_w, C_h могут быть различными (рис. 2). Для характеристики соотношения используемых кодовых символов и символов синхронизации введем параметр *плотность* кода как отношение площади, занимаемой кодовыми символами, к общей площади структурной картины, включая символы синхронизации:

$$\rho = \frac{C_x C_y S_\alpha}{(C_x \alpha_x + C_w)(C_y \alpha_y + C_h)}, \quad (1)$$

где $S_\alpha = \alpha_x \alpha_y$ — площадь кодового символа. В целях сравнения различных структур удобно положить

$$C_w = \alpha_x, C_h = \alpha_y, \text{ тогда } \rho = \frac{C_x C_y}{(C_x + 1)(C_y + 1)}.$$

Плотности кода для структур, показанных на рис. 2, равны соответственно $\rho_{(1,1)} = 1/4$, $\rho_{(3,1)} = 3/8$, $\rho_{(2,3)} = 1/2$, $\rho_{(5,3)} = 5/8$. Более высокая плотность кода ведет к уменьшению размера d минимального идентифицируемого элемента, но повышает сложность алгоритма детектирования. Далее основные алгоритмы приводятся для подсветки типа $C_x = 3$, $C_y = 2$ (рис. 2, г). Помимо плотности кода размер минимального идентифицируемого элемента структуры определяют характеристики кодовой последовательности, используемой при кодировании.

Для кодирования подсветки были использованы псевдослучайные (также называемые псевдошумовыми) последовательности, а именно неполные М-последовательности. Псевдослучайные М-последовательности находят широкое применение в радиолокации как основа для построения фазоманипулированных сигналов. М-последовательности обладают целым рядом полезных свойств и, прежде всего, превосходными периодическими и автокорреляционными свойствами [12]. Наиболее важным для кодирования подсветки свойством М-последовательности является тот факт, что если окно ширины m перемещается вдоль М-последовательности, то каждый из $2^m - 1$ ненулевых двоичных наборов из m чисел будет виден ровно один раз (свойство "скользящего окна"). Свойство скользящего окна

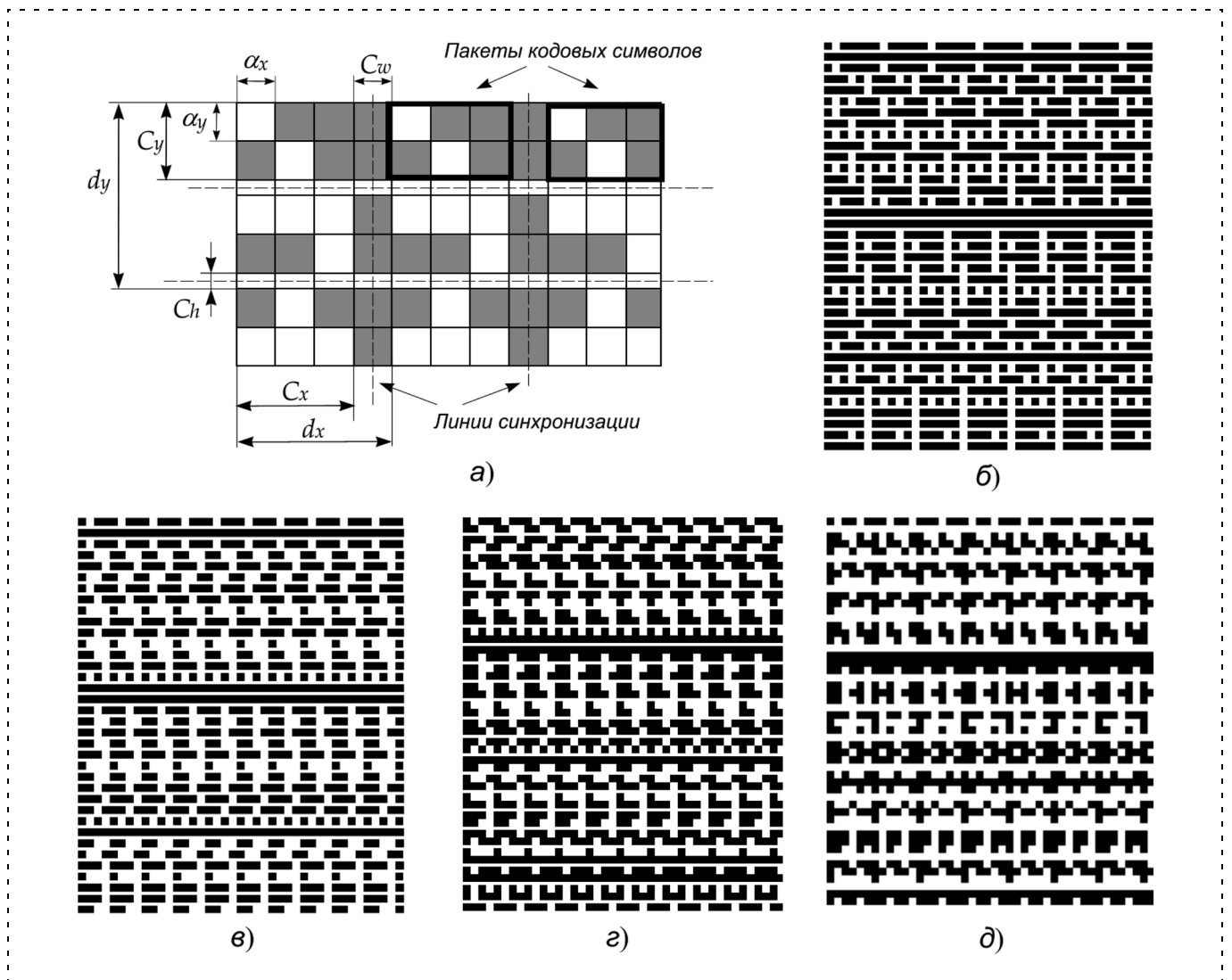


Рис. 2. Пространственное кодирование подсветки:
a — параметрический синтез структуры; *б* — фрагмент структуры $C_x = 1, C_y = 1$; *в* — фрагмент структуры $C_x = 3, C_y = 1$; *г* — фрагмент структуры $C_x = 3, C_y = 2$; *д* — фрагмент структуры $C_x = 5, C_y = 3$

устанавливает взаимнооднозначное соответствие между каждым фрагментом структуры подсветки длины m и его координатами в системе координат транспаранта проекционной системы. Таким образом, для идентификации каждого элемента подсветки достаточно детектировать непрерывный отрезок кодовой последовательности длины m , который содержит этот элемент.

Алгоритм детектирования сигнала опорной подсветки

Детектирование подсветки заключается в регистрации кодовых символов на приемной системе и объединении их в слова кодовой последовательности. Задачей, которую решает алгоритм детектирования, является восстановление исходной пространственной структуры подсветки по изображению сцены, освещенной структурным светом. В резуль-

тате работы алгоритма детектирования строится граф пространственной структуры, используемый далее в алгоритме декодирования. Вид подсветки, спроецированной на плоский объект, приведен на рис. 3, *a*. Алгоритм детектирования включает в себя процедуры фильтрации, сегментации и морфологического анализа изображения, необходимые для устойчивого выделения структуры подсветки в условиях помех, вызванных неоднородностью отражающих свойств подстилающей поверхности.

Предварительная обработка изображения для выделения структурных элементов подсветки состоит из следующих этапов:

- 1) масочная фильтрация изображения (фильтр скользящего среднего);
- 2) выделение контуров (применение горизонтального и вертикального оператора Собеля);

3) пороговая бинаризация, получение контурного препарата;

4) утончение контуров, связывание контуров и сегментация.

На рис. 3, б, в показан контурный препарат, полученный в результате обработки структурной картины. Отметим, что информация о знаке составляющих градиента яркости изображения сохраняется наряду с результатами бинаризации. Таким образом, на изображении рис. 3, б содержится по

два типа горизонтальных и вертикальных границ — $\{H_+, H_-, V_+, V_-\}$ в зависимости от знака отклика оператора Собеля.

На этапе связывания контуров определяется положение *узловых точек* N_{ij} как точек пересечения сегментов горизонтальных и вертикальных границ. Результаты сегментации представим в виде графа узловых точек $G_N = (N_{ij}, E)$, вершинами которого являются узловые точки N_{ij} , а множество ребер E состоит из горизонтальных и вертикальных границ, соединяющих точки N_{ij} :

$E = v_{ij} \cup h_{ij}$ (рис. 4, а). Под конфигурацией ребер при некоторой вершине графа будем подразумевать вектор $W = (e_1, e_2, e_3, e_4)$, элементы которого принимают следующие значения: $e_i = -1$, если ребро является границей типа H_- или V_- ; $e_i = +1$, если ребро является границей типа H_+ или V_+ ; $e_i = 0$, если в данном направлении ребро отсутствует.

Ребра графа в векторе конфигурации перечислены по часовой стрелке начиная с верхнего: $(v_{i-1j}, h_{ij}, v_{ij}, h_{ij-1})$. Общее число различных векторов конфигураций составляет $3^4 = 81$, из которых 16 является допустимыми конфигурациями, соответствующими всем возможным узлам структуры (рис. 5), а остальные — ошибочными. Ошибочные конфигурации не могут встречаться в узлах структуры и не рассматриваются. Каждой вершине графа присвоим метку, соответствующую *конфигурации ребер* при данной вершине (рис. 4, а). Для этого необходимо выполнить классификацию узловых точек в зависимости от выделенных контуров изображения. При решении этой задачи воспользуемся стратегией Байеса минимизации ошибки классификации. С каждым ребром e графа G_N

сопоставим вес: $\omega_e = \frac{n_e}{\|e\|}$, где n_e — число детектированных

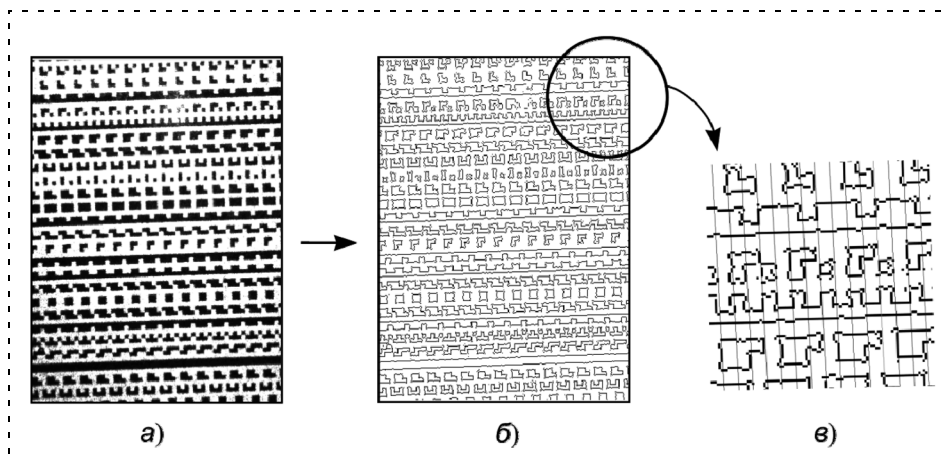


Рис. 3. Детектирование сигнала опорной подсветки: а — исходное изображение; б — изображение после выделения контуров и препарирования; в — фрагмент сегментированной кодовой структуры

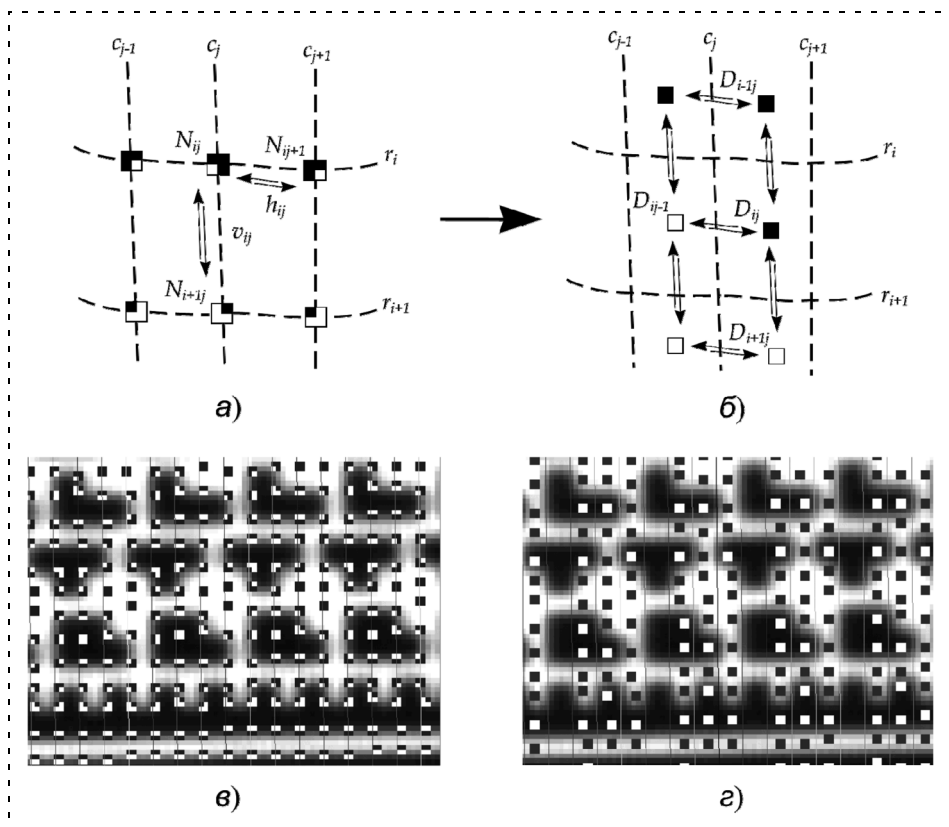


Рис. 4. Построение графа пространственной структуры

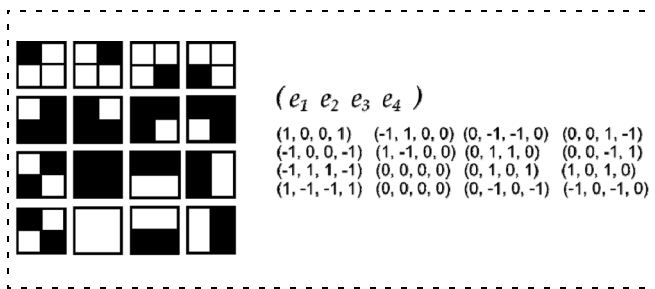


Рис. 5. Допустимые конфигурации ребер в узловых точках

точек контура v_{ij} или h_{ij} , проходящего вдоль этого ребра; $\|e\|$ — длина ребра e , вычисленная как расстояние между узловыми точками N_{ij}, N_{kl} , которые соединяет данное ребро: $\|e\| = \text{dist}(N_{ij}, N_{kl})$. Тогда условная вероятность наблюдения некоторой конфигурации ребер X для заданного класса допустимых конфигураций (рис. 5) $W_i = (e_1, e_2, e_3, e_4)$ равна $P(X|W_i) = P_e(e_1)P_e(e_2)P_e(e_3)P_e(e_4)$, где $P_e(1) = \omega_e$, $P_e(0) = 1 - \omega_e$, $P_e(-1) = 0$ для границ типа H_+ или V_+ и $P_e(1) = 0$, $P_e(0) = 1 - \omega_e$, $P_e(-1) = \omega_e$ для границ типа H_- или V_- .

Воспользовавшись формулой Байеса, запишем апостериорную вероятность принадлежности наблюдаемой конфигурации ребер X классу W_i :

$$P(W_i|X) = \frac{P(X|W_i)P(W_i)}{\sum_k P(X|W_k)P(W_k)}, \quad (2)$$

где $P(W_i)$ — априорная вероятность появления конфигурации W_i . Для допустимых конфигураций вероятности $P(W_i)$ могут быть легко вычислены по частоте появления в исходной кодовой последовательности. Для ошибочных конфигураций примем:

$P(W_{17}) = P(W_{81}) = 0$. Далее классификация выполняется по правилу Байеса:

$$\forall j \neq i : P(X|W_i)P(W_i) \geq P(X|W_j)P(W_j) \Rightarrow X \in W_i, \quad (3)$$

т. е. выбирается конфигурация ребер, доставляющая максимум апостериорной вероятности $P(W_i|X)$. Результаты классификации приведены на рис. 4, в.

На этапе декодирования практически более удобно представление детектированной структуры в виде кодового графа G_D (см. рис. 4, б). Данный граф является двойственным для графа узловых точек и может быть получен из G_N следующей заменой:

1) минимальные циклы $N_{ij}, N_{ij+1}, N_{i+1j+1}, N_{i+1j}$ заменяются на вершины D_{ij} ;

2) вертикальное ребро v_{ij} , являющееся общим для двух минимальных циклов $N_{ij}, N_{ij+1}, N_{i+1j+1}, N_{i+1j}$ и $N_{ij-1}, N_{ij}, N_{i+1j}, N_{i+1j-1}$, заменяется на горизонтальное ребро $(D_{ij-1}D_{ij})$;

3) горизонтальное ребро h_{ij} , являющееся общим для двух минимальных циклов $N_{ij}, N_{ij+1}, N_{i+1j+1}, N_{i+1j}$ и $N_{i-1j}, N_{i-1j+1}, N_{ij+1}, N_{ij}$, заменяется на вертикальное ребро $(D_{i-1j}D_{ij})$.

Пример результирующего графа G_D показан на рис. 4, г. В алгоритме декодирования происходит формирование кодовых слов из окрестностей соседних вершин кодового графа G_D и их локализация в исходной кодирующей последовательности. Основным результатом декодирования является определение координат $p_{pr} = (vx_{pr}, vy_{pr}, v)^T$ элемента подсветки в системе координат транспаранта проекционной системы (рис. 6). Знание p_{pr} необходимо для вычисления трехмерных мировых координат точки p . Можно записать [13]:

$$p = \tau(p_c, p_{pr}, M_c, M_{pr}), \quad (4)$$

где τ — оператор триангуляции; p_c — координаты элемента подсветки в системе координат приемной

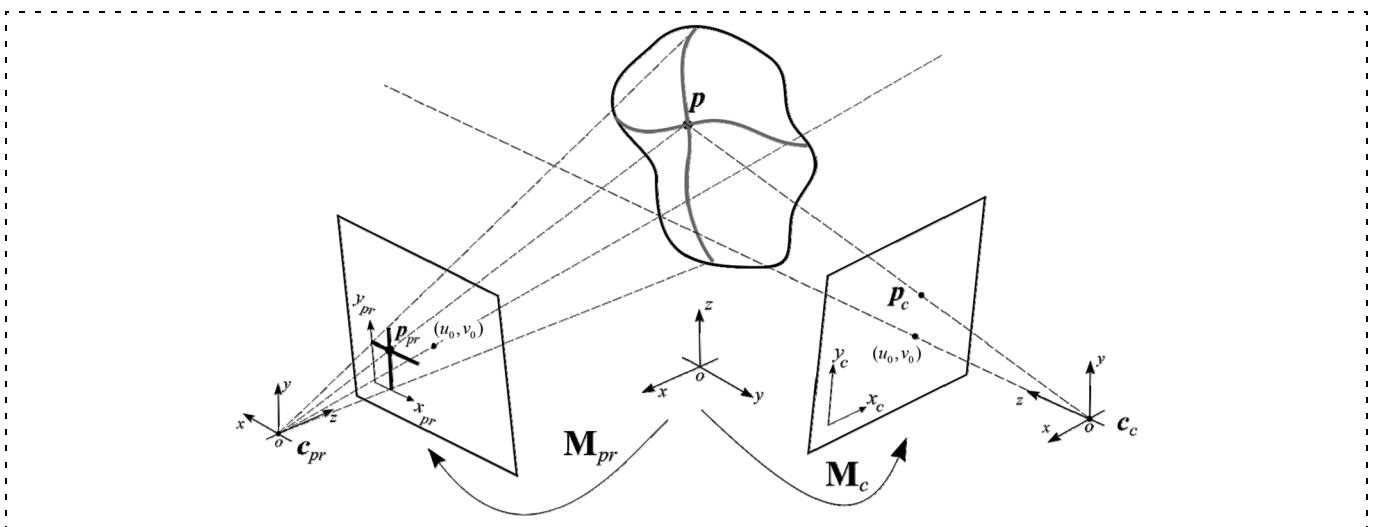


Рис. 6. Математическая модель системы объемного зрения со структурной подсветкой

системы; M_c и M_{pr} — матрицы проективного преобразования. Параметры математических моделей приемной и проекционной систем, описываемые матрицами M_c и M_{pr} (фокусные расстояния объективов оптических систем, направления оптических осей и т. д.), определяются на этапе предварительной калибровки [14].

Пример объемного описания объекта, полученного с помощью системы объемного зрения, показан на рис. 7 (см. вторую сторону обложки). В качестве способа представления объемного описания объекта выбрана кусочно-линейная аппроксимация поверхности объекта — полигональная модель. Использование полигональных моделей трехмерных объектов удобно с точки зрения их универсальности, простоты и скорости визуализации при использовании современных графических процессоров. Визуализация объемного описания объекта может быть получена с любого ракурса, в том числе отличающегося от точки съемки (рис. 7, в).

Экспериментальное исследование метода

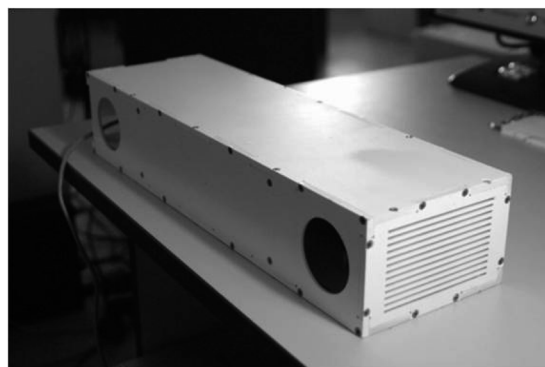
Для апробации предложенного метода был изготовлен опытный образец телевизионной системы объемного зрения (ТСОЗ).

В состав опытного образца ТСОЗ (рис. 8) входят следующие компоненты:

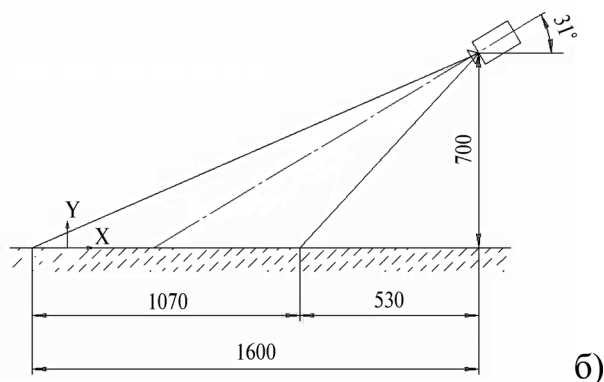
- 1) приемная система (черно-белая телекамера на базе ПЗС-матрицы высокой чувствительности разрешением 1280×1024 пикселей);
- 2) проекционная система (импульсный излучатель, работающий в видимом оптическом диапазоне спектра);
- 3) схемы временной синхронизации приемной и проекционной систем;
- 4) гальванически развязанные схемы питания приемной и проекционной систем.

Программа испытаний ТСОЗ включала в себя серию автономных испытаний и испытания в составе мобильного робота. В ходе автономных испытаний ТСОЗ было выполнено макетирование типовых ситуаций, возникающих в процессе управления мобильным роботом при изменении направления движения и планировании траектории объезда препятствий. В ходе эксперимента изучалась точность измерения основных параметров простейших типов препятствий, таких как "Дверь", "Стена", "Блок" (рис. 9).

В частности, измерялись: дальность до препятствия, высота (для препятствия "Блок"), ширина и смещение в горизонтальной плоскости относительно центральной оси системы (для препятствий "Дверь" и "Блок"). Полученные зависимости (рис. 10) свидетельствуют о точности измерения параметров сцены, достаточной для прокладки траектории и управления мобильным роботом по информации ТСОЗ. Наибольшая ошибка измерения была получена для параметра "высота" H^* объекта "Блок" (рис. 10, з). Данная ошибка связана с колебаниями высоты отсчетной поверхности и говорит о необходимости точной привязки системы координат ТСОЗ к уровню поверхности движения робота. Для компенсации этой ошибки выполняли сегментацию объемного описания сцены. Далее среди сегментированных объектов рабочей сцены выделяли поверхность движения и вводили коррекцию в виде поправки высоты и углов наклона дорожного полотна в продольном и поперечном направлении. Отметим также особенность измерения ширины дверного проема W^* (рис. 10, б). Ошибка измерения ширины возрастает с увеличением расстояния D до объекта "Дверь", оставаясь при этом в пределах допустимой погрешности измерений. Погрешности измерения горизонтального смещения левого и



а)



б)

Рис. 8. Опытный образец телевизионной системы объемного зрения: а — внешний вид; б — расположение системы на мобильном роботе

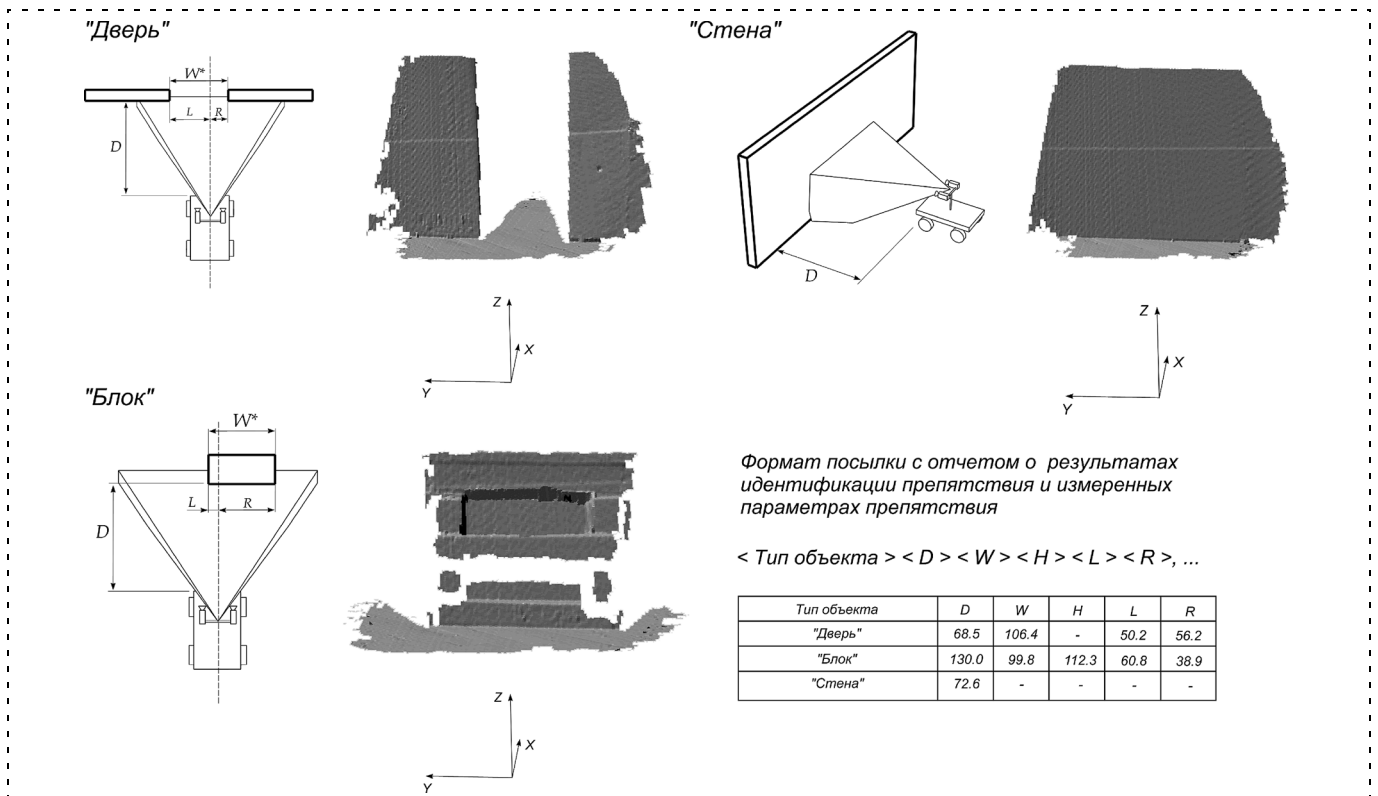


Рис. 9. Примеры объемного описания, полученного для объектов из набора "Типовые препятствия". На схемах отмечены параметры препятствий, измеряемые системой

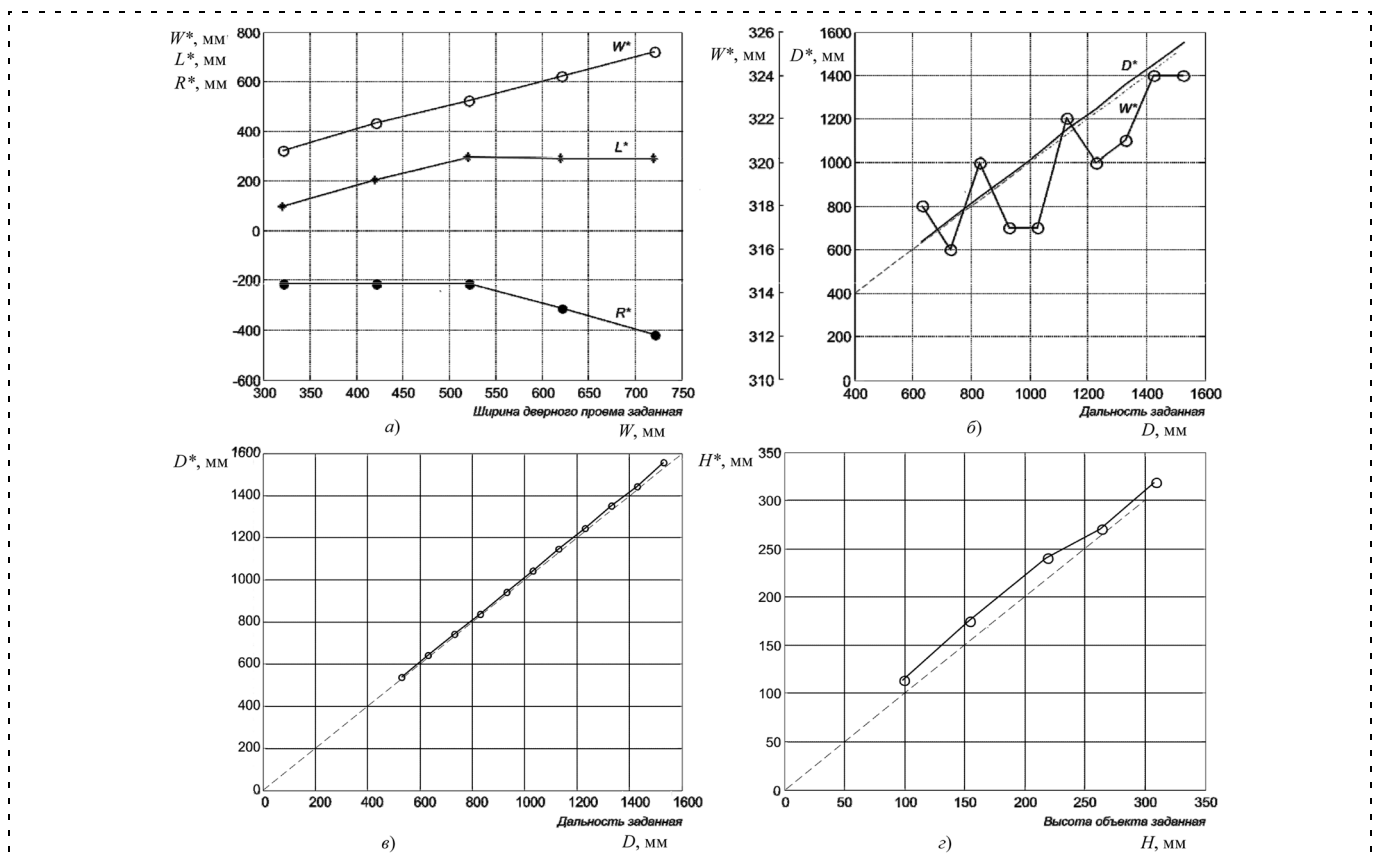


Рис. 10. Результаты измерений параметров препятствий: а — объект "Дверь", ширина дверного проема W^* , расстояния до левого L^* и правого R^* краев; б — объект "Дверь", ширина дверного проема W^* , дальность D^* ; в — объект "Блок", дальность D^* ; г — объект "Блок", высота H^*

Сравнительный анализ характеристик систем объемного зрения

Технические характеристики	ТСОЗ	SICK
Размеры рабочей зоны по дальности, м	0,5...2,5	до 50
Угловые размеры поля зрения, °		
— по горизонтали	40	180
— по вертикали	30	90
Угловое разрешение, рад	0,004	0,017
Относительная погрешность измерения дальности в пределах сцены (не более), мм	5	50
Время сбора визуальной информации (одного кадра), мс	0,2	1000
Частота кадров, Гц	15	<1

правого краев объекта "Дверь" R^* , L^* не превышают ошибки измерения ширины дверного проема (рис. 10, а).

В результате серии автономных испытаний опытного образца телевизионной системы объемного зрения получены его основные технические характеристики (см. таблицу). Для сравнения в таблице даны характеристики одной из наиболее распространенных на сегодняшний день систем объемного зрения — лазерного дальномера "SICK" [4]. Сравнение характеристик наглядно демонстрирует достоинства и недостатки двух различных подходов к регистрации трехмерной координатной информации и дает возможность очертить области эффективного применения каждого из методов. Среди достоинств разработанной системы выделим высокое пространственное разрешение, более высокую точность и скорость съемки. При этом необходимо отметить, что системы со структурной подсветкой имеют меньшее угловое поле зрения и ограничены по дальности по сравнению с лазерными дальномерами.

Проведенные эксперименты подтвердили предположения о неприменимости разработанной системы для получения объемного описания полупрозрачных объектов, металлических объектов с зеркально полированной поверхностью, что является ограничением используемого метода регистрации. Эксперименты с данными объектами показали недостаточную надежность измерения координат и размеров таких объектов.

Испытания ТСОЗ в составе робототехнического комплекса продемонстрировали возможность ее применения для обнаружения препятствий на пути движения мобильного робота, измерения их размеров и местоположения. Во время движения мобильного робота система зрения осуществляла непрерывный контроль состояния рабочей зоны непосредственно перед роботом. При поступлении сигнала о наличии препятствия в направлении движения система управления робота планировала траекторию объезда препятствий и выполняла корректировку курса. Если препятствие оказывалось непреодолимым, робот останавливался. Было по-

казано, что принятие решения о возможности движения в выбранном направлении и выбор маневра объезда препятствия может эффективно осуществляться с использованием объемного представления рабочей сцены.

Заключение

На основе проведенного исследования предложен оригинальный метод кодирования структурной подсветки, учитывающий специфику использования системы для управления движением мобильного робота; отмечено место, которое занимает данный метод в ряду существующих подходов к кодированию структурной подсветки. Детально описаны алгоритмы детектирования структуры подсветки для вычисления координат объектов сцены, затрагиваются вопросы выбора кодирующих последовательностей. Приведены результаты, полученные в ходе практической работы с экспериментальным образцом системы объемного зрения, дано сравнение технических характеристик разработанной системы с характеристиками популярного сканирующего лазерного дальномера.

Список литературы

1. **Jahne B., Hausseker H.** Computer vision and applications: San Diego Academic Press, 2000.
2. **Яне Б.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
3. **Носков В. П., Носков А. В.** Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 16—21.
4. **Ye Cang, Borenstein J.** Characterization of a 2-D laser scanner for mobile robot obstacle negotiation // Proc. of the 2002 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Washington DC, USA, 10—17 May 2002. P. 2512—2518.
5. **Posdamer J. L., Altschuler M. D.** Surface measurement by space-encoded projected beam systems // Computer Vision, Graphics, Image Processing. 1982. P. 1—17.
6. **Carrhill B., Hummel R.** Experiments with the intensity ratio depth sensor // Computer Vision, Graphics, Image Processing. 1985. P. 337—358.
7. **Vuylsteke P., Oosterlinck A.** Range image acquisition with single binary-encoded light pattern. // IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12 (2): 143—164, 1990.
8. **Сырский Г. В.** Трехмерная система технического зрения для робототехнического комплекса объемного копирования // Вестник МГТУ 1995. № 3.
9. **Horn E., Kiryati N.** Toward optimal structured light patterns // Image and Vision Computing 17 (2): 87—97, 1999.
10. **Pages J., Salvi J., Collewet C., Forest J.** Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition // Image and Vision Computing 23: 707—720, 2005.
11. **Maguama M., Abe S.** Range sensing by projecting multiple slits with random cuts // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1993. Vol. 15. P. 647—651.
12. **Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А.** Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Связь, 1979.
13. **Володин Ю. С.** Система трехмерного зрения для поиска и идентификации объектов в экстремальных условиях // Тр. 15-й науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". СПб.: Изд. СПбГТУ, 2004.
14. **Володин Ю. С., Орлов А. В., Михайлов Б. Б.** Калибровка системы трехмерного зрения со структурной подсветкой при помощи плоских объектов // Тр. 16-й науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". СПб.: Изд. СПбГТУ, 2005.

УДК 658.012.011.56: 658.26

Ю. А. Аветисян¹, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
В. А. Кушников², д-р техн. наук, зав. кафедрой,
А. Ф. Резчиков², д-р техн. наук, зав. кафедрой,
В. А. Родичев¹, ст. науч. сотр.,

¹ Институт точной механики и управления РАН,
г. Саратов

² Саратовский технический университет
iptmuran@san.ru

Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций

Разработаны математические модели и алгоритмы, позволяющие осуществить оперативное управление процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций на промышленных предприятиях. Рассмотрен модельный пример, иллюстрирующий процедуру их использования при ликвидации чрезвычайной ситуации, связанной с затоплением промышленных объектов во время наводка. Разработанное математическое обеспечение было внедрено на одном из крупных промышленных предприятий г. Саратова при проведении работ по модернизации существующей автоматизированной системы управления производственными процессами.

Ключевые слова: модели, методы, алгоритмы, МЧС, промышленное предприятие, чрезвычайные ситуации.

Введение

Интенсивное развитие современной промышленности, быстрый рост населения планеты, невысокий уровень "экологической" сознательности многих руководителей экономики и политиков, разрушительные военные конфликты часто приводят к возникновению крупных аварий, стихийных бедствий, эпидемий и катастроф. Так, только на территории России за год в среднем происходит около 230...250 крупных событий чрезвычайного характера, связанных с опасными природными явлениями, и 900...950 техногенных катастроф [1—3].

Один из путей уменьшения разрушительного воздействия этих чрезвычайных ситуаций и сокращения ущерба от их возникновения связан с использованием возможностей современной вычислительной техники и информационных технологий, позволяющих улучшить подготовку персонала российской системы предупреждения и действий

в чрезвычайных ситуациях (РСЧС) и значительно повысить эффективность оперативного управления объектами и территориями при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

В настоящее время разработаны, прошли проверку практикой и успешно функционируют в составе РСЧС различные информационные системы, в том числе центр управления в кризисных ситуациях (ЦУКС), системы оперативно-диспетчерского управления в чрезвычайных ситуациях (ОСОДУ), единые дежурно-диспетчерские службы (ЕДДС), системы мониторинга окружающей среды, прогнозирования и ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных промышленных объектах и др. [1—3].

Вместе с тем, на объектовом уровне РСЧС, сформированном на крупных промышленных предприятиях и в организациях, большинство систем оперативного управления позволяют обеспечить рациональный режим работы только отдельных групп оборудования в стереотипных производственных ситуациях и, как правило, не выдают рекомендаций оперативно-диспетчерскому персоналу при возникновении аварийных и нештатных ситуаций комплексного характера, затрагивающих весь производственный процесс в целом. Между тем, как показывает практика, многие чрезвычайные ситуации развиваются на основе техногенных происшествий именно этого уровня вследствие конструктивных недостатков и изношенности используемого оборудования, низкой квалификации и халатности производственного персонала, серьезных нарушений техники безопасности и т. д.

Указанное обстоятельство обуславливает необходимость разработки и внедрения в составе информационных систем РСЧС новых моделей, алгоритмов и комплексов программ [4—6], позволяющих улучшить подготовку оперативно-диспетчерского персонала промышленных предприятий, а также значительно повысить эффективность оперативного управления объектами и территориями при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Постановка задачи

Допустим, что на контролируемых объектах и территориях возникла чрезвычайная ситуация природного или техногенного характера

$w(x(t), u(t)) \in [W(X(t), U(t))]$, в результате чего они перешли в состояние $s_0(t) \in \{S(t)\}$ и им был причинен значительный ущерб (здесь $\{S(t)\}$ — множество допустимых состояний контролируемых объектов и территорий; $[W(X(t), U(t))]$ — множество возможных чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера; t — время). Допустим также, что по мнению экспертов переход контролируемых объектов и территорий в состояние $s_k(t) \in \{S(t)\}$ приведет к ликвидации чрезвычайной ситуации $w(x(t), u(t))$.

С учетом сделанных допущений формализованная постановка комплекса задач может быть сформулирована следующим образом: для информационно-управляющих систем объектового и территориального уровней, входящих в состав РСЧС, разработать формальные модели и алгоритмы, позволяющие на временном интервале $[t_n, t_k]$ при известных параметрах среды $x(t) \in \{X(t)\}$ и управляющих воздействиях $u(t) \in \{U(t)\}$, характеризующих чрезвычайную ситуацию $w(x(t), u(t))$, в течение отведенного на решение данной задачи времени осуществить переход из начального состояния $s_0(t) \in \{S(t)\}$ в конечное состояние $s_k(t) \in \{S(t)\}$, минимизируя функцию ущерба, причиненного чрезвычайной ситуацией,

$$\int_{t_n}^{t_k} D(x(t), u(t)) dt \rightarrow \min \quad (1)$$

при известных ограничениях, наложенных на продолжительность работ по ее ликвидации $t_k - t_n \leq \varepsilon$ и на значение максимально допустимого ущерба

$$\int_{t_n}^{t_k} D(x(t), u(t)) dt \leq D_{\max}, \quad (2)$$

а также при других функциональных ограничениях в виде равенств и неравенств, описывающих особенности функционирования объекта и системы управления, и при заданных граничных условиях (t_n и t_k — время начала и окончания чрезвычайной ситуации; D_{\max} — максимально допустимый ущерб; $\varepsilon, n_i, i = \overline{1, 4}$ — известные константы).

Математическая модель

♦ **Модель для приближенной оценки ущерба.** В основу модели приближенной оценки ущерба была положена гипотеза о том, что функция ущерба $D(x(T_L), u(T_L))$ на интервале ΔT ($T_L \in \Delta T, T_L = \text{const}$) пропорциональна расстоянию между точками $S_i, S_k \in \{S\}$, характеризующими те-

кущее и конечное положения объекта управления в пространстве состояний $\{S\}$:

$$D(x(T_L), u(T_L)) = k \rho_S; \quad \sum_{i=1}^{n_1+n_2} \mu_i = 1; \quad (3)$$

$$\rho_S = ((u_1^t - u_1^k)^2 \mu_1 + (u_2^t - u_2^k)^2 \mu_2 + (u_{n_1}^t - u_{n_1}^k)^2 \mu_{n_1} + (x_{n_1+1}^t - x_{n_1+1}^k)^2 \mu_{n_1+1} + (x_{n_1+2}^t - x_{n_1+2}^k)^2 \mu_{n_1+2} + \dots + (x_{n_1+n_2}^t - x_{n_1+n_2}^k)^2 \mu_{n_1+n_2})^{0,5},$$

где u_i^t, u_j^k — значение управляющих координат в точках S_i и S_k ; x_i^t, x_j^k — значение параметров среды в точках S_i и S_k ; n_1, n_2 — число управляющих координат и параметров среды, учитываемых при ликвидации чрезвычайной ситуации, соответственно; $\mu_i, i = \overline{1, n_1+n_2}$, — весовой коэффициент, показывающий степень влияния отклонения по i -й координате на значение ущерба; k — известный масштабирующий коэффициент, используемый для расчета ущерба в денежном выражении.

♦ **Модель для более точной оценки ущерба.** Рассмотрим особенности формирования функции ущерба на примере чрезвычайной ситуации, ежегодно возникающей во многих регионах страны во время паводка. Перед началом паводка увеличивается уровень воды в реках и водохранилищах, происходит затопление пойменных участков и низин, что, тем не менее, не приводит к возникновению ущерба. При продолжающемся быстром таянии снега и выпадении осадков отклонение входных координат выходит за величину $\varepsilon_i, i = \overline{1, n_1+n_2}$, и возникает ущерб,

который на интервале $[\varepsilon_i^H; \varepsilon_i^B]$ (ε_i^H и ε_i^B — нижняя и верхняя границы интервала) описывается линейной функцией $D_i = k_i \varepsilon_i + b_i, i = \overline{1, n_1+n_2}$.

Данный этап развития чрезвычайной ситуации соответствует умеренному затоплению контролируемых объектов и территорий и возникновению ущерба, который прямо пропорционален величине $\varepsilon_i \in [\varepsilon_i^H; \varepsilon_i^B], i = \overline{1, n_1+n_2}$.

Если количество воды, поступающей на контролируемые объекты и территории, продолжает возрастать или нарушается ее нормальный отток, то ущерб будет увеличиваться экспоненциально, что соответствует этапу остановки работы на промышленных и сельскохозяйственных объектах, за-

топлению жилых домов, административных зданий и сооружений и др.

Эти явления могут происходить, например, вследствие разрушения дамбы, переполнения водохранилища, изменения русла реки, подъема уровня воды в заливе вследствие ураганного ветра и т. д. Таким образом, на данном этапе развития чрезвычайной ситуации ущерб описывается зависимостью $D_i = a_i^{\varepsilon_i}$, $\varepsilon_i \in [\varepsilon_i^{m1}; \varepsilon_i^{m2}]$, $i = \overline{1, n_1 + n_2}$ (a_i — основание известной степенной функции, $a_i > 1$; ε_i^{m1} , ε_i^{m2} — нижняя и верхняя границы интервала).

Данный этап развития чрезвычайной ситуации длится непродолжительное время и приводит практически к полной остановке хозяйственной деятельности на всей контролируемой территории, а также весьма затрудняет нормальную жизнедеятельность людей. В отдельных, наиболее тяжелых случаях на данном этапе возможны и человеческие жертвы. При продолжающемся неблагоприятном развитии чрезвычайной ситуации наступает ее последний этап, связанный с постепенным ростом ущерба ввиду продолжающегося затопления контролируемых объектов и территорий. На данном этапе ущерб, как и в предыдущем случае, описывается линейной функцией, но с другими коэффициентами:

$$D_i = k_i^* \varepsilon_i + b_i^*, \varepsilon_i \in [\varepsilon_i^{T1}; \varepsilon_i^{T2}], i = \overline{1, n_1 + n_2},$$

где ε_i^{T1} , ε_i^{T2} — нижняя и верхняя границы интервала.

С учетом сделанных допущений при использовании данной модели значение ущерба D_i , $i = \overline{1, n_1 + n_2}$, на различных этапах развития чрезвычайной ситуации может быть определено из следующего выражения:

$$D_i(\varepsilon_i) = \begin{cases} 0 & \text{при } \varepsilon_i \in [0, \varepsilon_i]; \\ k_i \varepsilon_i + b_i & \text{при } \varepsilon_i \in [\varepsilon_i^H, \varepsilon_i^B]; \\ a_i^{\varepsilon_i} & \text{при } \varepsilon_i \in [\varepsilon_i^{m1}, \varepsilon_i^{m2}]; \\ k_i^* \varepsilon_i + b_i^* & \text{при } \varepsilon_i \in [\varepsilon_i^{T1}, \varepsilon_i^{T2}], \end{cases} \quad i = \overline{1, n_1 + n_2}, \quad (4)$$

а суммарный ущерб от возникновения чрезвычайной ситуации определится из выражения $D = \sum_{i=1}^n D_i$

(k_i , a_i , k_i^* — известные коэффициенты).

Алгоритм решения задачи методом динамического программирования

Представим процедуру оперативного управления объектами и территориями при ликвидации чрезвычайной ситуации $w(x(t), u(t))$ на временном интервале ΔT в виде дискретно-распределенного процесса, состоящего из g стадий. Допустим, что на каждой стадии g_i контролируемые объекты и территории могут находиться в одном из состояний S_{ki} , $i = \overline{1, g}$, $k = \overline{1, m_i}$ (m_i — число состояний на стадии g_i). Будем также считать, что в процессе подготовки к действиям в условиях чрезвычайных ситуаций управленческим персоналом РСЧС были разработаны планы мероприятий P_{ik} , $i = \overline{1, g}$, $k = \overline{1, m_i}$, позволяющие осуществить перевод контролируемых объектов и территорий из состояний стадии g_i в состояния стадии g_{i+1} . Каждому плану P_{ik} , $i = \overline{1, g}$, $k = \overline{1, m_i}$, ликвидации возникшей чрезвычайной ситуации $w(x(t), u(t))$ ставится в соответствие функция ущерба D_{ik} , $i = \overline{1, g}$, $k = \overline{1, m_i}$, значение которой определяется по одной из разработанных выше методик. В качестве критерия оптимальности решаемой задачи используется функция $D = \sum_{i=1}^g D_i$

(D_i — ущерб объекта управления на i -м этапе ликвидации чрезвычайной ситуации).

В основу методики решения задачи положен принцип оптимальности Беллмана. Задача решается в два этапа способом обратной прогонки. Рекуррентное соотношение для алгоритма обратной прогонки имеет следующий вид:

$$D_i(S_i) = \min_{\forall D(S_i, S_{i+1}) \in \{D\}} \{D(S_i, S_{i+1}) + D_{i+1}(S_{i+1})\}, \quad i = \overline{1, g-1}. \quad (5)$$

На первом этапе реализации данного алгоритма определяется совокупность состояний $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_k$, при прохождении через которые объекта управления чрезвычайная ситуация будет ликвидирована с минимальным ущербом. На его втором этапе формируются планы P_k , $k = \overline{1, g-1}$, соответствующие переходам $S_{k-1} \rightarrow S_k$ из условия $\min_{\forall D(S_{k-1}, S_k) \in \{D\}} \{D(S_{k-1}, S_k)\}$ ($\{D\}$ — множество всех допустимых переходов $S_{k-1} \rightarrow S_k$). В результате будет сформирована совокупность планов мероприятий $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{g-1}$ по ликвидации возникшей чрезвычайной ситуации $w(x(t), u(t))$.

Модельный пример решения задачи

Рассмотрим одну из чрезвычайных ситуаций, достаточно часто возникающую на территории Самарской области Российской Федерации. Допустим, что необходимо ликвидировать чрезвычайную ситуацию, связанную с затоплением контролируемых объектов и территорий во время весеннего паводка. Будем считать, что возникшая чрезвычайная ситуация характеризуется набором из шести координат: y_1 — площадь зоны затопления; y_2 — число разрушенных, поврежденных объектов; y_3 — степень повреждения объектов экономики; y_4 — площадь земель, частично или полностью исключенных из сельскохозяйственного оборота; y_5 — площадь загрязнения опасными веществами почв, грунтов, подземных, поверхностных вод; y_6 — экономический ущерб от чрезвычайной ситуации.

В табл. 1 указаны значения этих координат на момент начала работ по ликвидации чрезвычайной ситуации. Приведенные в таблице величины измерены в шкале отношений $[0; 1]$, их перевод в эту шкалу был осуществлен по формуле $y_i = y_i^T / y_i^{\max}$, $i = \overline{1, 6}$ (y_i^T, y_i^{\max} — текущее и максимальное значение i -й координаты).

После анализа сложившейся ситуации, проведенного с учетом материальных, финансовых и людских ресурсов, направляемых руководством области и структурами МЧС на ликвидацию чрезвычайной ситуации $w(x(t), u(t))$, было принято решение

Таблица 1
Значение координат $y_i, i = \overline{1, 6}$, на момент начала работ по ликвидации чрезвычайной ситуации

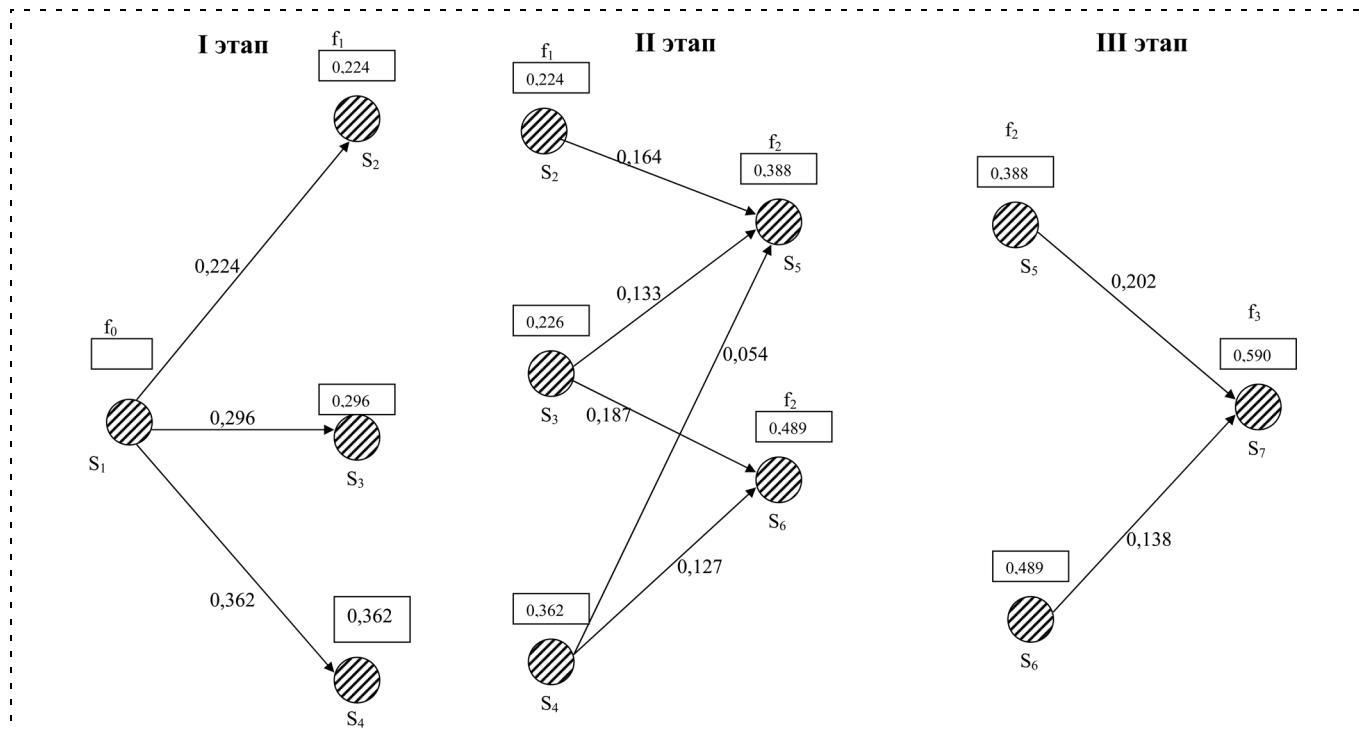
y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
0,6	0,3	0,5	0,8	0,7	0,5

Таблица 2
Значения координат для различных промежуточных состояний объекта управления

Состояния	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
S_2	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2
S_3	0,3	0,25	0,35	0,4	0,3	0,2
S_4	0,35	0,15	0,2	0,35	0,2	0,1
S_5	0,25	0,1	0,2	0,3	0,2	0,05
S_6	0,1	0,1	0,1	0,25	0,15	0

выполнить работы, но поэтапно. Последовательность проведения работ по ликвидации чрезвычайной ситуации представлены на рисунке в виде графа $G(V, E)$. В табл. 2 приведены значения координат для состояний S_2, S_3, S_4, S_5 и S_6 объекта управления.

Для расчета ущерба при переходах из одного состояния в другое воспользуемся зависимостью (3) модели приближенной оценки ущерба, в которой примем $k = 1, \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = 1/6$. При решении поставленной задачи методом динамического программирования разделим процедуру нахождения оптимального значения целевой функции на три этапа, как это показано на рисунке.



Граф $G(V, E)$ с накапливаемыми значениями функции $f_i, i = \overline{1, 3}$

Для проведения вычислений наименьших (накапливаемых) значений ущерба по всем вершинам этапа с последующим использованием этих значений в качестве исходных данных для следующего этапа воспользуемся рекуррентной формулой алгоритма прямой прогонки, которую запишем в следующем виде:

$$f_i(x_i) = \min_{\substack{\text{все допустимые} \\ \text{маршруты}}} \{D(S_i, S_{i+1}) + f_{i+1}(S_{i+1})\},$$

$$i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

Суммируя веса дуг графа $G(V, E)$ в соответствии с (6), получим следующие итоговые результаты: наименьший ущерб при переходе к конечной вершине $V_7 \in G(V, E)$ из вершины $V_5 \in G(V, E)$ составляет $\min \begin{cases} 0,388 + 0,202 = 0,590 \\ 0,489 + 0,138 = 0,627 \end{cases} = 0,590$ единицы. Таким образом, для ликвидации чрезвычайной ситуации $w(x(t), u(t))$ необходимо осуществить переход из начального состояния S_1 в конечное состояние S_7 по траектории $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_5 \rightarrow S_7$. Для реализации данного перехода следует разработать план мероприятий P_1, P_2, P_5, P_7 по ликвидации чрезвычайной ситуации $w(x(t), u(t))$, минимизирующий ущерб от ее возникновения.

Заключение

Разработанное математическое обеспечение было использовано при совершенствовании автоматизированной системы управления производственными процессами ОАО "Трансмаш" (г. Энгельс).

Список литературы

1. Емельянов В. М., Коханов В. Н., Некрасов П. А. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. М.: Академический проект: Трикста, 2004. 480 с.
2. Емельянов В. М., Коханов В. Н., Некрасов П. А. Основы защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях / Под ред. акад. В. В. Тарасова. М.: Академический проект, 1991. 190 с.
3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Защита населения и территорий при ЧС природного и техногенного характера. М.: МГФ "Знание", 1999. 592 с.
4. Красовский А. А., Наумов А. И. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта // Изв. Академии наук. Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 69—75.
5. Васильев С. Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению I // Изв. Академии наук. Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 5—22.
6. Васильев С. Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению II // Изв. Академии наук. Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 5—21.

УДК 005:519.713.1:625.748.54

А. А. Безродный, канд. техн. наук, науч. сотр.,
Институт проблем точной механики
и управления РАН, г. Саратов
abezrodny@licard.ru

Оптимизация обслуживания автотранспортных средств на автозаправочных станциях с использованием автоматизированных автозаправочных терминалов

Предложены подходы к оптимизации структур и процессов обслуживания автотранспортных средств на автозаправочных станциях с использованием автоматизированных автозаправочных терминалов.

Ключевые слова: автозаправочная станция, автоматизированный автозаправочный терминал, модель, оптимизация, алгоритм.

Автозаправочные станции (АЗС) являются наиболее распространенными объектами системы нефтепродуктообеспечения (НПО). К настоящему времени используется ряд моделей структур АЗС и

алгоритмов оптимизации их функционирования [1—3]. В [4] показано, что оптимальной по критерию минимума простоя автотранспортных средств (АТС) и топливораздаточных колонок (ТРК) для современного среднего города РФ является структура, состоящая из двух двухсторонних ТРК, расположенных перпендикулярно дорожному полотну улично-дорожной сети (УДС) и реализующих все предлагаемые на АЗС виды нефтепродуктов.

Однако возможности увеличения числа ТРК для обслуживания растущего потока АТС для большинства АЗС исчерпаны [4]. Необходимы новые подходы к оптимизации структур АЗС и процессов их функционирования.

В данной статье предлагается подход к оптимизации обслуживания АТС на АЗС с использованием автоматизированных автозаправочных терминалов (ААТ).

Подходы к оптимизации структур АЗС

Повышение скорости обслуживания потоков АТС на АЗС требует совершенствования систем обслуживания, одним из путей которого является

использование на АЗС ААТ. Известные задачи [5] оптимизации функционирования АЗС с ААТ не полностью охватывают случаи использования ААТ. В них в качестве каналов обслуживания выступают заправочные позиции (стороны) ТРК на рабочей площадке, хотя обслуживание может осуществляться с использованием нескольких терминалов контрольно-кассовой техники (ККТ), находящихся в здании АЗС, терминалов систем безналичных расчетов, установленных на топливораздаточных колонках, устройств бесконтактной идентификации потребителей и т. п. [6, 7]. Поэтому предлагается рассматривать новый комплекс задач для решения данной проблемы.

Задача определения состава ТРК на АЗС с ААТ состоит в минимизации числа ТРК, обслуживающих существующие и перспективные потоки АТС:

$$K(n, n_0, m) \Rightarrow \min, \\ 1 \leq K \leq K_{\max}, 1 \leq m \leq M_{\max}, n \sim P(n), \quad (1)$$

где K — число ТРК на АЗС (известное $K_{\max} = 12$); n — число АТС на АЗС; n_0 — допустимая потребителем длина очереди, после достижения которой новые АТС не поступают на АЗС, считая ее "занятой"; m — виды нефтепродуктов (Аи-80, Аи-92, Аи-95, Аи-98, ДТ, сжиженные углеводородные газы); $P(n)$ — вероятность нахождения на АЗС заданного числа АТС n .

Задача определения структуры ТРК на АЗС с ААТ состоит в нахождении такого взаимного расположения ТРК и ААТ, которое минимизирует потери потребителей от ожидания в очереди и предприятий НПО от простоев ТРК:

$$\Pi(\Gamma_q, K) \Rightarrow \min, \Pi = \Pi_1 + \Pi_2, K \leq K_{N1}, \\ \Gamma_q \in (\Gamma_{1...5}), \Pi_{1,2} = \Pi_{1,2}(\tau_{1,2}), \quad (2)$$

где Γ_q — вариант структуры ТРК ($q = \overline{1,5}$, $q = 1$ — перпендикулярно дорожному полотну УДС; $q = 2$ — параллельно дорожному полотну УДС; $q = 3$ — диагональная; $q = 4$ — матричная и $q = 5$ — смешанная структуры); значение K получается по результатам решения предыдущей задачи; Π_1 — потери потребителей от ожидания в очереди в течение τ_1 ; Π_2 — потери АЗС от простоев ТРК в течение τ_2 . Выражения, определяющие потери от простоя АТС и ТРК, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Определение потерь от простоя АТС и ТРК на АЗС

Время простоя АТС	Потери от простоя АТС	Время простоя ТРК	Потери от простоя ТРК
$\tau_1 = (n_0 - K)\tau_{\text{тех}}$	$\Pi_1 = q_1\tau_1$	$\tau_2 = 60(1 - \eta_3)$	$\Pi_1 = q_2\tau_2$

Данные выражения содержат коэффициенты q_1 и q_2 (q_1 — альтернативная стоимость и нереализованные варианты развития, q_2 — затраты на амортизацию), зависящие от специфики региона, сети АЗС и метода подсчета. Коэффициент часовой занятости ТРК η_3 находится по результатам наблюдения за реальными объектами и анализа ретроспективных данных АСУ АЗС об обслуживании потоков АТС (данные АСУ АЗС); $\tau_{\text{тех}}$ — среднее техническое время обслуживания, отражающее возможности топливораздаточного оборудования.

Модели структур АЗС и алгоритмы их оптимизации

При решении задач оптимизации структур топливораздаточного оборудования рассматривается ситуация превышения числа заявок входного потока над числом заявок, которые могут быть обслужены при существующей структуре ТРК, т. е. случай, когда число АТС на АЗС больше суммы допустимой длины очереди и числа ТРК: $n > n_0 + K$.

При росте интенсивности потоков АТС данная ситуация является типичной для АЗС с неоптимальной структурой. Следовательно, вероятность $P(n \geq n_0 + K)$ появления на АЗС числа АТС n с заявками на нефтепродукты составляет

$$P(n \geq n_0 + K) = 1 - \sum_{n=n_0+K}^{n-1} p_n(\tau'), \quad (3)$$

где τ' — время образования очереди.

Интенсивность поступления АТС на обслуживание определяется по данным АСУ АЗС. Проведенные исследования показали [5], что реальный нестационарный поток заявок на АЗС можно аппроксимировать потоком, стационарным на отдельных интервалах времени int ($\text{int} = 1 \dots \text{Int}_{\max}$) (интервалах квазистационарности) [8]. Неординарность реального потока АТС описывается с помощью вероятности $P_{f,m}$ отпуска нефтепродуктов вида m через ТРК f ($f = 1 \dots K$) — совместной вероятности наличия на ТРК f нефтепродуктов вида m и ее незанятости. При использовании ААТ учитывается вероятность $P_{f,c}$ обслуживания с использованием ККТ или ААТ: если обслуживание выполняется с использованием ККТ, то $P_{f,c} = 1/K$, а если с ААТ, то $P_{f,c} = c/K$ ($c = 1 \dots C_{\max} < K$).

Для вновь прибывающей заявки определяющей является вероятность $P_{f,m}$ незанятости ТРК с видом нефтепродуктов m , тогда как для АЗС в целом существенное значение имеет вероятность $P_{\text{int},m}$ запроса вида нефтепродуктов m в интервале времени int . Следовательно, для АЗС с ААТ вероятность $P_{\text{int},m}$ нахождения в интервале int числа заявок $n > n_0 + K$

на вид нефтепродуктов m определяется соотношением

$$P_{\text{int},m}(n \geq n_0 + K) = \left(1 - \sum_{n=n_0+K}^{n-1} \frac{(\lambda_{\text{int},m} \tau'_{\text{int},m})^{n_0+K}}{(n_0+K)!}\right) \times e^{-\lambda_{\text{int},m} \tau'_{\text{int},m}} P_{f,m} P_{f,c} P_{\text{int},m} \quad (4)$$

где $P_{f,m} = \frac{K_m - 1}{K} \left(\frac{K_{m0}}{K_0}\right)_{vh}$; $P_{f,c} = \left\{ \begin{array}{l} 1/K \text{ в случае использования ККТ} \\ c/K \text{ в случае использования ААТ} \end{array} \right\}$;

$$P_{\text{int},m} = \frac{n_{\text{int},m}}{n_{\text{int}}}$$

Здесь $\lambda_{\text{int},m}$ — интенсивность потока заявок на нефтепродукты вида m в интервале int ; $(K_{m0}/K_0)_{vh}$ — элемент матрицы топологии ТРК на АЗС; K — общее число заправочных позиций — независимо работающих сторон ТРК (до двух на известных ТРК); K_m — число заправочных позиций для отпуска нефтепродуктов вида m ; K_0 — общее число заправочных кранов — устройств отпуска (до шести на заправочных позициях известных ТРК); K_{m0} — число заправочных кранов для отпуска нефтепродуктов вида m ; $\tau'_{\text{int},m}$ — время для образования очереди заявок на нефтепродукты вида m в int ; $P_{\text{int},m}$ — вероятность запроса нефтепродуктов вида m в интервал int ; $n_{\text{int},m}$ — число заявок на вид нефтепродуктов m в интервале int ; n_{int} — общее число заявок в интервале int .

Для определения структуры ТРК на АЗС с ААТ станция представляется в виде системы массового обслуживания (СМО), каналы обслуживания которой включают в себя заправочные позиции ТРК и ККТ (или ААТ) АСУ АЗС.

Граф обслуживания на АЗС без ААТ приведен на рис. 1.

На рис. 1 особыми состояниями V_i ($i = 1 \dots I_{\text{max}}$, $I_{\text{max}} = 6$) являются поступления заявки в СМО: при-

бытие АТС на АЗС, обращение потребителя к персоналу АЗС или использование им ААТ ($i = 1$); информационная обработка заявки в АСУ АЗС в соответствии с ее характеристиками: время прибытия, объем и вид нефтепродуктов, вид оплаты, в ряде случаев тип АТС и подача команд на исполнение заявки на ТРК ($i = 2$); постановка АТС в очередь к выбранной ТРК ($i = 3$); подготовка к обслуживанию: остановка, открытие люка бензобака, вставка раздаточного крана в горловину ($i = 4$); обслуживание — отпуск нефтепродуктов ($i = 5$); окончание обслуживания: проверка окончания отпуска, вставка крана в посадочное место на ТРК, закрытие лючка бензобака ($i = 6$).

Между выделенными особыми состояниями протекают потоки заявок E_j ($j = 1 \dots J_{\text{max}}$, $J_{\text{max}} = I_{\text{max}} + 1$) — входной поток поступающих на АЗС АТС ($j = 1$), потоки после прохождения и обработки в особых состояниях ($j = 2 \dots 6$) и выходные потоки заявок ($j = 7$). Заявке при моделировании ставится в соответствие элемент массива, содержащий информацию об ее характеристиках.

Граф обслуживания на АЗС с ААТ, представленный на рис. 2, дополнен процедурами обработки заявок на ККТ или ААТ (рис. 2).

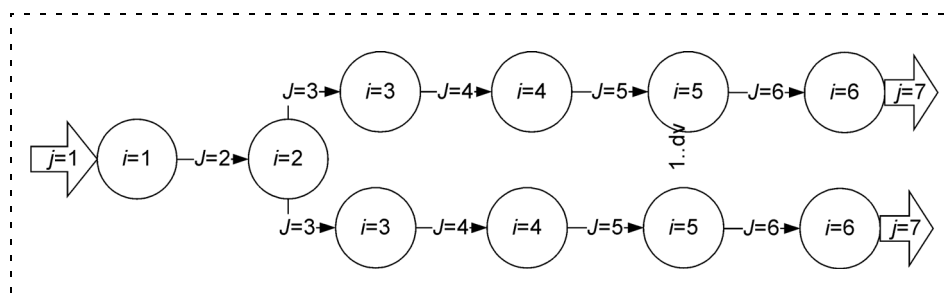


Рис. 1. Граф обслуживания АТС на АЗС без ААТ

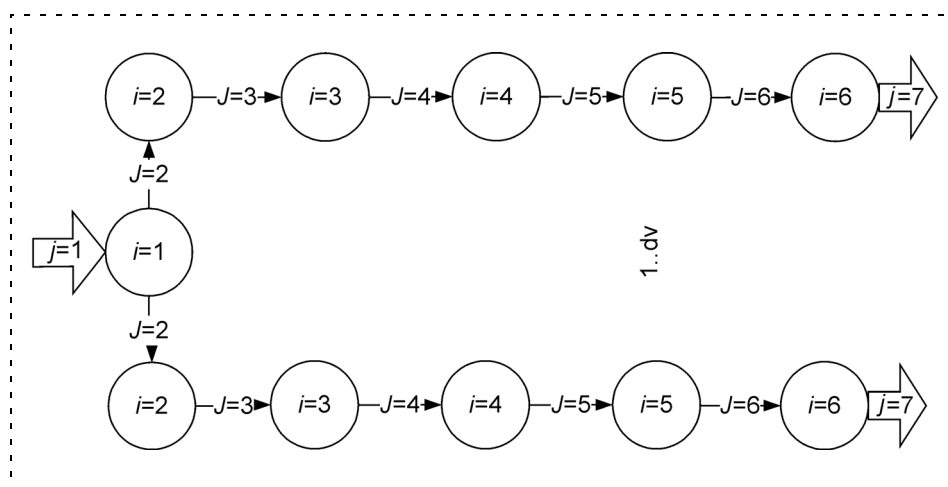


Рис. 2. Граф обслуживания АТС на АЗС с ААТ

Характеристики потоков АТС на АЗС с ААТ

Наименование	Распределение	Описание	Обоснование
1. Поступление заявки в СМО	Потоки Эрланга	Поток АТС, частично перехватываемый на АЗС, моделируется в СМО АЗК потоками Эрланга	Использование данных АСУ АЗС, независимость порядка потока Эрланга от значений коэффициентов перехвата потока АТС
2. Обработка заявки в АСУ АЗС и подача команд на ТРК	Табличные распределения	Потребитель находится на АЗС в течение интервала времени, определяемого характеристиками оборудования, подготовленностью персонала, личными предпочтениями и поведенческими особенностями	Характеристики ТРК и АСУ АЗС задаются ТУ на оборудование
3. Постановка АТС в очередь	Нормальные распределения		Существует множество случайных факторов, определяющих отклонения от задаваемых (ТУ оборудования, стандарты обслуживания и особенности поведения групп потребителей) средних значений характеристик, влияние каждого из которых мало
4. Подготовка к обслуживанию			
5. Обслуживание	Линейная зависимость	Техническое время отпуска нефтепродуктов ТРК линейно зависит от необходимого объема	Постоянство скорости отпуска в штатных установившихся режимах работы ТРК
6. Окончание обслуживания	Аналогично правилам особого состояния		

Входные потоки АТС моделируются потоками Эрланга [8]. Характеристики потоков АТС, проходящих через СМО, приведены в табл. 2.

Алгоритм определения состава ТРК на АЗС с ААТ

При реализации алгоритма используются следующие обозначения: K_{\max} — максимально известное число заправочных позиций; n_0 — допустимая длина очереди к каждой заправочной позиции; $P_{\text{int},m}(n-1) = 0$ (исходя из целевого предназначения АЗС в интервал int на нее поступит хотя бы одно АТС).

На *первом этапе* осуществляется сбор данных о сети АЗС: число АЗС сети $N_{\text{АЗС}}$; максимально возможное число видов нефтепродуктов M_{\max} ; максимально возможное число ТРК (заправочных позиций) K_{\max} ; число интервалов Int_{\max} .

На *втором этапе* определяются: вероятность нахождения на АЗС числа АТС, равного n , при данной интенсивности потока АТС в интервал int как совместная вероятность подачи заявки на вид топлива m , наличия данного вида топлива на ТРК, ее незанятости и наличия на ТРК ААТ; точка $n_{\text{насыщ}}$ функции $P_{\text{int},m}(n \geq n_0 + K)$ с требуемой точностью (обычно 5 %); соответствующее число заправочных позиций K .

На *третьем этапе* осуществляется поиск числа заправочных позиций K , обеспечивающих допустимую потребителями длину очереди n_0 . По результатам второго этапа находится массив зависимостей $K(n, n_0, \text{int})$, определяются средние значения

и доверительные интервалы K для обеспечения заданного n_0 . Верхняя доверительная граница найденного числа заправочных позиций, округленная до целого числа в большую сторону, считается оптимальной. Для найденного числа заправочных позиций вычисляются коэффициенты простоя ТРК и АТС.

На *четвертом этапе* выполняется апробация полученных результатов на тестовой АЗС и выдаются рекомендации о реконструкции структуры ТРК на действующих АЗС и ее применении на вновь создающихся объектах.

Алгоритм определения структуры ТРК на АЗС с ААТ

На *первом этапе* по данным АСУ АЗС проводится определение структуры и параметров СМО: интервалов квазистационарности, числа каналов обслуживания, параметров входных потоков, правил обработки заявок (АТС).

На *втором этапе* осуществляется имитация обслуживания АТС (см. рис. 2).

На *третьем этапе* формируются массивы времен простоя АТС и ТРК для различных интервалов квазистационарности, определяются потери и осуществляется выбор (путем полного перебора) структуры Γ , оптимальной по критерию (2).

Данный алгоритм относится к одной АЗС, но может быть распространен на сеть АЗС.

Диалоговое окно среды моделирования Trace Mode представлено на рис. 3.

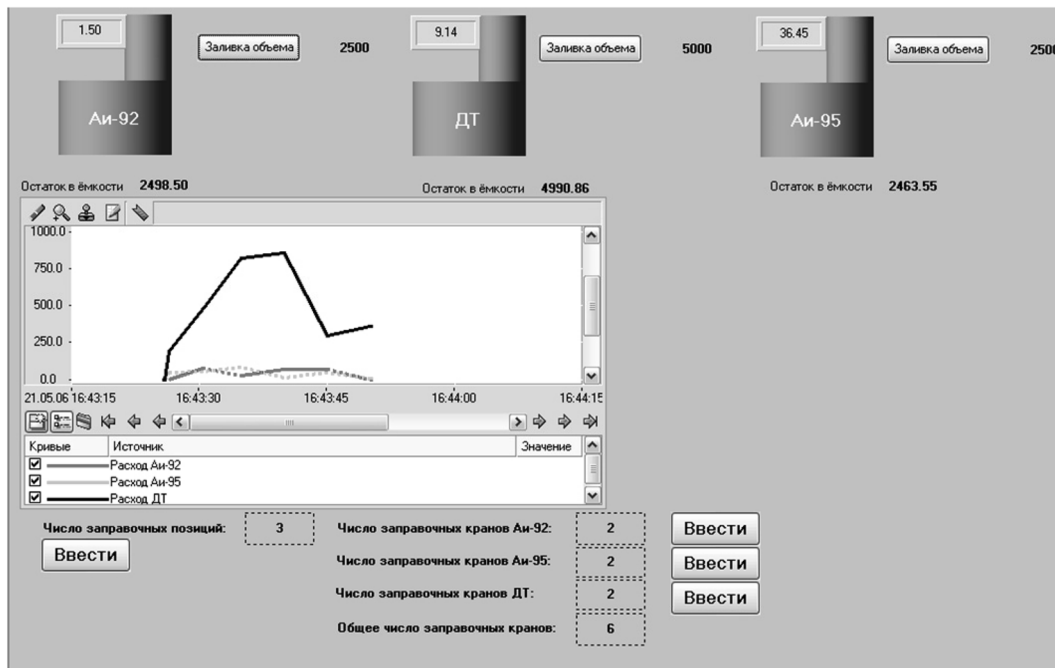


Рис. 3. Диалоговое окно среды моделирования Trace Mode

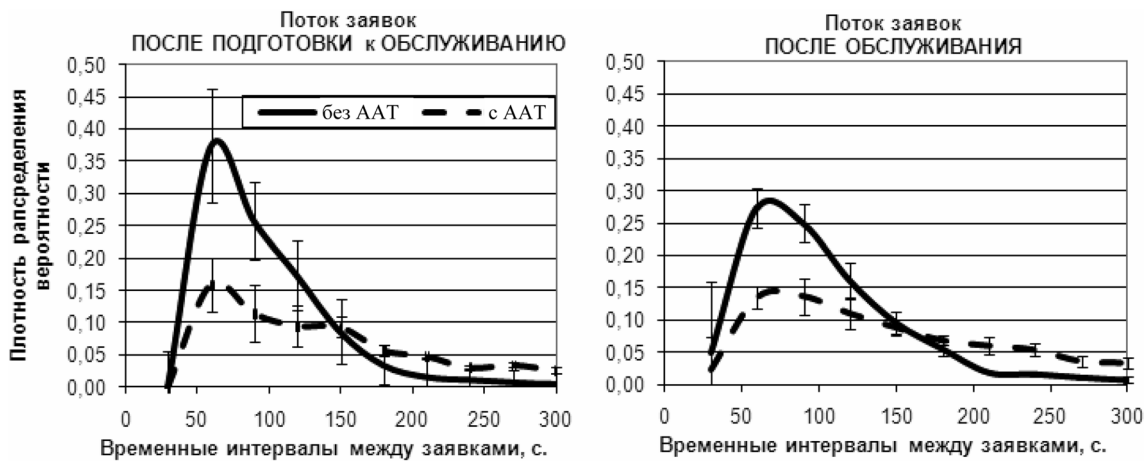


Рис. 4. Характеристики потоков заявок на АЗС при наличии и отсутствии ААТ

Результаты моделирования и внедрения ААТ на АЗС

1. В результате решения поставленных задач получены зависимости законов распределения потоков АТС при наличии и отсутствии ААТ (рис. 4).

Наличие ААТ улучшает качество обслуживания, делая выходной поток заявок более равномерным и уменьшая интервалы между заявками (заправка большегрузных автомобилей с разовым объемом выборки до 1000 л дизельного топлива и более не учитывается).

2. Применение ААТ на АЗС снижает число ТРК, оптимальных по критериям (1) и (2) для обслуживания потока АТС среднего города (рис. 5, см. третью сторону обложки, рис. 6).

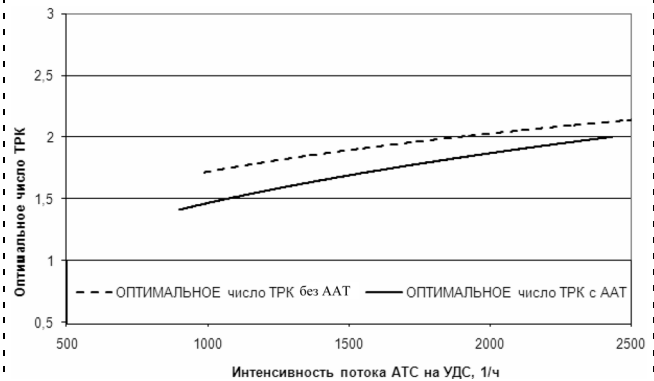


Рис. 6. Сравнение оптимального числа ТРК на АЗС при наличии и отсутствии ААТ в зависимости от интенсивности АТС на УДС

3. С использованием предложенных моделей и алгоритмов в конце 2005 г. в г. Пенза введена в эксплуатацию одна из первых в РФ АЗС с совместным использованием в составе АСУ ККТ и ААТ (рис. 7, см. третью сторону обложки), структура обслуживания, которой представлена на рис. 8 (см. третью сторону обложки).

АСУ АЗС обеспечивает надежную работу станции при выходе из строя любого компонента автозаправочного оборудования и применение ААТ независимо от его марки. Реализация дополнительного объема нефтепродуктов по картам позволила окупить издержки доработки АСУ за четыре месяца [9, 10].

Заключение

Рост интенсивности потоков АТС требует для повышения эффективности функционирования АЗС, совершенствования их структур и процессов обслуживания на них. Это может быть достигнуто с помощью использования ААТ.

Представленные модели позволяют оценить эффективность новых схем автоматизированного обслуживания существующих и перспективных потоков АТС.

Опыт практической реализации АЗС предложенного вида показал эффективность разработанных моделей.

Список литературы

1. Бутков П. П. Заправочные станции и пункты. М.: Недра, 1967. 312 с.
2. Коваленко В. Г., Кантор Ф. М., Хабаров С. Р. Системы обеспечения нефтепродуктами. М.: Недра, 1982. 237 с.
3. Цагарели Д. В. Техническое развитие нефтепродуктообеспечения. М.: Нефть и Газ, 1995. 112 с.
4. Безродный А. А., Иващенко В. А., Резчиков А. Ф. Оптимизация структур управления системами нефтепродуктообеспечения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 42—49.
5. Безродный А. А., Резчиков А. Ф. Модели структур и алгоритмы управления автозаправочными станциями. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. 249 с.
6. Tim Russel. Fill'er up! The great American gas station. St. Paul, MN: MBI Pub-lising company, 2007. 208 p.
7. Bernard Polster. Super oder Normal: Tankstellen eines modernen Mythos. Kohl: DuMont, 1996. 247 s.
8. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
9. "Лукойл" продвигает автоматы // Современная АЗС. 2006. № 2. С. 40—43.
10. Безродный А. А., Новиков Р. В., Симановский В. А. Синтез структуры топливораздаточного оборудования АЗС с использованием ААТ // Проблемы и перспективы развития прецизионной механики и управления: Материалы Междунар. конф. / ИПТМУ РАН. Саратов, 2006. С. 134—145.

ИНФОРМАЦИЯ

XVII САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ

Россия, Санкт-Петербург

ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор"

31 мая—02 июня 2010 г.

*Председатель программного и организационного комитетов конференции —
академик РАН В. Г. Пешехонов*

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Системы навигации, управления и наведения и их элементы
- Интегрированные навигационные системы для морских, наземных и аэрокосмических объектов
- Инерциальные системы и датчики
- Спутниковые системы GLONASS, GPS, Galileo и их дополнения
- Механические системы
- Алгоритмы и программное обеспечение
- Испытания и метрология

На конференции не рассматриваются вопросы, затрагивающие военно-техническое сотрудничество, разработки военных технологий и образцов вооружений и военной техники.

Адрес:

ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор",
ул. Малая Посадская, 30, 197046, Санкт-Петербург

Тел.: (812) 499 82 10 — рабочая группа конференции
(812) 499 81 57 — руководитель рабочей группы М. В. Гришина
Факс: (812) 232 33 76. E-mail: ICINS@eprib.ru
<http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/icins2010/rufrset.html>



ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



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

Крыжановский Г. А., Солодухин В. А.

Методологические и прикладные аспекты обратной задачи оптимизации в процессах принятия решений при управлении воздушным движением 54

Лебедев Г. Н., Мирзоян Л. А., Ефимов А. В.

Нейросетевое планирование групповых действий летательных аппаратов при наблюдении заданной группы подвижных наземных объектов. 60

Хахулин Г. Ф., Новиков С. А., Посадский А. И., Ескин В. И.

Задачи формирования и динамической корректировки плана наблюдений в системе космического мониторинга подвижных морских объектов. 65

Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В.

Проблемы обеспечения сбое- и отказоустойчивости бортовой аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли от воздействия излучений космического пространства. . . 72

Г. А. Крыжановский,
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
В. А. Солодухин, канд. техн. наук, проф.,
Санкт-Петербургский государственный
университет гражданской авиации
victorsoloduhin@yandex.ru

Методологические и прикладные аспекты обратной задачи оптимизации в процессах принятия решений при управлении воздушным движением*

Рассмотрены вопросы развития методологии использования решений обратной задачи оптимизации (ОЗО). Установлена связь решений ОЗО с функцией полезности лица, принимающего решение. Приведена структурно-логическая схема методологии решения ОЗО для типовых задач управления воздушным движением (УВД). Предложен подход к оценке качества деятельности и уровня профессиональной подготовки диспетчеров УВД, использующий решения ОЗО. Рассмотрен пример использования решений ОЗО для анализа устойчивости решений типовых задач в системе УВД.

Ключевые слова: интересо-ориентированная система, процессы принятия решений, обратная задача оптимизации, типовые задачи управления воздушным движением.

Система управления воздушным движением (УВД), так же как и авиационно-транспортная система в целом, является "интересо-ориентированной". В отличие от целеориентированных систем, в которых цель управления задана экзогенно, в таких системах мотивация активности и управляющих действий основывается на интересах, точнее — на стремлении к их реализации [1]. Современный этап развития системы УВД связан с решением сложной научно-технической проблемы обеспечения максимально возможного уровня безопасности воздушного движения. Принципиальные ее трудности связаны с тем обстоятельством, что безопасность воздушного движения не может рассматриваться в качестве главной цели, а должна рассматриваться и решаться в контексте интересов, связанных с использованием авиационно-транспортной системы. К последним относится, в частности, проблема повышения пропускной способности системы УВД. Сказанное относится ко всем этапам организации и функционирования системы УВД.

Наибольшей сложностью характеризуются, по-видимому, процессы принятия решений (ППР) при непосредственном УВД. Это обусловлено необхо-

димостью решения задач в реальном масштабе времени, а также наличием различных изменяющихся факторов, требующих учета при выборе управляющих решений, в силу которых однозначно определить и формализовать цель управления не удастся. Иными словами, исследование задач непосредственного УВД не вписывается в методологию оптимизации решений, хорошо развитую для целеориентированных систем. Это является одним из основных факторов, сдерживающих создание автоматизированных систем поддержки принятия решений (СППР) в системе УВД. В настоящее время уже никто не говорит о возможности полной автоматизации процессов УВД, поскольку все возможные ситуации развития динамической воздушной обстановки вряд ли можно предвидеть и тем более формализовать в виде адекватных им моделей, позволяющих решать задачи УВД с желаемой эффективностью.

Одним из очевидных направлений разработки СППР является ориентация на часто повторяющиеся задачи сбора (приема), обработки и обмена информацией в целях исключения случайных ошибок, снижения загруженности (временной занятости) диспетчера УВД и повышения, тем самым, уровня безопасности и пропускной способности системы УВД. Проблема автоматизации ППР при непосредственном УВД пока еще слабо структурирована. С точки зрения формализации задач в системе УВД новые возможности открываются на основе решения обратных задач оптимизации (ОЗО) [2–5]. В общем виде ОЗО обычно рассматривается как задача идентификации параметров, т. е. нахождения таких параметров, при которых заданные значения переменных прямой задачи являются ее решением.

Формализация построения множества всех прямых задач для заданного решения позволяет осуществить анализ устойчивости, т. е. определить возможные возмущения параметров задачи, при которых заданное решение остается оптимальным. Наиболее интенсивное развитие такой подход получил в рамках теории математического программирования [6–8]. Постановка и решение таких задач актуальны, в том числе и при исследовании проблемы совершенствования системы УВД.

Другое направление использования решений ОЗО нами связывается с исследованием экстремальных свойств решений функциональных типовых задач (ФТЗ) организации, планирования и, прежде всего, непосредственного УВД, выбранных органом или лицом, принимающим решение (ЛПР) в процессе деятельности. Формализация многих из этих задач осуществлена в рамках линейного программирования (ЛП) в виде постановок задачи о покрытии, транспортной задачи, задачи о кратчайшем пути на сети, с булевыми переменными специальной структуры (с целочисленным или квазицелочисленным множеством допустимых решений (МДР))

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 08-08-00012-а.

и др. [5, 9]. Общее решение обратной задачи (ОЗ) ЛПР и схема его использования для идентификации параметров (весовых коэффициентов) комплексного показателя эффективности решения, выбранного ЛПР, приводится в [5]. При этом речь не идет об анализе произвольных допустимых решений задачи. Понятно, что для любого допустимого решения задачи выпуклого математического программирования, принадлежащего границе МДР, легко построить множество линейных и нелинейных функций, принимающих экстремальное значение, т. е. решение является оптимальным в смысле некоторого критерия качества. Если смысл такой оптимальности не удастся объяснить исходя из общепринятых понятий об эффективности решения (например, по Парето), то, по-видимому, такое решение целесообразно считать недопустимым (неадекватным требованиям к качеству, нерациональным) для исследуемой задачи.

В теории принятия решений для оценки эффективности решений ЛПР вводится функция полезности. Обычно предполагается, что она зависит от совокупности частных показателей эффективности (критериев качества) и является, как правило, нелинейной, а совокупность показателей удовлетворяет ряду общесистемных требований, среди которых определяющим является полнота учета требований к эффективности функционирования системы. Для моделирования ФТЗ УВД в [5] определены две группы показателей, определяющие эффективность решения с точки зрения пользователя и временную занятость диспетчера УВД, что вполне согласуется с концепцией интересо-ориентированных систем.

Сказанное свидетельствует о целесообразности дальнейшего развития методологии использования решений ОЗО.

Связь решений обратной задачи с функцией полезности ЛПР

Пусть частные показатели — линейные функции $J_s = \mathbf{c}_s^T \mathbf{x}$, $s = 1, \dots, k$, а МДР типовой задачи формализовано в виде

$$\Omega_x: \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} \leq b_i, i = 1, \dots, n; x_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где \mathbf{x} — вектор решений; $\mathbf{a}_i, \mathbf{c}_i$ — числовые векторы; b_i — константы.

Предположим, что функция полезности ЛПР $U(J_1, \dots, J_k)$ непрерывна и дифференцируема в точках \mathbf{x} , определяющих эффективные (оптимальные по Парето) решения, т. е. таких, для которых выполняются условия [10]

$$\sum_{s=1}^k \lambda_s \mathbf{c}_s = \sum_{i=1}^m \mu_i \mathbf{a}_i; \lambda_s, \mu_i \geq 0. \quad (2)$$

Градиент U в точке \mathbf{x} имеет вид

$$\nabla U(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^k (\partial U(\mathbf{x})/\partial J_s) \nabla J_s(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^k (\partial U(\mathbf{x})/\nabla J_s) \mathbf{c}_s.$$

Пусть для первого критерия выполнено $(\partial U(\mathbf{x})/\partial J_1) > 0$. Тогда направление градиента функции U в точке \mathbf{x} можно определить в виде

$$\nabla U(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^k \omega_s \mathbf{c}_s, \text{ где } \omega_s = (\partial U(\mathbf{x})/\partial J_s)/(\partial U(\mathbf{x})/\partial J_1).$$

Полагая $\alpha_s = \omega_s / \sum_{q=1}^k \omega_q$, получаем $\nabla U(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^k \alpha_s \mathbf{c}_s$,

$$\sum_{s=1}^k \alpha_s = 1, \alpha_s \geq 0.$$

Таким образом, решение типовой задачи \mathbf{x}^* , выбранное ЛПР, полностью определяется градиентом функции полезности ЛПР U независимо от ее формального вида. Более того, если множество допустимых решений определяется выпуклым многогранником, а \mathbf{x}^* — крайняя точка, это решение оптимизирует (максимизирует) некоторое множество Ω_j показателей вида

$$J_\Sigma(\lambda, \mathbf{J}) = \sum_{s=1}^k \lambda_s J_s, \sum_{s=1}^k \lambda_s = 1, \lambda_s \geq 0. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{J} — векторная функция полезности с компонентами J_s , $s = 1, \dots, k$. Это множество, совпадающее с решением ОЗО [5], содержит также и пока-

затель $J(\alpha)_\Sigma = \sum_{s=1}^k \alpha_s J_s$, возможно наилучшим об-

разом аппроксимирующий неизвестную функцию полезности. Рассмотрим бинарное отношение предпочтения ЛПР на некотором подмножестве допустимых решений в окрестности точки \mathbf{x}^* (например, всех соседних с ней крайних точек $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 : \mathbf{x}_1 \succ \mathbf{x}_2$ на рис. 1). Если оно транзитивно, то исключая подмножество показателей (3), неадекватных предпочтениям ЛПР ($\bar{\Omega}_J$ на рис. 1), получим множество показателей $\Omega_{J_\Sigma} = \Omega_J \setminus \bar{\Omega}_J$, которое правильно отражает предпочтения ЛПР. На рис. 1 такому случаю соответствует функция полезности ЛПР U_1 .

Функция U_2 является примером, когда отношение предпочтения ЛПР также транзитивно, но при этом $\mathbf{x}_2 \succ \mathbf{x}_1$ и $J(\alpha)_\Sigma \notin \bar{\Omega}_J$. Этот случай требует дополнительных исследований, например, в отношениях ЛПР к значениям коэффициентов α_s , или при переходе к ОЗО с квадратичным показателем эффективности и др. А это уже относится скорее к проблематике когнитивного моделирования.

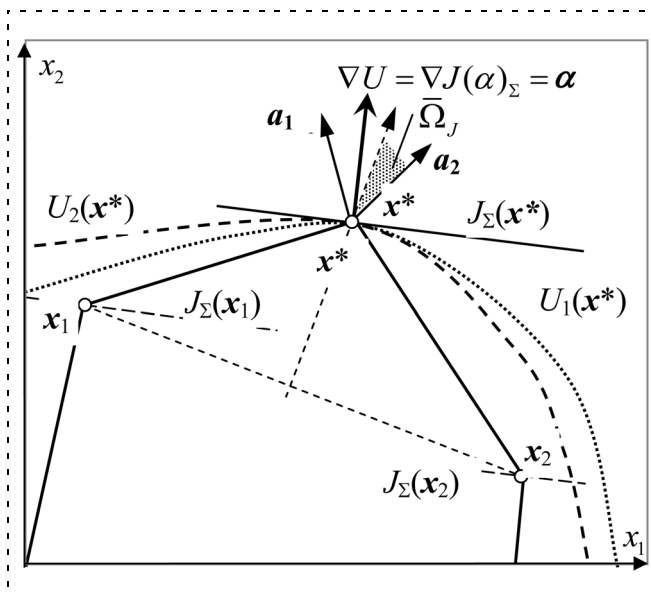


Рис. 1. Анализ предпочтений и свойств функции полезности ЛПР

Таким образом, показано, что в любом случае показатель, определяемый градиентом функции полезности ЛПР, содержится в множестве решений ОЗО, а его подмножество Ω_{J_Σ} правильно отражает транзитивное отношение предпочтений.

Обратная задача оптимизации в общей схеме исследования проблемы принятия решений

В общей теории целеориентированных систем установлена практически каноническая методология исследования проблемы принятия решений. Ключевыми моментами являются построение МДР и выбор показателей эффективности решений. Решение проблемы выбора показателя эффективности осуществляется чаще всего итеративно с коррекцией показателя на основании анализа результатов решения тестовых задач до определения такого показателя, который признается объективным. Объективность комплексного показателя определяется его адекватностью — как математической модели требуемой цели — результатам решения типовой задачи в различных ситуациях, что характеризуется, например, правильным отображением принятой системы предпочтений, повторяемостью результатов и чувствительностью комплексного показателя к вариациям значений частных показателей и условиям внешней среды.

Теоретически проблема решения значительного числа ФТЗ непосредственного УВД также может рассматриваться как задача определения экстремума комплексного показателя эффективности $J_\Sigma = F(J(x), R)$ на МДР вида (1). Здесь x — вектор переменных состояния процесса ФТЗ, опосредованным изменением (выбором, управлением) значений которых или части из них ЛПР добивается желаемых результатов; R — совокупность парамет-

ров, определяющих развитие динамической воздушной обстановки, и других факторов, принимаемых для рассматриваемой ФТЗ в качестве условий внешней среды, влияющих на ППР. Однако до настоящего времени не известны какие-нибудь результаты формализации зависимости $J_\Sigma = F(J(x), R)$ по параметрам R . Это как раз и объясняет невозможность непосредственного применения методологии целеориентированных систем для определения объективного комплексного показателя эффективности решения ФТЗ непосредственного УВД.

В системе УВД выбор решения ФТЗ является прерогативой ЛПР — диспетчера УВД. Можно предположить, что диспетчер осуществляет деятельность оптимальным (субоптимальным) образом в смысле некоторого не заданного в явном виде критерия оптимальности решений (или функции полезности), отражающего в интегральном виде представления диспетчера УВД о целях и требуемых результатах при решении задач, стоящих перед ним в реальной ситуации, определяемой параметрами R .

Очевидно, что это справедливо, если решение задач в процессе УВД осуществляется с соблюдением установленного регламента (определяющего в явном или неявном виде перечень требуемых целей, а также правила принятия решений), а содержание команд (рекомендаций) диспетчера соответствует наиболее благоприятному развитию управляемого процесса в соответствии с концепцией интересо-ориентированных систем.

Тогда, учитывая установленную связь между неизвестной функцией полезности ЛПР и решением ОЗО, можно считать, что решение типовой задачи ЛПР оптимально (рационально) в смысле некоторого показателя вида (3), а процесс решения типовой задачи ЛПР моделируется в виде решения соответствующей задачи ЛП (1), (3).

Основное содержание методологии решения ОЗ ЛП приведено на рис. 2.

Для решения ОЗО необходимым является адекватное описание МДР, по крайней мере, в окрестности исследуемого оптимального решения. Сложность формализации и решения ОЗО в значительной степени определяется видом МДР, наличием и объемом априорных данных о структуре искомых показателей, формой представления условий оптимальности решений и другими факторами методологического, алгоритмического и организационно-технического характера.

При невыполнении каких-либо необходимых условий решение ОЗО, вообще говоря, может привести к отрицательному результату. Однако и в этом случае попытки решения ОЗО не следует считать бессмысленными. Отсутствие решения ОЗО позволяет определить основные направления и поставить новые задачи исследований для установления необходимой адекватности соответствующих моделей.

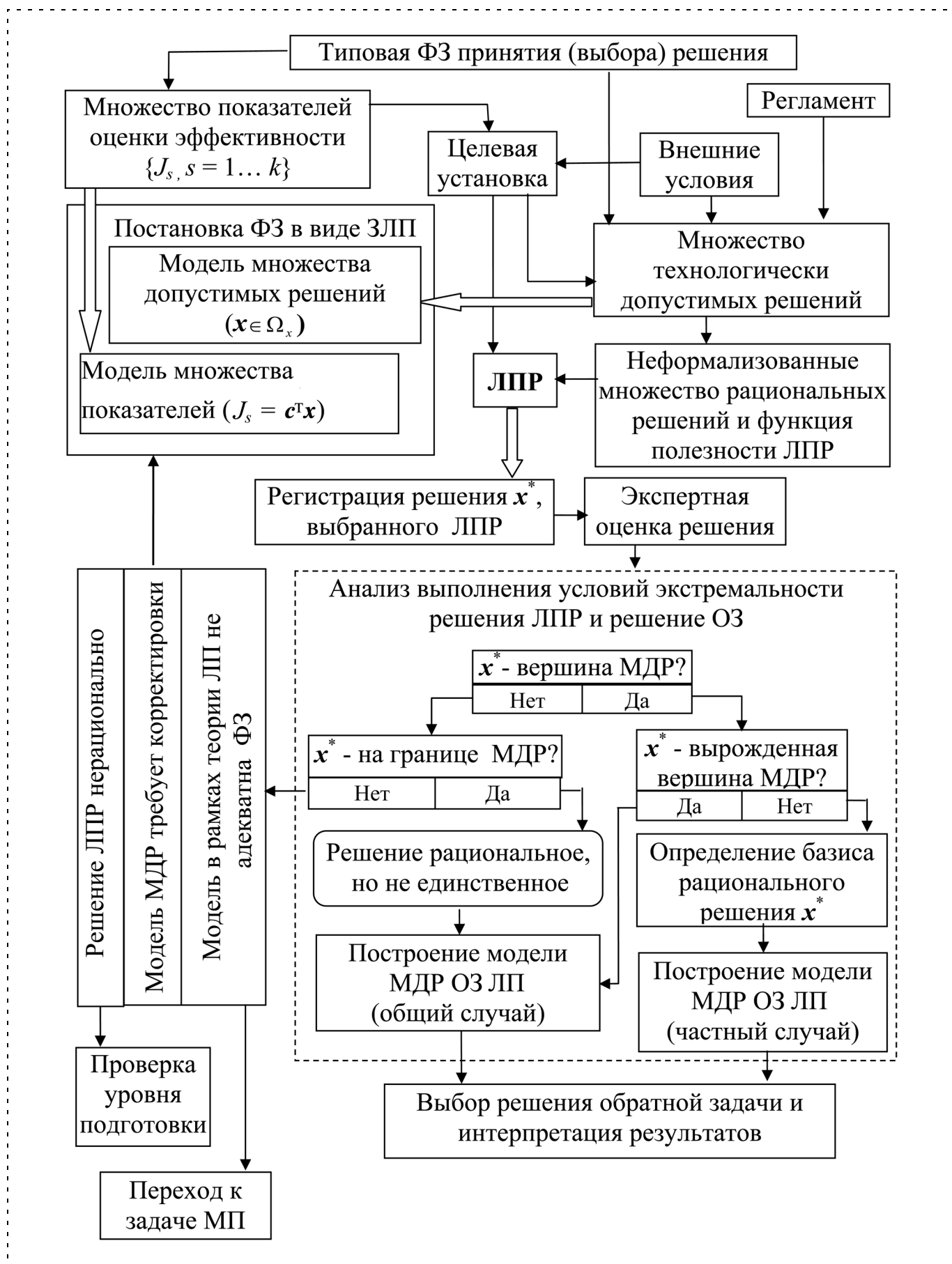


Рис. 2. Структурно-логическая схема методологии решения ОЗО для типовых задач УВД

Проблема существования решений ОЗО для показателя заданной структуры, в том числе и вида (3), обусловлена целым рядом факторов, связанных с особенностями применяемых способов выработки рациональных решений, а также степенью адекватности моделей МДР и показателя эффективности исследуемым процессам. Отсутствие решений ОЗО выражается формально в виде несовместности условий (2), т. е. невозможности выполнения необходимых условий оптимальности. Это может быть вызвано, прежде всего, невыполнением условия принадлежности решения, выбранного ЛПР в качестве рационального, границе области МДР ($x^* \notin \Gamma_\Omega$), являющегося характерным для большинства прикладных задач математического программирования (МП). Возможными причинами такого нарушения могут быть:

- неадекватность модели МДР реальному процессу;
- несоответствие (неэквивалентность) модели МДР, используемой ЛПР при получении решения x^* , модели, определяемой множеством Ω_x ;
- недостаточная компетентность или уровень профессиональной подготовки ЛПР.

Последние факторы, по существу, отражают качество моделирования ППР, условно разбиваемого на этапы предрешения и собственно решения. При этом адекватность модели МДР является оценкой качества моделирования первого этапа, на котором анализируются процессы восприятия информации, синтеза единого образа управляемого объекта, оценки и распознавания (классификации) состояния объекта, прогноза развития состояния.

Качество этапа собственно решения характеризуется процессами выбора совокупности управляемых параметров и определением их значений (команд, ресурсов и т. д.) из области допустимых, определяемой ЛПР с учетом физических особенностей системы управления, принятых правил, а также представлений ЛПР об эффективности процесса.

Возникновение первых двух причин требует совершенствования модели МДР либо выбора нового решения $x^* \in \Gamma_\Omega$, обеспечивающего максимальную в определенном смысле точность решения обратной задачи и достоверность выводов.

Устранение третьей причины достигается также корректировкой решения x^* , совпадающей по содержанию с процессом оптимизации решения рассматриваемой задачи при использовании x^* в качестве начального приближения.

Если $x^* \in \Gamma_\Omega$, то нарушение необходимых условий оптимальности решения x^* становится признаком неразрешимости обратной задачи в виде (3). Здесь возможными причинами являются:

- несоответствие структуры комплексного показателя J_Σ модели МДР;
- неполнота набора учитываемых частных показателей;
- недостаточная компетентность или уровень профессиональной подготовки ЛПР.

Первые две причины устраняются совершенствованием процесса обоснования структуры комплексного показателя, третья (так же, как и в случае $x^* \notin \Gamma_\Omega$) требует корректировки первоначально выбранного решения x^* .

Следует отметить, что при сделанных выше допущениях относительно МДР, а также при дополнительных допущениях об адекватности модели МДР и выполнении условия $x^* \in \Gamma_\Omega$ решение обратной задачи в общем виде всегда существует.

Следовательно, можно говорить о наличии двух разновидностей постановок и направлений использования решений ОЗО: в корректной и некорректной форме.

Первая из них характеризуется наличием полной определенности информации об оптимальности решения в смысле искомого показателя эффективности заданной структуры.

Решение задач второй группы связано с необходимостью разработки специальных методов и процедур регуляризации.

Таким образом, ОЗО можно считать средством формализации показателей оптимальности решений ФТЗ в предположении об их высокой эффективности, которую можно считать эталонной. Решения ОЗО, полученные при различных значениях параметров R , можно использовать для формирования банка данных "ФТЗ — ситуация принятия решения — показатель эффективности решения", что создает предпосылки для создания автоматизированной системы поддержки принятия рациональных решений.

Прикладные задачи на множестве решений ОЗО

♦ Оценка качества деятельности и уровня диспетчера УВД

В общем случае в реальных условиях возможна нестабильность (изменчивость) критериев оптимальности деятельности, которая проявляется из-за участия различных диспетчеров в процессе УВД и нестационарности их профессиональных и психофизиологических свойств и качеств. В этих условиях для обоснования адекватности и объективности построенных показателей оптимальности деятельности можно использовать методы теории ОЗО и методы экспертной оценки.

Различия математических моделей процессов решения ФТЗ УВД в значительной степени определяют специфику применения этих методов. Однако независимо от класса рассматриваемых задач предлагаемый подход обладает элементами общности, которые позволяют раскрыть основное содержание и особенности рассматриваемого направления моделирования ППР и управления в системе УВД.

Эта общность проявляется в том, что формализация критериев оптимальности принятия решения (или управления) осуществляется с применением методов экспертных оценок для анализа и отбора

тех решений обратной задачи оптимизации, для которых реализация ППР (или управления) удовлетворяет всей совокупности требований, предъявляемых к качеству функционирования системы УВД в целом, а также к деятельности диспетчера.

Рассмотрим некоторые особенности и общую схему реализации этих методов на примере решения типовой задачи осуществления УВД на этапе захода на посадку.

Процесс функционирования системы УВД (в реальных условиях или на специальных тренажерах) многократно наблюдается группой экспертов, а также подвергается аппаратурной регистрации в соответствии с [4].

Для каждой i -й реализации на основании идентифицированных по данным регистрации значений обобщенной функции управления и вектора обобщенных фазовых координат q (отклонений от программной траектории снижения) решается ОЗ теории оптимальных процессов [2, 11]. Иными словами, находится обобщенная характеристика i -й реализации процесса, определяющая интегральные свойства и качества, которыми обладали в процессе конкретной i -й реализации технические и эргатические элементы системы. При постоянных технических характеристиках системы (один и тот же тип воздушного судна, использование одних и тех же средств отображения информации и др.) можно считать, что процесс УВД в каждой реализации осуществляется диспетчером с использованием своих экстремальных возможностей, которые определяются в основном профессионально-психологическими качествами. В этом смысле построенная обобщенная характеристика $J_{\Sigma i}$ может рассматриваться как критерий оптимальности деятельности диспетчера при соответствующем уровне профессиональной подготовки и готовности к деятельности в условиях i -й реализации.

Каждая i -я реализация процесса УВД, кроме того, подвергается экспертной оценке. Анализ и обработка результатов экспертной оценки позволяют провести разделение реализаций и соответствующих им критериев на ряд классов в соответствии с системой предпочтений, используемой при экспертной оценке. Параметры, образующие ядро критерия оптимальности, в каждом классе усредняются по одной из процедур сглаживания. В результате определяются базовые критерии J^s . Классы характеризуются различными уровнями качества функционирования системы и, следовательно, определяются различными требованиями, предъявляемыми к уровню профессиональной подготовки диспетчеров и отработанности у них навыков. Возможность построения и классификация критериев создает предпосылки к объективной оценке качества деятельности диспетчеров на этапе захода на посадку как в процессе обучения, так и в реальных условиях. Использование базовых критериев J^s для оценки качества функционирования системы и деятельно-

сти или уровня подготовки диспетчера может быть основано на решении ОЗО и отнесения полученного критерия оптимальности к одному из классов, например, по схеме определения наименьшего расстояния J от базовых J^s в пространстве их параметров.

Полученные таким образом критерии оптимальности описывают сформировавшиеся в результате опыта и интуитивные представления диспетчера о рациональном УВД на траектории снижения и позволяют синтезировать управление, эквивалентное управлению, которое осуществляет диспетчер при нормальном функционировании системы.

Аналогичную схему можно использовать и при исследовании других ФТЗ.

♦ Устойчивость и оценка времени "жизни" решений по тенденции изменения цен

Проектирование сложных организационно-технических систем обычно связано с минимизацией затрат на приобретение дорогостоящего оборудования и эксплуатацию системы. Примером такой задачи является задача рациональной организации системы наблюдения за движением летательных аппаратов. Ее решение связано с определением типов технических средств и их рациональным размещением и может быть получено путем моделирования в виде задачи покрытия или эквивалентной ей простейшей задачи размещения.

В связи с тем, что этап реализации таких проектов имеет значительную длительность, представляется важным получение оценок устойчивости оптимального решения задачи при изменении учитываемых затрат во времени.

При этом возникает необходимость решения двух видов задач: проверки оптимальности имеющегося решения при заданном значении вектора $c \neq c_0$ и определения времени устойчивости оптимального решения при заданном характере изменения вектора $c(t) = c_0 + d(t)$.

В первой задаче достаточно проверить совместность системы, определяющей МДР ОЗ ЛП [5], что реализуется, например, путем решения обыкновенной задачи ЛП с произвольно заданной целевой функцией.

Вторая задача в общем случае является задачей МП с нелинейными ограничениями и может оказаться сложной в вычислительном отношении. Предположим, что выполняется условие неразрывности области устойчивости при изменении t , т. е. если при некотором $c(t_1)$ решение становится неоптимальным, то оно остается неоптимальным для всех $t > t_1$.

Тогда представляется возможной кусочно-линейная аппроксимация векторной функции $d(t)$. При этом оценка устойчивости может быть получена путем решения последовательности задач ЛП, связанных с проверкой условия принадлежности МДР ОЗ ЛП вектора $c = c_0 + d(t_r)$, $r = 1, \dots, s$, где s — номер интервала кусочной линейности функ-

ции $d(t)$, на котором условие принадлежности не выполняется, если это имеет место. В этом случае для определения времени устойчивости необходимо решить задачу ЛП вида: $\max t$ при условии принадлежности МДР ОЗ ЛП вектора $c = c(t_{s-1}) + \alpha t$, где α — вектор угловых коэффициентов линейных отрезков, аппроксимирующих функцию $c(t)$ на s -м интервале. При большом числе интервалов уменьшение объема вычислений для локализации s -го интервала обеспечивается использованием методов одномерной оптимизации.

Таким образом, включение ОЗО в общую схему исследования ППР позволяет установить новые логические связи между ее этапами, а также обоснованно определить перспективные направления исследований. Особенно большое значение представляет приобретаемая таким образом потенциальная возможность использования методологии оптимизации решений, хорошо развитой для целеориентированных систем, для автоматизации поддержки принятия решений при непосредственном УВД.

Список литературы

1. Баранов В. В. Процессы принятия управляющих решений, мотивированных интересами. М.: Физматлит, 2005. 296 с.
2. Кизько В. Г., Крыжановский Г. А., Солодухин В. А. Метод построения комплексной оценки деятельности диспетчера

в системе УВД // Авиационная эргономика. Киев: КИИГА, 1979. С. 21—27.

3. Крыжановский Г. А., Куклев Е. А., Солодухин В. А. Структуризация базы данных в системе интеллектуальной поддержки ППР в транспортных системах // Интеллектуальные системы: Труды IV Межд. симпозиума. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. С. 156—159.

4. Крыжановский Г. А., Солодухин В. А. Проблемы моделирования и обратные задачи оптимизации процессов деятельности, профессиональной подготовки и повышения квалификации операторов авиатранспортных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 11. С. 2—5.

5. Солодухин В. А. Обоснование решений в автоматизированной системе поддержки деятельности диспетчера по управлению воздушным движением и обратная задача линейного программирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 11. С. 47—53.

6. Шваргин С. М. Об общей устойчивости канонических задач линейного программирования. М.: Вычисл. центр РАН, 1989. 20 с.

7. Волошинов В. В., Коткин Г. Г. Параметрические свойства обратных задач оптимизации. М.: Вычисл. центр АН СССР, 1990. 45 с.

8. Обратные задачи математического программирования: Сб. ст. М.: Вычисл. центр РАН, 1992. 156 с.

9. Солодухин В. А. Задачи оптимизации процессов планирования и управления потоками воздушного движения // Научный вестник МГТУ ГА. М.: МГТУ ГА, 2009. 139 с.

10. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. 256 с.

11. Крыжановский Г. А., Солодухин В. А. Обратная задача теории оптимальных процессов и синтез линейных оптимальных систем при ограниченных фазовых координатах // Изв. АН СССР. Тех. кибернетика. 1972. № 3. С. 217—224.

УДК 004.3+681.5

Г. Н. Лебедев, д-р техн. наук, проф.,

Л. А. Мирзоян, канд. техн. наук, доц.,

А. В. Ефимов, студент,

Московский авиационный институт

(государственный технический университет)

lola_mai@mail.ru

Нейросетевое планирование групповых действий летательных аппаратов при наблюдении заданной группы подвижных наземных объектов*

Решается задача распределения между летательными аппаратами наблюдаемых наземных объектов и определения последовательности их облета с учетом скорости и направления их движения. Показано, что базовой процедурой оптимизации групповых действий является динамическое программирование. С учетом уточняющих примеров эффективного поведения предложена нейросетевая реализация процесса маршрутизации, обеспечивающая высокое быстродействие оперативного планирования группового полета.

Ключевые слова: групповой полет, маршрутизация полета, нейронные сети, динамическое программирование, подвижные объекты.

Введение

При проведении мониторинга наземных объектов с помощью группы летательных аппаратов (ЛА) планирование их действий разбивается как минимум на три сложные подзадачи:

- распределение заданного множества наземных объектов между ЛА;
- маршрутизация их облета для каждого ЛА;
- составление расписания полета каждого ЛА, если наземные объекты нужно наблюдать в заданные ограниченные интервалы времени.

Не рассматривая пока последнюю подзадачу, нужно отметить, что первые две подзадачи становятся еще сложнее, если учесть, что контролируемые объекты движутся, особенно если в разных направлениях.

Известные подходы к планированию одиночных и групповых полетов можно разбить на три группы:

- кинематический подход к маршрутизации без учета динамики ЛА и подвижных целей. Этот подход справедлив при больших расстояниях между целями и относительно малых их скоростях;

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-08-00145а.

- маршрутизация облета неподвижных объектов, но с учетом динамики ЛА. Этот подход исключает возможность наблюдения целей, лежащих вне траверса ЛА.
- наведение ЛА на один подвижный объект при обеспечении встречи ЛА с подвижной целью в упрежденной точке. При этом курсовой угол меняется по отношению к исходному направлению полета. Изменение курсового угла сказывается на том, какие сложности появятся при наведении на следующую цель. Однако эти последствия в известных системах наведения не учитываются.

В данной статье для преодоления указанных недостатков известных подходов предложен подход, учитывающий динамику и ЛА, и цели. Делается попытка учета дополнительного маневра, который вынужден совершить ЛА, чтобы пролететь над подвижным объектом и попасть в так называемую точку встречи. Чем больше этот маневр, тем больше время выполнения задачи и меньше приоритет этого пункта. С этой целью предлагается увеличивать вектор состояния сложной динамической системы путем добавления специальных параметров, характеризующих относительную по сравнению с ЛА поперечную скорость каждого объекта, и затем пытаться найти приближенное решение с помощью динамического программирования [2].

Полученные результаты оптимизации предложено реализовать с помощью быстродействующей нейронной сети.

Постановка задачи

Рассмотрим процесс управления групповыми действиями ЛА при следующих допущениях:

1) задана группа подвижных объектов ($j = 1, \dots, N$), наблюдаемая с помощью летящей группы ЛА ($i = 1, \dots, M$), при этом каждый j -й объект должен быть проконтролирован один раз одним ЛА. При этом считается, что число N_j объектов, попавших в маршрут одного ЛА, относительно невелико ($N_j < 10$);

2) известны параметры местоположения каждого j -го объекта и его движения. Пусть значение скорости $V_{ц}$ движения у всех объектов одинаково, тогда каждый объект характеризуется географическими координатами $x_j^{ц}$, $z_j^{ц}$ и углом $\alpha_j^{ц}$ направления движения в земной системе координат;

3) известны текущие значения параметров каждого ЛА — $x_i^{ЛА}$, $z_i^{ЛА}$, $\alpha_i^{ЛА}$ при допущении, что заданная постоянная скорость $V^{ЛА}$ полета у всех ЛА одинакова и $V^{ЛА} > V^{ц}$. Таким образом, текущее состояние всей системы характеризуется вектором, имеющим размерность $3(N + K)$. В дальнейшем в статье задача будет решаться на примере одного ЛА, и все индексы, связанные с нумерацией ЛА, будут опущены.

4) заданы координаты $x_K^{ц}$ и $z_K^{ц}$ конечного пункта K (аэродрома) полета всех ЛА;

5) задан критерий оптимальности групповых действий в виде условия минимального времени выполнения задачи наблюдения указанных объектов, которое фиксируется при возвращении всех ЛА на аэродром. Так как предстоит параллельное во времени наблюдение всеми ЛА, это условие, строго говоря, соответствует минимаксному критерию времени полета каждого ЛА. В данной работе принимается, что при решении задачи маршрутизации полета любого ЛА в отдельности минимизируется суммарное время T_i облета "своих" объектов:

$$T = \sum_{j=1}^N \Delta t_j,$$

где Δt_j — время перелета из одного подвижного объекта в другой;

б) при наведении ЛА на подвижный j -й объект нужно сманеврировать в горизонтальной плоскости так, чтобы пролететь над ним с минимальным промахом. Особенно это важно, если ЛА и объект движутся в разных направлениях. В данной статье принято, что процесс наведения осуществляется методом пропорциональной навигации, когда выполняется условие сведения к нулю угловой скорости линии визирования (на рис. 1 — линия, соединяющая точки O, j). Это соответствует такому маневру, при котором "поперечная" относительная скорость, равная разности проекций $V^{ц}$ и $V^{ЛА}$ на линию (O, j) , была ликвидирована, а ЛА летит в так называемую упрежденную точку. При этом возможны два случая. В первом случае условие пролета над объектом из-за ограничений маневра может оказаться невыполнимым, тогда j -й объект исключается из маршрута. Во втором случае ЛА пролетает над j -м объектом с новым углом $\alpha^{ЛА} + \alpha_j^{ц}$ направ-

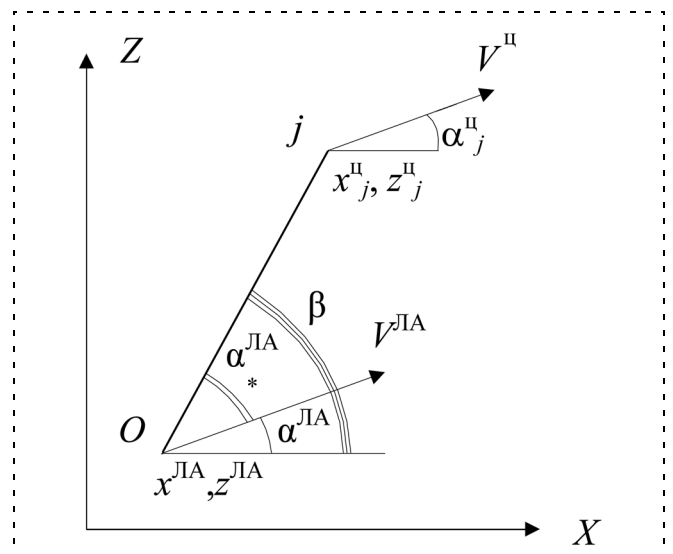


Рис. 1. Схема наведения ЛА на подвижный наземный объект

ления полета, время полета Δt_j увеличивается, и эти изменения надо учесть на следующих шагах планирования.

При этих условиях требуется:

- предложить общий подход поэтапного планирования групповых действий, решающий задачи распределения подвижных объектов между ЛА и маршрутизации полетов для каждого из них;
- выбрать метод приближенного решения задачи оптимальной маршрутизации полетов с учетом подвижности объектов;
- с помощью дополнительного моделирования сформировать уточняющие примеры оптимальных действий и с их помощью заменить алгоритм приближенного решения обучаемой нейронной сетью, чтобы обеспечить высокое быстродействие оперативного планирования.

Общий подход к решению задачи оперативного планирования групповых действий ЛА

1. Поле видимости ЛА разбивается на $n = 5$ областей (зон), каждой из которых поставлена в соответствие одна из N альтернатив поведения (J) (рис. 2). Задача управления в таком случае состоит в выборе альтернативы поведения (направления движения) из N возможных, в качестве которых рассматривается движение в одну из построенных областей [3].

2. Управление групповым полетом представляется как иерархический процесс, который условно можно разбить на три уровня:

- стратегический;
- тактический;
- исполнительный.

Стратегический уровень, или уровень принятия решения о выборе поведения, состоит в определении зоны, в которую должен лететь ЛА в текущий момент времени.

На тактическом уровне происходит выбор объекта в зоне.

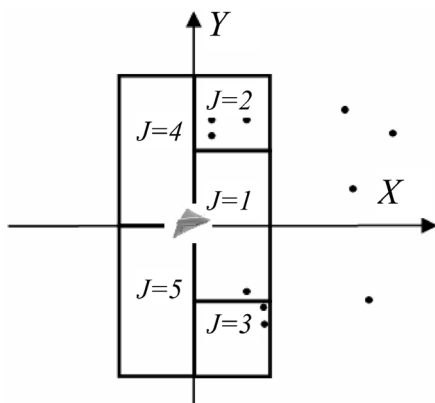


Рис. 2. Альтернативы поведения

Третий, исполнительный уровень, — это уровень системы управления самим ЛА, в задачи которого входит поддержание или отработка с помощью управляющих органов задающих воздействий по таким сигналам, как желаемое направление, скорость, высота полета к цели.

3. При выборе летательными аппаратами одной и той же зоны и одного и того же объекта в зоне необходима процедура разрешения конфликта.

Приближенное решение задачи маршрутизации полета одного ЛА с помощью динамического программирования

Прежде чем перейти к оптимизации, опишем динамику системы рядом соотношений. Вначале рассмотрим один фрагмент движения одного ЛА (его параметры $x^{\text{ЛА}}$, $z^{\text{ЛА}}$, $\alpha^{\text{ЛА}}$) к одному первоочередному объекту (его параметры x_j^{II} , z_j^{II} , α_j^{II}). Пусть линия визирования, соединяющая их, образует угол

$$\beta = \arctg \frac{z_j - z^{\text{ЛА}}}{x_j - x^{\text{ЛА}}}.$$

Тогда угол $\alpha^{\text{ЛА}*}$, характеризующий для ЛА поперечную скорость при нежелательном вращении линии визирования, равен

$$\alpha^{\text{ЛА}*} = \beta - \alpha^{\text{ЛА}} = \arctg \frac{z_j^{\text{II}} - z^{\text{ЛА}}}{x_j^{\text{II}} - x^{\text{ЛА}}} - \alpha^{\text{ЛА}}.$$

Соответственно угол $\alpha_j^{\text{II}*}$, характеризующий для j -го объекта его поперечную скорость, равен

$$\alpha_j^{\text{II}*} = \arctg \frac{z_j^{\text{II}} - z^{\text{ЛА}}}{x_j^{\text{II}} - x^{\text{ЛА}}} - \alpha_j^{\text{II}}.$$

Скорость сближения $V_{\text{сбл}}$ объекта с ЛА при его наведении равна

$$V_{\text{сбл}} = V^{\text{ЛА}} \cos \alpha^{\text{ЛА}*} - V^{\text{II}} \cos \alpha_j^{\text{II}*}.$$

Если $V^{\text{ЛА}} \gg V^{\text{II}}$, то преодолеваемое расстояние D_j можно оценить как

$$D_j = \sqrt{(z_j^{\text{II}} - z^{\text{ЛА}})^2 + (x_j^{\text{II}} - x^{\text{ЛА}})^2}.$$

Отсюда получим первое соотношение для минимизируемого времени выполнения маневра Δt_j , входящее в критерий оптимизации:

$$\Delta t_j = \frac{\sqrt{(z_j^{\text{II}} - z^{\text{ЛА}})^2 + (x_j^{\text{II}} - x^{\text{ЛА}})^2}}{V^{\text{ЛА}} \cos \left(\arctg \frac{z_j^{\text{II}} - z^{\text{ЛА}}}{x_j^{\text{II}} - x^{\text{ЛА}}} - \alpha^{\text{ЛА}} \right) - V^{\text{II}} \cos \left(\arctg \frac{z_j^{\text{II}} - z^{\text{ЛА}}}{x_j^{\text{II}} - x^{\text{ЛА}}} - \alpha_j^{\text{II}} \right)}. \quad (1)$$

Переход ЛА в новое состояние после пролета над j -м объектом определяется через приращения $\Delta x_j^{ЛА}$, $\Delta z_j^{ЛА}$ весьма просто:

$$\Delta z_j^{ЛА} = V^{\Pi} \sin \alpha_j^{\Pi}; \Delta x_j^{ЛА} = V^{\Pi} \cos \alpha_j^{\Pi}. \quad (2)$$

Более сложным является определение нового положения вектора скорости ЛА в момент его пролета над j -м объектом при попадании в упрежденную точку встречи, когда угловая скорость линии визирования равна нулю. Можно показать, что в процессе наведения отклонение $\Delta \alpha_j^{ЛА}$ угла направления полета ЛА будет примерно равно

$$\Delta \alpha_j^{ЛА} = \frac{V^{\Pi}}{V^{ЛА}} \left[\sin \left(\arctg \frac{z_j^{\Pi} - z^{ЛА}}{x_j^{\Pi} - x^{ЛА}} - \alpha_j^{\Pi} \right) - \sin \left(\arctg \frac{z_j^{\Pi} - z^{ЛА}}{x_j^{\Pi} - x^{ЛА}} - \alpha^{ЛА} \right) \right]. \quad (3)$$

Соотношений (1)–(3) достаточно, чтобы перейти к динамическому программированию. Уравнение Беллмана в дискретной форме имеет вид

$$\varepsilon(x, z, \alpha) = \min_j \{ \Phi_i(x^{ЛА}, z^{ЛА}, \alpha^{ЛА}, j) + \varepsilon_{i+1}(x^{ЛА} + \Delta x_j^{ЛА}, z^{ЛА} + \Delta z_j^{ЛА}, \alpha_0 + \Delta \alpha_j^{ЛА}, t + \Delta t_j),$$

где ε — функция Беллмана; i — номер шага маршрутизации; Φ_i — текущий штраф, равный по смыслу решения задачи времени Δt_j перелета в новый пункт; значения $\Delta x_j^{ЛА}$, $\Delta z_j^{ЛА}$, $\Delta \alpha_j^{ЛА}$, Δt_j вычисляются по формулам (1)–(3).

Поэтому в непрерывной форме условие оптимальности по Беллману можно записать в виде

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \min_j \left\{ 1 + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x^{ЛА}} V^{\Pi} \cos \alpha_j^{\Pi} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z^{ЛА}} V^{\Pi} \sin \alpha_j^{\Pi} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha^{ЛА}} \frac{\Delta \alpha_j^{ЛА}}{\Delta t_j} \right\}. \quad (4)$$

Уравнение (4) показывает, что в стоящую в фигурных скобках текущую функцию риска входят три слагаемых, которые как раз учитывают движение наземных объектов и относительное движение ЛА при его наведении на контролируемый j -й объект.

Провести аналитическим путем оптимизацию выбора альтернатив и показать функцию их переключения в принципе можно, но приближенно, если задаться нужным числом очевидных ситуаций и затем вычислить поверхность отклика в виде полиномиальной функции Беллмана, как это показано в [4]. Однако для того, чтобы представить области принятия альтернативных решений в обозримом

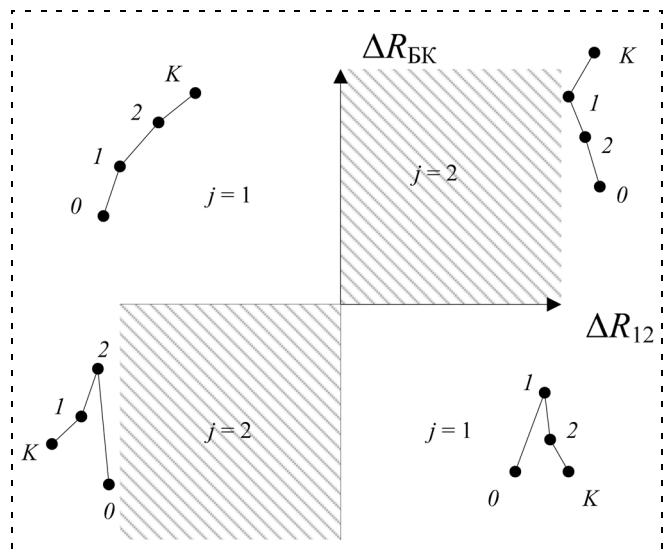


Рис. 3. Области принятия альтернативных решений при облете неподвижных пунктов маршрута

виде, определим текущую ситуацию зависящей от малого числа следующих обобщенных координат.

Результаты обобщения в сконцентрированном виде можно проиллюстрировать графиками на рис. 3, 4, 5 для случая выбора одного из двух пунктов маршрута ($j = 1, 2$) при их облете. На рис. 3 рассмотрены варианты облета двух неподвижных пока что пунктов 1, 2 при оптимизации маршрута попадания в конечный пункт K по критерию минимума времени полета. По оси абсцисс отложена величина

$$\Delta R_{12} = \sqrt{(z^{ЛА} - z_1^{\Pi})^2 + (x^{ЛА} - x_1^{\Pi})^2} - \sqrt{(z^{ЛА} - z_2^{\Pi})^2 + (x^{ЛА} - x_2^{\Pi})^2},$$

характеризующая разность расстояний между ЛА и каждым из пунктов. По оси ординат отложена разность ΔR_{BK} расстояния между ЛА и ближайшим к нему объектом и расстояния между ЛА и заданным конечным пунктом:

$$\Delta R_{BK} = \sqrt{(z^{ЛА} - z_B^{\Pi})^2 + (x^{ЛА} - x_B^{\Pi})^2} - \sqrt{(z^{ЛА} - z_K^{\Pi})^2 + (x^{ЛА} - x_K^{\Pi})^2},$$

где $B = \{1, 2\}$.

В результате выбора маршрута в разных случаях образуются области принятия подобных решений для каждого из четырех квадрантов. В каждом квадранте дана типовая иллюстрация расположения точек $0, 1, 2, K$ маршрута в передней полусфере (точка 0 соответствует положению ЛА в начале полета), а также указана альтернатива j в виде номера первоочередного пункта, куда нужно попасть. Видно, что границами этих областей являются оси ординат и абсцисс. Также видно, что в первом прибли-

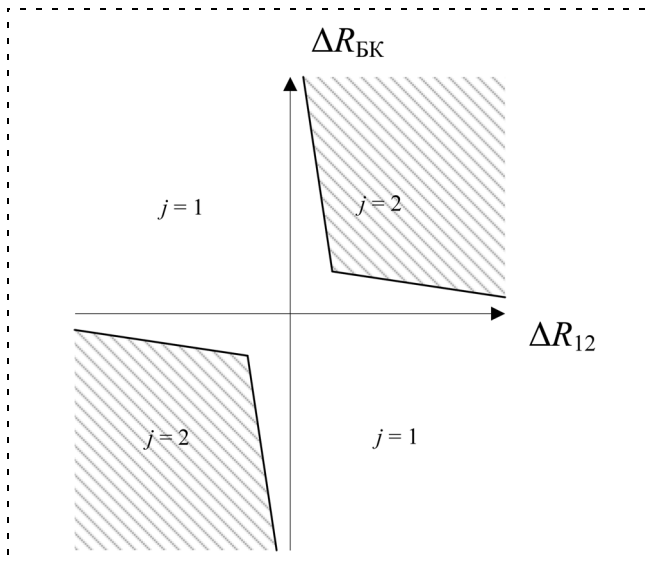


Рис. 4. Области принятия альтернативных решений при облете подвижных объектов в случае $\Delta V_{12} > 0$

жении для неподвижных пунктов нужную функцию переключения можно описать двумя координатами ΔR_{12} и $\Delta R_{БК}$ вместо восьми координат $x^{ЛА}$, $z^{ЛА}$, x_1^{Π} , z_1^{Π} , x_2^{Π} , z_2^{Π} , x_K^{Π} , z_K^{Π} .

Если теперь перейти к более сложному случаю облета двух подвижных объектов 1 и 2 при допущении об их движении с одинаковой скоростью V^{Π} , но в разных возможных направлениях, то тогда необходимо рассмотреть как минимум еще одну дополнительную координату ΔV_{12} , определяющую разницу в поперечной скорости движения каждого из объектов 1 и 2 относительно вектора скорости ЛА по формуле

$$\Delta V_{12} = |V^{ЛА} \sin(\alpha^{ЛА}) - V^{\Pi} \sin(\alpha_1^{\Pi*})| - |V^{ЛА} \sin(\alpha^{ЛА}) - V^{\Pi} \sin(\alpha_2^{\Pi*})|.$$

Чем больше это значение, тем менее удобен объект 1 при попадании в него и тем ниже его приоритет по сравнению с объектом 2. Поэтому область принятия решения $j = 1$ сужается, а решения $j = 2$ — увеличивается, как это показано на рис. 4.

Если же наоборот, величина $\Delta V_{12} < 0$, то область принятия решения $j = 1$ становится больше, чем для $j = 2$, что видно на рис. 5.

Продолжая рассуждения подобным образом для трех подвижных объектов, можно также использовать новые обобщенные координаты в виде относительных расстояний $\Delta R_{БЗ}$ и относительных скоростей ΔV_{13} и ΔV_{23} и попытаться получить первое представление о функции переключения трех альтернатив. Однако эти рассуждения будут все более усложняться.

Очевидно, что учет более тонких особенностей как расположения, так и движения объектов будет

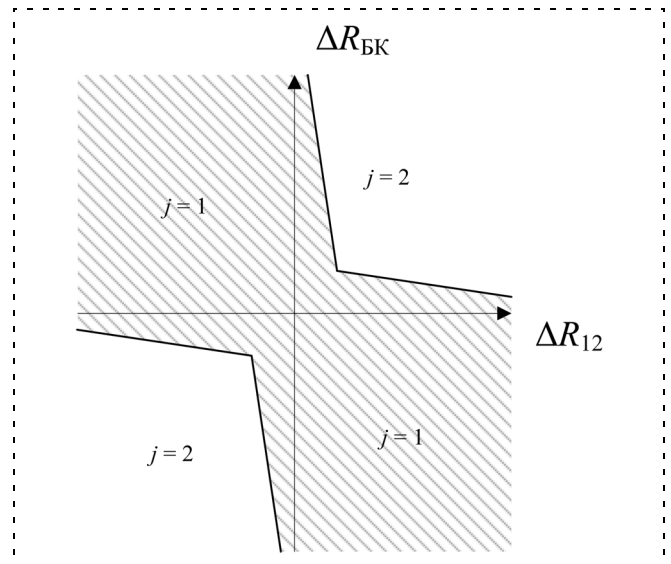


Рис. 5. Области принятия альтернативных решений при облете подвижных объектов в случае $\Delta V_{12} < 0$

приводить к механизму принятия альтернативных решений, который все труднее описать аналитически. Поэтому имеет смысл использовать эффективный для этого случая нейросетевой подход, основанный на обучении алгоритма маршрутизации с помощью множества примеров, найденных как логическим, так и экспериментальным путем для

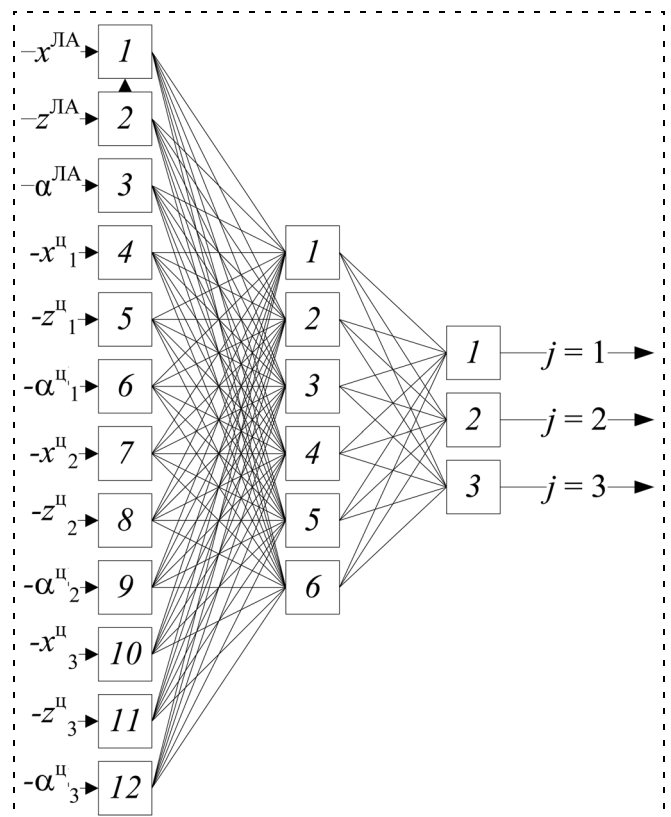


Рис. 6. Нейросетевая структура выбора одной из трех альтернатив первоочередного объекта при маршрутном полете

различных полетных ситуаций. В частности, если допустить попадание в выбранную на стратегическом уровне зону малого числа подвижных объектов, то, например, при $n_j = 3$ текущая полетная ситуация при фиксированных скоростях $V^{ЛА}$ и $V^ц$ движения ЛА и объектов характеризуется двенадцатью параметрами: $x^{ЛА}, z^{ЛА}, \alpha^{ЛА}, x_1^ц, z_1^ц, \alpha_1^ц, x_2^ц, z_2^ц, \alpha_2^ц, x_3^ц, z_3^ц, \alpha_3^ц$. Эти параметры образуют вектор входных сигналов нейронной сети, на выходе которой указывается номер $j = 1, 2, 3$ первоочередного пункта.

Первые исследования и экспериментальные результаты показали, что в случае использования многослойного персептрона нейросетевая структура содержит три слоя, в первом слое — 12 нейронов, в промежуточном слое — шесть нейронов, в выходном слое — три нейрона (рис. 6). Преимущество нейросетевой реализации состоит в быстродействии и отсутствии программирования сложного аналитического аппарата принятия решений.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Показано, что задачу последовательного наблюдения подвижных объектов можно решить на основе динамического программирования, позволяющего на каждом перелете ЛА в новую упрежденную точку учесть переход в новое состояние как по местоположению, так и по направлению полета.

2. При решении задачи маршрутизации полета в качестве штрафа вместо расстояния между объектами вводится время выполнения маневра ЛА при его наведении методом пропорциональной навигации.

3. Предложена обладающая высоким быстродействием нейросетевая реализация алгоритма выбора очередного подвижного объекта наблюдения в зоне, назначенной на стратегическом уровне управления групповыми действиями.

Список литературы

1. Лебедев Г. Н., Гришанин Ю. С., Липатов А. В., Степаньянц Г. А. Теория оптимальных систем. М.: Изд. МАИ, 1999.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: ИИЛ, 1960.
3. Лебедев Г. Н., Мирзоян Л. А. Нейросетевое планирование действий по облету наземных объектов группой летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 12.
4. Лебедев Г. Н. Методы принятия оперативных решений в задачах управления и контроля. М.: Изд. МАИ, 1992.

УДК 519.854(075.8)

Г. Ф. Хахулин, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
С. А. Новиков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
А. И. Посадский, аспирант,
В. И. Ескин, канд. техн. наук, доц.,
 Московский авиационный институт
 (государственный технический университет)
 schrank@mail.ru

Задачи формирования и динамической корректировки плана наблюдений в системе космического мониторинга подвижных морских объектов

Рассматриваются задачи формирования и динамической корректировки составленного на заданный интервал времени плана наблюдений подвижных морских объектов с учетом поступающей в центр приема и обработки информации данных о результатах осмотра областей возможного положения этих объектов.

Ключевые слова: система космического мониторинга, космическое наблюдение, дистанционное зондирование Земли, бортовая аппаратура обзора, планирование наблюдений, стохастическая постановка задачи планирования, слежение за местоположением морского объекта, корректировка плана наблюдений.

Введение

В настоящее время весьма актуальным является создание спутниковых систем мониторинга, предназначенных для получения информации о земной поверхности в целях решения различных задач научного и прикладного характера [1]. Среди этих систем особое место занимают системы морской космической разведки. История, технические трудности и проблемы создания первой в мировой практике отечественной системы такого вида описаны в [2]. В данной статье рассматривается один из актуальных вариантов такого рода системы: автоматизированная система космического мониторинга подвижных морских объектов (АСКМ ПМО), формируемая на основе группировок разнородных космических аппаратов (КА), оснащенных разнородной аппаратурой обнаружения (АО). Центральной задачей, решаемой в такой системе, от эффективности решения которой во многом зависит эффективность функционирования всей АСКМ ПМО, является задача планирования наблюдений подвижных морских объектов (ПМО). Постановке и решению этой задачи и посвящена данная статья. Задачи планирования наблюдений в спутниковых системах мониторинга рассматривались и ранее [1], однако

в них не учитывался динамический, трудно прогнозируемый характер поведения объектов наблюдения, которыми в данной системе являются ПМО. Учет же такого характера функционирования ПМО приводит к необходимости формировать и решать задачу планирования в стохастической постановке.

Постановка задачи планирования наблюдений ПМО

Активными средствами рассматриваемой АСКМ ПМО являются разнородные группировки КА с АО различного типа (радиолокационной, радиотехнической, оптической и т. п.), способной просматривать заданные области земной поверхности и собирать информацию по различным характеристикам ПМО (координатам, курсу, скорости движения, типу ПМО и др.), отображаемым информационно в центре приема и обработки информации (ЦПОИ) системы в виде позиций формуляра ПМО. Процесс сбора информации имеет стохастический характер, что связано с ошибками в прогнозе местоположения ПМО, частичностью перекрытия полосой обзора АО прогнозируемой области возможных положений (ОВП) ПМО, вероятностным характером самого процесса обнаружения. Полученная с помощью АО КА информация о ПМО с запаздыванием доводится до ЦПОИ.

С учетом всех этих факторов и ресурсных ограничений, накладываемых на работу АО (по времени работы, числу включений на отдельных витках КА или на всем периоде планирования, объему бортового долговременного запоминающего устройства (ДЗУ) и др.), в АСКМ должна решаться задача планирования наблюдений ПМО таким образом, чтобы обеспечивать постоянно как можно большую степень новизны (актуальности) собираемой в ЦПОИ информации о ПМО.

Для осуществления планирования наблюдений необходимо сначала определить информационный массив по всем возможным наблюдениям, которые могут быть осуществлены на интервале планирования всеми КА по всему множеству наблюдаемых ПМО, а затем из этих возможностей выбрать те, которые будут включены в план. Этот массив должен содержать, в частности, следующую информацию по каждому возможному наблюдению:

- моменты времени возможного начала и окончания наблюдения;
- момент времени возможного доведения данных текущего наблюдения до ЦПОИ;
- объем бортового ДЗУ, необходимый для хранения данных, полученных в результате наблюдения;
- долю перекрытия ОВП ПМО полосой обзора АО КА;
- освещенность места наблюдения;
- прогнозируемое состояние метеобстановки в месте наблюдения;

- угол разворота на ПМО оси камеры наблюдения в полосе обзора АО оптического типа.

Указанный информационный массив формируется по результатам проведения баллистического прогноза взаимодействия АО КА с ПМО на заданный интервал планирования.

Целью планирования в АСКМ является обеспечение наиболее эффективного решения задач слежения (ЗС) за местоположением ПМО и выдачи информации (ЗВИ) о характеристиках ПМО конечным потребителям этой информации.

Проведем формализованное описание наиболее важных факторов и процессов функционирования АСКМ таким образом, чтобы получить адекватную формализованную постановку задачи планирования наблюдений ПМО.

Одним из важных видов процессов, которые должны быть учтены в этой постановке, является процесс старения получаемой в АСКМ в определенные моменты информации о ПМО с точки зрения использования ее в дальнейшем для решения ЗС и ЗВИ. Для учета этого свойства функционирования АСКМ предлагается ввести в рассмотрение формализованное описание процессов старения информации в ЦПОИ по каждой k -й позиции формуляра ($k \in P^f$, P^f — множество позиций формуляра ПМО) m -го ПМО ($m \in M$, M — множество ПМО, планирование наблюдений ОВП которых осуществляется) в виде случайной, пилообразного вида, кусочно-линейной функции времени, принимающей значения на отрезке $[0, 1]$ и зависящей от составленного плана. Будем считать, что этот процесс принимает значение 0, если информация только что получена АО КА и одновременно доведена до ЦПОИ, и 1, если информация либо отсутствует, либо полностью устарела и не может быть использована для решения целевых задач АСКМ. Случайный характер этой функции определяется случайными величинами θ_{ir} ($i \in I$, $r \in R_i$, где I — множество КА, для которых осуществляется планирование, R_i — упорядоченное по времени множество всех возможных наблюдений для i -го КА), определяющими успешность наблюдений, обозначаемых условно (i, r) . Параметрами отдельного наблюдения являются m_{ir} — номер наблюдаемого ПМО и l_{ir} — номер витка i -го КА, на котором оно может реализоваться ($l_{ir} \in L_i$, где L_i — множество витков i -го КА на интервале планирования), моменты начала и окончания наблюдения t_{ir}^H , t_{ir}^K . Будем считать, что $\theta_{ir} = 1$, если наблюдение прошло успешно, и $\theta_{ir} = 0$ — в противном случае. Предполагается, что перед началом решения задачи планирования по каждому возможному наблюдению рассчитана вероятность успешной его реализации $P_{ir} = P(\theta_{ir} = 1)$, учитывающая вероятность нахождения ПМО внутри прогнозируемой ОВП, вероятность накрытия полосой обзора АО КА той части ОВП, где находится ПМО, и непосредственно веро-

ятность успешного получения информации о наблюдаемом ПМО с учетом освещенности и метеобстановки в месте наблюдения.

Процесс старения информации по k -й позиции формуляра m -го ПМО предлагается определить следующим образом:

$$S_{mk}(t) = \min_{(i,r) \in X_{mk}(\{x[i,r]\}, \{\theta_{ir}\})} S_{mk}^{ir}(t), \quad (1)$$

где $\{x[i, r]\}$ ($i \in I, r \in R_i$) — множество всех оптимизационных переменных, каждая из которых $x[i, r]$ может принимать значения 1, если наблюдение (i, r) включено в составляемый план, и 0 — в противном случае; X_{mk} — множество запланированных и успешно реализованных наблюдений, обновляющих данные по k -й позиции формуляра m -го ПМО; $S_{mk}^{ir}(t)$ — составляющая процесса старения информации, связанная с успешной реализацией запланированного наблюдения (i, r) :

$$S_{mk}^{ir}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t < t_{ir}^d; \\ (t - t_{ir}^k) / T_k^s, & \text{если } t \in (t_{ir}^d, t_{ir}^k + T_k^s); \\ 1, & \text{если } t \geq t_{ir}^k + T_k^s, \end{cases} \quad (2)$$

где t_{ir}^d — момент доведения до ЦПОИ информации, полученной в наблюдении (i, r) ; T_k^s — время полного устаревания информации по k -й позиции формуляра ПМО (для различных позиций формуляра оно может быть различным).

При формировании критерия задачи планирования будем использовать величину, определяющую на временном отрезке планирования $[T_p^1, T_p^2]$ математическое ожидание площади над рассматриваемым процессом старения в интервале возможных его значений до максимального, равного 1:

$$M \left[\int_{T_p^1}^{T_p^2} (1 - S_{mk}(t)) dt \right]. \quad (3)$$

С учетом смыслового содержания определенно-го выше процесса старения эта площадь интегрально характеризует степень актуальности имеющейся в ЦПОИ на плановом периоде информации по k -й позиции формуляра m -го ПМО. Эта величина должна позволить заменить в формализованной постановке задачи планирования конечные целевые показатели работы АСКМ.

Для завершения формализованного описания дополнительно введем следующие понятия и обозначения:

K_m^{MO} ($m \in M$) — коэффициент важности m -го ПМО; предполагается, что их значения нормированы на отрезке $[0, 1]$ и множестве M ;

K_k^{pf} ($k \in P^f$) — коэффициент важности k -й позиции формуляра с точки зрения использования содержащейся в ней информации для решения ЗС и ЗВИ; предполагается, что их значения нормированы на отрезке $[0, 1]$ и множестве P^f ;

R_i^l — множество последовательных возможностей наблюдения для i -го КА на l -м витке;

N_i^v ($i \in I$) — ограничение на число включений АО i -го КА на одном витке интервала планирования;

N_i ($i \in I$) — ограничение на число включений АО i -го КА на всем интервале планирования;

T_i^v ($i \in I$) — ограничение на время работы АО i -го КА на одном витке интервала планирования;

T_i ($i \in I$) — ограничение на время работы АО i -го КА на интервале планирования;

V_i ($i \in I$) — ограничение на объем ДЗУ АО i -го КА;

K_i^{iv} ($i \in I$) — коэффициент пересчета времени наблюдения АО i -го КА в объем памяти ДЗУ, требуемой для хранения информации, полученной в результате наблюдения;

J_i ($i \in I$) — множество интервалов между соседними моментами сброса информации в ЦПОИ на всем интервале планирования для i -го КА;

R_{ij} ($i \in I, j \in J_i$) — упорядоченное по времени множество всех возможных наблюдений для i -го КА на j -м временном интервале между соседними моментами сброса информации в ЦПОИ;

D_{ir} ($i \in I, r \in R_i$) — длительность наблюдения (i, r) ;

I_p — подмножество КА, АО которых требует нацеливания на область наблюдения;

$T_{r,r+j}^i$ ($i \in I_p, r \in R_i$) — время, необходимое для перенацеливания АО i -го КА с r -го на $(r + j)$ -е наблюдение.

С учетом введенных понятий и обозначений формализованная запись задачи планирования будет иметь следующий вид:

$$\max_{\{x[i,r]\}} \sum_{m \in M} K_m^{MO} \sum_{k \in P^f} K_k^{pf} M \left[\int_{T_p^1}^{T_p^2} (1 - S_{mk}(t)) dt \right]; \quad (4)$$

$$\sum_{r \in R_i^l} x[i, r] \leq N_i^v \quad (i \in I, l \in L_i); \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R_i} x[i, r] \leq N_i \quad (i \in I); \quad (6)$$

$$\sum_{r \in R_i^r} x[i, r] D_{ir} \leq T_i^y \quad (i \in I, l \in L_i); \quad (7)$$

$$\sum_{r \in R_i} x[i, r] D_{ir} \leq T_i \quad (i \in I); \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R_{ij}} x[i, r] K_i^{iv} D_{ir} \leq V_i \quad (i \in I, j \in J_i); \quad (9)$$

$$x[i, r+j] x[i, r] (t_{ir+1}^H - t_{ir}^K) \geq x[i, r+j] x[i, r] T_{r, r+j}^i \quad (i \in I_p; r, r+j \in R_i). \quad (10)$$

Таким образом, критерий оптимизации задачи планирования (4) можно интерпретировать как максимум математического ожидания актуальности информации (АИ) по совокупности ПМО (по всем позициям формуляра каждого ПМО и по всем ПМО с учетом их важности).

Соотношения (4)–(10) определяют задачу планирования как комбинаторную нелинейную дискретную задачу стохастического программирования. Стохастический характер задачи определяется зависимостью критерия от реализации случайных величин $\{\theta_{ir}\}$. Область допустимых решений задачи имеет детерминированный характер. Неравенства (5), (6) определяют ограничения по числу включений АО КА соответственно на отдельных витках и на всем плановом периоде (например, на сутках). Неравенства (7), (8) определяют аналогичные ограничения по времени работы АО КА. Неравенства (9) задают ограничение на объемы бортовых ДЗУ. Неравенства (10) определяют временные ограничения на возможность перенацеливания АО КА с ОВП одного ПМО на ОВП другого ПМО, следующего по определенному в плане порядку наблюдения.

Подход к решению задачи планирования

Известны две группы методов решения задач стохастического программирования: прямые и косвенные [3]. Высокая вычислительная сложность прямых методов, использующих в процессе оптимизации информацию по реализациям случайных параметров решаемой задачи, а также существующие ограничения по времени решения задачи планирования в АСКМ делают актуальным анализ возможности применения для рассматриваемой задачи косвенных методов, основанных на использовании аппарата тео-

рии вероятностей для проведения процедур вероятностного осреднения.

В рассматриваемой задаче необходимо уметь рассчитывать значения математических ожиданий по соотношению (3), осуществляя вероятностное осреднение по реализациям случайных величин θ_{ir} при фиксированных значениях оптимизационных переменных $x[i, r] (i \in I, r \in R_i)$. Такая возможность в данной задаче существует. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим конкретный пример реализации введенных выше в рассмотрение процессов $S^n(t)$ для ряда наблюдений с номерами $n = r, r+1, \dots, r+4$ некоторой позиции формуляра некоторого ПМО, опустив для упрощения обозначения их номеров.

На рис. 1 показан пример возможного и достаточно сложного наложения процессов старения информации, определяемых соотношениями (1)–(2), по результатам пяти запланированных последовательных наблюдений.

При описании примера в дополнение к ранее введенным используются следующие обозначения:

t_r^S — моменты полного устаревания информации по рассматриваемой позиции формуляра ПМО, полученной в r -м наблюдении;

$\widehat{S}_r^j (j = 1, 2, \dots)$ — площадь над процессом $S^r(t)$ на некотором j -м интервале времени (t_j^1, t_j^2) :

$$\widehat{S}_r^j = \widehat{S}_r^t(t_j^1) - \widehat{S}_r^t(t_j^2), \quad (11)$$

где $\widehat{S}_r^t(t) = (t_r^S - t)^2 / (2T^S)$ (12)

— площадь треугольника над процессом $S^r(t)$ на интервале (t, t_r^S) ;

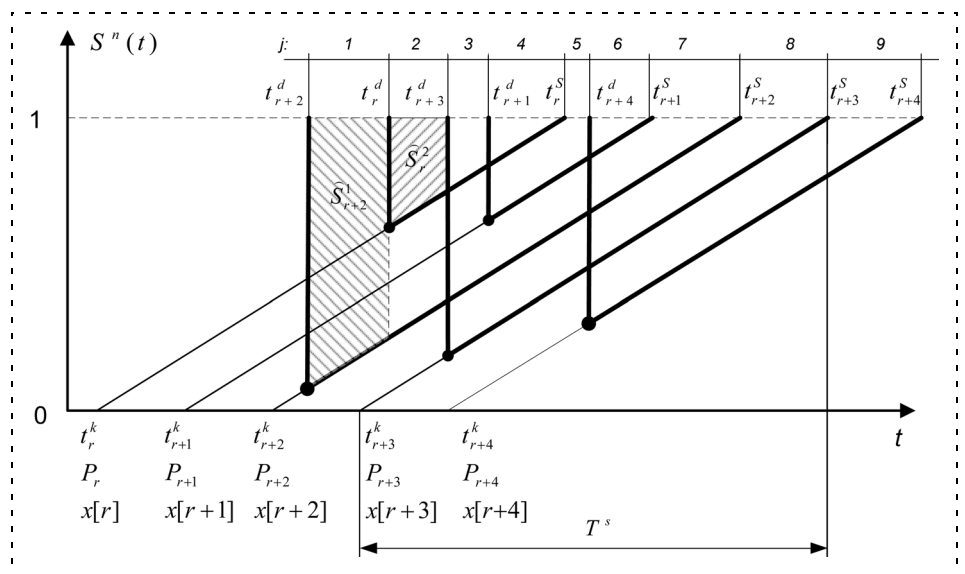


Рис. 1. Пример реализации процессов старения информации для нескольких последовательных наблюдений некоторого ПМО при сборе информации по некоторой позиции его формуляра

\overline{S}_j — средняя площадь над процессами $S^n(t)$ на j -м временном интервале;

\overline{S} — средняя площадь над процессами $S^n(t)$ на всем рассматриваемом временном интервале.

Ниже приводится алгоритм расчета математического ожидания площади над процессами старения информации по рассматриваемой позиции формулы ПМО. Результаты работы алгоритма иллюстрируются на примере, показанном на рис. 1.

Алгоритм расчета математического ожидания:

1. Из значений t_r^d и t_r^s сформировать массив $\{t_j\}$ упорядоченных по возрастанию значений с указанием типа соответствующей величины (d — если $t_j = t_r^d$, иначе s) и номера r добавляемого на интервале $(t_j, t_j + 1)$ процесса $S^r(t)$ (если $t_j = t_r^d$) или исключаемого (если $t_j = t_r^s$). (Результаты выполнения этого пункта для рассматриваемого примера представлены в табл. 1.)

2. Сформировать перечень массивов $\{r\}_j$ номеров процессов $S^r(t)$, которые действуют на интервалах (t_j, t_{j+1}) , $j \in J$. (Результат для рассматриваемого примера представлен в табл. 2.)

3. Рассчитать \overline{S} :

$$\overline{S} = \sum_{j \in J} \overline{S}_j, \quad (13)$$

где

$$\overline{S}_j = \sum_{r \in \{r\}_j} \widehat{S}_r^j P_r x[r] \prod_{\substack{l \in \{r\}_j \\ (l > r)}} (1 - P_l x[l]). \quad (14)$$

Таблица 1

Результат выполнения п. 1 алгоритма

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\{t_j\}$	t_{r+2}^d	t_r^d	t_{r+3}^d	t_{r+1}^d	t_r^s	t_{r+4}^d	t_{r+1}^s	t_{r+2}^s	t_{r+3}^s	t_{r+4}^s
{тип}	d	d	d	d	s	d	s	s	s	s
r	$r+2$	r	$r+3$	$r+1$	r	$r+4$	$r+1$	$r+2$	$r+3$	$r+4$

Таблица 2

Результат выполнения п. 2 алгоритма

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\{r\}_j$	$r+2$	$r+2$	$r+3$	$r+3$	$r+3$	$r+4$	$r+4$	$r+4$	$r+4$
		r	$r+2$	$r+2$	$r+2$	$r+3$	$r+3$	$r+3$	$r+3$
			r	$r+1$	$r+1$	$r+2$	$r+2$		
				r		$r+1$			

В частности, для показанного на рис. 1 примера в соответствии с (13) и (14)

$$\begin{aligned} \overline{S}_3 &= \widehat{S}_{r+3}^3 P_{r+3} x[r+3] + \\ &+ \widehat{S}_{r+2}^3 P_{r+2} x[r+2] (1 - P_{r+3} x[r+3]) + \\ &+ \widehat{S}_r^3 P_r (1 - P_{r+2} x[r+2]) (1 - P_{r+3} x[r+3]). \end{aligned}$$

Конец алгоритма.

Нетрудно увидеть, что на основе массивов, сформированных в результате работы приведенного алгоритма, достаточно просто и эффективно могут быть решены задачи пересчета значений общего критерия задачи при изменении плана: введении новых назначений или исключении ранее введенных назначений. Для этого необходимо определить те участки из множества J , которые включают в себя номер изменяемого назначения, и осуществить пересчет \overline{S}_j только для них.

Алгоритм планирования наблюдений

Алгоритм планирования наблюдений предлагается формировать на основе метода неявного перебора, основанного на стратегии локального поиска по одной большой итерации [1]: на первом этапе с использованием эвристических правил формируется хорошее допустимое решение задачи (3)–(9), а на втором осуществляются попытки его улучшения.

Алгоритм планирования:

1. Для каждого КА на каждом витке, временном интервале накопления в памяти информации, точном интервале рассчитать затраты ресурсов работы его АО (по числу включений, времени работы, требуемой памяти хранения полученной информации) при реализации всех возможностей наблюдения ПМО, выявленных в баллистическом прогнозе.

2. Выявить КА и интервалы работы их АО, для которых ресурсные ограничения не выполняются. Определить по каждому интервалу процентное превышение заданного ресурсного ограничения.

3. Реализовать стратегию формирования допустимого и эффективного плана использования возможностей наблюдения ПМО. Для этого использовать следующие эвристические правила:

- на тех интервалах, где превышение ресурсных ограничений не более установленного предела (например, не более 40...50 %), стратегию вхождения в область допустимых решений осуществлять путем последовательного исключения отдельных возможностей из полного их множества до тех пор, пока выявленное нарушение ресурсного ограничения не будет ликвидировано;
- на тех интервалах, где превышение ресурсных ограничений больше установленного предела, стратегию формирования допустимого плана

осуществлять путем последовательного включения отдельных возможностей, начиная с пустого множества до тех пор, пока по какому-то ресурсному ограничению не реализуется выход на границу области допустимых решений;

- последовательное включение в план (исключение из плана) возможностей проводить с учетом — изменения критерия задачи планирования; — изменений затрат по дефицитным ресурсам; — частотных возможностей наблюдения ПМО различными КА на отдельных временных интервалах.

4. Осуществить попытки улучшения сформированного допустимого плана путем исключения из плана некоторых возможностей и включения вместо них других таким образом, чтобы получить как можно больший прирост критерия (4). При определении изменений допустимого решения рассматривать те КА, ресурсные ограничения АО которых являются активными.

Результаты исследования решений задачи

Проведенные имитационные исследования реализации формируемых планов в АСКМ показали эффективность предложенных решений задачи планирования. В частности, установлено, что значения целевой функции задачи планирования (W_{zp}) имеют высокую степень корреляции с конечными критериями качества функционирования АСКМ: математическими ожиданиями важности ПМО, по которым решаются ЗВИ (W_{zvi}) и ЗС (W_{zs}) (рис. 2 и 3).

Отдельные точки на приведенных графиках представляют результаты имитационных экспериментов при различных сочетаниях параметров АСКМ, в которых решалась задача планирования

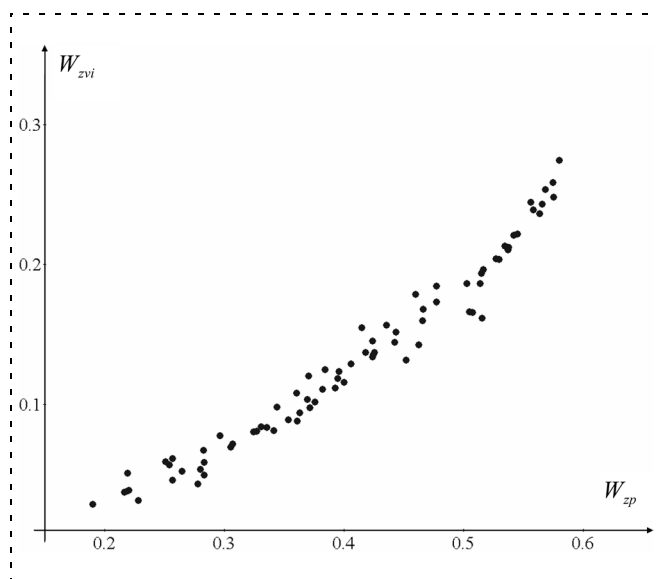


Рис. 2. График зависимости W_{zvi} от W_{zp}

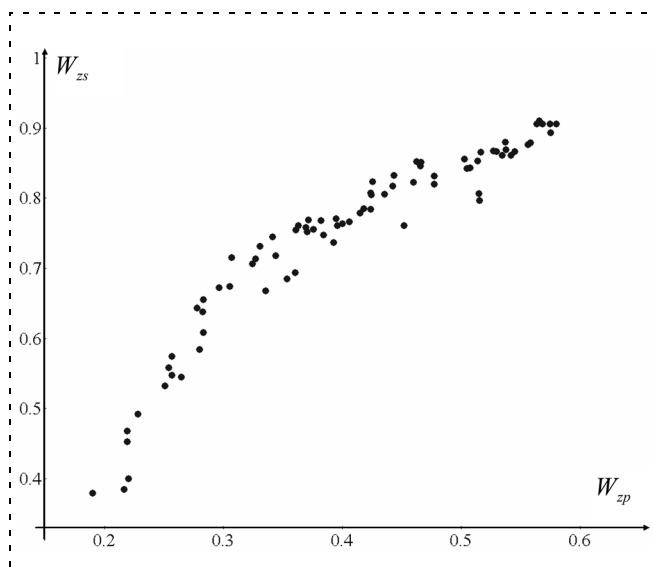


Рис. 3. График зависимости W_{zs} от W_{zp}

и оценивалась эффективность реализации составленных планов по указанным выше конечным критериям.

Рассчитаны коэффициенты корреляции между W_{zvi} и W_{zp} и W_{zs} и W_{zp} . Они имеют значения $\tilde{r}_{W_{zvi}W_{zp}} = 0,977$ и $\tilde{r}_{W_{zs}W_{zp}} = 0,934$ соответственно, что указывает на наличие связи между соответствующими показателями, близкой к линейной. На основе этого можно сделать вывод о том, что предложенный критерий формализованной постановки оптимизационной задачи планирования наблюдений ПМО соответствует конечным целям и соответствующим показателям эффективности функционирования АСКМ.

Имитационные исследования реализации плана показали также, что с удалением от начала периода планирования прогнозные размеры ОВП ПМО значительно растут. Это приводит к уменьшению процента перекрытия их зонами наблюдения АО КА и уменьшению вероятности успешного наблюдения ПМО. В результате реализация таких возможностей требует больших затрат временных ресурсов АО и становится неэффективной при формировании плана наблюдений.

Задача динамической корректировки плана

Реализация запланированных наблюдений имеет стохастический характер вследствие двух причин: стохастической природы процесса наблюдений, производимых АО КА, и возможности ПМО маневрировать и, как следствие, выходить из зоны наблюдения АО.

В процессе выполнения составленного плана возможны следующие варианты реализации отдельных его компонентов:

а) по результатам некоторых наблюдений получена и доведена до ЦПОИ информация о местоположении и других характеристиках ПМО, которые определяются АО, выполнившей соответствующие наблюдения;

б) по результатам некоторых наблюдений получена и доведена до ЦПОИ информация о том, что ПМО в зоне возможного их положения не обнаружены;

в) некоторые наблюдения уже проведены, но информация по ним еще не доведена до ЦПОИ;

г) некоторые запланированные наблюдения еще не выполнены, но изменить план по этим наблюдениям нельзя, так как КА, участвующие в этих наблюдениях, в оставшееся до их реализации время не будут находиться в зоне информационного взаимодействия с ЦПОИ;

д) некоторые запланированные наблюдения еще не проведены и можно изменить план по этим наблюдениям: либо их отменить, либо скорректировать параметры наблюдений (изменить времена включения и выключения АО КА).

Таким образом, на основе новой информации, полученной в результате частичной реализации плана, в ЦПОИ возникает необходимость и возможность корректировки ранее составленного плана.

С учетом полученной информации в ЦПОИ на основе соответствующих алгоритмов может быть скорректирован прогноз динамики движения и размеров зон возможного положения тех ПМО, по которым реализовались исходы "а" или "б".

В результате баллистического прогноза взаимодействия зон наблюдения АО КА с обновленной динамикой ОВП ПМО осуществляется корректировка множества возможных наблюдений. При этом по некоторым наблюдениям могут быть скорректированы лишь параметры (моменты начала и конца наблюдения), некоторые возможности могут вообще исчезнуть (например, из-за того, что процент перекрытия ОВП маневрирующего ПМО становится недопустимо мал), могут появиться новые возможности наблюдения.

При решении задачи корректировки плана необходимо также учитывать то, что некоторые ресурсы АО уже истрачены или будут истрачены в результате частичной реализации плана. При корректировке правых частей ресурсных ограничений необходимо использовать информацию о ближайших временных интервалах информационных контактов КА с ЦПОИ (эта информация является неизменной на всем интервале планирования): все ранее запланированные возможности до этих интервалов будут реализованы без изменения и соответствующие ресурсы АО будут израсходованы.

Процессы изменения "актуальности информации" по отдельным позициям формуляра ПМО с учетом полученной информации по исходам "а" или "б" принимают на момент решения задачи кор-

ректировки конкретные значения и являются для задачи корректировки начальными условиями.

Важным, требующим решения на момент корректировки вопросом является определение множеств КА и ПМО, по которым должна быть решена задача корректировки плана наблюдений. Возможны два варианта подхода к решению этого вопроса:

1) решение задачи корректировки проводить на ограниченных множествах КА и ПМО, а именно тех, которых коснулись изменения, связанные с вновь полученной в ЦПОИ информацией о ПМО;

2) решение проводить на полных множествах КА и ПМО.

У каждого из этих вариантов свои преимущества и недостатки.

Первый вариант

Преимущество: возможность уменьшить размерность задачи корректировки и, соответственно, временные затраты на ее реализацию. Это может быть актуальным с учетом многократного ее решения.

Недостатки:

- сложность формирования подмножеств ПМО и КА, для которых нужно решать задачу корректировки. Она определяется наличием не только непосредственных связей между ПМО и КА через подмножество корректируемых возможностей наблюдения, но и через ресурсы АО, учитываемые при составлении плана;
- отсутствие оптимальности плана корректировки вследствие совмещения старого и нового планов;
- необходимость совмещения остатков старого плана и плана корректировки.

Второй вариант

Преимущества и недостатки по отношению к первому варианту меняются местами.

Принципиально формализованная запись задачи корректировки не отличается от задачи планирования. Но многие параметры корректируются и определяются на момент ее решения — T_k . Это такие параметры, как: $I, M, [T_p^1, T_p^2], L_i (i \in I), R_{ij} (i \in I, j \in J_j), S_{mk}(t) (m \in M, k \in P^f)$ и некоторые другие.

Возникает необходимость проведения исследований по оценке эффективности динамического процесса корректировки: определения границ временного интервала, на котором проводится корректировка, множеств задействованных в этой корректировке КА и ПМО и др. Для этого нужно создать инструментальное средство исследования эффективности процесса динамической корректировки в виде системы вложенных имитационных моделей (ИМ): во внешней ИМ реализуются алго-

ритмы планирования, корректировки плана наблюдений и оценки эффективности процесса функционирования АСКМ по конечным критериям эффективности, а внутренняя ИМ используется для осуществления динамического прогноза изменяющихся возможностей наблюдения с учетом информации, получаемой АСКМ в результате частичной реализации ранее составленных планов и их корректировок.

Заключение

Осуществлена формализованная постановка, предложен метод и алгоритм решения задачи планирования наблюдений в АСКМ ПМО.

Имитационные исследования показали адекватность формируемых в результате решения задачи планов конечным показателям эффективности АСКМ.

Исследования показали высокую эффективность процесса поиска решения по точности и быстротедействию.

Проведено обоснование необходимости осуществления динамического процесса корректировок формируемых планов. Рассмотрен подход к постановке и решению задач корректировки. Определены задачи проведения исследований эффективности процесса динамической корректировки планов наблюдений ПМО.

Список литературы

1. Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Бобронников В. Т., Нестеренко О. П., Федоров А. В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление. М.: Изд-во МАИ, 2000. 566 с.
2. Землянов А. Б., Коссов Г. Л., Траубе В. А. Система морской космической разведки и целеуказания. СПб.: Галлея ПРИНТ, 2002. 216 с.
3. Хахулин Г. Ф., Красовская М. А., Булыгин В. С. Теоретические основы автоматизированного управления (Задачи, методы, алгоритмы теории оптимального планирования и управления). М.: Изд-во МАИ, 2005. 395 с.

УДК 531.383: 629.78

Р. Н. Ахметов, канд. техн. наук, ген. конструктор,
В. П. Макаров, д-р техн. наук, науч. советник,
А. В. Соллогуб, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ — Прогресс", г. Самара
csdb@samtel.ru

Проблемы обеспечения сбое- и отказоустойчивости бортовой аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли от воздействия излучений космического пространства

Рассмотрен круг вопросов, связанных с применением на борту космического аппарата радиоэлектронной аппаратуры с комплектующими электрорадиоизделиями высокой степени интеграции. Обсуждаются подходы к обеспечению сбое- и отказоустойчивости бортовой аппаратуры от воздействия заряженных частиц космического пространства.

Ключевые слова: космический аппарат, радиоэлектронная аппаратура, сбои, отказы, тяжелые заряженные частицы, высокоэнергетичные протоны, показатели устойчивости, параметры чувствительности.

Введение

Одной из важнейших проблем, возникающих в процессе разработки космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с дли-

тельным сроком активного существования, является проблема обеспечения сбое- и отказоустойчивости его бортовых средств к условиям функционирования в космическом пространстве (КП). В современных КА ДЗЗ практически все бортовые средства целевых и обеспечивающих систем включают в себя интегральные схемы (ИС), которые должны выполнять свои функции в жестких эксплуатационных условиях [1, 4]. С одной стороны, это традиционные воздействия: механические (вибрации, удары, упругие колебания элементов конструкции); скачки электрического питающего напряжения бортовой сети; циклическое изменение температуры корпуса КА и устанавливаемой снаружи бортовой аппаратуры (БА) в течение периода орбитального движения; изменение давления атмосферы внутри гермоотсеков КА и в гермообъемах самой БА. С другой стороны, это постоянное воздействие потоков заряженных частиц (ЗЧ) высоких энергий — галактических космических лучей (ГКЛ), солнечных космических лучей (СКЛ) и излучений естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ). Как известно, длительное воздействие именно этих факторов космического пространства на современную БА, обладающую высокой степенью интеграции, может вызывать локальные изменения в кристаллах электронных компонентов БА, а происходящее в них накопление этих изменений способно приводить к нарушению работы электронных узлов, в том числе, к необратимым последствиям (отка-

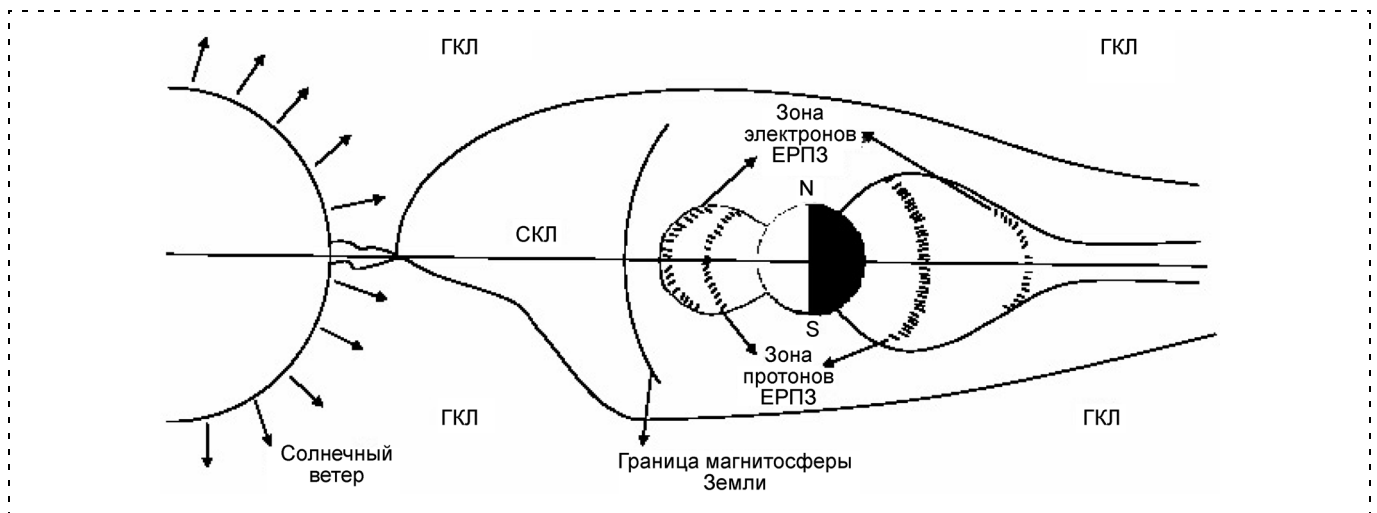


Рис. 1. Зоны радиационных полей в околоземном космическом пространстве

зам БА). Это явление оказалось наименее изученным к настоящему времени для типовых орбит КА ДЗЗ, что затрудняет полноценный учет его влияния при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Недостаточное внимание к нему может приводить к катастрофическим последствиям на борту КА, особенно в условиях применения доступной элементной базы с негарантированным уровнем радиационной стойкости.

В данной статье рассмотрены некоторые подходы к обеспечению сбое- и отказоустойчивости бортовых средств КА ДЗЗ от воздействия излучений КП.

Структура и энергетика радиационных полей заряженных частиц КП

На рис. 1 приведена укрупненная схема расположения зон радиационных полей в околоземном КП в плоскости, проходящей через линию, соединяющую центры масс Солнца и Земли и перпендикулярную плоскости эклиптики. При движении по орбите КА и его БА подвергаются одновременному воздействию всех без исключения радиационных полей [1, 2].

ЕРПЗ состоит, в основном, из протонов и электронов, захватываемых магнитным полем Земли из КП. Зона протонов простирается ближе к поверхности Земли и находится в слое от 300 до 10 000 км, зона электронов занимает более верхние слои. Источниками локальных радиационных эффектов в ИС могут стать потоки протонов. Потоки протонов сосредоточены в области экватора на широтах в пределах $\sim 40^\circ$ по обе стороны экватора.

ГКЛ состоят из протонов ($\sim 95\%$) и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) — атомных ядер, лишенных электронов ($\sim 4\%$ ядра гелия и 1% более тяжелых ядер). Происхождение ГКЛ до сих пор является предметом дискуссий (взрывы сверхновых звезд и др.), проследить траекторию их движения не уда-

ется, поэтому считается, что поток ГКЛ изотропен, постоянен во времени и для первичных лучей (не искаженных взаимодействием с атмосферой Земли) составляет ~ 1 частица/см $^{-2}$ ·с. (рис. 2). Хотя поток незначительный, но диапазон энергий ГКЛ составляет $10^6 \dots 3 \cdot 10^{20}$ эВ.

СКЛ включают $\sim 99\%$ протонов и $\sim 1\%$ ядер гелия. Плотность потока СКЛ во время солнечных вспышек достигает $\sim 10^6$ частиц/см $^{-2}$ ·с, но энергия их ниже, чем ГКЛ и составляет $10^5 \dots 10^{11}$ эВ. Продолжительность действия солнечных вспышек — от нескольких десятков минут до трех суток.

Различают одиночные (от одной частицы) и дозовые (накапливающиеся во времени) радиационные эффекты. По литературным источникам доля отказов РЭА КА от одиночных радиационных эффектов составляет $25 \dots 35\%$, от дозовых — $5 \dots 15\%$.

Наибольшую опасность для ИС, используемых в БА КА, представляют высокоэнергетичные протоны (ВЭП) и ТЗЧ, которые могут вызывать локальные радиационные эффекты (ЛРЭ). Возможные виды ЛРЭ от воздействия ТЗЧ, ЕРПЗ, ГКЛ и СКЛ приведены на рис. 3.

Механизм возникновения локальных радиационных эффектов связан с генерацией избыточного

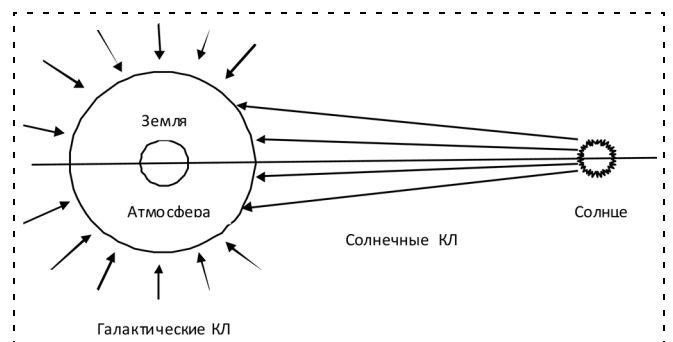


Рис. 2. Галактические и солнечные космические лучи



Рис. 3. Виды ЛРЭ от воздействия ТЗЧ и ВЭП ЕРПЗ, ГКЛ и СКЛ

заряда в отдельном микрообъеме чувствительного элемента ИС. Избыточный заряд может формироваться двумя способами — в результате линейных потерь энергии ТЗЧ при прохождении микрообъема и в результате линейных потерь энергии вторичными ядрами частиц, являющихся продуктами взаимодействия ВЭП с атомами кремния (ионизационный эффект от образовавшихся ионов кремния).

При решении проблемы обеспечения сбое- и отказоустойчивости БА КА, наибольшую озабоченность разработчиков вызывают вопросы эффективной реализации возможностей автоматического парирования сбоев за заданное время (если они возникнут), своевременное обнаружение и локализация отказов (обратимых и катастрофических), а также обеспечение заданной вероятности штатного функционирования БА в течение времени активного существования КА.

Показатели и параметры сбое- и отказоустойчивости РЭА

На рис. 4 приведены факторы, влияющие на чувствительность РЭА, а на рис. 5 — основные показатели, определяющие устойчивость РЭА и параметры чувствительности.

В общем случае частота ν возникновения сбоев в каком-либо канале, содержащем различное число типов ИС, различное число ИС каждого типа, различное число однотипных элементов в каждой ИС зависит от многих факторов:

$$\nu = \nu(H, i, x, E_{0p}, L_0, \sigma_{сб}(E), \sigma_{сб}(L), \sigma_{ТЗЧ}^H, \sigma_p^H, n, k, m, M_p, \varphi_{ТЗЧ}(L), \varphi_p(E), F_{ТЗЧ}(\geq L_0), F_p(\geq E_{0p}), V^T).$$

Здесь H — высота полета КА; i — наклонение орбиты; x — массовая толщина защиты ИС; E_{0p} —

пороговое значение энергии протона; L_0 — пороговое значение ЛПЭ, $\sigma(E)$, $\sigma(L)$ — зависимость сечений сбоя ИС от энергии протонов и от ЛПЭ,

соответственно; $\sigma_{ТЗЧ}^H$, σ_p^H — сечения насыщения для ТЗЧ и протонов, соответственно; n — число типов ИС в канале; k_j ($j = 1, 2, \dots, n$) — число ИС j -го типа в канале; m_j — число однотипных элементов в ИС j -го типа (например, объем памяти в СБИС); M_p — мощность потока (средняя, максимальная); $\varphi_{ТЗЧ}(L)$ — дифференциальный ЛПЭ-спектр плотности потока ТЗЧ для определенного вида КЛ; $\varphi_p(E)$ — дифференциальный энергетический спектр плотности потока протонов для определенного вида космических лучей; $F_{ТЗЧ}(\geq L_0)$ — интегральный ЛПЭ-спектр средней плотности потока ТЗЧ для определенного вида космических лучей; $F_p(\geq E_{0p})$ — интегральный энергетический спектр плотности потока протонов для определенного вида космических лучей; V_L — признак, определяющий тип космических лучей.

Параметры $\sigma(E)$, $\sigma(L)$, $\sigma_{ТЗЧ}^H$, σ_p^H определяются выбранными типами электрорадиоизделий.

Следует отметить, что значения сечений для сбоя и одиночных отказов (тиристорных эффектов, пробоев и др.) являются различными. Разработчик БА, помимо выбора типов электрорадиоизделий, может варьировать также такие параметры, как n , k , m и частично параметр x . Параметр x зависит от материала защиты, от расположения РЭА на КА (в приборном, агрегатном отсеке, отсеке аппаратуры зондирования, под обшивкой КА и др.). Головное предприятие выдает разработчику БА информацию по дифференциальным и интегральным спектрам космических лучей для определенных орбит полета КА с учетом этого параметра. Разработчик БА вправе вводить дополнительную защиту аппаратуры. Все остальные параметры определяются требованиями технического задания на КА и БА (орбита КА и соответствующие ей спектральные характеристики лучей КП), а также принятой методологией оценки стойкости РЭА.

Следует отметить следующие основные свойства, которые используются при расчетах: изотропность

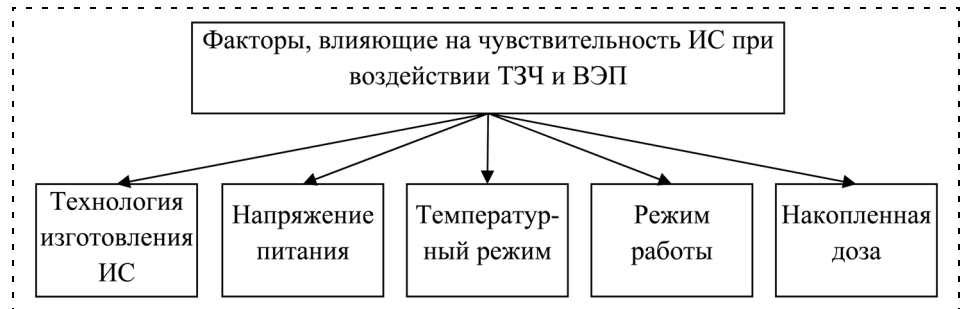


Рис. 4. Факторы, определяющие чувствительность ИС

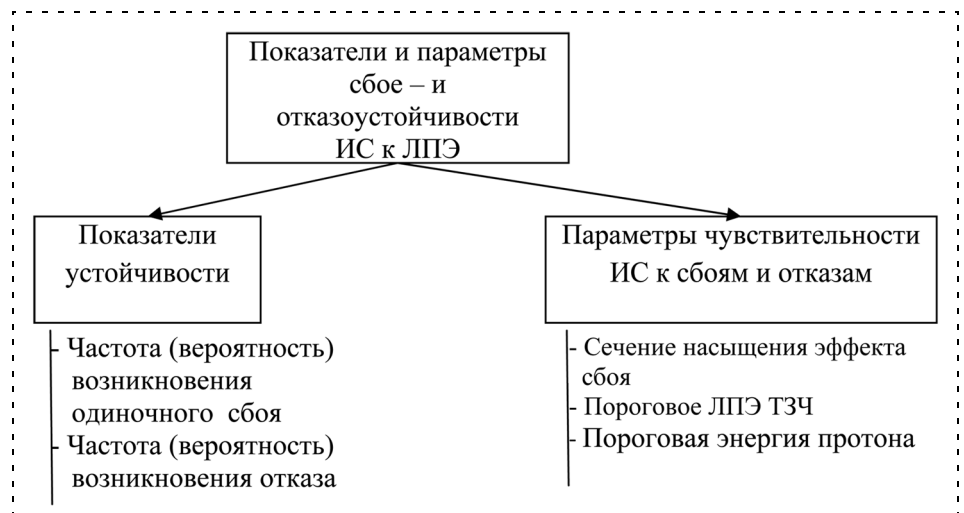


Рис. 5. Показатели устойчивости и параметры чувствительности ИС к сбоям и отказам

космических лучей и аддитивный характер частоты сбоя и отказов от различных факторов КП.

В общем виде частота сбоя $v_{сб}$ однотипного элемента ИС может быть вычислена следующим образом:

$$v_{сб} = v_{сб}^{ГКЛ} + v_{сб}^{СКЛ} + v_{сб}^{ЕРПЗ}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{где } v_{сб}^{ГКЛ} &= \int_{E_{0p}}^{E_{\max}} \sigma_{сб}(E) \varphi_p^{ГКЛ}(E) dE + \\ &+ \int_{L_0}^{L_{\max}} \sigma_{сб}(L) \varphi_{ТЗЧ}^{ГКЛ}(L) dL; \\ v_{сб}^{СКЛ} &= \int_{B_{0p}}^{B_{\max}} \sigma_{сб}(E) \varphi_p^{СКЛ}(E) dE + \\ &+ \int_{L_0}^{L_{\max}} \sigma_{сб}(L) \varphi_{ТЗЧ}^{СКЛ}(L) dL; \\ v_{сб}^{ЕРПЗ} &= \int_{E_{0p}}^{E_{\max}} \sigma_{сб}(E) \varphi_p^{ЕРПЗ}(E) dE. \end{aligned}$$

Для ЕРПЗ частота сбоя определяется только потоками протонов. Потоки ВЭП и ТЗЧ ГКЛ считаются стационарными. Для СКЛ и ЕРПЗ различают спектры средней и максимальной плотности (для СКЛ — потоки протонов и ТЗЧ, для ЕРПЗ — потоки протонов).

Для случая канала, состоящего из последовательно соединенных n типов ИС в количестве k_j ($j = 1, 2, \dots, n$) ИС каждого типа, имеющих m_j однотипных элементов, частота сбоев в канале определяется выражением

$$v_{сб}^{кан} = \sum_{j=1}^n k_j m_j (v_{сб}^{ГКЛ}(\sigma_{сб}^j(E)), \sigma_{сб}^j(L)) + v_{сб}^{СКЛ}((\sigma_{сб}^j(E), \sigma_{сб}^j(L)) + v_{сб}^{ЕРПЗ}(\sigma_{сб}^j(E))). \quad (2)$$

Для определения частот катастрофических отказов (тиристорного эффекта, пробоя) можно воспользоваться формулами (1) и (2), но в качестве сечений необходимо использовать зависимости, соответствующие возникновению этих одиночных отказов, т. е. $\sigma_{отк}^j(E)$ и $\sigma_{отк}^j(L)$.

В приведенных выше формулах используются зависимости сечений одиночных эффектов от энергии протонов и ЛПЭ ЗЧ. Нередко такие зависимости отсутствуют. В этом случае для расчетов используются максимально возможные значения сечений (сечения насыщения), а также интегральные энергетические и ЛПЭ спектры.

Для этого случая расчеты выполняются по соотношениям:

- для однотипных элементов ИС

$$v_{сб} = v_{сб}^{ГКЛ} + v_{сб}^{СКЛ} + v_{сб}^{ЕРПЗ}, \text{ где } v_{сб}^{ГКЛ} = \sigma_{рсб}^H F_p^{ГКЛ}(\geq E_{0p}) + \sigma_{ТЗчсб}^H F_{ТЗч}^{ГКЛ}(\geq L_0); \quad (3)$$

$$v_{сб}^{СКЛ} = \sigma_{рсб}^H F_p^{СКЛ}(\geq E_{0p}) + \sigma_{ТЗчсб}^H F_{ТЗч}^{СКЛ}(\geq L_0),$$

$$v_{сб}^{ЕРПЗ} = \sigma_{рсб}^H F_p^{ЕРПЗ}(\geq E_{0p});$$

- для случая канала

$$v_{сб}^{кан} = \sum_{j=1}^n k_j m_j (v_{сб}^{ГКЛ}(\sigma_{рсб}^{jH}, \sigma_{ТЗчсб}^{jH}) + v_{сб}^{СКЛ}(\sigma_{рсб}^{jH}, \sigma_{ТЗчсб}^{jH}) + v_{сб}^{ЕРПЗ}(\sigma_{рсб}^{jH})). \quad (4)$$

Аналогичные выражения используются для определения частоты отказов.

Наиболее часто для определения максимально возможной частоты эффектов используется их консервативная оценка. В этом случае расчеты по формулам (3) и (4) выполняются при следующих условиях:

- при минимально возможных пороговых значениях E_{0p} и L_0 ;
- при максимальных плотностях потоков СКЛ и ЕРПЗ.

Различают максимально возможную частоту возникновения одиночных эффектов ($v_{м.в.}$), которая зависит от условий эксплуатации КА, свойств РЭА, толщины защиты, спектральных характеристик КЛ, и предельно допустимое значение частоты ($v_{п.д.}$), обусловленное принятыми функционально-алгоритмическими мерами парирования одиночных эффектов. При $v_{м.в.} < v_{п.д.}$ РЭА считается стойкой к одиночным эффектам. В противном случае необходимо принять дополнительные меры по обеспечению стойкости.

На рис. 6 приведены основные методы обеспечения сбое- и отказоустойчивости.

Другой показатель устойчивости РЭА (например, вероятность возникновения катастрофического отказа в канале) может быть определен по формуле

$$P = 1 - \exp(-v_{отк}^{кан} t),$$

где $v_{отк}^{кан}$ — частота отказа в канале, t — время в течение которого канал находится во включенном состоянии.

Например, для бортовой вычислительной системы которая постоянно включена, время t равно времени активного существования КА, для другой БА это время должно рассчитываться с учетом коэффициента готовности аппаратуры.

В случае, если в соответствии с консервативной оценкой РЭА не удовлетворяет требованиям по сбое- и отказоустойчивости, то необходимо более тщательное исследование свойств РЭА по определению параметров

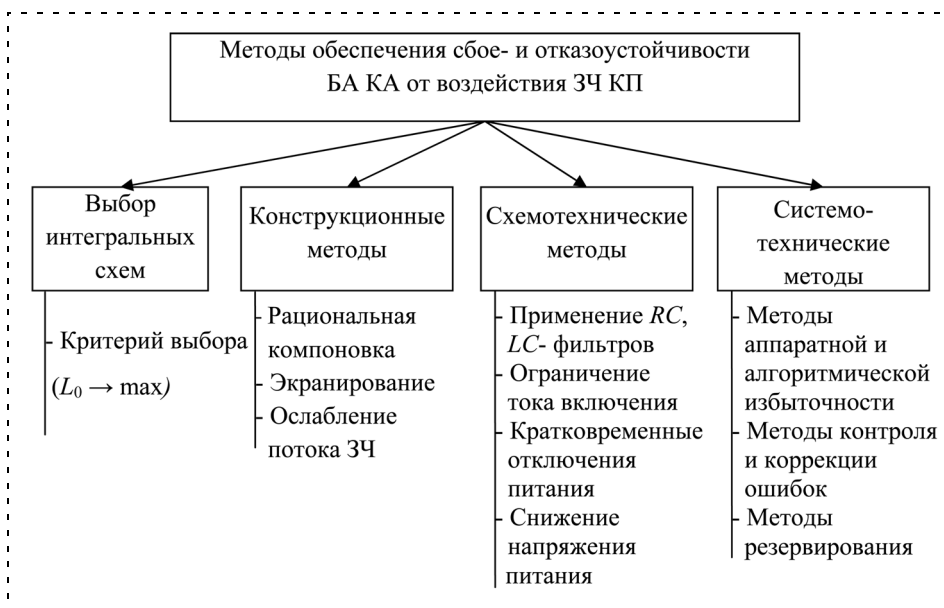


Рис. 6. Методы обеспечения сбое- и отказоустойчивости БА КА при воздействии ЗЧ КП

чувствительности с использованием моделирующих и имитирующих установок (ускорителей протонов, ионов, лазерных установок).

При облучении протонами сечение одиночного события σ определяется как величина, обратная среднему потоку протонов (Φ_1), приходящемуся на одно событие ($\sigma = 1/\Phi_1$), а средний поток равен

$$\Phi_1 = \Phi/N,$$

где Φ — поток протонов за весь этап облучения; N — число одиночных событий.

Для построения зависимости $\sigma(E_p)$ используется энергия протонов от 20 до 100 МэВ. Сечение, получаемое при энергии протонов ~100 МэВ, для большинства РЭА является сечением насыщения (σ_0).

Если полученную в результате эксперимента зависимость $\sigma(E_p)$ аппроксимировать с использованием функции Бендела [3]

$$\sigma(E_p) = \sigma_0 [1 - \exp(-0,18 \times \sqrt{\sqrt{18/E_{p0}}(E_p - E_{p0})})]^4,$$

где σ_0 и E_{p0} — параметры аппроксимации, то получим, соответственно, сечение насыщения и пороговое значение энергии протонов, приводящих к одиночному событию.

При испытаниях РЭА необходимо предусмотреть меры, исключая появление отказов из-за дозовых эффектов.

Представляет интерес организация непосредственных испытаний РЭА в условиях КП. Возможны несколько подходов. Один заключается в разработке для этих целей специализированного микроКА (с испытуемой РЭА), доставляемого на орбиту в качестве попутной нагрузки. Такой подход намного уменьшит риски по использованию РЭА в дорогостоящих проектах.

Другой подход состоит в разработке и размещении на борту КА специализированной подсистемы мониторинга проявления одиночных и дозовых радиационных эффектов и включения ее в состав блока контроля и управ-

ления. Это позволит принимать в автоматическом режиме меры по парированию последствий проявлений радиационных эффектов (например, отключение питания, снижения нагрузки, переход на резерв и др.).

Алгоритм оценки и обеспечения сбое- и отказоустойчивости БА КА от воздействия ТЗЧ и ВЭП на этапах разработки БА приведен на рис. 7.



Рис. 7. Алгоритм оценки и обеспечения сбое- и отказоустойчивости БА КА от воздействия ТЗЧ и ВЭП на этапах разработки БА (ИПЭ — изделия полупроводниковой электроники)

Системотехнические методы обеспечения сбое- и отказоустойчивости

Можно выделить несколько подходов к построению БА различного назначения и их типовые структуры: одноканальные простые; одноканальные с контролем и восстановлением информации (КВИ); многоканальные резервированные с холодным и горячим резервом каналов со встроенным КВИ, в том числе включающие специальный блок контроля и управления реконфигурацией, безотказность работы которого (по определению) должна быть существенно выше, чем для остальных резервированных модулей; многоканальные структуры с автоматом межканального обмена, программно-го контроля и восстановления информации в каналах и др.

В работе [2] проведен анализ подобных структур для бортовых вычислителей и показано, что по критерию времени жизни скрытого состояния потенциального сбоя наилучшими для бортовых вычислителей являются многоканальные многоярусные структуры с аппаратным мажоритированием сигналов каждого функционального узла бортового вычислителя.

В отличие от одноярусных структур, где мажоритирование информации (аппаратное или программное) осуществляется только на входных и выходных сигналах, в многоярусной структуре бортового компьютера аппаратному мажоритированию подвергаются все основные магистральные сигналы процессора, памяти, блока сопряжения с устройствами ввода-вывода и другие (по принципу "два из трех"). Этим достигается парирование возникающих локальных сбоев и отказов в каждом из основных функциональных узлов бортового компьютера и снижение их влияния на работу остального оборудования. Заметим, что осуществляются эти операции в текущем такте решения задачи с одновременным получением данных о работоспособном состоянии как самого бортового компьютера, так и связанной с ним БА системы управления.

Рассмотренные выше методы применяются непосредственно разработчиками БА. Кроме этого, головным разработчиком КА при разработке бортового программного обеспечения бортового компьютера управления для обеспечения живучести КА предусматривается многослойная процедура проверки анализа аномальных ситуаций и принятие, в соответствии с этим, решений по реанимации управления изделием автономными средствами. Если, например, ситуация возникла из-за сбоя или отказа аппаратуры, и эта ситуация не была исправлена средствами БА, то реанимация может быть осуществлена алгоритмическим путем, при котором организуется "откат" всей системы в одно из устойчивых состояний (контрольных точек), которые

либо созданы заблаговременно, либо сформированы в процессе полета КА. Дальнейшее функционирование КА продолжается, начиная с этой контрольной точки. В ряде случаев реанимация заключается в переключении вышедшей из строя аппаратуры на резервные комплекты.

В более сложных случаях, когда для анализа аномальных ситуаций требуется время и привлечение к анализу наземных аналитических служб, предусматривается перевод изделия в одно из двух допустимых состояний — ориентированный дежурный полет или неориентированный полет. В бортовом программном обеспечении для этих целей предусмотрен специальный паттерн — "Управление КА при возникновении неисправностей".

Заключение

Рассмотренные вопросы, связанные с обеспечением сбое- и отказоустойчивости бортовых средств КА от воздействия излучений космического пространства, обострили проблемы управления отказоустойчивостью и живучестью современных низкоорбитальных автоматических КА ДЗЗ. Существующее методическое обеспечение, используемые подходы к испытаниям и экспериментальной отработке БА КА в наземных условиях с точки зрения влияния локальных радиационных эффектов на ее работоспособность не соответствуют требованиям сегодняшнего дня.

Применение электрорадиоизделий с повышенной степенью интеграции, имеющих более высокую чувствительность к локальным радиационным эффектам, оказывает негативное влияние на качество разработки соответствующей БА, а следовательно, затрудняет создание отказоустойчивых КА ДЗЗ с большим сроком активного существования, и особенно мини-, микро-, наноКА.

Общий подход к решению этих проблем включает в себя как разработку типовых системотехнических и системотехнических решений, так и создание специализированных центров для ускоренных испытаний бортовых средств КА в наземных и полетных условиях.

Список литературы

1. Хамидулина Н. М., Кузнецов Н. В. Исследование одиночных сбоев в бортовой радиоэлектронной аппаратуре КА "Спектр-Р" // Полет. 2009. № 3. С. 55—59.
2. Харченко В. С., Юрченко Ю. Б. Анализ структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании электронных компонентов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 2. С. 3—10.
3. Чумаков А. М. Однопараметрическая модель для оценки чувствительности ИС к эффектам одиночных сбоев при воздействии высокоэнергетичных протонов. М.: ЭНПО. Специализированные электронные системы, 2008.
4. Меньшиков В. А., Рудаков В. Б., Сычев В. Н. Задачи, основные тенденции и перспективы развития автоматических космических аппаратов // Полет. 2009. № 9. С. 8—13.

CONTENTS

- Mironov V. I., Mironov Yu. V., Yusupov R. M.** The Variation Estimation of Conditions Parameters of Non-Linear Dynamic System Due to Criterion of Maximum Verisimilitude 2
One considers the application of variation approach for solution of problems of statistic estimation of non-linear dynamic systems due to criterion of maximum verisimilitude.
Keywords: *statistic estimation, non-linear dynamic systems, criterion of maximum verisimilitude.*
- Klodina T. V., Mezheritskiy E. L., Pogorelov V. A., Sapozhnikov A. I.** About Application of Pirson Distribution for Synthesis of Probability Density of Mark Vector of the Dynamic System Condition 6
The method of creating of the closed system of moments exactly approximating probability density of mark vector of the dynamic system condition is considered.
Keywords: *apriori probability density, Pirson distributions, distributions moments.*
- Aranovsky S. V., Bobtsov A. A., Nikolaev N. A.** Adaptive Observer Design for Chaotic Duffing System. 9
Problem of unknown encoded parameter reconstruction is solved by means of procedure of design of adaptive observer for chaotic Duffing system. Unlike known analogues, the problem in question is only solved using measurements of output of chaotic system and in conditions of full parametrical uncertainty.
Keywords: *chaotic system, adaptive observers.*
- Afonin S. M.** Research Characteristics of Step-Piezodrive Nano- and Micrometric Movements 16
Step-piezodrive is modeled by using the techniques of parametric structural diagrams. Electromechanical deformation and statics and dynamic characteristics of a pawl and a central piezodrive are proposed. Structural parametric circuits of piezodrive at longitudinal and transverse piezoeffect are built, its transfer functions are obtained. Effect of geometric and physical parameters of step-piezodrive and external load on its statics and dynamic characteristics are determined.
Keywords: *step-piezodrive, statics and dynamic characteristics, nano- and micrometric movement, piezoeffect.*
- Bukhgolts Yu. G., Novokreshchenov O. I., Pristup A. G., Shevchenko A. F.** Development of Piece of a Series of Synchronous Magnetolectric Motors with Fractional Slot Windings. 24
In clause questions of creation of a piece of a series of synchronous electric motors with excitation from permanent magnets and fractional slot windings are considered. Approaches to the development, made decisions, methods of calculation, modeling, results of experimental researches are described. Comparison is lead and advantages of the developed piece of a series with similar asynchronous electric motors of series AI are shown.
Keywords: *synchronous electric motors, permanent magnets, fractional slot windings, a series, development and methods of modeling.*
- Ivanchura V. I., Suchanov V. V., Nikulin N. A.** Electric Drive with Multiphase Transverse Flux Linear Induction Motor 29
Propulsion and levitation characteristics of multiphase transverse flux linear induction motor, nonlinearly depending on consumed current, slip and the changed size of air gap between inductor and secondary element are defined. The complex imitating model of the electric drive with frequency-current control is developed, allowing to conduct researches steady-state and transients, and also to carry out synthesis of the automatic control system, providing demanded indicators of quality.
Keywords: *electric drive, multiphase linear induction motor, transverse flux, number of phases, high space excitation harmonics, propulsion, levitation, frequency current controlled drive, current inverter.*
- Volodin Yu. S.** Coded Structured Light Three-Dimensional Robot Vision System 35
We present a three-dimensional robot vision system based on structured light principle. A novel coded structured light pattern was proposed for robot vision and obstacles detection, specific pattern decoding and reconstruction algorithms were elaborated. We demonstrate results of experimental investigation and give the characteristics of vision system compared to laser rangefinder.
Keywords: *3d vision, coded structured light system, pattern decoding, obstacles detection.*
- Avetisyan Yu. A., Kushnikov V. A., Rezchikov A. F., Rodichev V. A.** Mathematical Models and Algorithms of the Operational Administration Liquidation Processes Extreme Situations. 43
In article mathematical models and the algorithms are developed, allowing to carry out an operational administration processes of liquidation of extreme situations at the industrial enterprises. The modelling example illustrating procedure of their use at liquidation of an extreme situation, connected with flooding of industrial targets during a high water is considered. The developed software has been introduced on one of the large industrial enterprises of of Saratov at work on modernisation of the existing automated control system by productions.
Keywords: *models, methods, algorithms, the ministry of emergency measures, the industrial enterprise, extreme situations.*

- Bezrodny A. A.** Optimization of Vehicle Service on Gas Stations by Means of Automated Filling Terminals. 47
The approaches to optimize structures and service processes on gas stations using automated filling terminals are suggested.
Keywords: gas station, automated filling terminal, model, optimization, algorithm.
- Kryzhanovsky G. A., Solodukhin V. A.** Methodological and Applied Aspects of Inverse Problem of Optimization in the Processes of Making Decision in the Management of Air Traffic. 54
The problems of development methodologies for the use of solutions of the inverse problem optimization (IPO) are considered. The connection between solutions of IPO with the function of the usefulness of the decision is established. The structural-logical chart of the methodology for solving IPO for typical tasks of ATC is presented. An approach to evaluating the quality of work and level of training air traffic controllers, using the solution of IPO is suggested. Of analysis of stability of typical tasks solutions the ATC — an example using the solution of inverse problem is considered.
Keywords: interest-oriented system, processes of making decision, inverse problem of optimization, typical tasks of ATC.
- Lebedev G. N., Mirzoyan L. A., Efimov A. V.** Neural Network Planning of the Group Action of Aerial Vehicles at Observation of the Moving Ground Targets. 60
The problem of the observed ground targets allocation between aerial vehicles and finding order of their fly-around is solved taking into their velocity and direction of motion. It is shown that dynamic programming is the basic procedure for optimization of group actions. Neural network realization of the routing process is proposed taking into account additional examples of effective behavior that will provide high performance of group flight operative planning.
Keywords: group flight, flight routing, neural networks, dynamic programming, moving targets.
- Hahulin G. F., Novikov S. A., Posadskiy A. I., Eskin V. I.** Problems of Formation and Dynamic Updating of the Plan of Supervision in the System of Space Monitoring of Mobile Sea Objects 65
Problems of formation and dynamic updating of the plan of supervision of the mobile sea objects, time made on a set interval are considered. The data about results of survey of areas of possible position of these objects, arriving in the centre of reception and processing of the information of system is thus considered.
Keywords: system of space monitoring, space supervision, remote sounding of the Earth, onboard equipment of the review, planning of supervision, stochastic statement of a problem of planning, tracking a site of sea object, updating of the plan of supervision.
- Akhmetov R. N., Makarov V. P., Sollogub A. V.** Maintaining of Fault-Tolerant and Fail-Safe Behavior of Remote Sensing Satellite Onboard Equipment to Withstand Impact of Space Charged Particles 72
The article covers a wide range of questions about implementation of electronic equipment with LSHIC components aboard satellite. There are discussed approaches to maintain fault-tolerant and fail-safe behavior of onboard equipment to withstand impact of space charged particles.
Keywords: satellite, electronic equipment, faults, failures, heavy charged particles, high-energy protons, stability indicator, susceptibility parameters.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Г. Д. Назарьева.*

Сдано в набор 27.08.2009. Подписано в печать 12.10.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
 Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,36. Заказ 964. 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