

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 2 (131)

февраль

2012

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.
ВИТТИХ В. А.
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.
ПРОВЛОВСКИЙ В. Е.
ПРОХОРОВ Н. Л.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Никонов А. Н., Терехов В. А.** О проблеме начальных условий в управляемых системах с нелинейной динамикой и особенностями канала управления 2
- Колосов О. С., Кошоева Б. Б.** Алгоритмы численного дифференцирования реального времени в задачах управления 10
- Бобцов А. А., Ефимов Д. В., Пыркин А. А., Золгадри А.** Алгоритм адаптивного оценивания частоты смещенного синусоидального сигнала с аддитивной нерегулярной составляющей 16

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Диане С. А.** Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения 22

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Петухов И. В.** Исследование сенсорно-моторного взаимодействия человека-оператора и технической системы 33
- Иванов А. С., Лапковский Р. Ю., Уков Д. А., Филимонюк Л. Ю.** Причинно-следственный подход к расследованию аварийных ситуаций в человеко-машинных системах . . 38

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ АВТОТРАНСПОРТОМ

- Палагута К. А., Алексеев А. А.** Метод формирования области поиска для оптимизации траектории уклонения автомобиля от лобового столкновения 44
- Бузников С. Е., Тамбулатов П. В.** Анализ решений задачи стабилизации скорости автомобиля 49

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Алгулиев Р. М., Оруджов Г. Г., Сабзиев Э. Н.** Комплексирование измерений для идентификации траектории полета летательного аппарата 57
- Денисов М. М., Кузин М. Н., Пасисниченко М. А.** Математическое моделирование лазерной локации космических аппаратов в неинерциальной системе отсчета. . . 60
- Семенов И. В., Аксененко В. Д.** Компенсация влияния момента сухого трения на точность системы гироскопической стабилизации. 65
- Contents** 71

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

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

УДК 681.511.4

А. Н. Никонов, ассистент,
В. А. Терехов, д-р техн. наук, проф.,
СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург

О проблеме начальных условий в управляемых системах с нелинейной динамикой и особенностями канала управления

Исследуется влияние особенностей канала управления на динамическое поведение нелинейных управляемых систем. Выделены основные типы особенностей, показана связь с проблемой начальных условий. На примерах нелинейных управляемых систем иллюстрируется подход к анализу на основе аналитического исследования особых случаев и численного эксперимента с моделью.

Ключевые слова: нелинейные регуляторы, достижимость цели управления, неафинные по управлению системы, скользящий режим

Введение. Очевидна связь решения задачи управления объектами с особенностями нелинейной динамики их поведения. К числу особенностей относятся естественные предельные множества, бифуркационные состояния и хаотические режимы, которые могут выступать в качестве "естественных" целей управления. Вместе с тем, возможные свойства канала управления, приводящие к локальной потере управляемости или устойчивости относительно выбранных целей, естественные ограничения внешнего управляющего воздействия на объект могут стать причиной некорректности задачи синтеза функций управления.

Проблема управления объектами с особенностями рассматривалась ранее в работах, посвященных синтезу регуляторов для режимов с бифуркациями [1, 2]. Разработанные методы используются для синтеза регуляторов нелинейной динамики [2, 3] и хаотических режимов [4], анализа поведения замкнутых систем [5, 6]. Известны постановки задач и методы синтеза регуляторов с целевыми бифуркационными состояниями [7, 8] и множествами, неустойчивыми по Ляпунову [9, 10].

В данной статье рассматривается класс нелинейных систем с регулятором состояния, синтезируемым по функциям макропеременных [9–12], определяющих целевые многообразия в пространстве состояний. Управление по функциям макропеременных предполагает декомпозицию динами-

ки на две составляющие: движение вдоль целевого многообразия и перевод к нему изображающей точки из заданной области. Постулируется, что целевые многообразия согласованы со свойствами объекта. Последнее само по себе служит самостоятельной проблемой синтеза оптимальных законов на основе макропеременных [11], не рассматриваемой в данной статье.

Целью работы является выявление типичных особенностей канала управления, анализ их влияния на динамику поведения нелинейных систем. Исследуется проблема попадания изображающей точки из заданной области в малую окрестность целевого многообразия, что равносильно поиску области начальных условий, гарантирующей выход траекторий нелинейной системы на желаемый аттрактор.

Условия возникновения особенностей в канале управления. Дадим ряд формальных определений, используемых в последующем для описания различных типов особенностей и условий их возникновения. Исходную модель объекта примем в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, u),$$

где $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ — вектор состояния; u — функция внешнего скалярного управления; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, $\mathbf{g}(\mathbf{x}, u)$ — гладкие функции своих аргументов. Следуя работе [13], будем говорить, что исходное векторное поле $\mathbf{f} \oplus \mathbf{g}$ порождает фазовый поток ϕ_t , где $\phi_t(\mathbf{x}) = \phi_t(\mathbf{x}, t)$ — гладкая функция. Начальные условия в системе определим как $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$, тогда $\phi_t(\mathbf{x}_0, t)$ задает движение в фазовом пространстве системы с начальными условиями $\mathbf{x}_0$.

Одной из проблем синтеза нелинейных законов является проблема выбора начальных условий. Введем *целевое* многообразие $\psi(\mathbf{x}) \equiv 0$ в пространстве состояний, движение вдоль которого соответствует выполнению объектом заданной технологической задачи. Желаемое состояние управляемого объекта определим макропеременной $\psi(\mathbf{x})$, тогда целью управления u выберем перевод траекторий системы из допустимого начального состояния в окрестность многообразия $\psi(\mathbf{x}) \equiv 0$ с последующей стабилизацией этого состояния. Смысл внешнего управления интерпретируется как управление фазовым потоком $\phi_t(\mathbf{x}_0, t)$ при движении к целевому многообразию $\psi(\mathbf{x}) \equiv 0$. В дальнейшем будем рассматривать геометрическое представление управляемой системы, формально задаваемое функциональным уравнением

$$\Phi(\psi, \dot{\psi}, \dots, \psi^{(n)}) = 0. \quad (1)$$

Искомый нелинейный регулятор реализует во времени функцию $u(t)$ и обеспечивает выполнение равенства $\Phi(\cdot) = 0$.

Реализация нелинейного закона регулирования может быть получена методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (метод АКАР [11]) или с использованием обучаемой в реальном времени нейронной сети [12]. В обоих случаях исходная информация включает в себя функцию макропеременных $\psi(\mathbf{x})$, вид уравнения $\Phi(\cdot) = 0$ и начальные условия $\mathbf{x}_0$.

Как в методе АКАР, так и в нейросетевом подходе выбор начальных условий не рассматривается. В [12] сформулированы условия разрешимости задачи синтеза в стандартной постановке. В данной работе исследуются ситуации, в которых условия разрешимости нарушаются, что приводит к ухудшению качества переходных процессов или потере достижимости цели управления. Нарушение условий разрешимости является особыми случаями, называемыми далее *особенностями*. Как будет показано ниже, существуют причинно-следственные связи между особенностями и проблемой начальных условий.

Выделим две стадии движений в управляемой системе. На первой осуществляется переход траекторий к многообразию $\psi(\mathbf{x}) = 0$ в соответствии с (1), на второй — движение вдоль многообразия $\psi(\mathbf{x}) = 0$. Проблема начальных условий связана с первой стадией — на основе исходной информации о принятой модели объекта необходимо определить область в пространстве состояний, старт из которой гарантирует выход траекторий на аттрактор $\psi(\mathbf{x}) = 0$.

Проанализируем зависимость функционала $\Phi(\cdot)$ от управления u с целью выделить особенности. Для простоты дальнейшего изложения ограничимся случаем функционала $\Phi(\cdot)$ вида¹

$$\begin{aligned} \Phi(\psi, \dot{\psi}, \dots, \psi^{(n-1)}) &= \dot{\psi} - \varphi(\psi) = 0, \\ \psi\varphi(\psi) &< 0, \quad \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial u} \neq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Раскрывая производную функции ψ по времени с учетом уравнений модели объекта, получим выражение²

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi}{\partial x_i} f_i(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi}{\partial x_i} g_i(\mathbf{x}, u) + \varphi(\psi(\mathbf{x})) = 0,$$

где x_i, f_i, g_i — компоненты одноименных векторов. Введем нелинейную замену координат в целях преобразования вектора $\mathbf{g}$ в скалярную функцию $\tilde{g}$, входящую в уравнение для одной из динамических

¹ Функционал общего вида может обладать дополнительными особенностями, которые в данной статье не рассматриваются, при этом общность результатов статьи не теряется.

² Предполагается, что сигнал управления не используется при формировании функции макропеременных, но ее производная по времени в явном виде зависит от u .

переменных³. Эта переменная обозначается далее $\tilde{x}_u$. Перепишем получившееся выражение:

$$\frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}_u} \tilde{g}(\tilde{\mathbf{x}}, u) = F(\tilde{\mathbf{x}}), \quad \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad \tilde{\psi} = \psi(\tilde{\mathbf{x}}), \quad (3)$$

где $\tilde{\mathbf{x}}$ — новые координаты; $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{h}(\mathbf{x})$ — обратимая замена координат; $F(\tilde{\mathbf{x}})$ — гладкая функция. На основе выражения (3) выделим варианты особенностей.

1) полюс канала управления — для $\forall u \in R$ и $\tilde{\mathbf{x}} \in \Omega$: $\frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}_u} \tilde{g}(\tilde{\mathbf{x}}, u) = 0$;

2) u -особенность — для $\forall u \in R$ и $\tilde{\mathbf{x}} \in \Omega$:

$$\frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}_u} \tilde{g}(\tilde{\mathbf{x}}, u) \neq F(\tilde{\mathbf{x}}), \quad \tilde{\psi} \neq 0. \quad (4)$$

Анализируя особенности первого типа, ограничимся случаями:

1а) ψ -особенность — для $\tilde{\mathbf{x}} \in \Omega$: $\frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}_u} = 0$; (5)

1б) g -особенность — для $\forall u \in R$, $\tilde{\mathbf{x}} \in \Omega$: $\tilde{g}_u(\tilde{\mathbf{x}}, u) = 0$, $\tilde{\psi} \neq 0$.

Обозначения особенностей соответствуют природе их возникновения. Так, ψ -тип связан с нелинейностью целевого множества ψ ; g -тип — канала внутреннего управления $\mathbf{g}$; u -тип — внешнего управления u . Далее анализируется влияние каждого типа в отдельности на динамику управляемой системы, и исследуется зависимость поведения от начальных условий.

Особенности целевых множеств. Особенность ψ -типа характерна тем, что вектор внутреннего воздействия на объект направлен параллельно целевому многообразию, а значит, эталонное уравнение устойчивого движения по макропеременной не выполняется. При этом поведение регулятора, синтезируемого по функциональному уравнению (2), некорректно. Математически некорректность связана с делением на ноль и неограниченным ростом уровня воздействия. Учет ограниченности воздействий в реальных физических системах на практике приводит к отклонению от заданного качества (2) в некоторой окрестности особого многообразия ψ_p . Степень отклонения будет зависеть от динамических свойств объекта.

Переформулируем условие возникновения особенностей. Для этого введем в пространстве состояний расслоение по уровням a вида $\psi(\mathbf{x}) - a = 0$, где a — константа. Очевидно, что уровень $a = 0$ соответствует целевому многообразию, а каждой точке $\mathbf{x}_a$ вне многообразия соответствует подходящий слой $\psi = a$. Условие возникновения ψ -особенности рассматривается как условие ортогональности вектора внутреннего управления $\mathbf{g}(\mathbf{x}_a, u)$ и нормали слоя a в точке $\mathbf{x}_a$. Для нелинейного и гладкого многооб-

³ Формирование условий существования такой замены координат — отдельная задача, которая в данной статье не рассматривается.

разия ψ подобные особенности локальны, причем они образуют нелинейные многообразия ψ_p (особые многообразия), перпендикулярные в каждой точке многообразиям уровня $\psi = a$.

Проанализируем динамику замкнутой системы в окрестности особого многообразия. Для этого рассмотрим поведение при отклонениях от точки пересечения многообразия-слоя $\psi = a$ и особого многообразия ψ_p . Обозначим эту точку $\mathbf{x}_a$ и перепишем уравнение (3) в малых отклонениях:

$$(\tilde{\Psi}_{xu}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) + O^2)(\tilde{\mathbf{g}}^0 + \tilde{\mathbf{g}}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) + O^2) = F^0 + \mathbf{F}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) + O^2,$$

где $\mathbf{x}$ — вектор-столбец отклонений от особой точки $\mathbf{x}_a$ на слое $\psi = a$; $\tilde{\Psi}_{xu}^1$, $\tilde{\mathbf{g}}^i$, $\mathbf{F}^i$ — вектор-строки коэффициентов i -го порядка членов ряда Тейлора в точке $\mathbf{x}_a$ для функций $\tilde{\psi}_{xu}(\tilde{\mathbf{x}}) = \partial\tilde{\psi}/\partial\tilde{x}_u$, $\tilde{\mathbf{g}}(\tilde{\mathbf{x}}, u)$, $F(\tilde{\mathbf{x}})$ соответственно; O^2 — члены высшего порядка. Здесь и далее $\cdot$ — скалярное произведение векторов. Отбросим члены высшего порядка малости, исключим сингулярную точку $\mathbf{x} = \mathbf{x}_a$, затем выделим функцию внутреннего управления⁴:

$$\tilde{\mathbf{g}}^0 + \tilde{\mathbf{g}}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) = \frac{F^0 + \mathbf{F}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)}{\tilde{\Psi}_{\mathbf{x}}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)}.$$

Выполнение условий⁵

$$|\tilde{\mathbf{g}}^0| \gg |\tilde{\mathbf{g}}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)| \neq 0, |F^0| \gg |\mathbf{F}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)| \neq 0,$$

означает, что знак $\tilde{\mathbf{g}}$ в окрестности точки $\mathbf{x}_a$ зависит от знака выражения

$$S = \tilde{\Psi}_{\mathbf{x}}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a),$$

эквивалентного скалярному произведению вектора нормали к особому многообразию и вектора отклонений от точки $\mathbf{x}_a$. Знак выражения S меняется при пересечении особого многообразия.

По мере приближения к особому многообразию модуль внутреннего управления стремится к бесконечности. Поэтому влиянием собственной динамики объекта на поведение системы можно пренебречь. С учетом ортогональности вектора внутреннего управления к особому многообразию и смены знака при переходе через особое многообразие в системе становятся возможны только два вида поведения: притяжение и отталкивание фазовых траекторий по отношению к особенности. Это означает, что для замкнутой системы особое многообразие является непреодолимой преградой в пространстве состояний: траектории либо "отталкиваются", либо стремятся

попасть на него. Последнее, очевидно, приведет к возникновению скользящего режима в окрестности особого многообразия, так как вектор воздействия всюду будет направлен внутрь области отключения регулятора.

Возникновение скользящего режима приводит к невыполнению равенства (2), поэтому необходим анализ поведения системы в режиме скольжения, определяемого собственной динамикой объекта при движении вдоль особого многообразия. Задачу анализа можно упростить, воспользовавшись редуцированными уравнениями динамики, получаемыми с помощью уравнения особого многообразия. Уравнение особого многообразия может быть получено из условий возникновения ψ -особенности (5):

$$\frac{\partial\tilde{\psi}}{\partial\tilde{x}_u}(\tilde{\mathbf{x}}) = \frac{\partial\tilde{\psi}}{\partial\tilde{x}_u}(\mathbf{h}(\mathbf{x})) = \psi_p(\mathbf{x}) \equiv 0.$$

В результате редукции размерность динамической системы уменьшается на единицу, дальнейший анализ может быть выполнен с использованием существующих методов анализа нелинейной динамики [13–14].

Изложенные выше рассуждения позволяют определить взаимосвязь между ψ -особенностью и задачей выбора начальных условий. Взаимосвязь заключается в том, что часть траекторий замкнутой системы может попадать в область скользящего режима, не гарантирующего достижимость целевого множества. Выделим три вида областей начальных условий со свойствами им траекториями, характеризующимися: а) достижимостью с заданным качеством (2); б) достижимостью с искажением заданного качества; в) недостижимостью цели. Наибольший интерес представляет выявление областей двух последних типов. Их анализ содержит два этапа.

На первом этапе проводится исследование всего пространства состояний системы. Выявляются многообразия-особенности и анализируется их тип (притягивающие/отталкивающие). Для притягивающих многообразий определяется бассейн притяжения и строится портрет динамики замкнутой системы в целом. На втором этапе анализируется движение вдоль всех многообразий, как целевых, так и особых с построением редуцированной системы уравнений. Благодаря редукции пространства состояний задача анализа сводится к исследованию свойств нелинейной системы меньшей размерности, чем у исходной. Решение последней проблемы — отдельная задача, в данной статье она не рассматривается. По результатам исследования определяются типы многообразий с точки зрения достижимости целевого множества (достижимость с заданным качеством, с искажением заданного качества и недостижимость цели). Бассейны притяжения многообразий-аттракторов вместе с типом достижимости позволяют выделить области начальных условий, старт траекторий из которых гарантирует попадание изображающей точки на целевое множество.

⁴ Предполагается, что $\tilde{\Psi}_{\mathbf{x}}^1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) \neq 0$, в противном случае имеем более вырожденный случай особенности.

⁵ Нарушение условий означает наличие дополнительных особенностей в этой точке, подобная ситуация выходит за рамки рассматриваемых в статье случаев.

Проиллюстрируем приведенный подход к анализу на примерах нелинейных управляемых систем, обладающих ψ -особенностями.

Пример 1. Рассмотрим систему с устойчивым скользящим режимом:

$$\begin{cases} \dot{x} = y^2 - 2x, \\ \dot{y} = u; \end{cases} \quad \psi = y^2 + x, \quad \psi_p = y, \quad (6)$$

$$u = \begin{cases} u_a, & |\psi_p| \geq \delta, \\ u_\delta, & |\psi_p| < \delta; \end{cases} \quad \delta > 0, \quad u_a = -\frac{4x + 5,5y^2}{y}; \quad u_\delta = 0.$$

В примере (6) закон управления u_a , полученный методом АКАР, отключается в окрестности особого многообразия $\psi_p = y = 0$. Проанализируем зависимость поведения нелинейной системы от начальных условий. Для этого выделим инвариантные множества, определим их тип и составим портрет пространства состояний. В системе присутствуют два множества — целевое многообразие $\psi = 0$ и многообразие-особенность $\psi_p = 0$. Множество $\psi = 0$ притягивающее, поэтому интересует поведение в окрестности множества $\psi_p = 0$. Для определения типа устойчивости ψ_p рассмотрим приближенное уравнение линий уровня

$$\psi_a = \psi - a = 0 \text{ при } y \rightarrow 0: \psi_a = x - a$$

и проанализируем поведение системы в окрестности многообразия ψ_p вдоль многообразия ψ_a . Используем редуцированные уравнения динамики:

$$\begin{cases} x = a; \\ \dot{y} = -\frac{1}{y} (4a + 5,5y^2) = f(y, a). \end{cases}$$

Устойчивость движения определим по коэффициенту линейной части $f(y, a)$ при $y \rightarrow 0$ (окрестность многообразия $\psi_p = 0$). Приходим к выражению

$$\lim_{y \rightarrow \pm 0} \frac{\partial f(y, a)}{\partial y} = \begin{cases} \lim_{y \rightarrow \pm 0} (-4a/y), u_\delta, & a \neq 0; \\ -11, & a = 0. \end{cases}$$

Из соотношения следует, что при $a \geq 0$ многообразие-особенность притягивает траектории, а при $a < 0$ — отталкивает.

Перейдем к анализу поведения при движении вдоль инвариантных многообразий, для этого запишем редуцированные уравнения динамики:

- вдоль многообразия $\psi = 0$: $\dot{x} = -3x, y^2 = -x$;
- вдоль многообразия $\psi_p = 0$: $\dot{x} = -2x, y = 0$.

Обе редуцированные системы устойчивы относительно точки $(x, y) = (0, 0)$, расположенной на целевом многообразии. Можно заключить, что в рассматриваемой системе наличие ψ -особенности не при-

водит к потере достижимости цели, однако качество движения ухудшается — для части траекторий характерно скольжение вдоль особого многообразия. Множество начальных условий можно разделить на две части — с траекториями, удовлетворяющими и не удовлетворяющими заданному качеству движения. Аналитические результаты позволяют качественно изобразить схему пространства состояний, характеризующую влияние начальных условий на динамику поведения (рис. 1, а). Результат численного интегрирования системы (6) с различными начальными условиями совпадает с выводами аналитического исследования (рис. 1, б).

Пример 2. Рассмотрим систему с неустойчивым скользящим режимом. Он основывается на модельном уравнении бифуркации Пуанкаре-Андронova-Хопфа с неустойчивым предельным циклом. Подобное поведение свойственно многим нелинейным системам. Добавив в модель сигнал управления u , запишем уравнения динамики:

$$\begin{cases} \dot{x} = x(-1 + x^2 + y^2) - y(x^2 + y^2), \\ \dot{y} = (x^2 + y^2)x + (-1 + x^2 + y^2)y + u. \end{cases} \quad (7)$$

В качестве целевого аттрактора выберем множество неустойчивого предельного цикла — окружность радиуса 1, качество движения к нему определим с помощью стандартного функционального уравнения:

$$\Phi = \dot{\psi} + \psi = 0, \quad \psi = x^2 + y^2 - 1.$$

В синтезированной по методу АКАР управляемой нелинейной системе особенность ψ -типа возникает на многообразии $\psi_p = y$. Для обеспечения корректности аналитический закон "выключается" в окрестности особенности:

$$\psi_p = y; \quad u = \begin{cases} u_a, & |\psi_p| \geq \delta, \\ u_\delta, & |\psi_p| < \delta; \end{cases} \quad u_\delta = 0, \quad \delta > 0, \quad (8)$$

$$u_a = -\frac{1}{2y} (-x^2 + 2x^4 + 4x^2y^2 - y^2 + 2y^4 - 1).$$

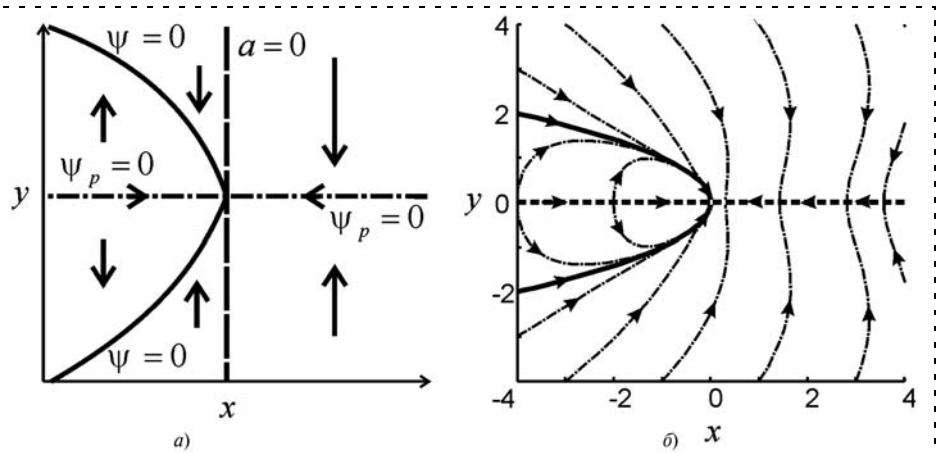


Рис. 1. Портрет пространства состояний системы (6):

а — схема по результатам аналитического исследования; б — численное интегрирование уравнений (6)

Составим схему зависимости поведения от начальных условий, для этого определим тип устойчивости многообразий системы. Целевое многообразие всюду устойчиво, кроме областей-особенностей, поэтому перейдем к анализу особых случаев. Составим приближенное выражение линий уровня ψ_a в окрестности многообразия-особенности:

$$\psi_a = x^2 + y^2 - 1 - c \text{ при } y \rightarrow 0: \psi_a = x^2 - 1 - c, \\ \psi_a \equiv 0 \Leftrightarrow x = \pm a, a \in [0; +\infty].$$

В силу симметричности особенности относительно начала координат далее рассматривается только случай $\psi_a = x - a$. Осуществим редукцию динамики, используя уравнение уровня в окрестности особенности:

$$\dot{y} = a(y^2 + a^2) + (y^2 + a^2 - 1)y - \\ - \frac{1}{2y}(-a^2 + 2a^4 + 4a^2y^2 - y^2 + 2y^4 - 1) = f(y, a), \\ x = a, a \in [0; +\infty],$$

и проанализируем зависимость линейной части $f(y, a)$ от параметра a :

$$\lim_{y \rightarrow \pm 0} \frac{\partial f(y, a)}{\partial y} = \\ = \begin{cases} -\frac{6}{4} & \text{при } a = 1; \\ \lim_{y \rightarrow \pm 0} \left(-\frac{(a-1)(a+1)(a^2+0,5)}{y^2} \right) & \text{при } a \neq 1. \end{cases}$$

Получаем, что при $-1 < a < 1$ многообразие-особенность — отталкивающее, при $|a| \geq 1$ — притягивающее.

Перейдем к анализу динамики поведения при движении вдоль многообразий. В исходной системе целевому многообразию соответствует инвариантное множество неустойчивого предельного цикла, поэтому желаемое движение определяется естествен-

ным движением на предельном цикле. Для анализа поведения в окрестности многообразия-особенности рассмотрим уравнения редуцированной системы:

$$\dot{x} = x(x^2 - 1), y = 0.$$

В редуцированной системе присутствует три особых точки: $x = 0$, $x = \pm 1$. Точка $x = 0$ устойчива, точки $x = \pm 1$ — неустойчивы. Подобное поведение траекторий в окрестности особого многообразия (рис. 2, а) приходит в противоречие с динамикой вдоль целевого многообразия, характеризуемого циклическим движением против часовой стрелки.

В окрестности точек $(\pm 1, 0)$ имеем нетривиальное поведение: с одной стороны, вдоль особого многообразия траектории расходятся, с другой — вдоль целевого проходят мимо. При этом оба многообразия — притягивающие. Это означает, что в окрестности точек пересечения должны присутствовать дополнительные сепаратрисы, разделяющие бассейны притяжения множеств. Аналогичное утверждение справедливо и для первого примера, однако там движение вдоль особого многообразия было устойчивым и траектории в любом случае попадали на целевое многообразие. Во втором примере движение вдоль особенности неустойчиво, попав в область притяжения особого многообразия, цель управления становится недостижимой. По этой причине во втором примере поиск сепаратрис становится актуальным, так как определяет область допустимых начальных условий для замкнутой системы. Факт наличия сепаратрис подтверждается результатами численного моделирования, две из них отмечены штрихпунктирными линиями на рис. 2, б.

Проведенный в примерах 1, 2 анализ показывает, что при возникновении ψ -особенностей происходит не только ухудшение качества, но и потеря достижимости цели. Пространство состояний разбивается на бассейны притяжения устойчивых и неустойчивых инвариантных многообразий, опреде-

ляющих области допустимых начальных условий для нелинейных управляемых систем.

Особенности канала внутреннего управления. В случае g -особенности отсутствует возможность воздействия на систему, поэтому поведение в окрестности особенности определяется динамическими свойствами объекта. Управляющее воздействие становится нулевым, что влечет за собой изменение качества движения по сравнению с заданным, определяемым функциональным уравнением (2). Геометрически изменение происходит в области особого многообра-

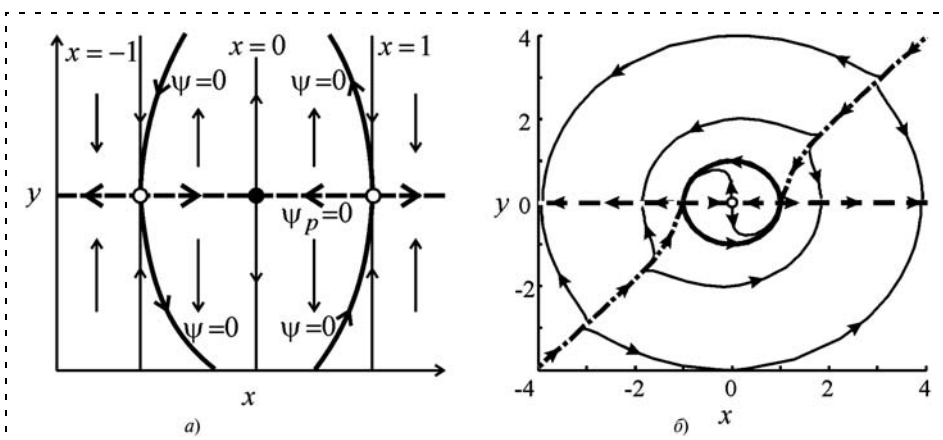


Рис. 2. Портрет пространства состояний для замкнутой системы (7)–(8):

а — схема поведения в окрестности особого многообразия, составленная по результатам аналитического исследования; б — результат численного интегрирования замкнутой системы (7)–(8) с различными начальными условиями

зия, соответствующего g -особенности. Целесообразно начать исследование с анализа динамики поведения в данной области.

Характер движения в окрестности g -особенности определяется взаимодействием двух векторных полей — управляемого $\mathbf{f} \oplus \mathbf{g}$ и неуправляемого $\mathbf{f}$. По мере приближения к особому многообразию модуль вектора внутреннего управления g стремится к нулю (в силу физической ограниченности сигнала внешнего управления), а движение системы определяется моделью собственной динамики объекта $\mathbf{f}$, что приводит к искажению заданного качества (2). Степень искажений зависит от взаимной ориентации особого многообразия, управляемого и неуправляемого векторов движения. Выделим два возможных типа ситуаций: движение сквозь особое многообразие и переход в скользящий режим вдоль особого многообразия. С точки зрения выбора начальных условий целесообразно решить две задачи: выявить скользящие режимы и проанализировать их влияния на достижимость цели; определить бассейны притяжения скользящих режимов. Первая задача далее решается аналитически на основе исходных уравнений динамики, вторая — с использованием численного интегрирования уравнений.

Рассмотрим задачу поиска скользящих режимов на многообразии-особенности g -типа. Они возникают в присутствии разнонаправленных векторов движения управляемой и неуправляемой системы относительно многообразия-особенности. Сформулируем условие возникновения режима через скалярное произведение трех векторов:

$$Q(\mathbf{x}_a) = (\bar{\mathbf{N}}_p \cdot \bar{\mathbf{f}}_g)(\bar{\mathbf{N}}_p \cdot \bar{\mathbf{f}}) < 0, \quad \psi_p(\mathbf{x}_a) = 0, \quad (9)$$

где $\mathbf{x}_a$ — элемент множества скользящего режима; $\bar{\mathbf{N}}_p$ — вектор нормали к особому многообразию в точке $\mathbf{x}_a$; $\bar{\mathbf{f}}_g$ — вектор управляемого движения без особенности; $\bar{\mathbf{f}}$ — вектор собственных движений. Из уравнений (9) необходимо определить множества на особом многообразии, для которых одна из пар векторов $(\bar{\mathbf{N}}_p, \bar{\mathbf{f}}_g)$ и $(\bar{\mathbf{N}}_p, \bar{\mathbf{f}})$ ортогональна. Такие множества служат границами режимов двух типов: со свободным прохождением особого многообразия и переходом в скользящий режим вдоль многообразия-особенности. Дальнейший анализ направлен на исследование динамики при движении в скользящем режиме вдоль особого многообразия. Задача анализа может быть упрощена с помощью редукции уравнений на особом многообразии. Исследование поведения редуцированной системы может опираться на известные методы анализа нелинейной динамики [13–14].

Аналитический анализ позволяет выявить скользящие режимы и вид поведения на многообразии-особенности. На основе этой информации путем численного интегрирования уравнений могут быть выделены различные области начальных условий

с точки зрения достижимости целевого множества и соответствия заданному качеству движений (2).

Пример 3. Рассмотрим управляемую систему с g -особенностью:

$$\begin{cases} \dot{x} = x + y - 0,1x^2; & g(x, y, u) = (y + 2x + 2)u; \\ \dot{y} = 10y - x^2 + g(x, y, u); & \psi_p = y + 2x + 2; \end{cases}$$

$$u = \begin{cases} u_a, & |\psi_p| > \delta; \\ 0, & |\psi_p| \leq \delta; \end{cases} \quad \psi = y + 2x - 0,1x^2;$$

$$u_a = \frac{(200x + 650y - 75x^2 - 10xy + x^3)}{50(y + 2x + 2)}; \quad (10)$$

$$g = -4x - 13y + \frac{3}{2}x^2 + \frac{1}{5}xy - \frac{1}{50}x^3,$$

где ψ — целевая функция; u_a — внешнее управление, синтезируемое по методу АКАР; g — внутреннее управление; $\delta > 0$ — порог выключения регулятора в окрестности особенности. Вычислим по исходным данным уравнение и вектор нормали к особому многообразию:

$$\psi_N = x - 2y, \quad \bar{\mathbf{N}}_p = (2; 1).$$

Составим выражение для определения типов динамического поведения в окрестности особого многообразия:

$$\begin{aligned} Q(x, y) &= (\bar{\mathbf{f}}_g \cdot \bar{\mathbf{N}}_p)(\bar{\mathbf{f}} \cdot \bar{\mathbf{N}}_p) = \\ &= \left(2\left(x + y - \frac{1}{10}x^2\right) - 3y + \frac{1}{2}x^2 - 4x + \frac{1}{5}xy - \frac{1}{50}x^3\right) \times \\ &\times \left(2\left(x + y - \frac{1}{10}x^2\right) + 10y - x^2\right). \end{aligned}$$

Приравнявая получившееся выражение к нулю, осуществив редукцию с помощью $\psi_p = 0$, рассчитаем значения точек ортогональности векторов:

$$\begin{cases} x_{01} = -17,1684; \\ x_{02} = -1,1649; \\ x_{03} = 2,5468; \end{cases} \quad \begin{cases} y_{01} = 32,3368; \\ y_{02} = 0,3299; \\ y_{03} = -7,0971; \end{cases} \quad \begin{cases} s_{01} = 1; \\ s_{02} = -1; \\ s_{03} = 1, \end{cases}$$

где s_{0i} — знак производной в точках ортогональности. Между точками ортогональности направленность векторов чередуется слева направо по оси абсцисс как "встречное", "сонаправленное", "встречное", "сонаправленное". Таким образом, получаем два скользящих режима на особом многообразии между точками $(-\infty; +\infty)$ и $(x_{01}; y_{01})$, $(x_{02}; y_{02})$ и $(x_{03}; y_{03})$.

Проанализируем поведение в скользящих режимах, для этого осуществим редукцию уравнений динамики исходной системы на особом многообразии:

$$\dot{x} = -x - 2 - 0,1x^2, \quad y = -2x - 2.$$

Редуцированная система обладает двумя стационарными точками — неустойчивой $x_1 = -5 - \sqrt{5}$ и устойчивой $x_2 = -5 + \sqrt{5}$. Обе точки находятся за пределами множеств скользящих режимов, однако из-за неустойчивости точки x_1 скользящий режим

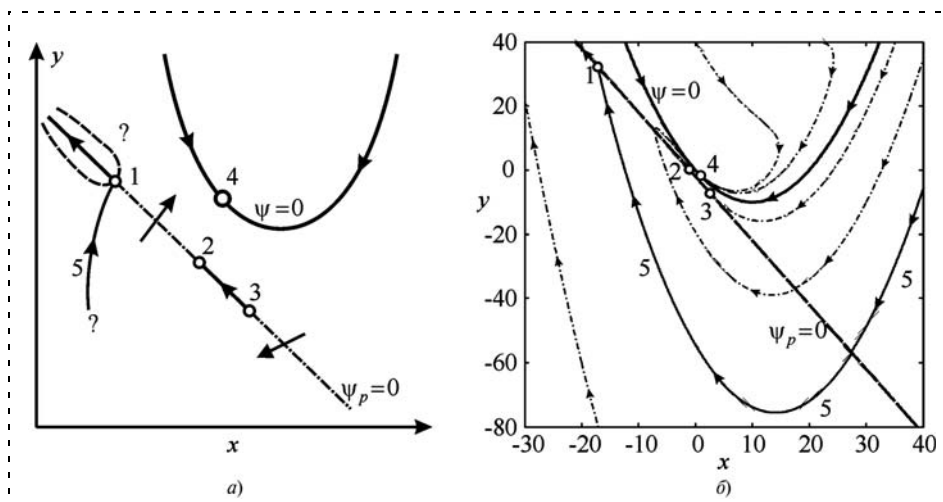


Рис. 3. Пространство состояний нелинейной системы (10): а — схема по результатам аналитического исследования; б — результат численного интегрирования уравнений для различных начальных условий

левее точки x_{01} оказывается неустойчивым, а значит, в пространстве состояний системы присутствует область начальных условий, не относящаяся к бассейну притяжения целевого аттрактора.

Результаты проведенного анализа позволяют составить схему пространства состояний замкнутой системы (рис. 3, а). На ней пространство состояний частично разделено на области начальных условий с различным типом поведения. Численное интегрирование уравнений дает общую картину.

Остается неизвестным поведение в окрестности скользящего режима (штриховая линия на рис. 3, а). С учетом действия возмущений подобное множество оказывается слабо притягивающим — вероятен переход траектории в область притяжения целевого аттрактора. По этой причине необходимо дополнять исходную постановку задачи информацией о возможных возмущениях и области действия особенности (области отключения регулятора).

Результаты анализа показывают, что особенность g-типа порождает области "рискованных" начальных условий, старт из которых приводит к непредсказуемому поведению системы. Наличие таких областей повышает уровень требований к точности описания управляемого процесса для окрестности особенности, к составлению моделей возможных возмущений и свойств канала внешнего управления.

Особенности канала внешнего управления. Рассмотрим распространенный вид особенности, связанный с естественными ограничениями и свойствами канала внешнего управления. Из формального определения особенности (4) следует наличие глобального экстремума:

$$\exists u_0 \in R, x_0 \in \Omega: \frac{\partial g}{\partial u}(x_0, u_0) = 0.$$

Негативный эффект глобального экстремума — ограничение сигнала воздействия — отрицательно сказывается на качестве управления и приводит

к уменьшению области допустимых начальных условий, обеспечивающих выход траекторий на целевой аттрактор. Кроме ограничения экстремум может приводить к нарушению корректности задачи синтеза регулятора, так как подходящая функция управления становится неединственной. Последняя проблема решается путем изменения постановки задачи — введением дополнительных критериев качества, позволяющих выбрать единственный вариант функции управления. Интерес представляет проблема ограничения сигнала — анализируется связь между экстремумом,

областями начальных условий и поведением управляемой нелинейной системы.

С геометрической точки зрения глобальному экстремуму соответствуют два типа многообразий в пространстве состояний. Первый тип определяет границу особой области согласно критерию (4), второй — границу области неустойчивого по Ляпунову движения системы относительно цели управления. Формализуем многообразие-границу неустойчивости с помощью выражения

$$\begin{aligned} \psi_0(x, u_e) &= \dot{\psi} = \sum_i \frac{\partial \psi}{\partial x_i} f_i(x, u_e) = \\ &= F(x) + G_e(x, u_e) = 0, \psi \neq 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где ψ_0 — пограничное многообразие области неустойчивого поведения; u_e — сигнал внешнего управления в точке экстремума; F — гладкая функция; G_e — характеризует внутреннее воздействие в точке экстремума. Тип устойчивости зависит от знака выражения (11) с учетом знака функции макропеременных для данной области. Устойчивому движению с функцией Ляпунова $V = 0,5\psi^2$ соответствует неравенство

$$\dot{V} = \psi \dot{\psi} < 0, \psi \neq 0. \quad (12)$$

По отношению к многообразию-границе система может вести себя двумя способами — двигаться внутрь и во вне области неустойчивости. Вероятны ситуации, при которых на одном пограничном многообразии сосуществуют два типа движений, разделенных особым множеством (особенностью на границе области неустойчивости). Условием возникновения внутренних особенностей является касание пограничного многообразия и вектора управляемого движения:

$$S(x, u_e) = \bar{N}_0 \cdot \bar{f}_g = \sum_i N_{ix} f_i(x, u_e) = 0, \psi_0 = 0,$$

где S — множество касания; $\bar{N}_0$ — вектор нормали к многообразию-границе; $\bar{f}_g$ — вектор управляемого движения на многообразии-границе. Для определения направления движения по отношению к многообразию-границе необходимо вычислить значение производной на множестве $S(x, u_e) = 0$.

Возникновение множества касания на многообразии-границе поднимает вопрос существования дополнительных сепаратрис в пространстве состояний системы. Действительно, если по разные стороны от множества касания на многообразии-границе присутствуют движения с противоположными направлениями, то само множество касания должно быть источником соответствующих сепаратрис в пространстве состояний. Сепаратрисы позволяют выделить области начальных условий, характерные для различных видов движения.

Пример 4. Проиллюстрируем рассуждения анализом поведения нелинейной системы, описываемой уравнениями

$$\begin{cases} \dot{x} = x^2 + y; g(u) = u^2 + 4u; \psi = x^2 + x + y; \\ \dot{y} = x + y + g(u); g_{\min} = -4; \dot{\psi} + \psi = 0, \end{cases}$$

где $g_{\min}$ — глобальный минимум воздействия. В рассматриваемом примере u -особенность делит пространство состояний на две части: в одной функция управления оказывается неединственной, в другой — ограничена по амплитуде. Выберем из двух возможных вариантов управления, обеспечивающий наименьший уровень амплитуд сигнала:

$$u = \begin{cases} -2 + \sqrt{D(x, y)}, & D(x, y) \geq 0, \\ -2, & D(x, y) < 0, \end{cases}$$

$$D(x, y) = 4 - 2x^3 - 2xy - 2x^2 - 3y - 2x.$$

Определим границу области неустойчивых по Ляпунову движений, для этого рассмотрим производную макропеременной по времени:

$$\dot{\psi} = \psi_0 = (2x + 1)(x^2 + y) + x + y + g_{\min} = 0.$$

Глобальный минимум управляющего воздействия ограничивает только отрицательные значения производной функции макропеременных. Это означает, что согласно (12) следует рассматривать ψ_0 только

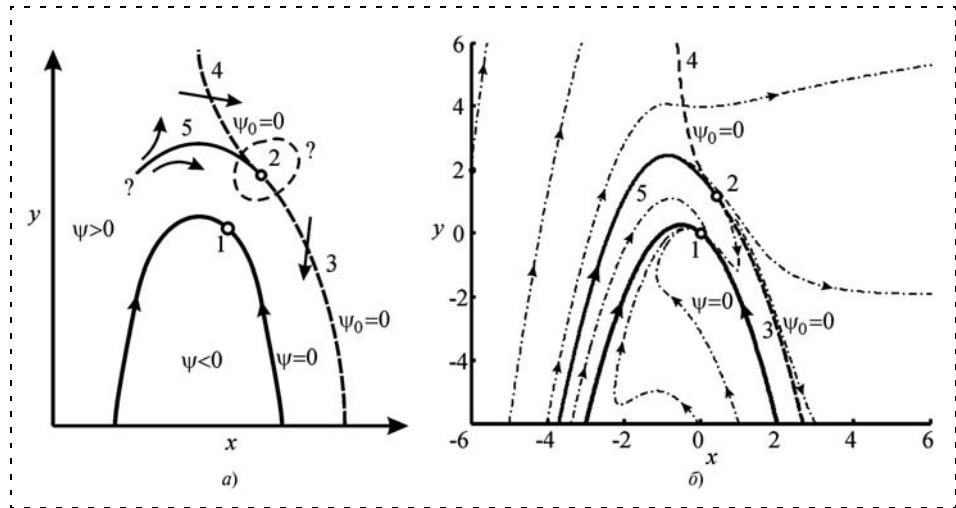


Рис. 4. Пространство состояний системы с u -особенностью:
а — схема по результатам аналитического исследования; б — численное интегрирование исходных уравнений

в области положительных значений ψ . Получаем описание границы устойчивости:

$$\begin{cases} 2x^3 + 2xy + x^2 + 2y + x + g_{\min} = 0; \\ x^2 + x + y > 0. \end{cases}$$

Для определения точек касания на многообразии-границе сформируем выражения вектора нормали и вектора управляемого движения:

$$\bar{N}_0 = \left(\frac{6x^2 + 2y + 2x + 1}{2x + 2}; 1 \right), \quad \bar{f}_g = (x^2 + y; x + y - 4).$$

Найдем точки касания на многообразии-границе из системы:

$$\begin{cases} \bar{N}_0 \cdot \bar{f}_g = 0; \\ \psi_0 = 0; \\ \psi > 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_0 = -1 + \sqrt{2} \approx 0,4142; \\ y_0 = -\frac{9}{2} + 4\sqrt{2} \approx 1,1569. \end{cases}$$

Составим схему пространства состояний на основе полученной информации (рис. 4, а). Значение производной ψ_0 в точке (x_0, y_0) по направлению нормали отлично от нуля, поэтому по разные стороны точки касания управляемое движение разнонаправленное (стрелки 4 и 3 на рис. 4, а). Это означает, что точка (x_0, y_0) принадлежит сепаратрисе, отделяющей бассейн притяжения целевого множества (цифра 5 на рис. 4, а). Разнонаправленность векторов движения означает, что часть траекторий, попавших в область неустойчивости, может возвращаться обратно. Другими словами, анализ дает лишь частичное описание поведения системы в окрестности точки касания на многообразии-границе.

Аналитически определить расположение сепаратрисы не представляется возможным, оценка получается путем численного интегрирования уравнений (цифра 5 на рис. 4, б).

Заключение. Установлен и исследован ряд причинно-следственных связей между особенностями канала управления и областью допустимых начальных условий для управляемых систем. В приведенных примерах прослеживается закономерность, согласно которой сфера влияния особенностей выходит за пределы их геометрического представления (многообразия в пространстве состояний). Особенности выступают в роли "узла" сепаратрис, которые разделяют области с разными типами движений. Подобная ситуация с возникновением "побочных эффектов" свойственна нелинейным системам.

Подход к анализу динамики нелинейных систем с использованием аналитического и численного исследования является достаточно распространенным [13–14]. Это вызвано тем, что особые случаи допускают аналитическое исследование в силу своей локальности, а порождаемые ими глобальные эффекты могут быть построены численно.

Результаты анализа могут рассматриваться как ограничения при выборе начальных условий, а также использоваться при синтезе нелинейных законов управления состоянием в нелинейных динамических системах, расширяющих область притяжения целевого множества. В последнем случае открывается путь к синтезу новых классов систем, неафинных по управлению, обладающих ограничениями, допускающих нелинейные целевые множества.

Список литературы

1. **Abed E. H., Fu J.-H.** Local feedback stabilization and bifurcation control. I. Hopf bifurcation // *Systems & Control Letters*. 1986. Vol. 7. N 1. P. 11–17.
2. **Chen G., Moiola J. L., Wang H. O.** Bifurcation control: theories, methods, and applications // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2000. Vol. 10. N 3. P. 511–548.
3. **Терехов В. А., Никонов А. Н.** Синтез нейрорегулятора нелинейных динамических объектов на основе одной модели бифуркаций // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010. № 1. С. 31–42.
4. **Андреевский Б. Р., Фрадков А. Л.** Управление хаосом: Методы и приложения. Часть I. Методы // *Автоматика и телемеханика*. 2003. № 5. С. 3–45.
5. **Wang W., Krener A. J.** Extended quadratic controller normal form and dynamic feedback linearization of nonlinear systems // *SIAM J. Control and Optimization*. 1992. Vol. 30. N 6. P. 1319–1337.
6. **Kang W.** Normal Form, Invariants, and Bifurcations of Nonlinear Control Systems in the Particle Deflection Plane // *Dynamics, Bifurcation and Control. Lecture Notes in Control and Information Sciences*. 2002. Vol. 273. P. 67–87.
7. **Moreau L., Sontag E., Arcak M.** Feedback tuning of bifurcation // *Systems and Control Letters*. 2003. Vol. 50. N 2. P. 229–239.
8. **Ефимов Д. В.** Робастное и адаптивное управление нелинейными колебаниями. СПб.: Наука, 2005. 314 с.
9. **Тюкин И. Ю., Терехов В. А.** Адаптация в нелинейных динамических системах. Сер. "Синергетика: от прошлого к будущему". М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 384 с.
10. **Tyukin I.** Adaptation in Dynamical System. Cambridge University Press, UK, 2011. 410 p.
11. **Колесников А. А.** Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
12. **Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю.** Нейросетевые системы управления. Сер. "Нейрокомпьютеры и их применение". Кн. 8. / Под общ. ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2002. 480 с.
13. **Гукенхеймер Дж., Холмс Ф.** Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. Москва—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 560 с.
14. **Kuznetsov Yu. A.** Elements of Applied Bifurcation Theory // *Series "Applied Mathematics Science"*. 2004. Vol. 112. N.-Y.: Springer-Verlag. 631 p.

УДК 621.398-501.01

О. С. Колосов, д-р техн. наук, проф.,
KolosovOS@mpei.ru,
Б. Б. Кошоева, аспирант,
Московский энергетический институт

Алгоритмы численного дифференцирования реального времени в задачах управления

Анализируются структуры и свойства алгоритмов численного дифференцирования реального времени, обсуждаются варианты их синтеза в составе управляющих устройств систем автоматического управления для улучшения динамических свойств системы и уменьшения влияния высокочастотных помех.

Ключевые слова: алгоритм численного дифференцирования реального времени, полоса пропускания, точность дифференцирования, интерполяционный полином Ньютона, регулятор

С ростом быстродействия управляющих микропроцессоров реализуемые в них алгоритмы управления по своим свойствам приближаются к непрерывным. Это приводит к известным эффектам подчеркивания высокочастотных помех в тракте передачи сигнала при наличии операций численного дифференцирования в алгоритмах цифрового управления. Для устранения подобного эффекта требуется усложнять алгоритмы управления путем введения дополнительных алгоритмов цифровой фильтрации высокочастотных помех.

В данной статье показано, что рациональный выбор структуры алгоритма численного дифференцирования реального времени и шага дискретизации при его использовании в алгоритмах управления системами может обеспечить достаточную помехозащищенность всего тракта цифрового управления без дополнительной высокочастотной фильтрации.

Анализ точности алгоритмов численного дифференцирования при использовании их для задач

управления целесообразно проводить в частотной области, так как в этом случае легко увязать понятие "точности" с понятием "полосы пропускания", которое широко используется при проектировании систем управления. В пользу такого подхода говорит и то обстоятельство, что существующие методы анализа и синтеза систем управления базируются по большей части на частотных методах и представлениях [5]. Это относится как к непрерывным, так и к дискретным системам. В частотной области эти системы анализируются с единых позиций. В связи с этим интерес представляют исследование частотных свойств известных алгоритмов численного дифференцирования и выработка рекомендаций по их применению.

В литературе по численным методам [1,2] для оценки производных таблично заданной функции $y=f(t)$ предлагается провести замену ее значений $y_0, y_1, y_2, \dots, y_k$, соответствующих значениям аргумента $t_0, t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots, t_0 + k\Delta t$, интерполяционным полиномом (простым алгебраическим или специальным — Стирлинга, Ньютона или Бесселя) k -й степени, принимающим те же значения, что и $f(t)$ при тех же значениях аргумента. Для получения производной i -го порядка необходимо продифференцировать интерполяционный полином i раз. Использование специальных полиномов позволяет получить как простейшие (легко интерпретируемые геометрически [1]) алгоритмы численного дифференцирования, так и более сложные, входящие в таблицы наиболее употребляемых алгоритмов [2].

Однако реализация алгоритмов численного дифференцирования реального времени может быть осуществлена только на базе интерполяционного полинома Ньютона, так как оценка производной в точке y_0 осуществляется по значениям наблюдаемой функции $y_0, y_{-1}, y_{-2}, \dots, y_{-k}$ в момент времени t_0 и в предыдущие моменты времени $t_0 - \Delta t, t_0 - 2\Delta t, \dots, t_0 - k\Delta t$.

Полином Ньютона по переменной $u = \frac{t-t_0}{\Delta t}$ для функции $f(t)$ имеет вид

$$\hat{y}(u) = y_0 + u\Delta y_{-1} + \frac{1}{2!}u(u+1)\Delta^2 y_{-2} + \frac{1}{3!}u(u+1)(u+2)\Delta^3 y_{-3} + \dots$$

При $t = t_0$ ($u = 0$) первая производная интерполяционного полинома Ньютона оценивается как [1]

$$\hat{y}' = \frac{1}{\Delta t} \left(\Delta y_{-1} + \frac{1}{2} \Delta^2 y_{-2} + \frac{1}{3} \Delta^3 y_{-3} + \frac{1}{4} \Delta^4 y_{-4} + \frac{1}{5} \Delta^5 y_{-5} + \dots + \frac{1}{k} \Delta^k y_{-k} + \dots \right). \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \Delta y_{-1} &= y_0 - y_{-1}; \\ \frac{1}{2} \Delta^2 y_{-2} &= \frac{1}{2} (y_0 - 2y_{-1} + y_{-2}); \\ \frac{1}{3} \Delta^3 y_{-3} &= \frac{1}{3} (y_0 - 3y_{-1} + 3y_{-2} - y_{-3}); \\ \frac{1}{4} \Delta^4 y_{-4} &= \frac{1}{4} (y_0 - 4y_{-1} + 6y_{-2} - 4y_{-3} + y_{-4}); \\ \frac{1}{5} \Delta^5 y_{-5} &= \frac{1}{5} (y_0 - 5y_{-1} + 10y_{-2} - 10y_{-3} + 5y_{-4} - y_{-5}); \\ \frac{1}{6} \Delta^6 y_{-6} &= \frac{1}{6} (y_0 - 6y_{-1} + 15y_{-2} - 20y_{-3} + 15y_{-4} - 6y_{-5} + y_{-6}) \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (2)$$

Ключевым понятием при исследовании систем в частотной области является частота среза на амплитудно-частотной характеристике разомкнутой системы, которая практически определяет полосу пропускания замкнутой системы. Именно в этой полосе частот необходимо обеспечить требуемую точность работы алгоритма численного дифференцирования [4]. Это обстоятельство приводит к необходимости введения понятия полосы пропускания алгоритма, т. е. такой области частот, где свойства алгоритма с определенной точностью воспроизводят свойства идеального дифференцирования. Речь идет об оценке верхней границы частоты в области низких частот, до которой частотные свойства идеального дифференцирующего звена и звена, реализующего операцию численного дифференцирования, совпадают с определенной точностью. Комплексный коэффициент передачи $W(j\omega)$ идеального дифференцирующего звена, его модуль $|W(j\omega)|$ и фаза $\varphi(\omega)$, как известно, имеют вид

$$W(j\omega) = K_d \cdot j\omega; |W(j\omega)| = K_d \omega, \varphi(\omega) = +\frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

где K_d — коэффициент передачи дифференцирующего звена.

Не нарушая общности, примем $K_d = 1$.

Для удобства термин "алгоритм численного дифференцирования" в дальнейшем заменим термином "дискретный дифференциатор".

Основными критериями выбора наилучшего дифференциатора, с точки зрения управления, можно считать следующие:

- точность дифференцирования в полосе пропускания алгоритма;
- максимальный коэффициент передачи за пределами полосы пропускания;
- простота реализации.

Большое значение имеет коэффициент передачи алгоритма численного дифференцирования (дискретного дифференциатора), определяемый частотными свойствами алгоритма в области высоких частот в сравнении с идеальным дифференцирова-

нием. Чем ближе дискретный дифференциатор по своим характеристикам в области высоких частот к характеристике идеального дифференциатора, тем сильнее он усиливает высокочастотные шумы. Этот фактор, очевидно, является нежелательным.

Проведем сравнительный анализ частотных свойств идеального дифференцирующего звена и звена, реализующего алгоритм численного дифференцирования на базе интерполяционного полинома Ньютона (1) с использованием логарифмических амплитудно-частотных (ЛАЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ). С помощью ЛАЧХ и ФЧХ можно оценить не только точность дифференцирования в полосе пропускания, но и установить влияние интервала дискретизации на точность оценки производной. Частотные характеристики вычисляются путем последовательного применения преобразований Лапласа и Фурье к алгоритму.

Рассмотрим дискретный дифференциатор с использованием первого слагаемого производной интерполяционного полинома Ньютона (2):

$$\hat{y}'[n\Delta t] = \frac{y[n\Delta t] - y[(n-1)\Delta t]}{\Delta t} = f[n\Delta t]. \quad (4)$$

Комплексный коэффициент усиления дискретного дифференциатора на базе алгоритма (4) будет иметь вид

$$W^*(j\omega\Delta t) = \frac{F^*(j\omega)}{Y^*(j\omega)} = \frac{(1 - e^{-j\omega\Delta t})}{\Delta t} = \frac{1 - \cos(\omega\Delta t) + j\sin(\omega\Delta t)}{\Delta t}. \quad (5)$$

Тогда модуль дискретного дифференциатора $|W^*(j\omega\Delta t)|$ на базе одного слагаемого от производной интерполяционного полинома Ньютона (далее для краткости будем писать: "на базе одного слагаемого") будет иметь вид

$$|W^*(j\omega\Delta t)| = \frac{1}{\Delta t} 2\sin \frac{\omega\Delta t}{2} \approx \omega \left(\text{для } \frac{\omega\Delta t}{2} \leq \frac{\pi}{6} \right).$$

Последнее условие позволяет оценить верхнюю границу частоты, до которой модуль частотной характеристики (ЧХ) оценки производной с определенной точностью совпадает с модулем ЧХ идеального дифференцирующего звена (3). Несколько усилив это условие, приходим к более простому соотношению:

$$\omega \leq \frac{1}{\Delta t}. \quad (6)$$

Фазочастотная характеристика (5), определяемая как

$$\varphi(\omega\Delta t) = \arctg\left(\frac{\sin\omega\Delta t}{1 - \cos\omega\Delta t}\right) = \arctg\left(\operatorname{ctg}\frac{\omega\Delta t}{2}\right),$$

будет близка к $+\frac{\pi}{2}$, если еще усилить условие (6):

$$\omega \leq \frac{0,1}{\Delta t}. \quad (7)$$

Количественные величины погрешностей в оценке значений модуля и фазы по отношению к характеристикам идеального дифференцирующего звена (3) для граничных условий (6) и (7) приводятся далее при расчетах ЛАЧХ и ФЧХ дискретных дифференциаторов с учетом разного числа слагаемых в полиноме (1).

Логарифмические ЧХ рассчитываются путем подстановки действительной и мнимой частей комплексного коэффициента усиления дискретного дифференциатора (5) в известные соотношения:

$$L(\omega) = 20\lg\left(\frac{\sqrt{(\operatorname{Re}(W^*(j\omega\Delta t)))^2 + (\operatorname{Im}(W^*(j\omega\Delta t)))^2}}{\Delta t}\right),$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{\operatorname{Im}(W^*(j\omega\Delta t))}{\operatorname{Re}(W^*(j\omega\Delta t))}\right).$$

Аналогично определяются ЧХ дискретных дифференциаторов на базе двух и более слагаемых производной интерполяционного полинома Ньютона. Соответствующие комплексные коэффициенты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Комплексные коэффициенты передачи дискретных дифференциаторов на базе полинома Ньютона с двумя и более слагаемыми

Число слагаемых	$W^*(j\omega)$
2	$\frac{3 - 4e^{-j\omega\Delta t} + e^{-2j\omega\Delta t}}{2\Delta t}$
3	$\frac{11 - 18e^{-j\omega\Delta t} + 9e^{-2j\omega\Delta t} - 2e^{-3j\omega\Delta t}}{6\Delta t}$
4	$\frac{25 - 48e^{-j\omega\Delta t} + 36e^{-2j\omega\Delta t} - 16e^{-3j\omega\Delta t} + 3e^{-4j\omega\Delta t}}{12\Delta t}$
5	$\frac{137 - 300e^{-j\omega\Delta t} + 300e^{-2j\omega\Delta t} - 200e^{-3j\omega\Delta t} + 75e^{-4j\omega\Delta t} - 12e^{-5j\omega\Delta t}}{60\Delta t}$
6	$\frac{147 - 360e^{-j\omega\Delta t} + 450e^{-2j\omega\Delta t} - 400e^{-3j\omega\Delta t} + 225e^{-4j\omega\Delta t} - 72e^{-5j\omega\Delta t} + 10e^{-6j\omega\Delta t}}{60\Delta t}$

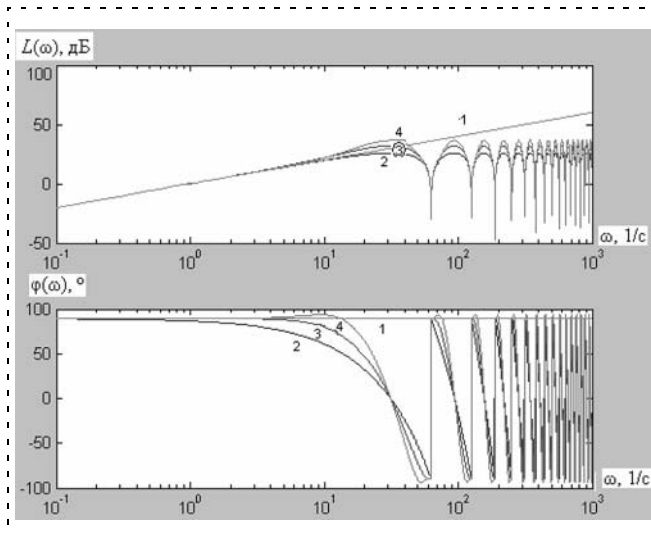


Рис. 1. ЛАЧХ и ФЧХ для дискретных дифференциаторов на базе одного, двух, трех слагаемых (кривые 2, 3 и 4 соответственно) для интервала дискретизации $\Delta t = 0,1$ с и ЛАЧХ и ФЧХ идеального дифференцирующего звена (кривые 1)

На рис. 1 представлены ЧХ дискретных дифференциаторов на базе алгоритмов с разным числом слагаемых при $\Delta t = 0,1$ с, а на рис. 2 показаны ЧХ дискретного дифференциатора на базе одного слагаемого при интервалах дискретизации $\Delta t = 0,1$ с и $\Delta t = 1$ с.

Анализ построенных ЧХ демонстрирует естественную их периодическую повторяемость в интервалах частот, задаваемых границами: $\omega_{гр} = n \frac{2\pi}{\Delta t}$, где $n = 1, 2, 3 \dots$ [6]. Эта же периодичность иллюстрируется годографами дифференциаторов, показанными на рис. 3, где отмечены характерные точки на годографах, соответствующие границам полосы пропускания $\omega = \frac{1}{\Delta t} n$ (анализируемая граница соответствует $n = 1$) и экстремумам ЛАЧХ $\omega = \frac{\pi}{\Delta t} n$. Следует

отметить, что с уменьшением шага дискретизации Δt растет коэффициент передачи на высоких частотах. Аналогичный эффект наблюдается у дискретных дифференциаторов с ростом числа слагаемых в алгоритме.

На рис. 4 и 5 представлены графические зависимости относительной погрешности по амплитуде и фазе по отношению к идеальному дифференциатору (3) на границе полосы пропускания $\omega_{гр} = \frac{1}{\Delta t}$ и для

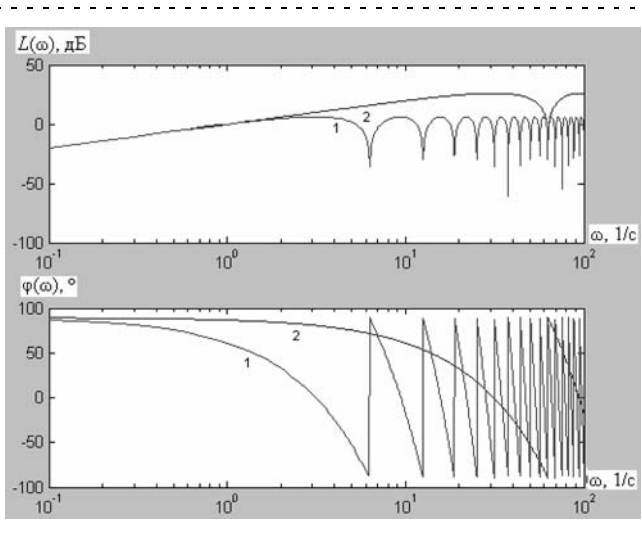


Рис. 2. ЛАЧХ и ФЧХ дискретного дифференциатора на базе одного слагаемого для интервала дискретизации: $\Delta t = 1$ с и $\Delta t = 0,1$ с (кривые 1 и 2)

границы (7) с более жестким ограничением $\omega_{гр} = \frac{0,1}{\Delta t}$.

Их анализ, а также годографы на рис. 3, позволяют сделать вывод о том, что дискретные дифференциаторы целей управления целесообразно базировать на не более чем трех слагаемых. При этом наибольшей погрешностью на границе полосы пропускания и минимальным усилением в области высоких частот обладает дифференциатор на базе одного слагаемого, а наоборот (наименьшей погрешностью и максимальным усилением) — дифференциатор на базе трех слагаемых.

Анализ представленных таблиц и графиков показывает, что простой (на базе одного слагаемого) дискретный дифференциатор с большим шагом Δt дает самые большие погрешности на границе своей

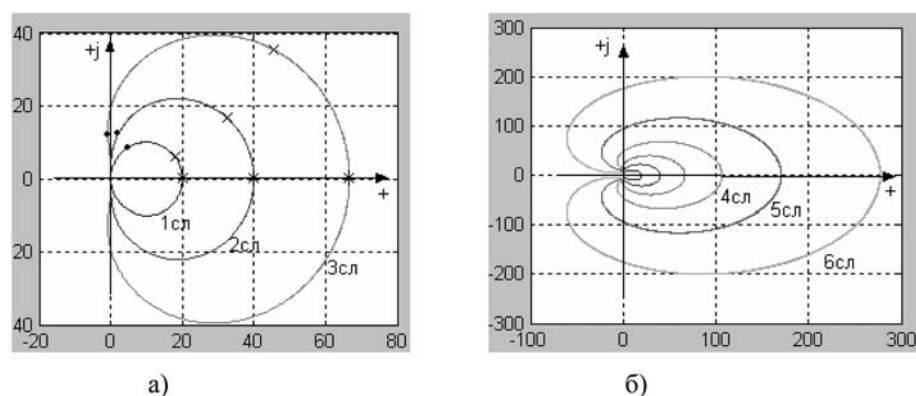


Рис. 3. Годографы дискретных дифференциаторов при $\Delta t = 0,1$ с: а — на базе одного, двух, трех слагаемых, б — на базе одного до шести слагаемых; метки на годографах соответствуют: "•" — $\omega = \frac{1}{\Delta t} n$; "×" — $\omega = \frac{2,5}{\Delta t} n$; "*" — $\omega = \frac{\pi}{\Delta t} n$

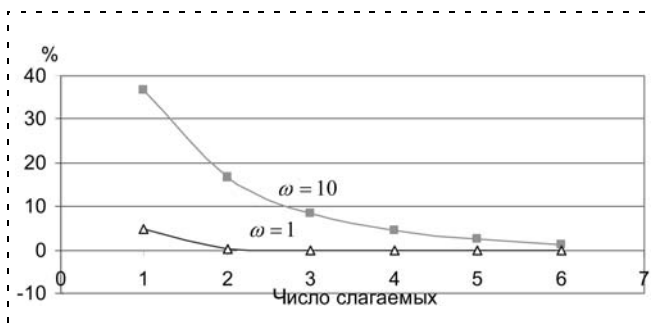


Рис. 4. Оценка погрешности по модулю

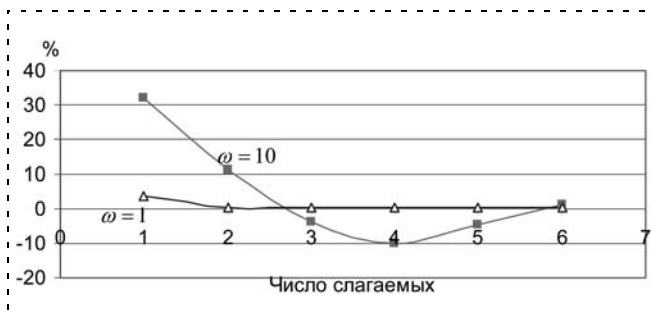


Рис. 5. Оценка погрешности по фазе

полосы пропускания. Уменьшение Δt приводит к усилению высокочастотных помех. Реализация более сложного алгоритма на базе двух или трех слагаемых позволяет повысить точность дифференцирования на границе полосы пропускания, однако поднимает усиление в области высоких частот. Дальнейшее увеличение числа слагаемых в базе дифференциатора нецелесообразно, так как приводит к усложнению алгоритма, но не дает существенного выигрыша в точности воспроизведения частотных свойств дискретного дифференциатора в рассматриваемой полосе частот.

Важным положительным свойством дискретного дифференцирования является то, что за пределами полосы пропускания максимальный коэффициент передачи фильтра ограничен. Для оценки свойств дискретных дифференциаторов в области высоких частот удобно сопоставить амплитудно-частотную характеристику дискретного дифференциатора с аналогичной характеристикой, которой обладает непрерывное реальное дифференцирующее звено с комплексным коэффициентом передачи:

$$W_H(j\omega) = \frac{j\omega}{(1 + T_H j\omega)}, \quad (8)$$

где T_H — эквивалентная постоянная времени непрерывного реального дифференцирующего звена.

Величина T_H находится из простых соотношений путем приравнивания коэффициента передачи звена (8) на частотах $\omega \rightarrow \infty$ и соответствующих

коэффициентов передачи дискретных дифференциаторов:

$$W^*(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega\Delta t}}{\Delta t},$$

$$W^*(j\omega) = \frac{3 - 4e^{-j\omega\Delta t} + e^{-2j\omega\Delta t}}{2\Delta t},$$

$$W^*(j\omega) = \frac{11 - 18e^{-j\omega\Delta t} + 9e^{-2j\omega\Delta t} - 2e^{-3j\omega\Delta t}}{6\Delta t}, \quad (9)$$

базирующихся на одном, двух или трех слагаемых, соответственно, на частотах экстремумов, для которых $\omega\Delta t = \pi$.

Эквивалентная постоянная времени непрерывного дифференцирующего звена определяется соотношением

$$T_H = \frac{\Delta t}{k}, \quad (10)$$

где $k = 2; 4; 6,667$ — соответствующие коэффициенты для дискретных дифференциаторов на базе одного, двух или трех слагаемых.

На рис. 6 в качестве примера показаны частотные характеристики дискретного дифференциатора (9) на базе двух слагаемых для $\Delta t = 1$ с и эквивалентного непрерывного дифференцирующего звена (8) с постоянной времени $T_H = 0,25$ с, рассчитанной с помощью (10).

Таким образом, непрерывный аналог дискретного алгоритма позволяет проводить оценку сверху коэффициента передачи дискретного дифферен-

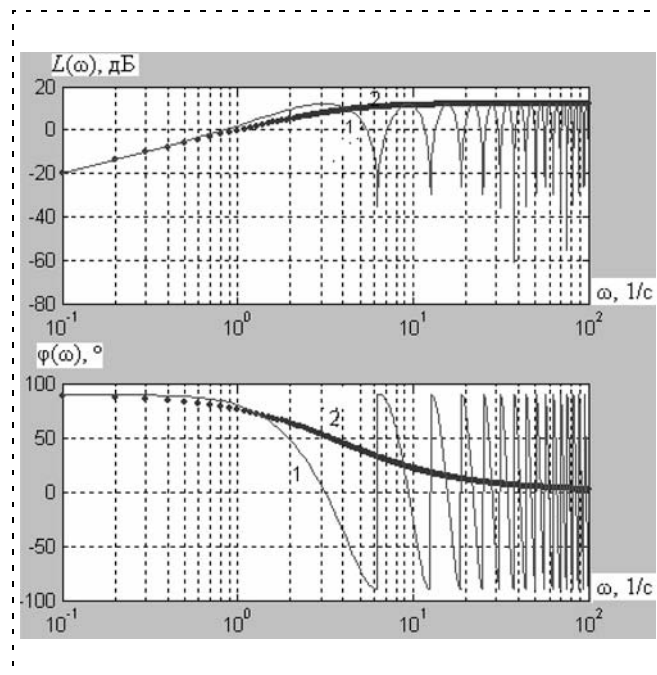


Рис. 6. Частотные характеристики дискретного дифференциатора на базе двух слагаемых для $\Delta t = 1$ с и эквивалентного непрерывного дифференцирующего звена с $T_H = 0,25$ с

Сравнительная оценка СКО случайных сигналов на входе и выходе аналогового и дискретных дифференциаторов

Шум	СКО входного сигнала	СКО на выходе непрерывного дифференциатора	СКО на выходе дискретного дифференциатора на базе одного слагаемого	СКО на выходе дискретного дифференциатора на базе двух слагаемых	СКО на выходе дискретного дифференциатора на базе трех слагаемых
Случайный сигнал с нормальным распределением	0,98	1,99 3,79 6,48	1,249	2,29	3,39
Белый шум	3,32	6,39 12,15 19,06	4,18	7,34	10,72
Случайный сигнал с равномерным распределением	1,81	3,51 6,52 11,50	2,286	4,47	5,00

циатора в области высоких частот, определяя в значительной степени возможное зашумление тракта передачи сигнала после управляющего устройства.

В связи с ростом быстродействия современных микропроцессорных управляющих устройств частотные свойства реализуемых на их базе алгоритмов управления практически не отличаются от непрерывных алгоритмов из-за высокой частоты дискретизации. В силу этого обстоятельства, например, дифференцирующую составляющую для ПИД-регулятора необходимо воспроизводить близкой по частотным свойствам к непрерывному дифференциатору вида (8).

Вместе с тем, прохождение шумовых составляющих с известными спектральными свойствами показывает, что наибольшее подчеркивание высоких частот выполняют непрерывные аналоги дискретных дифференциаторов. Усиление высоких частот дискретными дифференциаторами тем меньше, чем больше шаг дискретизации и меньше число слагаемых в алгоритме. Минимальное усиление происходит при одном слагаемом и максимально допустимом шаге дискретизации.

Важным положительным свойством дискретных дифференциаторов является то, что за пределами полосы пропускания в окрестности частот $\omega = \frac{2\pi}{\Delta t}$ коэффициент передачи существенно понижается, что также позволяет уменьшить влияния помех [6]. В связи с этим, при реализации дискретного дифференциатора целесообразно взять Δt по возможности большим. В табл. 2 дается сравни-

тельная оценка среднеквадратичного отклонения (СКО) случайных сигналов на входе и выходе аналогового и дискретных дифференциаторов ($\Delta t = 1$ с;

$T_H = \frac{1}{k}$), которая иллюстрирует лучшие свойства

дискретных дифференциаторов в области высоких частот по сравнению с непрерывным аналогом.

Таким образом, реализация дискретных дифференциаторов на базе одного, двух или трех слагаемых производной интерполяционного полинома Ньютона с максимально допустимым шагом дискретизации обеспечивает требуемую точность дифференцирования в полосе пропускания для нижних частот и минимальное усиление вне полосы пропускания (в сравнении с аналогом непрерывного дифференциатора).

Список литературы

1. **Анго А.** Математика для электро- и радиоинженеров. Пер. с французского под общей ред. К. С. Шифрина, 2-е изд. М.: Наука. Гл. физ.-мат. лит., 1967. 627 с.
2. **Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 487 с.
3. **Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В.** Вычислительные методы для инженеров: Учебное пособие. 2-е изд. М.: Издательство МЭИ, 2003. 396 с.
4. **Колосов О. С., Подольская И. Е., Кульмаилов С. А., Фон Чжаньлинь.** Алгоритмы численного дифференцирования в задачах управления. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 144 с.
5. **Теория автоматического управления** / Под ред. А. В. Нетушила: Учеб. для вузов. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 1976. 420 с.
6. **Колосов О. С., Кошова Б.** Выбор шага дискретизации в цифровых алгоритмах управления с дифференцированием // Матер. 6-й науч. конф. "Управление и информационные технологии" (УИТ-2010). СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", 2010. С. 210–214.

А. А. Бобцов¹,д-р техн. наук, проф., зав. каф., декан,
bobtsov@mail.ru,**Д. В. Ефимов²,** д-р техн. наук, науч. сотр.,**А. А. Пыркин¹,** канд. техн. наук, ассистент,**А. Золгадри²,** PhD, зав. лаб.,¹ Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики,² Университет Бордо 1, г. Таланс, Франция

Алгоритм адаптивного оценивания частоты смещенного синусоидального сигнала с аддитивной нерегулярной составляющей¹

Обсуждается разработка алгоритма адаптивного оценивания частоты сигнала, представляющего собой сумму полезной постоянной и синусоидальной функций времени и вредной высокочастотной нерегулярной составляющей, обусловленной, например, ошибками измерительных устройств. Рассматривается алгоритм адаптивной идентификации частоты, позволяющий повысить точность оценки искомого параметра.

Ключевые слова: идентификация, адаптация, качество процессов сходимости

Введение

Существует большое число подходов, посвященных идентификации параметров синусоидального сигнала (см., например, [1–16]). Некоторые из этих подходов легко могут быть распространены для идентификации параметров смещенного синусоидального сигнала [6, 10, 11], а также мультигармонических функций [3, 4, 5, 7, 14]. Несмотря на большое число полученных методов и алгоритмов идентификации параметров синусоидальных сигналов в условиях шумов, проблема оценивания частоты с наилучшей точностью и быстродействием остается актуальной и на сегодняшний день. Точность оценки и время сходимости — это наиболее важные характеристики адаптивного алгоритма при практическом внедрении. В данной статье обсуждаются вопросы увеличения быстродействия и точности алгоритма идентификатора частоты. Подход основывается на идеях, представленных в работах [12, 15, 16]. По сравнению с близким результатом работы [12] в данной статье предлагается более простой алгоритм оценивания частоты в смысле меньшего числа необходимых вычислений.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-08-00139-а).

Также важно, что предлагаемый подход позволяет обеспечить конечное время сходимости оценки частоты с заданной точностью. Показано, что время переходного процесса и точность оценки определяются параметрами алгоритма идентификации. В статье обсуждается возможная схема адаптации, связанная с переключением параметров в целях получения более точной оценки за меньшее время.

В первом разделе представлена постановка задачи. Во втором разделе представлен алгоритм оценивания частоты смещенного синусоидального сигнала без учета аддитивных помех. Затем анализируется случай наличия нерегулярной составляющей в канале измерения. В четвертом разделе предложен алгоритм адаптивной схемы оценивания частоты измеряемого сигнала, подверженного действию вредной высокочастотной нерегулярной составляющей. Для иллюстрации эффективности такого подхода рассмотрен ряд примеров численного моделирования.

1. Постановка задачи

Рассмотрим сигнал вида

$$y(t) = \sigma + \mu \sin(\omega t + \phi) + \delta(t), \quad (1)$$

где ω , σ , μ и ϕ — соответственно, частота, смещение (или постоянная составляющая полезного сигнала), амплитуда и начальная фаза полезной синусоидальной составляющей; $\delta(t)$ — ограниченная высокочастотная нерегулярная составляющая (шум измерения).

Рассмотрим следующие допущения относительно сигнала (1).

Допущение 1. Нижние границы частоты ω_0 и амплитуды μ_0 сигнала (1) известны: $\omega \geq \omega_0$ и $\mu \geq \mu_0$.

Допущение 2. Амплитуда полезного сигнала больше, чем наибольшее значение нерегулярной составляющей: $\mu > \sup_{\forall t \geq 0} |\delta(t)|$.

Допущение 3. Функция $\delta(t)$ — гладкая.

Целью является синтез алгоритма оценивания частоты ω , обладающего наилучшими быстродействием и точностью:

$$|\tilde{\omega}(t)| \leq \Delta, \quad \forall t \geq t_0, \quad (2)$$

где $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$; $\hat{\omega}$ — оценка параметра ω ; Δ — желаемое значение ошибки оценивания частоты; t_0 — время переходного процесса.

2. Синтез алгоритма оценивания

Синтез алгоритма оценивания будем осуществлять в два этапа. Сначала рассмотрим задачу идентификации частоты смещенного синусоидального сигнала без влияния ограниченной высокочастотной нерегулярной составляющей, т. е. при $\delta = 0$. Далее проанализируем работу алгоритма при наличии нерегулярной составляющей.

2.1. Смещенный синусоидальный сигнал

Следуя результатам, опубликованным в работах [14, 15], рассмотрим линейный фильтр второго порядка

$$\xi(s) = \frac{\lambda_0^2}{\gamma(s)} y(s), \quad (3)$$

где s — оператор Лапласа, $\lambda_0 > 0$ — положительный параметр, $\gamma(s) = s^2 + \gamma_1 s + \gamma_0$ — гурвицев полином с различными собственными числами λ_1 и λ_2 .

Пусть $\gamma_0 = \lambda_0^2$ и $l = \min_{i=1,2} \{|\operatorname{Re} \lambda_i|\}$.

Лемма 1. Для фильтра (3) и входного сигнала вида

$$y(t) = \sigma + \mu \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

справедливо соотношение

$$\ddot{\xi}(t) = \theta \dot{\xi} + \varepsilon(t), \quad (5)$$

где функции $\ddot{\xi}(t)$ и $\dot{\xi}(t)$ — соответствующие производные выходного сигнала фильтра (3):

$$\ddot{\xi}(s) = \frac{\lambda_0^2 s^3}{\gamma(s)} y(s), \quad \dot{\xi}(s) = \frac{\lambda_0^2 s}{\gamma(s)} y(s), \quad (6)$$

$\theta = -\omega^2$, переменная $|\varepsilon(t)| \leq \rho_0 e^{-\lambda t}$, $\rho_0 > 0$, и ее производные ограничены экспоненциально затухающими функциями времени.

Доказательство леммы 1. Хорошо известно (см., например, работу [9]), что для генерирования сигнала (4) можно использовать систему вида

$$\ddot{y}(t) + \omega^2 \dot{y}(t) = 0. \quad (7)$$

После преобразования Лапласа для (7) имеем

$$s^3 y(s) = \theta s y(s) + D(s), \quad (8)$$

где $D(s)$ соответствует начальным условиям. Умножение обеих частей уравнения (8) на выражение $\frac{\lambda_0^2}{\gamma(s)}$ дает

$$s^3 \frac{\lambda_0^2}{\gamma(s)} y(s) = \theta s \frac{\lambda_0^2}{\gamma(s)} y(s) + \frac{\lambda_0^2}{\gamma(s)} D(s) \quad (9)$$

или

$$s^3 \xi(s) = \theta s \xi(s) + \frac{\lambda_0^2}{\gamma(s)} D(s). \quad (10)$$

После обратного преобразования Лапласа для (10)

получим равенство (5), где $\varepsilon(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\lambda_0^2 D(s)}{\gamma(s)} \right\}$. В силу гурвицевости полинома $\gamma(s)$ переменная $\varepsilon(t)$ и ее производные ограничены экспоненциально затухающими функциями времени, что и требовалось доказать.

Следуя работе [16], представим адаптивную схему оценивания частоты сигнала (4) в виде следующей теоремы.

Теорема 1. Пусть алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала (4) имеет вид

$$\hat{\omega}(t) = \sqrt{|\hat{\theta}(t)|}, \quad (11)$$

$$\hat{\theta}(t) = \chi(t) + k \dot{\xi}(t) \ddot{\xi}(t), \quad (12)$$

$$\dot{\chi}(t) = -k \dot{\xi}^2(t) \hat{\theta}(t) - k \ddot{\xi}^2(t), \quad (13)$$

где $k > 0$ — положительный параметр.

Тогда существуют такие $\rho_1, \beta_1 > 0$, что

$$|\hat{\omega}(t)| \leq \rho_1 e^{-\beta_1 t}, \quad \forall t \geq 0. \quad (14)$$

Доказательство теоремы 1. С учетом леммы 1 рассмотрим производную переменной $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\theta}} &= \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}} = -\dot{\chi}(t) - k \ddot{\xi}^2(t) - k \dot{\xi}(t) \ddot{\xi}(t) = \\ &= k \dot{\xi}^2(t) \hat{\theta}(t) + k \ddot{\xi}^2(t) - k \ddot{\xi}^2(t) - k \dot{\xi}(t) \ddot{\xi}(t) = \\ &= k \dot{\xi}^2(t) \hat{\theta}(t) - k \dot{\xi}^2(t) \theta - k \dot{\xi}^2(t) \varepsilon(t) = \\ &= -k \dot{\xi}^2(t) \tilde{\theta}(t) - k \dot{\xi}(t) \varepsilon(t). \end{aligned} \quad (15)$$

Рассмотрим функцию Ляпунова

$$V(t) = \frac{1}{2} f(t) \tilde{\theta}^2(t), \quad (16)$$

где $f(t)$ — положительная функция, ограниченная сверху и снизу, которая будет определена далее при анализе. Дифференцируя (16), имеем

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \frac{1}{2} \dot{f}(t) \tilde{\theta}^2(t) + f(t) \tilde{\theta}(t) \dot{\tilde{\theta}}(t) = \\ &= \frac{1}{2} \dot{f}(t) \tilde{\theta}^2(t) - k f(t) \dot{\xi}^2(t) \tilde{\theta}^2(t) - k f(t) \dot{\xi}(t) \tilde{\theta}(t) \varepsilon(t) \leq \\ &\leq \frac{1}{2} \dot{f}(t) \tilde{\theta}^2(t) - k f(t) \dot{\xi}^2(t) \tilde{\theta}(t) + \\ &+ \frac{1}{2} k f(t) (\dot{\xi}^2(t) \tilde{\theta}^2(t) + \varepsilon^2(t)) = \\ &= \frac{1}{2} \dot{f}(t) \tilde{\theta}^2(t) - \frac{1}{2} k f(t) \dot{\xi}^2(t) \tilde{\theta}^2(t) + \frac{1}{2} k f(t) \varepsilon^2(t). \end{aligned} \quad (17)$$

Так как полином $\gamma(s)$ — Гурвицев, то для входного сигнала (4) выходная переменная фильтра (3) имеет вид

$$\xi(t) = \sigma_1 + \mu_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \varepsilon_\xi(t), \quad (18)$$

где σ_1 — смещение, μ_1 — амплитуда, ϕ_1 — фазовый сдвиг, $\varepsilon_\xi(t)$ — экспоненциально затухающая функция с экспоненциально затухающими производными.

Из (18) получим

$$\dot{\xi}(t) = \mu_1 \omega \cos(\omega t + \phi_1) + \varepsilon_1(t), \quad (19)$$

где $\varepsilon_1(t) = \dot{\varepsilon}_\xi(t)$ — экспоненциально затухающая функция времени. Отсюда

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_\xi(t) &= \mu_1^2 \omega^2 \cos^2(\omega t + \phi_1) + \\ &+ 2\mu_1 \omega \cos(\omega t + \phi_1) \varepsilon_1(t) + \varepsilon_1^2(t) = \\ &= \frac{1}{2} \mu_1^2 \omega^2 (1 + \cos(2\omega t + 2\phi_1)) + \\ &+ 2\mu_1 \omega \cos(\omega t + \phi_1) \varepsilon_1(t) + \varepsilon_1^2(t). \end{aligned} \quad (20)$$

Подставляя (20) в (17), имеем

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \frac{1}{2} \dot{f}(t) \tilde{\theta}^2(t) - \frac{1}{2} k \mu_1^2 \omega^2 \frac{1}{2} f(t) \tilde{\theta}^2(t) + \\ &+ \frac{1}{2} k f(t) \varepsilon_1^2(t) - \frac{1}{2} k f(t) \tilde{\theta}^2(t) \left(\frac{1}{2} \mu_1^2 \omega^2 \cos(2\omega t + 2\phi_1) + \right. \\ &\left. + 2\mu_1 \omega \cos(\omega t + \phi_1) \varepsilon_1(t) + \varepsilon_1^2(t) \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Выберем функцию $f(t)$ так, что

$$\begin{aligned} \dot{f}(t) &= k f(t) \left(\frac{1}{2} \mu_1^2 \omega^2 \cos(2\omega t + 2\phi_1) + \right. \\ &\left. + 2\mu_1 \omega \cos(\omega t + \phi_1) \varepsilon_1(t) + \varepsilon_1^2(t) \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Достаточно воспользоваться частным решением (22) в виде

$$f(t) = e^{g(t)}, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} g(t) &= k \int_0^t \left(\frac{1}{2} \mu_1^2 \omega^2 \cos(2\omega \tau + 2\phi_1) + \right. \\ &\left. + 2\mu_1 \omega \cos(\omega \tau + \phi_1) \varepsilon_1(\tau) + \varepsilon_1^2(\tau) \right) d\tau. \end{aligned} \quad (24)$$

Так как функция $g(t)$ зависит от ограниченных синусоидальной и экспоненциальной составляющих, то она ограничена $|g(t)| \leq C_1 < \infty$. Отсюда нетрудно получить границы $f(t)$ в виде $e^{-C_1} \leq f(t) \leq e^{C_1}$. Следовательно, функция Ляпунова (16) определена.

Подстановка (22) в (21) дает

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\frac{1}{2} k \mu_1^2 \omega^2 \frac{1}{2} (t) \tilde{\theta}^2(t) + \frac{1}{2} k f(t) \varepsilon_1^2(t) \leq \\ &\leq -C_2 V(t) + \rho_2 e^{-\beta_2 t}, \end{aligned} \quad (25)$$

где $C_2 = \frac{1}{2} k \mu_1^2 \omega^2$, $\rho_2 = \frac{1}{2} k e^{C_1} \rho_0^2$, $\beta_2 = 2\lambda$.

Используя Лемму сравнения [16, 17] для (25), получим

$$V(t) \leq V(0) e^{-C_2 t} + \rho_2 e^{-C_2 t} \int_0^t e^{(C_2 - \beta_2)\tau} d\tau, \quad (26)$$

откуда имеем

$$V(t) \leq \rho_3 e^{-\beta_3 t}, \quad (27)$$

где $\rho_3 > 0$ и $\beta_3 = \min\{\beta_2; C_2\}$. Заметим, что при вычислении интеграла в (26) мы учли возможность равенства $\beta_2 = C_2$. В этом случае можно выбрать β_2 из условия $0 < \beta_2 < C_2$, не нарушив экспоненциально затухающего вида функции $\varepsilon_1^2(t)$.

Из (16) и (27) получим

$$\tilde{\theta}(t) \leq \sqrt{\frac{2}{e^{-C_1}}} \sqrt{V(t)} \leq \sqrt{\frac{2\rho_3}{e^{-C_1}}} e^{-\frac{1}{2}\beta_3 t}. \quad (28)$$

На основе неравенства (28) получим выражение для ошибки оценивания частоты в виде (14), где

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{2\rho_3}{e^{-C_1}}} \text{ и } \beta_1 = \frac{1}{4} \beta_3. \text{ Теорема 1 доказана.}$$

Замечание. Из (27) следует, что время переходного процесса для переменной $V(t)$ явно зависит от числа β_3 , которое, в свою очередь, является функцией параметров k и λ . Увеличение параметров k и λ приведет к тому, что функция Ляпунова быстрее будет сходиться к нулю. Соответственно, оценка частоты $\hat{\omega}$ будет стремиться к истинному значению ω быстрее.

Пример 1. Рассмотрим алгоритм идентификации (11)–(13) при $\delta(t) = 0$. Пусть фильтр (3) имеет вид

$$\xi(s) = \frac{2\lambda^2}{s^2 + 3\lambda s + 2\lambda^2} y(s),$$

где характеристический полином имеет корни $\lambda_1 = -\lambda$ и $\lambda_2 = -2\lambda$.

На рис. 1 показаны временные диаграммы оценивания частоты для различных параметров k , λ и сигнала $y(t) = 3 + 4\sin(2t + 1)$.

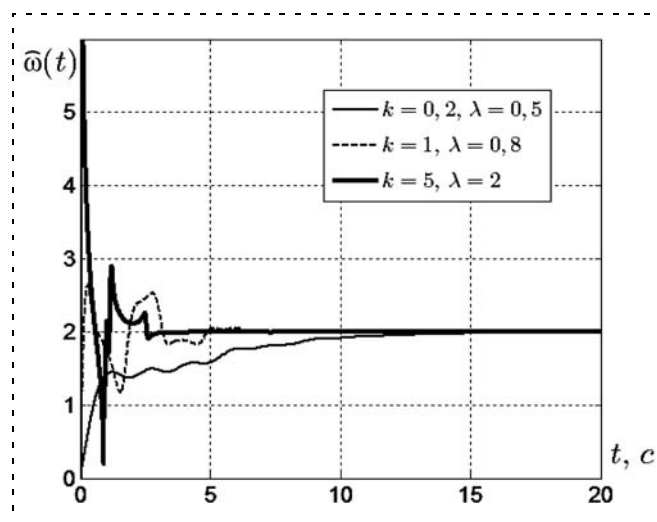


Рис. 1. Оценивание частоты $\omega = 2$

Из графиков видно, что увеличение параметров k и λ ведет к увеличению быстродействия параметрической сходимости.

2.2. Периодический сигнал с аддитивной высокочастотной нерегулярной составляющей

В этом разделе рассмотрим сигнал $y(t)$, содержащий высокочастотную нерегулярную составляющую. Воспользуемся следующей моделью, выходной переменной которой является сигнал $y(t)$:

$$\ddot{y}(t) + \omega^2 \dot{y}(t) = \delta_0(t), \quad (29)$$

где $\delta_0(t) = \ddot{\delta}(t) + \omega^2 \dot{\delta}(t)$ — высокочастотный входной сигнал. Для модели (29) и фильтра (3) выражение (5) примет вид

$$\ddot{\xi}(t) = \theta \dot{\xi}(t) + \varepsilon(t) + \delta_\xi(t), \quad (30)$$

где $\delta_\xi(t) = \frac{\lambda_0^2}{\gamma(p)} \delta_0(t)$ и $p = d/dt$ — оператор дифференцирования. Анализируя алгоритм оценивания частоты (11)—(13) и функцию Ляпунова (16) с учетом (1), (3) и (30), легко показать, что выражения (25) и (27) примут вид

$$\dot{V}(t) \leq -\beta_3 V(t) + k \delta_V(t), \quad (31)$$

где нерегулярная составляющая $\delta_V(t)$ обусловлена членами $\delta_\xi(t)$, $\varepsilon(t)$ и функцией β_3 , явно зависящей от параметров k и λ , как показано в (27). Тогда неравенство (14) будет выглядеть следующим образом:

$$|\tilde{\omega}(t)| \leq \rho_1 e^{-\beta_1 t} + C_\omega, \quad (32)$$

где C_ω — положительная константа, зависящая от амплитуды нерегулярной составляющей $\delta(t)$ в сигнале $y(t)$.

Пример 2. Рассмотрим алгоритм идентификации (11)—(13) для случая $\delta(t) \neq 0$. На рис. 2 пред-

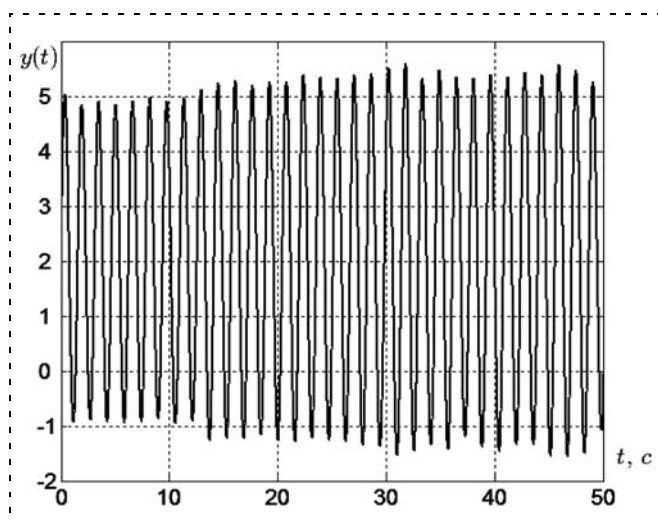


Рис. 2. Сигнал $y(t) = 2 + 3\sin(4t) + \delta(t)$

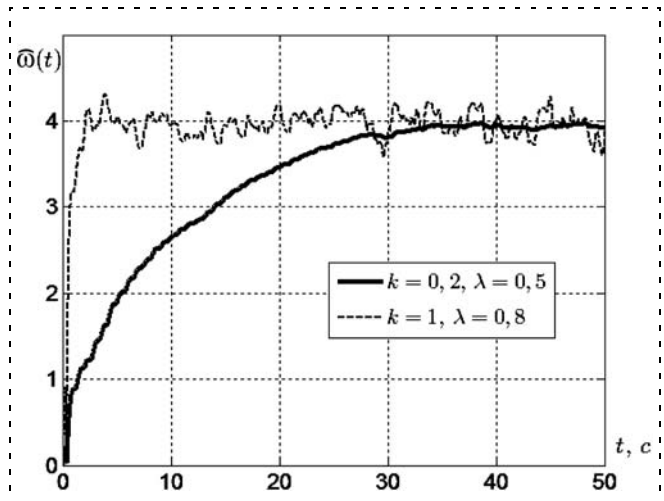


Рис. 3. Оценка частоты $\hat{\omega}$ для различных k и λ

ставлен сигнал $y(t) = 2 + 3\sin(4t) + \delta(t)$, где $\delta(t)$ — ограниченная составляющая, а на рис. 3 — результат оценивания частоты при различных параметрах k и λ . Из результатов компьютерного моделирования видно, что при увеличении коэффициентов k и λ точность оценивания ухудшается, хотя быстродействие увеличивается. В то же время, уменьшение коэффициентов k и λ дает лучшую точность оценивания, но процессы становятся более медленными. Таким образом, возникает задача выбора указанных коэффициентов для достижения наилучших быстродействия и точности, чему и будет посвящен следующий раздел.

3. Адаптивный алгоритм оценивания частоты

В этом разделе проанализируем влияние параметров k и λ алгоритма идентификации (11) — (13) на качество оценки частоты $\hat{\omega}$. Затем будет представлена схема адаптации параметров k и λ к улучшению упомянутых показателей качества. Суть данной адаптации k и λ заключается в следующем: сначала параметры выбираются достаточно большими, чтобы быстро получить предварительную оценку частоты $\hat{\omega}$, а затем k и λ следует постепенно уменьшать для улучшения точностных показателей алгоритма идентификации. Данный подход работает в случае, когда частотный спектр сигнала $\delta(t)$ выше, чем полезная составляющая $\sigma + \mu\sin(\omega t + \phi)$. Данное обоснование можно сделать на базе следующих рассуждений.

Рассмотрим вспомогательную систему вида

$$\dot{x}(t) = -\beta_3 x(t) + k \delta_V(t). \quad (33)$$

Перепишем (33) в виде

$$x(t) = W(p) \delta_V(t) = \frac{k}{p + \beta_3} \delta_V(t), \quad (34)$$

где $p = d/dt$.

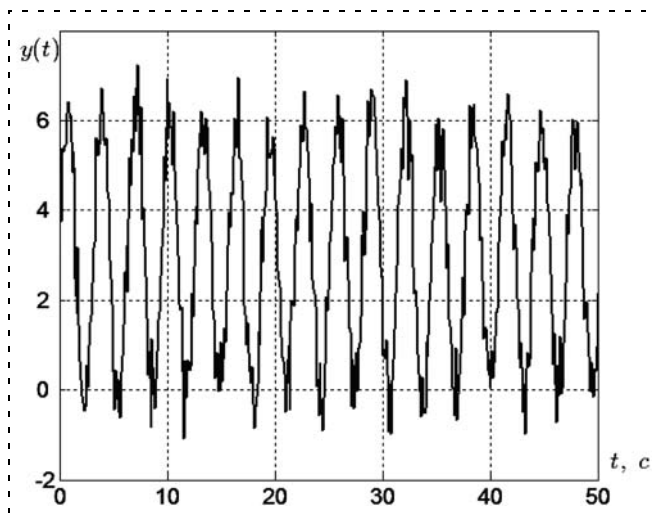


Рис. 4. Сигнал $y(t) = 3 + 3\sin(2t) + \delta(t)$

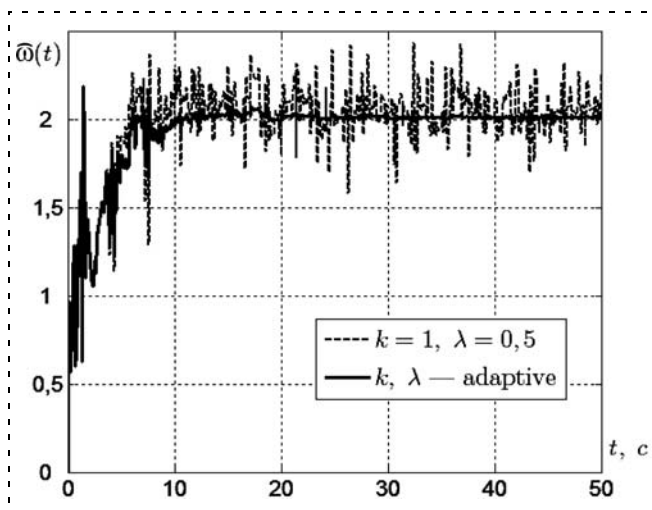


Рис. 5. Оценка частоты $\hat{\omega}$ для различных k и λ

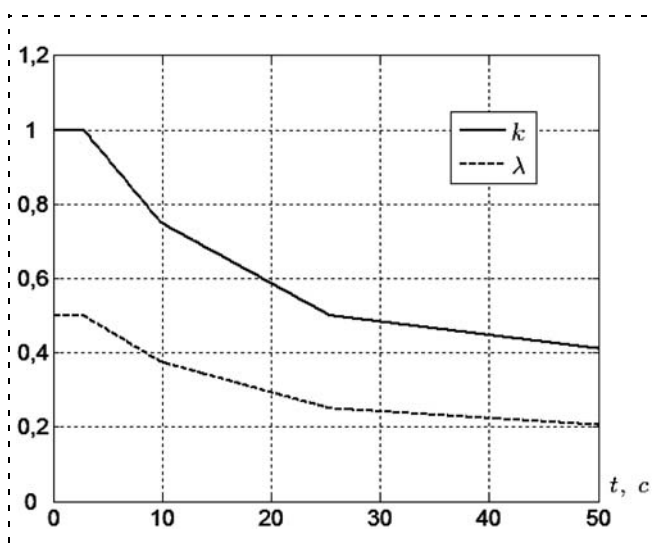


Рис. 6. Адаптация параметров k и λ

Легко показать, что система (33), (34) с передаточной функцией $W(p)$ представляет собой фильтр нижних частот с полосой пропускания, зависящей от параметра β_3 . Очевидно, что чем меньше β_3 , тем лучше парируется влияние высокочастотных составляющих и, в том числе, происходит уменьшение влияния функции $\delta_V(t)$ на функцию $x(t)$. Иными словами, чем меньше параметр β_3 , тем меньше значения амплитуды переменной $x(t)$. Используя теорему сравнения [17], получаем, что $V(t) \leq |x(t)|$, а следовательно, асимптотическая амплитуда функции $V(t) = \frac{1}{2}f(t)\tilde{\theta}^2(t)$ будет уменьшаться с уменьшением параметра β_3 . Уменьшение значения $V(t) = \frac{1}{2}f(t)\tilde{\theta}^2(t)$

влечет увеличение точности оценки искомого параметра ω .

Итак, в силу представленных рассуждений еще раз сформулируем основную стратегию адаптивного алгоритма.

Шаг 1. Выбираем параметры k и λ достаточно большими и быстро получаем предварительную оценку частоты $\hat{\omega}$.

Шаг 2. Начинаем постепенно уменьшать параметры k и λ и тем самым улучшать точность оценки частоты ω .

Для иллюстрации работоспособности данного алгоритма адаптации рассмотрим следующий числовой пример.

Пример 3. Рассмотрим алгоритм идентификации (11) – (13) с адаптацией параметров k и λ для случая $\delta(t) \neq 0$. На рис. 4 представлен сигнал $y(t) = 3 + 3\sin(2t) + \delta(t)$. На рис. 5 представлены результаты оценивания частоты сигнала $y(t)$ при фиксированных параметрах алгоритма $k = 1, \lambda = 0,5$ и адаптивно изменяющихся. Правило, по которому задаются значения параметров k и λ , представлено в виде временной диаграммы на рис. 6. Под адаптацией параметров k и λ подразумевается плавное монотонное уменьшение их значений.

Заключение

В данной статье предложен алгоритм оценивания неизвестной частоты смещенного синусоидального сигнала с высокочастотным шумом в канале измерения. Проведен анализ оценок скорости сходимости алгоритма адаптации и точности оценивания частоты. Определены параметры, влияющие на скорость и точность оценивания. Представлен алгоритм адаптации параметров алгоритма идентификации в целях улучшения асимптотической точности оценивания. Вопрос плавности и скорости уменьшения параметров алгоритма идентификации на данный момент авторы оставляют открытым и планируют его рассмотреть в последующих работах.

Список литературы

1. Hsu L., Ortega R., Damm G. A globally convergent frequency estimator // IEEE Transactions on Automatic Control. 1999. Vol. 46. P. 967–972.
2. Mojiri M., Bakhshai A. R. An Adaptive Notch Filter for Frequency Estimation of a Periodic Signal // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. V. 49. P. 314–318.
3. Marino R., Tomei R. Global Estimation of Unknown Frequencies // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. V. 47. P. 1324–1328.
4. Xia X. Global Frequency Estimation Using Adaptive Identifiers // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. V. 47. P. 1188–1193.
5. Obregon-Pulido G., Castillo-Toledo B., Loukianov A. A. Globally Convergent Estimator for n-Frequencies // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. V. 47. P. 857–863.
6. Бобцов А. А., Кремлев А. С. Адаптивная идентификация частоты смещенного синусоидального сигнала // Известия вузов. Приборостроение. 2005. № 4. С. 22–26.
7. Бобцов А. А., Колюбин С. А., Пыркин А. А. Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 11. С. 136–148.
8. Hou M. Amplitude and frequency estimator of a sinusoid // IEEE Transactions on Automatic Control. 2005. V. 50. P. 855–858.
9. Арановский С. В., Бобцов А. А., Кремлев А. С., Лукьянова Г. В. Робастный алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2007. № 3. С. 1–6.
10. Арановский С. В., Бобцов А. А., Кремлев А. С., Лукьянова Г. В., Николаев Н. А. Идентификация частоты смещенного синусоидального сигнала // АиТ. 2008. № 9. С. 3–9.
11. Bobtsov A. New approach to the problem of globally convergent frequency estimator // Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2008. № 3. P. 306–317.
12. Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. 2010. № 2.
13. Damm G., Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Discussion on: "Identification of frequency of biased harmonic signal" // European Journal of Control. 2010. № 2. P. 140–143.
14. Бобцов А. А., Николаев Н. А., Слита О. В. Новая схема идентификации частоты синусоидального сигнала // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 11. С. 2–4.
15. Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M. Rejection of Sinusoidal Disturbance of Unknown Frequency for Linear System with Input Delay. American Control Conference. Baltimore, USA, 2010. P. 5688–5693.
16. Пыркин А. А. Адаптивный алгоритм компенсации параметрически неопределенного смещенного гармонического возмущения для линейного объекта с запаздыванием в канале управления // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 8. С. 62–78.
17. Khalil H. Nonlinear Systems, third edition, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ

16–19 апреля 2012 г. в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

3-я Российская конференция с международным участием

"Технические и программные средства управления, контроля и измерения" (УКИ-12)

Тематические направления

- Теория, методы исследования и проектирования, опыт применения технических средств, основанных на различных физических и схемотехнических принципах.
- Теория, алгоритмы и программное обеспечение систем УКИ.
- Анализ состояния, тенденций и перспектив развития систем УКИ.
- Дискретно-событийные модели в системах УКИ, включая сетцентрические, логические, на основе нечеткой логики, сети Петри и др.
- Создание средств систем УКИ на основе новых современных технологий.
- Компьютерное и физическое моделирование технических и программных средств систем УКИ.
- Многопроцессорные и многомашинные системы как средства систем УКИ; их архитектуры, надежность, отказоустойчивость, диагностируемость.
- Теоретические и прикладные аспекты оценивания и повышения качества средств систем УКИ, метрологическое обеспечение создания и применения средств УКИ, их испытания и сертификация.
- Методы проектирования технических и программных средств систем УКИ для работы в экстремальных условиях и применения в специфических областях.
- Особенности построения технических и программных средств встроенных, сетевых систем УКИ. Вопросы обучения в области средств систем УКИ.

Подробную информацию о конференции
см. на сайте: <http://cmm.ipu.ru>

УДК 004.896

И. М. Макаров, акад. РАН, зав. каф.,
В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф.,
С. В. Манько, д-р техн. наук, проф.,
М. П. Романов, д-р техн. наук, проф.,
Е. Н. Крючков, инженер,
Р. В. Кучерский, аспирант,
С. А. Диане, студент,
cpd@mirea.ru,
МГТУ МИРЭА

Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения

Рассматриваются примеры и перспективы применения мультиагентных робототехнических систем различных типов и назначения.

Ключевые слова: мультиагентная робототехническая система, интеллектуальный автономный робот, групповое управление роботами

Введение. Ретроспективный взгляд на историю современной робототехники позволяет выделить основные этапы ее поступательного развития, связанные с появлением принципиально новых типов устройств и систем, наращивание функциональных возможностей которых от поколения к поколению определяется существенным усложнением решаемых прикладных задач, а также расширением областей применения: от жестко программируемых манипуляторов для загрузки станков и оборудования (60-е гг. XX в.), до адаптивных манипуляционных и мобильных роботов для автоматизации сложных технологических процессов в различных отраслях промышленного производства (70—80-е гг. XX в.) и, наконец, интеллектуальных робототехнических систем военного, специального и бытового назначения, ориентированных на работу в условиях неопределенности в полуавтоматическом и автономном режимах (90-е гг. XX — начало XXI в.). При этом разработка дистанционно-управляемых робототехнических систем представляет собой в некотором смысле самостоятельное направление, которое в тесной интеграции с остальными также активно развивается с начала 60-х годов XX в.

Следует отметить, что в настоящее время принципы построения интеллектуальных робототехни-

ческих систем находятся в стадии активного формирования и экспериментальной проверки. Несмотря на то, что эта проблема еще далека от своего окончательного разрешения, на повестку дня уже сейчас выносятся вопросы о создании мультиагентных систем, которые должны обеспечивать выполнение требуемых задач силами группы интеллектуальных автономных роботов, взаимодействующих друг с другом. Такая постановка не только правомерна, но и необходима, поскольку обе проблемы находятся в тесной взаимосвязи.

Специфика организации совместной работы роботов в составе мультиагентной системы неизбежно будет предъявлять расширенные требования к их интеллектуальным, функциональным и коммуникативным возможностям. Анализ этих требований, а также разработка соответствующих моделей и алгоритмов группового управления, формирования и распределения заданий, планирования поведения, обработки и обобщения разнородной сенсорной и командной информации представляет крайний интерес для создания перспективных образцов как интеллектуальных автономных роботов, так и мультиагентных систем, организуемых на их основе.

Данная статья открывает цикл публикаций с обобщением результатов исследований, проводимых на кафедре "Проблемы управления" МГТУ МИРЭА в области мультиагентных робототехнических систем.

Примеры и перспективы прикладного применения мультиагентных робототехнических систем

Акцентированное внимание, активно проявившееся со стороны мирового научно-технического сообщества на рубеже XX—XXI вв. к проблематике мультиагентных робототехнических систем (МАРС), обусловлено чисто прагматическими соображениями о преимуществах их прикладного применения. Мотивацией к началу полномасштабных исследований в этом направлении послужили следующие основные аргументы:

- существование различных прикладных задач, единственная или наиболее эффективная альтернатива решения которых связана с организацией взаимодействий нескольких исполнителей, объединяющих свои функциональные, интеллектуальные и/или технические ресурсы;
- существование различных прикладных задач, допускающих распараллеливание процессов своего решения между несколькими исполнителями в целях сокращения суммарных временных, энерге-

- тических и прочих затрат на достижение требуемого результата;
- возможность повышения надежности совместного решения общей прикладной задачи при отказе одного из исполнителей за счет перераспределения функций между оставшимися;
 - возможность потенциальной замены сложных многофункциональных дорогостоящих систем группой узкоспециализированных более простых и дешевых робототехнических устройств.

Перспективы применения МАРС

охватывают широкий спектр прикладных областей (рис. 1), включая военное дело и специальные операции, поисково-спасательные и ремонтно-восстановительные работы, промышленное производство и гражданское строительство, сельское и коммунальное хозяйство, освоение космического пространства, глубоководные изыскания, индустрию развлечений и т. д.

Результаты поисковых научно-исследовательских работ по созданию МАРС различных типов и назначения начинают получать свое практическое воплощение не только в форме экспериментальных компьютерных моделей, но и в виде макетных, а в ряде случаев и опытных образцов, которые успешно проходят тестовые испытания с постепенным переходом к стадии внедрения и последующей эксплуатации. Подобные тенденции подтверждаются множеством конкретных разработок.

Так, наиболее яркие и показательные примеры МАРС военного и специального назначения связаны, главным образом, с практической реализацией концепции "сетевцентрической войны" (*Network-Centric Warfare*), принятой в США и других передовых странах мира. Известно, что ее основные принципы предполагают ведение боевых действий в едином информационно-коммуникационном пространстве, охватывающем не только системы боевого управления, связи, вычислительной техники, разведки и наблюдения (*CAI — Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence*), но и группировки войск, личный состав и отдельные образцы вооружений и военной техники (ВВТ) нового поколения, в числе которой заметное место занимают автономные робототехнические комплексы [1–4].

Действующие в США программы развития вооружения и военной техники, включая *"Future Combat Systems"*, *"Joint Ground Robotics Enterprise"* и ряд других, предусматривают создание автономных робототехнических комплексов наземного, воздушного, над- и подводного базирования, которые должны не только интегрироваться в состав боевых сетевцентрических систем, но и обеспечивать возможность взаимодействия при совместном функционировании в автономном режиме [5, 6, 7]. При этом решение



Рис. 1. Области прикладного применения мультиагентных робототехнических систем

фундаментальных и прикладных проблем группового управления автономными роботами на базе сетевых технологий осуществляется в рамках специализированных программ *"Mobile Autonomous Robot Software"* и *"Software for Distributed Robotics"*, выполняемых под эгидой Агентства перспективных оборонных исследований Министерства обороны США DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*).

Одной из первых полномасштабных демонстраций применения МАРС военного назначения для решения реальных боевых задач может считаться прототипный образец, разработанный в рамках экспериментального проекта *"COUGAR" (COoperative Unmanned Ground Attack Robots)* (*US Army Aviation and Missile Research, Development, and Engineering Center AMRDEC*) [8].

МАРС *"COUGAR"*, структура которого приведена на рис. 2, включает в свой состав четыре основных модуля:

- мобильный командный пост оператора на базе армейского вездехода;
- автономный боевой мобильный робототехнический комплекс с установкой для запуска тактических ракет *"HELLFIRE"* (рис. 3, а);
- автономный мобильный робототехнический комплекс с разведывательной аппаратурой и лазерной установкой целенаведения (рис. 3, б);
- автономный малогабаритный беспилотный летательный аппарат (БЛА) освещения обстановки (рис. 3, в), транспортируемый на базе разведывательного мобильного робототехнического комплекса.

Автономность функционирования каждого из агентов под контролем оператора обеспечивается интеллектуальной бортовой системой управления (БСУ), а их информационное взаимодействие — за счет передающих устройств беспроводной сетевой связи (УСС).

Прототипный образец МАРС *"COUGAR"* успешно прошел полевые испытания в декабре 2002 г.

Другим крайне показательным примером МАРС может служить экспериментальный образец, созданный по заказу Агентства перспективных оборонных исследований Министерства обороны США

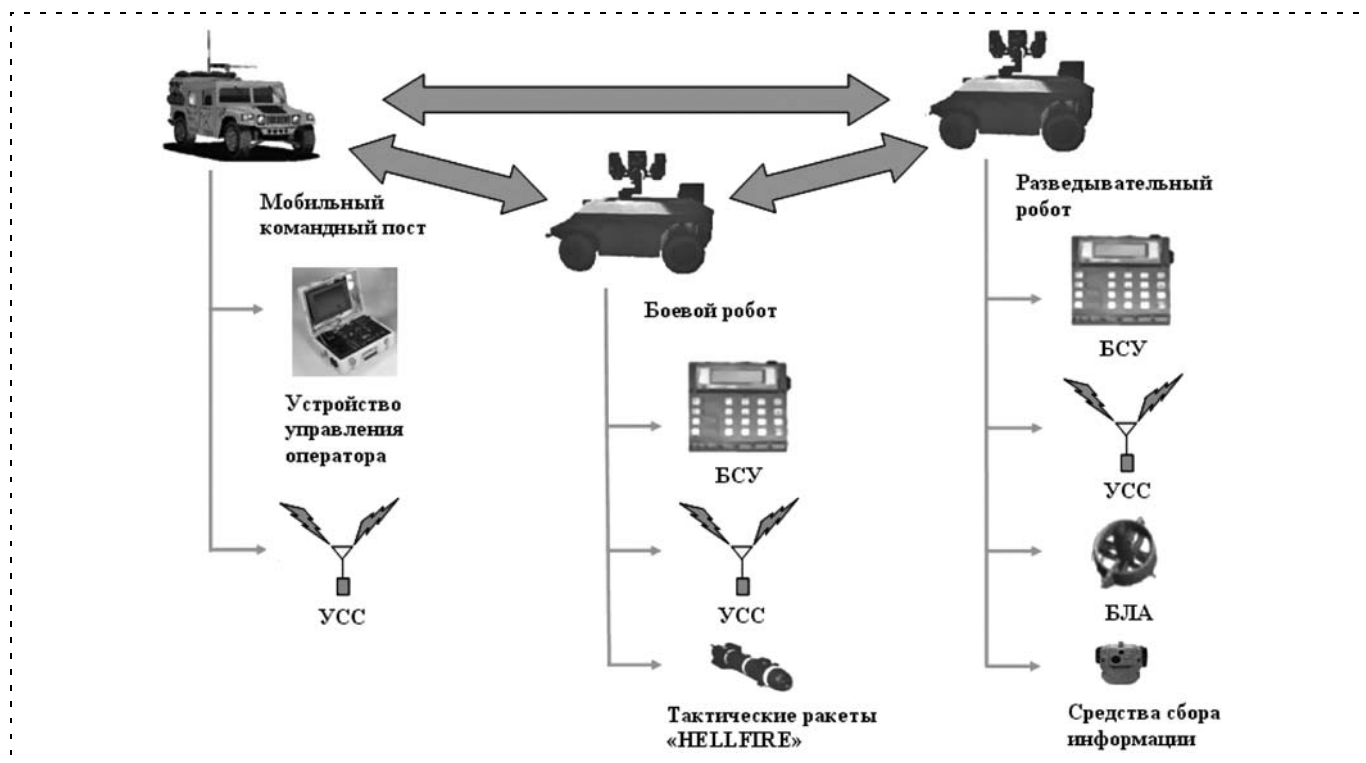


Рис. 2. Структура и состав MAPC "COUGAR" (US Army Aviation and Missile Research, Development, and Engineering Center AMRDEC)

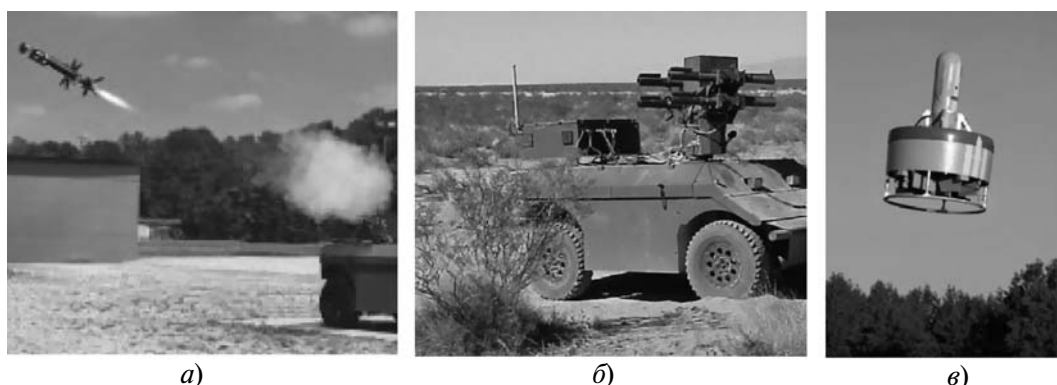


Рис. 3. Автономные безэкипажные аппараты, взаимодействующие в составе MAPC "COUGAR" (US Army Aviation and Missile Research, Development, and Engineering Center AMRDEC): боевой мобильный робототехнический комплекс с ракетной установкой "HELLFIRE" (а); разведывательный мобильный робототехнический комплекс (б); малоразмерный беспилотный летательный аппарат освещения обстановки (в)

DARPA в рамках проекта "Centibots" [9, 10]. Главная цель проекта, проведение которого осуществлялось совместными усилиями SRI International (USA), Stanford University (USA), University of Washington (USA) и ActivMedia (USA), заключалась в разработке технологии группового управления роботами, обеспечивающими координацию взаимодействий для решения задач картографирования, наблюдения за обстановкой, охраны объектов и выполнения других специальных миссий в городских условиях.

Экспериментальный образец системы "Centibots" насчитывал в своем составе 100 роботов двух типов:

- P2AT (ActivMedia Robotics, USA) (рис. 4, а) — автономный мобильный робот, который предназ-

начен для решения задач картографирования и укомплектован бортовой системой управления, системой инерциальной навигации, лазерным дальномером, телекамерой, одометром, ультразвуковыми датчиками и приемопередающим устройством беспроводной сетевой связи;

- Amigobot (ActivMedia Robotics, USA) (рис. 4, б) — автономный мобильный робот, который предназначен для решения задач поиска и обнаружения объектов потенциального интереса с привязкой к построенной карте и укомплектован бортовой системой управления, телекамерой, ультразвуковыми датчиками и приемопередающим устройством беспроводной сетевой связи.

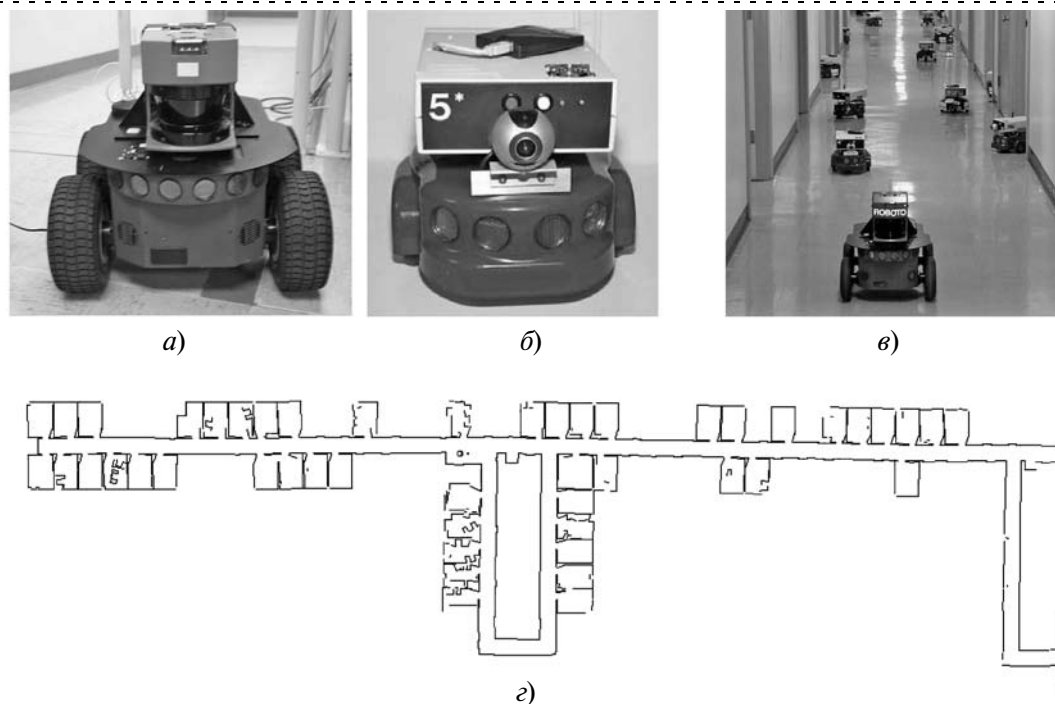


Рис. 4. МАРС "Centibots" (SRI International (USA), Stanford University (USA), University of Washington (USA), ActivMedia (USA)): автономный мобильный робот P2AT (ActivMedia Robotics, USA) (а); автономный мобильный робот Amigobot (ActivMedia Robotics, USA) (б); проведение эксперимента по картографированию помещений (в); автоматически сформированная карта (г)

В 2004 г. МАРС "Centibots" успешно прошла тестовые испытания, доказав свою практическую эффективность на примере автоматического построения планов разветвленной сети офисных помещений большой площади (рис. 4, в, г). Так, согласно официально представленным результатам, если формирование карты помещений общей площадью 10 000 м² с помощью одного робота занимает порядка 21,5 ч, то для 20 роботов продолжительность выполнения аналогичного задания составляет менее 2 ч [10].

В свете концепции "сетевидной войны" важнейший ориентир развития беспилотных летательных аппаратов ударного назначения в США связан с организацией их группового взаимодействия для поражения наземных целей при преодолении рубежей противовоздушной обороны противника [5]. Реальность практического воплощения подобной перспективы была подтверждена при создании экспериментального образца мультиагентной системы на базе БЛА X-45A (Boeing Integrated Defense Systems, USA) (рис. 5).

Так, в ходе завершающей стадии ее испытаний в феврале 2005 г. два аппарата X-45A, патрулируя заданную зону в автономном режиме, осуществили автоматическое обнаружение зенитных установок и, после получения подтверждения оператора на свой запрос об их подавлении, выполнили опти-

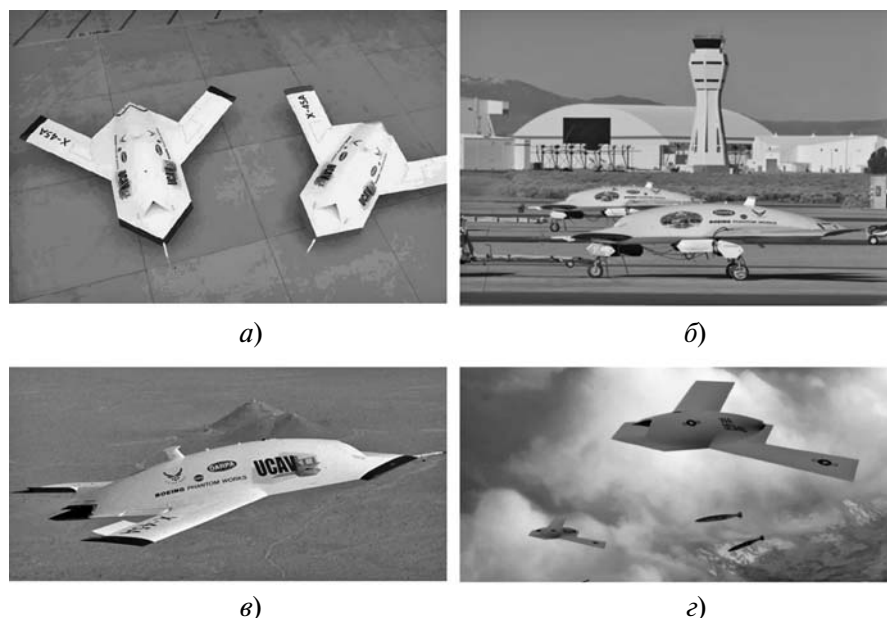


Рис. 5. Мультиагентная система на базе ударных БЛА X-45A (Boeing Integrated Defense Systems, USA): общий вид БЛА X-45A (а); БЛА X-45A в полете (б); группа из двух БЛА X-45A на стартовой позиции (в) и в ходе выполнения совместной боевой миссии (г)

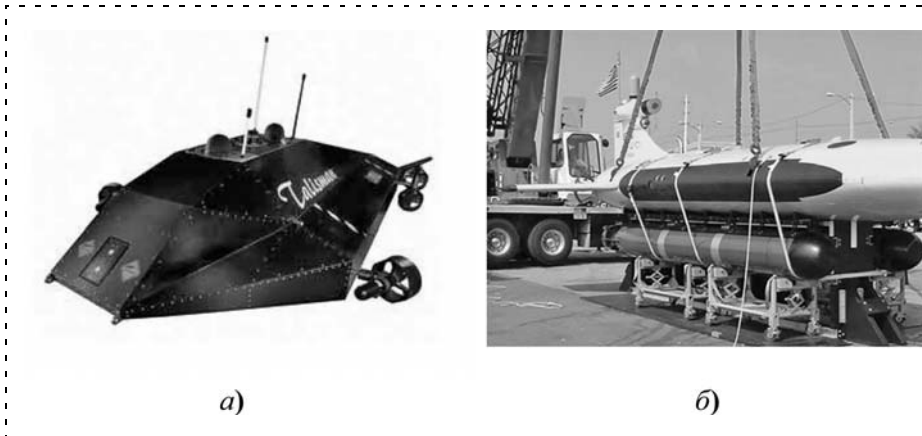


Рис. 6. Перспективные образцы АНПА с интеллектуальной бортовой системой управления: *Talisman* (BAE Systems, UK) (а); *Manta* (USA, US Navy Naval Undersea Warfare Center) (б)

мальное распределение и последующее уничтожение выявленных целей [11].

Создание автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), обладающих повышенным уровнем тактико-технических характеристик и способных к автоматическому выполнению требуемых функций в условиях неопределенности, в том числе и в режиме группового управления в составе многоагентных систем, является неотъемлемой частью развития военной робототехники [12, 13]. Так, например, в рамках программ соответствующей направленности ряда развитых стран к настоящему моменту времени разработаны и проходят испытания перспективные образцы автономных мини-субмарин (рис. 6), оснащаемых интеллекту-

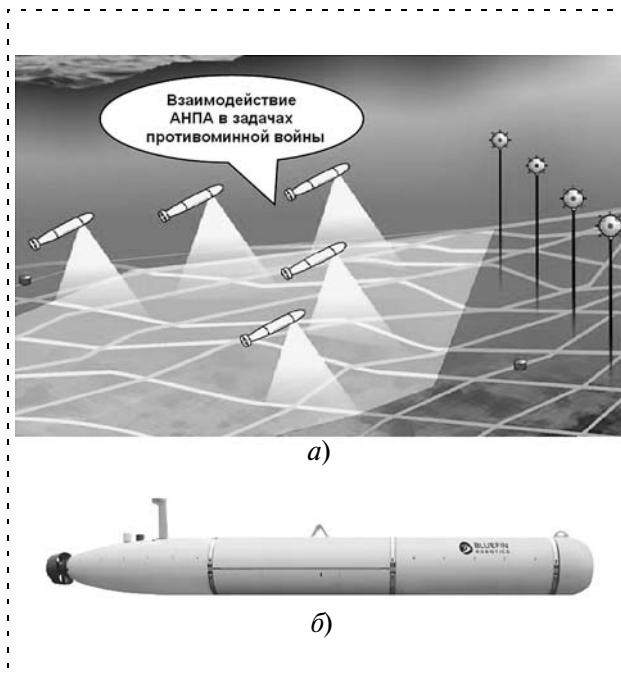


Рис. 7. Мультиагентная система на базе автономных НПА *BLUEFIN-21* (Bluefin Robotics Corporation, USA): обнаружение мин и их уничтожение (а); общий вид автономного НПА *BLUEFIN-21* (б)

альной бортовой системой управления с развитыми функциональными возможностями по планированию поведения, формированию последовательности целесообразных действий, автоматической оценке текущей ситуации и принятию адекватных управляющих решений.

Рассматриваемые направления боевого применения МАРС подводного базирования охватывают решение широкого круга задач:

- по скрытному оборудованию акваторий театра военных действий средствами и системами гидроакустической навигации, связи и сбора разведывательной и геофизической информации;
- по освещению подводной обстановки;
- по ведению противоминной войны (рис. 7);
- по обнаружению и уничтожению подводных лодок и надводных кораблей противника;
- по поддержанию технического состояния различных систем долговременного действия;
- по защите от несанкционированного доступа к развернутым системам и их информационным потокам;
- по обеспечению целевой ретрансляции информационных потоков от различных систем освещения обстановки, глобальных информационных центров и центров управления.

Широкий спектр исследований, ведущихся в области МАРС военного назначения, включает не только разработку различных типов экспериментальных образцов, но и предусматривает создание базовых унифицированных технологий их построения, программирования и применения.

Показательным примером, демонстрирующим уровень современных достижений в этом направлении, может служить проект "*MissionLab*", развиваемый в Технологическом институте Джорджии, США (*The Georgia Institute of Technology, USA*) и направленный на разработку средств человеко-машинного интерфейса с реализацией функций программирования, моделирования и контроля МАРС [14]. Очередная версия пакета "*MissionLab v7.0*" обладает широким набором функциональных возможностей, позволяющих обеспечить не только оперативную постановку прикладных задач для МАРС военного назначения с проверкой корректности сформированных планов в режиме виртуального моделирования (рис. 8, а), но и их выполнение в режиме группового управления реальными образцами автономных мобильных платформ (рис. 8, б), включая *ATRV* (*iRobot Corp., USA*), *Urban Robot* (*iRobot Corp., USA*), *Pioneer AT* (*ActivMedia Robotics, USA*), *Amigobot* (*ActivMedia Robotics, USA*) и ряд др.

Близким аналогом является универсальная среда *"Mobius"* (*Autonomous Solutions Inc., USA*), которая также предназначена для моделирования, программирования и контроля автономных мобильных роботов с поддержкой режимов телеоператорного, командного и группового управления при решении широкого спектра прикладных задач в сфере обороны и безопасности, грузоперевозок, в сельском хозяйстве и горнодобывающей отрасли, строительстве и т. д. [15].

Так, в частности, набор программно-инструментальных средств, предоставляемых пользователю в среде *"Mobius"*, позволяет обеспечить планирование автономного движения группы роботов в режиме следования за "ведущим" (рис. 9).

Реализация соответствующих функций человеко-машинного интерфейса в среде *"Mobius"* при телеоператорном, командном или групповом управлении автономными мобильными роботами осуществляется с помощью специализированного переносного пульта *"Mobi"* (*Autonomous Solutions Inc., USA*) [16] (рис. 10). При этом интегрированный комплекс аппаратно-программных средств *"Mobi"* — *"Mobius"* может использоваться для работы с автономными мобильными роботами фирм *iRobot*, *Harris Corporation*, *Foster-Miller*, *Northrop-Grumman Remotec*, *Deere & Company*, *Autonomous Solutions*, а также любыми другими образцами, которые соответствуют стандарту *JAUS* [17, 18], принятому в США и регламентирующему требования к построению систем управления безэкипажных машин различных типов и назначения.

Следует отметить, что многообразие и универсальность возможностей среды человеко-машинного интерфейса *"Mobius"* открывает перспективы ее применения в составе МАРС, ориентированных для решения сложных прикладных задач не только в сфере военных и специальных операций, но и

в области массовых грузоперевозок, в сельском хозяйстве (при обработке полей и сборе урожая), в строительстве и т. д.

Исследование принципов построения МАРС является важнейшей составляющей в развитии перспективных программ освоения и использования космического пространства.

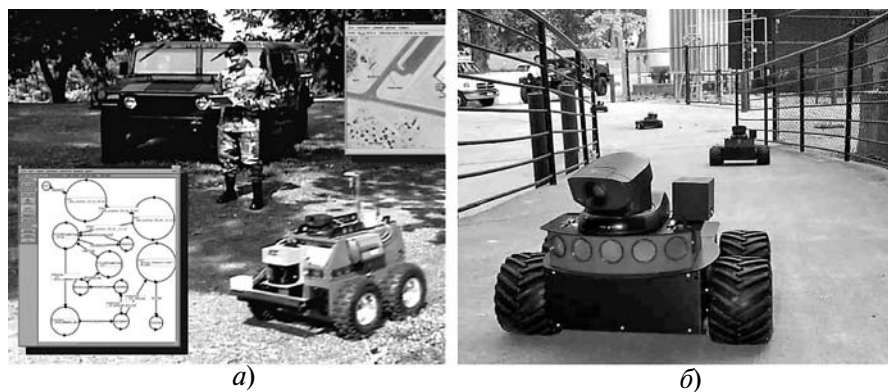


Рис. 8. Использование комплекса программно-инструментальных средств *"MissionLab v7.0"* (*Georgia Institute of Technology, USA*) для планирования прикладных миссий МАРС: оперативная постановка прикладной задачи (а) и ее последующее выполнение в режиме группового управления (б)



Рис. 9. Использование комплекса программно-инструментальных средств *"Mobius"* (*Autonomous Solutions Inc., USA*) для планирования движения группы автономных мобильных платформ на базе карьерного самосвала в режиме следования за ведущим: автономная мобильная платформа на базе карьерного самосвала (а); планирование автономного движения "ведущего" (б); обработка сформированного задания (в)

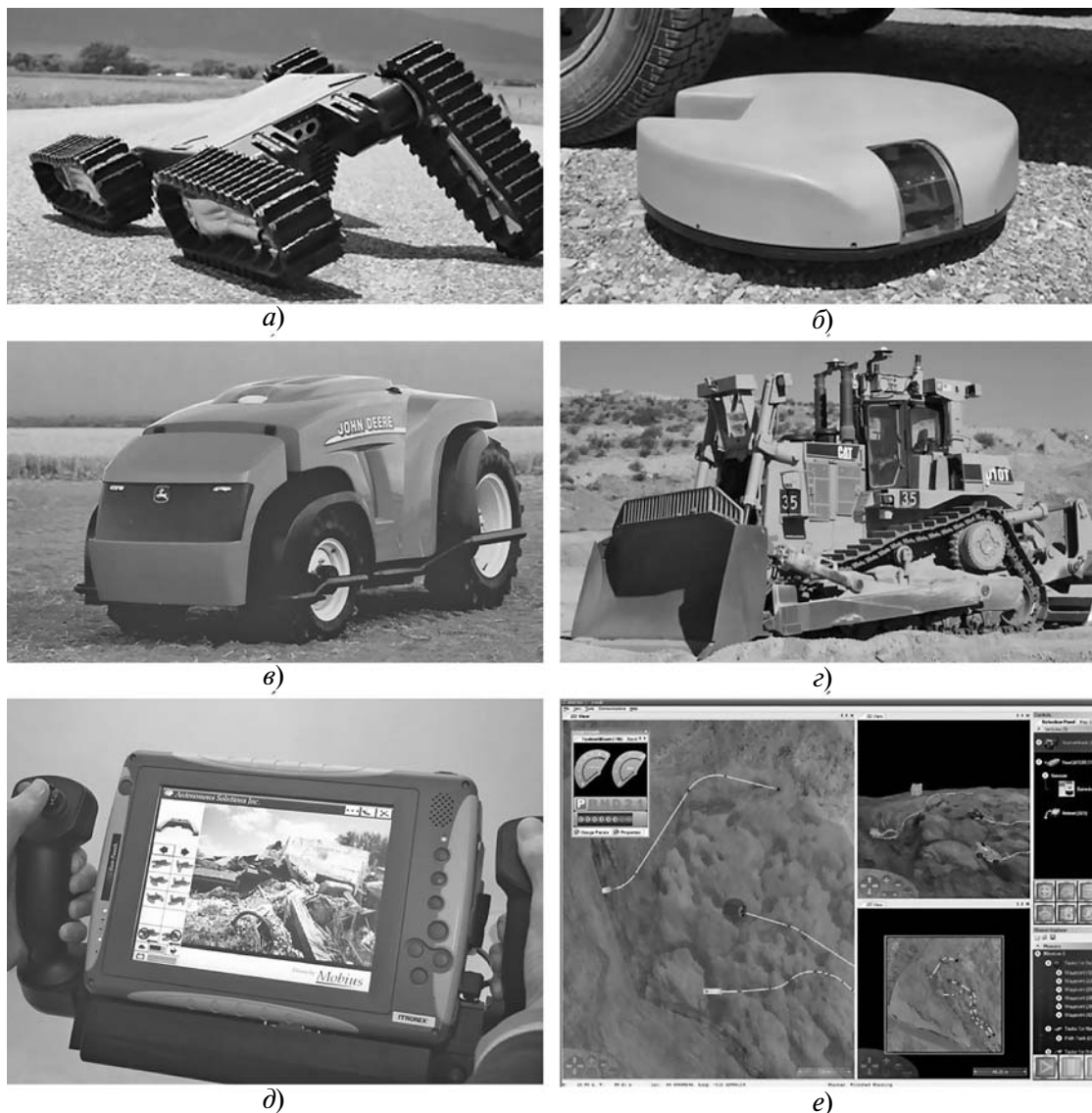


Рис. 10. Применение интегрированного комплекса аппаратно-программных средств "Mobi" — "Mobius" для обеспечения функций человеко-машинного интерфейса с автономными мобильными роботами различных типов и назначения: многофункциональный малогабаритный мобильный робот военного назначения "Chaos" (Autonomous Solutions Inc., USA) (а); специализированный мобильный робот "Spector" (Autonomous Solutions Inc., USA) (б) для обследования днищ автомобилей; многофункциональный сельскохозяйственный робот "John Deere" (Deere & Company, USA) (в); специализированный робот "Robotic Dozer System" (Autonomous Solutions Inc., USA) на базе бульдозера "CAT D10" (Caterpillar Inc., USA) (г); переносной пульт "Mobi" (Autonomous Solutions Inc., USA) (д) для телеоператорного, командного и группового управления автономными мобильными роботами; контроль за процессом функционирования автономных мобильных роботов при выполнении поставленных прикладных задач с использованием инструментальных средств среды "Mobius" (Autonomous Solutions Inc., USA) (е)

Так, одно из направлений этих исследований охватывает проблемы координации действий автономных мобильных роботов, обеспечивающих совместную транспортировку и последующий монтаж крупногабаритных конструкций при строительстве инженерных сооружений на поверхности Луны, Марса и других планет Солнечной системы [19, 20, 21].

Возможность разработки и целесообразность применения МАРС такого типа подтверждается результатами экспериментальных исследований на макетных и прототипных образцах (рис. 11, см. вторую сторону обложки), разрабатываемых в Лаборатории автоматизации, робототехники и меха-

троники Отделения проектирования механических и аэрокосмических систем в Государственном университете Нью-Йорка, США (ARM Lab, State University of New York, USA), Лаборатории реактивного движения Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства, США (Jet Propulsion Laboratory, NASA, USA) и ряде других научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций различных стран мира.

Другое направление исследований в области МАРС космического базирования связано с развитием концепции свободно маневрирующих платформ, предназначенных для сборки, реконфигурации и ремонта крупногабаритных спутников, ор-

битальных станций и комплексов, а также других инженерных конструкций [19, 22, 23, 24, 25]. Как показано на рис. 12 (см. вторую сторону обложки), такого рода платформы, свободно маневрирующие в условиях космического пространства, оснащаются двумя и более манипуляторами, способными обеспечить координированное выполнение требуемых технологических операций в режиме группового управления. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию опытных образцов свободно маневрирующих космических роботизированных платформ с несколькими взаимодействующими манипуляторами на борту в течение ряда лет активно проводятся в Институте Робототехники и Мехатроники Немецкого Аэрокосмического Центра (*Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center, Germany*), в Лаборатории Аэрокосмической Робототехники Стэнфордского Университета (*Aerospace Robotics Laboratory, Stanford University, USA*), в Японском Аэрокосмическом Исследовательском Агентстве

(*Japan Aerospace Exploration Agency, Japan*) и других научных центрах.

Известные варианты промышленного применения МАРС ограничиваются, главным образом, задачей автоматизации различных технологических операций, которые связаны с переносом, обработкой или монтажом крупногабаритных деталей и выполняются, как правило, двумя манипуляторами, координирующими свои действия (рис. 13, см. вторую сторону обложки) [26].

Конструкция некоторых из современных образцов промышленных роботов предусматривает наличие двух манипуляторов с общей рабочей зоной. Ярким примером серийно выпускаемых устройств такого типа может служить универсальный робот "Motoman-DA20" (*Motoman Inc., USA*), широко применяемый для автоматизации сборки разнородной промышленной продукции (рис. 14) [27].

Широкие перспективы прикладного применения МАРС связаны с развитием сферы индустрии развлечений.



а)



б)



в)



г)



д)



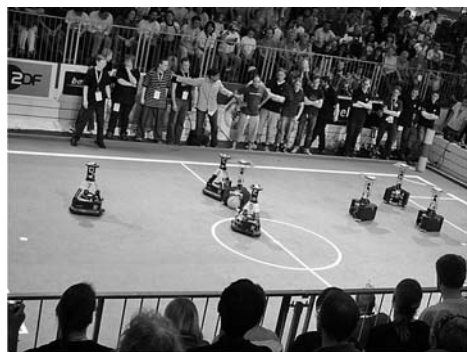
е)

Рис. 14. "Motoman-DA20" (*Motoman Inc., USA*) — серийно выпускаемый образец промышленного робота с двумя манипуляторами: общий вид (а); автоматизированная сборка офисного кресла (б); фрагменты автоматизированной сборки фотоаппарата (в, г, д, е)

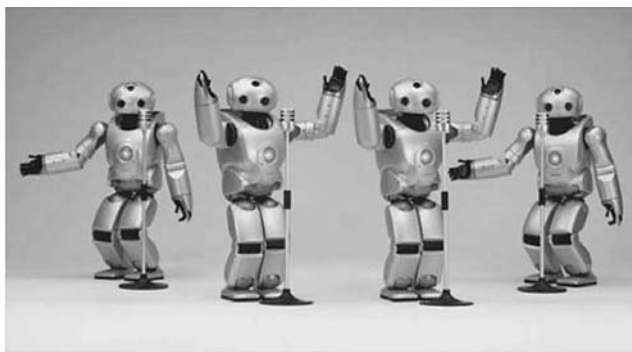
Так, например, если первые чемпионаты мира по футболу среди роботов *"RoboCup"* в середине 90-х гг. XX в. представляли собой скорее профинансированные мероприятия для узкого круга специалистов, то аналогичные соревнования 2007 г. собрали не только 321 команду из 39 стран, но и 1966 участников и еще большее число болельщиков. При этом в рамках одного из программных заявлений официального руководства международной федерации *"FIRA"* (*Federation of International Robot-*

soccer Association), ежегодно проводящей эти соревнования по классам мобильных (рис. 15, а) и антропоморфных роботов, утверждается, что к 2050 г. победитель *"RoboCup"* будет способен сыграть на равных с чемпионами мира по футболу среди спортсменов и выиграть соответствующую встречу [28], что при любом исходе очевидно вызовет большой резонанс и поднимет общественный интерес.

Необходимо отметить, что участие в соревнованиях *"RoboCup"* способствует не только ускоренно-



а)



б)

Рис. 15. Применение МАРС в области индустрии развлечений: чемпионат мира по футболу среди роботов *"RoboCup2006"* (а); танцевальное шоу с участием группы антропоморфных роботов *"SDR-4X"* (Sony Corporation, Japan) (б)



а)



б)



в)



г)

Рис. 16. МАРС *"Swarmanoid"* (IRIDIA, Belgium; IDSIA, Switzerland; EPFL-LIS, Switzerland; EPFL-LSRO, Switzerland; CNR-ISTC, Italy): общий вид системы (а); автономный агент на базе мобильного робота (б); автономный агент на базе манипуляционного робота, транспортируемого с помощью мобильных (в); автономный агент для глобального сбора информации на базе летающей платформы (г)

му развитию технологий группового управления, обработки и передачи информации в мультиагентных робототехнических системах, но и обеспечивает активную подготовку высококвалифицированных кадров.

Определенные перспективы использования МАРС в области развлечений и досуга связаны с организацией специализированных шоу. Подобные мероприятия, неоднократно проводимые с привлечением роботов-андроидов (рис. 15, б) [29, 30] при открытиях крупных международных форумов и ярмарок, на практике доказали свою популярность среди самых широких слоев населения.

Сложность и многогранность проблематики создания мультиагентных систем обуславливает появление международных научно-исследовательских проектов соответствующей направленности. Ярким примером такого рода является финансируемый Европейской комиссией проект "Swarmoid", который направлен на разработку технологий построения МАРС на основе использования стайных принципов поведения насекомых в живой природе и объединяет усилия пяти организаций-участников из трех стран — IRIDIA (*Institut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle — Université Libre de Bruxelles, Belgium*), IDSIA (*Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale, Switzerland*), EPFL-LIS (*Laboratory of Intelligent Systems — École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland*), EPFL-LSRO (*Institut de Production et Robotique — Laboratoire de systèmes robotiques, Switzerland*) и CNR-ISTC (*Consiglio Nazionale delle Ricerche Institute of Cognitive Science and Technology, Italy*) [31].

Результаты выполнения проекта нашли свое воплощение в создании экспериментального образца мультиагентной системы "Swarmoid" (рис. 16), объединяющей в своем составе до 60 роботов трех различных типов (автономная мобильная колесная платформа, автономный двурукий манипуляционный модуль и автономная летающая платформа) для совместного решения широкого круга прикладных задач.

Заключение

Проведенный обзор, хотя и является далеко не полным, тем не менее позволяет сделать ряд важных выводов.

1. Потенциальные преимущества и возможности применения МАРС открывают широкие перспективы для развития множества различных прикладных областей. Для оборонной сферы решение проблем разработки, внедрения и практического использования МАРС имеет принципиальное значение и может заметно изменить облик вооруженных сил, обеспечив существенное повышение уровней их постоянной готовности и боевой эффективности.

2. Исследованию проблем и разработке технологий создания МАРС во всем мире уделяется приоритетное внимание, а фундаментальные и реаль-

ные практические результаты, полученные прежде всего в США, Японии и ряде стран Европы, носят опережающий характер.

3. Даже на уровне поверхностного рассмотрения становится очевидным существование множества альтернативных подходов к построению МАРС. Такое положение вещей требует детального анализа возможных теоретических постановок задач группового управления роботами, а также адекватного выбора как математического аппарата для их решения, так и правильных технических путей для воплощения опытных образцов мультиагентных систем различных типов и назначения.

4. Организация полномасштабных исследований по созданию мультиагентных робототехнических систем в России может и должна осуществляться не только с точки зрения освоения передового зарубежного опыта, но и с позиций осмысления заделов, накопленных отечественной научной школой.

В связи с этим необходимо отметить, что результаты исследований и разработок, проводимых в этой области в течение многих лет в НИИ МВС ЮФУ (г. Таганрог) [32–38], в МГТУ МИРЭА (г. Москва) [38–42], в СПИИ РАН (г. С.-Петербург) [43–47] и ряде других научных центров страны, хотя и уступают по степени технологической завершенности достигнутому, например, в США, однако в теоретическом плане, по существу постановок и предлагаемых фундаментальных решений соответствуют современному мировому уровню.

Список литературы

1. Paul T. Mitchell Network Centric Warfare and Coalition Operations: The New Military Operating System. UK: T & F Books, 2009.
2. Шеремет И. Боевые робототехнические группировки — новая реальность войн XXI в. // Национальная оборона. 2006. № 3.
3. Кондратьев А. Нужна ли информационная революция в армии? // Военно-промышленный курьер. 2008. № 48.
4. Боев С. Ф., Рахманов А. А., Слока В. К. Сетевые системы регионального уровня реального масштаба времени // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 3. С. 64–68.
5. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations / Committee on Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations, National Research Council. USA: National Academies Press, 2005.
6. Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles / Committee on Army Unmanned Ground Vehicle Technology, National Research Council / USA: National Academies Press, 2002.
7. The Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan. URL: <http://www.chinfo.navy.mil/navpalib/technology/uuvmp.pdf>
8. COoperative Unmanned Ground Attack Robots (COUGAR). URL: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/cougar.htm>
9. Konolige K., Fox D., Ortiz C., Agno A., Eriksen M., Limketkai B., Ko J., Morisset B., Schulz D., Stewart B., and Vincent R. Centibots: Very large scale distributed robotic teams. In M. Ang and O. Khatib, editors // Experimental Robotics: The 9th International Symposium, Springer. Tracts in Advanced Robotics (STAR). Springer Verlag, 2005.
10. The Centibots Project. URL: <http://www.ai.sri.com/centibots/>
11. Boeing X-45. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_X-45
12. Голод О. С., Гончар А. И., Шлычек Л. И. Перспективы и концепции разработки автономных необитаемых подводных аппаратов // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану). № 4. 2007.

13. **Илларионов Г. Ю., Сиденко К. С., Сидоренков В. В.** Подводные роботы в минной войне. Калининград: ОАО "Янтарный сказ", 2008.
14. **MissionLab** v7.0. URL: <http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/robot-lab/research/MissionLab/>
15. **Mobius** — Universal Control for Unmanned Systems. URL: <http://autonomoussolutions.com/brochure/mobius.pdf>
16. **Mobi** — portable handheld Operator Control Unit. URL: <http://autonomoussolutions.com/brochure/mobi.pdf>
17. **Бобровский С.** JAUS: стандарт на разработку военных и мирных роботов // PC Week / RE. 2004. № 38.
18. **Enterprise** Structure: JAUS. URL: <http://www.jointrobotics.com/enterprise02.php>
19. **Space Robotics**. URL: <http://www.frc.ri.cmu.edu/projects/spacerobotics/Seminar/04sr.1208spacerobotics.pdf>
20. **Cooperative** Payload Transport by Robot Collectives. URL: <http://mechatronics.eng.buffalo.edu/research/mobilemanipulator/index.html>
21. **Cooperative** robots share the load. URL: http://trnmag.com/Stories/2002/021302/Cooperative_robots_share_the_load_021302.html
22. **Dubowsky S., Boning P.** The Coordinated Control of Space Robot Teams for the On-Orbit Construction of Large Flexible Space Structures // Proc. of the 2007 IEEE International Conf. Robotics and Automation, Special Workshop on Space Robotics, Rome, Italy, April 2007.
23. **Lampariello R., Agrawal S., Hirzinger G.** Optimal Motion Planning for Free-Flying Robots. URL: <http://www.robotic.de/file-admin/robotic/lamp/ica03.pdf>
24. **Ishijima Y., Tzeranis D., Dubowsky S.** The On-Orbit Maneuvering of Large Space Flexible Structures by Free-Flying Robots. URL: http://scripts.mit.edu/~robots/robots/publications/papers/2005_09_Ish_Tze_Dub.pdf
25. **Menon C., Aboudan A., Cocuzza S., Bulgarelli A., and Angrilli F.** Free-Flying Robot Tested on Parabolic Flights: Kinematic Control // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2005. Vol. 28. N 4, July—August.
26. **KUKA Industrial Robots**. URL: <http://www.kuka-robotics.com/en/products/>
27. URL: <http://www.motomanrobotec.si/roboti/da20/info.pdf>
28. **Federation** of International Robot-soccer Association. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Federation_of_International_Robot-soccer_Association
29. **QRIO (SDR) SONY Dream Robot**. URL: <http://www.sonyaiibo.net/aboutqrio.htm>
30. **Робот SDR-4X: песни и пляски имени SONY**. URL: <http://www.membrana.ru/articles/tf/2002/03/19/215500.html>
31. URL: <http://www.swarmanoid.org/>
32. **Каляев И. А.** Использование принципов коллективного принятия решений при управлении группой автоматических лифтов // Мехатроника. 2001. № 4. С. 24—29.
33. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. М.: Янус-К, 2002.
34. **Каляев И. А.** Метод коллективного управления группой объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 3. С. 9—22.
35. **Капустян С. Г., Вьюшин А. А.** Распределенная система управления группой роботов-штабелеров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 3. С. 22—29.
36. **Каляев И. А., Гайдук А. Р.** Стайные принципы управления в группе объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 12. С. 27—38.
37. **Каляев И. А., Капустян С. Г.** Проблемы группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 33—40.
38. **Интеллектуальные роботы: учеб. пособ. для ВУЗов** / Под ред. Е. Ю. Юревича / И. А. Каляев, В. М. Лохин, И. М. Макаров и др. М.: Машиностроение, 2007.
39. **Макаров И. М., Рахманкулов В. З.** Групповое управление роботами-манипуляторами с распределенно-централизованной обработкой информации / Микропроцессорные системы управления в робототехнике. М.: Наука, 1984.
40. **Рахманкулов В. З., Манько С. В.** Моделирующий комплекс группового управления роботами / Тез. докл. III Всесоюз. совещания по робототехническим системам. Воронеж, 1984. Ч. 4. Воронеж: ВПИ, 1984.
41. **Манько С. В., Худак Ю. И.** Распределение ресурсов в мультиагентных системах на основе принципа монотонности // Матер. III Всеросс. науч.-практ. конф. "Перспективные системы и задачи управления", Т. 1. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.
42. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В.** и др. Принципы построения, разработка и моделирование мультиагентных робототехнических систем // Матер. IV Всеросс. науч.-практ. конф. "Перспективные системы и задачи управления". Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009.
43. **Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В.** Инструментальные средства для открытых сетей агентов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 3.
44. **Gorodetskiy V., Karsaev O., Samoilov V., Skormin V.** Multi-Agent Technology for Air Traffic Control and Incident Management in Airport Airspace // Proc. of the International Workshop "Agents in Traffic and Transportation", Estoril, Portugal, 2008.
45. **Городецкий В., Карсаев О., Коношый В., Самойлов В.** Язык описания многоагентных систем // Приборостроение. 2008. № 10.
46. **Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S., Balandin S., Leppanen S., Turunen M.** Virtual P2P Environment for Testing and Evaluation of Mobile P2P Agents Networks // Proc. of the Second Internat. Conf. on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM 2008), Valencia, Spain, 2008.
47. **Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S.** Agent-based Distributed Decision Making in Dynamic P2P Environment // Intelligent Decision Technologies (IDT): An International Journal, Volume 3, Number 1, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ

с 28 по 30 мая 2012 года в Санкт-Петербурге
на базе ОАО "Концерн "Электроприбор" состоится

Международная конференция ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ (МКИНС2012)

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
- Микромеханические системы
- Алгоритмы и программное обеспечение
- Испытания и метрология

Подробную информацию о конференции см. сайте:
<http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/icins2012/rindex.php>

УДК 681.5.01

И. В. Петухов, канд. техн. наук, проф.,
PetuhovIV@ramarstu.net,
Марийский государственный
технический университет

Исследование сенсорно-моторного взаимодействия человека-оператора и технической системы

Обсуждаются вопросы обеспечения надежности и высокой производительности человеко-машинных систем. Предложен подход, основанный на комплексной оценке психофизиологических возможностей человека по восприятию и переработке информации, прогнозированию и принятию решения. Разработан комплекс методических средств для реализации предложенного подхода и технические средства их инструментальной реализации.

Ключевые слова: человеко-машинные системы, человек-оператор, надежность, интерфейсы, сенсорные системы, сенсорно-моторное взаимодействие

Введение

Проблема обеспечения оптимальных режимов взаимодействия человека и технической системы является далеко не новой. Тем не менее, в последнее время данная проблема приобретает особую актуальность, и существует необходимость разработки принципиально новых подходов к ее решению. Это обусловлено, в первую очередь, повсеместным внедрением средств вычислительной техники и информационных технологий во все сферы человеческой деятельности, в результате чего наблюдается значительное усложнение профессиональной деятельности человека, усложнение мыслительных процессов, увеличение информационной нагрузки на воспринимающие, опознающие, сопоставляющие, программирующие, решающие анализаторы и системы его организма.

Несоответствие информационного объема возможностям человеческого организма неизбежно приводит к преждевременному утомлению человека-оператора и, как следствие, к увеличению времени принятия решения и к ошибкам.

Установлено, что действия человека-оператора влияют на устойчивость и качество работы системы "человек—машина" [1]. При этом человеческий фактор в настоящее время рассматривается в качестве основного фактора возникновения и развития

аварийных ситуаций на производстве и транспорте. Проблема сохранения высокого уровня эффективной работоспособности человека в течение длительного времени, особенно в экстремальных условиях, остается актуальной, несмотря на многочисленные исследования научно-прикладного характера в этой области.

Анализ имеющихся данных свидетельствует, что надежность человека-оператора определяется большим числом факторов. В первом приближении их можно разделить на факторы внешней среды и факторы "внутреннего" порядка [2, 3].

К факторам внешней среды можно отнести соответствие или несоответствие техники требованиям эргономики, режим работы, наличие перегрузки и недогрузки оператора. К "внутренним" факторам относятся психофизиологические характеристики человека-оператора — как более стабильные, определяющие профессиональную пригодность, так и более изменчивые, определяющие функциональное состояние, а также такие психические функции, как внимание, память и др. В частности, выделяются вопросы исходного психофизиологического соответствия человека данной профессии и его специальной профессиональной подготовленности [4].

Считается, что для успешного выполнения профессиональной деятельности человек должен обладать соответствующими профессионально важными качествами (ПВК), которые являются предпосылкой профессиональной деятельности. Формирование и развитие ПВК является одним из путей решения проблемы совместимости человека и технической системы.

Для операторских (сенсорно-гностических) профессий в качестве ПВК выделяют точность и быстроту зрительного восприятия, точный глазомер, устойчивость и концентрацию внимания, оперативную память, быстроту мышления, умение выделять в информации главное, координацию движений руками. Для операторов, работающих в области связи и наблюдения (сенсорные профессии) важны острый слух (зрение), точность восприятия, устойчивость внимания и оперативная память, развитое чувство ритма, выносливость и подвижность нервной системы. Для водительских профессий (сенсомоторных) характерны распределение и устойчивость внимания, быстрая сенсомоторная реакция, подвижность нервных процессов, двигательная память, координация движений руками и ногами [5].

Вместе с тем, особенности психофизиологического восприятия человека должны находить отражение и в технических средствах и в способах организации интерфейса, обеспечивая оптимальные

скоростные и количественные характеристики информационного обмена по критерию надежности и производительности человеко-машинной системы в целом.

Таким образом, решение проблемы обеспечения совместимости человека и технической системы возможно лишь при комплексном подходе в междисциплинарном формате, в том числе при использовании когнитивных технологий и теории информации.

Целью работы являются исследования процессов сенсорно-моторного взаимодействия человека и технической системы, разработка методических и инструментальных средств реализации.

Теоретический анализ

Основной задачей человека-оператора при нормальном протекании процесса является контроль и наблюдение за ходом процесса. При возникновении внештатных ситуаций, нарушений или отклонений оператор должен выполнить резкий переход от монотонной работы в условиях "оперативного покоя" к действиям по ликвидации возникших отклонений. Именно данный процесс характеризуется наибольшей сенсорной, эмоциональной и интеллектуальной перегрузкой.

Вне зависимости от рода деятельности оператора принято считать, что операторскому труду соответствуют следующие четыре основных этапа деятельности: первый — прием информации, поступающей к органам чувств человека; второй — ее переработка; третий — принятие решения и четвертый — выполнение принятого решения. При этом все этапы деятельности человека-оператора опосредуются концептуальной моделью, что, так или иначе, влияет на показатели эффективности и надежности его действий [6].

Анализ действий оператора на каждом из этапов операторской деятельности, учет взаимных корреляционных и обратных связей, определяемых сложностью психофизической организации человека, является далеко не тривиальной задачей.

Разработан значительный комплекс методических и инструментальных средств исследования психофизической деятельности человека-оператора на отдельных этапах операторской деятельности, предназначенных для оценки успешности выполнения определенных действий.

Можно констатировать, что абсолютное большинство тестов мало подходят для комплексной оценки деятельности оператора, так как имеют низкую точность, достоверность и повторяемость, пригодны лишь для однократного прохождения (как в случае с опросниками), мало взаимосвязаны между собой. Различия тестового материала, предъявляемого испытуемым, приводят к различным результатам и к неодинаковым интерпретациям полученных результатов.

Очевидно, что разработка научно обоснованного комплекса методического и технического обеспечения является актуальной и востребованной.

Методическое обеспечение исследования сенсорно-моторных характеристик человека-оператора

Очевидно, что совместимость человека с технической системой возможна лишь в определенном диапазоне скорости и объема информационного потока.

Для определения максимально возможной скорости передачи информационного потока необходимо максимально упростить перцептивную задачу, стоящую перед оператором. Использование тестовых импульсов типа "да-нет" обеспечивает максимальную перцептивную простоту задачи и, кроме всего, позволяет устранить зависимость результатов измерений от языковых, национальных, культурных и интеллектуальных особенностей испытуемого, наблюдаемую в случае использования символической информации. При этом следует отметить, что такой тип тестовых импульсов наиболее соответствует аварийной сигнальной информации и, следовательно, имеет самостоятельную ценность для оценки деятельности оператора во внештатных режимах работы.

Для исследования деятельности оператора на этапе приема информации предложено использование модифицированного метода оценки критической частоты световых мельканий (КЧСМ) — частоты мельканий света в секунду, при которой мелькающий свет субъективно воспринимается как светящийся непрерывно. Метод КЧСМ широко известен, позволяет оценить точность и быстроту зрительного восприятия испытуемого, а также является диагностическим показателем зрительного утомления и функционального состояния органа зрения [7].

Вместе с тем известен ряд недостатков метода КЧСМ, связанных с низкой точностью результатов измерений, существенно ограничивающих его применение в практических целях.

Для повышения точности метода КЧСМ предложены следующие решения. Так, в частности, предложено испытуемому предъявлять световые импульсы фиксированной длительности $\tau_{\text{имп}} = 5$ мс [8], как показано на рис. 1. В этом случае при изменении частоты световых импульсов за счет изменения

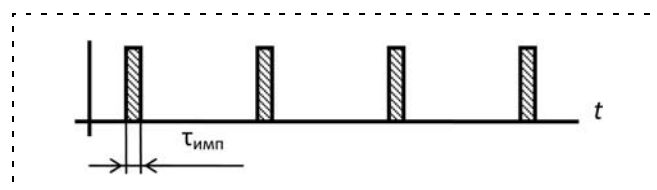


Рис. 1. Временная диаграмма световых импульсов, предъявляемых при определении КЧСМ

мой скважности длительность световых импульсов не изменяется.

В результате экспериментальных исследований установлено, что случайная составляющая погрешности измерений, характеризующая точность измерений, уменьшается по сравнению с измерениями, проводимыми при длительностях световых импульсов, равных 0,5 периода предъявления, от 14,2 до 75,4 %.

Кроме того, изменение частоты световых мельканий предложено осуществлять с шагом 0,5 Гц, а не 0,1 Гц, как принято в известных способах, что обеспечивает сокращение времени измерений и уменьшение нервно-рецепторного утомления испытуемого, влияющего на точность измерений. Изменение шага дискретизации частоты обусловлено проведенными экспериментальными исследованиями, установившими факт неразличения изменения частоты световых мельканий до 0,5 Гц [9].

При исследовании деятельности человека-оператора на этапе восприятия информации актуальна задача временной дифференциации двух сигналов, следующих друг за другом. Для исследования данной проблемы разработан новый способ определения инерционности зрительного анализатора, в том числе времени восстановления (ВВ) зрительного анализатора [10] и времени зрительного восприятия (ВЗВ) [11].

ВВ определяет временной интервал, необходимый для восстановления зрительного анализатора после восприятия первого светового импульса для восприятия второго светового импульса, а ВЗВ характеризует период предъявления световых импульсов, при котором они не могут помешать восприятию друг друга, т. е. воспринимаются отдельно.

Согласно разработанному способу испытуемому предъявляют последовательность парных световых импульсов фиксированной длительности, разделенных межимпульсным интервалом (МИИ) $t_{\text{МИИ}}$, повторяющихся через заданный интервал времени T , как показано на рис. 2.

Длительность МИИ уменьшают и определяют его минимальное значение, при котором световые импульсы в паре воспринимаются раздельными. Это значение принимают за ВВ зрительного анализатора. ВЗВ в этом случае составляет сумму длительности светового импульса и ВВ. Варьирование спектра световых импульсов, предъявляемых испытуемому, позволяет исследовать способность человека к приему информации в условиях различ-

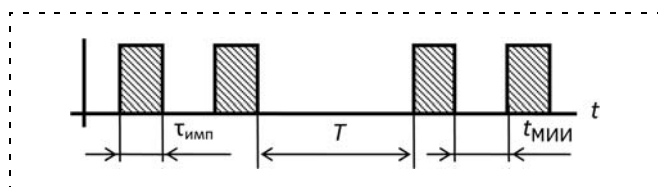


Рис. 2. Временная диаграмма световых импульсов, предъявляемых при определении ВВ и ВЗВ

ной освещенности, дифференцируя дневное и ночное зрение [12].

ВВ и ВЗВ характеризуют точность и быстроту зрительного восприятия, а числовые характеристики оценки точности их измерения определяют устойчивость и концентрацию внимания испытуемого.

Кроме того, экспериментально установлено, что ВЗВ является диагностическим показателем характера адаптации человека-оператора к зрительно напряженной работе [13] и, следовательно, входит в состав показателей, характеризующих успешность операторской деятельности.

Кроме того, в процессе анализа особенностей операторского труда, в частности, было установлено, что способность оператора к быстрому восприятию информации и ее последующей обработке, а также способность переключения с одной задачи на другую во многом зависят от особенностей организации центральной нервной системы (ЦНС) испытуемого.

Способность быстрого перехода от одного процесса к другому определяет подвижность нервной системы, а скоростные показатели перестройки, выраженные в скорости возникновения и прекращения нервных процессов, характеризуются лабильностью нервной системы. Лабильность является одной из наиболее стабильных характеристик нервных процессов в ЦНС человека, под которой, в соответствии с определением Н. Е. Введенского, понимают "...максимальный ритм, который способно возбудимое образование генерировать в одну секунду в точном соответствии с ритмом раздражений". Именно через механизм лабильности устанавливается слаженность и уравновешенность нервных процессов, и в то же время обеспечивается срочность возникновения этих процессов и закономерность их протекания [14].

Для определения лабильности оператора предложен новый способ, основанный на методе парных световых импульсов и способе определения ВЗВ. Согласно разработанному способу испытуемому предъявляют последовательность парных световых импульсов, как и в способе определения ВЗВ. При этом особенностью разработанного способа является определение минимального значения ВЗВ $T_{\text{ВЗВ}}$ при варьировании длительностей световых импульсов $\tau_{\text{имп}}$ в диапазоне от 3 до 70 мс. Лабильность определяют как величину, обратную значению ВЗВ в точке минимума функции $T_{\text{ВЗВ}} = f(\tau_{\text{имп}})$ (рис. 3).

Разработанный способ определения лабильности по отношению к аналогам отличается повышенной точностью, достигающей от 16,7 до 37,4 %, и может использоваться для исследования характера адаптации человека при зрительно-напряженной работе.

Для оценки сенсорно-моторных способностей наиболее широко используют метод оценки времени реакции на движущийся объект (РДО), являющийся сложным зрительно-моторным тестом. Суть метода заключается в определении точки встречи движущегося на экране символического изображения объ-

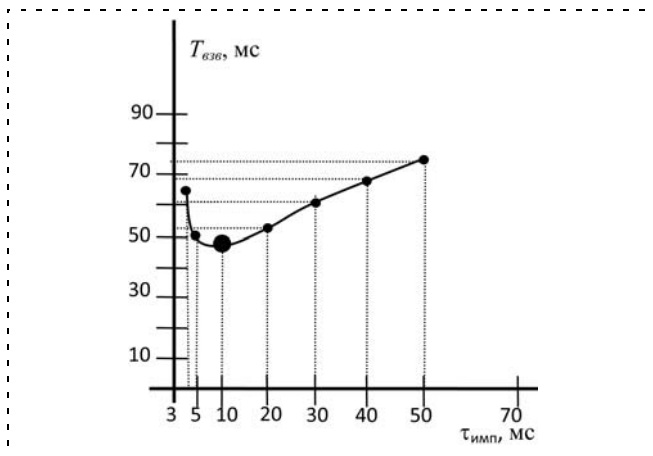


Рис. 3. Зависимость ВЗВ от длительности предъявляемых световых импульсов $\tau_{\text{имп}}$

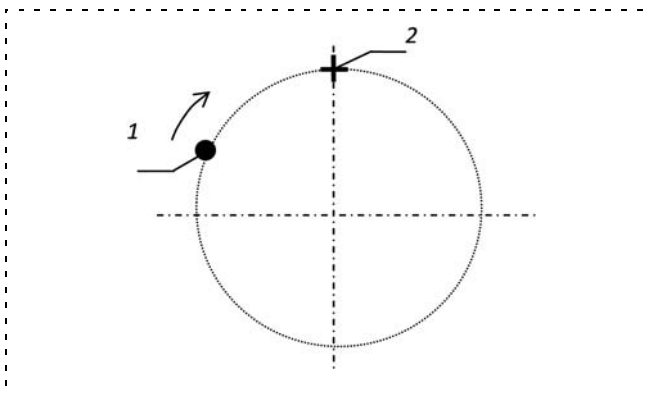


Рис. 4. Схема реализации метода оценки времени РДО

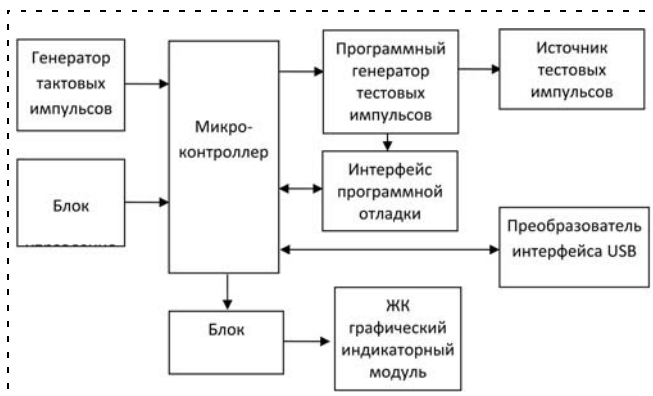


Рис. 5. Структурная схема АПК

екта с неподвижной точкой (меткой), заранее указанной в словесной инструкции (рис. 4).

Задача испытуемого, пытающегося точно остановить движущееся изображение объекта в заданной точке, состоит в нахождении некоторого упреждения с учетом скорости движения объекта, оставшегося расстояния и своих зрительно-моторных возможностей и осуществлении коррекции пути движения объекта, т. е. выполнении корректирующих воздействий на объект.

Для исследования способности оператора решать задачи слежения разработан комплекс методов оценки времени РДО, в том числе метод оценки времени РДО с возможностью корректировки действий оператора на основе информации об успешности предыдущих решений [15], без возможности корректировки собственных действий [16], метод оценки с учетом времени сенсомоторной реакции испытуемого [17], модификации метода с варьированием траекторий, направления, скорости и ускорения движения объекта [18].

Техническая реализация методов исследования психофизиологических характеристик человека-оператора

В качестве технической реализации предложенного методического обеспечения разработан аппаратно-программный комплекс (АПК), структурная схема которого представлена на рис. 5.

АПК может быть реализован на базе стандартного восьмибитного микроконтроллера типа ATmega128L. Программируемый генератор тестовых импульсов предназначен для формирования тестовых последовательностей световых импульсов при реализации методов определения КЧСМ, ВВ, ВЗВ и метода определения лабильности. Генератор может быть выполнен на основе функционального генератора AD9833 Analog Devices. Источником световых мельканий служат светодиодный источник света заданной яркости и спектральной характеристики.

Генератор тактовых импульсов предназначен для внешнего тактирования микроконтроллера для обеспечения большей устойчивости работы и большей тактовой частоты.

ЖК графический индикаторный модуль представляет собой графический модуль с малым временем отклика, подключенный к микроконтроллеру через блок согласования, который предназначен для предъявления испытуемому тестового изображения при реализации метода оценки РДО.

Пульт испытуемого предназначен для формирования испытуемым управляющих сигналов по изменению параметров тестовых стимулов, а также для фиксирования результатов измерений.

Предусмотрен USB-интерфейс для обеспечения возможности соединения микропроцессорного АПК с ЭВМ для последующей обработки результатов исследований и интерпретации данных.

В настоящее время разработан прототип АПК, ведется работа по его практической апробации и эксплуатационному сопровождению.

Выводы

Таким образом, в ходе проведенного исследования разработан комплекс методических и технических средств для исследования сенсорно-моторного взаимодействия человека-оператора и технической системы.

Отличительной чертой разработанных способов является их большая точность и достоверность в сравнении с аналогами, простота, ориентация на максимальную перцептивную простоту тестовой информации.

Главным достоинством разработанного методического комплекса является возможность повторного и неоднократного тестирования испытуемых для отслеживания динамики развития ПВК, тренировки и подготовки оперативного персонала, использования в составе специализированных тренажеров развития операторского навыка.

Разработано техническое обеспечение для реализации комплекса методического обеспечения на основе микропроцессорного АПК, который позволяет реализовать все разработанные методы при обеспечении требуемой точности, не требует подключения дополнительных инструментальных средств, прост в эксплуатации и пригоден для проведения массовых обследований.

В настоящее время представляется актуальным дальнейшее совершенствование методической базы исследований, проведение массовых экспериментов с применением разработанных средств для формирования банка данных. Актуальным является развитие системы комплексной оценки операторской пригодности на основе анализа отдельных данных психофизиологических исследований сенсорно-моторных характеристик человека.

Решение поставленной задачи создаст предпосылки к формулировке требований к обеспечению информационной совместимости человека и технической системы, разработке модели профессиональной пригодности человека-оператора, развитию теории человеко-машинного взаимодействия и разработке адаптивных интерфейсов.

Приведенные в статье результаты получены при поддержке гранта АВЦП 2011 № 2.1.2/11610 "Методическое, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение исследования временных аспектов сенсорного восприятия человека-оператора".

Список литературы

1. Устюжанин А. Д. Предельные значения динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2006, № 1. С. 117—124.
2. Clemens P. L. Human Factors and Operator Errors // Conference Presentation / Website Posting, 2nd edition, Jacobs Sverdrup, 2002, February.
3. System Safety Handbook, Chapter 17: Human Factors Principles & Practices. Federal aviation administration. 2000, December.
4. Брусенцов В. Г., Шапка А. В., Гончаров А. В., Бугайченко И. И., Брусенцов О. В. Надежность железнодорожных операторов — проблемы объективной оценки // Коммунальное хозяйство городов. 2005. № 64. С. 47—52.
5. Руководство по профессиональному отбору граждан и военнослужащих для прохождения военной службы в органах и войсках ФПС России на должностях солдат, матросов, сержантов и старшин: Приказ федеральной пограничной службы РФ № 700 от 16 октября 1996 г.
6. Основы инженерной психологии: под ред. Ломова. М.: Высшая школа, 1986. 448 с.
7. Егорова Т. С., Голубцов К. В. Влияние видеодисплея на зрительные функции слабовидящих школьников // Информационные процессы. 2003. Т. 3. № 2. С. 123—127.
8. Патент 2207809 РФ, МКИ7 А 61 В 5/16. Способ увеличения точности оценки критической частоты слияния световых мельканий / А. Г. Исаев, И. В. Петухов, В. В. Рожнецов. Оpubл. 10.07.2003, Бюл. № 19. 3 с.
9. Патент 2204932 РФ, МКИ7 А 61 В 3/00. Способ оценки точности определения критической частоты световых мельканий / В. В. Рожнецов, Т. А. Лежнина, И. В. Петухов. Оpubл. 27.05.2003, Бюл. № 15. 4 с.
10. Патент 2195174 РФ, А 61 В 5/16. Способ определения времени инерционности зрительной системы человека / В. В. Рожнецов, И. В. Петухов. Оpubл. 27.12.2002, Бюл. № 36. 10 с.
11. Патент 2209030 РФ, МКИ7 А 61 В 5/00. Способ определения времени восприятия зрительной информации / В. В. Рожнецов, И. В. Петухов. Оpubл. 27.07.2003, Бюл. № 21. 8 с.
12. Патент № 2372834 РФ. Способ определения времени инерционности зрительной системы человека / И. В. Петухов. Оpubл. 20.11.2009, Бюл. № 32.
13. Петухов И. В. Исследование адаптации человека-оператора к зрительно-напряженному труду // Системы управления и информационные технологии. 2006. № 4 (26). С. 95—97.
14. Виноградов М. И. Физиология трудовых процессов. М.: Медицина, 1966. 367 с.
15. Патент № 2322187 РФ. Способ оценки соотношения процессов возбуждения и торможения в центральной нервной системе / А. В. Песошин, И. В. Петухов, В. В. Рожнецов. Оpubл. 20.04.2008, Бюл. № 11. 7 с.
16. Патент № 2326595 РФ. Способ оценки времени реакции человека на движущийся объект / А. В. Песошин, И. В. Петухов, В. В. Рожнецов. Оpubл. 20.06.2008, Бюл. № 17. 17 с.
17. Патент № 2381743. Способ определения уровня соотношения процессов возбуждения и торможения в центральной нервной системе / И. В. Петухов. Оpubл. 20.02.2010, Бюл. № 5. 9 с.
18. Патент № 2381742. Способ определения способности к предвидению событий / И. В. Петухов. Оpubл. 20.02.2010, Бюл. № 5. 8 с.

ИНФОРМАЦИЯ

30 июня—2 июля 2012 г. в г. Петрозаводск
на базе Института прикладных математических исследований Карельского НЦ РАН состоится

Международный семинар

"Networking Games and Management"

Научную программу семинара планируется сконцентрировать на следующих направлениях:

- сетевые игры и управление, задачи оптимальной маршрутизации;
- аукционы, переговорные задачи, игры с обучением и адаптивные игры.

Подробную информацию о конференции см. сайте:

<http://mathem.krc.karelia.ru/event.php?id=170&plang=r>

А. С. Иванов, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой,
as_ivanov@info.sgu.ru,

Р. Ю. Лапковский, аспирант,
robitpub@gmail.com,

Д. А. Уков, аспирант,
k@sgu.ru,

Саратовский государственный университет,
Л. Ю. Филимонюк, инженер-исследователь,
filimonyukleonid@mail.ru,

Институт проблем точной механики
и управления РАН, г. Саратов

Причинно-следственный подход к расследованию аварийных ситуаций в человеко-машинных системах

Рассмотрен подход к актуальной задаче анализа аварийных ситуаций в сложных эргатических системах, связанного с необходимостью обработки большого количества разнородной информации, что в значительной мере усложняет работу лиц, проводящих расследование. Предложенный подход облегчает расследование таких ситуаций и позволяет с достаточной степенью достоверности определить причину их возникновения.

Ключевые слова: расследование, авария, происшествие, кибернетические системы, сложные системы, эргатические системы, человеко-машинные системы, причинно-следственный комплекс

Введение

Вследствие усложнения человеко-машинных систем возрастает число техногенных аварий, поэтому необходимо не только проводить профилактические меры по их предотвращению, но и иметь эффективные модели и алгоритмы расследования и установления причин, что, в свою очередь, поможет предотвратить подобные происшествия в будущем.

Поиск причин аварий в сложных мехатронных, эргатических системах [1] на сегодняшний день связан с напряженной работой групп высококвалифицированных специалистов, занимающихся расследованием. Работа состоит в сборе многочисленной информации, связанной с аварией, ее накоплении и структурировании, получении новых фактов на основе имеющихся, построении причинно-следственной цепочки развития событий и формулировании выводов о причинах происшествия. Этот процесс занимает достаточно длительное время из-за необходимости подбора таких вариантов развития событий, которые бы соответствовали собранной информации, и требует подключения дополнительных банков данных по различным видам учета, по статистике и т. д. Более того, приходится учитывать тот факт, что некоторые из полученных сведений могут быть ложными из-за ошибок, допущенных при их сборе, и сомнительных показаний свидетелей. Таким образом, приходится проводить расследование в условиях неполных (потеря информации, умышленное уничтожение ее виновными лицами и т. д.) и противоречивых данных.

Существуют как объективные (сложность системы, большая протяженность автомобильных и воздушных путей и трасс, погодные условия и т. д.), так и субъективные факторы, затрудняющие расследование аварии. Последние связаны в основном с тем, что осмотр места происшествия, составление протоколов и само расследование проводится соответствующими должностными лицами. Таким образом, на каждом этапе расследования большую роль играет человеческий фактор, из-за которого появляется множество ошибок и неточностей при обработке информации.

Например, в протоколе осмотра места ДТП фиксируются лишь те расстояния, которые важны с точки зрения инспектора и могут быть неоднозначно интерпретированы. В таких условиях сделать достаточно точный вывод становится сложной задачей.

Поэтому поиск причин возникновения критических ситуаций, поломок и аварий в сложных эргатических системах (самолет, железнодорожная система, человеко-машинные системы управления и т. п.) является на сегодняшний день сложной и актуальной задачей.

Особенностью рассматриваемых систем является то, что они, как правило, состоят из большого числа взаимодействующих компонентов различной природы, каждый из которых описывается своей моделью, своим набором характеристик и свойств. Иллюстрация взаимосвязи целей, критериев качества, свойств с процессами человеко-машинной системы, предложенная чл.-корр. РАН А. Ф. Резчиковым, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Взаимодействие разнородных процессов в человеко-машинной системе: ее цели, критерии качества и свойства

Существует множество методов поиска неисправностей в простых системах и достаточно простых частях сложных систем, что позволяет описать и проанализировать все части этой системы отдельно друг от друга. Однако часто оказывается, что причины неправильного функционирования сложной системы кроются не в какой-либо одной части системы, а сразу в нескольких, а также в характере их взаимодействия. Выявить такие причины можно, лишь рассматривая всю систему в целом, с учетом взаимодействия и взаимовлияния всех ее частей.

Подобную задачу позволяют решать методы, основанные на достаточно общих моделях описания сложных систем, которые позволяют охватить не только составные части системы по отдельности, но и всю систему с учетом всевозможных взаимосвязей между составляющими.

Одной из таких общих моделей является модель причинно-следственных комплексов (ПСК), предложенная в работе [2]. Благодаря общности структуры ПСК появляется возможность строить модель сложной системы с учетом взаимодействия различных процессов и объектов.

Модель ПСК позволяет разрабатывать принципы и методы поиска причин неправильного, "нарушенного" [3] функционирования сложных систем.

Причинно-следственный подход для описания сложных систем

В основе предлагаемого подхода к поиску причин аварий в сложных системах лежит модель ПСК как наиболее общая для описания сложных эргатических систем [2]. Отметим, что существует ряд разработок, основывающихся на данной модели [4, 5]. В них предлагаются эффективные методы и принципы построения структур ПСК для моделирования функционирования сложных систем, состоящих из большого числа разнородных, активно взаимодействующих между собой процессов. Именно такими являются большинство современных сложных эргатических систем, таких как предприятие, электростанция, самолет и т. д. В работе [5] приведен подход к моделированию дорожно-транспортной и авиационной систем.

Причинно-следственный подход дает возможность моделирования сложных систем в самых разных ситуациях, в том числе и аварийных. В ПСК вводится информация об исходном состоянии системы, а результатом моделирования является изменившееся состояние или его интерпретация в виде события-следствия.

Пусть имеется сложная система, функционирующая во множестве состояний Q . Тогда процесс функционирования системы можно представить в виде последовательной цепочки смены состояний, а ПСК позволяет проводить моделирование функционирования сложной системы, т. е. формировать конечное состояние системы на основе исходного состояния и в результате определять событие-следствие.

Так как прямая задача может быть решена однозначно, ПСК позволяет единственным образом определить конечное состояние по исходному. Однако обратная задача в общем случае неоднозначна, и каждому конечному состоянию может соответствовать несколько исходных. В этом случае необходимо оперировать множествами исходных и конечных состояний, которые необходимо классифицировать.

Функциональные отказы и классы неисправностей

Одним из ключевых понятий рассматриваемого метода является функциональный отказ (ФО), заключающийся в нарушении работоспособного состояния объекта [3].

Аварии в сложных эргатических системах, как правило, вызываются именно теми или иными ФО каких-либо разнородных частей системы, связующих их механизмов, а также всей системы в целом.

Теория ПСК, а также разработки, основанные на данной теории, позволяют построить детерминированную модель функционирования сложной системы. Модель позволяет задавать параметры и исходное состояние системы и, как результат, получать конечное состояние (событие) и изменившиеся параметры, причем исходные параметры и состояние системы должны однозначно определять результат моделирования.

Из этого следует, что ФО, воспроизводимые в процессе моделирования с помощью ПСК, заложены в исходном состоянии системы. Благодаря этой особенности становится возможным, изменяя определенным образом параметры исходного состояния системы, моделировать любой ФО.

Каждый ФО может быть вызван рядом неисправностей (под неисправностью будем понимать не только дефекты техники, но и ошибки человека, взаимодействующего с техникой), которые задаются значениями параметров исходного состояния. Неисправности, вызывающие ФО, допускаемые данной системой, можно разбить на классы. Для каждого класса можно определить множество исходных состояний, в которых заложены проявления указанных неисправностей (рис. 2). Особые состояния

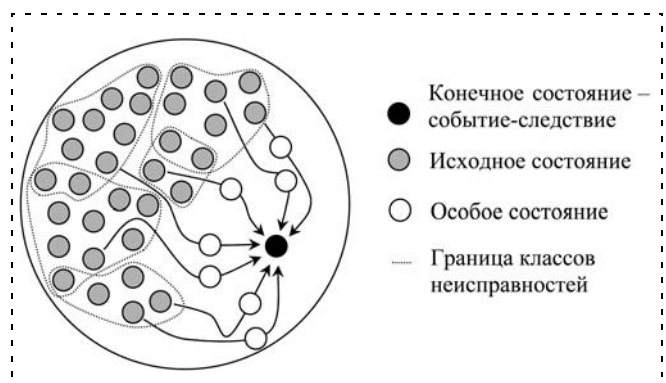


Рис. 2. Распределение исходных состояний по классам неисправностей

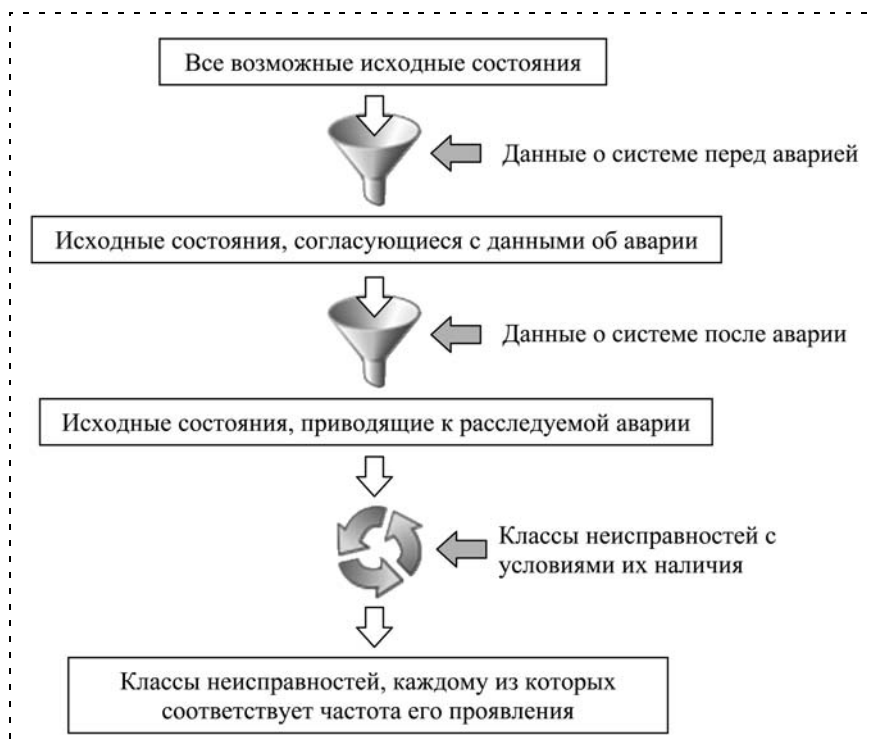


Рис. 3. Применение фильтров событий для сокращения множества исходных состояний

были рассмотрены в [5]. Заметим, что одно и то же исходное состояние может принадлежать одновременно множествам, соответствующим разным классам неисправностей. Для начальной равнозначности классов неисправностей необходимо, чтобы множества исходных состояний, соответствующих каждому классу неисправностей, были равномощны.

Допустим, имеется информация о наборе вероятных неисправностей, их проявлении в исходном состоянии, а также некоторые данные об исходном и конечном состояниях системы для конкретной аварии. В таком случае можно подобрать такое исходное состояние системы, чтобы ее конечное состояние после моделирования было полностью согласовано с данными об аварии.

Однако такой прямой поиск связан с большими временными затратами на перебор огромного числа вариантов исходных состояний. Поэтому предлагается сократить перебор за счет определения множества возможных неисправностей, за счет информации об аварии, статистической информации, информации из различных баз данных и т. д. Этот процесс осуществляется с помощью фильтров событий. Применение фильтров рассмотрим на примере расследования аварий в дорожно-транспортной системе (рис. 3).

Формирование множества возможных исходных состояний

В процессе анализа произошедшей аварии эксперты и службы, проводящие расследование, могут выделить некоторые данные, такие как расположе-

ние осколков, тормозной след и т. п. С помощью полученной информации, используя некоторые расчетные формулы, можно получить физические характеристики объектов и участников в момент, непосредственно предшествующий аварии. Так, например, в случае аварии на перекрестке авторы [6] предлагают следующий расчет параметров. Предположим, столкновение происходит так, как изображено на рис. 4, где S_1, S_4 — тормозные пути автомобилей; θ, φ — углы отскока, а S_2, S_3 — расстояния отскока; $V_1, \dots, V_6$ — скорости автомобилей в соответствующие моменты времени. Процесс столкновения разбивается на три этапа: движение перед торможением; движение во время торможения до столкновения; движение после столкновения.

Согласно полученным данным можно рассчитать скорости в каждый из выделенных этапов. Так, для первого автомобиля можно записать:

$$V_3 = \sqrt{254\varphi S_2}; V_4 = V_3 \cos \varphi + \frac{W_1}{W_2} V_2 \cos \theta;$$

$$V_6 = \sqrt{254\varphi S_2 + V_4^2},$$

где W_1, W_2 — массы первого и второго автомобилей, соответственно.

Имея скорость перед началом торможения, можно определить время выезда на перекресток и т. д.

Итак, на первом этапе с помощью более конкретных данных, полученных с места аварии, можно определить часть параметров исходного состояния системы и, соответственно, сократить множество возможных исходных состояний.

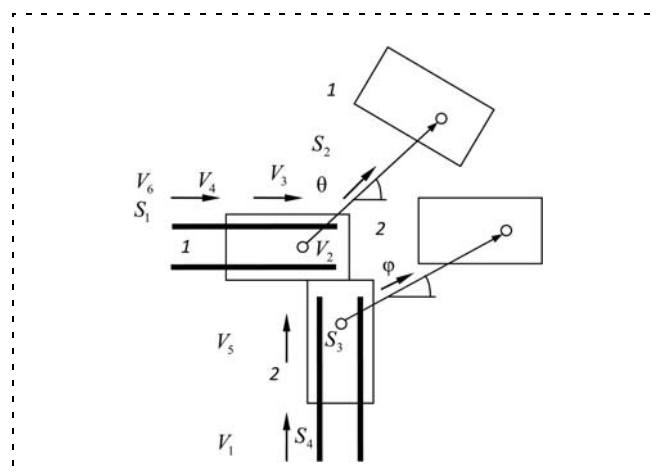


Рис. 4. Схема столкновения автомобилей на перекрестке

Несмотря на значительное сокращение множества исходных состояний с помощью уточнения, оно все равно остается бесконечным и не поддается полному перебору за счет того, что значения некоторых параметров лежат в интервале из R .

Пусть состояние системы описывается n параметрами, и для исходного состояния k из них определены; $m = n - k$ — число оставшихся параметров. Определим множество возможных исходных состояний (событий) для моделирования следующим образом: $Q_S = \{q | q \in Q; q = (q_1, \dots, q_k, q_{k+1}, \dots, q_n)\}$, где параметры $q_1, \dots, q_k$ имеют определенные фиксированные первым фильтром значения, а остальные параметры — переменные и задаются следующим образом $q_i \in \{a | a \in R; a_i < a < b_i; \exists j \in Z: a = a_i + jh_i\}$, $i = \overline{k+1, n}$, где $a_i, b_i, h_i \in R$. Иными словами, значение каждого из параметров $q_{k+1}, \dots, q_n$ принадлежит множеству точек из разбиения отрезка $[a_i, b_i]$ с шагом h_i . Теперь можно осуществлять перебор по элементам множества Q_S . Каждый из вариантов перебора используется ПСК из работы [5] для моделирования и получения конечного состояния системы.

В итоге множество исходных состояний представляет собой конечное множество наборов параметров системы, значение каждого из которых находится в определенном интервале.

Обозначим функционал используемого ПСК как отображение $\kappa: Q_S \rightarrow Q$, которое преобразует исходное состояние системы в конечное.

Следующим этапом рассмотрим отображение: $\varphi: Q \rightarrow \{0, 1\}$, являющееся формальным описанием условия, при котором конечное состояние системы является аварийным и согласуется с данными об аварии. На основе данного отображения построим множество $Q_R = \{q | q \in Q_S; \varphi(\kappa(q)) = 1\}$. Таким образом, $Q_R \subset Q$ и является множеством исходных состояний системы, приводящих к аварии и согласующихся с данными об аварии, т. е. во множество Q_R входят только те элементы из Q_S , конечные состояния которых удовлетворяют функции φ .

Классификация неисправностей

Далее выделяется набор классов возможных неисправностей (возможных причин аварии), который может быть сформирован на основе статистических данных о происшествиях данного типа. Каждому из l выбранных классов неисправностей соответствует множество P_i вида

$$P_i = \{p | p \in Q_R; \psi_i(p) = 1\}, \text{ где } \psi_i: Q \rightarrow \{0, 1\}, i = \overline{1, l}.$$

В силу определения множества P_i — конечны. Отображение $\psi_i(p)$ представляет собой условие, при котором считается, что в исходном состоянии p заложена неисправность i -го класса. Таким образом, мы распределяем исходные состояния по

классам неисправностей, порождающих функциональные отказы.

Весом класса неисправностей будем называть число $w_i = |P_i|$. Наиболее вероятным считаем класс неисправностей (причин), имеющий наибольший вес. Заметим, что их может быть несколько. Таким образом, если нет дополнительной (возможно статистической) информации, вероятность каждого класса неисправностей зависит только от числа исходных состояний множества Q_R , в которых заложена неисправность рассматриваемого класса.

Рассмотрим примеры поиска причин аварий в дорожно-транспортной и авиационно-транспортной системах.

Пример поиска причины аварии в дорожно-транспортной системе

В качестве примера рассмотрим аварию, произошедшую в дорожно-транспортной системе: столкновение автомобилей, пересекающихся перекресток. Моделирующий ПСК приведен в работе [5].

На первом шаге необходимо выделить набор классов неисправностей $P_i = \{p | p \in Q_R; \psi_i(p) = 1\}$, а также задать функции ψ_i для каждого из них. Классы неисправностей, выделенные в данном примере, приведены в табл. 1.

Заметим, что данный список может быть существенно расширен и детализирован, т. е. в него можно как добавить дополнительные классы неисправностей, так и разбить существующие на более мелкие и подробные подклассы. Этот процесс, очевидно, можно продолжать до бесконечности, степень и точность детализации определяются областью приложения, а также постановкой задачи расследования.

На втором шаге необходимо воспользоваться информацией, полученной непосредственно с места аварии, снятой с камер видеонаблюдения, различных систем контроля, статистических источников, извлеченной из баз данных по контролю транспортных средств, по медицинскому контролю водителей и т. д. После обработки указанная информация поможет конкретизировать состояние системы перед аварией. Таким образом, реализуется первый фильтр, который сужает круг возможных

Таблица 1

Список выбранных классов неисправностей

Класс неисправностей	Условие возникновения неисправности (функция ψ)
Отказ тормозов i -го водителя	Значение параметра "коэффициент эффективности торможения" для i -го водителя меньше 21
Замедленность реакции i водителя	Значение параметра "время реакции" для i -го водителя больше 800 мс
Малый радиус обзора i -го водителя	Значение параметра "радиус обзора" для i -го водителя меньше 3 м
Рассинхронизация светофора	Неправильное соответствие цветов двух светофоров

исходных состояний, исключив из них те, которые противоречат собранной информации.

В рассматриваемом примере в качестве такой информации выступает ряд характеристик, собранных на месте аварии, а также в базе данных технических осмотров: длина тормозного пути; угол отскока; расстояние от места удара; масса автомобиля; место столкновения; коэффициент сцепления с дорогой; данные технического осмотра о состоянии тормозных систем автомобилей.

С использованием данной информации и представленных формул становится возможным определить ряд параметров исходного состояния $q_1, \dots, q_k$ дорожно-транспортной системы: положения автомобилей; скорости автомобилей; направления движения автомобилей; коэффициент эффективности торможения автомобилей; коэффициент сцепления с дорогой.

На третьем шаге необходимо определить набор параметров исходного состояния системы $q_{k+1}, \dots, q_n$, которые не были определены на втором шаге. Заметим, что их число непосредственно зависит от полноты, достоверности и количества информации, собранной и использованной на втором шаге. Поэтому, чем информации больше и чем она точней, тем более точно будет определено исходное состояние.

Для каждой из оставшихся неопределенных характеристик необходимо выделить интервал ее возможных значений. Заметим, что ширина этого интервала может быть сужена также за счет собранной дополнительной информации.

После определения диапазона интервалов значений параметров происходит очередное сужение множества возможных состояний системы, что позволяет перебрать различные комбинации значений параметров с заданным шагом. Множество Q_S является множеством всех исходных состояний с различными комбинациями значений подбираемых параметров.

Следующим шагом решения поставленной задачи является моделирование системы для каждого из исходных состояний множества Q_S с помощью имеющегося ПСК.

Далее с помощью условий второго фильтра можно построить множество исходных состояний Q_R , удовлетворяющих конечным данным об аварии. В рассматриваемом примере условиям фильтра (т. е. функции φ) удовлетворяют те конечные состояния, в которых модельное место столкновения автомобилей достаточно близко к реальному, полученному на первом шаге. Отображение $\varphi : Q \rightarrow \{0, 1\}$ может быть определено следующим образом:

$$\varphi(q) = \begin{cases} 0, & \gamma(q) \notin O_\varepsilon(r), \\ 1, & \gamma(q) \in O_\varepsilon(r), \end{cases} \text{ где } \gamma : Q \rightarrow R^2, r \in R^2.$$

Далее для каждого из определенных ранее классов неисправностей посчитаем его вес w_i . Наиболее вероятной неисправностью считается неисправность, имеющая наибольший вес.

Пример поиска причины аварии в авиационно-транспортной системе

В качестве примера аварии в авиационно-транспортной системе (АТС) рассмотрим аварию на этапе посадки самолета. Алгоритм поиска причин аварии в АТС аналогичен примеру поиска причины аварии в дорожно-транспортной системе, поэтому отметим лишь особенности, характерные для данной системы.

Для построения условий первого фильтра при расследовании аварии эксперты могут получать информацию из банков данных уже проведенных расследований, например, данные о причинах аварий и траекториях для самолетов определенного типа (широкофюзеляжного, легкомоторного и т. д.). На основании этой информации можно исключить те исходные состояния, которые недопустимы для данного типа судна.

Далее необходимо отбросить те исходные состояния, которые не имеют отношения к конкретному воздушному судну. Используется информация из средств объективного контроля: из бортовых самописцев самолета, наблюдателей с земли, средств визуального наблюдения и так далее. Анализ данной информации позволит сузить коридоры траекторий полета конкретного самолета и отбросить те причины аварий, которые не соответствуют ей.

Следующий фильтр используется для построения логических выводов о причине происшествия на основании информации, собранной на месте аварии.

В качестве примера рассмотрим аварию, произошедшую на этапе посадки воздушного судна. В рассматриваемом примере можно выделить пять классов неисправностей, указанных в табл. 2.

Данный список также может быть существенно расширен и детализирован. Например, в монографии [3] рассматриваются 20 классов неисправностей.

Далее необходимо применить информацию, полученную непосредственно с места аварии, а также с камер наблюдения, различных систем контроля, статистических источников, полученную из баз данных по контролю транспортных средств, по предполетному медицинскому контролю пилотов и т. д.

Таблица 2

Список выбранных классов неисправностей

Класс неисправностей	Условие возникновения неисправности (функция ψ)
Отказ правого двигателя	Значение, возвращаемое функцией "тяга 1-го двигателя", равно 0
Отказ системы выпуска шасси	Значение, возвращаемое логической функцией "шасси выпущено", равно <i>false</i>
Неверные действия экипажа при посадке с боковым ветром	Значение логического параметра "стратегия борьбы с боковым ветром" равно <i>false</i>
Отказ тормозной системы шасси	Значение параметра "коэффициент торможения шасси" равно 1
Отказ системы реверса двигателя	Значение, возвращаемое функцией "торможение реверсом", равно 1

Эта информация после преобразования и формализации поможет в какой-то степени конкретизировать исходное состояние системы перед аварией.

В рассматриваемом примере в качестве такой информации выступает ряд характеристик, собранных на месте аварии, а также в базе данных технических осмотров: расстояние от начала посадки до места аварии; угол между штатным направлением захода на посадку и реальным направлением воздушного судна на месте аварии; наличие следов пожара на воздушном судне; масса воздушного судна; данные предполетного осмотра о состоянии силовой установки, авионики и механизмов воздушного судна.

Используя данную информацию, можно определить ряд параметров исходного состояния АТС: наличие топлива в топливной системе; реальное направление захода на посадку; высоту начала предпосадочного снижения; скорость, которую имело воздушное судно непосредственно перед аварией.

Таким образом, предложенный подход позволяет проводить расследование происшествий в различных человеко-машинных системах и определять причины их возникновения.

Заключение

Поиск причин аварий в эргатических системах является технически сложной и трудоемкой работой. Она осуществляется большими группами экспертов, исследователей и занимает продолжительное время. Кроме того, человеческий фактор влечет за собой большое число ошибок и неоднозначностей.

В рамках теории ПСК авторами предложен подход для поиска причин аварий в человеко-машинных системах. Он позволяет в значительной мере автоматизировать процесс анализа информации, уменьшить влияние человеческого фактора и выявить ошибки, допускаемые на этапе сбора данных.

Введенная система фильтров событий позволяет исключить невозможные варианты развития событий, а также те ситуации, которые не согласуются с фактическими данными об аварии.

Рассмотренный метод применен для решения задач поиска причин аварий в дорожно-транспортной и авиационно-транспортной системах.

Список литературы

1. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—10.
2. Резчиков А. Ф., Твердохлебов В. А. Причинно-следственные модели производственных систем. Саратов: Издательский центр "Наука", 2008. 137 с.
3. Новожилов Г. В., Неймарк М. С., Цесарский Л. Г. Безопасность полета самолета: концепция и технология. М.: МАИ, 2007. 196 с.
4. Резчиков А. Ф., Иванов А. С., Домнич В. С. Анализ аварий в человеко-машинных системах с использованием моделей причинно-следственных связей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 7. С. 30—35.
5. Иванов А. С., Лапковский Р. Ю., Уков Д. А., Филимонов Л. Ю. Кибернетический подход к моделированию разнородных процессов в мехатронных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 16—20.
6. Коллинз Д., Моррис Д. Анализ дорожно-транспортных происшествий. М.: Транспорт, 1971. С. 76—82.

ИНФОРМАЦИЯ

24—26 апреля 2012 года,
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

29—31 мая 2012 года,
Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

2—4 октября 2012 года,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

Распределенная во времени и пространстве XXV Международная научная конференция

«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ» (ММТТ-25)

Председатель конференции — академик РАН Г. И. Марчук

Направления работы конференции:

1. Качественные и численные методы исследования дифференциальных уравнений
 2. Оптимизация и оптимальное управление технологическими процессами
 3. Математическое моделирование технологических процессов
 4. Математическое моделирование и проектирование инженерно-экологических систем
 5. Компьютерная поддержка производственных процессов
 6. Интеллектуальные системы в технике и технологиях
 7. Математические методы и задачи в медицине и биофизике
 8. Математические методы в экономике, менеджменте и гуманитарных науках
 9. Информационные технологии в технике и образовании
 10. Математическое моделирование информационно-измерительных и телеметрических систем
- Во время работы конференции состоится Школа молодых ученых (ШМУ-17)

Подробная информация о конференции и условиях участия в ней
размещается на сайте <http://mmtt25.sstu.ru>

УДК 629.3.052

К. А. Палагута, канд. техн. наук, проф.,
А. А. Алексеев, аспирант,
alexeews@mail.ru,
Московский государственный
индустриальный университет (МГИУ)

Метод формирования области поиска для оптимизации траектории уклонения автомобиля от лобового столкновения

Рассматривается метод, позволяющий сформировать пространство поиска для определения оптимальной опорной кривой маневра уклонения автомобиля от лобового столкновения с неуправляемым динамическим препятствием. Предложены алгоритмы формирования исходного пространства поиска, а также алгоритм определения принадлежности кривых исходного пространства поиска конечному пространству поиска. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: маневр уклонения, пространство поиска оптимальной кривой

Введение

Сегодня ведущие мировые автопроизводители (Mercedes, BMW, Volvo, Volkswagen и др.) в сотрудничестве с лидерами рынка информационных технологий, такими как Intel и AMD, принимают активное участие в работах по созданию автоматизированных транспортных средств (ТС), способных решать задачи транспортировки грузов в сложных недетерминированных средах без непосредственного участия человека в процессе управления. Кроме того, ярким примером живого интереса к такого рода проектам со стороны как мировой научной общественности, так и компетентных органов государственного управления могут служить соревнования DARPA [1], проводимые ежегодно управлением перспективного планирования оборонных научно-исследовательских работ США. Следует заметить, что в рамках работ над автоматизированными ТС традиционно особое внимание уделяется реализации систем, способных решать задачи, связанные с уклонением от столкновений с динамическими препятствиями. Данный вопрос имеет особую актуальность, поскольку в последние несколько лет ведущие автопроизводители стали внедрять в свои продукты системы активной безопасности, помогающие води-

телю во время управления автомобилем [2]. Следует особо отметить, что одним из важнейших элементов подобных систем являются системы планирования оптимальных траекторий движения ТС, которые, в свою очередь, нуждаются в решениях, позволяющих формировать пространство поиска оптимальных траекторий.

Постановка задачи, определение базовых требований

При анализе схемы, иллюстрирующей маневр уклонения автомобиля или автоматизированного ТС от лобового столкновения (рис. 1), можно предположить, что эффективность данного маневра зависит от времени выполнения, причем маневр будет тем эффективнее, чем меньше время потребует на его выполнение. Однако при более детальном рассмотрении схемы маневра становится очевидным необходимость уточнения данного предположения, так как фактически траектория, описываемая первым (управляемым) ТС1, состоит из двух участков, каждый из которых следует рассматривать отдельно. Определим границы данных участков траектории.

Итак, первый интересующий нас участок маневра, который можно назвать **"активной фазой уклонения"**, ограничен точками B_0 и M (рис. 1), где B_0 определяется положением ТС1 в момент начала маневра ($t = 0$), а точка M соответствует моменту времени потенциального столкновения ТС1 и ТС2. Второй участок, который логично назвать **"фазой релаксации"**, ограничен точками M и B_3 . Таким образом, фаза релаксации начинается в момент потенциального столкновения и заканчивается с завершением маневра ТС1.

Эффективность рассматриваемого маневра будет зависеть исключительно от времени прохождения ТС1 участка, соответствующего активной фазе уклонения, так как в общем случае продолжительность фазы релаксации никак не отразится на эффективности маневра. Оптимальной траекторией для активной фазы уклонения будет являться такая, которой соответствует минимальный безопасный радиус поворота ТС1 — $R_{\min}$ [3].

Исходя из приведенных соображений сформулируем основное требование, которое будем предъявлять к опорной траектории маневра уклонения ТС от лобового столкновения. А именно, потребуем, чтобы координаты у точек опорной кривой Tr на участке активной фазы уклонения отличались от координат у точек окружности радиуса $R_{\min}$ не более чем на ΔR , т. е.

$$R_{\min} \leq y(x) \leq R_{\min} + \Delta R, \text{ при } x \in [0, M_x], \quad (1)$$

Обозначим вершины опорного многоугольника B_0, B_1, B_2, B_3 (рис. 2). В соответствии с рассматриваемой моделью ТС [5] точка B_0 при любых условиях будет совпадать с точкой касания дорожного полотна левым задним колесом ТС в момент начала маневра. Координаты точки B_3 будут определяться положением того же колеса в момент завершения маневра. Исходя из данных соображений определим зависимости для расчета положения точек B_0 и B_3 опорного многоугольника.

Поскольку положение точки B_0 определяется исключительно из геометрических параметров ТС, то для простоты будем считать, что $B_{0x} = 0, B_{0y} = 0$. В свою очередь, координату x точки B_3 будем определять, используя следующую формулу:

$$B_{3x} = L_1 + L_2 = 3R_{\min}. \quad (3)$$

Данное предположение основано на том, что расстояние $3R_{\min}$ (рис. 2) является более чем достаточным для выполнения маневра типа "перестроение". А координату y точки B_3 будем определять как

$$B_{3y} = M_y + L_{63}, \quad (4)$$

где $L_{63} = \text{const}$ — минимальное расстояние между ближайшими точками ТС1 и ТС2 в момент времени потенциального столкновения.

Теперь, когда заданы положения точек B_0 и B_3 , нахождение пространства поиска опорной кривой сводится к определению возможных положений для точек B_1 и B_2 .

Следует заметить, что в данном виде задача оптимизации является неразрешимой, так как в общем случае существует бесконечное множество вариаций расположений точек B_1 и B_2 , при которых определяемая ими кривая будет являться потенциально

подходящей на роль опорной траектории. Поэтому для сужения области поиска примем определенные допущения.

Предположим, что точки B_0 и B_1 лежат на одной прямой, то есть $B_{1y} = B_{0y}$. Аналогичное предположение сделаем также относительно точек B_2 и B_3 .

Однако, несмотря на введенные ограничения, задача поиска оптимальной кривой все еще является вычислительно избыточной. Так, например, изучение кривых, для которых координаты вершин опорного многоугольника $B_{1x}, B_{2x} \rightarrow B_{3x}$ лишено всякого смысла [4]. Следовательно, нам необходимо наложить дополнительные ограничения на значения x координат точек B_1 и B_2 .

Предположим, что наиболее приемлемые значения для координат x точек B_1, B_2 лежат на интервале от 0 до $R_{\min}$. Данное предположение основано на результатах серии вычислительных экспериментов и, как показывает практика, позволяет существенно сузить область поиска, одновременно сэкономив вычислительные ресурсы.

Помимо вышеуказанного будем считать область поиска для координат x точек B_1 и B_2 дискретной, т. е. предположим, что для двух "соседних" (следующих друг за другом в сформированном пространстве поиска) кривых координаты искомым точек вычисляются как

$$B_{1,2xi} = B_{1,2xi-1} + \Delta x, \quad (5)$$

где $\Delta x = \text{const}$ — шаг формирования пространства поиска. Тогда исходная область поиска будет иметь вид, изображенный на рис. 3 (показана одинарной штриховкой).

Для наглядной демонстрации формирования исходного пространства поиска покажем данный процесс на числовом примере.

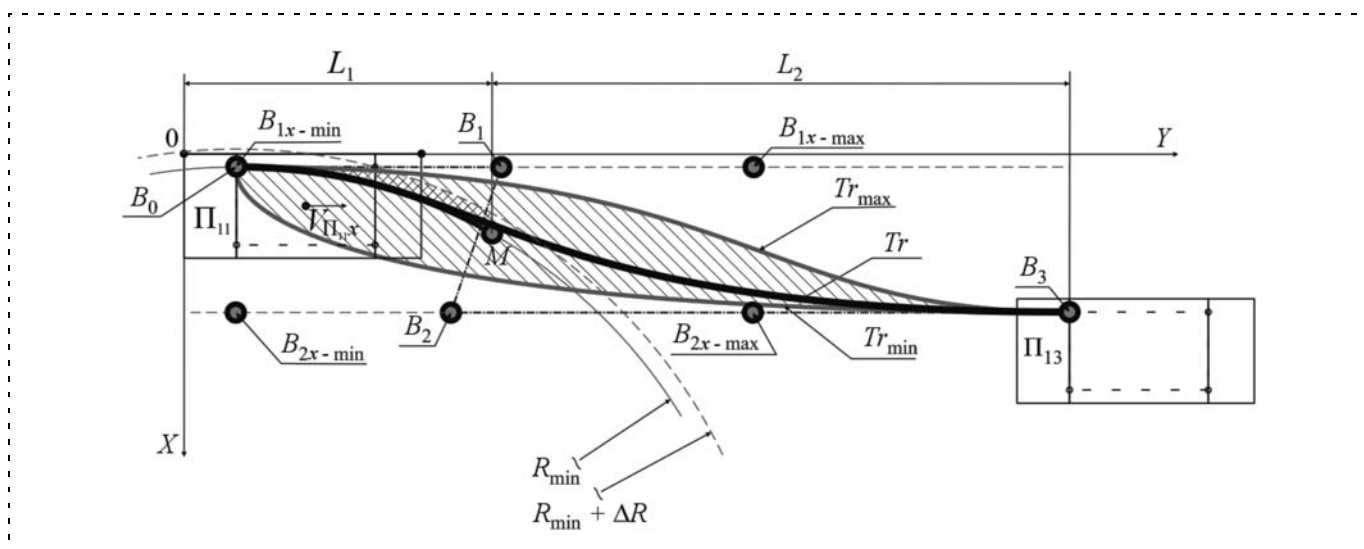


Рис. 3. Исходная (одинарная штриховка) и конечная (двойная штриховка) области поиска:

$Tr_{\max}$ и $Tr_{\min}$ — кривые, ограничивающие исходную область поиска; Tr — искомая кривая, соответствующая оптимальной опорной траектории; L_1 — активная фаза уклонения; L_2 — фаза релаксации; $R_{\min}$ — минимальный радиус разворота; $R_{\min} + \Delta R$ — ограничивающая окружность; $B_{1,n}$ — варианты расположения точек опорного многоугольника

Пример формирования исходного пространства поиска

Пусть имеется семейство кубических кривых Безье, координаты вершин опорных многоугольников которых следующие: $B_0[0, 20]$, $B_1[x, 20]$, $B_2[x, 0]$, $B_3[60, 0]$. (В рассматриваемом примере точки вершин опорных многоугольников кривых смещены по оси OY из соображений удобства.)

Тогда в соответствии со сделанными выше предположениями и допущениями получим следующую группу параметров для формирования исходной области поиска: значения x координат для точек B_1 и B_2 будут изменяться в пределах от 0 до 20. В качестве делителя области поиска примем $d = 100$, тогда из соображения, что $\Delta x = L_1/d$, получим $\Delta x = 0,2$. Все машинные вычисления будем проводить с точностью $p = 10^{-3}$.

С использованием тривиального итерационного алгоритма [6], блок-схема программной реализации которого приведена на рис. 4, сформируем исходное пространство поиска.

Из рис. 4 видно, что на вход алгоритма подаются известные параметры кривой (обозначены B_{0x} , B_{0y} , B_{1y} , B_{2y} , B_{3x} , B_{3y}), интервалы поиска для точек B_1 , B_2 (обозначены B_{10} , B_{11} и B_{20} , B_{21}) и делитель области поиска d . Затем циклично формируется массив всех возможных кривых, удовлетворяющих входным данным.

В силу того, что объем данных, полученных в результате формирования исходного пространства поиска, крайне велик, не будем демонстрировать полную трассировку работы алгоритма, покажем только параметры кривых, ограничивающих исходное пространство поиска, и укажем общее число кривых, попадающих в него (см. таблицу).

Теперь, когда исходное пространство поиска сформировано, для того чтобы привести его к конечному виду, остается исключить кривые, не удовлетворяющие требованию (1).

Окончательное формирование пространства поиска

Сегодня еще не предложен универсальный метод оценки принадлежности кривой некоторой области, поэтому приходится прибегать к пошаговому методу качественной оценки принадлежности кривых к конечной области поиска.

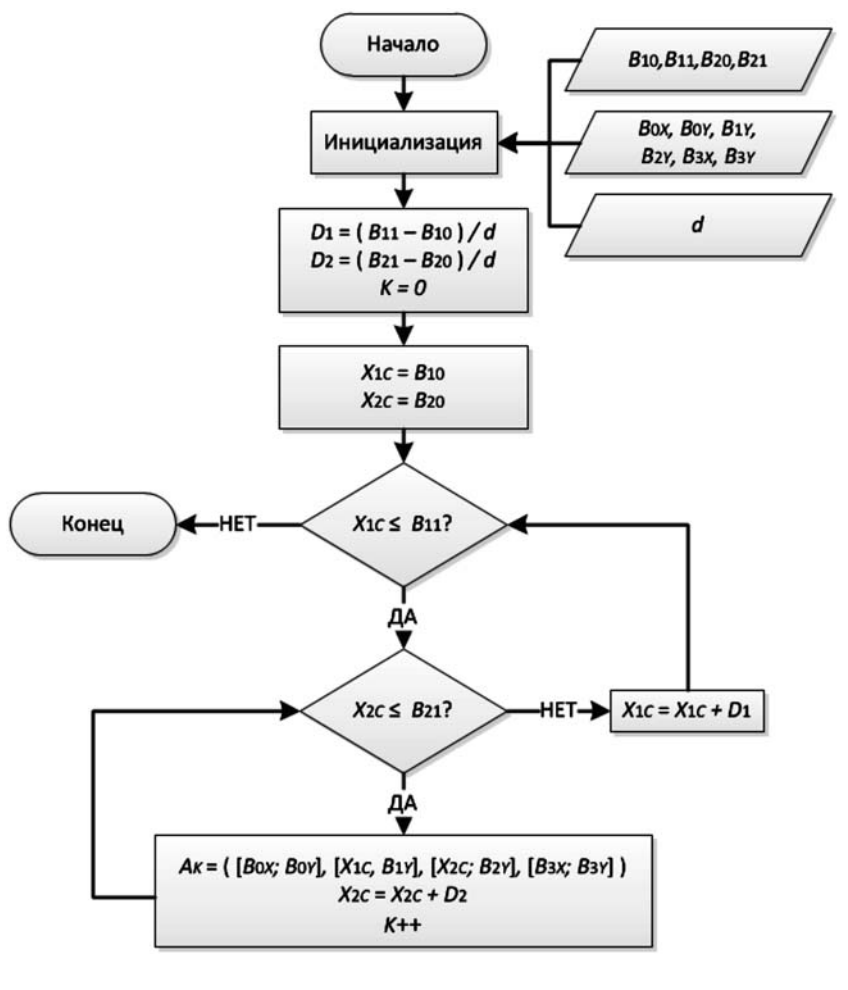


Рис. 4. Блок-схема алгоритма формирования исходного пространства поиска

Координаты вершин опорных многоугольников для кривых, входящих в исходное пространство поиска

№ кривой в пространстве поиска	Координаты точек опорных многоугольников			
	B_0	B_1	B_2	B_3
1	[0, 0]	[0, 0]	[0, 20]	[60, 20]
...	...	...	...	...
10201	[0, 0]	[20, 0]	[20, 20]	[60, 20]

Основная идея, положенная в основу данного метода оценки, продемонстрирована на рис. 5.

Пусть на интервале L_1 необходимо определить, попадает ли исследуемая кривая в "трубку" заданных ограничений, где под трубкой ограничений будем понимать область между двумя концентрическими окружностями радиусов $R_{\min}$ и $R_{\min} + \Delta R$. Для этого будем обходить интервал L_1 с некоторым шагом Δx , таким что $\Delta x \ll \Delta R$ (рис. 5). На каждом шаге вычисляя значение соответствующей координаты кривой y_k , условие принадлежности кривой

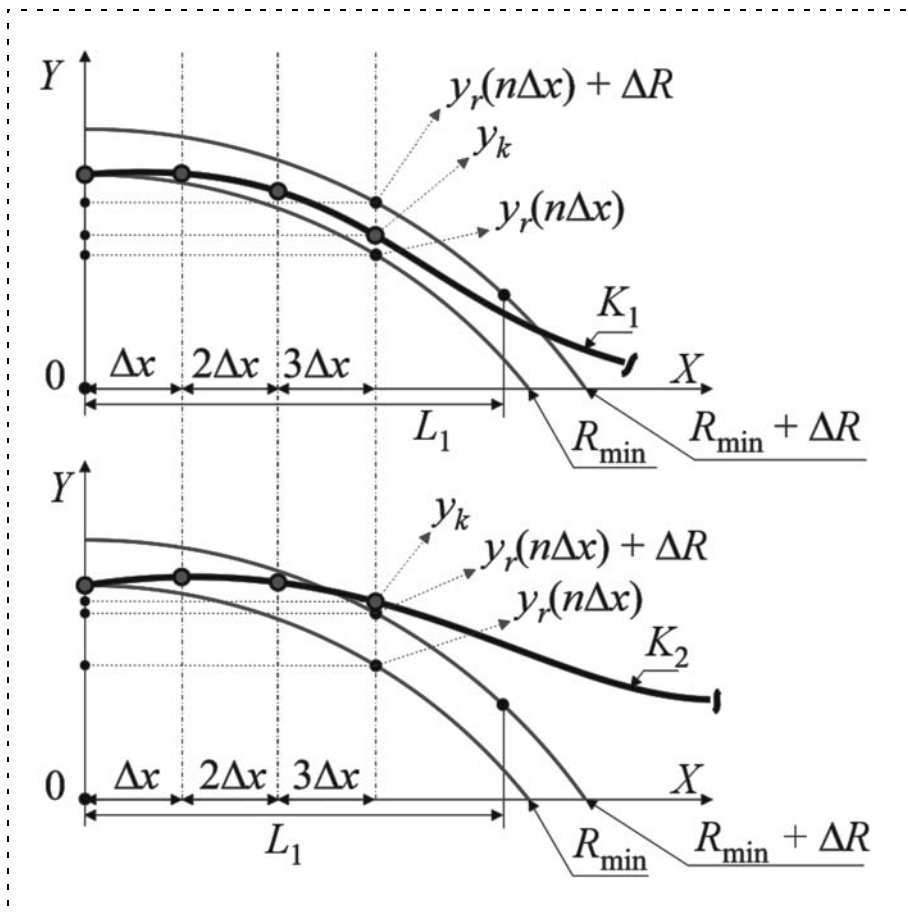


Рис. 5. Иллюстрация метода исключения кривых из исходного пространства поиска

заданной трубке ограничений на интервале L_1 можно записать в виде

$$y_r(n\Delta x) \leq y_k(n\Delta x) \leq y_r(n\Delta x) + \Delta R, \quad (6)$$

при $0 < n < \text{round}\left(\frac{L_1}{\Delta x}\right)$,

где $y_r(n\Delta x)$ — соответствующая координата y ограничивающей окружности; n — номер шага алгоритма; $\text{round}(\cdot)$ — округление до ближайшего целого числа.

Для получения конечного пространства поиска будем последовательно применять данный алгоритм ко всем кривым, входящим в исходное пространство поиска. На выходе данной операции мы получим семейство кривых, полностью удовлетворяющее условию (1). Схематично кривые, входящие в конечное пространство поиска, показаны на рис. 3 (кривые, попадающие в область, помеченную двойной штриховкой). Что касается приведенного выше примера, то в результате исключения из исходного множества поиска кривых, не удовлетворяющих

условию (6) на всем интервале исследования, определено, что координаты x точки B_1 опорного многоугольника лежат в интервале от 17,8 до 20, а координаты x точки B_2 — в интервале от 10,6 до 16,4.

Заключение

Существует масса методов, позволяющих решать задачи параметрической оптимизации на множестве, имеющем конечное число элементов [7], однако данный вопрос выходит за рамки изложенного материала. Что же касается предложенного варианта решения поставленной задачи, а именно, определения пространства поиска оптимальной опорной кривой, то здесь следует отметить крайнюю простоту программной реализации выработанного решения, так как данная особенность является весомым аргументом в пользу предложенного метода при разработке реальных технических устройств. Однако справедливости ради стоит обратить внимание на то, что разработанный метод формирования конечного про-

странства поиска для определения оптимальной опорной траектории является достаточно требовательным к производительности бортовой вычислительной системы эксплуатирующего его устройства.

Список литературы

1. URL: <http://www.darpa.mil/>
2. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Driver_Assistance_Systems
3. Афанасьев Л. Л., Дьяков А. Б., Иларионов В. А. Конструктивная безопасность автомобилей. М.: Машиностроение, 1983. 212 с.
4. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики: Учеб. пособ. СПб.: ВХБ — Петербург, 2003. 550 с.
5. Палагута К. А., Алексеев А. А. Кривые Безье как опорные кривые для построения траектории автомобиля // Инфо 2010 — Качество — Безопасность — Диагностика: Матер. науч.-практ. конф., 1—10 октября 2010 г. Сочи. 624 с.
6. Судоплатов С. В., Овчинникова Е. В. Математическая логика и теория алгоритмов: Учеб. пособ. Новосибирск: Изд. Новосибирского государственного технического университета, 2008. 224 с.
7. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

С. Е. Бузников, канд. техн. наук, доц.,
buznikof@mail.ru,

П. В. Тамбулатов, аспирант,
pasha.vt@yandex.ru,

Московский институт электроники и математики

Анализ решений задачи стабилизации скорости автомобиля

Рассматриваются постановка задачи стабилизации скорости автомобиля и ее решение на основе математических моделей продольного движения центра масс, двигателя и трансмиссии. Анализируются результаты моделирования динамики автомобиля с одношаговым регулятором и ПИ-регулятором с постоянными коэффициентами.

Ключевые слова: автомобильные системы управления, квадратичный функционал качества управления, задача стабилизации, управляющее воздействие, регуляторы, дифференциальные уравнения динамики автомобиля, математические модели двигателя и трансмиссии, анализ ошибок управления

Введение

За относительно короткий исторический период с начала XX в. по настоящее время автомобиль прочно вошел в повседневную жизнь общества. Общее число эксплуатируемой техники в 2011 г. превысило 1 млрд, что соизмеримо с населением Земли в 7 млрд человек. Доступность автомобильной техники и огромное число людей, управляющих автомобилями в разных частях Нового и Старого Света, создают иллюзию простоты управления этими техническими объектами. Реальность же оборачивается астрономическими потерями в дорожно-транспортных происшествиях, в которых, по данным ЮНЕСКО, ежегодно погибает более 1 млн 200 тыс. человек. Только в России это число составляет порядка 30 тыс. погибших и более 200 тыс. получивших ранения.

Естественно, что проблема безопасности автомобильного транспорта давно приобрела мировой уровень значимости и находится в одном ряду с жизненно-важными проблемами энергетики, продовольствия, здравоохранения, образования и другими.

Существо задачи обеспечения безопасности движения автотранспорта сводится к предотвращению столкновений автомобилей с препятствиями и к снижению тяжести последствий столкновений, если предотвратить их не удалось.

Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы безопасности движения автомобилей, развиваемым ведущими зарубежными фирмами, является создание систем активной безопасности и повышения уровня комфортности управления.

Создание эффективных конкурентоспособных систем активной безопасности основано на применении адекватных математических моделей объекта управления и новых алгоритмах обработки информации и управления. Вычислительные возможности современных управляющих компьютеров позволяют использовать для решения задач управления достаточно сложные математические модели объектов и внешней среды.

Особенности управления автомобилем

С точки зрения управления задача предотвращения столкновений сводится к задаче динамической стабилизации вектора состояния X автомобиля [1] в условиях ограниченности вектора управления U , неполной наблюдаемости вектора состояния X и неопределенности некоторых его динамических границ:

$$X_{igr}^H(X, U, t) \leq x_i(t) \leq X_{igr}^B(X, U, t), 1 \leq i \leq n, \quad (1)$$

при $U \in U_{доп}$, где верхние $X_{igr}^B(X, U, t)$ и нижние $X_{igr}^H(X, U, t)$ динамические границы определяются из достаточных условий предотвращения типовых столкновений.

В число основных компонент вектора состояния $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ входят:

- дистанции до попутных и неподвижных препятствий;
- продольная скорость центра масс автомобиля;
- угол поворота управляемых колес;
- скорости продольных и поперечных скольжений колес;
- давления воздуха в шинах;
- температуры перегрева шин и тормозов;
- углы развала и схождения колес;
- износы протекторов и кордов и шин;
- уровни виброускорений по вертикальной, продольной и поперечной осям автомобиля.

В число основных компонент вектора управления $U = (U_1, U_2, U_3, U_4, U_5)^T$ входят:

- номер передачи коробки переключения передач $0 \leq U_1 \leq U_{1max}$;
- положение дроссельной заслонки двигателя $U_{2min} \leq U_2 \leq 1$;
- управляющее воздействие на тормозную систему $0 \leq U_3 \leq 1$;
- управляющее воздействие на рулевое колесо $-1 \leq U_4 \leq 1$;
- управляющее воздействие на механизм сцепления $0 \leq U_5 \leq 1$.

Для автомобилей, не оснащенных системами активной безопасности, в число наблюдаемых координат вектора X входит лишь оценка продольной скорости центра масс, отображаемая на спидометре автомобиля.

Достраивание ненаблюдаемых координат вектора X , их верхних и нижних динамических границ, а также формирование необходимых управляющих воздействий выполняется водителем на основе индивидуального опыта, способности прогнозирования, интуиции и иных личностных качеств водителя. Очевидно, что результативность решения задачи предотвращения столкновений также имеет ярко выраженный индивидуальный характер.

Для объективной оценки качества управления на конечном временном интервале $(t_2 - t_1)$ при решении задачи динамической стабилизации водителем либо системами активной безопасности используется классический квадратичный функционал качества управления [2] $Q(t_2)$, содержащий целевой функционал $Q_1(t_2)$ и функционал потерь, обусловленный нарушением ограничений на вектор состояния X и аддитивную составляющую затрат на управление U :

$$Q(t_2) = Q_1(t_2) + \int_{t_1}^{t_2} L_1(X, \tau) d\tau + \int_{t_1}^{t_2} L_2(X, \tau) d\tau + \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^5 C_{3i} U_i^2(\tau) d\tau,$$

где

$$L_1(X, \tau) = \sum_{i=1}^r C_{1i} [X_i(\tau) - X_{\text{гpi}}^B(\tau)]^2;$$

$$L_2(X, \tau) = \sum_{i=1}^r C_{2i} [X_i(\tau) - X_{\text{гpi}}^H(\tau)]^2;$$

$$C_{1i} = \begin{cases} 0, & \text{если } X_i(\tau) \leq X_{\text{гpi}}^B(\tau); \\ C_{1i}^* \gg 0, & \text{если } X_i(\tau) > X_{\text{гpi}}^B(\tau); \end{cases}$$

$$C_{2i} = \begin{cases} 0, & \text{если } X_i(\tau) \geq X_{\text{гpi}}^H(\tau); \\ C_{2i}^* \gg 0, & \text{если } X_i(\tau) < X_{\text{гpi}}^H(\tau); \end{cases}$$

$$C_{3i} = \begin{cases} 0, & \text{если } U_i(\tau) \text{ формируется автоматически;} \\ C_{3i}^* \gg 0, & \text{если } U_i(\tau) \text{ формируется водителем;} \end{cases}$$

$$Q_1(t_2) = C_0 \int_{t_1}^{t_2} [V_{mz} - V_m(\tau)]^2 d\tau - \text{в случае стабилизации скорости центра масс } V_m \text{ на заданном уровне } V_{mz}.$$

Минимальное значение квадратичного функционала качества управления в задаче Маеира, решаемой без учета функционала потерь, достигается в случае $V_m(t) = V_{mz}$ при использовании автоматической трансмиссии (U_1, U_5) и автоматического управления дроссельной заслонкой двигателя (U_2) при движении по прямым участкам дороги ($U_4 = 0$) без торможений ($U_3 = 0$).

Минимальное значение квадратичного функционала качества управления в задаче Лагранжа, решаемой без учета целевого функционала, достигается

в случае выполнения неравенств (1) при использовании автоматической трансмиссии (U_1, U_5), автоматического управления дроссельной заслонкой двигателя (U_2) и тормозной системой автомобиля (U_3) при движении по прямым участкам дороги ($U_4 = 0$).

Минимальное значение квадратичного функционала качества управления в задаче Больца, решаемой с учетом целевого функционала и функционала потерь, достигается в случае выполнения неравенств (1) и $V_m(t) \leq V_{mz}$ при использовании автоматической трансмиссии (U_1, U_5), автоматического управления дроссельной заслонкой двигателя (U_2) и тормозной системой автомобиля (U_3).

Автоматическое управление рулевой трапецией (U_4) в задачах Лагранжа и Больца обеспечивает достижение глобального минимума функционала качества. Однако для большинства водителей, не подозревающих о существовании квадратичных функционалов, векторов состояния и управления и других достижений современной теории управления, многолетняя безаварийная эксплуатация автомобиля является обыденным фактом. Проблема же создания эффективного автомобильного автопилота специалистами в области управления в настоящее время не решена и перспективы ее успешного решения в обозримом будущем представляются неопределенными в силу чрезвычайно высокого научно-технического уровня проблемы.

Решения задачи динамической стабилизации для частных случаев ограниченных наборов компонент вектора состояния положены в основу современных систем активной безопасности, устанавливаемых на зарубежных автомобилях. Среди таких систем можно выделить системы предотвращения опрокидывания (VCS), стабилизации продольных (ABS и ASR) и поперечных (ESP) скольжений колес, стабилизации безопасных дистанций (ACC) и мониторинга давлений в шинах (TPMS). Потенциальные возможности приведенных систем позволяют предотвратить в общей сложности 33 из 100 типовых столкновений структурированного множества аварийных событий.

Исторически устройства стабилизации скорости движения автомобиля, предназначенные для снижения утомляемости водителя в дальних поездках, появились на зарубежных, а затем на отечественных автомобилях в 30 годы прошлого века. Принцип действия этих устройств был основан на дублировании канала управления дроссельной заслонкой двигателя от педали акселератора дополнительным приводом, управляемым кнопкой ручного газа, установленной на приборной панели.

Зафиксировав кнопку ручного газа, водитель задавал постоянное положение дроссельной заслонки. Недостатками рассмотренного устройства являлись относительные большие ошибки стабилизации скорости на подъемах и спусках, значительное время запаздывания при необходимости экстренного торможения, возникновение пробуксовок ведущих ко-

лес на скользких покрытиях, а также заносов колес и опрокидываний при прохождении виражей. Следующим шагом в эволюционном процессе совершенствования устройств стабилизации скорости, получивших название систем круиз-контроля в 50-е годы прошлого века, стало применение регуляторов положения дроссельной заслонки в зависимости от ошибки стабилизации, а также автоматическое отключение регулятора в случае воздействия на педаль тормоза или сцепления.

Современные компьютерные системы круиз-контроля предусматривают программную реализацию регуляторов положения дроссельной заслонки и управления автоматической трансмиссией. Появившиеся в последние годы компьютерные системы адаптивного круиз-контроля предусматривают стабилизацию скорости с учетом скорости попутного автомобиля и безопасной дистанции до него и обеспечивают управление дроссельной заслонкой двигателя, автоматической трансмиссией и тормозами.

Построение регуляторов для систем круиз-контроля [3] и адаптивного круиз-контроля [4] выполняется в рамках линейной теории и сводится к П- и ПИ-регуляторам с постоянными коэффициентами. В действительности, модель объекта является нелинейной, а применение управляющих компьютеров для программной реализации регуляторов требует учета дискретности обработки информации.

Математическая модель объекта управления

Математическая модель объекта управления в рассматриваемой задаче стабилизации скорости представляется системой дифференциальных уравнений первого порядка.

Первое уравнение системы представляет собой частный случай второго закона Ньютона для ускорения $\dot{V}_m$ объекта массой m_0 под действием суммы тяговых и тормозных сил, сил трения качения, аэродинамического сопротивления и скатывающей силы. Второе уравнение системы соответствует определению линейной скорости V_m как первой производной пути L_m .

Система дифференциальных уравнений продольного движения центра масс объекта приводится к виду

$$\begin{cases} \dot{V}_m = a_{dt}(U) - k_x m_0^{-1} V_m^2 - k_{тр} g - \tilde{\alpha}_T g; \\ \dot{L}_m = V_m, \end{cases} \quad (2)$$

где $a_{dt}(U) = [a_d(U_1, U_2) - a_T(U_3)]$ — сумма тягового $a_d(U_1, U_2)$ и тормозного $a_T(U_3)$ ускорений, создаваемых двигателем, трансмиссией и тормозной системой; k_x — коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, $k_{тр}$ — коэффициент трения качения шин; $\tilde{\alpha}_T$ — приведенный угол тангажа.

С учетом проекции вектора скорости ветра V_T на направление продольного движения центра масс и

дополнительной составляющей $a_{доп}$, обусловленной влиянием дополнительных составляющих, препятствующих движению, приведенное значение угла тангажа имеет вид $\tilde{\alpha}_T = \alpha_T + g^{-1} [V_T(2V_m + V_T)] k_x m_0^{-1} + g^{-1} a_{доп}$, где α_T — угол тангажа.

Уравнение тягового ускорения $a_d(U_1, U_2)$ определяется путем линейной аппроксимации зависимости мощности двигателя $W_{дв}(N_{дв})$ в диапазоне оборотов $0 \leq N_{дв} \leq N_{max}$ и приводится к виду

$$a_d(U_1, U_2) = \begin{cases} A_{10}(U_1)U_2, & \text{если } V_m \leq V_m^*(U_1)U_2 \text{ и } U_1 \neq 0; \\ [A_{11}V_m^{-1}U_2^2 - A_{12}(U_1)U_2], & \text{если } V_m > V_m^*(U_1)U_2 \text{ и } U_1 \neq 0; \\ 0, & \text{если } U_1 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$V_m^*(U_1) = 0,105 N_{дв}^* k_{ред}^{-1} k_{п}^{-1}(U_1) R_c;$$

$$A_{10} = 735 m_0^{-1} R_c R_d^{-1} W_{max} [V_m^*(U_1)]^{-1};$$

$$A_{11} = 735 m_0^{-1} R_c R_d^{-1} [W_{max} + |\alpha_E| N_{дв}^*];$$

$A_{12} = 7 \cdot 10^3 m_0^{-1} R_d^{-1} k_{п}(U_1) k_{ред} |\alpha_E|$; R_c и R_d — свободный и динамический радиусы ведущих колес; W_{max} — максимальная мощность двигателя, развиваемая при числе оборотов $N_{дв}^*$; $k_{ред}$ — передаточное число редуктора главной передачи; $k_{п}(U_1)$ — передаточное число коробки переключения передач (КПП) на передаче U_1 ; $\alpha_E = W_{max} \Delta N_{дв}^{-1}$ — коэффициент наклона скоростной характеристики двигателя при $N_{дв} > N_{дв}^*$, $\Delta N_{дв} \approx 1000 \text{ мин}^{-1}$; $U_1 = 0$ соответствует отключению трансмиссии от двигателя в нейтральном состоянии КПП.

Значение тягового ускорения ограничено вследствие ограниченности сил трения скольжения, уравновешивающих тяговые силы ведущих колес:

$$a_d^*(U) = \begin{cases} a_d, & \text{если } a_S^H \leq a_d \leq a_S^B; \\ a_S^B, & \text{если } a_d > a_S^B; \\ a_S^H, & \text{если } a_d < a_S^H, \end{cases} \quad (4)$$

где a_S^B и a_S^H — верхние и нижние границы тяговых ускорений, определяемые силами трения скольжения ведущих колес, определенным образом зависящие от распределения масс $m_i m_0^{-1}$, $1 \leq i \leq 4$, колесной базы b и от максимального значения коэффициента трения скольжения ведущих колес k_S^* .

Так, в частности, для заднеприводного автомобиля верхняя и нижняя границы тягового ускорения определяются в виде

$$a_S^B = (m_3 + m_4)m_0^{-1} k_S^* g(1 - b^{-1} R_d k_S^*)^{-1};$$

$$a_S^H = -(m_3 + m_4)m_0^{-1} k_S^* g(1 + b^{-1} R_d k_S^*)^{-1}.$$

На рис. 1 приведены графики зависимостей тягового ускорения от управляющего воздействия на дроссельную заслонку для 2-, 3-, 4-, 5-й передач автомобиля Mercedes-Benz E240T, движущегося со скоростью 15 м/с.

На рис. 2 приведены зависимости тяговых ускорений $a_d(U_1, U_{2\min})$, $a_{d\min}$ и U_2 от скорости центра масс V_m автомобиля Mercedes-Benz E240T в режиме торможения двигателем при $U_1 = 4$ и $U_{2\min} = 0,1$.

Минимальное отрицательное тяговое ускорение $a_{d\min}$ определяется из условия равенства нулю первой производной a_d по U_2 . В этом случае $U_2 = 0,5A_{12}(U_1)A_{11}^{-1} V_m$ линейно зависит от скорости V_m , если $V_m \geq 2A_{12}^{-1}(U_1)U_{2\min}$. Если $V_m^*(U_1)U_{2\min} < V_m <$

$< 2A_{12}^{-1}(U_1)A_{11}U_{2\min}$, то $a_d(U_1, U_{2\min}) = A_{11}V_m^{-1} V_{2\min}^2 - A_{12}(U_1)V_{2\min}$. Тяговое ускорение $a_d(U_1, U_{2\min}) = 0$ при скорости $V_m = A_{12}^{-1}(U_1)A_{11}U_{2\min}$.

Задача управления автоматической коробкой переключения передач (АКПП) при разгонах сводится к формированию последовательности передач $U_1(k)$, обеспечивающих максимальные ускорения a_m при ограниченных скольжениях колес $S_i < S^*$ и устойчивое движение с наибольшей скоростью V_m при заданном положении дроссельной заслонки U_2 . При замедлениях в режиме торможения двигателем $U_2 = U_{2\min}$ должна формироваться последовательность передач $U_1(k)$, обеспечивающих ограничение отрицательных скольжений колес $S_i > -S^*$ вплоть до полной остановки с включением низшей передачи $U_1 = 1$.

Решением задачи управления АКПП при разгонах и торможениях является следующее:

$$U_1(k) = \begin{cases} \min[U_1 \in U_{1\text{доп}}], & \text{если } U_{1\text{доп}} \neq \emptyset; \\ U_1(k-1), & \text{если } U_{1\text{доп}} = \emptyset; \end{cases}$$

$U_1 \in U_{1\text{доп}}$, если выполняется система неравенств:

$$\begin{cases} a_S^H \leq a_d(U_1, U_2) \leq a_S^B; \\ 0 \leq V_m(k) \leq \tilde{V}_m(U_1)U_2, \end{cases}$$

где $\tilde{V}_m(U_1) = A_{11}[A_{10}(U_1 + 1) + A_{12}U_1]^{-1}$.

В современных АКПП реализуется приближенное решение задачи управления, не предусматривающее идентификацию a_S^H и a_S^B . Для прогнозируемого водителем выполнения ограничений вводится переключение режимов работы АКПП в стандартных и зимних условиях. В зимних условиях разгон с места выполняется со второй передачи $U_1 = 2$.

Решение задачи с типовыми регуляторами

Решение задач управления в рамках линейной теории предполагает использование приближенных, линейных моделей и сводится к анализу свойств передаточных функций и частотных характеристик системы с различными регуляторами. В современных системах круиз-контроля и адаптивного круиз-контроля используются П- и ПИ-регуляторы, обеспечивающие свойство экспоненциальной устойчивости системы.

Так, в рассматриваемом случае объект управления согласно уравнениям (2) и (3) представляется последовательным соединением пропорционального W_1 и инерционного W_2 звеньев:

$$\begin{cases} W_1(p) = K_E(U_1, U_2, V_m); \\ W_2(p) = T_m(1 + T_m p)^{-1}, \text{ где } T_m = m_0 k_x^{-1} V_m^{-1}; \end{cases}$$

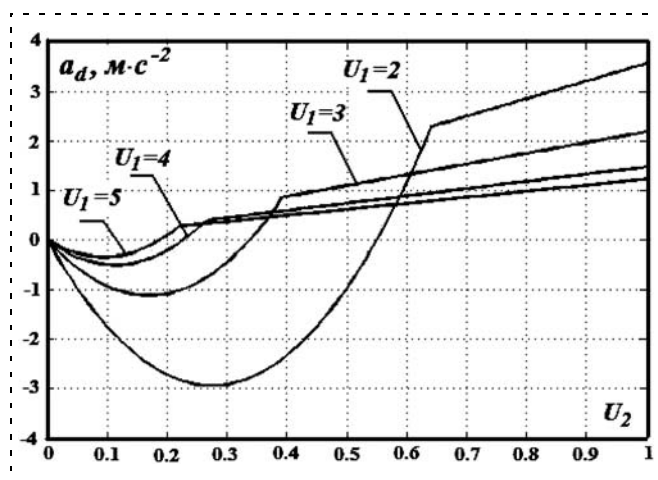


Рис. 1. Зависимости тяговых ускорений $a_d(U_1, U_2)$ от управляющего воздействия на дроссельную заслонку U_2

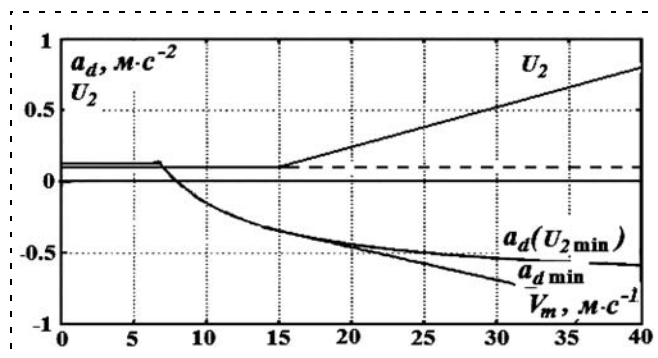


Рис. 2. Зависимости тяговых ускорений $a_{d\min}$, $a_d(U_1, U_{2\min})$ и U_2 от скорости V_m в режиме торможения двигателем

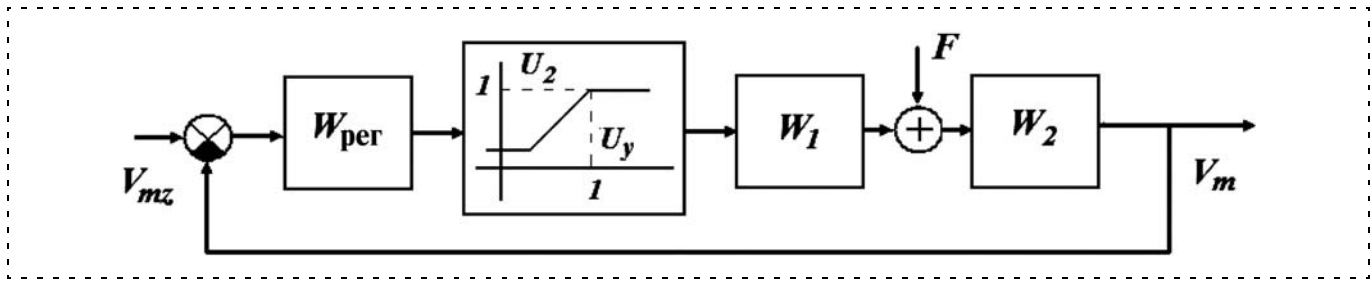


Рис. 3. Структурная схема системы стабилизации скорости

$$K_E(U_1, U_2, V_m) = \begin{cases} A_{10}(U_1), & \text{если } V_m \leq V_m^*(U_1)U_2 \text{ и } U_1 \neq 0; \\ [2A_{11}V_m^{-1}U_2 - A_{12}], & \text{если } V_m > V_m^*(U_1)U_2 \text{ и } U_1 \neq 0; \\ 0, & \text{если } U_1 = 0. \end{cases}$$

Структурная схема системы стабилизации скорости с линейным непрерывным регулятором $W_{\text{рег}}(p)$ с учетом ограничений положения дроссельной заслонки двигателя U_2 и выполнении ограничений на тяговые ускорения (4) приведена на рис. 3. Внешнее возмущение $F = -g(k_{\text{тр}} + \tilde{\alpha}_T)$.

В случае использования П-регулятора с коэффициентом $W_{\text{рег}}(p) = k_0$ передаточная функция замкнутой системы $W_c(p) = k_m(1 + Tp)^{-1}$, $k_m = k_0k_ET_m(1 + k_0k_ET_m)^{-1}$; $T = T_m(1 + k_0k_ET_m)^{-1}$.

Для заданной постоянной времени T величина k_0 П-регулятора определяется равной $k_0 = k_E^{-1}T^{-1}$ при условии $T_m \gg 1$.

Уравнение ошибки стабилизации для рассматриваемой системы:

$$E = (1 + W_{\text{рег}}W_1W_2)^{-1}V_{mz} - W_2(1 + W_{\text{рег}}W_1W_2)^{-1}F.$$

В установившемся режиме уравнение ошибки стабилизации преобразуется к виду $E = (1 + k_0k_ET_m)^{-1} \times V_{mz} + T_m g(1 + k_0k_ET_m)^{-1}(k_{\text{тр}} + \tilde{\alpha}_T)$. Ошибка E не обращается в ноль при конечных k_0 и линейно зависит от приведенного угла тангажа $\tilde{\alpha}_T$.

В случае использования ПИ-регулятора с коэффициентами усиления пропорциональной k_0 и интегральной $k_{\text{ин}}$ составляющих передаточная функция регулятора имеет вид $W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{ин}}(1 + T_0p)^{-1}$, $T_0 = k_0k_{\text{ин}}^{-1}$.

При условии $T_0 = T_m$ передаточная функция замкнутой системы приводится к виду $W_c(p) = (1 + Tp)^{-1}$, $T = k_{\text{ин}}^{-1}k_E^{-1}T_m^{-1}$.

Параметры настройки ПИ-регулятора определяются из условий $T_0 = T_m$ и $T = k_{\text{ин}}^{-1}k_E^{-1}T_m^{-1}$, и соответственно равны $k_{\text{ин}} = k_E^{-1}T^{-1}T_m^{-1}$ и $k_0 = k_E^{-1}T^{-1}$.

Следует отметить, что параметры настройки П- и ПИ-регуляторов U_1 и $k_{\text{ин}}$ зависят как от номера передачи U_1 , так от модуля скорости V_m .

Уменьшение постоянной времени T достигается соответствующим увеличением коэффициентов усиления U_1 и $k_{\text{ин}}$. Для линейной системы с инерционным звеном первого порядка свойство экспоненциальной устойчивости сохраняется при любых положительных коэффициентах k_0 , $k_{\text{ин}}$, k_E , T_m .

Однако в случае программной реализации типовых регуляторов в компьютерных системах круиз-контроля возникают ограничения коэффициентов усиления регуляторов, обусловленные конечным шагом вычислений ΔT и запаздыванием τ на шаге вычислений.

Так, в частности, для компьютерной системы круиз-контроля с П-регулятором конечно-разностное уравнение замкнутой системы в дискретном времени приводится к виду

$$V_m(k) = (1 - \Delta Tk_E k_0)V_m(k-1) + \Delta Tk_E k_0 V_{mz}.$$

Анализ решений приведенного уравнения показывает, что монотонность переходного процесса сохраняется, если $k_0 \leq (k_E \Delta T)^{-1}$. Если $(k_E \Delta T)^{-1} < k_0 < 2(k_E \Delta T)^{-1}$, то решение содержит затухающие колебания с периодом $2\Delta T$. Незатухающие колебания возникают в системе, если $k_0 \geq 2(k_E \Delta T)^{-1}$.

На рис. 4 приведены результаты моделирования системы круиз-контроля с ПИ-регулятором, $k_0 = 0,8$, $k_{\text{ин}} = 0,0093$ для автомобиля Mercedes-Benz E240 при $\Delta T = 0,5$ с и $\tau = 0$.

Моделирование процесса управления движением проводилось в среде MATLAB 7/6/0 (R2008a) с помощью программы "Моделирование интегрированной системы динамической стабилизации состояния автомобиля" [7].

Анализ результатов моделирования показывает, что на определенных временных интервалах, в частности, на спусках и горизонтальных участках возникают незатухающие автоколебания с периодом 1 с, которые отсутствуют на подъемах. На подъемах же достигается экспоненциальная устой-

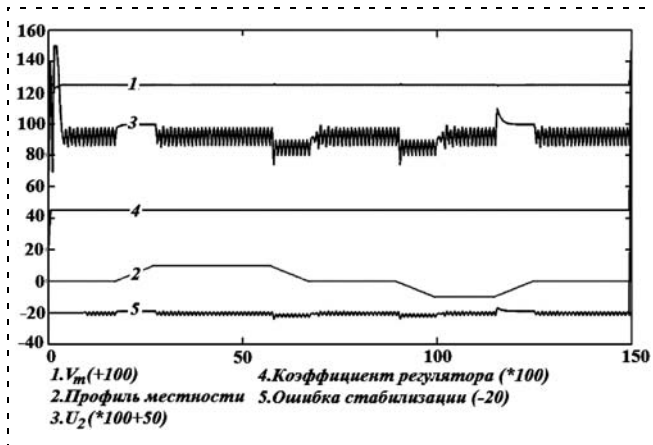


Рис. 4. Результаты моделирования системы круиз-контроля с ПИ-регулятором с постоянными коэффициентами

чивость. Собственные автоколебания, не свойственные линейным системам, объясняются дискретностью преобразования сигналов в компьютерной системе с нелинейным объектом.

Результаты моделирования показывают, что в начальный момент времени возникает провал в управляющем воздействии, что объясняется нулевой ошибкой в момент включения системы круиз-контроля.

Общим принципиальным недостатком современных компьютерных систем круиз-контроля и адаптивного круиз-контроля является отсутствие подавляющего большинства функциональных ограничений скорости даже в тех случаях, когда автомобиль дополнительно оснащен системами предотвращения опрокидывания, системами стабилизации продольных и поперечных скольжений колес. В число граничных скоростей, определяющих динамическую границу скорости стабилизации [5] наряду со скоростями опрокидывания, сноса и заноса колес, пробуксовки ведущих колес входят также скорости разрыва кордов шин, аварийного перегрева шин и тормозов, скорости, определяемые асимметрией колесных пар, допустимыми уровнями виброускорений, технического состояния рулевого управления и подвески.

Решение задачи управления с одношаговым регулятором

Принцип действия одношагового регулятора основан на формировании ускорения центра масс $a_m(k)$, достаточного для достижения заданной скорости V_{mz} в случае, если текущее значение скорости $V_m(k)$ отличается от V_{mz} .

Уравнение одношагового регулятора, обеспечивающего компенсацию ошибки за один шаг ΔT в дискретном времени, определяется из уравнения продольного движения центра масс (2):

$$a_d(k) = E(k)\Delta T^{-1} + k_x m_0^{-1} V_m^2(k) + k_{тр}g + \hat{\alpha}_T(k)g, \quad (5)$$

где $\hat{\alpha}_T(k) = \tilde{\alpha}_T(k-1)$ — оценка угла тангажа на $(k-1)$ -м шаге, определяемая уравнением $\hat{\alpha}_T(k) = g^{-1}[\alpha_d(k-1) - \alpha_m(k-1) - k_x m_0^{-1} V_m^2(k-1)] - k_{тр}$.

Учет ограничений скольжений ведущих колес $-S^* \leq S_i \leq S^*$ сводится к введению ограничений

(4) по тяговому ускорению $a_S^H(k_S^*) \leq a_d \leq a_S^B(k_S^*)$, идентифицируемых на конкретных поверхностях в движении.

Задача управления АКПП в режиме стабилизации скорости [6] состоит в определении передачи $U_1(k)$, для которой диапазоны развиваемых тяговых ускорений и скоростей при $U_{2min} < U_2 < 1$ покрывают необходимые для стабилизации значения тягового ускорения и скорости при минимальном расходе топлива.

Решением задачи управления АКПП в режиме стабилизации скорости является следующее:

$$U_1(k) = \begin{cases} \max[U_1 \in U_{1доп}], & \text{если } U_{1доп} \neq \emptyset; \\ U_1(k-1), & \text{если } U_{1доп} = \emptyset, \end{cases}$$

$U_1 \in U_{1доп}$, если выполняется система неравенств:

$$\begin{cases} a_{dmin}(U_1) < a_d^*(k) < A_{10}(U_1); \\ V_{min}(U_1) < V_m(k) < V_m^*(U_1), \end{cases}$$

где

$$a_{dmin}(U_1) = -0,25 A_{12}^2(U_1) A_{11}^{-1} V_m;$$

$$V_{min}(U_1) = 2 A_{11} A_{12}^{-1}(U_1) U_{2min}.$$

Управляющее воздействие $U_2(k)$ на дроссельную заслонку двигателя определяется из уравнения тягового ускорения (3):

$$U_2(k) = \begin{cases} a_d^*(k) A_{10}^{-1}(U_1), & \text{если } a_d^*(k) \geq a_{гр}; \\ 0,5 A_{12}(U_1) A_{11}^{-1} V_m + \text{Re } \sqrt{D}, & \\ \text{если } a_d^*(k) < a_{гр} \text{ и } V_m(k) \geq V_{min}(U_1); \\ U_{2min}, & \text{если } a_d^*(k) < a_{гр} \text{ и } V_m(k) < V_{min}(U_1), \end{cases}$$

где

$$a_{гр} = A_{10}(U_1) V_m [V_m^*(U_1)]^{-1};$$

$$D = [0,25 A_{12}^2(U_1) A_{11}^{-1} V_m^2 + A_{11}^{-1} V_m a_d^*(k)].$$

На рис. 5 приведены результаты моделирования системы круиз-контроля с одношаговым регулятором для автомобиля Mercedes-Benz E240T в условиях движения по сухой поверхности с переменным углом тангажа $\alpha_T(t)$.

Анализ результатов моделирования системы круиз-контроля с одношаговым регулятором пока-

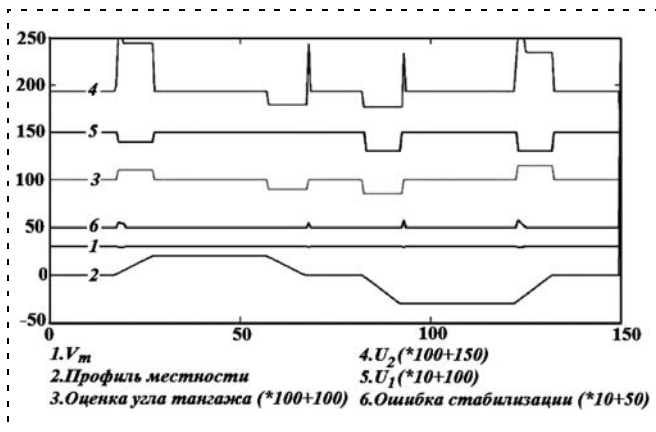


Рис. 5. Результаты моделирования системы круиз-контроля с одношаговым регулятором

зывает, что оценки угла тангажа $\hat{\alpha}_T$ идентифицируются с запаздыванием на один шаг и совпадают с $\tilde{\alpha}_T$ на подъемах, спусках и горизонтальных участках. Ошибка стабилизации на временном интервале моделирования совпадает с нулевым уровнем за исключением моментов времени изменения угла тангажа. Изменения управляющих воздействий U_2 и U_1 происходят в указанные моменты времени с запаздыванием на один шаг и компенсируют возникающие ошибки стабилизации. В случаях, когда управляющее воздействие U_2 ограничивается верхней границей $U_2 = 1$, для стабилизации требуется не один, а несколько шагов. Колебательные режимы управляющих воздействий U_2 и U_1 не возникают, что объясняется соблюдением условий одношаговой сходимости, характерной для принципа работы рассматриваемого регулятора. Провалы управления U_2 в момент включения круиз-контроля также отсутствуют, что объясняется свойствами одношагового регулятора.

Выводы

Проведенный анализ решений задач стабилизации скорости автомобиля с различными типами регуляторов и функциональных ограничений позволяет сформулировать следующие выводы:

- наиболее точное решение задачи стабилизации скорости автомобиля без учета ограничений до-

стигается с помощью одношагового регулятора при наличии идентифицированной модели продольного движения центра масс, двигателя, трансмиссии и состояния поверхности дорожного покрытия;

- введение ограничений на допустимые скольжения колес в одношаговый регулятор позволяет решать задачу стабилизации скорости автомобиля, который не оснащен дополнительными системами стабилизации продольных скольжений колес;
- приближенное решение задачи стабилизации скорости автомобиля в системах с П- или ПИ-регуляторами с учетом ограничений продольных скольжений колес возможно лишь на автомобилях, оснащенных противобуксовочными и антиблокировочными системами;
- для решения задачи стабилизации скорости автомобиля в реальных условиях движения требуется введение расширенного множества скоростных ограничений, расширяющих диапазон условий безопасной эксплуатации автомобиля.

Список литературы

1. Бузников С. Е. Современные состояния и перспективы развития автомобильных систем активной безопасности // Тр. XV Междунар. конф. "Проблемы управления безопасностью сложных систем". М.: РГТУ, 2007. С. 207—211.
2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
3. Бишоп Р., Дорф Р. Современные системы управления: Пер. с англ. Копылова Б. И. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
4. Nemeth B., Gaspar P. (2011) Road inclinations in the design of LPV-based adaptive cruise control. 18th IFAC World Congress Milano, 2202. 2207.
5. Бузников С. Е., Тамбулатов П. В., Шабанов Н. С. Граничные скорости систем активной безопасности автомобиля // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 11.2. С. 116—118.
6. Бузников С. Е., Тамбулатов П. В. Моделирование автомобильной системы круиз-контроля с расширенными векторами состояния и управления" // Тр. XVIII Междунар. конф. "Проблемы управления безопасностью сложных систем". М.: РГТУ, 2010. С. 380—384.
7. Бузников С. Е., Тамбулатов П. В. Моделирование интегрированной системы динамической стабилизации состояния автомобиля. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614595, Роспатент, 2010.

ИНФОРМАЦИЯ

5—8 июня 2012 г. в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

XII международная конференция

"Устойчивость и колебания нелинейных систем управления" (конференция Пятницкого)

Подробную информацию о конференции см. на сайте:

<http://www.stab12.ru>



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

Алгулиев Р. М., Оруджов Г. Г., Сабзиев Э. Н.

Комплексирование измерений для идентификации траектории полета летательного аппарата 57

Денисов М. М., Кузин М. Н., Пасисниченко М. А.

Математическое моделирование лазерной локации космических аппаратов в неинерциальной системе отсчета 60

Семенов И. В., Аксененко В. Д.

Компенсация влияния момента сухого трения на точность системы гироскопической стабилизации. 65

Р. М. Алгулиев, чл.-корр. НАН Азербайджана,
д-р техн. наук, проф.,
rasim@science.az,

Г. Г. Оруджов, канд. техн. наук, зав. отделом,
gazanfar.orujov@gmail.com,

Э. Н. Сабзиев, канд. физ.-мат. наук,
elkhan@kiber.az,

Институт информационных технологий
НАН Азербайджана

Комплексирование измерений для идентификации траектории полета летательного аппарата

Предложен метод для определения коэффициентов настройки фильтра комплексирования при комплексной обработке полетной информации. Предложенный метод предназначен для идентификации траектории движения летательного аппарата.

Ключевые слова: идентификация траектории, комплексная обработка информации, летательный аппарат

Введение

Известно, что наиболее важным критерием качества эксплуатации воздушного судна является безопасность его полета. В целях повышения уровня безопасности полета летательного аппарата (ЛА) в настоящее время осуществляется комплекс мероприятий, включающий в себя межполетную обработку полетной информации (ПИ), записанной в бортовом магнитном накопителе ("черном ящике") [1–6].

Существующие системы обработки ПИ позволяют выполнять:

- полную графическую и цифровую обработку полетной информации;
- идентификацию траектории полета в горизонтальной плоскости на фоне географической карты местности;
- визуализацию пространственного положения ЛА в трехмерной системе координат;
- осуществление оценки действий экипажа по управлению ЛА и многое другое.

Как правило, по завершении каждого полета информация, записанная в "черном ящике", тщательно анализируется с целью оценить действия экипажа и работоспособность подсистем ЛА. По результатам этого анализа принимается решение о дальнейшей эксплуатации исследуемого ЛА и о допуске экипажа к следующему полету (режим off-line).

Известны также работы, посвященные восстановлению потерянной или искаженной ПИ, уточнению бортовых измерений и идентификации траектории полета [7–11].

Комитет FANS (Future Air Navigation System — Будущие аэронавигационные системы), изучив существующие системы с функциями CNS/ATM (CNS — Communication, Navigation, Surveillance — связь, навигация, наблюдение; ATM—Air Traffic Management — Организация воздушного движения), пришел к выводу, что радионавигационные системы рубежа XX—XXI веков могут преодолеть ограничения существующих систем только с использованием принципиально новых концепций и систем CNS, а единственным оптимальным вариантом, на базе которого могут быть реализованы новые системы, являются спутниковые технологии.

Системы CNS/ATM могут способствовать созданию единого информационного обеспечения для пилотов (на борту летательного аппарата) и диспетчеров (наземной службы обеспечения полетов) с надежной и скоростной связью между собой в режиме online [12–17].

Статистика ICAO свидетельствует, что доля авиакатастроф по вине экипажа очень высока, так как в экстремальной ситуации экипажу очень трудно объективно оценить происходящие на борту и за бортом процессы и принять правильное решение для спасения ЛА в режиме реального времени. В некоторых случаях экипаж мог бы спасти ЛА, если бы имел полное и четкое представление о происходящих на борту и вне борта нештатных ситуациях.

Основные угрозы, приводившие к авиационным происшествиям, условно можно разделить на две группы: *внутренние* и *внешние*.

Внутренние угрозы включают в себя отказ подсистем ЛА и ошибки экипажа, которые выявляют путем анализа полетной информации, зарегистрированной в "черном ящике". К внутренним угрозам можно отнести искажение или частичную потерю полетной информации при измерении параметров движения бортовыми датчиками и передаче информации по линиям связи.

Внешние угрозы включают в себя опасность столкновения с земной поверхностью, другими ЛА или со стаей птиц и опасность атмосферного характера. Они контролируются наличием информации о воздушной обстановке посредством радаров различного назначения и спутниковой технологии. Одними из основных целей применения CNS/ATM-технологии являются обнаружение и нейтрализация внешних угроз с помощью GPS (Global Positioning System).

Навигация по GPS наряду с несомненными достоинствами имеет один серьезный недостаток: по разным причинам она может отключаться на короткое время (до 1 мин). Используя информацию от гироскопа, доплеровского измерителя скорости и системы воздушных сигналов, можно вырабатывать навигационное решение (идентификацию траектории полета ЛА) при кратковременных отключениях GPS [12].

Однако идентификация траектории полета ЛА по отдельным каналам информации дает неприем-

лемо большую погрешность [5, 6, 10]. По нашему мнению, это обстоятельство связано со спецификой принципа работы различных бортовых аппаратных средств (датчиков).

В данной статье предлагается алгоритм идентификации траектории движения ЛА по данным бортового накопителя полетной информации.

Алгоритм идентификации траектории движения летательного аппарата

Для повышения точности идентификации в работе [10] было предложено применение метода комплексирования информации разных аппаратных средств. Оказалось, что угадать подходящие значения коэффициентов комплексирования — весьма трудная задача.

В данной работе предлагается алгоритм для определения значений коэффициентов комплексирования на основе обработки данных серии полетов ЛА.

С математической точки зрения суть метода комплексирования заключается в определении вектора расположения ЛА $\mathbf{u} = (x(t), y(t), z(t))$ как решения следующей системы линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} x'' + k_1 x' = a_x + k_1 \sqrt{v^2 - (y')^2} \sin \psi; \\ y'' + k_2 y' + k_3 y = a_y + k_2 H' + k_3 H; \\ z'' + k_4 z' = a_z + k_4 \sqrt{v^2 - (y')^2} \cos \psi; \\ t \in (0, T_0) \end{cases} \quad (1)$$

с начальными при $t = 0$ условиями

$$\begin{cases} x(0) = 0, y(0) = 0, z(0) = 0; \\ x'(0) = 0, y'(0) = 0, z'(0) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где a_x, a_y, a_z — соответственно продольное, вертикальное и боковое ускорения; H — оценка бароинерциальной высоты полета; ψ — угол курса; v — истинная скорость; $k_1, \dots, k_4$ — коэффициенты настройки фильтров комплексирования; T — продолжительность полета.

Структура задачи (1)–(2) такова, что она может быть расщеплена на отдельные задачи и решена последовательно: сначала относительно y , затем относительно x и z . В этом случае явная зависимость от параметров комплексирования $k_1, \dots, k_4$ функций y, x и z может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} x = x(k_1, t); \\ y = y(k_2, k_3, t); \\ z = z(k_4, t). \end{cases}$$

Мы предлагаем определить коэффициенты $k_1, \dots, k_4$ из условия минимизации невязок

$$\begin{aligned} &|x(k_1, T) - x_T|, |y(k_2, k_3, T) - y_T|, \\ &|y'(k_2, k_3, T)|, |z(k_4, T) - z_T|, \end{aligned}$$

где (x_T, y_T, z_T) — относительные координаты аэродрома прилета.

Сначала определим приближенные значения коэффициентов k_2, k_3 путем нахождения корней характеристического уравнения $\alpha^2 + k_2 \alpha + k_3 = 0$.

Очевидно, что $\alpha_2 + \alpha_3 = -k_2$, $\alpha_2 \alpha_3 + \alpha_3^2 = k_3$, $\alpha_2^2 + \alpha_2 \alpha_3 = k_2^2 - k_3$ (где α_2, α_3 — корни характеристического уравнения).

Из (1)–(2) явный вид функции y может быть представлен следующим образом:

$$y(k_2, k_3, t) = \int_0^t \frac{e^{\alpha_2(t-\tau)} - e^{\alpha_3(t-\tau)}}{\alpha_2 - \alpha_3} F_2(k_2, k_3, \tau) d\tau, \quad (3)$$

где $F_2(k_2, k_3, t) \equiv a_y(t) + k_2 H'(t) + k_3 H(t)$.

Из условий минимизации невязок имеем

$$\begin{cases} \int_0^T \frac{e^{\alpha_2(T-\tau)} - e^{\alpha_3(T-\tau)}}{\alpha_2 - \alpha_3} F_2(k_2, k_3, \tau) d\tau - y_T = 0; \\ \int_0^T \frac{\alpha_2 e^{\alpha_2(T-\tau)} - \alpha_3 e^{\alpha_3(T-\tau)}}{\alpha_2 - \alpha_3} F_2(k_2, k_3, \tau) d\tau = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Заменяя функцию $e^{\alpha_j(T-\tau)}$ суммой первых трех слагаемых в формуле Тейлора [18]:

$$e^{\alpha_j(T-\tau)} \approx 1 + \alpha_j(T-\tau) + \frac{\alpha_j^2}{2} (T-\tau)^2, \quad j = 1, 2,$$

и учитывая вышеприведенные свойства α_2 и α_3 , имеем

$$\begin{cases} \int_0^T \left((T-\tau) - \frac{k_2}{2} (T-\tau)^2 \right) F_2(k_2, k_3, \tau) d\tau \approx y_T; \\ \int_0^T \left(1 - k_2(T-\tau) + \frac{k_2^2 - k_3}{2} (T-\tau)^2 \right) F_2(k_2, k_3, \tau) d\tau \approx 0, \end{cases}$$

или, что то же самое,

$$\begin{cases} a_2 k_2^2 + a_3 k_2 k_3 + a_{22} k_2 + a_{23} k_3 \approx b_2; \\ a_3 k_2^2 k_3 + a_{22} k_2^2 + a_{32} k_3 k_2 + a_{33} k_3^2 + \\ + a_{42} k_2 + a_{43} k_3 \approx b_3, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$a_2 = \frac{1}{2} \int_0^T (T-\tau)^2 H'(\tau) d\tau;$$

$$a_3 = \frac{1}{2} \int_0^T (T-\tau)^2 H(\tau) d\tau;$$

$$a_{22} = \frac{1}{2} \int_0^T ((T-\tau)^2 a_y(\tau) - 2(T-\tau) H'(\tau)) d\tau;$$

$$\begin{aligned}
a_{23} &= - \int_0^T (T - \tau) H(\tau) d\tau; \\
a_{32} &= - \frac{1}{2} \int_0^T ((T - \tau)^2 H'(\tau) + 2(T - \tau) H(\tau)) d\tau; \\
a_{33} &= \frac{1}{2} \int_0^T (T - \tau)^2 (H'(\tau) - H(\tau)) d\tau; \\
a_{42} &= - \int_0^T ((T - \tau) a_y(\tau) - H(\tau)) d\tau; \\
a_{43} &= - \frac{1}{2} \int_0^T ((T - \tau)^2 a_y(\tau) - 2H(\tau)) d\tau; \\
b_2 &= -y_T + \int_0^T (T - \tau) a_y(\tau) d\tau; \\
b_3 &= - \int_0^T a_y(\tau) d\tau.
\end{aligned}$$

Численно решая систему алгебраических уравнений, определяем коэффициенты k_2, k_3 . Таким образом, согласно (3), функция $y = y(k_2, k_3, t)$ оказывается восстановленной. Затем, из (1)–(2) можем написать явный вид функции x :

$$x(k_1, t) = \int_0^t \frac{1 - e^{-k_1(t-\tau)}}{k_1} F_1(k_1, \tau) d\tau,$$

где $F_1(k_1, t) \equiv a_x(t) + k_1 \sqrt{v^2(t) - (y'(k_2, k_3, t))^2} \sin \psi(t)$.

Также из условия невязки для функции $x(k, T)$ имеем

$$\int_0^t \frac{1 - e^{-k_1(t-\tau)}}{k_1} F_1(k_1, \tau) d\tau - x_T = 0.$$

Замена $e^{-k_1(T-\tau)} \approx 1 - k_1(T - \tau) + \frac{k_1^2}{2}(T - \tau)^2$ приводит к квадратичному относительно k_1 уравнению

$$a_1 k_1^2 + a_{11} k_1 + b_1 = 0, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{1}{2} \int_0^T (T - \tau)^2 \sqrt{v^2(\tau) - (y'(k_2, k_3, \tau))^2} \sin \psi(\tau) d\tau; \\
a_{11} &= \frac{1}{2} \int_0^T ((T - \tau)^2 a_x(\tau) - \\
&\quad - 2(T - \tau) \sqrt{v^2(\tau) - (y'(k_2, k_3, \tau))^2} \sin \psi(\tau) d\tau); \\
b_1 &= x_T - \int_0^T (T - \tau) a_x(\tau) d\tau.
\end{aligned}$$

Аналогичным образом имеем уравнение относительно коэффициента k_4 .

Таким образом, следуя описанному алгоритму, можем вычислить коэффициенты $k_1, \dots, k_4$.

Далее, повторяя процесс вычисления для различных полетов одного и того же летального аппарата, можем найти осредненные значения найденных коэффициентов по совокупности всей серии полетов.

Анализ результатов моделирования

Параметры $a_x, a_y, a_z, H, \psi, v$ в системе дифференциальных уравнений (1) извлекаются из полетной информации, а коэффициенты $k_1, \dots, k_4$ вычисляются с помощью уравнений (5) и (6). Для численного решения системы нелинейных алгебраических уравнений (5) применен метод Ньютона, а для численного решения системы дифференциальных уравнений (1) выбран метод Рунге—Кутты.

Численный эксперимент по комплексированию измерений проведен в системе обработки полетной информации Gartal Pro [6] для конкретного полета (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Результаты моделирования для идентификации траектории полета методом комплексирования измерений приведены в графическом виде на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

N — точка вылета ЛА;

1 — идентифицированная траектория полета ЛА по данным полетной информации без комплексирования;

2 — идентифицированная траектория полета ЛА по данным полетной информации с комплексированием;

K1 — точка приземления ЛА без применения метода комплексирования по данным полетной информации;

K2 — точка приземления ЛА с применением метода комплексирования по данным полетной информации.

Критерием точности идентификации приняты расстояния между точкой взлета (точка N) и точками приземления ЛА (точки K1 и K2) соответственно идентифицированных траекторий ЛА без комплексирования и с комплексированием измерений. Для рассматриваемого полета расчетное расстояние между точками взлета и приземления составляет:

- между точками N и K1 (без комплексирования) — 19,8 км;
- между точками N и K2 (с комплексированием) — 3,6 км.

Математическое моделирование для полетной информации серии полетов показало, что комплексирование измерений по предложенному методу увеличивает точность идентификации траектории полета примерно в 5 раз.

Список литературы

1. **Комплекс WinArm32.** Возможности комплекса. URL: <http://www.winarm.ru/content/view/29/32/>
2. **Интегрированный** наземно-бортовой комплекс регистрации, контроля и обработки полетной информации KARAT. URL: <http://www.gosniias.ru/works4.html>. URL: <http://www.gosniias.ru/pages/karat/man.pdf>
3. **Славутич:** Программный комплекс, Описание применения, Программно-аппаратный комплекс обработки и анализа информации бортовых средств регистрации полетной информации, шифр "MONSTR". URL: <http://www.kavr.com.ua/ru/service?id=11>
4. **Программное** обеспечение "СКАТ". URL: <http://www.topazlab.ru/production-skate-Soc-UBD.html>
5. **Керимов К. В.** Разработка и исследование методов синтеза системы оперативной обработки полетной информации на базе новой информационной технологии // Дисс. работа на соискание ученой степени кандидата технических наук. Институт информационных технологий НАНА. Баку, 1998. 115 с.
6. **Азизов Р. А.** Разработка методов и алгоритмов оперативной обработки полетной информации // Дисс. работа на соискание ученой степени кандидата технических наук. Институт информационных технологий НАНА. Баку, 2004. 160 с.
7. **Orujov G. H., Mamedova M. H.** An expert system for aircraft pilots training // Proc. of the 6th IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill Joint Design of Technology and Organization. Kranjska Gora. Slovenia, 1997.
8. **Abbasov A., Mamedova M., Orujov G. H., Aliev H.** Synthesis of the methods of subjective knowledge representations in problems of fuzzy pattern recognition // Mechatronics. 2001. V. 11. № 4. P. 439—449.
9. **Оруджов Г. Г.** Методика идентификации математической модели летательного аппарата // Тр. II междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'03). Институт проблем и управления им. В. А. Трапезникова РАН. Москва. 2003. С. 2340—2345.
10. **Алгулиев Р. М., Оруджов Г. Г., Сабзиев Э. Н.** Идентификация траектории полета летательного аппарата // Тр. III междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'04). Институт проблем и управления им. В. А. Трапезникова РАН. Москва. 2004. С. 343—347.
11. **Малогабаритные** интегрированные навигационные системы для авиационного применения. URL: www.teknol.ru/pdf/cn2-TO.pdf.
12. **Bevly D. M., Gebre-Egziabher D., Parkinson B.** Parametric error equations for dead reckoning navigators used in ground vehicle guidance and control // Navigation. 2006. V. 53. № 3. P. 135—147.
13. **Зобов Н. Ф., Кошелев Б. В.** Современные проблемы развития и внедрения аэронавигационной системы будущего. Москва: МАИ. 2003. 204 с. URL: <http://www.iqlib.ru/book/preview/B9EEFB19E94F47818BB04E6D0787DBFD>
14. **Национальный** план для систем CNS/ATM. Циркуляр 278-AN/164. Инструктивный материал. ИКАО. Монреаль. Канада. 2000. 139 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/345014/>
15. **Глобальный** аэронавигационный план применительно к системам CNS/ATM. Doc 9750. ИКАО. 2007. 186 с. URL: http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/9750_cons_ru.pdf
16. **Руководство** по требуемым характеристикам связи (RCP). ИКАО. 2008. 62 с. URL: www.aerohelp.ru/data/432/9613.pdf. URL: www.icao.int/airspot.ru/book/file/840/9869_cons_ru.pdf
17. **Guide** to methods & tools for airline flight safety analysis. Prepared by: GAIN Working Group B. Analytical Methods and Tools. Second Edition. 2003. URL: http://flightsafety.org/files/analytical_methods_and_tools.pdf
18. **Ильин В. А., Позняк Э. Г.** Основы математического анализа. Ч. I. М.: Наука, 1982.

УДК 621/396

М. М. Денисов, канд. техн. наук, доц.,

М. Н. Кузин, аспирант,

М. А. Пасисниченко, аспирант,

pm@mati.ru,

"МАТИ" — Российский государственный
технологический университет
имени К. Э. Циолковского

Математическое моделирование лазерной локации космических аппаратов в неинерциальной системе отсчета

Разработана математическая модель для лазерной локации космических аппаратов, учитывающая предсказываемый общей теорией относительности Эйнштейна эффект слабого искривления световых лучей в системе отсчета вращающейся Земли. Рассмотрено построение математической модели и описана ее программная реализация.

Ключевые слова: лазерная локация, система наведения, имитационные эксперименты

Введение

В последнее время для высокоточного контроля элементов орбит космических аппаратов все чаще стала применяться лазерная локация. В отличие от

радиолокационных станций лазерные станции излучают электромагнитные импульсы с очень узкой диаграммой направленности — с расходимостью порядка нескольких угловых секунд. Это обстоятельство требует очень точной системы целеуказания, так как в противном случае лазерный импульс пройдет в стороне от космического аппарата и не попадет на установленные на нем ретрорефлекторы.

Обычно поиск местоположения точки на небесной сфере, куда необходимо послать лазерный импульс, чтобы он отразился от ретрорефлекторов подошедшего в эту точку космического аппарата, выполняет оператор лазерной станции вручную методом проб и ошибок. Вместе с тем, современные вычислительные системы позволяют компьютеризировать этот процесс в режиме реального времени и обеспечить захват ретрорефлекторов движущегося по орбите космического аппарата с помощью автоматической информационно-поисковой системы без участия человека.

Необходимость в разработке такой системы возникла еще и потому, что современная лазерная локация вышла на такой уровень точности [1], когда требуется учитывать неинерциальность лазерной станции, находящейся на вращающейся Земле. И хотя этот эффект общей теории относительности

Эйнштейна мал, при проведении прецизионной локации узкими лазерными пучками его необходимо учитывать.

Более того, влияние неинерциального движения лазерных станций уже иногда проявляется при проведении локации космических аппаратов. Так, например, на Крымской лазерной станции, использующей маломощный лазер с относительно узким лазерным пучком (как известно, лазерный пучок не является цилиндром, а представляет собой расширяющийся конус), был замечен довольно странный эффект [2]: оператору было очень трудно попасть электромагнитным импульсом в космический аппарат. Обычно космический аппарат, движущийся по околоземной орбите, достаточно хорошо виден в телескоп лазерной станции, и оператор, вводя упреждение вдоль вектора его скорости, должен был попасть лазерным импульсом в отражатели, установленные на его внешних поверхностях.

Однако было замечено, что если лазерный импульс направить в расчетное место его встречи с космическим аппаратом, считая лазерный луч прямой линией, то этот импульс не попадет на отражатели. Если же ось лазерного пучка немного доворачивать и направлять электромагнитный импульс не в расчетное место встречи, а сканировать окрестности этого места, то при некотором небольшом угловом отклонении от расчетного места (составляющем несколько угловых секунд) лазерный импульс попадает на ретрорефлекторы космического аппарата, и в телескопе лазерной станции появляется отраженный электромагнитный импульс. После этого дальнейшее сопровождение космического аппарата лазерным пучком переключают на компьютер, который автоматически вводит найденную экспериментально дополнительную угловую поправку, и процесс локации проходит, как правило, без вмешательства оператора.

В качестве первой причины этого небольшого рассогласования между расчетным угловым направлением на место встречи лазерного импульса с космическим аппаратом и фактическим угловым направлением на это место было выдвинуто предположение о несовпадении оптической оси телескопа с осью лазерного пучка на лазерной станции. Однако дополнительные исследования юстировки показали [2], что эти оси с требуемой точностью совпадают.

На мощных лазерных станциях, использующих широкие лазерные пучки, этот эффект не наблюдался, так как световой импульс в окрестности космического аппарата имел большие поперечные размеры, и отражатели, установленные на космическом аппарате, попадали на периферию этого импульса.

Исследуя этот вопрос, мы показали [3], что причиной такого рассогласования является искривление лазерных лучей во вращающейся системе от-

счета. Поэтому существовавшие ранее автоматизированные системы наведения и целеуказания для задач проведения прецизионной локации космических аппаратов узкими лазерными пучками должны быть переработаны, так чтобы при расчетах угловых координат места встречи лазерного импульса и космического аппарата они учитывали этот эффект общей теории относительности [4].

Предметом обсуждения данной статьи и является разработка такой системы, учитывающей искривление лазерных лучей из-за вращения Земли.

Постановка задачи

Процесс поиска и захвата ретрорефлекторов космического аппарата световыми импульсами лазерной станции состоит в следующем. Используя получаемые лазерной станцией из Центра управления полетами элементы орбиты $p, e, \theta, \psi, \varphi$ интересующего нас космического аппарата (для этих целей можно использовать его эфемериды), а также момент времени T_0 прохождения им перицентра, телескоп лазерной станции ориентируют в направлении ожидаемого места появления космического аппарата на небесной сфере. Для уменьшения погрешностей, вносимых неоднородностью атмосферы, рабочими при лазерной локации считаются участки небесной сферы, расположенные на 20° выше местного горизонта. Обычно космический аппарат оказывается подсвеченным лучами от Солнца и поэтому его хорошо видно в телескоп лазерной станции.

Информационно-поисковая система с помощью ПЗС-матрицы должна измерить и зафиксировать угловое положение космического аппарата, а также и момент времени измерения t_0 . По этим данным она должна вычислить угловые координаты направления посылки лазерного импульса в момент времени $t_b = t_0 + t_1 + t_2$, где t_1 — время, необходимое компьютеру для проведения вычислений, t_2 — время, необходимое исполнительному механизму для изменения ориентации оси лазера на направление посылки лазерного импульса. Только тогда узкий лазерный импульс попадет на ретрорефлекторы движущегося космического аппарата.

Алгоритм построения математической модели

Предположим, что лазерная станция расположена на поверхности Земли в точке, радиус-вектор которой составляет угол θ_0 с осью вращения Земли, и эта точка имеет географическую долготу φ_0 . Процесс лазерной локации космических аппаратов обычно проводят, используя топоцентрическую систему отсчета, начало которой совмещено с лазерной станцией, ось z которой направлена по местной вертикали, ось x — по касательной к меридиану, а ось y — по касательной к параллели.

В этой топоцентрической системе отсчета координаты x_S, y_S, z_S космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите [5], с требуемой точностью имеют вид

$$x_S(\xi, t(\xi)) = a\{\cos\psi\cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) + \sin\psi\cos\theta\sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)\cos\theta_0 - \sin\psi\sin\theta\sin\theta_0\} \times \\ \times (\cos\xi - e) - a\sqrt{1-e^2}\{\sin\psi\cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) - \cos\psi\cos\theta\sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)\cos\theta_0 + \cos\psi\sin\theta\sin\theta_0\}\sin\xi; \quad (1)$$

$$y_S(\xi, t(\xi)) = a(\cos\xi - e)[\sin\psi\cos\theta\cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) - \cos\psi\sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)] + \\ + a\sqrt{1-e^2}[\sin\psi\sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) + \cos\psi\cos\theta\cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)]\sin\xi;$$

$$z_S(\xi, t(\xi)) = a\{\cos\psi\cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) + \sin\psi\cos\theta\sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)\sin\theta_0 + \sin\psi\sin\theta\cos\theta_0\}(\cos\xi - e) + \\ + a\sqrt{1-e^2}\{\cos\psi\cos\theta\sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) - \sin\psi\cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)\sin\theta_0 + \cos\psi\sin\theta\cos\theta_0\}\sin\xi - R_0,$$

где R_0 — радиус Земли; θ — наклонение орбиты; φ — долгота восходящего узла; ψ — угловое расстояние перигея орбиты от узла; ξ — безразмерная переменная, называемая эксцентрической аномалией, $a = (R_a + R_p)/2$ — большая полуось эллипса, $e = (R_a - R_p)/(R_a + R_p)$ — его эксцентриситет.

Время t , входящее в выражения (1), является собственным временем невращающейся геоцентрической системы отсчета. Оно связано с эксцентрической аномалией ξ соотношением

$$t(\xi) = T_0 + \frac{T}{2\pi} [\xi - e\sin\xi], \quad (2)$$

где T_0 — постоянная интегрирования, имеющая смысл момента времени, в который космический аппарат находился в перигее; $T = 2\pi\sqrt{a^3/(GM)}$ — период обращения космического аппарата по орбите; GM — произведение постоянной тяготения на массу Земли. Согласно [6] для Земли $GM = 398\,601 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2$.

В топоцентрической системе отсчета уравнение луча, выходящего в момент времени $t = 0$ из лазерной станции, и закон движения лазерных импульсов по этому лучу имеют вид

$$x_L(t) = R_0\sin\theta_0\cos\theta_0[\cos\Omega t - 1] + \\ + ct[\cos(\Omega t + \varphi_0 - \Phi)\sin\Theta\cos\theta_0 - \cos\Theta\sin\theta_0]; \\ y_L(t) = -R_0\sin\theta_0\sin\Omega t - ct\sin(\Omega t + \varphi_0 - \Phi)\sin\Theta;$$

$$z_L(t) = R_0\sin^2\theta_0[\cos\Omega t - 1] + \\ + ct[\cos(\Omega t + \varphi_0 - \Phi)\sin\Theta\sin\theta_0 + \cos\Theta\cos\theta_0],$$

где Θ, Φ — постоянные интегрирования.

Сделав замену $t \rightarrow t - t_b$, получим уравнение пучка лучей, по которым в момент времени $t = t_b$ различные импульсы проходят через лазерную станцию:

$$x_L(t) = R_0\sin\theta_0\cos\theta_0[\cos\Omega(t - t_b) - 1] + \\ + c(t - t_b)\{\cos[\Omega(t - t_b) + \varphi_0 - \Phi]\sin\Theta\cos\theta_0 - \cos\Theta\sin\theta_0\}; \quad (3)$$

$$y_L(t) = -R_0\sin\theta_0\sin\Omega(t - t_b) - \\ - c(t - t_b)\sin[\Omega(t - t_b) + \varphi_0 - \Phi]\sin\Theta;$$

$$z_L(t) = R_0\sin^2\theta_0[\cos\Omega(t - t_b) - 1] + \\ + c(t - t_b)\{\cos[\Omega(t - t_b) + \varphi_0 - \Phi]\sin\Theta\sin\theta_0 + \cos\Theta\cos\theta_0\}.$$

Используя эти соотношения, можно построить единичный касательный вектор в любой точке луча:

$$\mathbf{l} = \frac{\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}'|},$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор от центра Земли до КА; штрих означает производную по t .

В момент времени $t = t_b$ этот вектор будет иметь компоненты:

$$l_x = \frac{[\sin\Theta\cos\theta_0\cos(\varphi_0 - \Phi) - \cos\Theta\sin\theta_0]}{\sqrt{1 + \frac{2\Omega R_0}{c}\sin\Theta\cos\theta_0\sin(\varphi_0 - \Phi) + \frac{\Omega^2 R_0^2}{c^2}\sin^2\theta_0}}; \quad (4)$$

$$l_y = -\frac{[\sin\Theta\sin(\varphi_0 - \Phi) + \Omega R_0\sin\theta_0/c]}{\sqrt{1 + \frac{2\Omega R_0}{c}\sin\Theta\sin\theta_0\sin(\varphi_0 - \Phi) + \frac{\Omega^2 R_0^2}{c^2}\sin^2\theta_0}};$$

$$l_z = \frac{[\sin\Theta\sin\theta_0\cos(\varphi_0 - \Phi) + \cos\Theta\cos\theta_0]}{\sqrt{1 + \frac{2\Omega R_0}{c}\sin\Theta\sin\theta_0\sin(\varphi_0 - \Phi) + \frac{\Omega^2 R_0^2}{c^2}\sin^2\theta_0}}.$$

Именно вдоль этого вектора в момент времени $t = t_b$ должна быть ориентирована ось лазера для того, чтобы световой импульс в момент времени $t = t_r$ попал на отражатели космического аппарата.

Алгоритм работы информационно-поисковой системы

Обозначим эксцентрическую аномалию в момент попадания лазерного импульса на ретрорефлектор космического аппарата ξ_r . Момент времени t_r , со-

ответствующий этому значению ξ_r , может быть найден с помощью выражения (2):

$$t_r = T_0 + \frac{T}{2\pi} [\xi_r - e \sin \xi_r]. \quad (5)$$

Тогда для определения единичного вектора $\mathbf{l}$, вдоль которого необходимо послать лазерный импульс в момент времени t_b , имеем три трансцендентных уравнения:

$$x_L(t_r) = x_S(\xi_r, t_r), \quad y_L(t_r) = y_S(\xi_r, t_r), \quad z_L(t_r) = z_S(\xi_r, t_r).$$

Приведем эти уравнения к более простому виду. После тождественных преобразований с учетом явных выражений (1) и (3) будем иметь:

$$\begin{aligned} R_0 \sin \theta_0 \cos(\Omega t_b + \varphi_0) + c(t_r - t_b) \sin \Theta \cos(\Omega t_b + \Phi) &= \\ = a(\cos \xi_r - e) \{ \cos \psi \cos \varphi - \cos \theta \sin \psi \sin \varphi \} - \\ - a\sqrt{1-e^2} \{ \sin \psi \cos \varphi + \cos \theta \cos \psi \sin \varphi \} \sin \xi_r; \\ R_0 \sin \theta_0 \sin(\Omega t_b + \varphi_0) + c(t_r - t_b) \sin \Theta \sin(\Omega t_b + \Phi) &= \\ = a(\cos \xi_r - e) \{ \cos \psi \sin \varphi + \cos \theta \sin \psi \cos \varphi \} - \\ - a\sqrt{1-e^2} \{ \sin \psi \sin \varphi - \cos \theta \cos \psi \cos \varphi \} \sin \xi_r; \\ R_0 \cos \theta_0 + c(t_r - t_b) \cos \Theta &= \\ = a(\cos \xi_r - e) \sin \psi \sin \theta + a\sqrt{1-e^2} \cos \psi \sin \theta \sin \xi_r. \end{aligned}$$

Выразим из этих равенств $\cos \Theta$, $\sin \Theta \cos \Phi$, $\sin \Theta \sin \Phi$. В результате получим:

$$\begin{aligned} \sin \Theta \cos \Phi &= \frac{a(\cos \xi_r - e)}{c(t_r - t_b)} \{ \cos \psi \cos(\Omega t_b - \varphi) + \\ + \cos \theta \sin \psi \sin(\Omega t_b - \varphi) \} - \frac{a\sqrt{1-e^2}}{c(t_r - t_b)} \{ \sin \psi \cos(\Omega t_b - \varphi) - \\ - \cos \theta \cos \psi \sin(\Omega t_b - \varphi) \} \sin \xi_r - \frac{R_0 \sin \theta_0 \cos \varphi_0}{c(t_r - t_b)}; \quad (6) \\ \sin \Theta \sin \Phi &= -\frac{a(\cos \xi_r - e)}{c(t_r - t_b)} \{ \cos \psi \sin(\Omega t_b - \varphi) - \\ - \cos \theta \sin \psi \cos(\Omega t_b - \varphi) \} + \frac{a\sqrt{1-e^2}}{c(t_r - t_b)} \{ \sin \psi \sin(\Omega t_b - \varphi) + \\ + \cos \theta \cos \psi \cos(\Omega t_b - \varphi) \} \sin \xi_r - \frac{R_0 \sin \theta_0 \sin \varphi_0}{c(t_r - t_b)}; \\ \cos \Theta &= \frac{a(\cos \xi_r - e)}{c(t_r - t_b)} \sin \theta \sin \psi + \\ + \frac{a\sqrt{1-e^2}}{c(t_r - t_b)} \sin \theta \cos \psi \sin \xi_r - \frac{R_0 \sin \theta_0}{c(t_r - t_b)}. \end{aligned}$$

Подставляя эти равенства в выражения (4) и учитывая, что $\Omega R_0 \ll c$, приведем их к следующему виду:

$$\begin{aligned} l_x(t_b) &= A \{ a \{ [\cos \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) + \\ + \cos \theta \sin \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] \cos \theta_0 - \\ - \sin \theta \sin \theta_0 \sin \psi \} (\cos \xi_r - e) - \\ - a\sqrt{1-e^2} \{ [\sin \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) - \\ - \cos \theta \cos \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] \cos \theta_0 + \\ + \sin \theta \sin \theta_0 \cos \psi \} \sin \xi_r \}; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_y(t_b) &= -A \{ a [\cos \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) - \\ - \cos \theta \sin \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] (\cos \xi_r - e) - \\ - a\sqrt{1-e^2} [\sin \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) + \\ + \cos \theta \cos \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] \sin \xi_r + \\ + \Omega R_0 (t_r - t_b) \sin \theta_0 \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_z(t_b) &= A \{ a \{ [\cos \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) + \\ + \cos \theta \sin \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] \sin \theta_0 + \\ + \sin \theta \cos \theta_0 \sin \psi \} (\cos \xi_r - e) - \\ - a\sqrt{1-e^2} \{ [\sin \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) - \\ - \cos \theta \cos \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] \sin \theta_0 - \\ - \sin \theta \cos \theta_0 \cos \psi \} \sin \xi_r - R_0 \}, \end{aligned}$$

где для сокращения записи введено обозначение

$$\begin{aligned} A &= \{ c^2(t_r - t_b)^2 + 2\Omega a R_0 (t_r - t_b) \times \\ &\times \{ [\cos \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) - \\ - \cos \theta \sin \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] (\cos \xi_r - e) - \\ - a\sqrt{1-e^2} [\sin \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) + \\ + \cos \theta \cos \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] \sin \xi_r \} \sin \theta_0 + \\ + \Omega^2 R_0^2 (t_r - t_b)^2 \sin^2 \theta_0 \}^{(-1/2)}, \end{aligned}$$

и найдем компоненты единичного вектора $\mathbf{l}$, определяющего направление, вдоль которого необходимо в момент времени $t = t_b$ послать лазерный импульс, чтобы он попал на ретрорефлекторы космического аппарата.

Возводя соотношения (6) в квадрат, складывая их и учитывая выражение (5), получим:

$$\begin{aligned} c^2 \left\{ T_0 + \frac{T}{2\pi} [\xi_r - e \sin \xi_r] - t_b \right\}^2 &= \\ = a^2 [1 - e \cos \xi_r]^2 + R_0^2 - 2a R_0 (\cos \xi_r - e) \times \\ \times \{ \cos \theta_0 \sin \theta \sin \psi + \sin \theta_0 [\cos \psi \cos(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi) + \\ + \cos \theta \sin \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] \} - \\ - 2a R_0 \sqrt{1-e^2} \{ \cos \theta_0 \sin \theta \cos \psi - \sin \theta_0 [\sin \psi \cos(\Omega t_b + \\ + \varphi_0 - \varphi) - \cos \theta \cos \psi \sin(\Omega t_b + \varphi_0 - \varphi)] \} \sin \xi_r. \quad (8) \end{aligned}$$

Решив это уравнение численно относительно ξ_r , из выражения (5) найдем и t_r . Подставляя полученное значение ξ_r в выражения (8), найдем компоненты единичного вектора $\mathbf{l}$. Условие локации на 20° выше местного горизонта в топоцентрической системе отсчета принимает вид: $l_z > \cos 70^\circ$.

Таким образом, мы имеем все необходимые формулы для построения алгоритма численных расчетов.

На первом этапе вычисляем время $t_b = t_0 + t_1 + t_2$ посылки лазерного импульса. Затем, используя уравнение (8), численно определяем значение параметра ξ_r , соответствующее моменту отражения импульса. После этого выражение для ξ_r подставляем в уравнения (5) и определяем момент времени t_r . Полученные выражения подставляем в соотношение (7), которые дают компоненты единичного вектора $\mathbf{l}$, вдоль которого необходимо в момент времени $t = t_b$ послать лазерный импульс, чтобы он в момент времени t_r попал на ретрорефлекторы космического аппарата.

Реализация алгоритма информационно-поисковой системы

Информационно-поисковая система состоит из информационного обеспечения, которое является ее основным компонентом, технического обеспечения, математического и программного обеспечения и информационной базы.

Информационное обеспечение совместно с математическим и программным обеспечением осуществляет: ввод данных, поступающих от внешних источников, и их предварительную обработку, ввод данных в информационную базу и их хранение, формирование документов и сигналов управления для внешних абонентов.

При создании информационного обеспечения мы руководствовались принципами системности, эффективности, унификации, эволюционного развития, информационной совместимости, минимальной избыточности и упреждающей разработки.

Техническое обеспечение информационно-поисковой системы состоит из лазерной станции (передатчик), приемного телескопа (приемник), синхронизатора времени и аппаратуры передачи данных.

Информационная база состоит из нескольких баз данных: баз данных наблюдательно-измерительных пунктов, баз данных телескопов, баз данных ПЗС-матриц, скоростных приводов, баз данных лазеров, баз данных космических аппаратов, баз данных аппаратуры передачи информации и баз данных синхронизаторов. Заполнение баз данных происходит в процессе отладки и эксплуатации информационно-поисковой системы согласно принципу эволюционного развития информационного обеспечения.

Математическое и программное обеспечение состоит из комплекса программ на алгоритмиче-

ском языке FORTRAN и реализует: ввод параметров, проверку введенных параметров, расчет направляющих косинусов для введенных параметров согласно алгоритму, приведенному выше, запись результатов в базу данных информационно-поисковой системы, выдачу результатов расчета на исполнительные механизмы лазерной станции и телескопа.

Применение алгоритма информационно-поисковой системы

С использованием разработанной информационно-поисковой системы были проведены имитационные эксперименты по принятию решений на осуществление требуемой ориентации телескопа лазерной станции при локации космических аппаратов.

В качестве объекта локации были выбраны два космических аппарата: один низкоорбитальный — "Космос-2004", с высотой апогея 1031 км и перигея 993 км, наклонение орбиты 83° , период обращения 105 минут, другой высокоорбитальный — "Радио-астрон", с высотой апогея 365 000 км и перигея 300 км, наклонение орбиты $51,6^\circ$, период обращения 9,5 дней. Предполагалось, что локация этих аппаратов проводится с лазерной станции N 1893, расположенной в п. Кацивели, Крым, Украина, $\theta_0 = 45^\circ 36' 15''$, $\phi_0 = 33^\circ 58' 47''$.

Телескоп этой станции может поворачиваться с угловой скоростью $2,5^\circ/\text{с}$.

Проведенные имитационные эксперименты показали, что основной вклад в вычисляемое время t_b вносит время t_2 — время, необходимое исполнительному механизму для изменения ориентации оси лазера на направление посылки лазерного импульса. Время t_1 , необходимое компьютеру для проведения вычислений, оказалось значительно меньше, чем время t_2 , и оно слабо зависит от выбора околоземного космического аппарата. Так, например, на расчет требуемой ориентации телескопа при локации низкоорбитального космического аппарата процессорное время составляет 2,5 с, а для высокоорбитального аппарата это время составляет 3,4 с.

Разработанная информационно-поисковая система пригодна не только для решения задач управления ориентацией телескопа лазерной станции при первичном поиске ретрорефлекторов космического аппарата, но и для дальнейшего сопровождения их в процессе лазерной локации.

Имитационные эксперименты по принятию решений на осуществление требуемой ориентации телескопа лазерной станции при локации космических аппаратов показали хорошие результаты. Преимущества предложенного подхода к управлению телескопом лазерной станции заключаются в том, что система работает в режиме реального вре-

мени и не накапливает ошибок вычислений, а также ошибок, обусловленных действием возмущающих сил на космический аппарат и приводящих к небольшому отклонению реального закона движения от кеплеровского закона движения (1). Это происходит из-за того, что перед посылкой каждого лазерного импульса система определяет с помощью ПЗС-матрицы видимое положение космического аппарата и для прогнозирования его положения в момент следующей встречи с лазерным импульсом использует закон движения (1), который при $t_b \leq t \leq t_r$ достаточно хорошо аппроксимирует закон реального движения.

Список литературы

1. Глонасс — принципы построения и функционирования. 3-е изд., перераб. под ред. А. И. Петрова и В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2005. 688 с.
2. Игнатенко Ю. В., Тряпицын В. Н., Игнатенко И. Ю. Исследование скоростной аберрации при лазерной локации искусственных спутников Земли // Тез. докл. Третьей Украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. Кацивели, Крым, 2003. С. 172.
3. Денисов М. М., Кравцов Н. В., Кривченко И. В. Оптические эффекты во вращающейся системе отсчета // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 2007. Т. 85. № 8. С. 501—503.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1988. 510 с.
5. Дубошин Г. Н. Небесная механика. М.: Наука, 1968. 800 с.
6. Жарков В. Н., Трубицын В. П. Физика планетных недр. М.: Наука, 1980.

УДК 531.383:621.396.988—752.3

И. В. Семенов, аспирант,
В. Д. Аксененко, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
office@eprib.ru,
ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

Компенсация влияния момента сухого трения на точность системы гироскопической стабилизации

Предлагается способ компенсации влияния сухого трения в подшипниковых опорах подвеса с помощью дополнительного контура управления по возмущению, использующего информацию датчика угловой скорости, установленного на основании. Выполнен анализ влияния параметров контура компенсации на точность стабилизации. Обсуждаются результаты моделирования.

Ключевые слова: гиростабилизатор, управление по возмущению, компенсация момента трения

Введение

Основными причинами ошибок системы стабилизации являются моменты, связанные с обкаткой двигателя, и внешние моменты, из которых наиболее значимую роль играют моменты сухого трения в опорах подвеса [1].

Известен ряд технических решений [2, 3, 4], позволяющих уменьшить влияние момента обкатки на точность стабилизации. В таком случае доминирующим возмущающим моментом, определяющим точность стабилизации, становится момент сухого трения, и разработка решений по снижению его влияния весьма актуальна.

При определении точности следящих систем гиростабилизаторов широко используется модель трения Кулона, что объясняется простотой этой модели. Однако многочисленные исследования,

проведенные в этой области [3, 5], показали, что указанная модель является грубой и ее использование дает завышенные оценки ошибки стабилизации. В действительности момент трения в подшипниковых опорах при изменении направления движения изменяется не скачком, а по плавной кривой, близкой к экспоненте, что объясняется упругими деформациями в подшипнике [6, 7, 8, 9]. Поэтому момент зависит как от знака угловой скорости, так и от углового перемещения. Отсутствие мгновенного изменения момента позволяет компенсировать его влияние на погрешность стабилизации.

Особенности момента сухого трения в системе гироскопической стабилизации

В данной статье рассматривается одноосный гиростабилизатор на двухстепенном поплавковом гироскопе (ДПГ), описываемый следующей системой дифференциальных уравнений, в которой учитывается нежесткость конструкции платформы [2]:

$$\begin{cases} A_0 p^2 \alpha + H p \beta - R(\gamma - \alpha) = M_{\text{тр}}; \\ J_{\text{дв}} p^2 \gamma + R(\gamma - \alpha) = M_{\text{дв}}; \\ M_{\text{дв}} = \frac{k_{\text{дв}} U}{T_{\text{эм}} p + 1} - S_{\text{дв}}(p \gamma - p \theta); \\ U = -K_{\text{ДПГ}} K_y W_y(p) \beta; \\ B p^2 \beta + C p \beta - H p \alpha = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где A_0 — момент инерции стабилизируемой платформы; H — кинетический момент гироскопа; α — абсолютный угол поворота стабилизируемой платформы вокруг оси стабилизации (ошибка стабилизации); β — угол прецессии ДПГ; $M_{\text{тр}}$ — момент трения на оси стабилизации; R — угловая жесткость

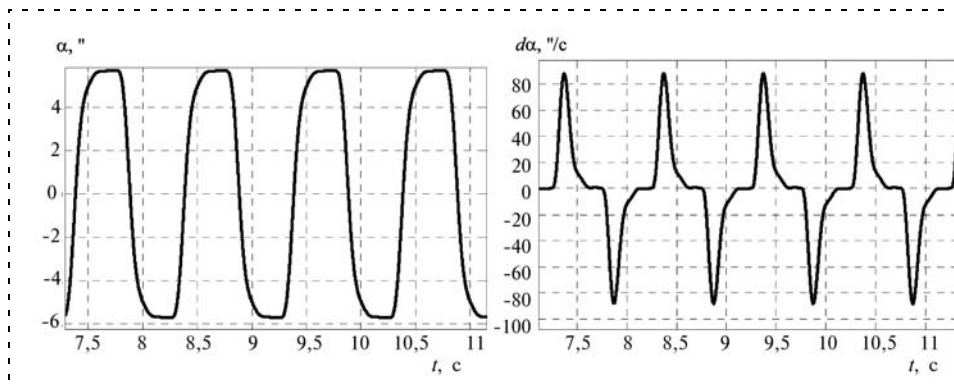


Рис. 1. Ошибка стабилизации (а) и скорость изменения ошибки стабилизации (б) под действием момента сухого трения

соединения ротора моментного двигателя со стабилизируемой платформой; γ — угол поворота вала этого двигателя; θ — угловое колебание основания платформы; $J_{\text{дв}}$ — момент инерции ротора двигателя; $k_{\text{дв}}$ — передаточное число двигателя; $T_{\text{эм}}$ — электромагнитная постоянная времени обмотки управления двигателя; U — управляющее напряжение; $S_{\text{дв}}$ — коэффициент вязкого трения моментного двигателя; $K_{\text{ДПГ}}$ — крутизна рабочей характеристики датчика прецессии гироскопа по выходному напряжению; K_y — коэффициент усиления цепи обратной связи; $W_y(p)$ — передаточная функция регулятора; B — момент инерции гирокамеры гироскопа относительно оси прецессии; C — коэффициент вязкого трения относительно оси прецессии.

Передаточная функция регулятора $W_y(p)$ определяется с помощью классической методики синтеза управления [1] в виде:

$$W_y(p) = W_d(p) = \frac{T_d p + 1}{T_m p + 1}, \quad (2)$$

где T_d — постоянная времени дифференцирования; T_m — малая постоянная времени дифференцирующего устройства.

При анализе используется модель сухого трения [10], которая описывается во временной области соотношением

$$\frac{dT(\alpha)}{dt} = \sigma \left(1 - \frac{T}{T_c} \text{sign} \dot{\alpha} \right)^i \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3)$$

где α — угол поворота; T — момент сухого трения; T_c — максимальное значение момента сухого трения; σ — параметр жесткости опоры; i — экспоненциальный показатель момента сухого трения. В результате интегрирования выражения (3) с учетом начальных условий модель трения принимает следующий вид:

$$T = T_0 + (T_c - T_0 \text{sign} \dot{\alpha}) (1 - e^{-\left| \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_c} \right|}) \text{sign} \dot{\alpha}, \quad (4)$$

где T_0 — значение момента трения в момент смены знака угловой скорости; α_0 — значение угла поворота в момент смены знака угловой скорости

$\alpha_c = \frac{\sigma}{T_c}$ — параметр, определяющий размер зоны упругих деформаций в подшипнике качения. Представленная модель приближается к модели сухого трения Кулона при стремлении α_c к нулю [5].

На рис. 1 представлены зависимости во времени

ошибки системы стабилизации по углу и скорости ее изменения при наличии гармонической качки основания с амплитудой 3° и периодом 1 с. В расчетах приняты следующие значения параметров системы стабилизации:

- момент инерции платформы $A_0 = 20 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$;
- момент инерции ротора двигателя $J_{\text{дв}} = 3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$;
- передаточное число двигателя $k_{\text{дв}} = 0,7 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{В}$;
- электромагнитная постоянная $T_{\text{эм}} = 0,003 \text{ с}$;
- коэффициент вязкого трения $S_{\text{дв}} = 3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$;
- угловая жесткость $R = 5 \cdot 10^4$;
- коэффициент передачи датчика угла прецессии ДПГ $K_{\text{ДПГ}} = 100 \text{ В/рад}$;
- момент инерции гирокамеры ДПГ $B = 0,000126 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$;
- коэффициент вязкого трения $C = 0,018 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$;
- кинетический момент гироскопа $H = 0,03 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$;
- максимальное значение момента сухого трения $T_c = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- величина зоны упругих деформаций в подшипнике качения $\alpha_c = 0,75^\circ$.

Под действием момента сухого трения при смене знака угловой скорости в следящей системе управления возникает переходной процесс по углу и, следовательно, скорости его изменения. Представленные на рис. 1 зависимости показывают, что ошибка стабилизации находится на уровне $6''$, а максимальное значение скорости изменения ошибки достигает $90''/\text{с}$, что в ряде случаев является неприемлемым.

Принцип компенсации влияния момента сухого трения на точность стабилизации

Для уменьшения ошибок стабилизации предлагается использовать метод комбинированного управления, формируя момент, компенсирующий момент сухого трения, в качестве сигнала управления по возмущению [11]. В систему гиростабили-

зации вводится дополнительный датчик угловой скорости (ДУС), который устанавливается на основание гиросtabilизатора так, чтобы его ось чувствительности была направлена вдоль оси стабилизации платформы. Структурная схема системы представлена на рис. 2.

Сигнал $U_{\text{ДУС}}$, поступающий с датчика, содержит информацию об абсолютной угловой скорости движения основания. Интегрируя получаемый сигнал, определяют угловое перемещение основания. Комбинируя полученную информацию с моделью сухого трения в подшипниковых опорах, формируют сигнал управления $U_{\text{доп}}$ по следующему закону:

$$U_{\text{доп}} = \frac{1}{k_{\text{дв}}} [U_{\text{доп}0} + (K_1 - U_{\text{доп}0} \text{sign} U_{\text{ДУС}}) (1 - e^{-\left| \frac{\gamma - \gamma_0}{K_2} \right|}) \text{sign} U_{\text{ДУС}}], \quad (5)$$

где $\gamma = \int U_{\text{ДУС}} dt$ — угол поворота основания; K_1, K_2 — коэффициенты, определяемые в процессе регулирования системы; $U_{\text{доп}0}, \gamma_0$ — значения сигнала компенсации и угла поворота основания, зафиксированные в момент смены знака угловой скорости.

Графики ошибки стабилизации системы со структурой, представленной на рис. 2, и указанными ранее параметрами приведены на рис. 3.

Максимальное значение ошибки стабилизации составляет здесь 0,3", а скорости ее изменения — 5"/с. Указанные погрешности получены при моделировании системы с идеальным дополнительным ДУС, при отсутствии временной задержки и точном знании параметров модели трения.

Рассмотрим влияние конструктивных параметров ДУС, временной задержки в выработке компенсирующего управления и точности определения коэффициентов K_1, K_2 из выражения (4) на эффективность компенсации возмущающего момента. Получение аналитической оценки погрешности представляет значительные сложности в силу нелинейного характера компенсирующего управления, поэтому функции влияния будем определять с помощью моделирования системы стабилизации.

Влияние смещения нуля ДУС на эффективность компенсации момента сухого трения

В настоящее время из всех типов ДУС наиболее широкое распространение получили микромеханические (ММГ) и волоконно-оптические (ВОГ) гироскопы. Первые из указанных датчиков характеризуются смещением нуля на уровне десятков-сотен градусов в час, вторые — долями — единицами градусов в час. Высокоточные ВОГ являются дорогостоящими, и их применение приведет к значительному удорожанию системы, поэтому целесообразно ограничиться датчиками с уровнем смещения нуля от 1 до 10 °/ч.

Смещение нуля ДУС приводит к тому, что изменение знака угловой скорости по выходному сигналу ДУС смещено относительно момента действительного изменения направления движения. Соответственно смещается выработка управляющего воздействия, которое уже не может скомпенсировать влияние возмущающего момента от сухого трения. Графики влияния смещения нуля ДУС на эффективность компенсации влияния сухого трения, полученные при гармонической качке с амплитудой 0,5° и частотами 0,2, 1 и 5 Гц, представлены на рис. 4.

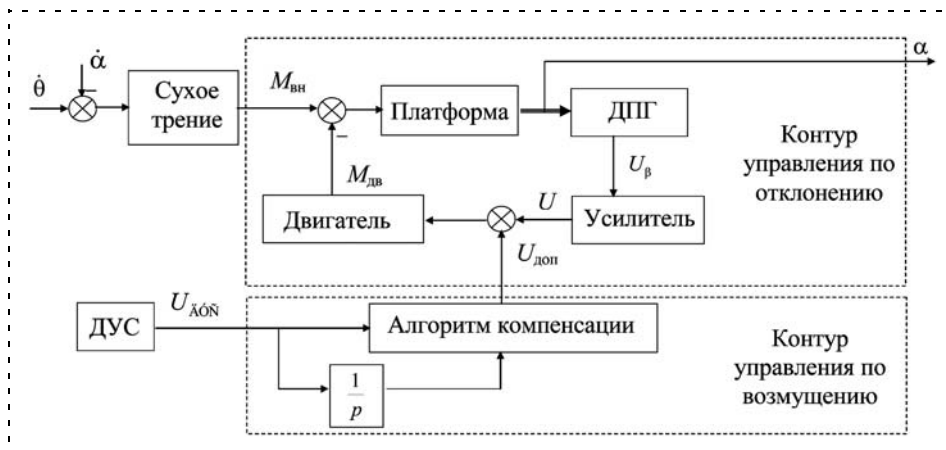


Рис. 2. Структурная схема системы стабилизации с контуром компенсации

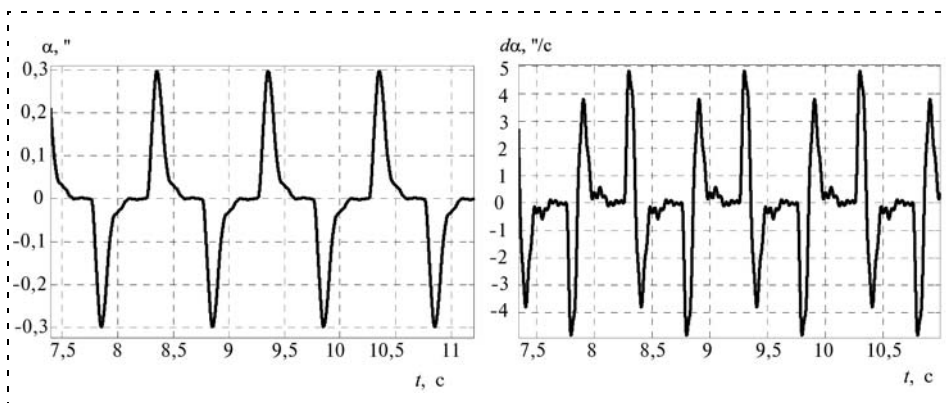


Рис. 3. Погрешность системы стабилизации (а) и скорость изменения ошибки стабилизации (б)

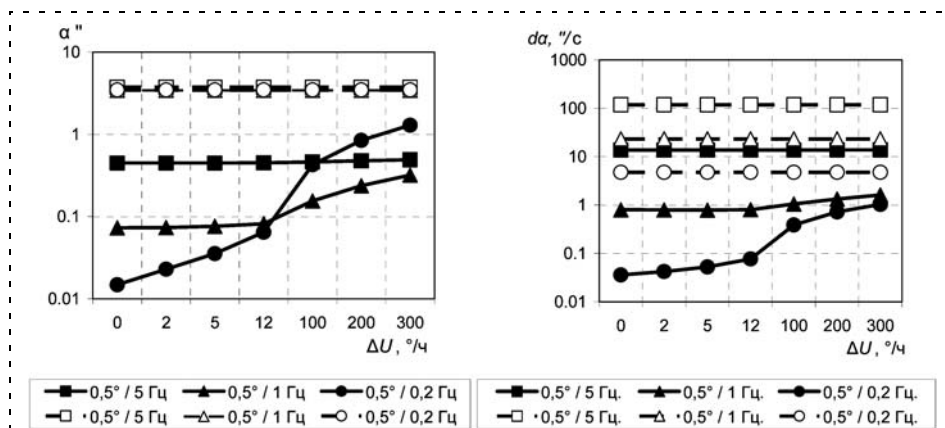


Рис. 4. Влияние смещения ДУС на точность компенсации ошибки стабилизации (а) и скорости ее изменения (б)

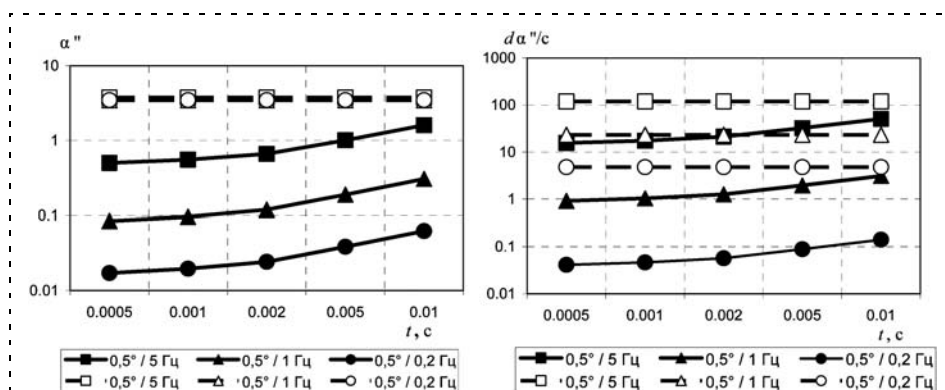


Рис. 5. Влияние временной задержки на точность компенсации ошибки стабилизации (а) и скорости ее изменения (б)

Здесь и далее штриховой линией с белыми маркерами на графиках представлена ошибка и скорость ее изменения в системе стабилизации без использования алгоритма компенсации при различных частотах возмущающего воздействия, сплошной линией показаны ошибки системы после компенсации. Из приведенных графиков видно, что компенсация более эффективна при низких частотах качки. Полученные зависимости показывают, что с увеличением смещения эффективность компенсации понижается, причем влияние смещения на низких частотах качки больше, чем на высоких. Однако даже при использовании микромеханических ДУС со смещением нуля в несколько сот градусов в час предложенный способ обеспечивает существенное (в 5...10 раз) снижение ошибки стабилизации и скорости ее изменения.

Компенсация влияния момента сухого трения в условиях задержки при выработке компенсирующего воздействия

В цифровых системах управления на скорость выработки управляющего воздействия влияет частота опроса источника информации, скорость рас-

чета управляющего воздействия и другие факторы. Между моментом появления возмущающего воздействия и моментом выработки управления проходит некоторое время, и эта временная задержка сказывается на эффективности компенсации. Графики влияния временной задержки на эффективность компенсации влияния сухого трения, полученные при гармонической качке с амплитудой 0,5° и частотами 0,2, 1 и 5 Гц, представлены на рис. 5.

Из приведенных графиков аналогично рис. 4 видно, что компенсация более эффективна при низких частотах качки. Полученные зависимости показывают, что с увеличением временной задержки эффективность компенсации понижается, причем относительное влияние задержки не зависит от частоты качки. Однако даже при использовании предложенного подхода в медленных системах с частотой замыкания 100 Гц предложенный способ обеспечивает существенное (в единицы—десятки

раз) снижение ошибки стабилизации и скорости ее изменения.

Влияние точности определения параметров сухого трения на эффективность компенсации

Для обеспечения точной компенсации момента сухого трения необходимо определить значения коэффициентов K_1 и K_2 . Первый из представленных коэффициентов численно определяет максимальное значение момента сухого трения в опоре подвеса. Значение этого коэффициента может быть определено с высокой точностью в процессе проведения регулировочных работ системы стабилизации. Второй коэффициент определяет размер зоны действия сил упругости при движении платформы, и нахождение точного значения этого коэффициента затруднено. Рассмотрим влияние погрешности определения второго коэффициента на ошибку системы стабилизации, считая, что значение K_1 найдено точно.

Графики влияния погрешности определения коэффициента K_2 на эффективность компенсации влияния сухого трения, полученные при гармонической качке с амплитудой 0,5° и частотами 0,2, 1 и 5 Гц,

представлены на рис. 6. По оси абсцисс отложена относительная точность определения коэффициента K_2 , определяемая выражением

$$\delta K = \frac{K_2 - \alpha_c}{\alpha_c}.$$

Из приведенных графиков аналогично рис. 4, 5 видно, что компенсация более эффективна при низких частотах качки, однако только при достаточно точном определении коэффициента K_2 . С увеличением погрешности определения коэффициента K_2 эффективность компенсации понижается, причем для низких частот качки более быстро, при погрешности нахождения коэффициента K_2 более 15...20 % относительное влияние неточности его определения практически не зависит от частоты качки. Однако использование предложенного подхода даже при погрешности определения параметров сухого трения до 20 % обеспечивает существенное (в разы) снижение ошибки стабилизации и скорости ее изменения.

Эффективность компенсации момента сухого трения в условиях реального полета

Для моделирования работы системы гироскопической стабилизации в реальных условиях были использованы результаты измерения координат и углов ориентации самолета в рабочем режиме с помощью системы LiDAR, в состав которой помимо лазерной измерительной системы были включены GPS-приемник и инерциальный измерительный модуль [12]. График изменения угла тангажа и его спектральный состав при прямолинейном движении самолета представлены на рис. 7.

Спектральный анализ показал наличие как достаточно больших угловых колебаний основания, имеющих при этом

низкую частоту, так и высокочастотных колебаний малой амплитуды. Ошибка стабилизации и скорость ее изменения без компенсации влияния сухого трения и при параметрах системы, представленных выше, приведены на рис. 8.

После введения компенсации с использованием волоконно-оптического гироскопа, обладающего смещением нуля на уровне 5 °/ч, при наличии за-

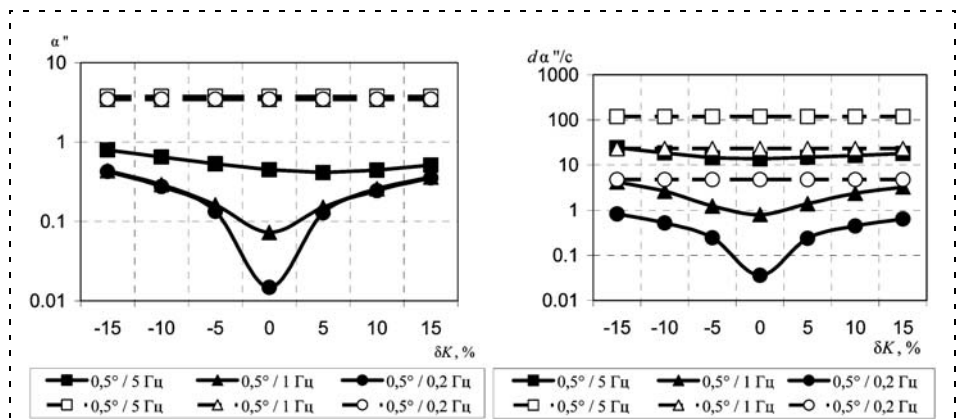


Рис. 6. Влияние точности определения K_2 на точность компенсации ошибки стабилизации (а) и скорости ее изменения (б)

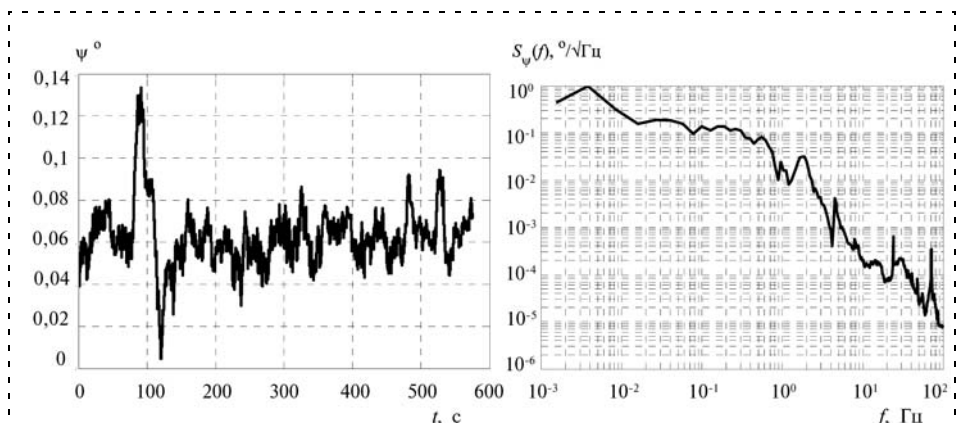


Рис. 7. Изменение угла тангажа при прямолинейном движении самолета (а) и спектр угла тангажа (б)

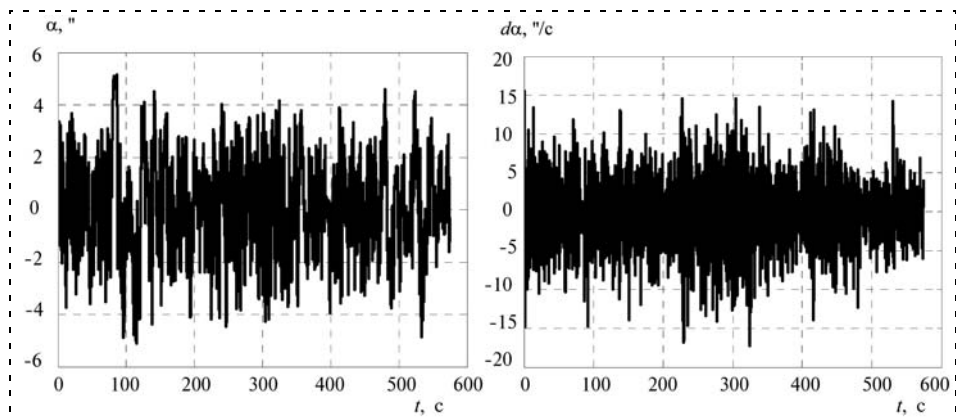


Рис. 8. Ошибка стабилизации (а) и скорость ее изменения (б) в условиях полета без компенсации момента сухого трения

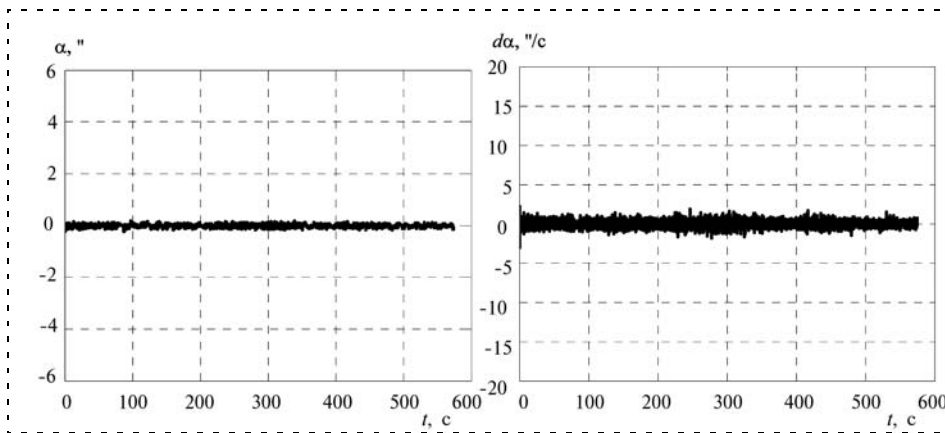


Рис. 9. Ошибка стабилизации (а) и скорость ее изменения (б) в условиях полета с компенсацией момента сухого трения

держки в выработке компенсирующего воздействия на 1 мс и ошибке определения параметров трения в пределах 5 % ошибка стабилизации и скорость ее изменения примут вид, представленный на рис. 9.

Сравнение рис. 8 и 9 наглядно демонстрирует эффективность предложенного способа компенсации влияния сухого трения.

Закключение

Проведенные исследования показали, что введение в систему гироскопической стабилизации дополнительного контура управления по возмущению позволяет значительно повысить ее точность.

Эффективность компенсации возмущения зависит от качества ДУС, временной задержки в выработке компенсирующего управления и точности определения параметров трения, однако даже при использовании дешевых микромеханических ДУС, при частоте замыкания системы 100 Гц и неточ-

ности определения параметров трения до 15 % предлагаемый подход обеспечивает снижение в 5...10 раз ошибки стабилизации, обусловленной сухим трением.

Список литературы

1. Фабрикант Е. А., Журавлев Л. Д. Вопросы динамики следящего привода силовых гироскопических стабилизаторов. Л.: Изд. ЦНИИ "Румб", 1978.
2. Бесекерский В. А., Фабрикант Е. А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. Л.: Судостроение, 1968.
3. Фабрикант Е. А., Журавлев Л. Д. Динамика следящего привода гироскопических стабилизаторов. М.: Машиностроение, 1984.
4. Патент 2193160 РФ. Способ повышения точности двухосного управляемого гиросtabilизатора и двухосный управляемый гиросtabilизатор. Грязев Б. В., Малютин Д. М. и др. 2001.
5. Аксененко В. Д., Семенов И. В. Исследование влияния сухого трения на точность гироскопического стабилизатора // Рефераты докладов XXVII конф. памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. СПб.: "ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", 2010.
6. Dahl P.R. Measurement of solid friction parameters of ball bearings // Proc. of 6th Annual Symp. On Incremental Motion, Control Systems and Devices, Illinois, 1977.
7. Leus M., Gutowski P. Analysis of longitudinal tangential contact vibration effect on friction force using Coulomb and Dahl models // Journal of theoretical and applied mechanics. Warsaw, 2008.
8. Lampaert V., Swevers J., Al-bender F. Experimental comparison of different friction models for accurate low-velocity tracking // Proc. of the 10th Mediterranean conference on control and automation — MED2002. Lisbon, Portugal, 2002.
9. Плотников П. К. Модели сил трения одномерных кинематических пар и свойства движения твердых тел // Известия Академии наук. Механика твердого тела. 2003. № 4.
10. Dahl P. A solid friction model // Aerospace Corp., El Segundo, C.A. Tech. Rep. TOR-0158(3107-18)-1, 1968.
11. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.
12. Schaer P. Airborne LiDAR in-flight accuracy estimation // Philipp Schaer, Jan Skaloud and et. al. GPS world, 2009.



Поздравляем

члена редколлегии журнала
"Мехатроника, автоматизация, управление"

СИГОВА

Александра Сергеевича

— ректора МГТУ МИРЭА,
доктора технических наук, профессора
с избранием *действительным членом РАН*
по отделению нанотехнологий
и информационных технологий.

CONTENTS

Nikonov A. N., Terekhov V. A. On the Initial Conditions Problem for Control Systems with Nonlinear Dynamic and a Control Singularity	2
---	---

A control singularity effects on nonlinear behavior of control systems are investigated. Basic types of singularity are given. Singularity relations for initial conditions problem are demonstrated. The analysis approach based on a singularity analytical study and numerical experiments for model is illustrated on examples of nonlinear control systems.

Keywords: nonlinear controllers, control objective attainability, non-affine control property systems, sliding-mode

Kolosov O. S., Koshoeva B. B. Algorithms of Numerical Differentiation of Real Time in Control Problems	10
---	----

Structures and properties of algorithms of numerical differentiation of real time are analyzed, variants of their synthesis in structure of operating devices of systems of automatic control for improvement of dynamic properties of system and reduction of influence of high-frequency noises are discussed.

Keywords: algorithm of numerical differentiation of real time, pass band, accuracy of differentiation, Interpolation polynomials Newton, regulator

Bobtsov A. A., Efimov D. V., Pyrkin A. A., Zolghadri Ali. Adaptive Algorithm of Frequency Estimation for Bias Periodical Signal with Additive Nonregular Component.	16
--	----

The frequency estimation technique with guaranteed finite time of convergence to a given accuracy of identification is presented. The approach for a high frequency noise rejection is proposed. The possibility of adaptive algorithm introduction for estimation quality improvement is discussed. Efficiency of the approach is demonstrated on examples of computer simulation.

Keywords: identification, estimation quality improvement, adaptive algorithm

Makarov I. M., Lohin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Kryuchenkov E. N., Kucherskiy R. V., Diane S. A. Multi-Agent Robotic Systems: Application Examples and Prospects.	22
--	----

The article shows application example and prospects for multi-agent robotic systems.

Keywords: multi-agent robotic system, intelligent autonomous robot, group robot control

Petukhov I. V. Study of Sensory-Motor Interaction of The Human-Operator and Technical System	33
---	----

In clause questions of maintenance of reliability and high efficiency of human-machine systems are opened. The approach based on a complex psychophysiological estimation of opportunities of the person on perception and processing of the information, forecasting and decision-making is offered. The complex of methodical means is developed for realization of the offered approach and means of their tool realization.

Keywords: human-machine systems, the person-operator, reliability, interfaces, touch systems, sensory-motor interactions

Ivanov A. S., Lapkovsky R. Yu., Ukov D. A., Filimonyuk L. Yu. The Cause-Effect Approach for Investigations of Emergency Situations in Man-Machine Systems.	38
---	----

Emergency situations analysis in complicated ergatic systems is an actual problem today, which is associated with an necessity of large amount of heterogeneous information processing. It complicates the work of investigators.

The authors provide the approach, which facilitates the investigations and makes possible to explain the reasons for the accidents with enough accuracy degree.

Keywords: investigation, accident, emergency, cybernetic systems, complicated systems, ergatic systems, man-machine systems, cause-effect complex, special states

Palaguta K. A., Alekseev A. A. Algorithm of Forecasting of a Head-on Collision	44
---	----

Article is devoted a question of forecasting of a head-on collision of the car. Within the limits of article the algorithm of forecasting of a head-on collision is offered and the criterion of an estimation of efficiency of withdrawal of the car from a head-on collision by evolution on the next strip is formulated.

Keywords: algorithm, prognostication, collision, vehicle, car

- Buznikof S. E., Tambulatov P. V.** Analysis of Objective's Solutions of Vehicle's Speed Stabilization 49
- Considered statement of the problem stabilize the vehicle's speed and it's decisions based on mathematical models of the longitudinal center of mass, engine and transmission. Analysis of simulation results of vehicle dynamics with one-step controller and PI-controller with constant coefficient.*
- Keywords:** automobile control systems, quadratic functional quality of control, problem of stabilization, control action, controllers, differential equations of dynamics of automobile, mathematical model of engine and transmission, analysis of control errors
- Alguliyev R. M., Orujov G. H., Sabziev E. N.** Complex Processing of Measurements for Identification of a Trajectory of Flight the Flying Machine 57
- One of methods for specification of the flight parameters of the flying device is complex processing of measurements of the onboard sensors. In this work is offered one method for definition of the adjustment coefficients of the filter complex when is making complex process the flight information. The suggested method is intended for identification of a trajectory of movement of the flying device.*
- Keywords:** identification of trajectory, complex processing of information, aircraft
- Denisov M. M., Kuzin M. N., Pasisnichenko M. A.** The Pointing Computer System for the Spacecraft Laser Ranging 60
- The pointing and tracking computer system for laser ranging of spacecrafts was developed. This system takes into account that due to Einstein's general relativity theory light ray is bended in the frame of reference of rotating Earth. A description of mathematical model and it's computorial program is given.*
- Keywords:** laser ranging, pointing system, imitation experiments
- Semenov I. V., Aksenenko V. D.** Dry Friction Compensation in Gyrostabilizer 65
- Dry friction torque in gimbals ball bearings provides a considerable degrades performance of gyroscopic stabilization systems. A method of friction compensation is proposed using an additional feedforward control, which employs data from inertial rotate sensor positioned on the base. Influence of control loop parameters on stabilization accuracy is analyzed. Simulation results are discussed.*
- Keywords:** gyrostabilizer, feedforward control, dry friction torque compensation

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 30.11.2011. Подписано в печать 23.01.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 9,16. Заказ МН212. 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"

Оригинал-макет ООО "Авансесд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансесд солюшнз".
105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.