

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 4 (85)

апрель

2008

Редакционный совет:

МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Тян В. К.** Редукция процедуры синтеза многомерных линейных систем управления к синтезу одномерных с типовым объектом 2
Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А. Синтез динамических систем по требуемым показателям качества 7
Тягунов О. А. Выбор показателей качества при многокритериальной настройке параметров систем управления 12

БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Павлова Н. В., Петров В. Г., Видов К. С.** Диалоговый комплекс прототипирования и имитационного моделирования бортового оборудования летательных аппаратов на основе информационной модели 17
Костюков В. М., Кутаранов А. Х. Определение путевой скорости летательного аппарата с помощью оптико-электронной системы 21
Волжин А. С. Об опыте измерения методической ошибки спутникового навигационного приемника, вызванной различием абсолютной и относительной угловой скорости суточного вращения Земли 25

ОТРАСЛЕВЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Малков А. В., Першин И. М.** Проектирование распределенной системы управления режимами эксплуатации месторождения "Куюлус" 27
Резчиков А. Ф., Голембиовский Ю. М., Аветисян Ю. А. Повышение управляемости и компьютеризация систем электроснабжения как важнейшее направление экономии энергии в промышленности 32
Девятков Д. Х., Файнштейн С. И., Тутарова В. Д., Калитаев А. Н. Оперативное планирование отгрузки готовой продукции со складов металлургических предприятий 36

СУДОВАЯ АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ И РЕЧНОМ ФЛОТЕ

- Филаретов В. Ф., Бобков В. А., Юхимец Д. А., Мельман С. В., Борисов Ю. С.** Особенности виртуального моделирования движений подводного аппарата с учетом воздействий окружающей вязкой среды 41
Инзарцев А. В., Павин А. М. Управление автономным необитаемым подводным аппаратом при инспекции искусственных протяженных объектов 47
Ушаков В. В. Применение нейронных сетей при оценке состояния подвижных объектов 54
Жадобин Н. Е., Лебедев А. И. Линейно-кольцевой магнитоупругий датчик упора и продольных колебаний валопроводов 54
Казунин Д. В., Матвеев С. К. Численное моделирование нестационарного газового перехода сжиженного газа в танках газовоза 55
Модеев Р. Н. Лоцманская проводка с берега: международный опыт реализации и существующая нормативная база 55
Давыденко А. А. Управление экономическим развитием морских торговых портов региона 55
Лаврентьева Е. Л. Алгоритм формирования финансовых резервов на ремонт основных средств в организациях водного транспорта 55
Contents 56

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание степени доктора наук

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

Определение 1. Оператор A_0 называется *стабилизирующим оператором*, если для заданного прямого оператора A выполняется условие

$$\|I - AA_0\| < 1, \quad (2)$$

где I — тождественный оператор.

Норма (2) определяется в каждом случае конкретно.

Определение 2. Структура, представленная на рис. 1, называется *фундаментальной*, если последовательность операторов, описывающая данную структуру, при неограниченном увеличении числа периодических ячеек данной структуры является фундаментальной последовательностью в соответствующем пространстве.

Пусть в (1) U, F — банаховы пространства.

Лемма. Для того чтобы представленная на рис. 1 периодическая структура была фундаментальной, необходимо и достаточно, чтобы оператор A_0 являлся стабилизирующим оператором.

Доказательство. Данная структура, содержащая k периодических ячеек, описывается следующей системой операторных уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta U_0 &= A_0 u; \\ \Delta U_1 &= [I - AA_0] u; \\ \Delta U_1 &= A_0 \Delta_1; \\ \Delta U_2 &= I \Delta_1 - A \Delta U_1; \\ \Delta U_2 &= A_0 \Delta_2; \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta U_k &= I \Delta_{k-1} - A \Delta U_{k-1}; \\ \Delta U_k &= A_0 \Delta_k. \end{aligned} \quad (3)$$

Из системы (3) нетрудно получить операторное выражение для структуры длиной k :

$$z_k = A_0 \left[I + \sum_{i=1}^k (I - AA_0)^i \right] u.$$

Тогда оператор, описывающий представленную на рис. 1 периодическую структуру длиной k , имеет вид

$$A_k = A_0 \left[I + \sum_{i=1}^k (I - AA_0)^i \right]. \quad (4)$$

Структура с $(k + 1)$ ячейкой описывается следующим оператором:

$$A_{k+1} = A_0 \left[I + \sum_{i=1}^{k+1} (I - AA_0)^i \right]. \quad (5)$$

Найдем разность операторов

$$\Delta A_k = A_{k+1} - A_k. \quad (6)$$

Подставив (4), (5) в (6), после некоторых преобразований получим

$$\Delta A_k = (I - AA_0)^{k+1}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что необходимым и достаточным условием фундаментальности периодической структуры, представленной на рис. 1, является условие

$$\|I - AA_0\| < 1. \quad (8)$$

Таким образом, лемма доказана.

Теорема. При выполнении условия фундаментальности периодической структуры (8) фундаментальная структура является ограниченной, а оператор периодической структуры сходится к обратному оператору A^{-1} .

Доказательство. На основании (4) запишем

$$AA_k = AA_0 \left[I + \sum_{i=1}^k (I - AA_0)^i \right].$$

После некоторых преобразований и суммирования окончательно получаем

$$AA_k = I - [I - AA_0]^{k+1}. \quad (9)$$

При соблюдении условия (8) выполняются неравенства [5]

$$\sum_{i=0}^{\infty} \| [I - AA_0]^i \| \leq \sum_{i=0}^{\infty} \| I - AA_0 \|^i < \infty.$$

На основании полноты рассматриваемых пространств и сходимости ряда $\sum_{i=0}^{\infty} \| [I - AA_0]^i \|$ из (9)

следует, что оператор AA_k является ограниченным. Так как оператор A является ограниченным, то, следовательно, оператор A_k является также ограниченным при любом значении k .

Таким образом, первая часть теоремы об ограниченности фундаментальной структуры доказана. Перейдем к доказательству второй части теоремы. Предел (9) с учетом (8) примет вид

$$\lim_{k \rightarrow \infty} AA_k = I.$$

Следовательно, $A_{\infty} = A^{-1}$.

Структурное представление обратной передаточной матрицы объекта управления

На базе приведенного выше общефункционального подхода была разработана теория периодических структур, позволяющая проводить синтез инвариантных и автономных многомерных систем [9–10]. На рис. 2 представлена периодическая структура, физически реализующая обратную передаточную матрицу многомерного линейного минимально фазового объекта управления и построенная по аналогии со структурным представлением обратного линейного оператора в банаховом пространстве.

В соответствии с вышеизложенным общефункциональным подходом приведем некоторые понятия применительно к теории автоматического управления.

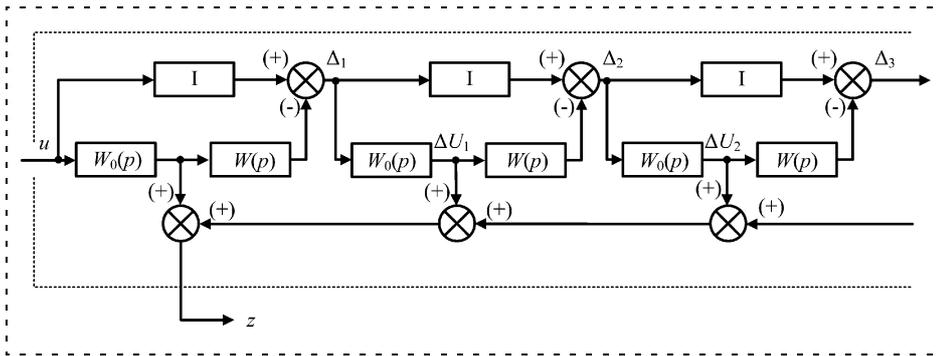


Рис. 2. Структурное представление обратной передаточной матрицы

Определение. Назовем передаточную матрицу $W_0(p)$ стабилизирующей матрицей, функционал $\|I - W(p)W_0(p)\|$ стабилизирующим функционалом, а представленную на рис. 2 передаточную матричную структуру фундаментальной, если последовательность периодических структур передаточных матриц при неограниченном увеличении числа периодических ячеек данной структуры описывается фундаментальной последовательностью передаточных матриц.

В выражении функционала $W(p)$ — передаточная матрица объекта управления.

Лемма. Для того чтобы представленная на рис. 2 периодическая передаточная матричная структура была фундаментальной, необходимо и достаточно, чтобы стабилизирующий функционал удовлетворял условию

$$\|I - W(p)W_0(p)\| < 1. \quad (10)$$

Теорема. При выполнении условия фундаментальности периодической структуры при неограниченном увеличении числа периодических ячеек фундаментальная структура является ограниченной, непрерывной и сходится к обратной передаточной матрице модели линейного минимально фазового объекта управления.

Из изложенного очевидны аналогии в определениях и теоремах для абстрактного банахового пространства и для пространства передаточных матриц линейных многомерных объектов управления. Таким образом, структурное представление обратной передаточной матрицы линейного минимально фазового объекта по аналогии с определением обратного оператора линейного пространства базируется на следующем соотношении:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W_k(p)W(p) = I. \quad (11)$$

Индексом k обозначено число ячеек, $W_k(p)$ — передаточная матрица, описывающая фундаментальную структуру длиной k .

Нетрудно заметить, что в случае устойчивости отдельных звеньев периодической структуры периодическая структура устойчива.

Оценка точности структурного представления обратной передаточной матрицы

В идеальном случае передаточная матрица системы "периодическая структура — объект управления" равна единичной матрице. Степень приближения к идеальному решению обратной задачи можно оценить различными способами. В контексте излагаемой теории оценки точности и физическую интерпретацию формул (10) и (11) да-

дим в частотной области ω , при этом в дальнейшем подразумевая $p = j\omega$.

Частотный диапазон, в котором выполняется условие (10), назовем *интервалом регуляризации*. Таким образом, в интервале регуляризации матрица периодической структуры сходится к обратной передаточной матрице объекта управления, и физическая реализация обратной задачи в системах с причинно-следственными связями (системах реального времени) возможна только в интервале регуляризации. Не случайно интервалом регуляризации является низкочастотная область.

Прямой способ оценки точности структурного представления обратной передаточной матрицы состоит в нахождении матрицы частотных характеристик системы "периодическая структура — объект управления" в интервале регуляризации и вне его и сравнении полученных матриц с единичной матрицей. Недостатком данного способа является точечность его оценки, поскольку оценка проводится при конкретном значении частоты.

Для интервальной оценки точности решения обратной задачи при конечной длине периодической структуры могут быть построены частотные характеристики для всех парных комбинаций скалярных выходов и входов. Однако число частотных характеристик резко возрастает при увеличении размерности (в смысле числа скалярных входов и выходов) объекта управления, что усложняет анализ решения.

Предлагается следующий подход к оценке точности структурного представления обратной передаточной матрицы. При высокой точности решения амплитудно-частотная характеристика произведения диагональных элементов матрицы системы "периодическая структура — объект управления" в интервале регуляризации близка к единице как произведение величин, близких к единице, а фазочастотная характеристика близка к нулю как сумма величин, близких к нулю. Назовем их обобщенными частотными характеристиками. Заметим, что в интервале регуляризации погрешность решения обратной задачи теоретически может быть сколь угодно малой за счет увеличения длины периодической структуры.

На практике же точность решения ограничена рядом факторов и, в первую очередь, точностью математической модели объекта управления.

Область частот, лежащая вне интервала регуляризации, определяет погрешность решения обратной задачи для систем реального времени и принципиально не может быть сведена к нулю. Таким образом, для интервальной оценки точности решения обратной задачи при конечной длине периодической структуры достаточно построить обобщенные частотные характеристики.

Исследование периодической структуры с многомерным объектом управления

Для проверки эффективности использования периодических структур для достижения автономности многомерных систем и возможности редукции синтеза многомерных САУ к синтезу одномерных САУ построим периодическую структуру в среде MATLAB для объекта управления, заданного передаточной матрицей следующего вида:

$$W_{об}(p) = \begin{bmatrix} \frac{3,4(0,4p + 1)}{0,38p^2 + 1,1p + 1} & \frac{6,8(0,55p + 1)}{0,38p^2 + 1,1p + 1} \\ \frac{0,18(1,13p + 1)}{0,38p^2 + 1,1p + 1} & \frac{0,9(1,1p + 1)}{0,38p^2 + 1,1p + 1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

На рис. 3 представлена структурная схема, содержащая периодическую структуру с объектом управления, описываемым передаточной матрицей (12).

Дадим точечную оценку точности решения обратной задачи и вычислим матрицы частотных характеристик внутри интервала регуляризации, например при $\omega = 1$, и вне его, например при $\omega = 10$:

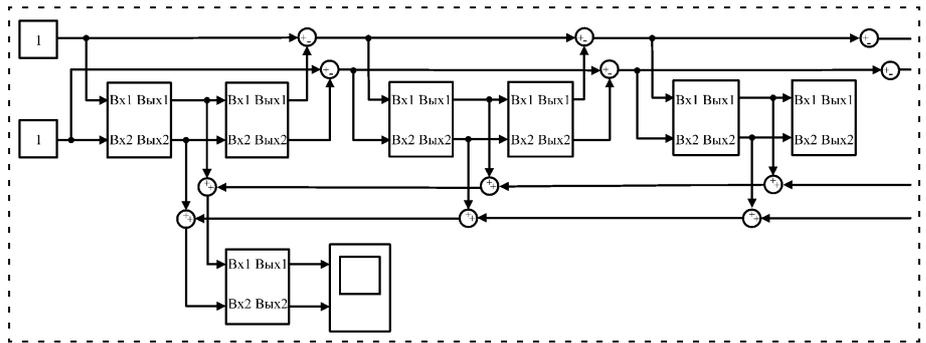


Рис. 3. Периодическая структура с объектом управления в среде MATLAB

- $\omega = 1$:

$$|W(j \cdot 1)W_k(j \cdot 1)| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

- $\omega = 10$:

$$|W(j \cdot 10)W_k(j \cdot 10)| = \begin{bmatrix} 0,969 & 0,176 \\ 0,00955 & 1,95 \end{bmatrix}.$$

Полученные матрицы подтверждают правильность структурного представления обратной матрицы.

Теперь найдем интервальную оценку точности решения обратной задачи. Для этого построим обобщенные частотные характеристики в среде MathCAD для произведения диагональных элементов передаточной матрицы, описывающей периодическую структуру с многомерным объектом управления. Обобщенные ЛАЧХ и ЛФЧХ представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

В интервале регуляризуемости АЧХ практически равна единице, ФЧХ — нулю. Таким образом, достигнута полная автономность в смысле развязки контуров управления в интервале регуляризации. Как и следовало ожидать, вне этого интервала автономность не достигнута (более того, принципиально не может быть достигнута), вследствие чего сохраняется некоторое влияние входов на несобственные выходы.

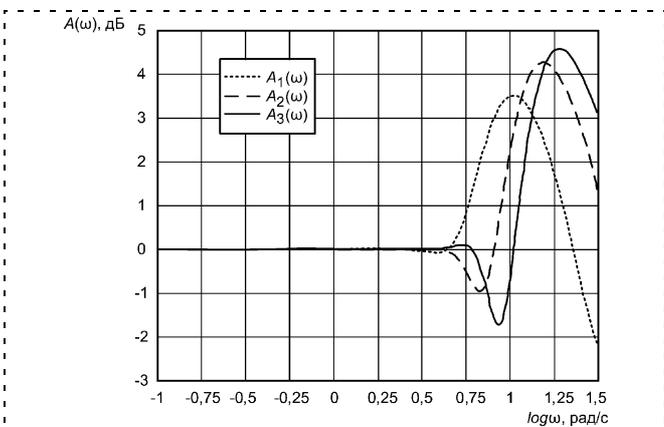


Рис. 4. Обобщенные ЛАЧХ:

$A_1(\omega)$ при $n = 6$; $A_2(\omega)$ при $n = 10$; $A_3(\omega)$ при $n = 13$

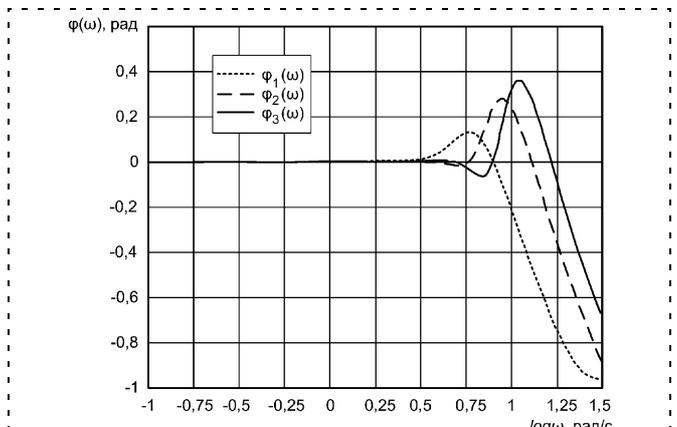


Рис. 5. Обобщенные ЛФЧХ:

$\varphi_1(\omega)$ при $n = 6$; $\varphi_2(\omega)$ при $n = 10$; $\varphi_3(\omega)$ при $n = 13$

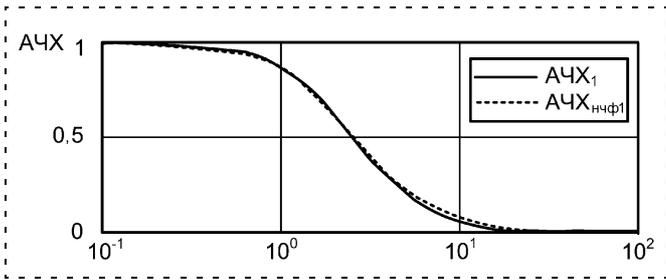


Рис. 6. АЧХ первого канала и АЧХ НЧФ первого канала

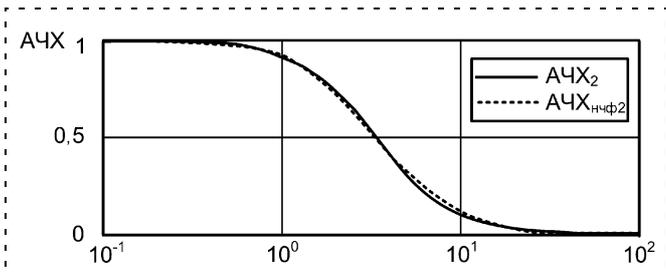


Рис. 7. АЧХ второго канала и АЧХ НЧФ второго канала

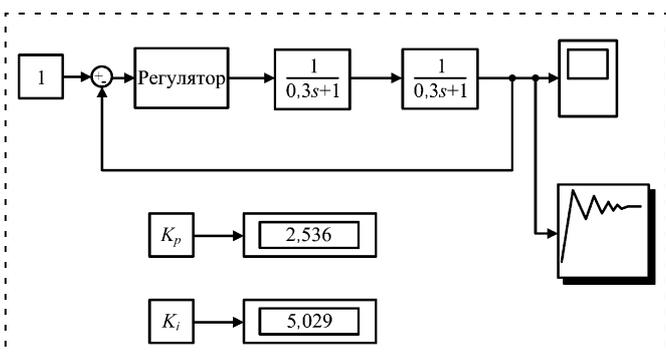


Рис. 8. Синтез регулятора для первого контура

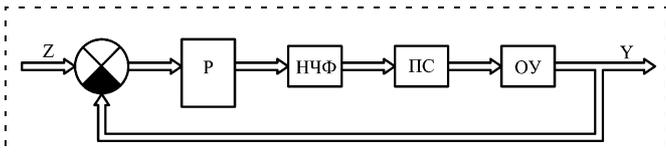


Рис. 9. Структурная схема редуцированной многомерной САУ

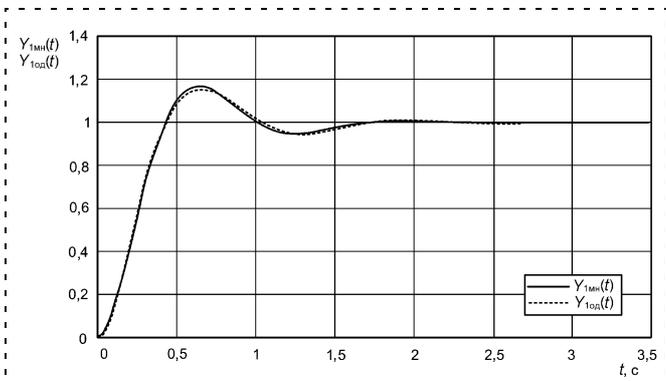


Рис. 10. Переходные характеристики первого автономного контура и соответствующей одномерной системы

Редукция многомерного объекта управления к совокупности одномерных типовых объектов

Для окончательной развязки входов от несобственных выходов системы "периодическая структура — объект управления" логично в интервале регуляризации провести низкочастотную фильтрацию управляющих сигналов. Параметры низкочастотного фильтра (НЧФ) определяются интервалом регуляризации. АЧХ идеального НЧФ имеет вид прямоугольного окна с полосой пропускания, равной интервалу регуляризации. Однако физически данный фильтр не реализуем. В качестве легко реализуемых фильтров могут быть использованы типовые объекты с низкочастотными фильтрующими свойствами, например, апериодические звенья определенного порядка.

В результате аппроксимации собственных АЧХ системы "периодическая структура — объект управления" звеньями второго порядка с единичными коэффициентами усиления получены передаточные функции $W_1(p) = \frac{1}{(0,3p + 1)^2}$, $W_2(p) = \frac{1}{(0,4p + 1)^2}$.

Результаты аппроксимации представлены на рис. 6 и 7.

На рис. 6 совмещены АЧХ первого канала рассматриваемой системы с АЧХ апериодического звена с передаточной функцией $W_1(p)$, на рис. 7 — АЧХ второго канала с АЧХ другого апериодического звена. Таким образом, периодические структуры позволяют добиться высокой автономности контуров управления в интервале регуляризации, а введение НЧФ в каждый канал управления позволяет рассматривать многомерный объект управления с периодической структурой как совокупность одномерных типовых объектов управления.

Редукция синтеза многомерной САУ к синтезу совокупности одномерных САУ с типовым объектом управления

Следующим шагом синтеза многомерных систем является синтез соответствующих одномерных систем с НЧФ в качестве объектов управления. В результате синтеза для НЧФ первого контура настройки ПИ-регулятора равны 2,536 и 5,029, а для второго контура — 1,71 и 2,612 для пропорциональных и интегральных составляющих. Соответствующие структурные схемы в среде MATLAB аналогичны друг другу, и первая из них показана на рис. 8.

Подставим найденные параметры регуляторов одномерных систем в соответствующие регуляторы контуров многомерной системы. Структурная схема синтезируемой многомерной автономной системы представлена на рис. 9.

Для проверки эффективности синтеза многомерных систем в соответствии с вышеизложенным алгоритмом совместим переходные характеристики многомерной системы с соответствующими характери-

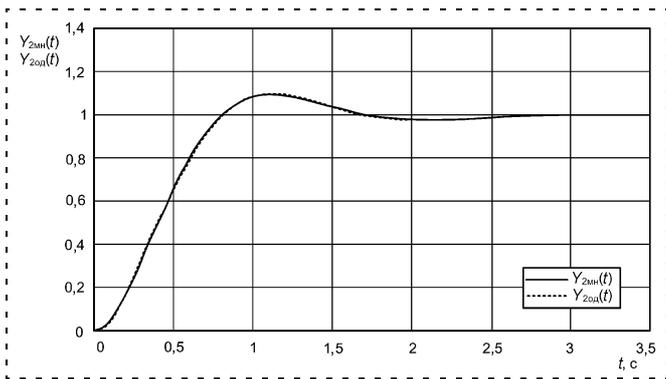


Рис. 11. Переходные характеристики второго автономного контура и соответствующей одномерной системы

стиками одномерных систем с низкочастотными фильтрами в качестве объектов управления. Сравнительные характеристики показаны на рис. 10 и 11.

Выводы

Практическое совпадение переходных характеристик одномерных систем с соответствующими переходными характеристиками многомерной системы свидетельствует об эффективности применения периодических структур в задачах синтеза многомер-

ных линейных систем управления как совокупности одномерных систем, т. е. методом редуцирования МСАУ к одномерным.

Список литературы

1. Морозовский В. Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления / Под общ. ред. К. А. Пупкова. Т. 3. Синтез регуляторов САУ. М.: МГТУ, 2005.
3. Рапопорт Э. Я., Тянь В. К. Достижение заданной инвариантности в стохастических системах комбинированного управления. Куйбышевский политехнический институт. Деп. В ВИНТИ 20.06.89, № 4089-В89.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
5. Тихонов А. Н., Гончаровский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990.
6. Тихонов А. Н., Кальнер В. Д., Гласко В. Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990.
7. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1981.
8. Тянь В. К. Структурное представление обратного оператора в банаховом пространстве // Вест. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. 2007. Вып. № 1 (14). С. 197—199.
9. Тянь В. К. Теория периодических структур в некорректных задачах синтеза инвариантных и автономных систем управления // Вест. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2006. Вып. 41. С. 47—54.

УДК 681.513

А. Р. Гайдук, д-р техн. наук, проф.,
Таганрогский технологический институт
Южного федерального университета,

Е. А. Плаксиенко, канд. техн. наук,
Таганрогский институт управления и экономики

Синтез динамических систем по требуемым показателям качества

Предлагается методика синтеза физически реализуемых динамических систем управления минимально- и неминимально-фазовыми объектами по требуемым показателям качества с использованием стандартных передаточных функций.

Введение. При проектировании мехатронных систем часто возникает необходимость синтеза систем управления приводами, исполнительными механизмами, звеньями манипуляторов и т. п. Поэтому методы синтеза физически реализуемых систем автоматического управления (САУ) с требуемыми показателями качества имеют большое практическое значение [1—3]. Чаще всего необходимо, чтобы синтезируемая система имела требуемые порядки астатизма к задающему и возмущающему воздей-

ствиям, а время регулирования, колебательность и перерегулирование не превышали заданных значений. Указанные свойства САУ, как известно, определяются коэффициентами и знаменателя, и числителя соответствующих передаточных функций (ПФ), поэтому наиболее удобным способом решения данной задачи является применение стандартных ПФ.

Стандартные ПФ известны в теории автоматического управления достаточно давно [1, 2]. Однако на практике по ряду причин [2] они применяются довольно редко. В то же время применение устройств управления с двумя входами, а также учет в полном объеме условий физической реализуемости ПФ системой с частично заданной структурой [4] приводят к удобной аналитической инженерной процедуре синтеза структуры и расчета параметров необходимого устройства управления.

Как показано в работе [5], если объект управления является неминимально-фазовым с вещественным нулем, то замкнутая система также будет неминимально-фазовой. При этом ее переходная функция по задающему воздействию обязательно будет иметь отрицательное перерегулирование. Как правило, по условиям функционирования неминимально-фазовых объектов наличие отрицательного перерегулирования не является фактором, исключая-

шим их эксплуатацию. Однако положительный нуль системы приводит к некоторому увеличению пере-регулирования и времени регулирования по сравнению с характеристиками минимально-фазовых систем. Поэтому синтез неминимально-фазовых систем управления на основе стандартных ПФ имеет некоторые особенности по сравнению с синтезом минимально-фазовых систем.

Изложенная ниже процедура применима в случае полных как минимально-фазовых, так и неминимально-фазовых объектов. Ее модификация к случаю неполных, но стабилизируемых объектов [6] сводится к включению характеристического полинома устойчивой неполной части объекта в характеристический полином устройства управления и, соответственно, в характеристический полином замкнутой системы.

Постановка задачи. Предположим, управляемый объект, включающий исполнительные и измерительные устройства, описывается уравнением

$$A(s)y(s) = B_0(s)u(s) + B_1(s)f(s), \quad (1)$$

где $y(s)$, $u(s)$ и $f(s)$ — изображения по Лапласу управляемой величины, управления и возмущения; $A(s)$, $B_0(s)$, $B_1(s)$ — заданные полиномы, причем если $n = \deg A(s)$, $m_0 = \deg B_0(s)$, $m_1 = \deg B_1(s)$, то $n \geq m_0$ и $n \geq m_1$. Здесь $\deg(\cdot)$ — степень полинома (\cdot) .

Будем также предполагать, что заданная часть является полной [6], т. е. в уравнении (1) полиномы $A(s)$, $B_0(s)$ не имеют одинаковых или близких нулей. Измеряемыми являются две величины: либо отклонение $\varepsilon = g - y$ и задающее воздействие g , либо величины ε и y . В соответствии с этим уравнение управляющего устройства (УУ) (формирующей части регулятора) с двумя входами имеет вид

$$R(s)u(s) = Q_0(s)\varepsilon(s) + \bar{L}(s)y(s) \quad (2)$$

или

$$R(s)u(s) = L(s)\varepsilon(s) + \bar{L}(s)g(s), \quad (3)$$

где полином $\bar{L}(s) = Q_0(s) - L(s)$, а $R(s)$, $Q_0(s)$, $L(s)$ — произвольные полиномы, подлежащие определению. Условие физической реализуемости УУ (2) или (3) запишем в виде неравенства

$$\mu_y \geq \mu_y^*, \quad (4)$$

где $\mu_y = \min\{r - q; r - l\}$ — относительная степень УУ [7], а μ_y^* — заданное минимальное значение этой степени. Здесь и далее $r = \deg R(s)$, $q = \deg Q_0(s)$, $l = \deg L(s)$. Относительная степень объекта управления (1) определяется выражением $\mu_0 = n - m_0$, причем $\mu_0 > 0$.

Если при реализации УУ допустимо применение безынерционных усилителей, то $\mu_y^* = 0$. Если же допустимо применение лишь инерционных звеньев, то $\mu_y^* \geq 1$. Отметим также, что если система состоит из УУ (2) или (3) и заданной части (1), то ее относительная степень $\mu_c = \mu_0 + \mu_y$.

Условимся, что если все нули некоторого полинома $H(s)$ расположены в левой полуплоскости Ω комплексной плоскости, то будем говорить, что $H(s) \in \Omega$ или $H(s)$ является $H_\Omega(s)$. В противном случае — $H(s) \notin \Omega$ или $H(s)$ является $H_{\bar{\Omega}}(s)$.

Факторизуем полином $B_0(s)$ относительно области Ω , т. е. представим его в виде произведения

$$B_0(s) = \beta_m B_\Omega(s) B_{\bar{\Omega}}(s), \quad (5)$$

где β_m — коэффициент этого полинома при старшей степени переменной s , а $B_\Omega(s)$ и $B_{\bar{\Omega}}(s)$ — соответствующие нормированные по старшей степени s полиномы.

Поставим задачу синтеза УУ (2) или (3), т. е. задачу определения степеней и всех коэффициентов полиномов $R(s)$, $Q_0(s)$, $L(s)$ так, чтобы замкнутая система (1), (2) или (1), (3) имела порядки астатизма по задающему и возмущающему воздействиям v_g и v_f , время регулирования t_p и перерегулирование σ не хуже заданных v_g^* и v_f^* , t_p^* и σ^* при выполнении условия (4).

Синтез управлений. При синтезе САУ методом стандартных ПФ [1, 2] в качестве модели замкнутой системы (1), (2) или (1), (3) обычно рассматривается ее ПФ по задающему воздействию. При заданных уравнениях (1)—(3) она определяется выражением

$$W_{yg}(s) = \frac{B_0(s)Q_0(s)}{A(s)R(s) + B_0(s)L(s)}. \quad (6)$$

Описанные в литературе стандартные ПФ [1, 2], как правило, могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} W(s, \omega_0) &= \frac{\Delta_v \omega_0^{n-v} s^v + \dots + \Delta_0 \omega_0^n}{s^n + \Delta_{n-1} \omega_0 s^{n-1} + \dots + \Delta_1 \omega_0^{n-1} s + \Delta_0 \omega_0^n} = \\ &= \frac{H_0(s, \omega_0)}{H(s, \omega_0)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $v = v_g - 1$, а v_g — порядок астатизма САУ по задающему воздействию; Δ_i — коэффициенты нормированной (при $\omega_0 = 1$ в (7)) ПФ; ω_0 — временной масштабный коэффициент. Как известно, применение стандартных ПФ основано [1, 2] на следующем их свойстве: $v = v_{gн}$, $t_p = t_{рн}/\omega_0$, $\sigma_p = \sigma_{рн}$, где $v_{gн}$, $t_{рн}$, $\sigma_{рн}$ и $v_{gн}$, $t_{рн}$, $\sigma_{рн}$ — показатели качества системы с ненормированной ($\omega_0 \neq 1$) и нормированной ($\omega_0 = 1$) ПФ (7) соответственно.

Минимально-фазовые объекты. В соответствии с выражениями (5) и (6) синтезируемая САУ с ПФ типа (7) может быть реализована [4, 5], если только выполняется условие

$$B_0(s) \in \Omega. \quad (8)$$

Действительно, в этом случае $B_{\bar{\Omega}}(s) \equiv 1$, и параметры искомого УУ можно найти путем приравнивания правых частей выражений (6) и (7). При этом для

обеспечения физической реализуемости УУ числитель и знаменатель правой части выражения (7) предварительно умножаются на произведение $B_{\Omega}(s)M(s)$, где $M(s)$ — некоторый полином, удовлетворяющий очевидному условию $M(s) \in \Omega$. Это дает два полиномиальных уравнения $B_0(s)Q_0(s) = H_0(s, \omega_0)B_{\Omega}(s)M(s)$ и $A(s)R(s) + B_0(s)L(s) = H(s, \omega_0)B_{\Omega}(s)M(s)$ относительно искомого полиномов $R(s), Q_0(s), L(s)$.

Условия разрешимости этих уравнений зависят от степеней полиномов $R(s), Q_0(s), L(s)$; от степеней и соотношения нулей полиномов $A(s)$ и $B_0(s)$, т. е. от свойств заданной части (1), а также от степеней и нулей полиномов $H(s, \omega_0)$ и $H_0(s, \omega_0)$, т. е. от свойств желаемой ПФ (7) [4–6]. При условии (8) с учетом (5) положим

$$R(s) = s^{\bar{v}} B_{\Omega}(s) \tilde{R}(s), \quad (9)$$

где $\bar{v} = \max(0, v_g^* - n_a, v_f^* - n_1)$, а n_a и n_1 — числа, определяемые соотношениями $A(s) = s^{n_a} \tilde{A}(s), B_1(s) = s^{n_1} \tilde{B}_1(s)$, причем $\tilde{A}(0) \neq 0$ и $\tilde{B}_1(0) \neq 0$. С учетом выражения (8) и представления (5) указанные выше полиномиальные уравнения принимают следующий вид:

$$Q_0(s) = \beta_m^{-1} H_0(s, \omega_0) M(s); \quad (10)$$

$$\bar{A}(s) \tilde{R}(s) + \beta_m(s)L(s) = H(s, \omega_0)M(s), \quad (11)$$

где $\bar{A}(s) = s^{\bar{v}} A(s)$.

Выражение (10), как видно, определяет полином $Q_0(s)$ непосредственно. Полиномиальное уравнение (11) эквивалентно системе линейных алгебраических уравнений [4], которая имеет решение, во первых, если только полиномы $A(s)$ и $B(s)$ не имеют одинаковых нулей (т. е. если объект является полным); во-вторых, если число неизвестных (коэффициентов полиномов $\tilde{R}(s)$ и $L(s)$) не меньше числа уравнений, т. е. величины $1 + \deg H(s, \omega_0)M(s)$. Отсюда с учетом условия (4) следует, что УУ будет физически реализуемым, если степень n_h полинома $H(s, \omega_0)$ удовлетворяет неравенству

$$n - m_0 + \mu_y^* + v_g^* - 1 \leq n_h \leq 2n + \mu_y^* + \bar{v} - m_0 - 1. \quad (12)$$

Таким образом, степень знаменателя нормированной ПФ, выбираемой для конкретного объекта (1), может варьироваться в достаточно широких пределах, однако более целесообразно принимать ее как можно меньшее значение. Пусть n_h — принятая степень полинома $H(s, \omega_0)$. Тогда степени полиномов $M(s), \tilde{R}(s)$ и $L(s)$ в (10) и (11) можно определить по формулам

$$\deg M(s) = 2n + \bar{v} + \mu_y^* - m_0 - n_h - 1; \quad (13)$$

$$\deg \tilde{R}(s) = \tilde{r} = n + \mu_y^* - m_0 - 1; \quad (14)$$

$$\deg L(s) = l = n + \bar{v} - 1. \quad (15)$$

При этом система линейных уравнений, эквивалентная полиномиальному уравнению (11), имеет вид [4, 6]

$$\begin{bmatrix} \beta_m & 0 & \bar{\alpha}_0 & 0 \\ 0 & \beta_m & \bar{\alpha}_1 & \bar{\alpha}_0 \\ \vdots & 0 & \vdots & \bar{\alpha}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \bar{\alpha}_{\bar{n}} & \vdots \\ 0 & \bar{\alpha}_{\bar{n}} & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \vdots \\ \lambda_1 \\ \rho_0 \\ \vdots \\ \rho_{\bar{r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta_k \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Здесь $\bar{\alpha}_i, \lambda_i, \rho_i, \delta_i$ — коэффициенты полиномов

$\bar{A}(s), L(s), \tilde{R}(s), D(s) = H(s, \omega_0)M(s)$ при степенях s^i соответственно.

Решение системы (16) определяет значения всех коэффициентов полиномов $L(s)$ и $\tilde{R}(s)$. Это позволяет найти полином $R(s)$ и записать уравнение искомого УУ в виде (2) или (3) в зависимости от того, какие переменные — ε и u или ε и g — измеряются в рассматриваемом случае.

Неминимально-фазовые объекты. В том случае, когда $B_0(s) \notin \Omega, B_0(0) \neq 0$ и порядок астатизма по задающему воздействию равен $v_g^* \geq 1$, как показано в работах [4, 5], реализованной может быть лишь ПФ вида

$$W_{yg}(s) = \frac{B_{\Omega}(s)\Pi(s)}{H(s)} = \frac{\gamma_{k_1} s^{k_1} + \dots + \gamma_{v_g^*} s^{v_g^*} + \eta_{v_g^*-1} s^{v_g^*-1} + \dots + \eta_0}{\eta_{n_h} s^{n_h} + \eta_{n_h-1} s^{n_h-1} + \dots + \eta_0}, \quad (17)$$

т. е. в числителе ПФ замкнутой САУ по задающему воздействию будет присутствовать множитель $B_{\Omega}(s) \neq 1$, нули которого лежат вне области Ω . Здесь $k_1 = \deg B_{\Omega}(s)\Pi(s) = m_{\Omega} + v_g^* - 1$. При этом степень полинома $\Pi(s)$ равна $v_g^* - 1$, а его коэффициенты находятся из равенства (17).

Как видно, при $B_0(s) \notin \Omega$ ПФ системы по задающему воздействию уже нельзя выбрать как стандартную ПФ типа (7), так как нули полинома $B_{\Omega}(s)$ оказывают определенное влияние на свойства системы. Однако в этом случае подходящие значения коэффициентов полиномов $\Pi(s)$ и $H(s)$, как показано ниже на примере, можно легко найти путем некоторой вариации коэффициентов стандартной ПФ типа (7), свойства которой несколько лучше требуемых. Вариация коэффициентов стандартной ПФ проводится в процессе моделирования соот-

ветствующей системы, например, в MATLAB. Если необходимо, она заключается в таких изменениях коэффициентов η_i в (17), при которых влияние коэффициентов $\gamma_{k_1}, \dots, \gamma_{v_g^*}$ будет в достаточной мере скомпенсировано.

Степени и коэффициенты полиномов $H(s, \omega_0)$, $M(s)$, $L(s)$, $\tilde{R}(s)$ соответствующего УУ и в этом случае определяются по соотношениям (12)–(16), в которых величина m_0 заменяется на $m_\Omega = \deg B_\Omega(s)$, а полином $Q_0(s)$ определяется выражением $Q_0(s) = \beta_m^{-1} \Pi(s)M(s)$.

Как известно [1, 2], первый ненулевой коэффициент ошибки по задающему воздействию системы с передаточной функцией (7) или (17) при $v_g^* \geq 1$ определяется выражением $C_{gv} = \Delta_v / \Delta_0 \omega_0^v$. Поэтому масштабный коэффициент ω_0 можно выбирать с учетом требований как по времени регулирования t_p , так и по точности отработки полиномиального задающего воздействия степени v_g^* .

Рассмотрим особенности синтеза систем управления изложенным методом на численных примерах.

Пример 1. Для полного объекта (1), где $A(s) = s^3 - s^2 - 2s$, $B_0(s) = 2s^2 + 22s + 60$, $B_1(s) = 4s + 20$, найти управление, при котором замкнутая система будет иметь по каналу $g \rightarrow y$ второй, а по каналу $f \rightarrow u$ первый порядок астатизма, время регулирования $t_p^* = 1,5$ с и перерегулирование $\sigma^* = 10\%$. Измерению доступны отклонение ε и регулируемая величина y . Относительная степень реализуемого УУ $\mu_y^* = 0$.

Переходя к решению, определим область Ω условием $\text{Re } s < -\varepsilon$, где ε — малое положительное число. Проведя факторизацию полинома $B_0(s)$ по (5), получим $\beta_m = 2$, $B_{\bar{\Omega}}(s) = 1$, $B_\Omega(s) = s^2 + 11s + 30$. Следовательно, заданный объект удовлетворяет условию (8), т. е. ПФ замкнутой системы может иметь вид (7). В данном случае $n = 3$, $n_a = 1$, $n_1 = 0$, $m_0 = 2$, $v_g^* = 2$, $v_f^* = 1$, $\bar{v} = \max(0, 2 - 1, 1 - 0) = 1$. Поэтому условие (12) для выбора степени знаменателя n_h стандартной ПФ (7) здесь принимает вид $2 \leq n_h \leq 4$.

Рассмотрим для сравнения два варианта замкнутой системы при $n_h = 3$ и $n_h = 2$. Если принять $n_h = 3$, то из соотношений (13)–(15) находим $\deg M(s) = 1$, $\deg \tilde{R}(s) = 0$, $\deg L(s) = 3$, т. е. $L(s) = \lambda_0 + \lambda_1 s + \lambda_2 s^2 + \lambda_3 s^3$, $\tilde{R}(s) = \rho_0$. Примем полином $M(s) = s + 3 \in \Omega$. Для случая $v_g = 2$, $n_h = 3$ и $\sigma^* = 10\%$ из таблицы стандартных ПФ [1, с. 257] находим коэффициенты $\Delta_0 = 1$, $\Delta_1 = 6,35$, $\Delta_2 = 5,1$, $\Delta_3 = 1$; при этом $t_{рн} = 7,0$ с. Следовательно, $\omega_0 = t_{рн} / t_p^* = 4,67$.

Примем с некоторым запасом $\omega_0^* = 5$. Подставляя в (7) и округляя, получим следующие полиномы: $H_0(s, \omega_0^*) = 159s + 126$, $H(s, \omega_0^*) = s^3 + 26s^2 + 159s + 126$, а также $D(s) = s^4 + 29s^3 + 237s^2 + 603s + 378$ и $\bar{A}(s) = s^{\bar{v}} A(s) = s^4 - s^3 - 2s^2$. Поэтому система (16) здесь имеет вид

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \rho_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 378 \\ 603 \\ 237 \\ 29 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Решение этой системы приводит к полиномам $R(s) = sB_\Omega(s) = s^3 + 11s^2 + 30s$, $L(s) = 15s^3 + 119,5s^2 + 301,5s + 189$. По формуле (10) имеем $Q_0(s) = +79,5s^2 + 301,5s + 189$, т. е. $\bar{L}(s) = -15s^3 - 40s^2$. Подставляя найденные полиномы в (2), получаем уравнение искомого УУ в изображениях по Лапласу

$$(s^2 + 11s + 30)u(s) = (79,5s^2 + 301,5s + 189)\varepsilon(s) - (15s^3 + 40s^2)y(s). \quad (18)$$

Как видно, найденное УУ имеет заданное значение $\mu_y = 0$, а путем вычисления, например, ПФ $W_{yg}(s)$ и $W_{yf}(s)$ можно убедиться, что построенная система с УУ (18) имеет требуемые свойства.

Если же принять $n_h = 2$, то из соотношений (13)–(15) находим $\deg M(s) = 2$, $\deg \tilde{R}(s) = 0$, $\deg L(s) = 3$, т. е. $L(s) = \lambda_0 + \lambda_1 s + \lambda_2 s^2 + \lambda_3 s^3$, $\tilde{R}(s) = \rho_0$. Примем полином $M(s) = (s + 2)(s + 4) = s^2 + 6s + 8 \in \Omega$. Для случая $v_g = 2$, $n_h = 2$ и $\sigma^* = 10\%$ из таблицы стандартных ПФ [1, с. 257] находим коэффициенты $\Delta_0 = 1$, $\Delta_1 = 2,5$, $\Delta_2 = 1$; при этом $t_{рн} = 3,6$ с. Следовательно, здесь $\omega_0^* = t_{рн} / t_p^* = 2,4$. Примем с некоторым запасом $\omega_0^* = 2,6$. Тогда согласно (7) полиномы $H_0(s, \omega_0^*) = 6,5s + 6,8$, $H(s, \omega_0^*) = s^2 + 6,5s + 6,8$, а $\bar{A}(s) = s^{\bar{v}} A(s) = s^4 - s^3 - 2s^2$ и $D(s) = s^4 + 12,5s^3 + 53,8s^2 + 92,8s + 54,4$. Поэтому система (16) в данном случае имеет вид

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \rho_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 54,4 \\ 92,8 \\ 53,8 \\ 12,5 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Решение этой системы приводит к полиномам $R(s) = sB_{\Omega}(s) = s^3 + 11s^2 + 30s$, $L(s) = 6,75s^3 + 27,9s^2 + 46,4s + 27,2$. По формуле (10) имеем $Q_0(s) = 3,25s^3 + 22,9s^2 + 46,4s + 27,2$, т. е. $\bar{L}(s) = -3,5s^3 - 5s^2$. Подставляя найденные полиномы в (2), получаем уравнение искомого УУ в изображениях по Лапласу:

$$(s^2 + 11s + 30)u(s) = (3,25s^3 + 22,9s^2 + 46,4s + 27,2)\varepsilon(s) - (3,5s^3 + 5s^2)y(s). \quad (19)$$

Путем вычисления ПФ или моделирования можно установить, что и в этом случае построенная система имеет тот же шестой порядок и требуемые свойства. Однако численные значения коэффициентов устройства управления (19) значительно ниже, чем в первом случае.

Пример 2. Рассмотрим синтез управления полным неминимально-фазовым объектом, который также описывается уравнением (1), но с полиномами $A(s) = s^3 + 0,6s^2 + 0,1s$, $B_0(s) = s^2 - 22s - 75$, $B_1(s) = 0,1s - 2,5$. Необходимо найти управление, при котором замкнутая система будет иметь по каналу $g \rightarrow u$ второй, а по каналу $f \rightarrow y$ первый порядок астатизма, время регулирования $t_p^* = 2$ с, перерегулирование $\sigma^* \leq 15\%$. Измерению доступны задающее воздействие g и отклонение ε . Относительная степень реализуемого УУ $\mu_y^* = 0$. Отрицательное перерегулирование допустимо.

Переходя к решению, область Ω определим также условием $\text{Re } s < -\varepsilon$. Проведя факторизацию полинома $B_0(s)$ по (5), получим $\beta_m = 1$, $B_{\Omega}(s) = s - 25$, $B_{\Omega}(s) = s + 3$. Данный объект не удовлетворяет условию (8), т. е. ПФ замкнутой системы может иметь только вид (17). В данном случае $n = 3$, $n_a = 1$, $n_1 = 0$, $m_0 = 2$, $v_g^* = 2$, $v_f^* = 1$, а $\bar{v} = \max(0; 2 - 1; 1 - 0) = 1$. Поэтому условие (11) для выбора степени знаменателя n_h стандартной ПФ (7) здесь принимает вид $3 \leq n_h \leq 5$. Примем минимальное значение $n_h = 3$.

Учитывая, что правый нуль в числителе ПФ (17) может привести к повышению значений перерегулирования и времени регулирования, выберем стандартную ПФ по условиям: $\sigma = 10\%$, $v_g^* = 2$, $n_h = 3$. Тогда, как и выше, можно взять $\Delta_0 = 1$, $\Delta_1 = 6,35$, $\Delta_2 = 5,1$, $\Delta_3 = 1$, $t_{рн} = 7$ с. Выберем ω_0 из условия $t_p^* = 1,7$ с и примем $\omega_0 = t_{рн}/t_p^* \approx 4,2$, тогда полиномы $H_0(s, \omega_0) = 90s + 74$, $H(s, \omega_0) = s^3 + 26,8s^2 + 90s + 74$. Степень полинома $\Pi(s)$ равна $v_g^* - 1 = 2 - 1 = 1$, т. е. $\Pi(s) = \pi_1 s + \pi_0$. Вычисляя коэффициенты π_i в соответствии с равенством (17), получим $\Pi(s) = -3,7184s - 2,96$, а ПФ системы

$$W_{yg}(s, \omega_0) = \frac{B_{\Omega}(s)}{H(s)} = \frac{-3,72s^2 + 90s + 74}{s^3 + 26,8s^2 + 90s + 74}. \quad (20)$$

Моделированием в MATLAB находим, что перерегулирование в системе с ПФ (20) составляет 17%, а время регулирования 2,47 с, что превышает заданные значения. Путем моделирования легко установить, что при замене в (20) коэффициента 26,8 на 20 перерегулирование уменьшается до 15%, а время регулирования становится равным 2,03 с. Поэтому ПФ (20) с заменой коэффициента 26,8 на 20 принимаем в качестве желаемой.

Для определения уравнения УУ, как и выше, найдем по формулам (13)–(15), заменяя m_0 на $m_{\Omega} = \deg B_{\Omega}(s) = 1$: $\deg M(s) = 2$, $\deg \tilde{R}(s) = 1$, $\deg L(s) = 3$. Положим $M(s) = s^2 + 5s + 6 \in \Omega$. Тогда получим, что полиномы $Q_0(s) = \beta_m^{-1} \Pi(s)M(s) = -3,72s^3 - 21,55s^2 - 37,11s - 17,76$, $\tilde{A}(s) = s^4 + 0,6s^3 + 0,1s^2$, $D(s) = s^5 + 25s^4 + 196s^3 + 644s^2 + 910s + 444$, а система (16) принимает вид

$$\begin{bmatrix} -25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -25 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -25 & 0,6 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0,6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \rho_0 \\ \rho_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 444 \\ 910 \\ 644 \\ 196 \\ 25 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Решение этой системы приводит к полиномам

$$R(s) = s\tilde{R}(s)B_{\Omega}(s) = s^3 + 35,54s^2 + 97,62s; \\ L(s) = -8,14s^3 - 27,114s^2 - 37,11s - 17,76$$

и, соответственно, к следующему уравнению искомого УУ:

$$s(s^2 + 35,54s + 97,62)u(s) = -(8,14s^3 + 27,114s^2 + 37,11s + 17,76)\varepsilon(s) + (4,42s^3 + 5,564s^2)g(s).$$

Исследование синтезированной системы свидетельствует, что она имеет требуемые свойства. При этом наличие положительного нуля у ПФ объекта управления приводит к отрицательному перерегулированию $\sigma = 4,92\%$ в системе управления при $t = 0,03$ с.

Заключение. Предложенный метод синтеза позволяет аналитически найти структуру и параметры физически реализуемого УУ как для минимально-фазовых, так и для неминимально-фазовых объектов управления на основе стандартных передаточных функций. При этом учитываются достаточно широкие требования к проектируемым системам управления.

Список литературы

1. Красовский А. А., Поспелов Г. С. Основы автоматики и технической кибернетики. М.: Госэнергоиздат, 1962. 599 с.
2. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы. М.: Машиностроение, 1982. 504 с.
3. Загашвили Ю. В. Оценка порядка регулятора минимальной сложности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 5. С. 10—13.

4. Гайдук А. Р. Об ограничениях, обусловленных заданной частью системы и управляющим устройством // Изв. вузов. Приборостроение. 1987. № 5. С. 11—16.
5. Филимонов Н. Б. К вопросу о разрешимости задачи В. В. Солодовникова // Труды МВТУ № 314. Системы автоматического управления. Вып. 7. М.: Изд-во МВТУ, 1979. С. 60—71.
6. Гайдук А. Р. Синтез систем управления при слабо обусловленной полноте объектов // АиТ. 1997. № 4. С. 133—144.
7. Бобцов А. А. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // АиТ. 2002. № 11. С. 108—117.

УДК 621.396.969.11

О. А. Тягунов, канд. техн. наук, доц.,
Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)

Выбор показателей качества при многокритериальной настройке параметров систем управления

Рассматривается постановка задачи выбора показателей качества при многокритериальной настройке параметров управляющих устройств систем управления и предложен метод решения, основанный на случайном зондировании многомерного пространства параметров с последующим построением приближенной границы точек Парето и вычислением коэффициентов корреляции показателей качества. Приведены численные примеры, демонстрирующие эффективность предложенного метода.

Введение

Известно, что задачи выбора параметров являются очень важными при исследовании свойств систем автоматического управления (САУ). Они возникают при исследовании устойчивости и стабилизации САУ с использованием метода построения областей устойчивости. Проблема выбора особенно важна при решении задач синтеза управляющих устройств САУ. Традиционные методы синтеза управляющих устройств предполагают при выборе параметров управляющих устройств использование одного, пусть и достаточно сложного, показателя качества (критерия). Например, можно отметить метод синтеза по интегральному квадратичному критерию, метод синтеза по максимальной степени устойчивости и т. д. Ряд исследователей признавали противоречивость такой постановки этой задачи. Уместно привести цитату из монографии выдающего отечественного специалиста по теории автоматического управления А. А. Фельдбаума: "Иногда (при задаче синтеза) ставится сразу несколько требований (например, обеспечение сразу наименьших величин времени регулирования и перерегулирования), ко-

торые могут противоречить друг другу. Необходимость компромиссного решения (например, обеспечение наименьшего времени регулирования при предварительном обеспечении отсутствия перерегулирования или минимума его) усложняет постановку и процесс решения задачи" [1, с. 704]. Сходные высказывания содержатся и в современной литературе по теории автоматического управления [2, с. 254]. В подобной ситуации более корректно говорить о задачах многокритериального синтеза управляющих устройств.

Проблема многокритериальной оптимизации (выбора параметров) интенсивно разрабатывалась специалистами в области исследования операций начиная с 60-х годов XX века. Решению задач многокритериальной оптимизации в общей постановке посвящено очень большое число работ, из которых можно отметить [3—5].

В настоящее время можно говорить о сложившейся схеме решения подобных задач. Перечислим основные этапы этой схемы:

1. Этап формализации задачи выбора и, в частности, выделения системы критериев качества, по которым будет определяться оптимальное решение.
2. Этап выделения в пространстве оптимизируемых параметров так называемых парето-оптимальных решений (множество эффективных решений, область компромисса, переговорное множество).
3. Этап выбора принципа нахождения компромисса, позволяющего находить решение по всем частным критериям с учетом их противоречивого характера на базе использования результатов второго этапа.

Следует заметить, что в большинстве работ рассматривались различные схемы формализации задачи многокритериального выбора и построения различных моделей поведения ЛПР, решающего задачу многокритериального выбора параметров оптимизируемых систем (третий этап решения задачи многокритериального выбора параметров).

В отличие от задач исследования операций проблеме многокритериального выбора параметров динамических систем уделялось существенно меньшее

внимание. Отметим цикл исследований по многокритериальным статическим и динамическим задачам в условиях неполной информации [6, 7], работы [8, 9], в которых был предложен принцип рациональной организации, при котором параметры в динамической системе подбираются так, чтобы различные схемы компромисса приводили к близким результатам. Достойна упоминания работа [10], в которой сформулирована постановка задачи и разработаны алгоритмические методы построения оптимальных по переменному критерию качества систем управления нелинейными объектами, основанные на теории синтеза систем последовательной оптимизации.

В [11] была впервые сформулирована задача многокритериального выбора параметров управляющих устройств систем автоматического управления и предложен метод решения этой задачи, основанный на построении множества точек Парето по совокупности двумерных сечений критериального пространства. Вопрос определения и обоснования системы критериев в задаче многокритериального выбора изучен недостаточно. С одной стороны, необходимо стремиться увеличить число критериев для адекватного учета свойств исследуемой системы; но, с другой стороны, с ростом размерности критериального пространства становятся более сложными алгоритмы выделения компромиссного решения.

Данная статья посвящена рассмотрению особенностей выбора системы показателей качества при решении задачи многокритериального выбора параметров управляющих устройств систем управления.

Постановка задачи выбора показателей качества при многокритериальном выборе параметров управляющих устройств систем управления

Пусть математическая модель системы управления задана либо в виде структурных схем, передаточных функций и частотных характеристик, либо в пространстве состояний. В целом в распоряжении исследователя должна быть возможность вычисления по заданной структуре и параметрам математической модели системы управления значений совокупности (множество) критериев качества, по которым можно объективно оценивать эффективность выбранного решения. Для систем управления множество критериев качества может быть разбито на две группы. Первая группа описывает свойства системы в установившемся (статическом) режиме — это прежде всего ошибки системы после этапа завершения переходных процессов. Вторая группа показателей предназначена для описания динамических свойств (свойств системы в переходном процессе).

В целом число критериев (размерность вектора показателей) может достигать величины порядка десяти или более. Некоторые из критериев могут быть сильно или слабо зависимы друг от друга.

Необходимо разработать метод, алгоритмическое и программное обеспечение для определения количественной зависимости критериев (показателей качества) системы с целью обоснованного исключения сильно зависимых критериев. Это позволит повысить эффективность решения задачи многокритериального выбора параметров управляющих устройств систем управления.

Метод решения задачи выбора системы показателей качества систем управления

Решение задачи выбора системы показателей качества систем управления не удастся получить с помощью чисто аналитических методов, поэтому воспользуемся методами математического моделирования и, в частности, будем использовать программный комплекс "Анализ систем", возможности которого были подробно описаны в [12]. В работе [11] комплекс "Анализ систем" использовался для многокритериального выбора параметров системы управления.

В комплексе используется метод построения приближенных точек Парето, основанный на процедуре просмотра области допустимых значений пространства параметров управляющего устройства с последующей операцией построения границы области критериального пространства, которой принадлежат точки Парето [5, 6]. Этот метод был предложен И. М. Соболев и Р. Б. Статниковым [13, 14].

Рассмотрим основные особенности данного метода.

1. Проводится случайный выбор точек многомерного пространства параметров и с помощью имитационной системы вычисляются значения вектора критериев (показателей качества) исследуемой системы, причем в качестве точек в пространстве параметров используются точки равномерно распределенных последовательностей — ЛП_τ-последовательности, обладающие наилучшими характеристиками равномерности среди всех известных в настоящее время равномерно распределенных последовательностей. В итоге строится матрица (таблица) испытаний.

2. После выполнения операций сортировки столбцов таблицы в многомерном пространстве параметров строится область, в которой содержатся искомые решения.

3. Данные п. 2 позволяют в пространстве критериев (критериальном пространстве) построить многомерную поверхность эффективных (неулучшаемых) точек (точек Парето), среди которых и следует выбирать устраивающую исследователя (ЛПР) решение.

4. Среди множества эффективных точек с использованием принятой ЛПР схемы выбора компромисса выделяются одно или несколько решений.

5. Для определения зависимости критериев используется процедура вычисления коэффициентов корреляции между ними. При этом используются данные таблицы, полученной в п. 2, и известные факты из теории вероятностей [15].

Если x и y — произвольные случайные величины, у которых существуют конечные математические ожидания Mx и My и дисперсии $Dx > 0$ и $Dy > 0$, то коэффициент корреляции этих величин определяется выражением

$$r(x, y) = \frac{Mxy - MxMy}{\sqrt{DxDy}}. \quad (1)$$

Как известно, $r(x, y) = r(y, x)$ и $-1 \leq r(x, y) \leq 1$. Если x и y независимы, то $r(x, y) = 0$.

Для нас крайне важно следующее свойство коэффициента корреляции [15]:

условие $|r(x, y)| = 1$ необходимо и достаточно для того, чтобы существовали постоянные $c_0 \neq 0$ и c_1 такие, что с вероятностью 1 имеет место линейная зависимость между x и y :

$$y = c_0x + c_1. \quad (2)$$

Случай $c_0 > 0$ соответствует условию $r(x, y) = 1$, а случай $c_0 < 0$ — условию $r(x, y) = -1$.

Пусть $F_i(A)$ и $F_j(A)$ обозначают i -й и j -столбцы отсортированной в п. 2 матрицы испытаний, соответствующие i -му и j -му критерию. Тогда, если r_{ij} близок к единице, например, $r_{ij} \approx 0,9$, то весьма правдоподобно, что между критериями (функциями) с индексами i и j существует зависимость, близкая к линейной, и один из этих критериев можно из рассмотрения исключить.

Во всех других случаях между критериями есть зависимость, которая может быть и довольно слабой, особенно при $r_{ij} \approx 0$.

При практической реализации метода необходимо проводить испытания для достаточно представительной выборки тестовых испытаний.

Практическая реализация метода определения системы показателей качества в задаче многокритериальной настройки параметров управляющих устройств систем управления

Метод реализован в рамках подсистемы многопараметрической оптимизации программного комплекса "Анализ систем". Существующая версия программного комплекса позволяет использовать следующие критерии:

- интегральная квадратическая ошибка;
- время регулирования;
- коэффициент перегулирования;
- время нарастания переходного процесса;
- декремент затухания;
- степень устойчивости;
- колебательность;
- комплексный критерий.

В последнем случае формирование комплексного критерия выполняется в виде линейной формы перечисленных выше критериев с положительными коэффициентами, задаваемыми пользователем и отражающими значимость каждого из частных критериев. В случае двух задаваемых критериев на плоскости критериального пространства имеется возможность выделения точек Парето.

Рассмотрим два примера использования рассмотренного метода при решении следующих задач.

Пусть объект управления описывается передаточной функцией, состоящей из трех апериодических звеньев:

$$W_{об}(s) = \frac{k}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)(1 + T_3s)}, \quad k = 1, T_1 = T_2 = T_3 = 1 \text{ (с)}, \quad (3)$$

а в качестве регулятора используется ПИД-регулятор

$$W_p(s) = k_{п} + \frac{k_{и}}{s} + k_{д}s. \quad (4)$$

Таблица 1

Коэффициенты корреляции динамических показателей качества

Критерий № 1	Критерий № 2	Коэффициент корреляции				
		$N = 10000$	$N = 20000$	$N = 30000$	$N = 40000$	$N = 50000$
Интегральная квадратичная ошибка	Время регулирования	0,8294174	0,8351635	0,8332334	0,8352386	0,8400595
Интегральная квадратичная ошибка	Степень устойчивости	-0,2232902	-0,2239036	-0,2230617	-0,2176584	-0,2175298
Интегральная квадратичная ошибка	Колебательность	0,5779586	0,5797503	0,5112353	0,578062	0,5808466
Время регулирования	Степень устойчивости	0,0480210	0,039432	0,0396795	0,0432074	0,0351072
Время регулирования	Колебательность	0,7131898	0,7192402	0,7181895	0,7163782	0,7173917
Степень устойчивости	Колебательность	0,1091772	0,1060931	0,1078391	0,1107253	0,1077554

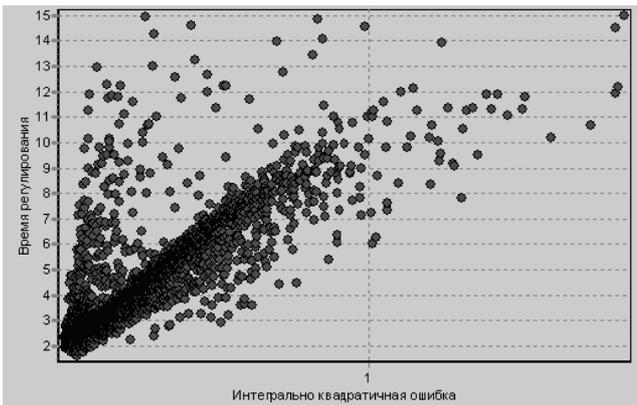


Рис. 1. Распределение критериев на плоскости "время регулирования — интегральная квадратическая ошибка"

В качестве критериев используются четыре показателя качества (интегральная квадратическая ошибка, время регулирования, степень устойчивости, колебательность), описывающие динамические свойства системы.

Методика вычислительных экспериментов была подробно описана в [11]. На рис. 1, 2 приведены варианты распределения сечений критериального пространства для двух различных пар критериев (*интегральная квадратическая ошибка — время регулирования* (критерии сильно связаны), рис. 1; *степень устойчивости — колебательность* (критерии слабо связаны), рис. 2), иллюстрирующие качественную картину взаимной зависимости критериев. В табл. 1 помещены значения коэффициентов корреляции для различных пар критериев при различных значениях числа испытаний N ($N = 10000; 20000; 30000;$

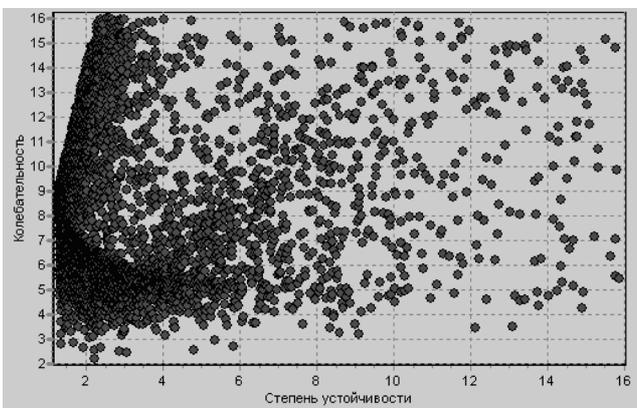


Рис. 2. Распределение критериев на плоскости "колебательность — степень устойчивости"

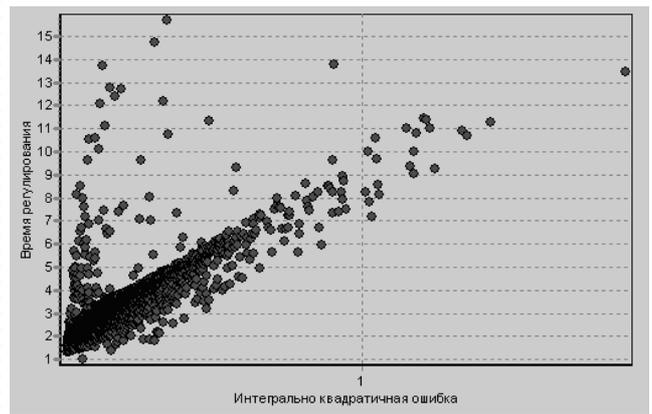


Рис. 3. Распределение критериев на плоскости "время регулирования — интегральная квадратическая ошибка"

40000; 50000). Это дает иллюстрацию динамики изменения коэффициентов корреляции в зависимости от объема выборки.

В качестве второго примера рассмотрим объект управления, описанный в [11], с передаточной функцией

$$W_{об}(s) = \frac{k}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)(1 + T_3s)^2} \quad (5)$$

Пусть передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_p(s) = k_{\pi} + k_{д}s + k_{дд}s^2 \quad (6)$$

На рис. 3, 4 приведены варианты распределения сечений критериального пространства для двух различных пар критериев (*интегральная квадратическая ошибка — время регулирования* (критерии сильно

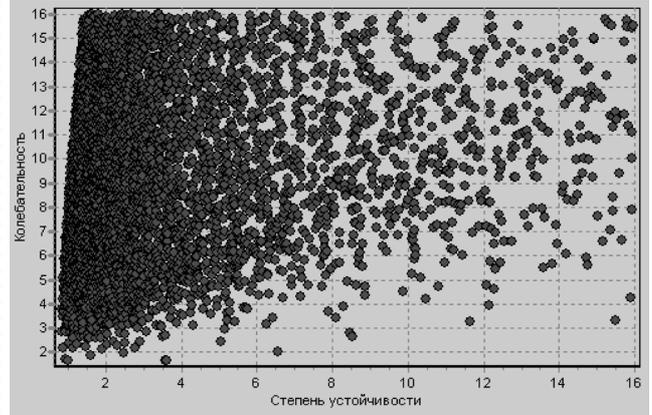


Рис. 4. Распределение критериев на плоскости "колебательность — степень устойчивости"

Коэффициенты корреляции динамических показателей качества

Критерий № 1	Критерий № 2	Коэффициент корреляции				
		$N = 10000$	$N = 20000$	$N = 30000$	$N = 40000$	$N = 50000$
Интегральная квадратичная ошибка	Время регулирования	0,8035142	0,8058653	0,8048531	0,8036845	0,8037824
Интегральная квадратичная ошибка	Степень устойчивости	-0,2054098	-0,2009626	-0,2020775	-0,2005404	-0,2052774
Интегральная квадратичная ошибка	Колебательность	0,3480889	0,3389896	0,3402986	0,3410001	0,3408899
Время регулирования	Степень устойчивости	-0,0020063	-0,0003604	0,0012954	0,0037383	0,0000208
Время регулирования	Колебательность	0,4990234	0,4889612	0,4925221	0,490599	0,4909892
Степень устойчивости	Колебательность	0,1620275	0,1660104	0,1680624	0,1665197	0,1675109

связаны), рис. 3; *степень устойчивости — колебательность* (критерии слабо связаны), рис. 4), иллюстрирующие качественную картину взаимной зависимости критериев. В табл. 2 помещены значения коэффициентов корреляции для различных пар критериев при различных значениях выборки N .

Отметим достаточно большое значение коэффициента корреляции между двумя показателями качества "интегральная квадратичная оценка — время регулирования" $k \geq 0,8$. Это позволяет сделать вывод о том, что один из этих критериев может быть исключен из системы показателей качества при решении задачи многокритериального выбора параметров управляющих устройств систем автоматического управления. Малое значение коэффициента корреляции двух показателей качества "степень устойчивости — колебательность" $k \leq 0,18$ дает основание для использования этих критериев в качестве основных при многокритериальном выборе параметров управляющих устройств систем управления.

Заключение

В статье рассмотрена постановка задачи обоснованного выбора системы показателей качества при многокритериальной настройке параметров управляющих устройств систем автоматического управления. Предложен метод решения, основанный на использовании равномерно распределенных точек в пространстве параметров с последующим построением в критериальном пространстве эффективных точек Парето и вычислением коэффициентов корреляции критериев, что позволяет дать качественные и количественные оценки взаимной зависимости показателей качества. Полученные результаты бу-

дут полезны при решении задач синтеза управляющих устройств для широкого класса систем управления.

Список литературы

1. **Фельдбаум А. А.** Электрические системы автоматического регулирования. М.: Оборонгиз, 1957.
2. **Поляк Б. Т., Шербаков П. С.** Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
3. **Борисов В. И.** Проблемы векторной оптимизации // Исследование операций. М.: Наука, 1972.
4. **Подиновский В. В., Ногин В. Д.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982.
5. **Рыков А. С.** Методы и модели системного анализа: принятие решений и оптимизация. М.: Изд. МИСИС, 2005.
6. **Жуковский В. И., Салуквадзе М. Е.** Оптимизация гарантий в многокритериальных задачах управления. Тбилиси: Мецниереба, 1996.
7. **Жуковский В. И., Салуквадзе М. Е.** Риски и исходы в многокритериальных задачах управления. Тбилиси: Интеллекти, 2004.
8. **Воронин А. Н.** Принцип рациональной организации в многокритериальных задачах управления // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. 1979. № 10.
9. **Воронин А. Н.** О формализации выбора схемы комприссов в задачах многокритериальной оптимизации // Техническая кибернетика. 1984. № 2.
10. **Колесников А. А., Гельфгат А. Г.** Проектирование многокритериальных систем управления промышленными объектами. М.: Энергоатомиздат, 1993.
11. **Кормилкин А. А., Тягунов О. А.** Многокритериальный выбор параметров регуляторов для линейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 3. С. 13—18.
12. **Евстигнеев Д. В., Кормилкин А. А., Тягунов О. А.** Программный комплекс для моделирования и исследования систем автоматического управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 6.
13. **Соболь И. М.** Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. М.: Наука, 1969.
14. **Соболь И. М., Статников Р. Б.** Постановка некоторых задач оптимального проектирования при помощи ЭВМ. Препринт № 24. М.: Ин-т прикладной математики АН СССР, 1977.
15. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1962.

БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 51:681.3.07

Н. В. Павлова, д-р техн. наук, проф.,
В. Г. Петров, канд. техн. наук, **К. С. Видов**,
Московский авиационный институт
(государственный технический университет)

Диалоговый комплекс прототипирования и имитационного моделирования бортового оборудования на основе информационной модели

Предметом исследования является инструментальное средство для моделирования и прототипирования комплексов бортового оборудования и информационная модель для анализа процесса моделирования.

Возрастающие требования, предъявляемые к бортовому оборудованию летательных аппаратов (ЛА), а также повышение сложности решаемых им задач непрерывно сказываются на облике современных комплексов бортового оборудования (КБО), в результате чего сегодня они представляют собой сложную систему, включающую блоки измерения, преобразования, обработки, хранения, отображения и передачи информации всем потребителям комплекса [1].

Создание таких сложных комплексов связано с разработкой эффективных средств автоматизации их исследования, позволяющих на ранних этапах проектирования описывать такие комплексы, оперативно синтезировать требуемые структуры их построения и оценивать их соответствие поставленным задачам [2]. Помимо этого, такие комплексы средств автоматизации позволяют оптимизировать все КБО по уровню этого соответствия, оценивать качество совместного функционирования систем и оперативно анализировать альтернативы по составу и характеристикам КБО [3].

Одной из основных задач, возникающих в ходе рассматриваемого процесса моделирования, является рациональный выбор и корректировка параметров сложной информационной модели, отражающей состав и поведение проектируемого КБО. Трудность решения этой задачи обусловлена наличием множества сложных блоков имитационной модели, объединенных перекрестными связями, что, в конечном итоге, делает процесс рационального выбора и корректировки параметров каждого блока трудно

прогнозируемым. В качестве основы автоматизации для решения указанных задач предлагается разработанный и используемый ОАО "ОКБ Сухого" диалоговый комплекс прототипирования и математического моделирования (ДКПиММ) КБО [4, 5], включающий такую информационную модель.

Архитектура и задачи ДКПиММ

ДКПиММ предназначен для поддержки проектирования и исследования КБО и бортового программно-алгоритмического обеспечения на этапе первичного проектирования. Рассматриваемый процесс включает следующие этапы:

- разработка алгоритмического обеспечения бортовой центральной вычислительной машины (ЦВМ) и программно-математических моделей (ПММ) элементов КБО, а также моделей процессов, не имеющих место непосредственно в структуре КБО, но оказывающих влияние на них;
- проектирование модели предметной области в виде многоуровневой иерархической декомпозиции задач и процессов;
- проектирование информационной базы параметров, подлежащих обмену между алгоритмами и ПММ, проектирование каналов информационного обмена, по которым осуществляется группирование этих параметров;
- проектирование протоколов информационного взаимодействия алгоритмов и ПММ систем КБО;
- сборка прототипа КБО;
- имитационное моделирование;
- формализованный и неформальный анализ полученных результатов, в том числе с использованием информационных моделей комплексных модулей, возврат к ранним этапам для внесения изменений и уточнений.

ДКПиММ имеет архитектуру, представленную на рис. 1. Она включает:

- информационную систему проектирования прототипов КБО;
- систему общей диспетчеризации и мониторинга;
- имитаторы органов управления и ПММ, составляющие информационно-управляющего поля кабины;
- информационную модель бортового оборудования, позволяющую управлять процессом моделирования.

В свою очередь, информационная система проектирования прототипов КБО используется для решения задач создания КБО на этапах, начиная от разработки бортовых алгоритмов до формирования ПММ (прототипа).

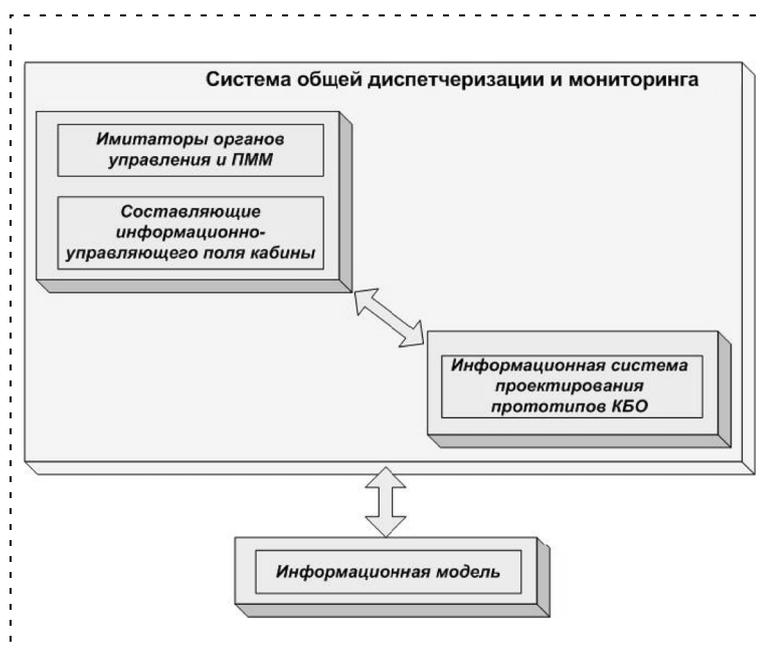


Рис. 1. Архитектура комплекса

Система общей диспетчеризации и мониторинга обеспечивает работу алгоритмов и ПММ по информации, полученной от системы проектирования прототипов КБО, и гарантирует работу математических моделей, входящих в исследуемый прототип, в соответствии с проектируемыми протоколами информационного взаимодействия.

Имитаторы органов управления и ПММ, а также составляющие информационно-управляющего поля кабины предназначены для формирования управляющих сигналов как непосредственного ручного управления самолетом, так и его автоматического управления, а кроме того, для смены типа представления полетной информации [5].

Информационная модель бортового оборудования, позволяющая управлять процессом моделирования, предназначена для проектирования моделей бортовых систем посредством использования полученных экспериментальных данных.

Все процессы проектирования в ДКПиММ осуществляются при поддержке информационной системы проектирования прототипов КБО, которая представляет собой инструментарий для описания общей структуры КБО, проектирования логики взаимодействия его компонентов, контроля образованных прототипов на функциональную полноту и наличие конфликтов. Процесс проектирования интегрированной модели (прототипа) КБО условно может быть разбит на несколько этапов:

- логическая декомпозиция всех задач, решаемых проектируемым КБО;
- проектирование (разработка, дополнение) номенклатуры параметров, подлежащих обмену, а также каналов информационного обмена;

- проектирование протоколов информационного взаимодействия;
- синтез прототипа, определение характеристик (начальных условий) его составляющих;
- определение множества параметров общего вектора состояния прототипа, подлежащих регистрации;
- выходной контроль.

ДКПиММ поддерживает три уровня логической декомпозиции при проектировании модели предметной области:

- задачи верхнего уровня, отражающие наиболее общие действия, выполняемые КБО в целом;
- задачи второго уровня, осуществляющие разбиение задач верхнего уровня до уровня использования ключевых систем КБО;
- задачи третьего уровня, конкретизирующие задачи второго уровня по режимам работы бортовых систем, алгоритмов и действий экипажа.

Процесс проектирования номенклатуры параметров сводится к проектированию каналов магистрали информационного обмена путем присвоения им уникального идентификатора, позволяющего в дальнейшем соотносить с ними вновь вводимые или уже имеющиеся параметры.

Процесс проектирования протоколов информационного взаимодействия заключается в определении входных и выходных параметров для выбранного алгоритма. Результатом этого этапа является конкретная трактовка значений, снимаемых с выходов математических моделей в структуре прототипа КБО. Комплекс математического моделирования устанавливает ряд стандартов на оформление программных модулей, предназначенных для использования в ДКПиММ, в число которых входит обязательное программное описание входных и выходных параметров, а также текстовое описание входов и выходов для удобства манипулирования этими параметрами. Этим достигается дополнительная гибкость в предоставлении пользователю ДКПиММ возможности осуществлять связи между алгоритмами, руководствуясь при этом либо текстовым описанием выдаваемой и принимаемой информации, либо собственным выбором входного параметра. На рис. 2 показан пример выбора параметра "Курс" (№ 432) для канала группового самолетовождения (ГСВ) в качестве входного параметра модели.

Интеграция алгоритма в ДКПиММ осуществляется посредством его регистрации. При регистрации алгоритм выбирается в окне "выбор входного параметра" и заносится в банк данных комплекса путем заполнения его "формуляра", включающего уникальное короткое имя, полное наименование, подробное описание назначения, рекомендации по использо-

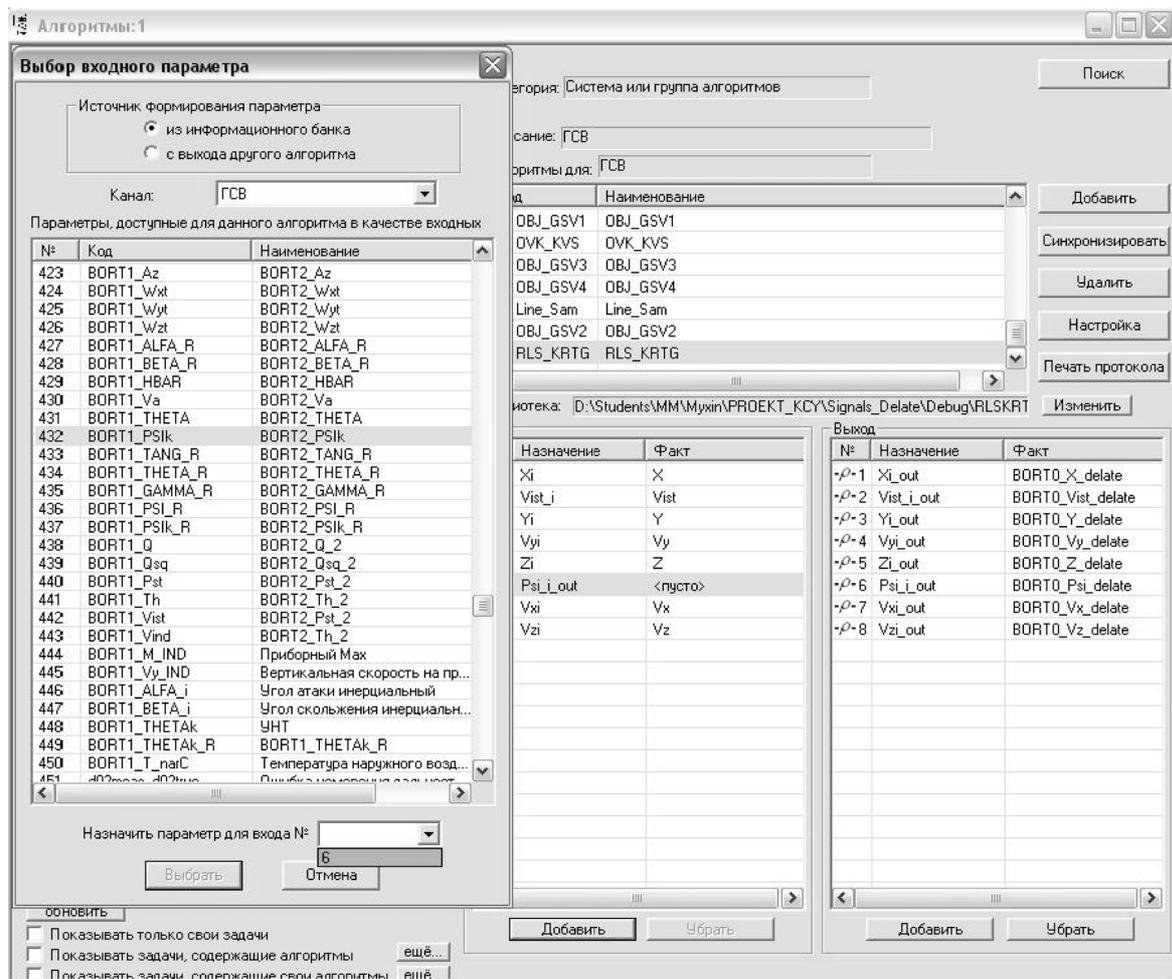


Рис. 2. Трактовка входа алгоритма

ванию, число входов и выходов, их описание, рекомендуемую частоту счета, дату создания, информацию об авторе. Далее для регистрации алгоритма и включения его в процесс решения задачи выполняется соотнесение выбранной группы алгоритмов с определенной задачей модели предметной области.

Заключительной стадией этапа проектирования модели предметной области и логики взаимодействия алгоритмов и моделей служит этап синтеза прототипа КБО, который можно считать подготовительной частью для проведения процесса имитационного моделирования. Суть его заключается в отборе задач, под которые автоматически синтезируется соответствующая им структура прототипа КБО. При необходимости конечное множество алгоритмов и моделей, составляющих прототип КБО, может быть подвергнуто прямой корректировке.

Этап синтеза прототипа начинается с предъявления пользователю задач моделей предметной области, которые он может выбрать для исследования. При выборе задачи выводится вся соответ-

ствующая ей иерархическая структура до уровня групп алгоритмов, входящих в ее состав, и все множество алгоритмов и моделей, ассоциированных с выбранной задачей и входящих в группы алгоритмов для этой задачи.

После выбора задач пользователю предоставляется возможность, если это необходимо, откорректировать получившееся множество алгоритмов путем отключения их как по отдельности, так и целым уровнем в иерархии задач. Алгоритмы, соответствующие этим уровням, будут изъяты из структуры прототипа КБО.

Информационная модель проектируемого КБО

Инженеру, в задачу которого входит проведение имитационных экспериментов с использованием рассматриваемого программного комплекса, необходимо оценивать влияние изменения того или иного настроечного параметра на результаты работы той или иной имитационной модели без проведения

трудоемких экспериментов. Провести выбор изменяемого параметра вручную в ходе таких экспериментов невозможно за приемлемое время.

Использование предлагаемого подхода для проектирования и исследования комплексной имитационной модели ДКПиММ или ее составных частей позволяет всесторонне оценивать возможности исследуемой системы, проверять адекватность имитационных моделей реальным аналогам и проводить усовершенствование имитационных моделей на основе полученных результатов.

Интегрированный КБО современных и перспективных ЛА относится к классу математически сложных систем, так как при объединении компонентов он в результате обретает качественно новые свойства, не присущие ни одному из компонентов в отдельности. Поэтому методы моделирования, применимые для простых систем (например, моделей, описываемых в форме уравнений с предсказанием поведения систем, основанных на их решении), здесь не дают результатов [6].

Для построения информационной модели КБО создано программное приложение Inform Model Design, которое является надстройкой ДКПиММ. Пользователю предоставляется возможность выбора структуры будущей информационной модели путем указания ее размерности и выбора тех параметров, которые его интересуют. В зависимости от указанной размерности и типов параметров приложением генерируется информационная модель. Ядром информационной модели является искусственная нейронная сеть, создаваемая с помощью программной библиотеки FANN2.1, в которой реализован аппарат создания и использования нейронных сетей обратного распространения. Обучение проводится на основании результатов имитационных экспериментов в среде ДКПиММ. В протестированном варианте программного обеспечения размерность информационной модели ["входы" \times "выходы"] не превышала $[7 \times 7]$. Имеется возможность генерации как прямой, так и обратной информационной модели, в которой входы и выходы меняются местами.



Рис. 3. Работа информационной модели на обучающей выборке

При тестировании проводился ряд экспериментов с комплексной имитационной моделью полета двух взаимодействующих ЛА. Оценивалось расстояние между ними в двух вариантах: истинная дальность и расстояние по информационной модели. Результаты этих экспериментов использованы при формировании обучающей и обобщающей выборок. Размерность информационной модели равнялась $[7 \times 4]$, где 7 — это размерность входного массива, составленного из полученных выходных параметров комплексной имитационной модели, 4 — размерность выходного массива, состоящего из трех входных параметров комплексной имитационной модели и одного настроечного. Получены результаты, демонстрирующие возможность информационной модели воспроизводить изменение параметров по результатам имитационных экспериментов. Результаты работы информационной модели на обучающей выборке представлены на рис. 3, на обобщающей выборке — на рис. 4. Обучающая выборка была сформирована из трехсот векторов значений, обобщающая выборка — из двадцати. Разработанная информационная модель функционирует в соответствии с заданными характеристиками, а ошибка на обучающей выборке находится в пределах допуска. На обобщающей выборке ошибка информационной модели увеличивается с удалением от обучающих данных, что устраняется путем увеличения выборки обучения.

Использование ДКПиММ в процессе исследовательской деятельности инженера-конструктора на начальных, проектных этапах разработки КБО поднимает этот процесс на качественно новый уровень, обеспечивая непрерывное согласование собственного разрабатываемого алгоритмического обеспечения с производимым конструкторами других тематических направлений. Распределенная архитектура ДКПиММ поощряет и упрощает кооперацию между разработчиками, давая возможность вести исследования как полностью изолированно, так и при поддержке алгоритмического обеспечения, относящегося к аналогичным или смежным областям исследуемого вопроса. ДКПиММ суще-

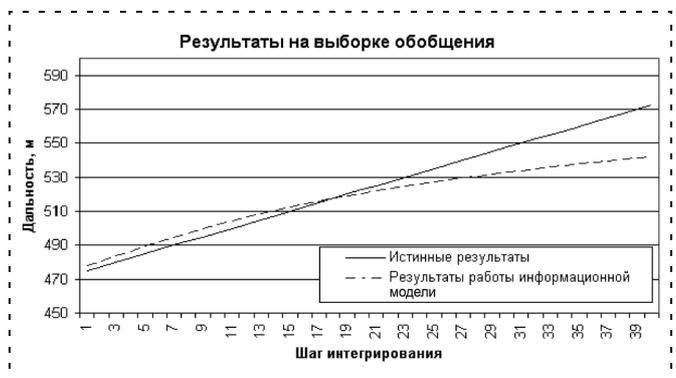


Рис. 4. Работа информационной модели на обобщающей выборке

ственно ускоряет и упрощает исследовательский процесс, предоставляя разработчику широкие возможности по конструированию исследовательских задач, ведению версий алгоритмов и математических моделей, оперативной замене нужных блоков и сохранению все исходные данные и результаты исследований в информационном банке.

Информационная модель, являющаяся надстройкой над ДКПиММ и построенная на базе нейротехнологии, позволяет рационально выбирать и корректировать параметры в ходе проведения имитационного эксперимента.

Инженер-исследователь в процессе построения и исследования прототипов КБО и его фрагментов осуществляет работу в диалоговом режиме, итогом которой могут являться рекомендации по коррекции характеристик бортовых систем (представленных своими математическими моделями) либо бортовых алгоритмов. ДКПиММ не накладывает ограничений на языки программирования и компиляторы, с помощью которых могут быть реализованы алгоритмы и математические модели, так как взаимодействие разработанного алгоритма и ДКПиММ происходит на уровне исполняемого кода. В качестве языка компилятора может быть использован компилятор любого языка программирования, способный генерировать 32-разрядный исполняемый код для операционной системы Windows 2000/XP, под управлением которой функционирует диалоговый комплекс.

Заключение

Благодаря мощным, наглядным и разноплановым методам анализа функционирования исследуемого прототипа КБО вероятность принятия конструктором верного решения существенно возрастает, что приводит к значительной экономии времени и средств на разработку и исследование таких ответственных и принципиально важных вопросов, как бортовой интеллект и математика, составляющих ядро КБО современных и перспективных ЛА.

Список литературы

1. Роголев А. П., Никулин А. С., Езкин А. А., Коркишко Ю. Ю., Павлова Н. В., Петров В. Г., Сухоруков С. Я. Инструментальные средства информационной поддержки разработки комплексов бортового оборудования // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2000. № 8.
2. Хахулин Г. Ф. Основы конструирования имитационных моделей. М.: НПК "ПОТОК", 2002.
3. Sweetman B. Sukhoi su-35 to have all class cockpit // Aviation week show news. Paris, 2007.
4. Езкин А. А., Петров В. Г., Роголев А. П. Информационное обеспечение процессов проектирования и моделирования ИКБО // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2000. № 8.
5. Павлова Н. В., Карпов М. А., Петров В. Г. Имитационное моделирование и прототипирование как метод разработки и исследования комплексов бортового оборудования // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 8.
6. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника. М.: Мир, 1992.

УДК 621.396

В. М. Костюков, д-р техн. наук, проф.,

А. Х. Кутаранов,

Московский авиационный институт

(государственный технический университет)

Определение путевой скорости летательного аппарата с помощью оптико-электронной системы

Рассматривается задача определения путевой скорости летательного аппарата (ЛА) с помощью оптико-электронной системы (ОЭС).

Введение

Одной из важнейших задач современного авиационного строительства является задача автономного определения путевой скорости летательных аппаратов. В настоящее время для определения путевой скорости при-

меняется радиолокационная аппаратура, использующая эффект Доплера. Доплеровские измерители скорости получили широкое распространение. Они обеспечивают автономную навигацию и автоматическое управление полетом различных летательных аппаратов [1, 2]. Недостатком доплеровского измерителя путевой скорости является высокая стоимость аппаратуры и демаскирующее ЛА электромагнитное излучение.

Для маловысотных ЛА, совершающих полет под облаками, можно использовать более простой и дешевый оптический измеритель пассивного (неизлучающего) типа. В данной статье предлагается алгоритм измерения путевой скорости с помощью ОЭС. Оцениваются допустимые параметры данного алгоритма.

Описание принципа работы ОЭС

Алгоритм основан на измерении скорости перемещения изображения подстилающей поверхности, видимой в поле зрения установленного на ЛА

фотоприемного устройства (ФПУ) ОЭС. Схема измерения скорости перемещения показана на рис. 1.

Два ФПУ, оптические оси которых направлены под углом α друг к другу, одновременно записывают изображения подстилающей поверхности по ходу полета. Из рис. 1 ясно, что изображения, фиксируемые ФПУ 1 и ФПУ 2 (назовем их изображениями A и B), повторяют друг друга, причем изображение B запаздывает по отношению к A на время $T = \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{W}$, где W — скорость полета ЛА.

Отсюда скорость $W = \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{T}$ определяется через время запаздывания T (величину H полагаем известной, измеренной высотомером).

Для определения T зафиксируем в момент t_1 изображение A над точкой P (назовем его A_P) и дождемся момента t_2 , когда второе ФПУ зафиксирует изображение B в точке P (назовем его B_P), и, следовательно, оно окажется максимально сходным с изображением A_P (хотя и отличающимся из-за ракурса). Момент t_2 максимального сходства определяется по максимуму взаимной корреляции A_P и B_P [3].

$$\text{Получаем } W = \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{t_2 - t_1}.$$

Особенность реализации этой идеи в данной работе состоит в том, что изображения A и B строятся построчно, так как используются не кадровые, а строчные ФПУ.

В ФПУ чувствительные элементы для считывания изображения располагаются вдоль прямой, как показано на рис. 2. Такое расположение в ряд фоточувствительных элементов обеспечивает одновремен-

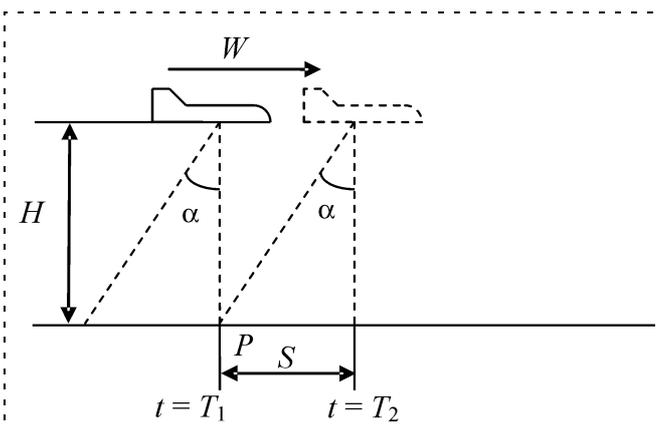


Рис. 1. Схема расположения направления оптических осей ФПУ: S — расстояние, которое пролетит ЛА за время T

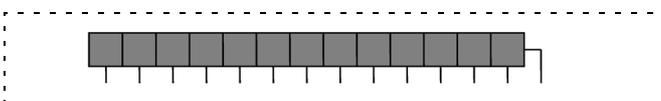


Рис. 2. Линейка фоточувствительных элементов

ную регистрацию элементов изображения в одном направлении (условно говоря, по строке), а перемещение всего ряда элементов в перпендикулярном направлении позволяет получить все строки изображения.

При полете в каждый момент времени линейка сенсоров регистрирует одну строку изображения. При съеме строк изображений фиксируется время съема каждой строки.

Таким образом, имеется два изображения с идентичными областями и накапливающимся числом строк. Отобрав определенное число строк, выполним корреляционный поиск изображения, полученного со второго ФПУ, (B) на изображении, полученном с первого ФПУ, (A). Число и ширина строк на изображении A должны быть больше, чем на B .

В результате поиска будет найден фрагмент изображения A , наиболее сходный с использованным при поиске фрагментом изображения B . Максимум сходства устанавливается по максимуму взаимной корреляции. После этого по разности времен фиксации соответствующих друг другу фрагментов A и B находим оценку продольной скорости ЛА, используя выражение

$$W = \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{t_m - t_0},$$

где H — высота полета ЛА; α — угол наклона ФПУ 2; t_m — время, когда была получена m -я строка изображения A ; t_0 — время, когда была получена нулевая строка изображения B .

Анализ предложенного алгоритма

Проанализируем погрешности, возникающие при таком способе измерения путевой скорости. При вычислении путевой скорости предложенным методом возникает погрешность, связанная с тем, что съемка строк изображений происходит не непрерывно, а дискретно по времени.

Допустим, шаг съемки равен Δt , расстояние, которое пролетает ЛА, составляет $S = Wt + x_0$, где $t = t_0 + \Delta t$. Будем считать $x_0 = 0$; $t_0 = 0$ — время начала работы алгоритма. Отсюда находим ΔS — расстояние, пройденное за один шаг: $\Delta S = W\Delta t$.

Время, через которое второе ФПУ будет "видеть" ту же область поверхности, которое видело первое ФПУ, составляет $t_1 = \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{W}$.

Число шагов, через которое наступит данное событие, равно

$$N = \frac{t_1}{\Delta t} = \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{\Delta S} = \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{W \Delta t}; \quad (1)$$

оценка скорости $\hat{W} = \frac{\hat{S}}{N \Delta t}$;

максимальная погрешность оценки пролетаемого расстояния за время Δt

$$\max(\xi_{\hat{S}}) = \frac{\Delta S}{2} = \frac{W\Delta t}{2}.$$

Отсюда

$$\hat{W} = \frac{H \operatorname{tg} \alpha + \xi_{\hat{S}}}{N\Delta t} = W + \frac{\xi_{\hat{S}}}{N\Delta t}.$$

Погрешность определения оценки скорости равна

$$\max(\xi_{\hat{W}}) = \frac{\max(\xi_{\hat{S}})}{N\Delta t} = \frac{W\Delta t}{2N\Delta t} = \frac{W}{2N}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) получаем

$$\xi_{\hat{W}} = \frac{W}{2N} = \frac{W^2 \Delta t}{2H \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

Для того чтобы определить оптимальный диапазон угла наклона второго ФПУ, проведено моделирование и по результатам моделирования построен график зависимости коэффициента корреляции от угла наклона второго ФПУ. Данный график зависимости представлен на рис. 3.

Падение коэффициента корреляции (рис. 3) связано с перспективными искажениями на изображении, полученном со второго ФПУ. При угле наклона второго ФПУ, равном 50° , глобальное значение коэффициента корреляции становится больше, чем значение истинного коэффициента корреляции. Следовательно, рассмотрение угла наклона второго ФПУ более 50° не имеет смысла. 50° — это максимально допустимый угол наклона второго ФПУ.

Теперь необходимо определить минимальный угол наклона второго ФПУ. Для этого необходимо построить график зависимости погрешности определения путевой скорости от угла наклона второго ФПУ по формуле (3).

График изменения $\xi_{\hat{W}}$ для $\Delta t = 0,01$ с в зависимости от угла наклона второго ФПУ показан на рис. 4.

Исходя из того, что требуемая погрешность должна составлять от 0,3 до 0,6 %, получаем, что при истинной скорости полета 200 м/с эти погрешности соответственно будут равны 0,6 и 1,2 м/с. На рис. 4 видно, что погрешность, равная 1,2 м/с, возникает при угле наклона, равном 29° , а при 50° принимает значение 0,55 м/с. Следовательно, оптимальный диапазон наклона второго ФПУ — $29...50^\circ$.

На рис. 5 представлены результаты моделирования и расчет скорости без учета ускорения.

Теперь проведем моделирование с теми же параметрами, но с учетом ускорения: $W = W_0 + \frac{W_k - W_0}{2}$ — рассчитываемая путевая скорость, где W_k — конечная, W_0 — начальная скорости. Результат моделирования представлен на рис. 6.

Погрешность определения в данном случае не превышала 0,47 м/с.

На рис. 7 представлен результат моделирования при погрешности определения высоты, равной 0,6 м.

При вычислении путевой скорости ЛА появилась погрешность, равная 1 м/с, что является до-

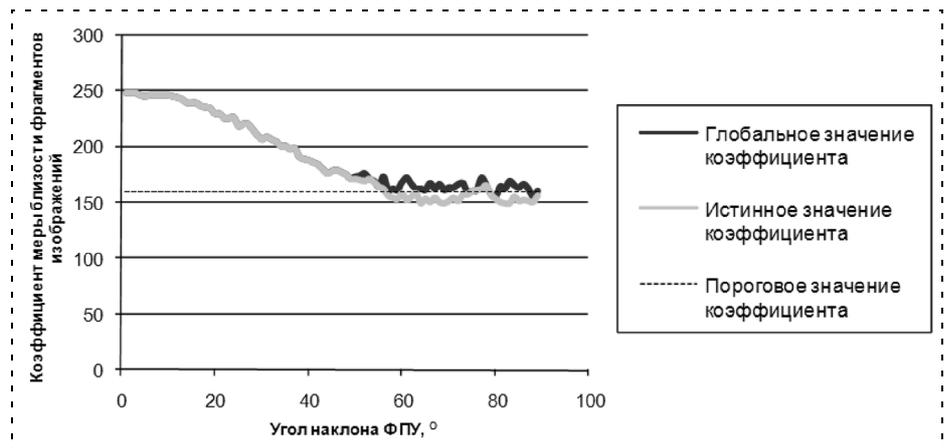


Рис. 3. График зависимости коэффициента корреляции от угла наклона ФПУ 2

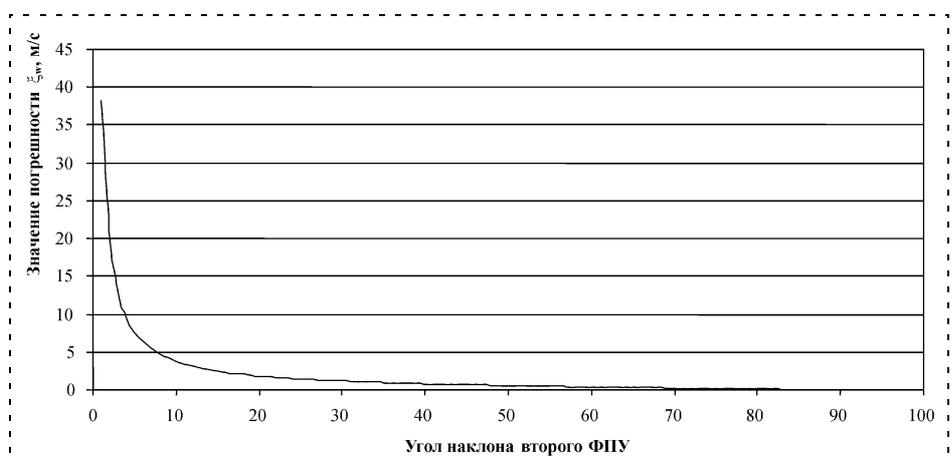


Рис. 4. График зависимости погрешности определения скорости от α при $W = 200$ м/с, $H = 300$ м, $t = 0,01$

пустимой погрешностью при данных параметрах моделирования.

На рис. 8 представлен результат моделирования при погрешности определения высоты, равной 0,7 м.

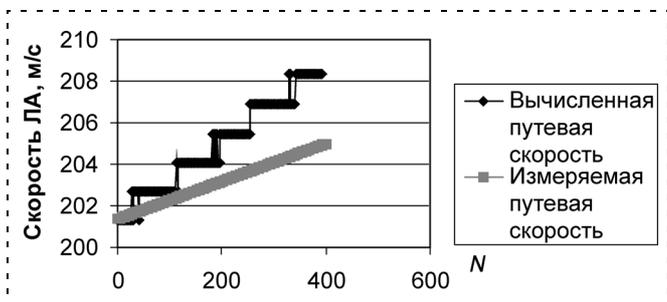


Рис. 5. Влияние дополнительной погрешности на определение путевой скорости без учета ускорения

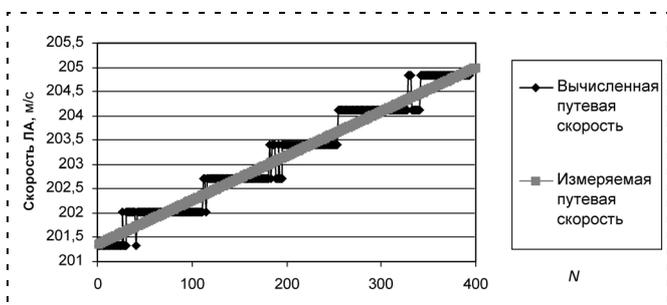


Рис. 6. Влияние дополнительной погрешности на определение путевой скорости с учетом ускорения

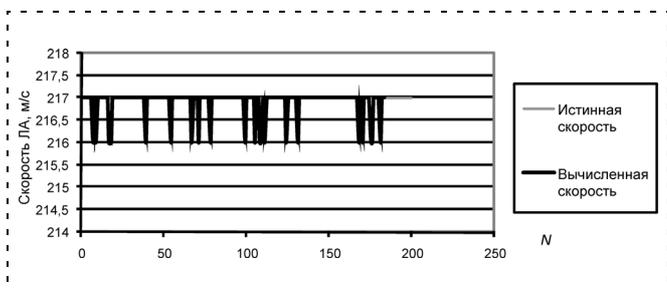


Рис. 7. Результат моделирования. Погрешность определения высоты 0,6 м

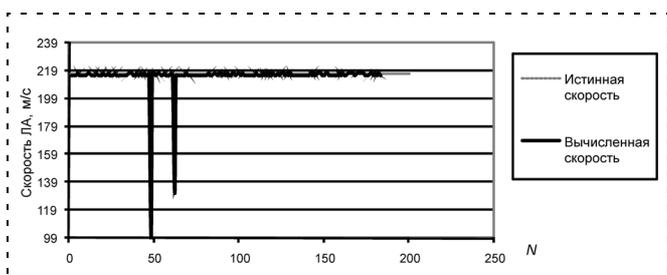


Рис. 8. Результат моделирования. Погрешность определения высоты 0,7 м

Максимальная погрешность в определении путевой скорости составила 118 м/с, что недопустимо. Максимально допустимая погрешность не должна превышать 0,6 %, следовательно, значение скорости не должно превышать 1,3 м/с.

Допустимая погрешность определения высоты 0,6 м.

Заключение

1. Разработаны и реализованы схема, алгоритм и математическая модель определения путевой скорости летательного аппарата. Алгоритм заключается в вычислении корреляции двух фрагментов изображений, получаемых с фоточувствительных приемников, жестко закрепленных на борту летательного аппарата. Вычисление корреляции позволяет определить время, за которое область поверхности фиксировало первое, а затем второе фоточувствительное устройство. Зная время и высоту полета ЛА, можно вычислить путевую скорость летательного аппарата.

2. Разработанные комплексные модели ЛА и ОЭС позволили оценить точность определения путевой скорости летательного аппарата. На квазистационарных участках полета погрешность не превышает:

- при угле наклона ФПУ 29° — 0,6 % от путевой скорости полета ЛА;
- при угле наклона ФПУ 50° — 0,275 % от путевой скорости ЛА.

Параметры ФПУ:

- размер фоточувствительного элемента $1,4 \times 1,4$ мм;
- число чувствительных элементов 16;
- диапазон спектральной чувствительности — от 0,4 до 1 мкм;
- угол обзора $47,78^\circ$.

3. Проведено моделирование, позволившее установить:

- влияние угла наклона второго фоточувствительного приемника на точность определения путевой скорости;
- влияние движения с ускорением летательного аппарата на погрешность определения путевой скорости;
- влияние погрешности высотомера.

4. Проведено полунатурное моделирование, позволившее определить совпадение оценок влияния параметров на погрешность определения путевой скорости с математическим моделированием.

Список литературы

1. Дудко Г. К., Резников Г. Б. Доплеровские измерители скорости и угла сноса самолета. М.: Сов. радио, 1964.
2. Бергер Ф. Б. Проектирование самолетных систем измерения скорости, использующих эффект Доплера // Вопросы радиолокационной техники. 1958. № 4 (46).
3. Буймов А. Г. Корреляционно-экстремальная обработка изображений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987.

УДК 001.5 + 521.1

А. С. Волжин, канд. техн. наук

Об опыте измерения методической ошибки спутникового навигационного приемника, вызванной различием абсолютной и относительной угловой скорости суточного вращения Земли

Объясняется незначительный казус, обнаруженный в прикладной части статьи "Об абсолютной угловой скорости суточного вращения Земли и ее влиянии на точность навигационных систем самолетов" автора А. С. Волжина после ее публикации в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2006, № 5. Казус связан с неправильной трактовкой причины возникновения измеренной с помощью инерциально-спутниковой системы систематической ошибки по северной составляющей скорости спутникового навигационного приемника.

В журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2006, № 5 была опубликована статья "Об абсолютной угловой скорости суточного вращения Земли и ее влиянии на точность навигационных систем самолетов" [1]. Основной целью статьи [1] является описание абсолютной угловой скорости (УС) суточного вращения Земли (СВЗ), создание методов ее расчета и определение численного значения. Показано ее влияние на точность навигационных систем.

В статье показано, что сложное движение Земли можно представить в виде трех основных составляющих движений: СВЗ, орбитального движения Земли (ОДЗ) вокруг Солнца и орбитальной обкатки Земли (ООЗ) по орбите (термин ООЗ введен автором). Следовательно, и абсолютная УС СВЗ обусловлена этими движениями. Определение абсолютной УС СВЗ связано с ООЗ, поэтому в статье дано краткое описание и обоснование ООЗ.

Движение ООЗ представляет собой качение Земли по орбите [2]. Земля катится по орбите вокруг оси орбитальной обкатки (ОО), которая проходит через ее центр масс (ЦМ) перпендикулярно плоскости орбиты, в обратную своему орбитальному движению сторону. За один период (год) орбитального движения Земля делает один оборот вокруг оси ОО при качении по орбите, т. е. УС ООЗ вокруг своего ЦМ равна по величине и противоположна по знаку УС ОДЗ и составляет в среднем $2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. При этом ЦМ Земли движется по орбите вокруг Солнца

с линейной скоростью, равной 1,275 м/с, проходя за один год расстояние, равное периметру фигуры Земли (приблизительно 40 000 км).

Вертикальная составляющая УС ОО ЦМ Земли (ее проекция на ось, параллельную оси СВЗ), которая определяет движение в плоскости экватора, равна $0,78 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$, что соответствует периоду, равному 25 540,6 года. Такова основная сущность движения ООЗ.

Существование ООЗ однозначно определяет существование абсолютной УС СВЗ в пространстве. Поэтому в статье приведено обоснование существования ООЗ. Фрагменты составляющего движения ООЗ были замечены давно (впервые одно из них — движение точки весеннего равноденствия — обнаружил Гиппарх в 123 году до н. э.), но им давали иное объяснение.

Приведем некоторые известные факты и физические явления, которые имеют место в результате ООЗ и подтверждают ее существование:

- движение точки весеннего равноденствия с периодом, равным периоду ОО ЦМ Земли;
- коническое движение (прецессия) оси СВЗ с этим же периодом, так как ось СВЗ проходит через ЦМ Земли под известным углом ($23^\circ 26' 21''$) к оси ОО, и при движении ЦМ в результате ООЗ она описывает коническую поверхность;
- неизменность направления оси СВЗ в пространстве, это происходит в результате двух противоположных движений ОДЗ и ООЗ с одинаковой по модулю УС;
- состояние покоя на поверхности Земли при ее орбитальном движении со скоростью примерно 30 км/с. Это обеспечивается указанной выше причиной, в результате которой переносная УС точек на поверхности Земли равна нулю, а следовательно, и кориолисово ускорение при ОДЗ равно нулю;
- различные значения УС СВЗ относительно Солнца и звезд;
- разная продолжительность тропического и сидерического года.

Можно привести еще несколько примеров, подтверждающих существование ООЗ, например Коперник высказывал предположение о наличии у Земли третьего движения.

С учетом ООЗ в статье описано пять различных методов определения абсолютной УС СВЗ в пространстве. Проведенные численные расчеты различными методами дали практически один и тот же результат, значения абсолютной УС СВЗ в пространстве ($7,290555 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$).

Результаты статьи о движении Земли докладывались на международных конференциях [2] и семинарах, и не было случаев их опровержений.

Значение УС СВЗ используется во многих областях науки и отраслях практической деятельности. Автор является специалистом в области гироскопических инерциальных навигационных систем, в которых используется значение УС СВЗ относительно звезд. Известно, что гироскоп измеряет абсолютную УС, поэтому из-за различия абсолютной и относительной УС СВЗ в навигационных системах возникают методические ошибки, которые в настоящее время меньше инструментальных. Поэтому в качестве прикладного дополнения к основному содержанию статьи было показано влияние этих методических ошибок на точность инерциальной навигационной системы (ИНС) и спутникового навигационного приемника (СНП).

При определении методической ошибки СНП в статье есть ссылка на результаты летного эксперимента по анализу точности инерциально-спутниковой навигационной системы (ИНС) и СНП. ИНС состоит из ИНС, СНП и фильтра физической интеграции (ФФИ), который помимо использования в задачах фильтрации ошибок ИНС и СНП применяется и для построения в ИНС дополнительного интегрированного канала навигации. Точность интегрированного канала навигации в установленном горизонтальном полете при измерении скорости в 4...5 раз выше точности СНП, а при измерении координат местоположения не хуже точности СНП. Поэтому интегрированный канал может измерять и компенсировать систематические ошибки по скорости СНП.

По проекту автора на основе ФФИ было создано несколько экспериментальных образцов ИНС с использованием различных типов ИНС (платформенная и бесплатформенная) и СНП. Многократные лабораторные эксперименты, в которых к выходному сигналу по скорости СНП специально добавляли систематические ошибки различной величины, и затем этот суммарный сигнал поступал на вход ФФИ, показали, что ФФИ измерял эти ошибки и компенсировал, потому они не влияли на точность интегрированного канала.

Казус в статье состоит в том, что полученные при обработке двух летных экспериментов систематические ошибки по северной составляющей скорости СНП были восприняты как методические ошибки СНП. В статье категорически не утверждается, а говорится гипотетически, что возможной причиной возникновения этой ошибки является различие абсолютной и относительной УС СВЗ.

В действительности оказалось, что систематическая ошибка по северной составляющей скоро-

сти СНП вызвана опiskой в данной версии программы ИНС. При написании дробного числа была не поставлена точка (было написано $3/2$, а правильно $3./2$), что приводило к возникновению указанной ошибки по северной составляющей скорости СНП, которую ФФИ устранял, и она не влияла на точность интегрированного канала навигации.

Эта ошибка по скорости СНП была принята за возможную методическую ошибку по двум причинам:

- она имела место только по северной составляющей скорости СНП, что совпадает с уравнениями вычисления составляющих скорости СНП (выражения (24), (25) статьи);
- значение ошибки находилось в диапазоне значений возможной методической ошибки.

После исправления программы и повторной обработки результатов летного эксперимента систематическая ошибка по северной составляющей скорости СНП имела порядок сотых долей м/с.

Вопрос измерения методической ошибки по северной составляющей скорости СНП в полете остается открытым. Во-первых, такие стабильные ошибки могут быть скомпенсированы наряду с инструментальными в самом приборе до определенно малой величины. Во-вторых, в статье приведено предельное модульное значение этой ошибки (0,4 м/с) при полете вдоль экватора без учета геометрии расположения видимых спутников и других факторов. В действительности при полете в высоких широтах и с учетом указанных факторов, при которых модульное значение ошибки трансформируется несколько раз через синусы и косинусы, текущая методическая ошибка может иметь небольшое значение на уровне сотых долей м/с.

Автор глубоко сожалеет о случившемся казусе в статье, хотя он и не влияет на основное содержание и результаты статьи, и приносит искренние извинения редколлегии журнала, его читателям и коллегам по работе.

Список литературы

1. Волжин А. С. Об абсолютной угловой скорости суточного вращения Земли и ее влиянии на точность навигационных систем самолетов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 5. С. 29—38.
2. Волжин А. С. О неизвестной составляющей движения Земли и ее влиянии на астронавигационные измерения // Докл. VIII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2001. С. 98—101.

ОТРАСЛЕВЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5

А. В. Малков, канд. г.-м. наук, доц.,
И. М. Першин, д-р техн. наук, проф.,
Пятигорский государственный
технологический университет

Проектирование распределенной системы управления режимами эксплуатации месторождения "Куюлус"

Рассмотрено проектирование распределенной системы управления водозаборными скважинами в районе г. Актау. Эксплуатация месторождения осуществляется в нестационарном режиме при систематической сработке пьезометрических уровней подземных вод и истощении эксплуатационных запасов. В таких условиях первоочередной задачей является построение системы управления режимами эксплуатации, обеспечивающей минимальное негативное воздействие на гидrolитосферу.

Центральной проблемой рассматриваемого региона (г. Актау) является водоснабжение, базирующееся на использовании артезианских подземных вод. За последние три десятилетия объем добычи подземных вод из гидrolитосферы увеличился более чем в два раза, что существенным образом изменило общую картину распределения природных вертикальных гидравлических градиентов месторождения подземных вод "Куюлус". В результате такого воздействия стало наблюдаться падение качественных показателей химического состава подземных вод, а также активизация ряда негативных техногенных процессов, реально угрожающих устойчивости кровли водоносных горизонтов. В связи с этим существует потенциальная опасность деградации месторождения подземных вод. Вероятность такого исхода определяется совместным воздействием физико-химических процессов, особенностями геолого-гидрогеологического строения гидrolитосферы, климатическими факторами и режимами эксплуатации водозабора. Процессы эти характеризуются высокой инерционностью и очень растянуты во времени. Оценить характер и тенденции в их развитии возможно только на основе математического моделирования, охватывающего периоды упреждения в несколько десятков или сотен лет.

С учетом этого важнейшей задачей является разработка и реализация эффективной системы управления режимами эксплуатации месторождения.

Краткая геолого-техническая характеристика

Месторождение подземных вод "Куюлус-Меловое" ("К-М") расположено в пределах Южно-Мангышлакского артезианского бассейна, который, в свою очередь, входит в состав Среднекаспийской водонапорной системы. С севера бассейн ограничен складчатыми сооружениями гор Каратау, с юга — зоной Кара — Богазгол — Туаркырских поднятий. На востоке — сливается с Южно-Устюртским бассейном, на западе — погружается под акваторию Каспийского моря. Водозабор предназначен для водоснабжения города Актау и промышленного комплекса. В плане он представляет собой систему из 50 водозаборных скважин, сгруппированных в восемь блоков, вытянутых линейно в субмеридиональном направлении по оси линзы опресненных вод. Конструкция водозабора ярусная, т. е. каждая водозаборная скважина каптирует только какой-то один водоносный горизонт. Основными рабочими горизонтами являются второй, первый альбские и сеноманский, содержащие напорные воды (рис. 1). Динамика водоотбора представлена на рис. 2.

Интенсивная эксплуатация водоносных горизонтов привела к тому, что формировалась обширная депрессионная воронка, достигшая понижения уровня в центре до 160 м. Радиус воронки и понижение уровня в ее пределах определяются, в первую очередь, длительностью эксплуатации, пространственными координатами и фильтрационными свойствами горизонтов. На первых этапах эксплуатации темпы снижения уровня составляли до 10...15 м/год. По мере увеличения радиуса воронки и сроков эксплуатации темпы снижения уровня несколько стабилизировались, однако стационарный режим фильтрации достигнут не был. Это объясняется тем, что водоотбор значительно превышает инфильтрационное питание водоносных горизонтов, и подобная ситуация сохраняется на протяжении всего периода эксплуатации.

Контроль за динамикой уровня осуществляется по сети наблюдательных скважин, расположенных в пределах депрессии на различных расстояниях от водозаборных сооружений. Анализ данных свидетельствует, что наиболее интенсивно динамический уровень снижался в западном и южном направлениях, наиболее удаленных от областей питания.

Наличие в разрезе палеоцен-датского водоносного горизонта, содержащего подземные воды с высокой концентрацией сероводорода, определило критический уровень развития депрессионной воронки. Положение уровня в рабочих горизонтах не должно быть ниже уровня вод палеоцен-датского горизонта.

Исходя из описания рассматривалась многопластовая схема с перетеканием между водоносными горизонтами. Учитывая, что практически 90 % водоотбора приходится на первый альбский горизонт, основное внимание уделялось ему. Динамика уровня охарактеризована в нем по шести точкам (наблюдательным скважинам), по которым осуществлялась верификация модели.

Рассматривалась плоско-пространственная математическая модель, описываемая дифференциальным уравнением [1, 2]

$$\mu^* \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) - b_k (S_k - S) - b_{\Pi} (S_{\Pi} - S), \quad (1)$$

где S — понижение уровня в рассматриваемом горизонте; μ^* — водоотдача пласта; b_k, b_{Π} — параметры перетекания относительно водоупорного пласта, залегающего в кровле и подошве; S_k, S_{Π} — напоры в смежных водоносных горизонтах: кровле и подошве соответственно; k — водопроницаемость пласта.

При составлении дискретной модели (1) вся область фильтрации была разбита неравномерной прямоугольной сеткой с шагом 5000×5000 м. Исходя из геологического строения принималась схема полуограниченного пласта с закрытой северной границей (граничные условия второго рода). В остальных направлениях модель рассматривалась как неограниченный пласт. В вертикальном разрезе границы между горизонтами заданы как границы третьего рода. Фильтрационная область разбита на шесть кусочно-однородных зон, в пределах которых параметры модели приняты постоянными. Параметры модели приняты по результатам опытно-фильтрационных работ. Режим водоотбора ступенчатый, начальные условия стандартные: $t = 0; Q = 0; S = 0$.

Как следует из расчетов, сходимость фактических и модельных понижений по наблюдательным скважинам довольно хорошая. Среднеквадратическая погрешность составляет 14 %. Если согласиться с тем, что точность измерения уровня в полевых условиях составляет 5 %, дебита (с учетом среднегодового осреднения) — 10 % и точность решения дифференциальных уравнений равна 4 %, то средняя погрешность расчетов должна быть $\delta = \sqrt{25 + 100 + 16} \approx 12 \%$, что вполне соответствует точности решения задачи.

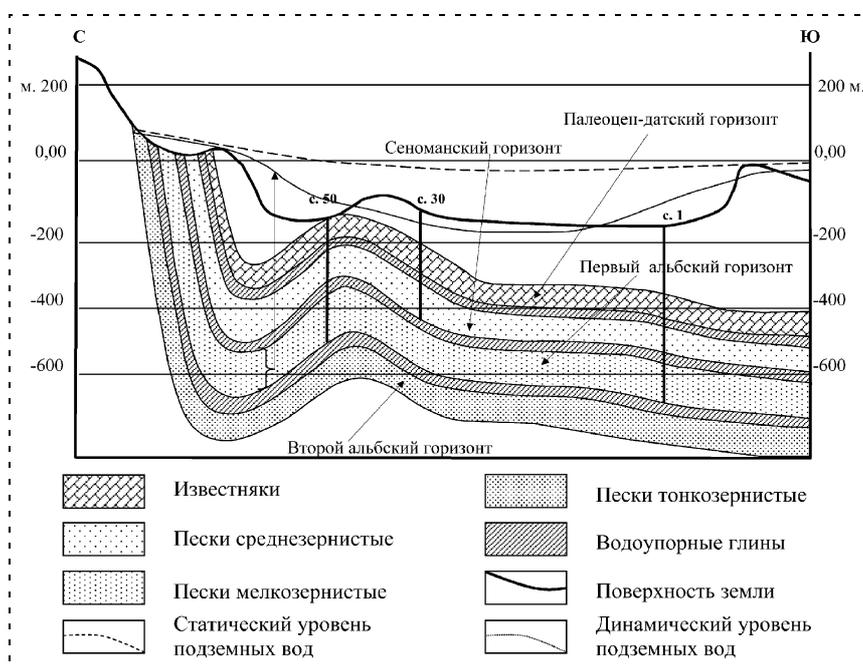


Рис. 1. Геолого-гидрогеологический разрез месторождения "К-М"

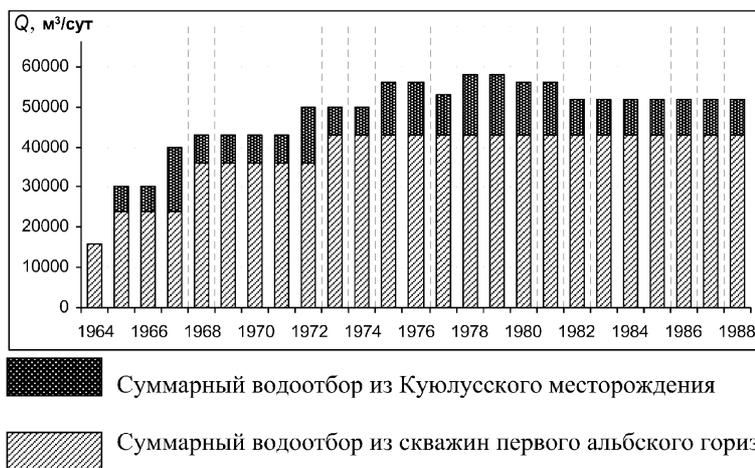


Рис. 2. Динамика суммарного водозабора из месторождения "К-М"

Синтез распределенной системы управления гидродинамическими процессами

Одним из основных параметров гидrolитосферных процессов является уровень понижения депрессионной воронки. Это связано с тем, что при достижении критического уровня понижения происходит обрушение кровли (разрушение пласта). Как известно, уровень понижения депрессионной воронки связан с дебитом скважин следующей зависимостью:

$$S_i = \frac{0,18 Q_i}{k} \lg \frac{2,25 a^* t}{R^2 (1 + 1,78 bt / \mu^*)}, \quad (2)$$

где S_i — понижение уровня в i -й скважине; Q_i — дебит i -й скважины, k — водопроводимость пласта; R — расстояние от центра скважины до точки, где определяется понижение уровня; a^* — пьезопроводность пласта; t — время от начала возмущения скважины; b — параметр перетекания.

Используя приведенную выше формулу, можно рассчитать понижение ($S_{ж}(x, t)$), обеспечивающее желаемый дебит скважин.

Общая схема системы управления рассматриваемым объектом приведена на рис. 3.

На рис. 4 приведен сектор фильтрационной схемы Куюлусского месторождения, в котором располагаются наблюдательные и добывающие скважины, и указаны координатные оси.

В рассматриваемых секторах по оси x располагаются восемь эксплуатационных блоков скважин (шаг между центрами 5000 м). С помощью наблюдательных скважин рассчитывается депрессионная воронка на расстоянии 5000 м от эксплуатационных скважин $S(x, 5000, t)$. Область распределения входного воздействия по первой пространственной моде, принятая при экспериментальных исследованиях, показана на рис. 5.

При этом в качестве пространственных мод были выбраны функции

$$S_m \cos(\Psi_\eta X_i), \Psi_\eta = \pi\eta/L_K,$$

где $L_K = 45000$ м — протяженность линейного ряда эксплуатируемых скважин. Значение S_m обычно выбирается в пределах 10 % от рабочего состояния. Скачкообразно к рабочему входному воздействию (рабочему состоянию понижения уровня в местах расположения добывающих скважин) добавляется значение $S_m \cos(\Psi_\eta X_i)$, где X_i — координата i -й добывающей скважины (рис. 5). Измеряя функцию выхода $S(x, 5000, t)$ (рассогласование между уровнями понижения при рабочем входном воздействии и входном воздействии с добавлением значения $S_m \cos(\Psi_\eta X_i)$) в точках расположения наблюдательных скважин, определяем принадлежность объекта к классу пространственно-инвариантных [3]. В результате экспериментальных исследований получено, что рассматриваемый объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных. Определим структуру и параметры передаточных функций рассматриваемого объекта по выбранному числу пространственных мод входного воздействия.

Исследования показывают [1, 5], что многие гидродинамические и тепловые процессы могут быть аппроксимированы передаточными функциями по

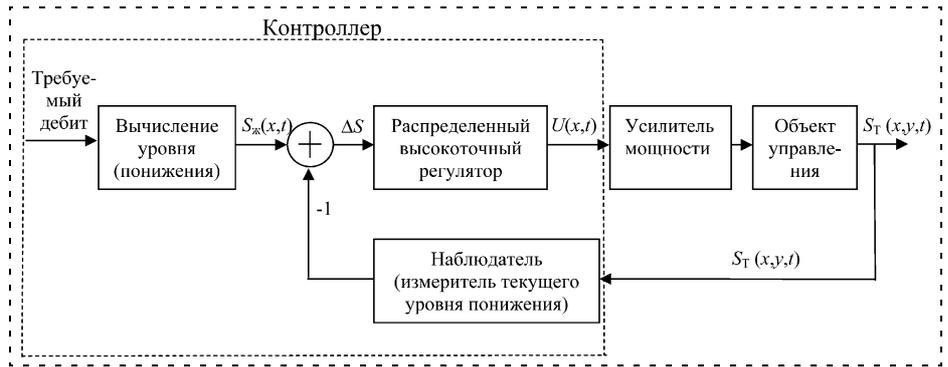


Рис. 3. Схема системы управления

каждой η -й пространственной моде входного воздействия вида

$$W_\eta(S) = \frac{K_\eta}{T_\eta s + 1} e^{-\tau_\eta s}, (\eta = 1, 2, \dots), \quad (3)$$

где s — оператор Лапласа; $T_\eta, K_\eta, \tau_\eta$ — параметры, определяемые с использованием результатов эксперимента.

Определение параметров передаточных функций для пространственно-инвариантных объектов осуществляется следующим образом: в момент времени t_0 к рабочему входному воздействию (рабочему состоянию понижения уровня в местах расположения добывающих скважин $X_i, i = \overline{1, 8}$) добавляется

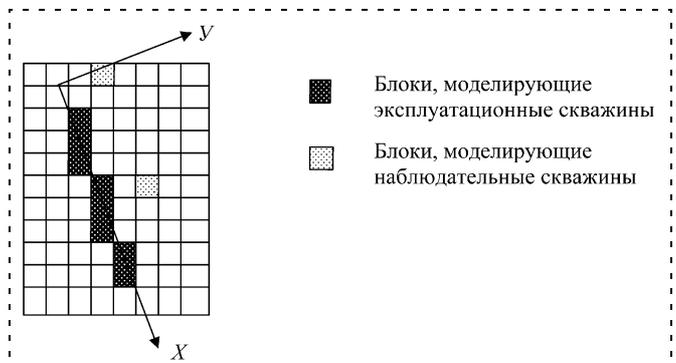


Рис. 4. Исследуемый сектор



Рис. 5. Распределение входных воздействий

значение $S_m \cos(\Psi_\eta, X_i)$ (задействуются все восемь скважин). Определяем функцию выхода $S(x, 5000, t)$ с использованием наблюдательных скважин.

Для двух пространственных мод входного воздействия ($\eta = 1, 3$) были проведены экспериментальные исследования и вычислены параметры: $K_1 = 0,2$; $T_1 = 360$; $\tau_1 = 8$; $K_3 = 0,11$; $T_3 = 220$; $\tau_3 = 8$ (значения T_1, T_3, τ_1, τ_3 указаны в сутках).

Постановка задачи синтеза: для системы управления объектом, передаточные функции которого по выбранным пространственным модам имеют вид (3), синтезировать распределенный высокоточный регулятор со следующими показателями: запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi \geq \pi/6$; по модулю $\Delta L \geq 10$ дБ; значение параметра $\Delta = 0,7$ (параметр Δ учитывает параметрические возмущения передаточной функции объекта управления в окрестности линии среза модуля разомкнутой системы [5]). Передаточная функция распределенного высокоточного регулятора имеет вид [3]

$$W(x, y, s) = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] s, \quad (4)$$

где E_μ, n_μ ($\mu = 1, 2, 4$) — параметры, подлежащие определению; ∇^2 — лапласиан.

Синтез распределенного регулятора

Положим, что фазовый сдвиг, вносимый в систему регулятором, равен нулю. Тогда для определения частот среза модуля разомкнутой системы в соответствии с (3) получим следующее уравнение:

$$-\pi + \Delta\varphi_\eta = -\omega\tau_\eta - \arctg(T_\eta\omega), \quad \eta = 1, 2, \dots$$

Подставляя значение T_η, τ_η и $\Delta\varphi_\eta = \pi/6$ в последнее уравнение, определим значение частот среза модуля: $\eta = 1, \omega_1 = 10^{-0,87118}$; $\eta = 3, \omega_3 = 10^{-0,86095}$ (где ω_η — частота, сут⁻¹).

Параметры регулятора будем определять из условия, что значение частот ω_η принадлежит линии перегиба [3]. Для частот ω_η , принадлежащих линии перегиба, фазовый сдвиг, вносимый в разомкнутую систему регулятором, равен нулю. Подставляя $\omega = \omega_1, \omega = \omega_3$ в последнее уравнение, получим следующую систему уравнений [3]:

$$\lg \omega_1 = 0,5 \lg \left(E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{\Psi_1^2}{n_4} \right] \right) - 0,5 \lg \left(E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{\Psi_1^2}{n_2} \right] \right); \quad (5)$$

$$\lg \omega_3 = 0,5 \lg \left(E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{\Psi_3^2}{n_4} \right] \right) - 0,5 \lg \left(E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{\Psi_3^2}{n_2} \right] \right). \quad (6)$$

Вычитая (5) из (6), придем к следующему результату:

$$\lg \Delta\omega^2 = \lg \left(\frac{n_4 - 1 + \Psi_3^2}{n_4 - 1 + \Psi_1^2} \right) - \lg \left(\frac{n_2 - 1 + \Psi_3^2}{n_2 - 1 + \Psi_1^2} \right),$$

где $\Delta\omega^2 = \frac{\omega_3^2}{\omega_1^2}$. (7)

Используя (7), определим значения n_2 и n_4 . Поскольку $\Delta\omega^2 > 1$, то положим в (7) $n_2 = \infty$. Тогда n_4 определяется соотношением

$$n_4 = (\Delta\omega^2 - 1 + \Psi_3^2 - \Delta\omega^2\Psi_1^2) / (\Delta\omega^2 - 1). \quad (8)$$

При этом на изменение значения n_4 в соответствии с [3] наложено ограничение $n_4 \geq 1$. Подставляя в (8) значения $\Psi_1, \Psi_3, \omega_1, \omega_3$, получим $n_4 = 1,5$.

Рассматривая совместно уравнения (4) и (6) ($\Delta = 0,7$), получим

$$E_4 = 0,89809, E_2 = 0,66249.$$

Подставляя $\omega = \omega_1, \omega = \omega_3$ в (3), определим значения модуля:

$$M_1 = 0,33; M_3 = 0,0139.$$

Так как ω_1, ω_3 являются частотами среза модуля разомкнутой системы, то коэффициенты усиления регулятора в этих точках равны

$$\bar{M}_1 = (M_1)^{-1}, \bar{M}_3 = (M_3)^{-1}. \quad (9)$$

Параметры n_1 и E_1 будем определять исходя из условия

$$\bar{M}_1 = M_{\min 1}, \bar{M}_3 = M_{\min 3} \text{ (см. [3], стр. 9);}$$

$$\bar{M}_1 = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{\Psi_1^2}{n_1} \right]; \quad (10)$$

$$\bar{M}_3 = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{\Psi_3^2}{n_1} \right]. \quad (11)$$

Поделив (11) на (10), придем к следующему результату:

$$n_1 = \frac{-1 + \Delta M - \Delta M \Psi_1^2 + \Psi_3^2}{\Delta M - 1}, \text{ где } \Delta M = \frac{\bar{M}_3}{\bar{M}_1}. \quad (12)$$

При этом значения n_1 подчинены ограничению $n_1 \geq 1$ (см. [3]). Подставив вычисленные значения M_1 и M_3 в (9), а затем результат в (12) и (11), получим $n_1 = 1,5$; $E_1 = 186,451$.

Передаточная функция синтезированного регулятора может быть записана в виде

$$W(x, s) = 186,451 \left[\frac{0,5}{1,5} - \frac{1}{1,5} \nabla^2 \right] + 0,89809 \left[\frac{0,5}{1,5} - \frac{1}{1,5} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + 0,66249s. \quad (13)$$

На вход регулятора (см. рис. 3) поступает воздействие

$$\Delta S(x, t) = S_{ж}(x, t) - S(x, 5000, t). \quad (14)$$

На выходе регулятора получим функцию, которая в пространстве состояния записывается в виде

$$U(x, t) = 186,51 [0,5/1,5 \Delta S(x, t) - 1/1,5 \nabla^2 (\Delta S(x, t))] + 0,89809 \int_0^t [0,5/1,5 \Delta S(x, t) - 1/1,5 \nabla^2 (\Delta S(x, t))] dt + 0,66249 d \Delta S(x, t) / dt.$$

Дискретный аналог входного воздействия в регулятор может быть записан в виде

$$\Delta S_i(t) = S_{iж}(t) - S_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, 8,$$

где i — токи дискретизации по оси x (эти точки совпадают с точками расположения добывающих скважин), шаг дискретизации $\Delta x = 5000$ м.

Дискретный аналог функции выхода регулятора записывается в виде

$$U_i(t) = 186,51 D_i + 0,89809 \int_0^t D_i dt + 0,66249 d \Delta S_i(t) / dt, \quad (15)$$

$$D_i = 0,5/1,5 \Delta S_i - 1/1,5 [\Delta S_{i-1} - \Delta S_i + \Delta S_{i+1}] / \Delta x^2, \quad i = 1, 2, \dots, 8.$$

Значения функции $\Delta S(x, t)$ в граничных точках ($x = 0, x = 45000$) в соответствии с граничными условиями заданы в виде $\Delta S_0(t) = \Delta S_1(t)$; $\Delta S_9(t) = \Delta S_8(t)$.

С использованием дискретного аналога функции выхода регулятора был разработан алгоритм управления и осуществлено моделирование работы замкнутой системы управления (численная модель объекта управления была составлена в соответствии с (1)). По результатам моделирования построены графики пятой водозаборной скважины, приведенные на рис. 6, 7, 8. Аналогичные графики могут быть построены и для других скважин.

Управляющее воздействие (понижение уровня в зоне пятого блока скважин)

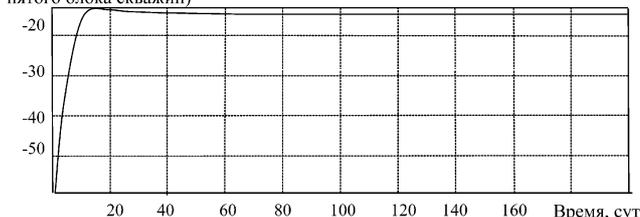


Рис. 6. График управляющего воздействия

Переходный процесс $S(x = 25000, y = 5000, t)$

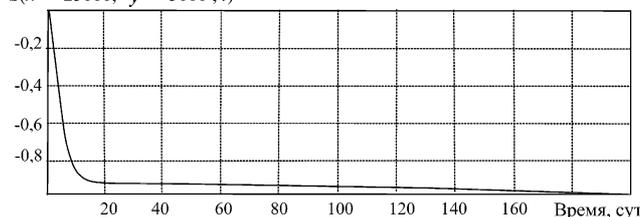


Рис. 7. График функции выхода системы управления

Дебит пятого блока скважин, м³/сут

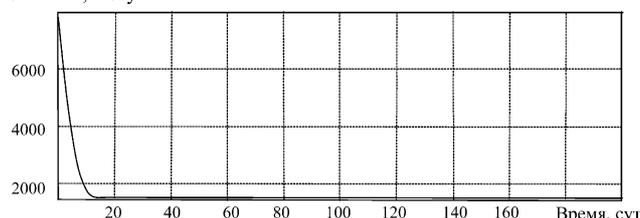


Рис. 8. График изменения дебита пятого блока скважин

Как показывают расчеты, распределенный высокоточный регулятор достаточно эффективно управляет гидродинамическим процессом.

Список литературы

1. **Гидрогеологические** расчеты на ЭВМ / Под ред. Р. С. Штенгелова. М.: Изд.-во МГУ, 1994. 336 с.
2. **Ломакин Е. А., Мироненко В. А., Шестаков В. М.** Численное моделирование геофильтрации. М.: Недра, 1988. 228 с.
3. **Першин И. М.** Синтез систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 2—10.
4. **Романов М. Ф., Федоров М. П.** Математические модели в экологии. СПб.: Иван Федоров, 2003, 240 с.
5. **Малков А. В., Першин И. М.** Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидrolитосферными процессами. М.: Научный мир, 2007. 257 с.

УДК 621.314.58

А. Ф. Резчиков¹, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, проф.,
Ю. М. Голембиовский², д-р техн. наук, проф.,
Ю. А. Аветисян¹, д-р физ.-мат. наук,

¹Институт проблем точной механики
и управления, г. Саратов,

²Саратовский государственный
технический университет

Повышение управляемости и компьютеризация систем электроснабжения как важнейшее направление экономии энергии в промышленности

Обосновывается перспективность построения адаптивных систем электроснабжения для питания массовых и индивидуальных потребителей. Рассмотрены принципы построения таких систем и варианты их структурной организации.

Ограниченность энергетических ресурсов и возрастание стоимости электроэнергии делают ее экономию все более насущной задачей.

Эта задача решается путем использования энергосберегающих технологий, а также создания таких систем электроснабжения, которые обеспечивают сокращение затрат энергии и других ресурсов на производство единицы продукции [1]. Рассмотрим с этой точки зрения принципиальные возможности и перспективные направления построения высокоэкономичных систем электропитания.

В настоящее время до 60 % вырабатываемой электроэнергии потребляется в преобразованном виде. Анализ структуры энергопотребления показывает, что существующая тенденция увеличения доли энергии, используемой в преобразованном виде, не только сохранится, но даже усилится в течение ближайших десятилетий. Это обусловлено не только технологическим прогрессом, но и тем фактом, что стандартная в России, странах ближнего зарубежья и многих дальних зарубежных странах общепромышленная частота 50 Гц не является оптимальной по затратам стали и цветных металлов на производство электрооборудования. Еще в 30-х годах прошлого столетия в научной среде велись интенсивные дискуссии на эту тему и было признано, что оптимальной для России была бы частота 100 Гц. Однако технический уровень промышленности того времени и экономические возможности страны не позволили реализовать переход на новую частоту энергосистем. В послевоенные годы стало очевидным, что более рациональным путем является широкое внедрение преобразовательных устройств для

питания массовых и индивидуальных потребителей. Появление полупроводниковых приборов резко интенсифицировало научные исследования и освоение промышленного производства вентильных преобразователей (ВП) различного назначения. Увеличение доли преобразованной энергии в структуре энергопотребления делает ВП одним из основных инструментов экономии энергоресурсов. Перевод ряда промышленных производств и индивидуальных потребителей на повышенные частоты стимулирует создание мощных и надежных систем электроснабжения на базе ВП. Такие системы находят широкое применение при питании внутришлифовальных станков подшипниковых предприятий, модульных электротермических установок конвейерного типа, в химической промышленности для привода технологического оборудования производства синтетических волокон и во многих других областях хозяйственной деятельности. Системы электроснабжения массовых потребителей по своим технико-экономическим и эксплуатационным показателям являются более выгодными по сравнению с источниками индивидуального электропитания отдельных потребителей. Целесообразность использования таких систем возрастает по мере увеличения суммарной потребляемой мощности. Кроме того, системы питания множества однотипных потребителей можно строить по модульному принципу, что существенно повышает их надежность и гибкость.

Любой технологический агрегат с номинальной мощностью P_n имеет статистическую среднесуточную загрузку $P_c < P_n$ [2]. Отношение $K_n = P_c/P_n$ для разных отраслей промышленности, разных технологий и агрегатов различно. По данным [1] значение K_n колеблется в широких пределах от 0,1...0,2 (например, для металлорежущих станков) до 0,85 (компрессоры химических производств). При такой среднесуточной загрузке снижаются КПД, а для многих потребителей и $\cos\phi$ источника электропитания технологического агрегата. Для поддержания указанных характеристик на высоком уровне необходимо использовать наимыгоднейшие режимы работы технологического агрегата, обеспечивающие при заданном качестве продукта и производительности минимальные энергетические и иные затраты.

Для задания таких режимов требуется изменение частоты f и напряжения U источника питания агрегатов. Мы приходим, таким образом, к выводу о необходимости повышения управляемости источника питания агрегата в целях минимизации затрат на производство единицы продукции. В соответствии с [3, 4] *управляемой* называется система, для которой существует управление $U(t_0, t_1)$, переводящее ее из состояния χ_0 в состояние χ_1 за время $(t_1 - t_0)$. Такое определение подчеркивает, что возможность движения объекта по оптимальной с точки зрения энергетических и иных затрат траекто-

рии тем выше, чем большими степенями свободы он обладает, т. е. чем выше его управляемость.

Электроснабжение технологического агрегата на общепромышленной частоте 50 Гц практически не обладает управляемостью. Здесь отсутствует возможность вариации параметров P_n, f и U , и единственный путь экономии электроэнергии — использование энергосберегающих технологий и оптимизация электротехнологических схем потребителей (электродвигателей, печей и т. д.). Иная картина складывается при электроснабжении на повышенных частотах. В качестве источников вторичного питания здесь используются электромашинные и вентильные (полупроводниковые) преобразователи частоты. Строго говоря, управляемостью в указанном смысле обладают лишь полупроводниковые преобразователи. В них принципиально заложена возможность изменения в широких пределах энергетических характеристик f, U, P_n , регулирование по требуемому технологическим процессом закону, рекуперация энергии. Будучи электронным устройством, ВП допускает автоматическое управление своими характеристиками.

Задача минимизации потерь электроэнергии при питании отдельного технологического агрегата требует построения сложных систем управления ВП, способных учитывать множество параметров при выработке управляющих воздействий. Такая задача не могла быть решена с использованием традиционных аналоговых средств управления, поскольку для нетривиальных применений требуется выполнение достаточно сложных расчетов в темпе технологического процесса. Принципиально возможность решения указанной задачи появилась после создания сравнительно недорогих микропроцессорных вычислительных средств. Микропроцессорные комплекты БИС позволяют строить встраиваемые микроконтроллеры ВП, способные решать сложные логические и оптимизационные задачи. Важным достоинством микропроцессорных систем управления является их легкая адаптируемость к изменению функций рабочего органа и критериев управления. Это достигается перестройкой лишь программного обеспечения управления без изменения технических средств.

Следующим шагом построения высокоэкономичных систем электроснабжения на повышенных частотах является создание оперативно перестраиваемых преобразовательных сетей (ОППС) для централизованного питания массовых потребителей (цехов и предприятий в целом) и индивидуальных мощных потребителей. Такие сети должны состоять из ряда параллельно работающих модулей ВП. Высокая управляемость ОППС достигается путем

1) подбора номинальных мощностей преобразователей, образующих ОППС согласно ряду Фибоначчи;

2) придания каждому модулю свойства многофункциональности, что дает возможность использовать его в разных режимах работы (например, в режимах инвертирования и компенсации);

3) создания системы управления на основе управляющего вычислительного комплекса (УВК) [5];

4) разработки специального математического обеспечения задач управления ОППС по критерию минимума потерь.

Совокупность перечисленных мероприятий позволяет построить принципиально новую систему электроснабжения на частоте, отличающейся от общепромышленной частоты 50 Гц, адаптивную к изменяющейся нагрузке. Структура такой системы оперативно перестраивается в зависимости от величины и характера нагрузки. При этом УВК оптимизирует на каждом шаге управления по критерию минимума потерь, максимальной надежности и качества электроэнергии состав преобразователей, обеспечивающих нагрузку активной мощностью, состав преобразователей, осуществляющих компенсацию реактивной мощности, реализует перевод преобразователей из одного режима в другой и вывод в резерв или из резерва. Тем самым обеспечивается поддержание КПД системы электроснабжения на максимально возможном уровне.

ОППС могут быть построены как на базе инверторов тока, так и на основе инверторов напряжения. Выбор того или иного класса инверторов для использования в универсальных преобразовательных модулях зависит от диапазона выходных частот и уровня мощности системы вторичного электроснабжения и, в конечном счете, определяется технико-экономическими расчетами.

На рис. 1 представлена обобщенная структура ОППС [6]. Синхронизация параллельно работаю-

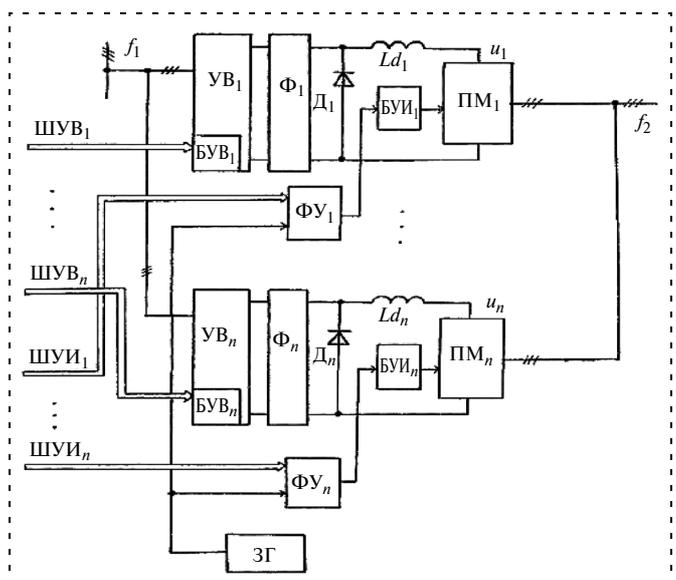


Рис. 1. Структура ОППС

щих модулей ($ПМ_1, \dots, ПМ_n$) достигается тем, что все фазосдвигающие устройства (ФУ) подключены к одному задающему генератору (ЗГ). Управляющие воздействия на блоки управления (БУВ₁, ..., БУВ_n) выпрямителей (УВ₁, ..., УВ_n) и на фазосдвигающие устройства (ФУ₁, ..., ФУ_n) подаются по шинам управления выпрямителями (ШУВ₁, ..., ШУВ_n) и инверторами (ШУИ₁, ..., ШУИ_n).

Широкое внедрение полупроводниковых преобразовательных систем позволит решить проблему перевода промышленности на повышенные частоты. Структура системы электроснабжения будущего может быть построена с применением разной степени централизации источников вторичного питания. При нижней степени централизации на цеховой преобразовательной подстанции устанавливается группа ОППС, преобразующих напряжение частоты 50 Гц в необходимые для данного цеха напряжения и частоты. Высший уровень централизации реализуется путем размещения преобразовательной подстанции в центре нагрузок предприятия по повышенной частоте. Совокупность ОППС осуществляет преобразование напряжения частоты 50 Гц в повышенные частоты с напряжением 6...10 кВ с последующей передачей энергии на цеховые подстанции, где осуществляется трансформация в напряжения, необходимые для питания потребителей.

Выбор той или иной степени централизации определяется технико-экономическими расчетами.

Наряду с источниками централизованного питания могут создаваться индивидуальные адаптивные системы электроснабжения на основе ВП (частотные приводы, индукционные агрегаты и другие), питающиеся от общепромышленной сети частоты 50 Гц.

На рис. 2 приведена примерная схема энергетических и информационных потоков в адаптивной схеме электроснабжения.

Электроэнергия от энергосистемы собственных генераторов ($\Gamma_1, \dots, \Gamma_k$) поступает на распределительные устройства и преобразовательные комплексы $ПУ_{z(i)}$, управляемые контроллерами СУ, образующими вместе с АСУ энергохозяйством предприятия локальную вычислительную сеть (ЛВС). Управление потоками реактивной мощности также осуществляется с помощью преобразовательных комплексов, переводимых в режим компенсации. Одна из типичных схем ОППС, разработанная и внедренная авторами, приведена на рис. 3.

Комплекс включает семь идентичных модулей мощностью 100 кВА каждый, один из которых постоянно работает в режиме компенсации. Остальные могут работать в одном из режимов: инвертирования, компенсации или резерва. Диапазон фиксированных частот: 400, 600, 700 и 850 Гц. Данная система обладает большими адаптационными возможностями и, как следствие, высокой надежностью при значительно меньшей суммарной установленной мощности силового оборудования по сравнению со 100 %-м резервированием.

Преобразовательный комплекс представляет собой три работающих на общую нагрузку двухмостовых автономных инверторов тока с конденсаторным суммированием выходных напряжений. В режиме максимальной загрузки компенсация избыточной реактивной мощности коммутируемых конденсаторов и стабилизация выходного напряжения обеспечиваются начальным конденсатором (тиристоры T_{71}, \dots, T_{76}). При сбросе нагрузки необходимое число инверторных мостов переводится в режим компенсации. Вывод инверторного моста в резерв сопровождается автоматическим отключением части коммутирующей емкости.

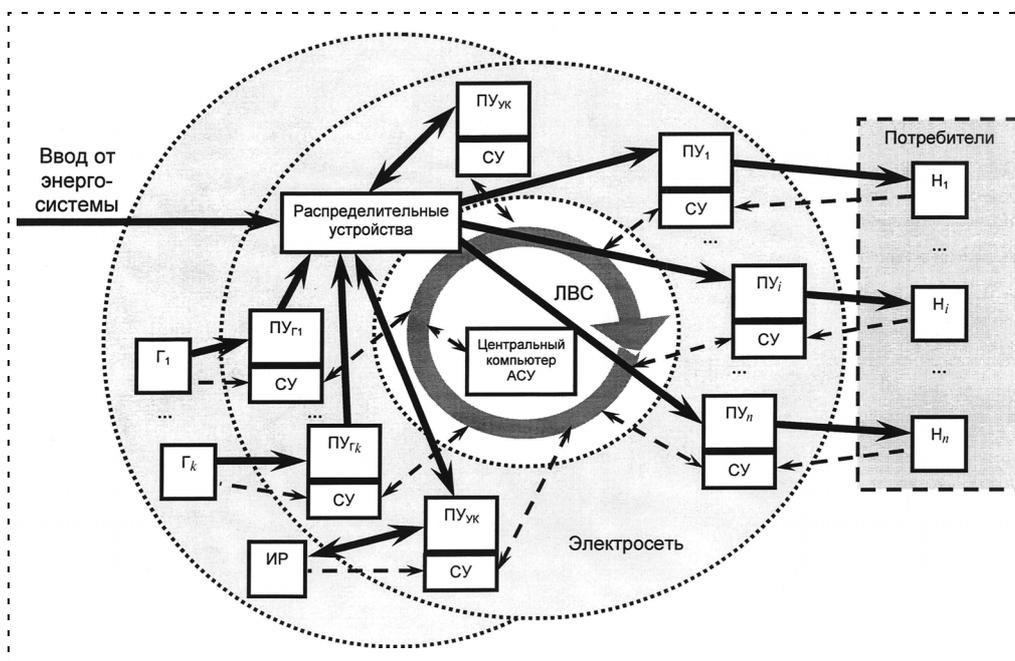


Рис. 2. Схема энергетических и информационных потоков:

Γ_i — собственные источники электроэнергии; ИР — машинный источник реактивной мощности; $ПУ_{ук}$ — преобразователи-компенсаторы реактивной мощности; $ПУ_i$ — преобразователи для питания потребителей; H_i — потребители; $\cdots \rightarrow$ — энергопотоки; \longrightarrow — информационные потоки

В случае отказа одного из модулей и его отключения средствами защиты происходит перераспределение мощности между оставшимися инверторами и система продолжает функционировать. При этом несколько ухудшается коэффициент гармоник, поскольку оставшийся от двухмостовой схемы инвертор будет генерировать некомпенсированные пятую и седьмую гармоники. Поэтому, если нагрузка позволяет, этот модуль целесообразно переводить в резерв или режим компенсации.

С учетом всей совокупности источников вторичного питания повышенной частоты представляется целесообразным строить систему управления электроснабжением предприятия [7] по иерархическому принципу. Высший уровень осуществляет связь с энергосистемами с точки зрения минимума ущерба, управление конфигурацией сети в нормальных режимах электропотребления, в условиях ограничения мощности со стороны энергосистемы и в аварийных ситуациях. Средний уровень обеспечивает управление ОППС на подстанциях, нижний уровень реализует адаптивное управление индивидуальными электроприемниками. Вычислительные средства всех уровней информационно и программно должны взаимодействовать между собой, образуя единый комплекс.

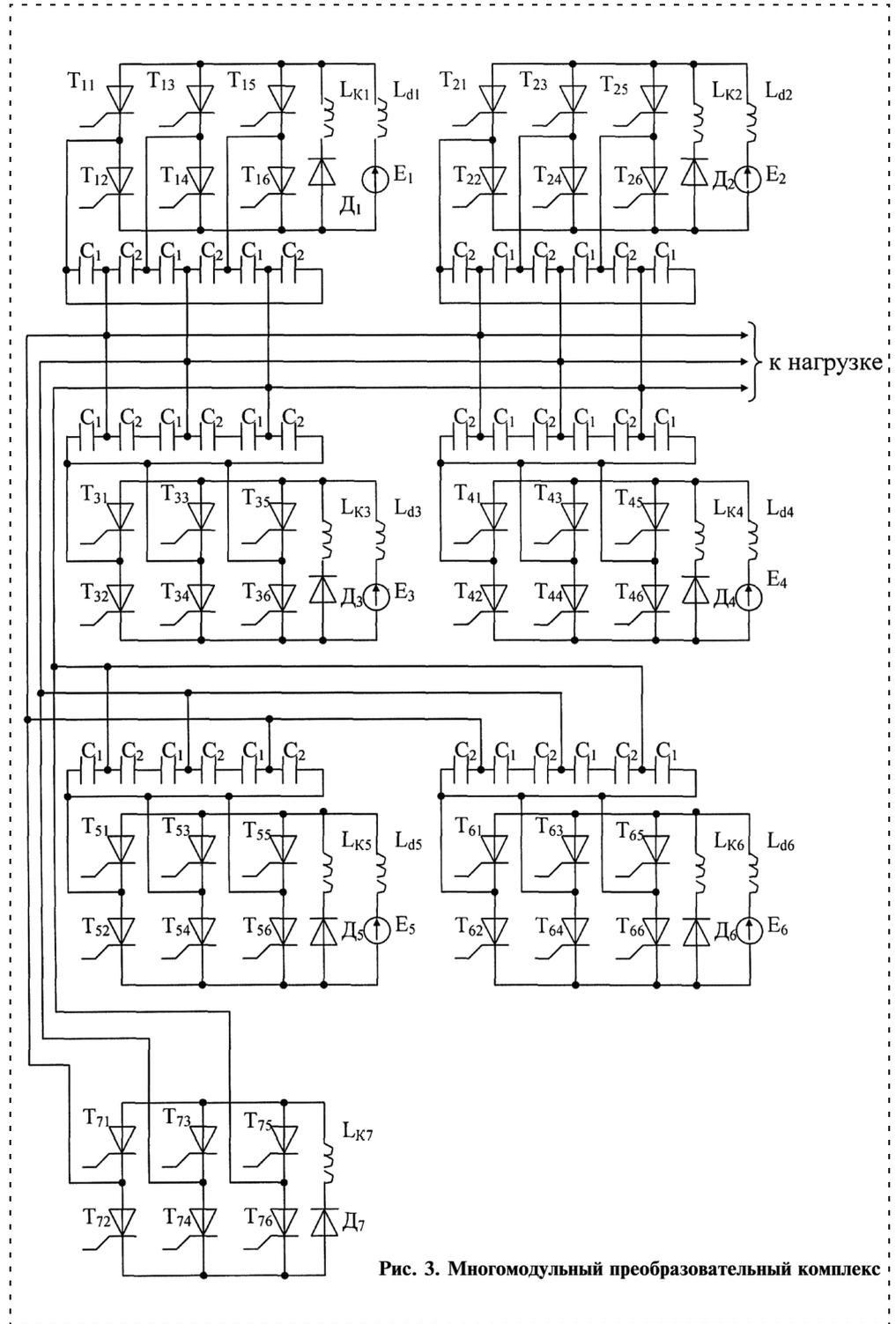


Рис. 3. Многомодульный преобразовательный комплекс

Выводы

1. Сформулированы принципы построения адаптивных систем электроснабжения на основе широкого использования полупроводниковых преобразовательных систем.

2. Предложены структуры систем электроснабжения на повышенных частотах с разной степенью централизации.

3. Отмечена необходимость построения иерархической трехуровневой системы управления всей совокупностью источников вторичного питания.

Список литературы

1. **Артемьев А. А., Артемьев А. И.** Повышенная частота — прогрессивное направление в электроэнергетике // Изв. вузов. Энергетика. 1979. № 10. С. 122—125.
 2. **Справочник** по электроснабжению промышленных предприятий / Под. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. Кн. 2. М.: Энергия, 1974. С. 11—37.
 3. **Поспелов Г. Ф., Ириков В. А.** Программно-целевое планирование и управление. М.: Советское радио, 1976. С. 52—56.
 4. **Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А.** Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 447 с.

5. **Кантер И. И., Голембиовский Ю. М., Томашевский Ю. Б.** Система управления вентиляльным энергетическим комплексом повышенной частоты // Вопросы преобразовательной техники и частотного электропривода: Межвуз. научн. сб. Саратов: Изд. Саратовского политехн. ин-та. 1981. С. 28—43.
 6. **Кантер И. И., Томашевский Ю. Б., Голембиовский Ю. М.** Система централизованного электроснабжения на базе параллельно работающих преобразователей частоты // Электричество. 1991. № 1. С. 39—47.
 7. **Резчиков А. Ф.** Управление энергетикой промышленных предприятий. Саратов: Изд. Сарат. гос. техн. ун-та, 2006. 348 с.

УДК 658.7:669.06.048.88

Д. Х. Девятков, д-р техн. наук, проф.,
С. И. Файнштейн,

В. Д. Тутарова, канд. техн. наук, доц.,
А. Н. Калитаев, канд. техн. наук,

Магнитогорский государственный технический
 университет им. Г. И. Носова

**Оперативное планирование
 отгрузки готовой продукции
 со складов металлургических
 предприятий**

Предложен эвристический полиномиальный алгоритм оперативного планирования, предназначенный для составления плана отгрузки готовой листопрокатной продукции со складов металлургических предприятий в режиме реального времени. Заданный вес набирается с высокой степенью точности. Алгоритм автоматически генерирует планы минимальной стоимости и максимально освобождает рабочее пространство склада. Стоимость плана определяется суммой штрафов и премий, начисленных за следование или отклонение от критериев оптимизации, выбранных пользователем.

Введение

Задача о наборе заданного веса является классической *NP*-полной задачей распознавания [1]. При попытке решить задачу точным методом необходимо выполнить перебор большого числа вариантов, что недопустимо в условиях оперативного планирования. Кроме того, есть еще одна проблема, связанная с отличием модельных задач от их производственных аналогов. Склад имеет ограниченную площадь, поэтому во время набора заданного веса следует, в первую очередь, генерировать те варианты, которые максимально освобождают рабочее пространство склада. Планирование складских операций проводится в рамках эвристической модели склада как пространства состояний [2], предложенной авторами в работах [3, 4]. Данная статья посвящена дальнейшему развитию этой тематики.

Эвристическая модель склада

Для решения задачи оперативного планирования складских операций обратимся к эвристическому поиску в пространстве состояний [2]. В терминах такой модели целью оперативного планирования является составление для исполнителя (мостового крана ограниченной грузоподъемности) цепочки допустимых операций, переводящей склад из начального состояния в целевое. Будем считать, что состояние склада полностью определяется списком штабелей и списком пачек внутри каждого непустого штабеля, причем пачки укладываются в штабели без превышения ограничения на высоту штабеля.

Минимальный элемент операции отгрузки (размещения) — пачка — обладает следующими признаками: типоразмер (марка стали, длина, ширина, толщина), ГОСТ, вес*, дата отгрузки (размещения). В заказе на отгрузку указываются общий тоннаж *TotW*, типоразмер, ГОСТ, дата отгрузки. Максимальное допустимое отклонение суммарного отгруженного веса от заданного равно *DW*.

Оперативное планирование происходит в режиме реального времени, то есть по мере поступления заказов. Таким образом, начальным состоянием в задаче является состояние склада до выполнения операции отгрузки (размещения) заказа, целевым — состояние склада после ее выполнения. Возможны три типа допустимых операций, переводящих склад из одного состояния в другое: размещение, переукладывание и отгрузка. Существуют три типа операций размещения. Пачка или размещается в пустом штабеле, или укладывается поверх непустого штабеля с учетом ограничения на высоту штабеля, или временно размещается в изоляторе. Операция переукладывания заключается в следующем: пачка снимается с верха штабеля и затем размещается согласно одному из предыдущих пунктов. При выполнении операции отгрузки отгружаемая пачка снимается с верха штабеля и отправляется в тупик.

*Всюду по статье будем использовать понятие "вес" в значении "масса".

Таблица 1

Стоимость штрафов и премий

Наименование штрафов и премий	Значение константы
Штрафы	
Широкая пачка на узкую (<i>F1</i>)	5
Длинная пачка на короткую (<i>F2</i>)	250
Тяжелая пачка на легкую (<i>F3</i>)	10
Короткая пачка на длинную (<i>F4</i>)	1
Разные марки стали (<i>F5</i>)	1
Разный ГОСТ (<i>F6</i>)	1
Размещение в изолятор (<i>F7</i>)	200
Превышение высоты штабеля (<i>VeryBigF</i>)	10000
Премии	
Совпадение типоразмера и ГОСТа (Prem)	-1

Для организации информированного поиска на пространстве состояний склада необходимо определить эвристическую оценочную функцию, имеющую смысл оценки состояния склада. Принцип определения этой функции основан на методе штрафных оценочных функций для листопрокатной продукции, изложенном в работах [4, 5]. Сущность метода заключается в следующем.

Определение 1. Положим стоимость пустого склада равной 0. Изменение стоимости склада после перехода в новое состояние в результате применения допустимой операции *A* есть аддитивная функция положительных штрафов и отрицательных премий (табл. 1), начисленных по всем параметрам операции *A*.

Определение 2. Стоимость плана отгрузки (размещения) заказа есть сумма стоимостей допустимых операций, составляющих план.

Размещение пачки строго по типоразмеру и ГОСТу отмечается премией, за любое отклонение начисляется штраф. Заметим, что числовые значения штрафов и премий играют роль настроечных констант эвристического поиска [2], подбираемых во время прогона программы на реальных данных.

Определим стоимости допустимых операций. Положим стоимость отгрузки пачки равной 0. Стоимость $Cost(P_1, P_0)$ размещения пачки P_1 поверх пачки P_0 равна:

- *VeryBigF* при превышении ограничения на высоту штабеля;
- *Prem* при совпадении типоразмера и ГОСТа;
- $F1 \cdot \text{sign}(\text{width1} - \text{width0} - \text{DopWd}) +$
 $+ F2 \cdot \text{sign}(\text{len1} - \text{len0} - \text{DopL0}) +$
 $+ F3 \cdot \text{sign}(\text{weigh1} - \text{weigh0} - \text{DopWg}) +$ (1)
 $+ F4 \cdot \text{sign}(\text{len0} - \text{len1} - \text{DopL1}) +$
 $+ F5 \cdot \chi(\text{"steel"} \diamond \text{"steel0"}) + F6 \cdot \chi(\text{"gost1"} \diamond \text{"gost0"})$
 в противном случае,

где *width1*, *len1*, *weigh1*, *gost1*, *steel1*, *width0*, *len0*, *weigh0*, *gost0*, *steel0* — ширина, длина, вес, ГОСТ, марка стали пачек P_1 и P_0 соответственно; *DopWD*, *DopL0*, *DopL1*, *DopWg* — допустимые отклонения по ширине, длине, весу; χ — характеристическая функция, служащая для арифметизации логического выражения. Аналогично вычисляется стоимость операции переукладывания.

Основные задачи и критерии оптимизации

Определим основные задачи, которые необходимо решить при отгрузке заказа. Пачки на складе уложены в штабеля, которые могут содержать "посторонние" элементы, не участвующие в отгрузке. Наша задача отличается от модельной тем, что элементы, участвующие в наборе веса, образуют упорядоченные последовательности, которые мы неформально будем называть верхними и внутренними стопками. Разумеется, эта задача также является *NP*-полной, так как включает в себя модельную задачу как частный случай. Таким образом, общая задача набора веса включает в себя две задачи: набор веса верхними стопками и набор веса внутренними стопками. Введем в задачу следующее ограничение. Если тоннаж *TotW* не превосходит суммарного веса верхних стопок, будем набирать его только элементами верхних стопок без переукладываний. Дадим точную математическую формулировку этой задачи.

Задача "Набор заданного веса"

Условие. Задано конечное множество *A*, разбиение *A* на упорядоченные непересекающиеся последовательности $A_i = \{a_1^i, \dots, a_{m_i}^i\}$, $i = 1 \dots p$, также заданы веса $w(a) \in Z^+$ всех элементов $a \in A$, целое положительное число *B* и функция $f: A \rightarrow Z^+$ такая, что $f(a_j^i) = \sum_{r=1}^j w(a_r^i)$.

Вопрос. Существует ли такое подмножество $A' \in A$, содержащее не более одного элемента из каждого A_i , что $\sum_{a \in A'} f(a) = B$?

Для решения этой задачи будет использован приближенный *FFP*-алгоритм, описанный в следующем разделе.

Рассмотрим теперь задачу о наборе веса внутренними стопками. Критерий оптимизации для этой задачи не может заключаться только в минимизации числа переукладываний, так как новое размещение снятых пачек может оказаться очень дорогим.

Определение 3. Положим стоимость отгрузки верхней стопки равной 0. Определим стоимость отгрузки внутренней стопки как суммарную стоимость

всех новых размещений, выполненных во время ее отгрузки, подсчитанную согласно (1).

Таким образом, критерий оптимизации отгрузки веса, набранного внутренними стопками, заключается в минимизации суммарной стоимости отгрузки всех стопок, вошедших в решение. Для решения этой задачи воспользуемся следующим алгоритмом.

Шаг 1. Сортируем стопки в порядке возрастания числа переключиваний, которые необходимо осуществить в процессе отгрузки. В случае совпадения числа переключиваний стопки сортируются в порядке убывания веса.

Шаг 2. Набираем заданный вес верхними элементами внутренних стопок с помощью *FFP*-алгоритма.

Шаг 3. Формируем план отгрузки минимальной стоимости. Для этого воспользуемся следующим "жадным" алгоритмом. Вычисляем стоимости отгрузки всех стопок. Отгружаем стопку минимальной стоимости. Так как состояние склада изменилось, выполняем пересчет стоимостей стопок и т. д. до полной отгрузки веса.

Сделаем замечание о новом размещении пачек, снятых при отгрузке внутренней стопки. Каждая переключиваемая пачка размещается на складе оптимальным образом с помощью эвристического алгоритма размещения [4], минимизирующего целевую функцию стоимости склада.

FFP-алгоритм набора веса

Определение 4. Назовем алгоритм набора веса, состоящий из процедур *TopSet*, *DealRound* и *CorrectWeight*, *FFP*-алгоритмом ("first full pile" — первая полная стопка).

Определение 5. Назовем максимальное число пачек, удаляемое из стопки процедурой *CorrectWeight*, глубиной корректировки веса.

Основная процедура набора веса TopSet

Шаг 1. Сортируем массив стопок по убыванию веса стопки. $i:=0$.

Шаг 2. $i:=i+1$. Обнуляем текущий набранный вес. Помечаем все стопки как допустимые, все пачки как неиспользованные.

Шаг 3. Добавляем к текущему решению i -ю стопку. Если вес стопки не превышает $TotW + DW$, то стопка добавляется к решению целиком, иначе частично. Помечаем i -ю стопку как недопустимую; пачки, вошедшие в решение, — как использованные.

Шаг 4. Добавляем к решению только полные стопки. Для этого перебираем допустимые стопки в порядке убывания веса и стопки, подходящие по весу, добавляем к решению. Помечаем стопку и пачки стопки аналогично шагу 3. Если вес набран с точностью до DW , то выход. Иначе сравниваем текущее решение с оптимальным. Если текущий

вес отклоняется от заданного меньше оптимального, то переписываем оптимальное решение.

Шаг 5. Добираем вес отдельными пачками. Перебираем допустимые стопки в порядке убывания веса, внутри стопки перебираем пачки сверху вниз. Если пачка подходит по весу, то добавляем ее к текущему решению, помечаем как использованную и проверяем решение на оптимальность аналогично шагу 4. Иначе (пачка не подходит по весу) переход на следующую стопку. Если все стопки уже просмотрены, то переход на шаг 6.

Шаг 6. Вызов процедуры корректировки веса *CorrectWeight*. Если после корректировки веса заданный вес еще не набран и $i < p$ (число стопок), то переход на шаг 2. Если $i = p$, то вызов процедуры кругового набора веса *DealRound*. Выход.

Процедура корректировки веса CorrectWeight глубины k

Шаг 1. Перебираем массив стопок по убыванию веса стопки и находим номер i_0 последней стопки, в которой есть использованные пачки. $i:=0$. $kk:=0$.

Шаг 2. Увеличиваем глубину корректировки веса $kk:=kk+1$. Если $kk < k$, то переход на шаг 3. Иначе выход.

Шаг 3. Фиксируем стопку, из которой будут удаляться пачки. $i:=i+1$. Если $i \leq i_0$, то переход на шаг 4, иначе переход на шаг 2.

Шаг 4. Проверяем, есть ли в i -й стопке k использованных пачек. Если таких пачек нет, то переход на шаг 3. Иначе переход на шаг 5.

Шаг 5. Делаем рабочую копию 1 текущего решения. Все дальнейшие действия проводятся с рабочей копией 1.

Шаг 6. Удаляем из i -й стопки k использованных нижних пачек.

Шаг 7. Будем добирать вес пачками из стопок, начиная с j -й. $j:=0$.

Шаг 8. $j:=j+1$. Если $j > i_0$, то переход на шаг 3. Иначе переход на шаг 9.

Шаг 9. Если $j = i$, то переход на шаг 8. Иначе переход на шаг 10.

Шаг 10. Делаем рабочую копию 2 текущего решения. Все дальнейшие действия проводятся с рабочей копией 2.

Шаг 11. Перебираем стопки от j до i_0 . В каждой стопке перебираем пачки от первой неиспользованной до нижней пачки стопки. Если пачка подходит по весу, то добавляем ее к текущему решению, помечаем как использованную и проверяем решение на оптимальность. Иначе переход на следующую стопку. Если все стопки уже просмотрены, то переход на шаг 8.

Процедура DealRound кругового набора веса

Шаг 1. Сортируем массив стопок по возрастанию веса стопки.

Шаг 2. Обнуляем текущий набранный вес. Помечаем все стопки и пачки как допустимые. STOP:= false.

Шаг 3. Если NOT(STOP), то переход на шаг 4. Иначе выход.

Шаг 4. STOP:= true. $i := 0$.

Шаг 5. $i := i + 1$.

Шаг 6. Если $i \leq p$, то переход на шаг 7. Иначе переход на шаг 3.

Шаг 7. Если в i -й стопке есть неиспользованная пачка, то переход на шаг 8. Иначе переход на шаг 5.

Шаг 8. Если первая неиспользованная пачка подходит по весу, то добавляем ее к текущему решению, помечаем как использованную, STOP:= false и проверка решения на оптимальность. Переход на шаг 5.

Вычислительная сложность FFP-алгоритма

Пусть N — суммарное число пачек заданного типоразмера, p — число стопок. Поскольку глубина корректировки веса ограничена сверху максимальным числом пачек в штабеле, вычислительная сложность равна $O(p^2N)$. В случае, если каждая стопка содержит ровно одну пачку, получаем $O(N^3)$.

Оценки погрешности FFP-алгоритма

Ограничимся рассмотрением только тех индивидуальных подзадач (задач I) задачи распознавания "Набор заданного веса", в которых существует точный набор заданного веса, то есть величина $OPT(I)$ равна заданному весу B . Будем называть решением полученный набор заданного веса, а величиной решения — суммарный вес входящих в него элементов. Обозначим $FFP(I)^-$ и $FFP(I)^+$ величины приближенных решений с недостатком и избытком соответственно, а $FFP(I)$ — величину приближенного решения, наименее отклоняющуюся от заданного веса.

Определение 6. Назовем величину $\delta^- = OPT(I) - FFP(I)^-$ недостатком веса, а величину $\delta^+ = FFP(I)^+ - OPT(I)$ — избытком веса.

Определение 7. Назовем величину $\delta = |OPT(I) - FFP(I)|$ абсолютным отклонением FFP-алгоритма от точного решения.

Теорема 1. Для всех индивидуальных задач I о наборе веса имеют место неравенства $OPT(I) - [MaxW/2] \leq FFP(I) \leq OPT(I) + [MaxW/2]$, где $MaxW$ — вес самого тяжелого элемента. Для любой глубины корректировки веса существует бесконечное число индивидуальных задач I , для которого $OPT(I)$ сколь угодно велико и $FFP(I) = OPT(I) \pm [MaxW/2]$.

Доказательство. Пусть точное решение задачи I существует, и FFP-алгоритм его не находит. Пусть на каком-то шаге сформировано максимальное приближенное решение величиной $FFP(I)^-$ с недостатком веса δ^- . Максимальность решения заклю-

чается в том, что при добавлении к нему любого нового элемента набираем избыточный вес. При добавлении к этому решению элемента $z > \delta^-$ получаем приближенное решение величиной $FFP(I)^+$ с избытком веса δ^+ . Заметим, что если $z < \delta^-$, то решение с недостатком не максимально; если $z = \delta^-$, то FFP-алгоритм находит точное решение. Получаем систему уравнений

$$\delta^- = OPT(I) - FFP(I)^-; \delta^+ = FFP(I)^+ - OPT(I);$$

$$FFP(I)^+ = FFP(I)^- + z.$$

Так как FFP-алгоритм из всех текущих решений выбирает решение с минимальным отклонением, то $\delta = \min\{\delta^-, \delta^+\}$. Следовательно, δ достигает максимального значения при $\delta^- = \delta^+$. Отсюда $z = 2\delta$ и $\delta = [z/2] \leq [MaxW/2]$, где $MaxW$ — вес самого тяжелого элемента.

Покажем, что отклонение величины $[MaxW/2]$ достигается для любого числа стопок p и любой глубины корректировки веса k . В левой части табл. 2 приведена бесконечная серия I , где $MaxW \times k$ — стопка из k пачек веса $MaxW$, жирной линией обведены элементы, составляющие точное решение; в правой части табл. 2 приведена I для $p = 3, k = 1, MaxW = 12$. Для общего случая $OPT(I) = MaxW + p(k + 3)MaxW; \delta = MaxW/2$, для частного $OPT(I) = 108, \delta = 6$. ■

Теперь покажем, что для бесконечного числа I нет прямой зависимости между отклонением и диапазоном, в котором находятся веса элементов, и есть прямая зависимость между глубиной корректировки веса k и отклонением δ .

Теорема 2. Для $p = 3$ существует бесконечное число I с весами элементов в диапазоне $[MaxW - 1, MaxW]$, для которых $OPT(I)$ сколь угодно велико, и отклонение $\delta = MaxW/2 - k$, где $k = 0... MaxW/2$.

Доказательство. Рассмотрим серию I из p стопок (табл. 3).

Пусть $\delta = MaxW/2; FFP(I)^- = (px - 1)MaxW; FFP(I)^+ = pxMaxW$; сумма элементов одного столбца равна $FFP(I)^-$. Подберем значения x и p . $xMaxW + MaxW(MaxW - 1) = (px - 1)MaxW$;

Таблица 2

Вариант решения задачи набора заданного веса

MaxW	MaxW	...	MaxW	12	12	12
MaxW/2	MaxW	...	MaxW	6	12	12
MaxW×k	MaxW×k	...	MaxW×k	12	12	12
	MaxW	...	MaxW		12	12
	MaxW×(p-2)(k+3)	...	MaxW×(p-2)(k+3)		12×4	12×4
	MaxW/2	...	MaxW/2		6	6

Таблица 3

Глубина корректировки веса

Max W × x	Max W × x	Max W × x
(Max W - 1) × Max W/2	(Max W - 1) × Max W/2	(Max W - 1) × Max W/2
(Max W - 1) × Max W/2	(Max W - 1) × Max W/2	(Max W - 1) × Max W/2

$x(p - 1) = \text{Max } W$. Так как глубина корректировки веса $k \leq \text{Max } W/2$, то $x \geq \text{Max } W/2$. Отсюда $x = \text{Max } W/2$; $p = 3$.

Пусть на каком-то шаге решение $FFP(I)^-$ состоит из одного столбца. Удалим из него корректировкой веса k нижних элементов веса $\text{Max } W - 1$ и затем добавим k верхних элементов веса $\text{Max } W$ из другого столбца. Отклонение δ уменьшается на k . ■

Результаты вычислительного эксперимента

Для идентификации алгоритма была рассмотрена работа программы на опытных данных по отгрузке пачек листов со склада готовой продукции листопрокатного цеха № 4 ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" в январе 2007 г. Для отгрузки был выбран типоразмер, имеющий длину 6000 мм, ширину 1500 мм, толщину 10 мм, марку стали 09Г2С и ГОСТ 19281—89. Этот выбор был обусловлен большим весом пачек — от 7450 до 8200 кг. Допустимое отклонение от заданного веса было установлено равным 2000 кг при существующей норме 5000 кг, глубина корректировки веса $k = 2$. Из всех исходных данных был выбран набор, на котором алгоритм давал наибольшие отклонения. Затем с по-

Таблица 4

Результат работы алгоритма набора веса

Первый набор данных			Второй набор данных		
Общий тоннаж	Приближенный + точный	Приближенный	Общий тоннаж	Приближенный + точный	Приближенный
620000	619794	619794	620000	619794	619794
62000	63666*	63666	620000	617313*	617027
62000	63290*	63290	62000	63232*	63518
62000	63666*	63888	62000	30700*	30700
62000	64088*	64088	62000	0	0
62000	64240*	64124			
62000	64376*	64376			
62000	64535*	64429			
62000	63800*	63800			
62000	65216*	65216			
62000	63232*	63232			
62000	63232*	63232			
62000	7904*	7904			
62000	0	0			

мощью точного алгоритма был проведен анализ причины этих отклонений. Программа запускалась дважды: с использованием только приближенного алгоритма и с использованием приближенного и точного алгоритмов для $p \leq 4$. И точный, и приближенный алгоритмы прерывали перебор вариантов, как только генерировалось решение с отклонением ≤ 2000 . Результаты приведены в табл. 4 для двух наборов исходных данных (числа стопок и веса пачек), звездочкой (*) отмечены результаты, полученные точным алгоритмом.

Анализ результатов показал, что в случае $p > 4$ FFP-алгоритм всегда находил решение с отклонением не более 2000, что объясняется большим числом вариантов набора веса. В случае $p \leq 4$ отклонение превышало 2000 только в случае, если набора веса с такой точностью не существовало. Кроме того, FFP-алгоритм генерировал решения с полными стопками, а точный алгоритм находил произвольный набор веса, поэтому освобождение рабочего пространства склада при работе FFP-алгоритма происходило быстрее.

Выводы

- Всей эвристической информации из предметной области задачи придан единообразный числовой вид. Гибкая система настроек позволяет настраивать алгоритм под реальные данные и оперативно менять критерии оптимизации.
- Отказ от жестких ограничений позволяет генерировать приемлемые решения с небольшим числом нарушений.
- Генерация решения происходит быстро, что позволяет осуществлять оперативное управление складом и уменьшить время простоя вагонов.
- Заданный вес набирается с высокой степенью точности, минимальным числом переключений и максимальным освобождением рабочего пространства склада.

Список литературы

1. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982.
2. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. М.: Радио и связь, 1985.
3. Девятов Д. Х., Калигаев А. Н., Каплан Д. С., Тутарова В. Д., Файнштейн С. И. Эвристическая модель оперативного планирования размещения и отгрузки готовой продукции на складах металлургических предприятий // Матер. XV Всеросс. сем. по нейроинформатике, ее приложениям и анализу данных. Красноярск, 2007. С. 46—48.
4. Каплан Д. С., Девятов Д. Х., Файнштейн С. И., Тутарова В. Д., Калигаев А. Н. Эвристический полиномиальный алгоритм оперативного планирования размещения готовой продукции на складах металлургических предприятий // Автоматизация и современные технологии. В печати.
5. Каплан Д. С., Девятов Д. Х., Белявский А. Б., Файнштейн С. И., Торчинский В. Е. Алгоритм оперативного планирования погрузки металла в печи листопрокатного стана // Сталь. 2007. № 2. С. 130—133.

УДК 004.415.2

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, проф.,

В. А. Бобков, д-р техн. наук, проф.,

Д. А. Юхимец, канд. техн. наук,

С. В. Мельман, Ю. С. Борисов,

Институт автоматки и процессов управления
ДВО РАН, г. Владивосток

Особенности виртуального моделирования движений подводного аппарата с учетом воздействий со стороны окружающей вязкой среды*

Предложен новый подход к учету распределенных характеристик внешней среды при моделировании пространственных движений произвольных АПА, а также удобный способ автоматизированного заполнения поля подводных течений. Кроме того, предложена структура данных, позволяющая строить модели АПА с произвольным набором оборудования, а также представлен удобный редактор, обеспечивающий быстрое задание нужной конфигурации АПА требуемого типа.

Введение. С учетом развития средств вычислительной техники предварительные эксперименты по исследованию созданных систем управления сложными динамическими объектами целесообразно проводить в виде математического моделирования. Это позволяет значительно сократить сроки проектирования и затраты на начальной стадии разработки дорогостоящих объектов, к которым относятся, в частности, и автономные подводные аппараты (АПА).

В настоящее время уже создан ряд сред для моделирования движения АПА (SubSim [1], Marine System Simulator [2] и др.), однако они имеют ряд существенных недостатков, осложняющих их эффективное использование. В частности, характеристики подводных течений (величина и направление) в указанных средах задаются с помощью специальных генераторов. Эти генераторы представляют собой специальные программные модули (подпрограммы), которые формируют нужные параметры течений с помощью некоторых аналитических выражений. Однако указанные выражения могут определить требуемые характеристики течений только в некоторых простейших случаях. Если же не-

*Работа поддержана РФФИ (грант № 05-07-90027).

обходимо задать карту течений некоторого района, полученную экспериментально, то использование аналитического подхода весьма затруднительно, так как в данном случае потребуется формировать и хранить большое число не только сложных математических выражений, но и логических условий. Другой недостаток известных сред моделирования заключается в том, что они или позволяют моделировать движения АПА с уже заданным набором и расположением оборудования (двигателей, сонаров, видеокамер и т. д.), или требуют осуществления сложного и длительного редактирования файлов, в которых хранится описание АПА. В последнем случае пользователь должен детально знать особенности представления данных в применяемой среде моделирования и каждый раз вручную настраивать систему под новую модель АПА. В результате возникает задача устранения указанных недостатков путем разработки специальных вычислительных блоков и модернизации используемой программной среды.

Указанную задачу в данной работе предлагается решить с использованием среды "МИКРОБ" (Моделирующий Исследовательский Комплекс для подводных РОБотов), которая является специализированной средой визуального моделирования пространственных движений АПА различного назначения [3]. Эта среда имеет удобный пользовательский интерфейс, гибкую архитектуру, позволяющую расширять ее без изменения ранее написанных модулей, удобную систему представления результатов и высокую точность моделирования.

1. Постановка задачи

В данной работе ставятся и решаются задача разработки удобного способа автоматизированного учета и задания характеристик произвольных подводных течений при моделировании пространственных движений АПА различного типа, а также задача разработки эффективного редактора для быстрого и компактного описания конфигурации любого АПА с произвольным набором бортового оборудования без ручного редактирования соответствующих файлов среды. Поставленные задачи будут решаться путем интегрирования дополнительных вычислительных модулей, выполняющих соответствующие функции, в уже существующую структуру ранее созданного программного комплекса. При этом в процессе задания соответствующих характеристик и создания новых моделей АПА пользователь не

должен обладать знаниями о внутренней структуре представления данных в среде моделирования.

2. Построение модуля расчета воздействий на АПА со стороны подводных течений

Основной характеристикой окружающей среды, не зависящей от параметров АПА и существенно влияющей на динамику его движения, является подводное течение. В данном разделе будет решаться задача учета характеристик этих течений при моделировании пространственного движения АПА. Эта задача разбивается на две основные подзадачи. Первая связана с обеспечением удобного задания карты течений на всем пространстве движения АПА. Вторая подзадача состоит в быстром пересчете характеристик течения в текущей точке пространства во внешние воздействия на АПА и в использовании этих характеристик в модели, описывающей динамику движения АПА.

Характеристики течений при моделировании движения АПА можно задать двумя способами. Первый способ позволяет задать эти характеристики в виде некоторых аналитических функций времени или координат. Данный способ позволяет достаточно просто рассчитать величины указанных течений, но в общем случае связан с большими сложностями получения искомым аналитических выражений, когда приходится использовать данные о течениях, полученные экспериментально. Поэтому для описания характеристик течения в трехмерном пространстве предлагается использовать векторные поля данных, которые для каждой произвольной точки пространства позволяют задать вектор характеристик течения. Использование этих полей облегчает задачу моделирования течений на основе экспериментальных данных, но в то же время приводит к необходимости использования гораздо большего объема памяти и более сложных вычислительных процедур. Однако указанный недостаток не является существенным с учетом объема памяти современных ЭВМ.

Распространенной формой задания векторных полей являются регулярные решетки данных. Для создания этих решеток весь объем моделируемого пространства разбивается на элементарные объемы, которые называются вокселями [4] (рис. 1). Каждый воксел имеет длину, высоту, глубину и положение в пространстве, при этом для каждой вершины вокселя (узла решетки данных) задается свое значение векторного поля. В случае описания подводных течений с помощью решеток данных каждой вершине вокселя будет соответствовать вектор $v_c^i (v_{cx}, v_{cy}, v_{cz})$, где i — номер вершины вокселя, описывающего величину и направление течения в абсолютной системе координат.

Линейные размеры вокселя задаются пользователем и зависят от точности представления данных,

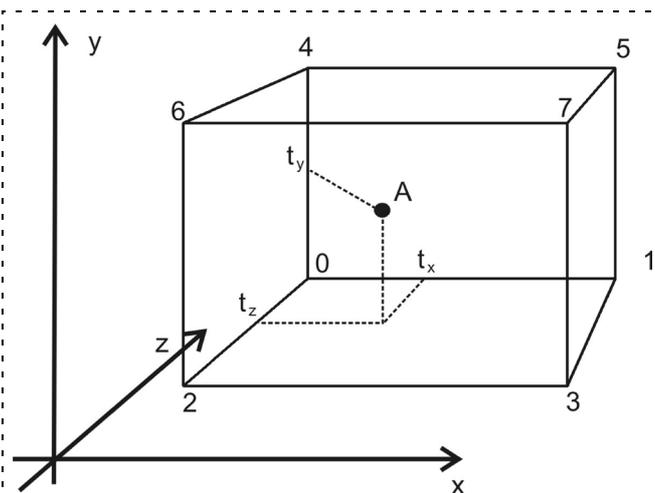


Рис. 1. Описание вокселя и положения АПА

а также от имеющегося объема памяти ЭВМ. Объем памяти (в байтах), необходимый для хранения векторного поля, описывающего течение в пространстве с линейными размерами W_x, W_y, W_z , равен

$$N = ((W_x/v_x)(W_y/v_y)(W_z/v_z) + 3) \cdot 12N_f, \quad (1)$$

где v_x, v_y, v_z — линейные размеры вокселя; N_f — число байтов, необходимых для представления значения отдельной составляющей вектора скорости течения. В случае, когда характеристики течения по направлению, совпадающему с какой-то координатной осью, меняются слабо, размер отдельного вокселя вдоль этого направления можно увеличить, что согласно выражению (1) приводит к уменьшению объема требуемой памяти без снижения точности представления данных.

Значения пространственной решетки данных можно задать двумя способами. Первый заключается в прямом задании с использованием либо экспериментальных данных, либо данных, которые были рассчитаны с помощью специализированных приложений (Excel, Matlab, Maple и т. д.).

Второй способ заключается в автоматическом генерировании значений данных решетки по нескольким базовым значениям, введенным пользователем. Для этой цели был разработан специальный инструмент, с помощью которого пользователь вручную задает размеры вокселей, а в горизонтальных слоях получившейся решетки — данные для некоторого числа произвольных узлов. После задания во всех горизонтальных слоях базовых данных происходит автоматический расчет данных для остальных узлов решетки. При этом в простейшем случае используется алгоритм линейной интерполяции данных, аналогичный алгоритму закрашивания Гуро, который применяется отдельно для каждой составляющей векторов скорости течения. Так как генерация данных для узлов решетки вы-

полняется только один раз перед началом моделирования, то для большей точности представления данных при необходимости возможно использование более сложных алгоритмов интерполяции.

Для большей наглядности процедуры задания данных в программе предусмотрена визуализация результирующего векторного поля данных. При этом каждая составляющая вектора скорости течения показывается своим цветом. Интенсивность цвета определяется значением этой составляющей (нулевая интенсивность — при минимальном значении, максимальная интенсивность — при максимальном значении этой составляющей). Результат визуализации по одной составляющей поля данных с семью базовыми точками показан на рис. 2.

Так как в процессе моделирования движения АПА его координаты в общем случае не совпадают с координатами вершин вокселей, то при моделировании необходимо непрерывно рассчитывать текущее значение вектора скорости течения по значениям этих векторов, хранящихся в ближайших узлах решетки данных (т. е. в вершинах вокселя, внутри которого находится АПА). Для этой цели используется алгоритм трилинейной интерполяции:

$$\begin{aligned}
 t_x &= (x - x_v^0)/v_x; \quad t_y = (y - y_v^0)/v_y; \quad t_z = (z - z_v^0)/v_z, \\
 v_{ci}^{0,4} &= (v_{ci}^4 - v_{ci}^0)t_z + v_{ci}^0; \quad v_{ci}^{1,5} = (v_{ci}^5 - v_{ci}^1)t_z + v_{ci}^1; \\
 v_{ci}^{2,6} &= (v_{ci}^6 - v_{ci}^2)t_z + v_{ci}^2; \quad v_{ci}^{3,7} = (v_{ci}^7 - v_{ci}^3)t_z + v_{ci}^3; \\
 v_{ci}^{0,4,3,7} &= (v_{ci}^{3,7} - v_{ci}^{0,4})t_y + v_{ci}^{0,4}; \\
 v_{ci}^{1,5,2,6} &= (v_{ci}^{2,6} - v_{ci}^{1,5})t_y + v_{ci}^{1,5}; \\
 v_{ci}^a &= (v_{ci}^{1,5,2,6} - v_{ci}^{0,4,3,7})t_x + v_{ci}^{0,4,3,7},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где t_x, t_y, t_z — нормированные относительно размеров вокселя значения координат АПА; x_v^0, y_v^0, z_v^0 — координаты нулевой вершины вокселя в абсолютной системе координат; x, y, z — координаты АПА в абсолютной системе координат; $v_{ci}^{a,b}$ — промежуточные переменные; v_{ci}^j — значение i -й компоненты вектора скорости течения в j -й вершине вокселя; v_{ci}^a — i -я компонента вектора скорости течения в точке расположения АПА.

Для восстановления вектора скорости течения $v_c^a (v_{cx}^a, v_{cy}^a, v_{cz}^a)$ в точке расположения АПА с помощью выражений (2) необходимо рассчитать все три компоненты этого вектора. После определения этого вектора необходимо учесть его влияние на динамику движения АПА. Особенность учета воздействия подводных течений на движение АПА заключается в том, что направление и величина те-

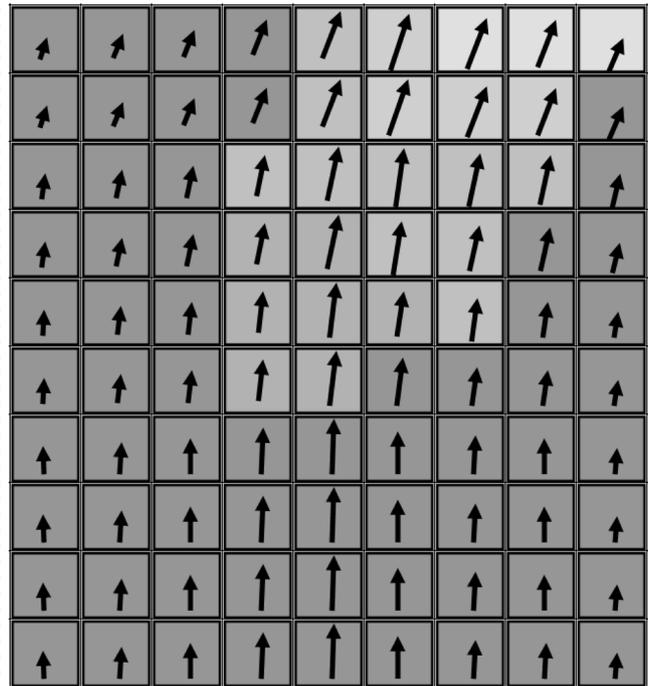


Рис. 2. Пример автоматизированного задания поля подводных течений

чения заданы относительно абсолютной системы координат, в то время как динамика АПА описывается относительно связанной системы координат. Согласно методике, описанной в работах [5, 6], течение при моделировании движения АПА можно учесть с помощью выражений

$$v_r = v - v_c, \quad v_c = J(\theta, \varphi, \psi)v_c^a,$$

где $v_r \in R^3$ — вектор линейных скоростей движения АПА относительно окружающей среды в связанной системе координат (он используется для расчета гидродинамических и кориолисовых сил в модели динамики АПА); $v \in R^3$ — вектор линейных скоростей движения АПА в связанной системе координат; $v_c \in R^3$ — вектор скорости течения, заданный в связанной системе координат; $v_c^a \in R^6$ — вектор скорости течений, заданный в абсолютной системе координат; $J(\theta, \varphi, \psi) \in R^{6 \times 6}$ — матрица перехода от абсолютной к связанной системе координат; θ, φ, ψ — углы крена, курса и дифферента соответственно;

$$J(\theta, \varphi, \psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\varphi & \sin\psi\cos\varphi & -\sin\varphi \\ -\sin\psi\cos\theta + \cos\psi\sin\varphi\sin\theta & \cos\psi\cos\theta + \sin\psi\sin\varphi\sin\theta & \sin\theta\cos\varphi \\ \sin\psi\sin\theta + \cos\psi\sin\varphi\cos\theta & -\cos\psi\sin\theta + \sin\psi\sin\varphi\cos\theta & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix}.$$

Схема взаимодействия модулей среды моделирования при расчете вектора скорости подводного течения показана на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что в процессе вычисления участвуют три модуля: моделирующий, который на каждом шаге моделирования формирует информацию о текущем положении и ориентации АПА; база данных, которая хранит информацию о векторном поле, векторе положения и ориентации АПА, а также рассчитанном векторе скорости течения; модуль расчета вектора скорости течения, который рассчитывает его по данным, поступающим из базы данных.

Предложенная схема (рис. 3) имеет два основных преимущества. Первое заключается в том, что на моделирующий модуль не накладывается дополнительная нагрузка по обработке больших объемов данных, описывающих векторное поле, и по вычислению вектора скорости течения. Второе преимущество состоит в возможности асинхронной работы указанных модулей и использовании механизма распределенных вычислений. Иными словами, при необходимости вычисление вектора скорости подводного течения можно перенести на другую ЭВМ, работающую независимо от ЭВМ, на которой происходит моделирование.

Результаты моделирования движения АПА с учетом и без учета течения показаны на рис. 4 (см. вторую сторону обложки). Из этого рисунка видно, что наличие течений существенно влияет на траекторию движения аппарата, поэтому их учет является обязательным при разработке систем управления АПА.

Следует отметить, что в данной работе подробно рассмотрен только учет подводных течений при моделировании пространственного движения АПА. Однако с помощью предложенного подхода можно учитывать и другие распределенные характеристики внешней среды: скорость распространения звука, магнитные поля, температуру и т. д. При этом задание этих характеристик можно осуществлять с помощью разработанного редактора для задания характеристик подводных течений, а их учет в процессе моделирования не будет требовать введения изменений в структуре модулей программы.

Таким образом, предложенный подход дает пользователю простой способ задания и учета подводных течений без вывода громоздких аналитических выражений.

3. Формирование редактора структуры подводных аппаратов

Для того чтобы среда моделирования была универсальной, пользователь сам должен иметь возможность назначать (выбирать) основные характеристики исследуемого АПА. К ним относятся динамические параметры корпуса АПА (его масса, гидродинамические характеристики, матрица присоединенных масс и присоединенных моментов инерции, метацентрическая высота и др.), характеристики его движительного комплекса (число движителей, их расположение и ориентация, динамические свойства движителей и др.), состав и параметры бортового оборудования (видеокамеры, сонары, магнитометры и т. д.). Основная сложность реализации указанной возможности состоит в разработке такого описания АПА, при котором можно было бы вводить и учитывать произвольное число и любые виды оборудования и при этом однотипно использовать получившееся описание в процессе моделирования, не изменяя разработанные ранее модули.

Для удобного задания вида и свойств конкретного АПА был разработан специальный редактор "КАППА" (Конструктор Автономного Подводного аппарата), отвечающий следующим требованиям:

- должен иметь возможность создания АПА с произвольным набором бортового оборудования (двигатели, видеокамеры, сенсоры, магнитометры и т. д.);
- должен иметь возможность задания произвольного числа параметров для каждого компонента;
- все компоненты, используемые для создания модели АПА, должны описываться универсальной структурой, позволяющей добавлять новые компоненты без какой-либо модернизации уже существующего комплекса;

- интерфейс редактора должен быть простым, чтобы позволить пользователю без специальных навыков создать АПА заданного типа и конфигурации.

В редакторе "КАППА" аппарат описывается иерархической структурой типа "дерево", которая показана на рис. 5. Основными частями этой структуры являются узлы, описывающие конкретные свойства модели или конкретное устройство, входящее в состав АПА. В структуре описания АПА используется два вида узлов: корневой и некорневой. Корневой узел (на рис. 5 он

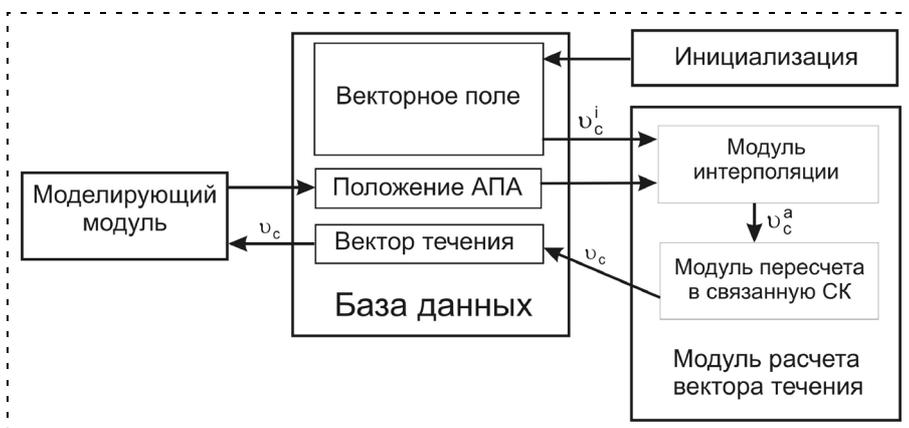


Рис. 3. Схема взаимодействия модулей программы при вычислении элементов вектора подводного течения

обозначен "_root") может быть единственным. Он содержит параметры модели динамики аппарата (массу, гидродинамические и гидростатические характеристики, моменты инерции и т. д.), которые являются общими для любого типа АПА. В этом же узле дается ссылка на файл с графической полигональной моделью в одном из стандартных форматов (3DS, DirectX Model).

Помимо корневого узла, содержащего общие параметры модели, пользователь может задать произвольное число дополнительных узлов, которые будут описывать конкретные устройства, входящие в состав АПА (двигатели, сенсоры, видеокамеры, манипуляторы и т. д.). Каждый дополнительный узел содержит идентификатор (имя узла), указывающий на соответствующую запись в базе данных, в которой хранятся описания всех используемых устройств. При необходимости параметры конкретного устройства, хранящиеся в узле, можно легко изменить. Кроме того, в узлах хранятся данные о расположении и ориентации конкретного устройства на модели АПА, а также его графическая модель. Такой подход позволяет без затруднений расширять базу данных доступных устройств без изменения разработанной ранее структуры описания всего АПА.

Для того чтобы существовала возможность описывать АПА с произвольным набором бортового оборудования, описывающая его структура данных должна строиться по иерархическому принципу. Согласно этому принципу все узлы сгруппированы по уровням иерархии, а между узлами, имеющими разный уровень иерархии, установлены связи типа "родитель"—"потомок" (рис. 5). Самый высокий уровень иерархии имеет корневой узел, так как он содержит данные о базовых параметрах любого АПА. Корневой узел является "родительским" для узлов первого уровня, описывающих оборудование, установленное на АПА. При этом "родительский" узел хранит ссылки на все свои узлы—"потомки". Каждый некорневой узел первого уровня может быть "родительским" для нескольких узлов второго уровня и т. д. Создание такой иерархической структуры происходит автоматически, она необходима в случае, когда используемое оборудование может состоять из нескольких независимых частей (например, для подводного манипулятора). Когда пользователь создает новый узел, он указывает "родительский" для него узел, а ссылка на узел—"потомок" добавляется в описание "родительского" узла автоматически. Внешний вид интерфейса редакто-

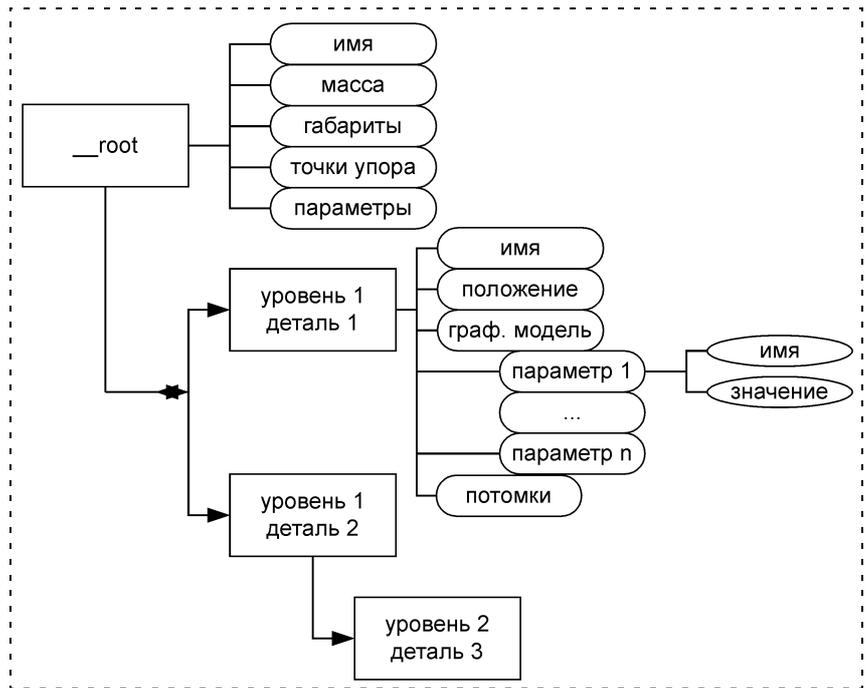


Рис. 5. Структура данных, описывающая АПА

ра АПА показан на рис. 6 (см. вторую сторону обложки).

Так как в процессе задания параметров АПА пользователь имеет возможность конструирования аппарата с произвольным набором оборудования, то возникает необходимость преобразования выходных данных с этого оборудования к виду, позволяющему однотипно учитывать его в модели АПА независимо от числа используемых единиц оборудования и его расположения на корпусе (внутри корпуса) АПА.

Поскольку наибольшее влияние на динамику аппарата оказывает конфигурация его движительного комплекса, важно сформировать рациональное описание этого комплекса, имеющего в своем составе произвольное число движителей. При этом каждый движитель в модели АПА, используемой в среде моделирования, обладает следующим набором параметров: коэффициенты дифференциальных уравнений математической модели; координаты положения на корпусе АПА в связанной системе координат; угловая ориентация относительно горизонтальной и вертикальной плоскостей связанной системы координат. В процессе моделирования на основе используемой динамической модели движителя вычисляются упоры, создаваемые каждым движителем. В случае неподвижно закрепленного движителя точка приложения упора и его ориентация определяются соответствующими параметрами движителя, заданными пользователем. Для расчета силовых и моментных воздействий на АПА со стороны движительного комплекса вначале опре-

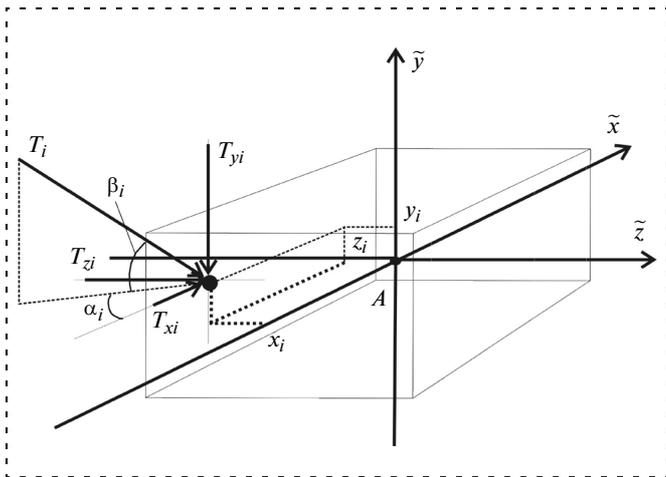


Рис. 7. Обобщенная схема установки движительного комплекса АПА

деляются проекции сил и моментов на оси связанной системы координат, создаваемых каждым движителем, а затем находятся равнодействующие сила и момент. Эти расчеты осуществляются с помощью схемы, показанной на рис. 7. На этой схеме движитель, создающий упор T_i , имеет координаты (x_i, y_i, z_i) в связанной системе координат и углы ориентации α_i и β_i , соответственно, в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Проекции T_{xi} , T_{yi} , T_{zi} упора T_i i -го движителя на оси связанной системы координат вычисляются по формулам

$$T_{xi} = T_i \cos \alpha_i \cos \beta_i; \quad T_{yi} = T_i \sin \beta_i; \quad T_{zi} = T_i \cos \beta_i \sin \alpha_i. \quad (3)$$

Моменты M_{xi} , M_{yi} , M_{zi} , создаваемые i -м движителем относительно осей связанной системы координат, вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} M_{xi} &= T_{yi} z_i + T_{zi} y_i; & M_{yi} &= T_{xi} z_i + T_{zi} x_i; \\ M_{zi} &= T_{xi} y_i + T_{yi} x_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Результирующая сила и момент, создаваемые всем движительным комплексом, с учетом выражений (3) и (4) определяются в виде

$$T_j = \sum_{i=1}^n T_{ji}, \quad M_j = \sum_{i=1}^n M_{ji},$$

где T_j — проекция на j -ю ось связанной системы координат результирующего упора, развиваемого всем движительным комплексом АПА; M_j — результирующий момент относительно j -й оси связанной системы координат, развиваемый движительным комплексом АПА; n — число движителей, входящих в движительный комплекс; $j = \overline{1, 3}$.

Для ускорения процесса формирования математических моделей АПА конфигурации самых распространенных (типовых) движительных комплексов внесены сразу в базу данных как одно устройст-

во. Но при этом у пользователя остается возможность изменять параметры этих типовых комплексов, а также создавать любую новую конфигурацию комплекса по своему усмотрению.

Таким образом, применяя разработанный редактор, без дополнительного редактирования конфигурационных файлов пользователь может создавать любую модель АПА, имеющую различные динамические свойства и характеристики, а также желаемый набор оборудования. При этом при использовании указанной модели в созданной среде моделирования не требуется никакого дополнительного редактирования ее описания.

Заключение. Предложены новый подход к учету распределенных характеристик внешней среды при моделировании пространственных движений произвольных АПА, а также удобный способ автоматизированного заполнения поля подводных течений. Разработана схема взаимодействия модулей среды моделирования, позволяющая использовать параллельные вычисления. Это значительно сокращает время моделирования. Сформирована структура данных, позволяющая строить модели АПА с произвольным набором оборудования. Создан удобный редактор, обеспечивающий быстрое задание нужной конфигурации АПА требуемого типа. Разработаны схема и алгоритм, позволяющие описать движительный комплекс АПА с произвольным числом, расположением и ориентацией движителей. В результате разработанный программный комплекс для моделирования любых пространственных движений произвольных АПА, благодаря точному описанию (заданию) подводных течений и силовых взаимодействий движущегося аппарата с окружающей его вязкой средой, позволил обеспечить высокую точность моделирования. В процессе моделирования можно исследовать любые системы и алгоритмы управления любыми АПА. Кроме того, следует отметить, что созданный программный комплекс модульного типа допускает расширение, а также его последующую доработку и совершенствование без дополнительной корректировки структуры и алгоритмов работы основных блоков.

Список литературы

1. <http://robotics.ee.uwa.edu.au/auv/subsim.html> (subSim)
2. <http://www.cesos.ntnu.no/mss> (Marine System Simulator)
3. Филаретов В. Ф., Бобков В. А., Юхимец Д. А., Мельман С. В., Борисов Ю. С. Программный комплекс для моделирования пространственного движения автономного подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2007. № 1. С. 8—13.
4. Kaufman A., D. Cohen, and R. Yagel. Volumetric Graphics // IEEE Computer. 1993. Vol. 26 (7). P. 51—64.
5. Fossen T. I. Guidance and Control of Ocean Vehicle / John Wiley&Sons, 1994. 480 p.
6. Antonelli G. Underwater Robots. Springer Verlag, 2006. 265 p.

УДК 629.58:681.5

А. В. Инзарцев, канд. техн. наук, **А. М. Павин**,
Институт проблем морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток

Управление автономным необитаемым подводным аппаратом при инспекции искусственных протяженных объектов

Рассматривается задача управления автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) при поиске и обследовании искусственных протяженных объектов с использованием данных от различных поисковых систем АНПА. Приводятся алгоритмы управления подводным аппаратом и интегральной обработки разнородной информации, позволяющие повысить вероятность обнаружения объекта и качество инспекционных работ. Обсуждаются результаты натурных испытаний АНПА.

Введение

Проведение инспекции искусственных протяженных объектов (ИПО), к которым можно отнести подводные кабельные линии, трубопроводы, траншеи, является перспективным направлением использования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Благодаря возможности длительного пребывания под водой, дальности действия, маневренности и относительно низкой стоимости работ применение АНПА оправдано для регулярной инспекции подводных коммуникаций. Набор сенсорных устройств поискового АНПА [1] позволяет обнаруживать объект инспекции и двигаться вдоль него на основе телевизионной [2], электромагнитной [3] и эхолокационной [4, 5] информации. Задача инспекции облегчается тем, что генеральное направление искомого объекта, как правило, известно.

Основная проблема во время автономной инспекции протяженного объекта заключается в необходимости управления подводным аппаратом на основе разнородной, неполной и/или противоречивой информации от указанных сенсорных устройств. Однако совместная обработка информации, учитывающая особенности работы каждой из подсистем, может существенно повысить вероятность обнаружения и качество отслеживания объекта. В статье рассматривается подход к формированию управления АНПА при отслеживании протяженного объекта. Предлагаемый алгоритм работы включает следующие шаги:

- сбор данных о наличии и расположении объекта инспекции от имеющихся на борту систем идентификации ИПО;

- интегральную обработку этих данных совместно с информацией от бортовой навигационной системы и построение на их основе общей картины местонахождения ИПО (модели окружающей среды);
- расчет целевого курса АНПА с использованием составленной модели и текущего положения аппарата.

Используемые системы АНПА, сбор и предварительная обработка данных

Для расчета интегральной оценки наличия и местоположения объекта инспекции информация от разных систем обнаружения ИПО должна быть приведена к единому формату. Предполагается, что каждая система n идентификации протяженного объекта ($n = 1...N$, N — число систем распознавания) периодически выдает данные, на основании которых могут быть вычислены следующие параметры ИПО (рис. 1):

- местоположение и направление искомого объекта в абсолютной системе координат (системе координат, связанной с земной поверхностью) $r_t^{(n)} = [X_t^{(n)}, Y_t^{(n)}, \Phi_t^{(n)}]^T$;
- оценка вероятности существования объекта с заданными координатами в текущий момент времени $p_t^{(n)}$.

Рассмотрим характеристики ряда систем АНПА, разработанных в Институте проблем морских технологий (ИПМТ ДВО РАН) и используемых во время инспекции искусственных подводных протяженных объектов.

Бортовая навигационная система

Совместная обработка данных от поисковых систем осуществляется с использованием текущих координат АНПА $r_t^{\text{АНПА}} = [X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}}, \Phi_t^{\text{АНПА}}]^T$, определяемых бортовой навигационной системой. Особенно важны точные измерения локальных перемещений аппарата за небольшой интервал времени (порядка десяти минут). Во время инспектирования протяженного объекта аппарат находится на небольшом отстоянии от дна (1,5...3 м), поэтому для счисления траектории АНПА могут быть использованы данные от доплеровского лага. При установке на АНПА разработанного в ИПМТ ДВО РАН доплеровского лага накапливающаяся с течением времени ошибка не превышает несколько десятков метров за час работы, что вполне допустимо для обеспечения надежного управления аппаратом при отслеживании объекта инспекции.

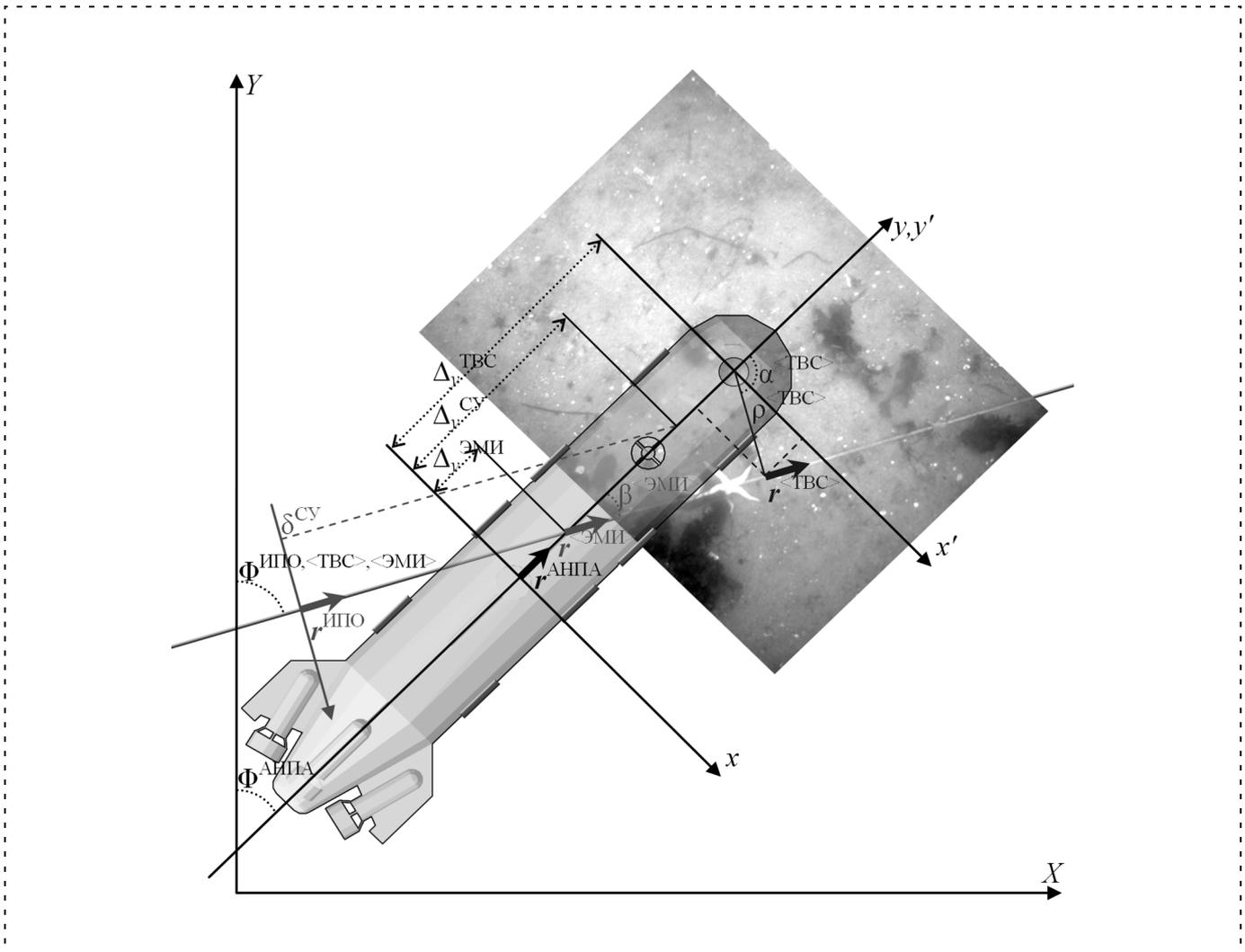


Рис. 1. Расположение устройств и систем координат АНПА

Телевизионная система

В число задач, решаемых телевизионной системой (ТВС), входит идентификация (обнаружение) инспектируемого объекта и сбор данных о его состоянии. При обнаружении ИПО система распознавания для каждого кадра съемки указывает следующий набор величин (рис. 1):

- направление распознанного протяженного объекта относительно продольной оси изображения $\alpha_t^{(ТВС)}$;
- расстояние от центра кадра до линейного объекта $\rho_t^{(ТВС)}$;
- длина видимой части объекта $l_t^{(ТВС)}$.

Детектирование ИПО [2] сводится к поиску наиболее длинного протяженного объекта, присутствующего на фотоизображении, и получению для него перечисленных характеристик. При этом возможны ложные обнаружения из-за наличия на морском дне объектов, обладающих прямолинейными участками (морские звезды, водоросли и т. д.). Вместе с тем, объект может быть просто не виден на фотоизображении (заилен, закрыт другими объектами) и в результате пропущен.

Направление и местоположение объекта (рис. 1) в абсолютной системе координат по данным телевизионной системы $r_t^{(ТВС)} = [X_t^{(ТВС)}, Y_t^{(ТВС)}, \Phi_t^{(ТВС)}]^T$ для фотокамеры, направленной вниз перпендикулярно корпусу аппарата, вычисляются следующим образом (пренебрегая креном и диффе-

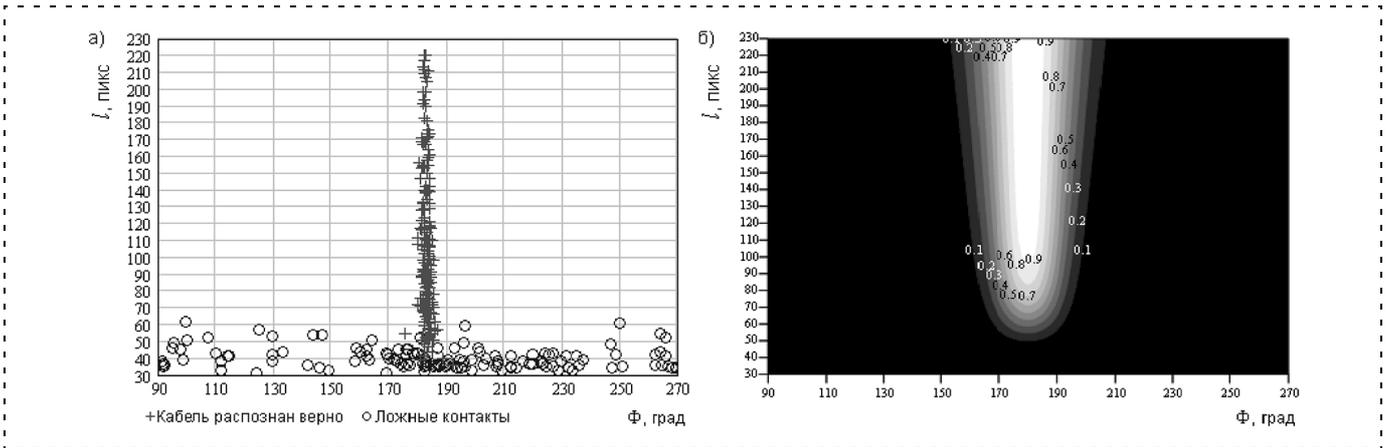


Рис. 2. Данные ТВС:
 а — контакты ТВС; б — функция наличия объекта $p^{<TBC>}$

рентом АНПА, которые во время движения вдоль ИПО не превышают нескольких градусов):

$$r_t^{<TBC>} = \begin{bmatrix} X_t^{АНПА} \\ Y_t^{АНПА} \end{bmatrix} + G(\Phi_t^{АНПА}) \left(\begin{bmatrix} \Delta_x^{TBC} \\ \Delta_y^{TBC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_t^{<TBC>} \\ y_t^{<TBC>} \end{bmatrix} \right);$$

$$\Phi_t^{АНПА} + \alpha_t^{<TBC>} - \text{sign}(\alpha_t^{<TBC>}) \cdot 90^\circ$$

$$x_t^{<TBC>} = \rho_t^{<TBC>} \sin \alpha_t^{<TBC>};$$

$$y_t^{<TBC>} = \rho_t^{<TBC>} \cos \alpha_t^{<TBC>};$$

$$G(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix},$$

где $x_t^{<TBC>}$, $y_t^{<TBC>}$ — координаты местоположения распознанного объекта на кадре телекамеры; Δ_x^{TBC} , Δ_y^{TBC} — местоположение телекамеры на борту АНПА; $G(\varphi)$ — матрица поворота системы координат на курсовой угол φ .

Вероятность $\rho_t^{<TBC>}$ верно принятого решения об обнаружении объекта инспекции в момент времени t можно оценить исходя из длины объекта на фотоизображении и его направления. При этом значение оценки растет с увеличением длины распознанного объекта $l_t^{<TBC>}$ и уменьшается с увеличением рассогласования между ожидаемым направлением ИПО в данном районе $\Phi_0(X_t^{АНПА}, Y_t^{АНПА})$ и распознанным $\Phi_t^{<TBC>}$. На форму конкретной зависимости влияют визуальные характеристики про-

тяженного объекта, грунта, видимость в районе инспекции и информация о расположении объекта. Контакты ТВС, полученные в результате инспекции участка кабеля с генеральным направлением около 180° , и пример функции $p^{<TBC>}(\Phi_t^{<TBC>}, l_t^{<TBC>})$ приведены на рис. 2.

Электромагнитный искатель

Электромагнитный искатель (ЭМИ) предназначен для обнаружения металлосодержащих объектов [3]. Он состоит из четырех пар электродов, образующих три пары излучающих и принимающих диполей (см. рис. 1). Излучающие диполи расположены под острым углом к продольной оси АНПА, а принимающие диполи перпендикулярны излучающим. С помощью излучающих диполей попеременно в протяженном объекте наводится электрический ток и измеряется значение потенциала на соответствующих приемных диполях. Сравнивая напряженности на разных диполях, можно рассчитать направление протяженного объекта относительно продольной оси корпуса АНПА $\beta_t^{<ЭМИ>}$. Положение объекта по данным ЭМИ определяется как местонахождение центра приемоизлучающей электродной системы в момент максимума потенциалов на приемных электродах. Таким образом, положение и направление ИПО в абсолютной системе координат $r_t^{<ЭМИ>} = [X_t^{<ЭМИ>}, Y_t^{<ЭМИ>}, \Phi_t^{<ЭМИ>}]^T$ можно вычислить следующим образом:

$$r_t^{<ЭМИ>} = \begin{bmatrix} X_t^{АНПА} \\ Y_t^{АНПА} \end{bmatrix} + G(\Phi_t^{АНПА}) \begin{bmatrix} \Delta_x^{ЭМИ} \\ \Delta_y^{ЭМИ} \end{bmatrix},$$

$$\Phi_t^{АНПА} + \beta_t^{<ЭМИ>}$$

где $\Delta_x^{\text{ЭМИ}}$, $\Delta_y^{\text{ЭМИ}}$ — местоположение центра приемно-излучающей электродной системы на борту АНПА.

ЭМИ надежно идентифицирует металлосодержащий протяженный объект и определяет угол пересечения при заходе на него под углами $30...60^\circ$ к продольной оси АНПА. Система работает неуверенно при движении подводного аппарата вдоль объекта (скорость изменения потенциала близка к нулю) и поперек (излучающими электродами наводится слишком малый потенциал). Оценку вероятности существования искомого объекта $p_t^{\text{ЭМИ}}$ можно определить исходя из значения потенциала на приемных электродах $v_t^{\text{ЭМИ}}$ (общая оценка потенциала по данным всех приемных диполей) и направления $\Phi_t^{\langle\text{ЭМИ}\rangle}$ обнаруженного объекта. Конкретная зависимость подбирается исходя из параметров устройства, скорости и высоты движения АНПА, характеристик грунта и свойств объекта инспекции (электромагнитных свойств, диаметра, толщины оболочки и др.). Эта зависимость выражает степень уверенности в существовании искомого объекта в данной точке. На рис. 3 (см. третью сторону обложки) изображены величины $p_t^{\text{ЭМИ}}$ и $v_t^{\text{ЭМИ}}$ при обследовании участка кабеля с генеральным направлением около 180° и используемая функция $p^{\langle\text{ЭМИ}\rangle}(\Phi_t^{\langle\text{ЭМИ}\rangle}, v_t^{\text{ЭМИ}})$.

Эхолокационные средства идентификации протяженного объекта

Для обнаружения выделяющихся на фоне грунта протяженных объектов с большой площадью поперечного сечения (таких как трубопроводы и траншеи) возможно применение эхолокационных средств [4], в частности, многолучевой эхолокационной системы [5].

Малогабаритная многолучевая эхолокационная система (ЭЛС) способна обеспечить веер из $100...200$ лучей в плоском секторе $60...90^\circ$. Веер лучей направляется вниз перпендикулярно продольной оси АНПА. Таким образом, во время движения система собирает данные об изменении высот рельефа под АНПА и имеет возможность распознать протяженный объект по его форме на фоне морского дна [5]. Результатом работы служит вектор координат ИПО в абсолютной системе координат $r_t^{\langle\text{ЭЛС}\rangle} = [X_t^{\langle\text{ЭЛС}\rangle}, Y_t^{\langle\text{ЭЛС}\rangle}, \Phi_t^{\langle\text{ЭЛС}\rangle}]^T$ и оценка наличия объекта в данной точке $p_t^{\langle\text{ЭЛС}\rangle}$, кото-

рые могут использоваться при совместной обработке информации для расчета комплексного местоположения протяженного объекта.

Совместная обработка информации и определение местоположения ИПО

Показателем наличия искомого объекта по данным n -й системы обнаружения в момент времени t является величина $p_t^{\langle n \rangle}$ (рис. 4, см. третью сторону обложки). Для учета контактов, предшествующих текущему моменту времени, проводится их накопление:

$$p_t^{\langle n \rangle \Sigma} = k^{\langle n \rangle} p_{t-1}^{\langle n \rangle \Sigma} + p_t^{\langle n \rangle},$$

где $p_t^{\langle n \rangle \Sigma}$ — суммарное значение контактов к моменту времени t для подсистемы n ; $k^{\langle n \rangle}$ — коэффициент затухания ("забывания" информации для подсистемы n).

Коэффициент $k^{\langle n \rangle}$ лежит в пределах $(0, 1)$ и подбирается с учетом характеристик распознающих подсистем. К примеру, для ЭМИ он выше, чем для ТВС, поскольку у ЭМИ вероятность ложных срабатываний существенно меньше. К тому же частота появления контактов ЭМИ ниже, так как они возникают только во время пересечения металлического предмета.

Общий показатель наличия объекта инспекции $p_t^{\Sigma \Sigma}$ по данным всех систем (рис. 4, см. третью сторону обложки) определяется как взвешенная сумма накопленных оценок каждой подсистемы $p_t^{\langle n \rangle \Sigma}$ и априорной оценки нахождения объекта инспекции в данной точке $w^0(X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}})$ (конкретный вид функции $w^0()$ зависит от заранее известной информации о местонахождении ИПО). При этом весовые коэффициенты $w^{\langle n \rangle}$ определяют степень доверия к каждой подсистеме:

$$p_t^{\Sigma \Sigma} = \sum_{n=1}^N w^{\langle n \rangle} p_t^{\langle n \rangle \Sigma} + w^0(X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}}).$$

Интегральная оценка местоположения и направления протяженного объекта $r_t^{\text{ИПО}} = [X_t^{\text{ИПО}}, Y_t^{\text{ИПО}}, \Phi_t^{\text{ИПО}}]^T$ (рис. 5, см. третью сторону обложки) рассчитывается аналогично исходя из данных каждой подсистемы $r_t^{\langle n \rangle} = [X_t^{\langle n \rangle}, Y_t^{\langle n \rangle}, \Phi_t^{\langle n \rangle}]^T$ и априорной информации о местоположении и направлении объекта инспекции в данном

районе $r^0(X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}}) = [X^0(X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}}), Y^0(X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}}), \Phi^0(X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}})]^T$:

$$r_t^{(n)\Sigma} = k^{<n>} r_{t-1}^{(n)\Sigma} + p_t^{(n)} r_t^{(n)};$$

$$r_t^{\text{ИПО}} = \frac{1}{p_t^{\Sigma\Sigma}} \left(\sum_{n=1}^N w^{<n>} r_t^{(n)\Sigma} + w^0(X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}}) r^0(X_t^{\text{АНПА}}, Y_t^{\text{АНПА}}) \right),$$

где $r_t^{(n)\Sigma} = [X_t^{(n)\Sigma}, Y_t^{(n)\Sigma}, \Phi_t^{(n)\Sigma}]^T$ — промежуточная переменная (суммарная составляющая каждой координаты объекта к моменту времени t для системы n).

Управление АНПА во время поиска и отслеживания протяженного объекта

Решение задач инспекции требует управления подводным аппаратом таким образом, чтобы: а) минимизировать время поиска объекта и б) обеспечить сбор информации о состоянии объекта (с помощью телевизионной системы — для большинства ИПО, датчика метана и многолучевой ЭЛС — для трубопроводов). Таким образом, можно выделить следующие требования к организации управления АНПА:

1) при первоначальном поиске ИПО необходимо использовать системы обнаружения, обладающие наименьшей вероятностью ложных срабатываний, и двигаться так, чтобы максимизировать вероятность обнаружения ИПО с помощью этих систем;

2) после обнаружения какого-либо объекта необходимо убедиться в том, что данный объект является искомым, и перейти к его отслеживанию;

3) траектория АНПА во время отслеживания должна лежать над ИПО, пока существует устойчивый контакт с системами идентификации;

4) при потере контакта с объектом инспекции необходимо осуществлять поиск (например, "расходящейся змейкой") для обеспечения возврата к объекту.

Во время отслеживания протяженного объекта целевой курс $\Phi_t^{\text{ЦК}}$ можно представить в виде суммы следующих величин: направления инспектируемого объекта $\Phi_t^{\text{ИПО}}$, угла пересечения с объектом $\text{cross}()$ (при движении "змейкой") с соответствующим знаком Side_t (определяющим направление захода на объект) и величины, стабилизирующей траекторию АНПА над объектом инспекции, $\text{stab}()$ (при движении вдоль ИПО):

$$\Phi_t^{\text{ЦК}} = \Phi_t^{\text{ИПО}} + \text{Side}_t \text{cross}(p_t^{\Sigma\Sigma}) - \text{stab}(\delta_t^{\text{СУ}});$$

$$\text{Side}_t = \begin{cases} -1, & \delta_t^{\text{СУ}} > \text{border}(p_t^{\Sigma\Sigma}) \\ +1, & \delta_t^{\text{СУ}} < -\text{border}(p_t^{\Sigma\Sigma}); \\ \text{Side}_{t-1}, & |\delta_t^{\text{СУ}}| \leq \text{border}(p_t^{\Sigma\Sigma}) \end{cases}$$

$$\delta_t^{\text{СУ}} = (X_t^{\text{СУ}} - X_t^{\text{ИПО}}) \cos(\Phi_t^{\text{ИПО}}) - (Y_t^{\text{СУ}} - Y_t^{\text{ИПО}}) \sin(\Phi_t^{\text{ИПО}});$$

$$X_t^{\text{СУ}} = X_t^{\text{АНПА}} + \Delta_x^{\text{СУ}} \sin(\Phi_t^{\text{АНПА}});$$

$$Y_t^{\text{СУ}} = Y_t^{\text{АНПА}} + \Delta_y^{\text{СУ}} \cos(\Phi_t^{\text{АНПА}}),$$

где $\delta_t^{\text{СУ}}$ — расстояние от протяженного объекта

$r_t^{\text{ИПО}}$ до "точки стабилизации" на корпусе АНПА; $\text{border}()$ — размер границы обследования протяженного объекта (дистанция, на которую должна перемещаться "точка стабилизации" по отношению к ИПО). Под "точкой стабилизации" понимается фиксированная позиция на корпусе аппарата, формирование желаемой траектории для которой является целью управления. Ее положение зависит от мест установки распознающих систем на аппарате и определяется как $\Delta_x^{\text{СУ}}, \Delta_y^{\text{СУ}}$ — в связанной и $X_t^{\text{СУ}}, Y_t^{\text{СУ}}$ — в абсолютных системах координат.

При потере контакта с объектом инспекции (уменьшение $p_t^{\Sigma\Sigma}$) АНПА должен переходить к осуществлению поисковой траектории, которая характеризуется как увеличением угла захода на объект $\text{cross}()$, так и расширением границ обследования объекта $\text{border}()$. Ниже даны примеры возможных зависимостей, использовавшихся во время натурных испытаний АНПА:

$$\text{border}(p^{\Sigma\Sigma}) = \delta_{\min}^{\text{border}} + \delta_{\max}^{\text{border}} \exp(-K^{\text{border}} p^{\Sigma\Sigma});$$

$$\text{cross}(p^{\Sigma\Sigma}) = \varphi_{\min}^{\text{cross}} + \varphi_{\max}^{\text{cross}} \exp(-K^{\text{cross}} p^{\Sigma\Sigma});$$

$$\text{stab}(\delta^{\text{СУ}}) = \varphi_{\max}^{\text{stab}} \text{th}(K^{\text{stab}} \delta^{\text{СУ}}),$$

где $\delta_{\min}^{\text{border}}$ и $\delta_{\max}^{\text{border}}$ — минимальный и максимальный размеры границы обследования соответственно; K^{border} — коэффициент уменьшения границ; $\varphi_{\min}^{\text{cross}}$ и $\varphi_{\max}^{\text{cross}}$ — минимальный и максимальный углы пересечения ИПО; K^{cross} — коэффициент уменьшения угла; $\varphi_{\max}^{\text{stab}}$ — максимальный угол для компенсации отклонения АНПА от ИПО; K^{stab} —

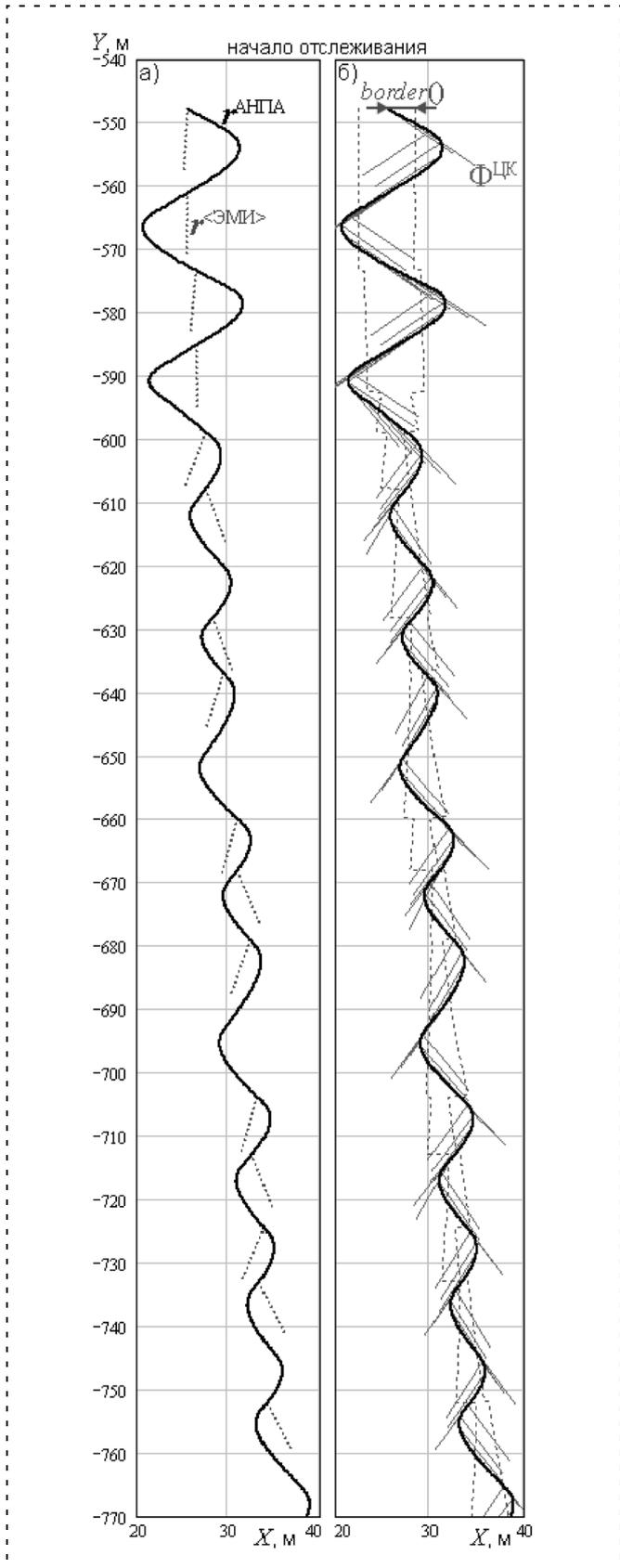


Рис. 6. Обследование ИПО с помощью ЭМИ:
 а — траектория АНПА и контакты ЭМИ; б — траектория АНПА, границы обследования и целевой курс

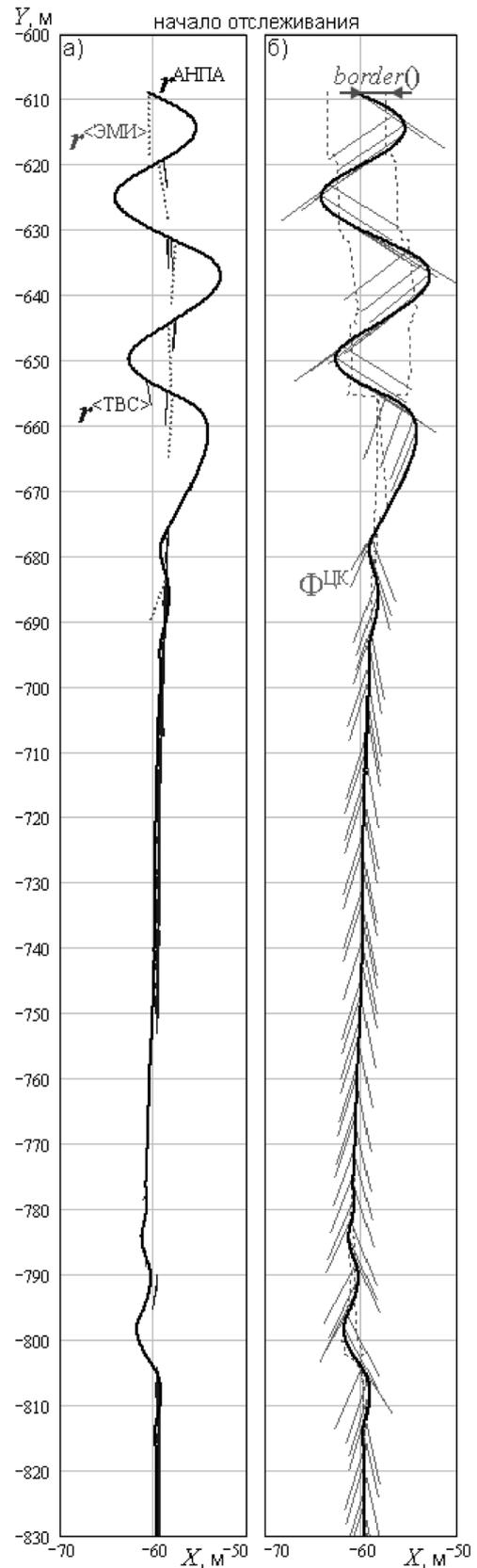


Рис. 7. Обследование ИПО с помощью ЭМИ и ТВС:
 а — траектория АНПА, контакты ЭМИ и ТВС; б — траектория АНПА, границы обследования и целевой курс

коэффициент изменения курса АНПА при стабилизации движения вдоль объекта инспекции.

Таким образом, траектория подводного аппарата будет представлять собой колебательное движение вдоль объекта инспекции (рис. 6, 7, 8). При этом амплитуда колебаний обратно пропорциональна вероятности наличия ИПО возле АНПА. При максимальной оценке вероятности наличия ИПО движение вырождается в прямую линию. При уменьшении оценки (потеря объекта) вновь возникают колебательные движения (проводится поиск), и амплитуда колебаний возрастает по мере уменьшения уверенности в наличии объекта.

Результаты натурных испытаний комплекса

Описанный подход был реализован в составе координирующего уровня системы управления АНПА [1]. Испытания АНПА проводились в два этапа: 1) в качестве системы распознавания ИПО использовался только ЭМИ (см. рис. 6); 2) для идентификации объекта были задействованы две системы — ЭМИ и ТВС (рис. 4 и 5, см. третью сторону обложки, рис. 8, 9). В роли искусственного протяженного объекта в обоих случаях выступал специально проложенный по морскому дну фрагмент кабеля диаметром 12 мм и длиной около 800 м. Параметры управляющих алгоритмов выбирали исходя из характеристик используемого подводного аппарата. Средняя скорость движения АНПА составляла около 0,35 м/с, отстояние от грунта — 1,7 м.

В обоих случаях во время выполнения поисковой траектории (на графиках отсутствует) АНПА движется под углом около 45° к предполагаемому направлению залегания кабеля до возникновения первого ЭМИ-контакта. Далее в течение четырех минут аппарат движется "змейкой" вдоль объекта, используя данные от систем обнаружения ИПО (только ЭМИ — для первого случая, либо ЭМИ и ТВС — для второго) для набора статистических данных и корректировки местоположения ИПО (ширина зоны обследования и угол захода на объект при этом постоянны: $\text{border}() = 3 \text{ м}$, $\text{cross}() = 45^\circ$). Затем АНПА управляется, руководствуясь вышеприведенными зависимостями.

Результаты испытания АНПА во время автономной инспекции кабеля с использованием ЭМИ в качестве распознающей системы приводятся на рис. 6. На рис. 6, а изображена траектория АНПА (в горизонтальной плоскости) и контакты, полученные во время пересечения кабеля. Рис. 6, б отображает границы обследования и направления целевого курса для исполняющего уровня системы управления АНПА (с интервалом в 10 с). Видно, что целевой курс резко меняет свое направление при выходе АНПА за границу обследования объ-

екта. При этом граница обследования расширяется при отсутствии (и пропуске) контактов и сужается (с коррекцией местоположения) при получении новых контактов. Угол захода на объект также уменьшается при появлении контактов и увеличивается — в противном случае. Пропуски контактов происходят из-за особенностей работы ЭМИ при малых углах захода на кабель (которые предпочтительны с точки зрения инспекции). Однако в случае пропуска контакта угол захода на кабель увеличивается, и ЭМИ вновь идентифицирует пересечение, не давая АНПА потерять объект инспекции.

На рис. 4, 5, см. третью сторону обложки, и рис. 7, 8 демонстрируются результаты отслеживания кабеля при совместном использовании ЭМИ и ТВС. На рис. 7, а изображена траектория АНПА с контактами ЭМИ и ТВС, рис. 7, б показывает динамически изменяющуюся зону обследования и целевые курсы АНПА. Спустя примерно 7 мин после начала отслеживания телевизионная система стабильно распознает объект. При этом АНПА движется вдоль кабеля, поскольку границы зоны обследования совпадают со средним местоположением ИПО. Примерно на 12-й минуте движения появляется заиленный участок, на котором кабель не виден. В результате АНПА плавно переходит в режим движения "расходящаяся змейка". Когда объект вновь становится видимым — возобновляется прямолинейное движение вдоль него. В результате весь тестовый отрезок кабеля был пройден. При этом объект инспекции практически все время находился в поле зрения ТВ-камеры. На рис. 8 приведен фрагмент последовательности кадров, полученных телевизионной системой при движении аппарата вдоль кабеля.



Рис. 8. Мозаичированная последовательность кадров на одном из участков движения АНПА вдоль кабеля

Заключение

Описанный подход с интегральной обработкой данных от систем идентификации ИПО был реализован в системе управления одного из аппаратов ИПМТ ДВО РАН и успешно прошел испытания летом 2007 г. К достоинствам подхода можно отнести низкую ресурсоемкость применяемых алгоритмов, а также достаточно высокую вероятность обнаружения и отслеживания объекта при низкой вероятности ложных срабатываний. Дальнейшее направление работ видится в проверке работоспособности описанных алгоритмов при интегрировании большего количества средств идентификации ИПО (например, использование многолучевой ЭЛС во время отслеживания трубопровода).

Авторы выражают признательность сотрудникам ИПМТ: Н. И. Рылову — руководителю экспедиционных работ, А. А. Борейко, Д. А. Варламову и А. К. Кукарских — за подготовку поисковых устройств к использованию в составе описанной системы, а также Л. В. Киселеву — за ценные замечания при подготовке статьи. Кроме того, при написании

данной статьи был использован алгоритм сшивки изображений, разработанный А. Ф. Щербатюком и С. А. Муном.

Список литературы

1. **Автономные** подводные роботы: системы и технологии / М. Д. Агеев, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко и др.; под общ. ред. М. Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. **Ваулин Ю. В., Щербатюк А. Ф.** Система отслеживания протяженных объектов на основе телевизионной информации для подводного робота // В сб. "Морские технологии". Вып. 3. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 80—91.
3. **Агеев М. Д., Кукарских А. К.** Электромагнитный гидролокатор для обнаружения и отслеживания протяженных объектов с борта АНПА // В сб. "Морские технологии". Вып. 4. Владивосток: Дальнаука, 2001. С. 71—90.
4. **Инзарцев А. В., Павин А. М.** Использование эхолокационной информации для обнаружения и инспекции искусственных протяженных объектов автономным необитаемым подводным аппаратом // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 27—35.
5. **Павин А. М.** Метод идентификации подводного трубопровода на основе многолучевой эхолокационной информации АНПА: разработка и моделирование // Матер. VIII школы-семинара молодых ученых "Математическое моделирование и информационные технологии" (8—12 июля 2006). Иркутск: Ин-т динамики систем и теории управления СО РАН. 2006. С. 134—138.

УДК 004.032.26

В. В. Ушаков, канд. техн. наук,
ЗАО "Транзас", Санкт-Петербург

Применение нейронных сетей при оценке состояния подвижных объектов

Использование математического аппарата теории распознавания образов для оценки состояния подвижных объектов затруднительно из-за нелинейного влияния отдельных признаков на состояние объекта и динамического характера этих признаков. Предлагается применение для этой цели настраиваемых нейронных сетей. Обсуждаются результаты применения настраиваемых нейронных сетей различных типов для оценки состояния объекта по значениям его параметров, изменяющихся во времени.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 62912011

Н. Е. Жадобин, д-р техн. наук, проф., **А. И. Лебедев**,
ГМА им. адм. С. О. Макарова, Санкт-Петербург

Линейно-кольцевой магнитоупругий датчик упора и продольных колебаний валопроводов

Для измерения упора гребного винта и продольных колебаний валопроводов, а также для уменьшения вредного влияния магнитной неоднородности предлагается использовать линейно-кольцевой магнитоупругий преобразователь, состоящий из секций, симметрично расположенных по окружности вала. Каждая секция состоит из последовательно включенных трансформаторных магнитоупругих преобразователей приставного типа, расположенных вдоль линии вала и установленных с зазором по отношению к нему. При этом уровень помеховой составляющей уменьшается в \sqrt{N} раз, где N — число трансформаторных магнитоупругих преобразователей.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 629.12

Д. В. Казунин, канд. техн. наук, доц.,
ЗАО "Транзас",
С. К. Матвеев, д-р физ.-мат. наук, проф.,
СПбГУ, Санкт-Петербург

Численное моделирование нестационарного фазового перехода сжиженного газа в танках газовева

Изложены основные принципы построения модели фазового перехода для однородной, однокомпонентной жидкости, которая проходит фазовый переход, взаимодействия с газовой средой, в составе которой присутствует один инертный компонент. Модель построена с учетом специфики моделирования процессов в грузобалластных тренажерах. Приведен вывод основных зависимостей термических и калориметрических свойств веществ, описана динамика смеси газов, а также приведены основные уравнения сохранения для общего и частных случаев расчета нестационарного фазового перехода сжиженных газов.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 629.12

Р. Н. Модеев,
ЗАО "Транзас", Санкт-Петербург

Лоцманская проводка с берега: международный опыт реализации и существующая нормативная база

Обсуждается современное состояние и тенденции развития систем поддержки судоводителей с берега путем введения в эксплуатацию СУДС, их развития от локальных до региональных и даже интернациональных, введение систем судовых сообщений, систем глобальной связи при бедствии, систем точного позиционирования и др. Автор акцентирует внимание на системе береговой лоцманской проводки, идея которой была сформулирована и получила отражение в документах, одобренных МАМС, но которая до сих пор так и не получила должного применения в практике судоходства.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 627 (09)

А. А. Давыденко, канд. экон. наук,
Федеральное агентство морского и речного транспорта, г. Москва

Управление экономическим развитием морских торговых портов региона

Изложены наиболее важные направления регионального экономического развития морских торговых портов в современных условиях: стратегическое планирование и стратегический маркетинг. На основании сложившихся основных теоретических подходов предложен алгоритм стратегического планирования портового регионального развития. Рассмотрены возможности реализации государственными органами регионального управления преимуществ стратегического маркетинга портовых услуг.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 657.421 (035)

Е. Л. Лаврентьева,
ЗАО "Транзас", Санкт-Петербург

Алгоритм формирования финансовых резервов на ремонт основных средств в организациях водного транспорта

Обоснование необходимости и целесообразности создания резерва на ремонт основных средств в организациях водного транспорта связано с отраслевыми особенностями состояния и использования транспортных средств. Существует несколько универсальных методик формирования резерва финансовых средств для предстоящих расходов на ремонт основных средств в целях налоговой оптимизации для обеспечения эффективности использования финансовых ресурсов предприятия. На основе обобщения существующих методик разработан укрупненный трехэтапный алгоритм обоснования резерва для предстоящих расходов на ремонт основных средств для организаций водного транспорта. Обсуждаются особенности алгоритма и его использование для рационального формирования внутрифирменной финансово-экономической политики с учетом особенностей деятельности.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

CONTENTS

Tjan V. K. <i>Reduction of Synthesis Process of Many-Dimensional Linear Control Systems to Synthesis of One-Dimensional Linear Control Systems with Standart</i>	2
Gaiduk A. R., Plaksienko E. A. <i>Synthesis of Dynamic Systems on the Requirement Performances</i>	7
Tjagunov O. A. <i>Choice Cost Functions at Multiobjective Tuning Adjustment Parameters of Control Systems</i>	12
Pavlova N. V., Petrov V. G., Vidov K. S. <i>Conversation Software Prototyping and Simulation in Constructing Onboard Equipment on Basis of Information Model</i>	17
Kostjukov V. M., Kutaranov A. Kh. <i>Definition of Absolute Speed of Aircraft with the Help of Optoelectronic System</i>	21
Volzhin A. S. <i>Concerning the Metodical Mistake of Satellite Navigational Receiver Caused by the Difference of Absolute and Angular Velocity of Daily Rotation of the Earth</i>	25
Malkov A. V., Pershin I. M. <i>Design of the Distributed Control System by Exploitation Regimes of "Kujulus"</i>	27
Rezhnikov A. F., Golembiovsky Yu. M., Avetisjan Yu. A. <i>Increase of Controllability and Compurization of Systems of Electrosupply as the Major Direction of Economy of Energy in the Industry</i>	32
Devjatov D. Kh., Fainstein S. I., Tutarova V. D., Kalitaev A. N. <i>Operational Planning of Finished-Products Shipment from Metallurgical Works Stock-Rooms</i>	36
Filaretov V. F., Bobkov V. A., Iukhimets D. A., Meljman S. V., Borisov Yu. S. <i>Singularities of Virtual Simulation of Submarine Apparatus Movements with Regard for Actions of Surrounding Ductile Medium</i>	41
Inzartsev A. V., Pavin A. M. <i>Autonomous Underwater Vehicle Control during Artificial Lengthy Objects Inspection</i>	47
Ushakov V. V. <i>Use of Neuron Networks in Evaluating of State of Moving Objects</i>	54
Zhadobin N. E., Lebedev A. I. <i>Linear-Ring Magnetoelastic Transmitter of Support and Longitudinal Vibrations of Shaftings</i>	54
Kazunin D. V., Matveev S. K. <i>Numerical Simulation of Nonstandard Gas Transfer of Liquefacted Gas in Tanks of Gas Carrier</i>	55
Modeev R. N. <i>Pilot-Fish Conductance from the Seashore Coast: International Experiment of Realization and the Existence Normative Base</i>	55
Davydenko A. A. <i>Management of the Economic Development of Sea Commercial Ports of the Region</i>	55
Lavrentjeva E. L. <i>Algorithm of Reserve Formation for Repairs of the Main Means in Water Transport Organizations</i>	55

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1

Телефон редакции журнала: **(495) 269-5397**, тел./факс: **(495) 269-5510**Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Художник *В.Н. Погорелов*.Технический редактор *О.А. Ефремова*. Корректор *Т.В. Арбузова*.

Сдано в набор 05.02.2008. Подписано в печать 14.03.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,70. Заказ 302. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15