

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 9 (150)

сентябрь

2013

## Редакционный совет:

БОЛОТНИК Н. Н.  
ВАСИЛЬЕВ С. Н.  
КАЛЯЕВ И. А.  
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.  
КУЗНЕЦОВ Н. А.  
ЛЕОНОВ Г. А.  
МАТВЕЕНКО А. М.  
МИКРИН Е. А.  
ПЕШЕХОНОВ В. Г.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г.  
СИГОВ А. С.  
СИРОТКИН О. С.  
СОЙФЕР В. А.  
СОЛОВЬЕВ В. А.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
ФЕДОРОВ И. Б.  
ЧЕНЦОВ А. Г.  
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л.  
ШЕРБАТЮК А. Ф.  
ЮСУПОВ Р. М.

## Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

## Заместители гл. редактора:

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

## Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

## Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.  
АНТОНОВ Б. И.  
АРШАНСКИЙ М. М.  
БУКОВ В. Н.  
ВИТТИХ В. А.  
ВОСТРИКОВ А. С.  
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.  
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.  
ИВЧЕНКО В. Д.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г.  
КОЛОСОВ О. С.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.  
КУЗЬМИН Н. Н.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.  
ЛОХИН В. М.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
ПРОХОРОВ Н. Л.  
РАПОПОРТ Э. Я.  
СЕРГЕЕВ С. Ф.  
ТИМОФЕЕВ А. В.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
ФРАДКОВ А. Л.  
ФУРСОВ В. А.  
ШАЛОБАЕВ Е. В.  
ЮРЕВИЧ Е. И.

## Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Григорьев В. В., Быстров С. В., Першин И. М., Мансурова О. К.** Анализ устойчивости линейных систем с распределенными параметрами . . . . . 2  
**Гайворонский С. А., Езангина Т. А.** Параметрический синтез линейного регулятора для интервального объекта управления . . . . . 5

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Градецкий В. Г., Фомин Л. Ф.** Динамические процессы в системах создания вакуума миниатюрных мобильных роботов . . . . . 10  
**Румянцев К. Е., Кравцов С. В.** Исследование параметрической связи динамики мобильного робота и бортовой бинокулярной системы технического зрения методом спектрального анализа . . . . . 15  
**Фурсов В. А., Гошин Е. В., Бибииков С. А.** Реконструкция 3D-сцен на пучках эпиполярных плоскостей стереоизображений . . . . . 19

### ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Дударенко Н. А., Сержантова (Полякова) М. В., Ушаков А. В.** Моделирование поведения антропокомпонентов в составе бинарных структур в надпроизводственной среде с помощью интервальных системных представлений . . . . . 25  
**Сергеев С. Ф.** Интеллектуальные симбионты организованных техногенных средств управления подвижными объектами . . . . . 30  
**Обознов А. А.** Адаптивный интерфейс в эргатической системе: инженерно-психологическая оценка . . . . . 37

### БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

- Дюжев А. А., Дубовик Д. А., Савченко В. В.** Развитие бортовых электронных и мехатронных систем мобильных машин в Республике Беларусь . . . . . 41  
**Поддубный В. И., Трехтлер А., Йекер К. П., Харченко Е., Варкентин А.** Моделирование активной подвески для автомобиля повышенной проходимости и оценка возможности ее использования для снижения нагрузки на колесо с поврежденной шиной . . . . . 47

### Журнал в журнале

#### "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Кушнир В. М., Душко В. Р.** Воздействие нелинейных поверхностных волн на морской терминал пирамидальной формы . . . . . 52  
**Дорожок В. М.** Динамическое воздействие аномально большой волны на неподвижную преграду . . . . . 59  
**Пушков С. Г., Ловицкий Л. Л., Корсун О. Н.** Методы определения скорости ветра при проведении летных испытаний авиационной техники с применением спутниковых навигационных систем . . . . . 65  
**Contents** . . . . . 71

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

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

УДК 681.5

**В. В. Григорьев**, д-р техн. наук, проф.,  
grigvv@yandex.ru,

**С. В. Быстров**, канд. техн. наук, доц.,  
sbystrov@mail.ru,

Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет  
информационных технологий механики и оптики,

**И. М. Першин**, д-р техн. наук, проф.,  
ivmp@yandex.ru,

Пятигорский государственный  
технологический университет,

**О. К. Мансурова**, канд. техн. наук, доц.,  
erke7@mail.ru,

Национальный минерально-сырьевой университет  
"Горный", г. Санкт-Петербург

## Анализ устойчивости линейных систем с распределенными параметрами

*Понятие экспоненциальной устойчивости расширено на линейные системы с распределенными параметрами на основе частотных методов исследования систем. Формулируется модифицированный критерий Найквиста экспоненциальной устойчивости линейных систем с распределенными параметрами.*

**Ключевые слова:** частотные характеристики, экспоненциальная устойчивость, линейные системы с распределенными параметрами

### Введение

Частотные методы эффективно применяются при решении задач анализа и синтеза линейных непрерывных систем различного типа [1–4]. Методы анализа различных видов устойчивости динамических систем "перекидывают мостик" к решению задач синтеза этих систем по заданным оценкам качества процессов. Критерий устойчивости Найквиста относится к частотным критериям исследования устойчивости линейных непрерывных систем с постоянными параметрами и позволяет для систем с одним входом и одним выходом и единичной обратной связью по амплитудно-фазовым частотным характеристикам (АФЧХ) разомкнутого контура устанавливать свойство асимптотической устойчивости замкнутой системы. Однако свойство асимптотической устойчивости не позволяет судить о скорости сходимости процессов системы к положению равновесия.

Экспоненциальная устойчивость дает возможность оценивать быстродействие системы по степени сходимости процессов к положению равновесия и проводить их мажорирование. Следует отметить, что из выполнения свойств экспоненциальной устойчивости следует выполнение условий асимптотической устойчивости. Модификация критерия Найквиста позволяет устанавливать свойство экспоненциальной устойчивости для линейных непрерывных систем с постоянными параметрами и тем самым проводить оценку быстродействия.

### Постановка задачи

Основные подходы [1–4], используемые при анализе линейных объектов с распределенными параметрами, основаны на использовании теории дифференциальных уравнений в частных производных и частотных методов. Без потери общности для линейных объектов с распределенными параметрами поставим задачу для частного случая подобных объектов. Положим, что имеется пластина конечных размеров (рис. 1), в которой осуществляется процесс распространения тепла. Математическая модель рассматриваемого процесса описывается уравнением

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$0 < x < X_L, \quad 0 < y < Y_L, \quad 0 < z < Z_L,$$

где  $T(x, y, z, \tau)$  — фазовая переменная;  $x, y, z$  — пространственные координаты;  $a$  — заданный коэффициент;  $X_L, Y_L, Z_L$  — заданные числа.

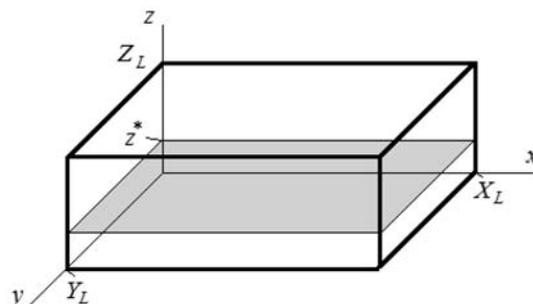


Рис. 1. Объект управления

Граничные и начальные условия для уравнения (1) имеют вид

$$T(0, y, z, \tau) = T(x, 0, z, \tau) = \\ = T(x_L, y, z, \tau) = T(x, y_L, z, \tau) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = 0, \\ T(x, y, z_L, \tau) = U(x, y, \tau), \quad T(x, y, z, 0) = 0.$$

Функцией выхода является значение температурного поля  $T(x, y, z = z^*, \tau)$ , где  $z^*$  — заданное число ( $0 < z^* < z_L$ ).

Для объектов управления (систем), описание которых задается подобными уравнениям движения (1) с граничными условиями вида (2), на основе частотного подхода к их исследованию [1, 4] ставится задача использования модифицированного частотного критерия Найквиста, позволяющего устанавливать свойства экспоненциальной и качественной экспоненциальной устойчивости и, как следствие, проводить оценки качества процессов [5–6] систем управления подобного класса.

### Модификация критерия Найквиста для линейных непрерывных систем с постоянными параметрами

Рассмотрим линейную непрерывную систему с единичной обратной связью и передаточной функцией разомкнутого контура  $W(s)$ , которая представляет отношение двух полиномов

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (3)$$

причем степень полинома  $A(s)$  равна  $n$ , а степень полинома  $B(s)$  равна  $m$  ( $m \leq n$ ). При этом передаточная функция замкнутой системы с единичной обратной связью имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{B(s)}{A(s) + B(s)}. \quad (4)$$

Введем для системы, описываемой передаточной функцией (4), вспомогательную передаточную функцию

$$W_1(s) = 1 + W(s) = \frac{D(s)}{D_1(s)}, \quad (5)$$

где  $D(s) = A(s) + B(s)$  — характеристический полином замкнутой системы в соответствии с выражениями (2) и (3), а  $D_1(s) = A(s)$  — характеристический полином разомкнутого контура.

Сведем задачу установления факта экспоненциальной устойчивости к классической задаче определения устойчивости, для чего введем конформное отображение вида

$$s_1 = s - a^*, \quad (6)$$

где  $a^*$  — параметр, определяющий степень сходимости процессов в понятии экспоненциальной устойчивости. Тогда характеристический полином по каждой пространственной моде замкнутой системы должен иметь все корни характеристического по-

линома относительно переменной  $s_1$  в левой полуплоскости комплексной плоскости корней, т. е. все корни должны иметь отрицательные вещественные части (контур по каждой пространственной моде экспоненциально устойчив с параметром  $a^*$ ).

Введем в рассмотрение вспомогательную частотную передаточную функцию:

$$W_1(j\omega_1) = W_1(s_1)|_{s_1=j\omega_1} = \\ = \frac{D(s_1)}{D_1(s_1)} \Big|_{s_1=j\omega_1} = \frac{D(j\omega_1)}{D_1(j\omega_1)}. \quad (7)$$

Согласно принципу приращения аргумента, если разомкнутый контур имеет  $l$  корней, лежащих в правой полуплоскости, то приращение  $f_1$  аргумента вспомогательной частотной передаточной функции (7) должно быть равно

$$f_1 = \frac{n\pi}{2} - \frac{(n-l)\pi}{2} + \frac{l\pi}{2} = l\pi. \quad (8)$$

Переходя к АФЧХ разомкнутого контура, получаем, что приращение аргумента частотной передаточной функции разомкнутого контура

$$W(j\omega_1) = \frac{B(j\omega_1)}{A(j\omega_1)} \quad (9)$$

относительно точки комплексной плоскости  $(-1, j \cdot 0)$  должно быть равно

$$f_2 = l\pi, \quad (10)$$

где  $f_2$  — приращение аргумента разомкнутого контура. Если разомкнутый контур экспоненциально устойчив со степенью сходимости  $a^*$ , то  $l = 0$  и приращение аргумента (9) в соответствии с (10) будет равно

$$f_2 = 0, \quad (11)$$

т. е. АФЧХ модифицированной частотной передаточной функции разомкнутого контура  $W(j\omega_1)$  (6) не должна охватывать точку  $(-1, j \cdot 0)$  комплексной плоскости, при этом линейная система будет экспоненциально устойчивой со степенью сходимости процессов равной  $a^*$ .

### Модификация критерия Найквиста для линейных систем с распределенными параметрами

Разложим входное воздействие  $U(x, y, \tau)$  в описании объекта (1) в ряд Фурье по пространственным координатам. Учитывая граничные условия (2), входное воздействие может быть представлено в виде

$$U(x, y, \tau) = \sum_{\eta, \gamma=1}^{\infty} C_{\eta, \gamma}(\tau) \sin(\psi_{\eta}, x) \sin(\tilde{\varphi}_{\gamma}, y),$$

где  $\psi_{\eta} = \pi\eta/x_L$ ;  $\tilde{\varphi}_{\gamma} = \pi\gamma/y_L$ .

Реакция объекта на каждую составляющую ряда может быть записана в виде [4]

$$\bar{T}_{\eta,\gamma}(x, y, z, s) = \frac{\exp(\beta_{\eta,\gamma} z) + \exp(-\beta_{\eta,\gamma} z)}{\exp(\beta_{\eta,\gamma} z_L) + \exp(-\beta_{\eta,\gamma} z_L)} \bar{C}_{\eta,\gamma}(s) \sin(\psi_{\eta} x) \sin(\tilde{\varphi}_{\gamma} y),$$

где  $\bar{T}_{\eta,\gamma}(x, y, z, s)$  — преобразованная по Лапласу функция  $T(x, y, z, \tau)$ .

Передаточная функция объекта по  $(\eta, \gamma)$ -моду входного воздействия имеет вид

$$W_{0,\eta,\gamma}(s) = \frac{\bar{T}_{\eta,\gamma}(x, y, z = z^*, s)}{\bar{C}_{\eta,\gamma}(s) \sin(\psi_{\eta} x) \sin(\tilde{\varphi}_{\gamma} y)} = \frac{\exp(\beta_{\eta,\gamma} z^*) + \exp(-\beta_{\eta,\gamma} z^*)}{\exp(\beta_{\eta,\gamma} z_L) + \exp(-\beta_{\eta,\gamma} z_L)}, \eta, \gamma = \overline{1, \infty}. \quad (12)$$

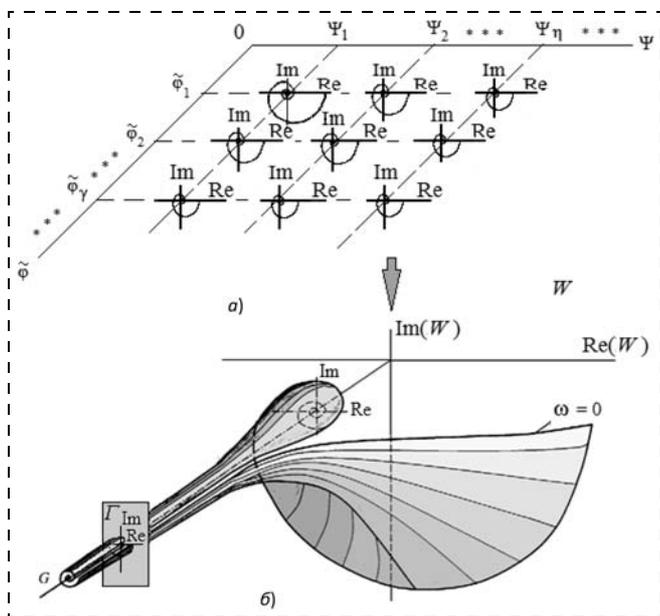


Рис. 2. Пространственный годограф

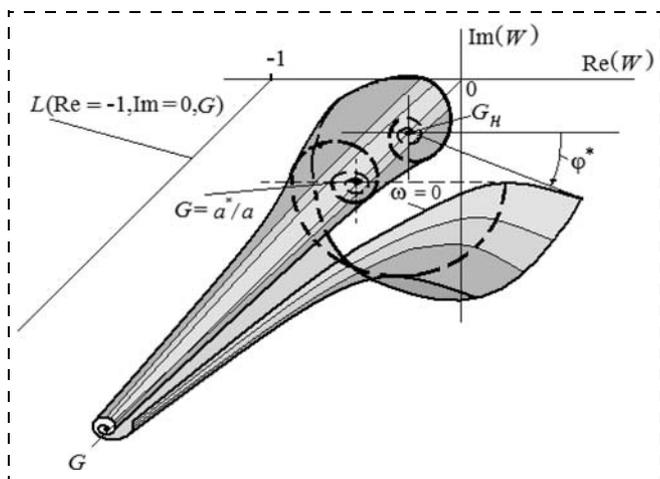


Рис. 3. Модифицированный пространственный годограф

С использованием соотношения (12) для каждой пространственной моды могут быть построены модифицированные годографы (рис. 2, а), причем их бесконечное множество. Работать с таким спектром частотных характеристик не всегда удобно. Отметим что если для разных значений  $\eta, \gamma$  значения  $\psi_{\eta}^2 + \tilde{\varphi}_{\gamma}^2$  одинаково, то частотные характеристики для таких пространственных мод совпадают. Свернем бесконечное множество частотных характеристик по пространственным модам (рис. 2, а) в пространственный годограф. Для этого перейдем от набора функций (12) к функциональной зависимости

$$W(G, j\omega) = \frac{\exp(\beta z^*) + \exp(-\beta z^*)}{\exp(\beta z_L) + \exp(-\beta z_L)}, \quad (13)$$

где  $\beta = \left(\frac{j\omega}{a} + G\right)^{1/2}$ ,  $G_H \leq G \leq \infty$ ,  $G_H = \psi_1^2 + \tilde{\varphi}_1^2$ .

Функцию  $G$  назовем обобщенной координатой [4]. Полагая в (13)  $s = j\omega - a^*$ , получим модифицированный комплексный передаточный коэффициент объекта управления

$$W(G, j\omega) = \frac{\exp(\beta z^*) + \exp(-\beta z^*)}{\exp(\beta z_L) + \exp(-\beta z_L)}, \quad (14)$$

где  $\beta = \left(\frac{j\omega - a^*}{a} + G\right)^{1/2}$ ,  $G_H \leq G \leq \infty$ ,  $G_H = \psi_1^2 + \tilde{\varphi}_1^2$ .

С использованием соотношения (14) может быть построен модифицированный пространственный годограф (рис. 3). В работе [4] приведено доказательство критерия Найквиста для систем управления, передаточные функции которых  $(\Phi_p(s))$  могут быть представлены отношением аналитических целых функций, а также приведены условия, которым должна удовлетворять передаточная функция разомкнутой системы. Эти условия заключаются в следующем:

а)  $\lim_{s \rightarrow \infty} \Phi_p(s) = \text{const}$ ;

б) внутри контура интегрирования передаточная функция должна быть мероморфной.

Исследования, приведенные в работе [4] показывают, что для ряда распределенных объектов передаточные функции обладают перечисленными выше условиями.

Модификация критерия Найквиста заключается в следующем: для того чтобы объект (система) (1), (2) был качественно экспоненциально устойчивым с параметром  $a^*$ , достаточно, чтобы модифицированный годограф не охватывал линию  $L$  ( $\text{Re} = -1, \text{Im} = 0, G$ ) (рис. 3).

### Заключение

Основной результат заключается в развитии применения частотных методов к исследованию экспоненциальной устойчивости систем с распределенными параметрами [1, 3, 4]. Модификация частот-

ного критерия Найквиста позволяет устанавливать свойство экспоненциальной устойчивости для линейных систем с распределенными параметрами, что позволяет выявлять новые свойства и подходы к решению задач анализа и управления, оценкам качества процессов и синтеза экспоненциально устойчивых систем подобного класса [5–6].

#### Список литературы

1. Григорьев В. В., Быстров С. В., Першин И. М. Синтез распределенных регуляторов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во С-Пб ГУИТМО, 2011.

2. Grigoriev V. V., Mansurova O. K. Qualitative exponential stability and instability of dynamical systems // Preprints of 5 th IFAK Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS'01). St.-Petersburg, 2001.

3. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Особые линейные и нелинейные системы. М.: Энергия, 1981.

4. Малков А. В., Першин И. М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012.

5. Быстров С. В., Григорьев В. В., Рабыш Е. Ю., Мансурова О. К. Анализ качества переходных процессов в непрерывных и дискретных системах на основе условий качественной экспоненциальной устойчивости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 9. С. 32–36.

6. Григорьев В. В. Качественная экспоненциальная устойчивость непрерывных и дискретных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43. № 1–2.

УДК 681.50

С. А. Гайворонский, канд. техн. наук, доц.,  
saga@tpu.ru,

Т. А. Езангина, аспирант,  
eza-tanya@yandex.ru,

Томский политехнический университет

## Параметрический синтез линейного регулятора для интервального объекта управления

*Рассматривается система автоматического управления, содержащая линейный регулятор и интервальный объект управления. С использованием коэффициентных оценок показателей качества системы разработана методика синтеза параметров регулятора, гарантирующего максимальную степень устойчивости и допустимую степень колебательности системы. В основу методики положен коэффициентный метод анализа показателей качества и точности с применением интервального подхода. На основе полученной методики разработан программный продукт MDSL. Приводится числовой пример.*

**Ключевые слова:** интервальный полином, синтез регулятора, максимальная степень устойчивости, показатели качества системы

### Введение

Практически все реальные системы автоматического управления (САУ) содержат интервальнонеопределенные параметры. Их интервальность обусловлена неточным знанием параметров или их изменением в процессе эксплуатации систем в заданных диапазонах по заранее неизвестным законам. Системы с подобными параметрами получили название интервальных систем автоматического управления (ИСАУ).

Для ИСАУ актуальна задача параметрического синтеза широко используемых в инженерной практике линейных регуляторов. Решение данной задачи заключается в нахождении таких настроек

регуляторов, которые обеспечивают гарантированные показатели качества ИСАУ при любых вариациях интервальных параметров.

Одним из широко используемых при проектировании ИСАУ критериев является максимальная степень устойчивости системы. Известно, что системы, синтезированные по этому критерию, при прочих равных условиях обладают более высоким быстродействием, меньшим перерегулированием и большим запасом устойчивости.

Синтезу линейных регуляторов, обеспечивающих максимальную степень устойчивости в стационарных САУ, посвящено большое число работ, из которых следует выделить работы [1–4]. При этом пока еще мало внимания уделяется решению задачи обеспечения максимальной степени устойчивости в ИСАУ и разработке для этого соответствующих пакетов прикладных программ на языках высокого уровня, которые дают проектировщику эффективный инструмент для решения указанных выше задач.

С учетом вышесказанного представляет интерес разработка отдельного программного модуля на языке программирования высокого уровня C++ для синтеза ИСАУ максимальной степени устойчивости. В качестве математического аппарата для разработки алгоритмов параметрического синтеза линейных регуляторов ИСАУ предлагается использовать достаточно простой коэффициентный метод [5], основанный на коэффициентах характеристического полинома ИСАУ.

### Постановка задачи

Рассмотрим ИСАУ со структурой, которая приведена на рис. 1.

Полагаем, что объект управления (ОУ) имеет вид

$$W_{OY}(s) = \frac{b}{A(s)}, \quad A(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i,$$

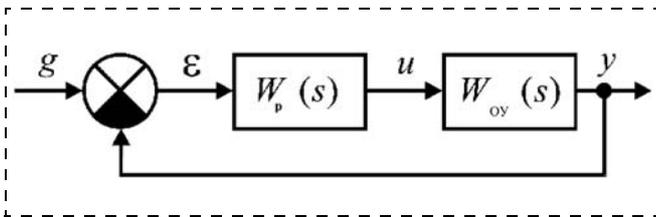


Рис. 1. Структура ИСАУ

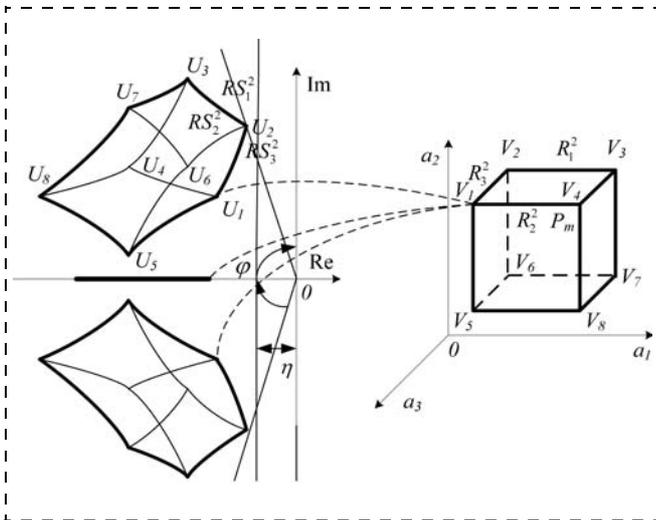


Рис. 2. Отображение параметрического многогранника ИСАУ

где  $\underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i$  ( $\underline{a}_i$  — нижний предел,  $\bar{a}_i$  — верхний предел) — коэффициенты полинома  $A(s)$ ;  $b$  — коэффициент передачи объекта управления,  $s$  — оператор Лапласа. Пусть регулятор задан структурой  $W_p(s, k)$  с вектором настраиваемых параметров  $k$ . Тогда характеристический полином ИСАУ может быть представлен в виде

$$D(s, k) = \sum_{i=0}^m d_i(k) s^i, \quad (1)$$

где  $\underline{d}_i \leq d_i \leq \bar{d}_i$  ( $\underline{d}_i$  — нижний предел,  $\bar{d}_i$  — верхний предел) — коэффициенты полинома.

Область возможных значений интервальных параметров системы (многогранник, являющийся прямоугольным гиперпараллелепипедом) отображается на комплексную плоскость корней в виде областей их локализации (рис. 2).

Необходимо выбрать такие значения параметров вектора  $k$ , которые на основе достаточных условий коэффициентного метода [1] обеспечивают максимизацию степени устойчивости  $\eta_{\max}^*$  ИСАУ. Дополнительными требованиями параметрического синтеза регулятора являются расположение корней полинома (1) в заданном секторе  $\pm\varphi$  и обеспечение заданной добротности системы.

### Условия обеспечения корневых показателей качества и точности

Согласно работе [2] для заданной передаточной функции ОУ  $W_{oy}(s)$  и функции регулятора  $W_p(s)$  с интегральной составляющей в законе управления добротность системы по скорости будет определяться выражением

$$D = \frac{k_0 b}{d_0}. \quad (2)$$

Введем в рассмотрение основные коэффициентные показатели качества и на их основе найдем выражения для определения максимальной степени устойчивости и соответствующих ей параметров регулятора. Склонность системы к колебаниям проявляется при наличии в решении ее характеристического уравнения комплексных корней вида  $-\alpha + j\beta$ . Если имеются корни характеристического уравнения, то легко определить связанный с колебательностью системы угловой сектор  $\pm\varphi$ , в пределах которого расположены все его корни. Однако эту характеристику системы желательно получить непосредственно по коэффициентам характеристического полинома. Согласно работе [1], для анализа колебательности стационарной системы на основе коэффициентного метода используют безразмерные параметры:

$$\delta_i = \frac{d_i^2}{d_{i-1} d_{i+1}}, \quad i = \overline{1, n-1},$$

которые называются показателями колебательности.

В работе [1] на основе  $\delta_i$  приведено достаточное условие заданной колебательности: для расположения корней характеристического полинома стационарной САУ в заданном секторе  $\pm\varphi$  достаточно выполнения условий

$$\delta_i \geq \delta_d(n, \varphi_i^0), \quad \forall i = \overline{1, n-1},$$

где  $\delta_d$  — допустимый показатель колебательности, определяемый из рис. 3.

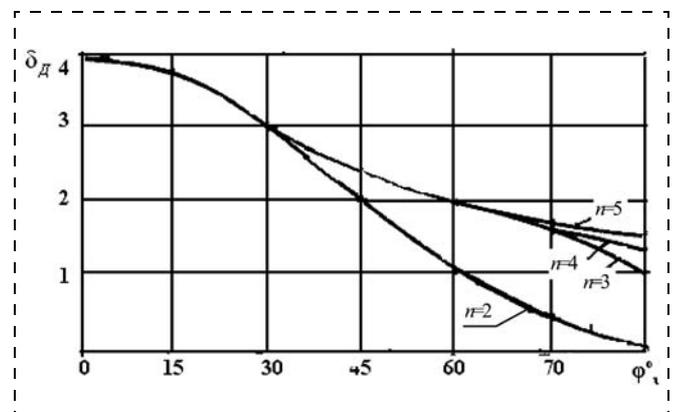


Рис. 3. Зависимость  $\delta_d$  от порядка системы и размера сектора

На основе данного условия авторами сформулировано следующее утверждение.

**Утверждение 1.** Для того чтобы корни интервального полинома (1) лежали в заданном угловом секторе  $\pm\varphi$ , необходимо выполнение условий

$$\delta_i = \frac{d_i^2}{d_{i-1}d_{i+1}} > \delta_d, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (3)$$

*Доказательство.* Пусть в (3)  $d_i^2 = m$ , а  $d_{i-1}d_{i+1} = n$ .

Согласно работе [1] для оценки колебательности системы с переменными параметрами желательно определить ее качество в наихудшем режиме. В данном случае система обладает наихудшим качеством, если

$$\delta_i \rightarrow \min. \quad (4)$$

Для выполнения условия (4) необходимо, чтобы

$$m \rightarrow \min, \quad l \rightarrow \max. \quad (5)$$

Очевидно, что условие (5) достигается при  $m = \underline{d}_i$ ,  $l = \overline{d_{i-1}d_{i+1}}$ . Если условия (4) выполняются для указанных пределов интервальных коэффициентов, то они выполняются и для всех других их значений из заданных интервалов.

Введем вспомогательные параметры  $\lambda_i$ , образуемые четверками рядом стоящих коэффициентов характеристического полинома:

$$\lambda_i = \frac{d_{i-1}d_{i+2}}{d_i d_{i+1}}, \quad i = \overline{1, n-2}.$$

Параметры  $\lambda_i$  называют показателями устойчивости [1]. На основе  $\lambda_i$  в работе [1] предложено достаточное условие заданной степени устойчивости стационарной системы: чтобы все корни полинома (1) стационарной САУ лежали левее вертикальной прямой, проходящей через точку  $(-\eta, j0)$ ,  $0 \leq \eta < \infty$ , достаточно выполнения следующих условий:

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{d_{i-1}d_{i+2}}{(d_i - d_{i+1})(n-i-1)\eta(d_{i+1} - d_{i+2})(n-i-2)\eta} < 0,465, \\ i = \overline{1, n-2}; \\ d_k \geq d_{k+1}(n-k-1)\eta, \quad k = \overline{1, n-1}; \\ d_0 - d_1\eta + 2d_2\frac{\eta^2}{3} \geq 0. \end{cases}$$

На основе данного условия авторами сформулировано следующее утверждение.

**Утверждение 2.** Чтобы все корни интервального характеристического полинома (1) лежали левее вертикальной прямой, проходящей через точку

$(-\eta, j0)$ ,  $0 \leq \eta < \infty$ , достаточно выполнения следующих условий:

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{\overline{d_{i-1}d_{i+2}}}{(\underline{d}_i - \overline{d_{i+1}})(n-i-1)\eta(\overline{d_{i+1}} - \underline{d_{i+2}})(n-i-2)\eta} < 0,465, \\ i = \overline{1, n-2}; \\ \underline{d}_k \geq \overline{d_{k+1}}(n-k-1)\eta, \quad k = \overline{1, n-1}; \\ \underline{d}_0 - \overline{d}_1\eta + 2\underline{d}_2\frac{\eta^2}{3} \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Обозначение  $\overline{d_{i+1}}$  означает, что коэффициент  $d_{i+1}$  следует принимать как максимальным, так и минимальным.

*Доказательство.* Согласно работе [1] для оценки степени устойчивости ИСАУ с интервальными параметрами желательно определить ее наихудшее качество, а именно, максимальные значения ее показателей устойчивости, т. е.

$$\lambda_i \rightarrow \max. \quad (7)$$

Введем обозначения  $d_{i-1}d_{i+2} = m$ ,  $(d_i - d_{i+1})(n-i-1)\eta(d_{i+1} - d_{i+2})(n-i-2)\eta = n$ . Очевидно, что условие (7) выполняется при

$$m \rightarrow \max \text{ и } l \rightarrow \min. \quad (8)$$

С учетом интервального анализа условия (8) выполняются при  $m = \overline{d_{i-1}d_{i+2}}$  и  $l = (\underline{d}_i - \overline{d_{i+1}}) \times (n-i-1)\eta(\overline{d_{i+1}} - \underline{d_{i+2}})(n-i-2)\eta$ . Если условия (7) выполняются для указанных пределов интервальных коэффициентов, то они выполняются и для всех других их значений из заданных интервалов.

Данное утверждение позволяет оценить робастную степень устойчивости ИСАУ. Для его применения к ИСАУ в целях определения максимальной робастной степени устойчивости доказано следующее утверждение.

**Утверждение 3.** Для определения максимальной робастной степени устойчивости ИСАУ необходимо для всех вариантов сочетаний интервальных коэффициентов выбором параметров регулятора обеспечить максимальное значение  $\eta_{\max}$  в  $(n-2)$  системах:

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{\overline{d_{i-1}d_{i+2}}}{(\underline{d}_i - \overline{d_{i+1}})(n-i-1)\eta(\overline{d_{i+1}} - \underline{d_{i+2}})(n-i-2)\eta} = 0,465, \\ i = \overline{1, n-2}; \\ \lambda_j < 0,465, \quad j = \overline{1, n-2}, \quad j \neq i; \\ \underline{d}_k \geq \overline{d_{k+1}}(n-k-1)\eta, \quad k = \overline{1, n-1}; \\ \underline{d}_0 - \overline{d}_1\eta + 2\underline{d}_2\frac{\eta^2}{3} \geq 0. \end{cases} \quad (9)$$

*Доказательство.* Увеличивать значение  $\eta$  в системе (9), меняя параметры регулятора, можно до тех пор, пока  $\lambda_i < 0,465, \forall i = 1, n-2$ . При  $\lambda_i = 0,465$  получаем максимальное значение показателя устойчивости  $\lambda_i$ , соответствующее наибольшей степени устойчивости системы. При этом интервалы коэффициентов полинома выбираются в соответствии с утверждением 2.

### Основные соотношения для синтеза ПИД регулятора

В качестве примера получим основные соотношения для выбора настроек ПИД регулятора для объекта управления 3-го порядка:

$$W_{Oy}(s) = \frac{b}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0},$$

где  $\underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i, i = 0, 3$ .

При выводе этих соотношений примем, что задан допустимый показатель колебательности  $\delta_d = 1,6$  (соответствует желаемому расположению корней характеристического полинома в секторе  $\varphi = 65^\circ$ ) и добротность системы  $D = 10$ . ПИД регулятор описывается следующей функцией:  $W_p(s) = \frac{k_0}{s} + k_1 + k_2 s$ .

Найдем параметр  $k_0$  через добротность с помощью выражения (2). Далее из выражения (3) при  $i = 1$  выразим  $k_2$  через  $k_1$ :

$$k_2 = \frac{(bk_1 + a_0)^2 - 1,6bk_0\bar{a}_1}{1,6bk_0}.$$

Далее выразим параметр регулятора  $k_1$  через  $\eta$  из первого соотношения системы (9) при  $i = 2$ :

$$k_1 = \frac{0,465((\underline{a}_1 + bk_2) - \bar{a}_3\eta)(\bar{a}_3) - \bar{a}_0\bar{a}_3}{b\bar{a}_3}, \quad (10)$$

и, используя полученные выше соотношения, сформируем систему неравенств (9):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\bar{a}_0\bar{a}_3}{(d_1 - 2\bar{d}_2\eta)(\bar{d}_2 - \eta\bar{d}_3)} - 0,465 < 0; \\ \underline{d}_1 \geq 2\bar{d}_2\eta; \\ \underline{d}_2 \geq \eta\bar{d}_3; \\ \underline{d}_0 - \bar{d}_1\eta + 2\underline{d}_2\frac{\eta^2}{3} \geq 0; \\ \frac{\underline{d}_2^2}{\underline{d}_1\bar{d}_3} - 1,6 > 0; \\ \frac{\underline{d}_3^2}{\underline{d}_2\bar{d}_4} - 1,6 > 0. \end{array} \right.$$

Решение данной системы позволит найти искомые неизвестные параметры регулятора и степень устойчивости.

### Алгоритм синтеза линейных регуляторов

Для параметрического синтеза линейных регуляторов ИСАУ разработан алгоритм, который включает следующие этапы:

1. Задать начальные условия: пределы интервальных коэффициентов передаточной функции ОУ, желаемую добротность, допустимое значение показателя колебательности, тип регулятора.
2. На основании достаточного условия заданной робастной колебательности (3) или на основании выражения добротности ИСАУ (2) определить выражение для одного из параметров регулятора.
3. На основе первого уравнения условия (9) получить достаточные условия максимальной робастной степени устойчивости и выразить другой параметр регулятора через степень устойчивости  $\eta$ .
4. Записать систему неравенств для нахождения максимальной робастной степени устойчивости (9).
5. Решить систему неравенств и определить максимальную степень устойчивости  $\eta_{\max}$  и соответствующие ей настройки регулятора.
6. Повторить п. 4, 5 для других  $\lambda_i = 0,465, i = 1, n-2$ , и других соотношений пределов интервальных коэффициентов.
7. Выбрать  $\eta_{\max} = \max \eta_i(k)$  и определить тем самым искомую максимальную робастную степень устойчивости и соответствующие робастные настройки регулятора.

На основе составленного алгоритма разработан программный продукт MDSLS (создан в программном пакете Borland C++). Данный программный продукт позволяет:

- вычислять интервальный характеристический полином по заданной передаточной функции ОУ;

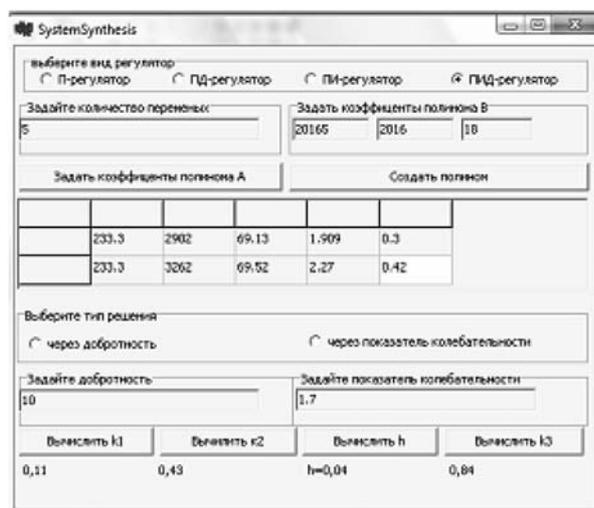


Рис. 4. Результаты синтеза ПИД регулятора в программном продукте MDSLS

- решать систему уравнений (9) и находить максимальную степень устойчивости;
- проводить параметрический синтез различных типов линейных регуляторов при заданной добротности и расположении корней полинома (1) в желаемом секторе.

Результаты работы данного программного продукта приведены на рис. 4.

### Численный пример параметрического синтеза регулятора

Рассмотрим в качестве примера синтез ПИД регулятора системы стабилизации положения буксируемого подводного объекта (БПО). Структура синтезируемой системы приведена в работе [6]. Она включает два контура: основной контур перемещения и контур, служащий для демпфирования вертикальных колебаний БПО. Последние вызваны как морской качкой, так и упругими свойствами троса, связывающего судно и БПО. Структура системы управления БПО имеет признаки адаптивной системы с сигнальной самонастройкой, где эталонный сигнал задатчика скорости сравнивается с сигналом скорости БПО и их разность поступает на ПИД регулятор, который управляет расположенной на БПО амортизирующей лебедкой.

В качестве интервальных параметров, которые изменяются при спуске и подъеме БПО в заранее известных пределах, следует рассматривать массу БПО  $m_{\text{БПО}} = [300; 350]$  и длину троса  $l = [100; 120]$ .

В результате математического описания синтезируемой системы получен ее характеристический полином  $P(s)$ :

$$P(s) = p_5s^5 + p_4s^4 + p_3s^3 + p_2s^2 + p_1s^1 + p_0,$$

где  $p_5 = 10^{-5}m_{\text{БПО}}l$ ,

$p_4 = 0,00624m_{\text{БПО}} + 0,000123m_{\text{БПО}}l + 0,6 + 18k_2$ ,

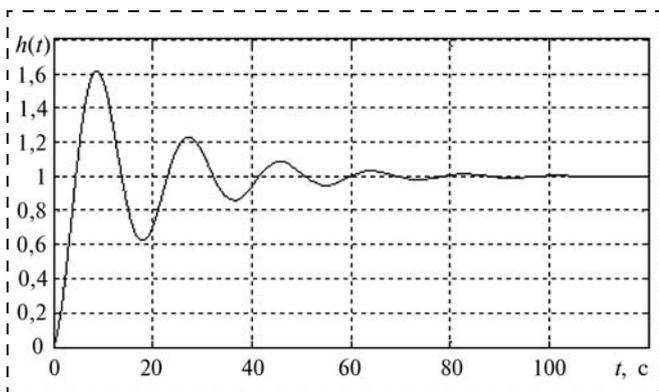


Рис. 5. Переходная характеристика

$$p_3 = 2016,05k_2 + 18k_1 + 0,69m_{\text{БПО}} + 0,000038m_{\text{БПО}}l + 67,39, p_2 = 21605k_2 + 2016,05k_1 + 18k_0 + 7,29m_{\text{БПО}}, p_1 = 21605k_1 + 2016,05k_0 + 233,3, p_0 = 21605k_0.$$

Требуется обеспечить в рассматриваемой ИСАУ максимальную степень устойчивости при заданной добротности по скорости  $D = 10$  и ограничении степени колебательности значением 1,7.

В результате применения программного продукта MDSLS к интервальной системе стабилизации положения БПО определены настройки ПИД регулятора, обеспечивающие максимальную степень устойчивости системы при указанных выше ограничениях ( $k_1 = 0,11$ ;  $k_2 = 0,43$ ;  $k_3 = 0,84$ ;  $\eta = 0,04$ ).

При найденных настройках ПИД регулятора построена переходная характеристика системы (рис. 5).

### Заключение

1. Получен алгоритм параметрического синтеза линейного регулятора, использующий коэффициенты оценки показателей качества системы и обеспечивающий максимальную робастную степень устойчивости ИСАУ при заданной добротности и допустимой степени колебательности.

2. Разработан программный модуль на языке С++, позволяющий на ПЭВМ определять в диалоговом режиме настройки линейного регулятора, обеспечивающего желаемое робастное качество работы ИСАУ.

3. Работоспособность предложенного алгоритма проверена на числовом примере при расчете настроек ПИД регулятора интервальной системы стабилизации положения подводного объекта.

### Список литературы

1. Волков А. Н., Загашвили Ю. В. Метод синтеза систем автоматического управления с максимальной степенью устойчивости при наличии ограничений // Известия РАН. Сер. Теория и системы управления. 1997. № 3. С. 12–19.
2. Шубладзе А. М. Способы синтеза систем управления максимальной степени устойчивости // Автоматика и телемеханика. 1980. № 1. С. 28–37.
3. Шубладзе А. М. Методика расчета оптимальных по степени устойчивости ПИ-законов. I // Автоматика и телемеханика. 1987. № 4. С. 16–25.
4. Татаринев А. В., Цирлин А. М. Задачи математического программирования, содержащие комплексные переменные, и предельная степень устойчивости линейных динамических систем // Известия РАН. Сер. Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 28–33.
5. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженерные методы анализа и синтеза / Б. Н. Петров, Н. И. Соколов, А. В. Липатов и др. М.: Машиностроение, 1986. 256 с.
6. Езангина Т. А. Система стабилизации положения подводного объекта / Т. А. Езангина, С. А. Гайворонский // Тр. X Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодежь и современные информационные технологии". Томск: Изд-во ТПУ, 2012. С. 292–295.

УДК 621.3

**В. Г. Градецкий**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,  
**Л. Ф. Фомин**, науч. сотр.  
 Институт проблем механики  
 им. А. Ю. Ишлинского РАН

## Динамические процессы в системах создания вакуума миниатюрных мобильных роботов

*Рассматриваются динамические процессы в вакуумных захватных устройствах миниатюрных роботов, обеспечивающих удержание роботов на наклонных, вертикальных или потолочных поверхностях. Анализируются особенности и приводятся характеристики эжекторных вакуумных захватных систем. Приводятся результаты экспериментальных испытаний.*

**Ключевые слова:** вакуумные захватные устройства, динамические процессы, микроэжекторы, роботы вертикального перемещения

### Введение

В связи с применением мобильных роботов в экстремальных условиях перемещения по неферромагнитным поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту, а также по вертикальным, потолочным поверхностям появилась необходимость выявления особенностей захватных вакуумных систем, учитывающих различные режимы движения в неопределенных условиях окружающей среды по непредсказуемым заранее поверхностям [1–3].

Эжекторные системы являются наиболее простым и надежным способом создания разрежения в вакуумных схватах миниатюрных роботов вертикального перемещения для самых различных применений. Основные достоинства эжекторных систем — простота конструкции и надежность в работе. Струйные эжекторные насосы для создания вакуума широко используются в машинах и установках микроэлектронной, криогенной, авиационной, машиностроительной и других отраслей техники [4–11].

Несмотря на выполненные ранее исследования эжекторных вакуумных систем, эффективное их применение потребовало миниатюризации конструкции и получения дополнительных данных.

Для обеспечения надежного сцепления с поверхностями в процессе движения миниатюрных робо-

тов вертикального перемещения необходимо поддержание вакуума на оптимальном уровне в диапазоне изменения давления питания от 0,2 до 0,6 МПа.

### Основные уравнения микроэжекторов

Миниатюрный воздушный эжектор как струйный насос должен включать в себя рабочее или активное сопло высоконапорной струи воздуха, приемную камеру или коллектор отсасываемого воздуха, камеру смешения и диффузор.

Для расчета параметров эжекторных вакуумных захватов обычно используются законы сохранения массы, импульса и энергии. По закону сохранения массы имеем:

$$G_3 = G_1 + G_2,$$

где  $G_3$  — массовый расход воздуха на выходе из камеры смешения эжектора;  $G_1$  — массовый расход воздуха через активное сопло питания эжектора;  $G_2$  — массовый расход воздуха через пассивное сопло эжектора.

Коэффициентом эжекции  $n$  считается отношение количества (или расхода) воздуха через пассивное сопло к расходу через активное сопло:  $n = G_2/G_1$ .

Считая, что линии тока воздуха из пассивного сопла плавно входят в диффузор эжектора, уравнение сохранения импульса можно записать в виде

$$G_1 u_1 + p_1 S_1 + G_2 u_2 + p_2 S_2 = G_3 u_3 + p_3 S_3,$$

где  $u_1, p_1, S_1$  — скорость, давление и площадь сечения струи на срезе сопла питания эжектора;  $u_2, p_2, S_2$  — скорость, давление и площадь сечения струи воздуха пассивного сопла эжектора;  $p_3, S_3, u_3$  — давление, площадь сечения и скорость потока на выходе из камеры смешения эжектора.

Уравнение сохранения энергии запишется в виде

$$G_3 (c_p T_3 + \frac{1}{2} u_3^2) = \\ = G_1 (c_p T_1 + \frac{1}{2} u_1^2) + G_2 (c_p T_2 + \frac{1}{2} u_2^2),$$

где  $c_p = 1005 \text{ [м}^2/\text{с}^2\text{К]}$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. При этом для удельной теплоемкости воздуха при постоянном объеме  $c_v$ , газовой постоянной  $R = c_p - c_v$  и показателя адиабаты  $k = c_p/c_v$  имеем значения  $c_v = 1407 \text{ [м}^2/\text{с}^2\text{К]}$ ;  $R = 287,3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ ;  $k = 1,41$ .

Принимаются также следующие обозначения и допущения:  $T_0, T_1, T_2, T_3$  — абсолютные температуры воздуха на входе в активное сопло, на выходе

из активного сопла, пассивного сопла и камеры смешения эжектора соответственно;  $u_1, u_2, u_3, u_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  — скорости и приведенные скорости на выходе из активного сопла, пассивного сопла, камеры смешения и диффузора соответственно;  $d_1, d_3, d_4$  — диаметры активного сопла, камеры смешения и диффузора соответственно;  $S_4$  — площадь сечения на выходе диффузора. Для окружающей среды плотность, давление и температуру обозначим  $\rho, p, T$ . Для потока перед входом в активное сопло имеем:  $\rho_0, p_0, T_0, d_0$ .

Проведены исследования динамических процессов, происходящих в эжекторных системах генерации вакуума миниатюрных мобильных роботов вертикального перемещения, в двух следующих основных режимах:

- режим *A*: режим начальной откачки воздуха из полости вакуумной присоски при наибольшей скорости потока откачиваемого воздуха, а также при движении мобильного робота по неровным поверхностям с трещинами и выбоинами при  $u_2 > 0$ ;
- режим *B*: режим нулевой скорости потока откачиваемого воздуха при герметичном сцеплении присоски с поверхностью движения для  $u_2 = 0$ .

#### Экспериментальные исследования эжектора

Микроэжектор для вакуумных захватов миниатюрных роботов вертикального перемещения должен позволять подсасывать большое количество воздуха при небольшом повышении его напора. Поэтому микроэжектор должен иметь малое значение первого основного геометрического параметра  $\alpha$  эжекторов в виде отношения площади среза активного сопла к площади сечения пассивного сопла  $\alpha = S_1/S_2 = S_1/(S_3 - S_1)$ , т. е.  $S_2 \gg S_1$ . При этом для режима *B* при  $u_2 = 0$  коэффициент эжекции  $n = G_2/G_1$  равен нулю, а для режима *A* при  $u_2 > 0$  коэффициент эжекции  $n$  неопределен.

Проведенные эксперименты показали, что диаметр среза активного сопла для вакуумных захватных устройств миниатюрных роботов вертикального перемещения должен составлять  $d_1 = 1$  мм.

Второй основной геометрический параметр эжектора — отношение площади выходного сечения диффузора к площади сечения камеры смешения  $f = S_4/S_3 = (d_4/d_3)^2$  при достаточной длине диффузора, обеспечивающей угол раскрытия диффузора порядка  $8^\circ$ .

Третий основной геометрический параметр эжектора — отношение длины камеры смешения к ее диаметру  $l_3/d_3$ .

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при исследовании динамических процессов для режима *A* при  $u_2 > 0$  и режима *B*

при  $u_2 = 0$  в вакуумных захватных системах миниатюрных мобильных роботов вертикального перемещения существующие в литературе [4—11] многочисленные методики расчетов газовых эжекторов необходимо применять для регулируемого микроэжектора, позволяющего изменять расстояние от среза активного сопла до начала камеры смешения.

Рассмотрены две наиболее важные для мобильных роботов задачи: 1) рассчитать проструйный эжектор для вакуумирования от атмосферного давления  $p_2 = 0,1$  МПа до давления  $p_2 = 0,02$  МПа за время  $= 1...3$  с камеры захватного устройства робота объемом  $V = 100 \text{ см}^3 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ ; 2) рассчитать эжектор для вакуумирования той же камеры захватного устройства робота при постоянном просачивании дополнительного количества воздуха  $G_2 = nG_1$  через выбоины и трещины в поверхностях движения. При этом принимаем среднее значение коэффициента эжекции  $n = 0,01$ , температуру  $T = 293 \text{ К}$  и давление окружающей среды  $p = 0,1$  МПа.

Методика расчета состоит, прежде всего, в нахождении следующих основных характеристик:

- степени повышения давления отсасываемого воздуха  $\sigma = p_4/p_2$ ;
- степени расширения эжектирующего потока воздуха  $\varepsilon = p_1/p_4$ .

Принцип работы микроэжектора в режиме  $u_2 > 0$  при соприкосновении активной расширяющейся струи воздуха со стенкой микроэжектора еще на коническом участке приемной камеры показан на рис. 1, а принцип работы микроэжектора в режиме  $u_2 = 0$  при соприкосновении расширяющейся струи сжатого воздуха из активного сопла уже с цилиндрической стенкой самой камеры смешения микроэжектора показан на рис. 2.

Отличительная особенность исследований и разработок вакуумных захватных устройств роботов вертикального перемещения заключается в обязательном учете многочисленных погодных и технологических факторов при функционировании роботов в изменяющихся неопределенных условиях окружающей среды в случаях их применений при тушении пожаров на нефтяных и газовых хранилищах, при обследовании и диагностике химических и атомных производств, в условиях Крайнего Севера и на море.

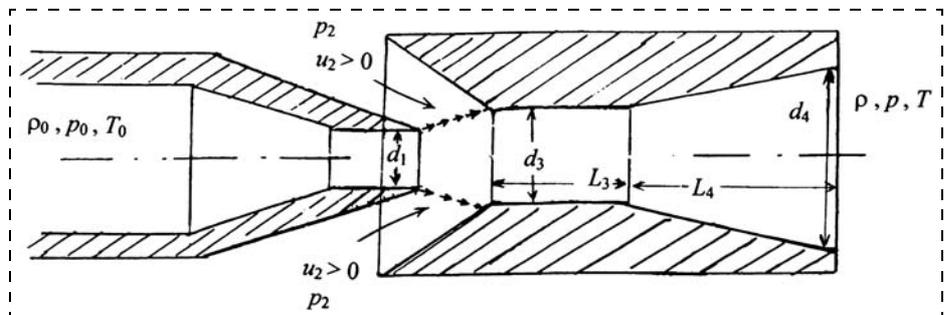


Рис. 1. Принцип работы микроэжектора в режиме  $u_2 > 0$  при соприкосновении активной расширяющейся струи со стенкой конической приемной камеры

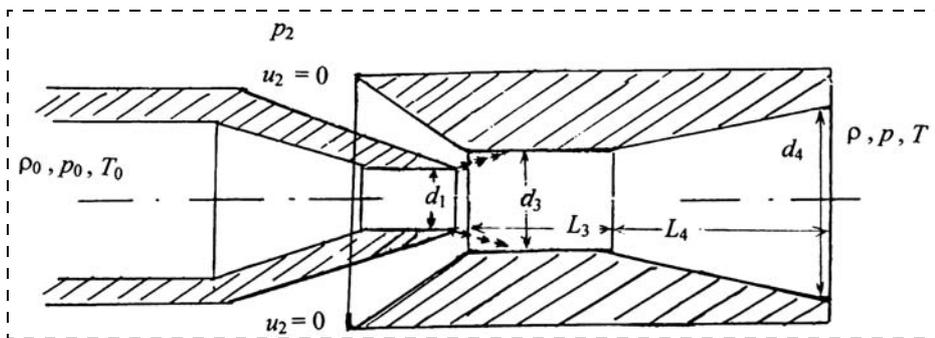


Рис. 2. Принцип работы микроэжектора в режиме  $u_2 = 0$  при соприкосновении активной расширяющейся струи со стенкой цилиндрической камеры смешения

Следовательно, захватные устройства роботов должны работать в диапазоне температур от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в условиях мокрых, заснеженных, замасленных поверхностей. К тому же сжатый воздух от передвижного компрессора до работающего на объекте робота подается по шлангам длиной в несколько десятков, а то и сотен метров, что может, в сочетании с большими колебаниями температуры, приводить к изменениям и колебаниям в больших пределах давления сжатого воздуха на входе в активное сопло. Все это, с одной стороны, указывает на первостепенное значение экспериментального подбора таких параметров, как (во-первых) расстояние  $L$  от среза активного сопла до входа в камеру смешения и (во-вторых) отношение  $d_1/d_3$  диаметра активного сопла  $d_1$  к диаметру камеры смешения  $d_3$ . Вместе с тем, отсюда следует, что активное сопло должно быть сужающимся звуковым соплом, но не сверхзвуковым соплом Лавала. При этом длина камеры смешения  $L_3$  и параметры диффузора  $d_4, L_4$  не столь существенны и могут быть приняты исходя из общеизвестных рекомендаций, имеющих в литературе [4–11].

Для эжекторов, разработанных в Институте проблем механики, задавались следующие значения параметров:  $d_0 = 4\text{ мм}$ ,  $d_1 = 1\text{ мм}$ ,  $L_3 = 7\text{ мм}$ ,  $d_4 = 4\text{ мм}$ ,  $L_4 = 8\text{ мм}$ . Наиболее важно, прежде всего, экспериментально определить оптимальное отношение диаметра среза активного сопла  $d_1$  к диаметру камеры смешения  $d_3$ , при котором требуемое значение вакуума сохраняется в заданном диапазоне дав-

лений сжатого воздуха на входе в активное сопло.

Для лучшего понимания динамических процессов в эжекторах рассмотрим сначала поток сжатого воздуха через эжектор при пассивном сопле, полностью открытом в окружающую среду. При этом скорость  $u_1$  истечения воздуха из активного сопла в атмосферу будет иметь определенное значение, зависящее не только от параметров  $p_0, T_0, \rho_0$  в ресивере

или на входе в активное сопло, но и от атмосферного давления в данном месте. Приблизим теперь и прижмем захватное устройство к поверхности движения робота. Струя активного воздуха начнет увлекать часть воздуха из пассивного сопла захватного устройства, создавая в нем определенный вакуум. Скорость истечения воздуха на срезе активного сопла будет повышаться по мере понижения противодавления в пассивном сопле и камере смешения. Понижение давления представляет собой возмущение потока, которое будет распространяться против течения потока сжатого воздуха от сопла по шлангам до тех пор, пока скорость потока на срезе сопла не повысится и не достигнет скорости звука (т. е. предела скорости распространения возмущений в воздухе). После этого возмущения (уменьшения) давления уже не смогут проникнуть через срез активного сопла в шланги и ресивер, так как они будут сноситься потоком воздуха, имеющего ту же скорость, что и скорость распространения возмущений в воздушном потоке.

Именно в этом динамичном, зависящем от времени процессе и заключается сущность экспериментального подбора геометрических параметров захватных устройств роботов вертикального перемещения.

Для удовлетворения полученных противоречивых условий в лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики РАН разработан регулируемый микроэжектор, состоящий из трех отдельных элементов, соединяемых с помощью

винтовой резьбы, как показано на рис. 3: 1 — активное сопло с внешней резьбой  $M8 \times 1$  и штуцером для шланга сжатого воздуха; 2 — корпус со сквозной внутренней резьбой  $M8 \times 1$  и штуцером для отсасываемого воздуха; 3 — блок, включающий комбинацию приемной камеры, камеры смешения и диффузора. Общая схема микроэжектора показана на рис. 4. Расстояние от среза активного сопла до входа в камеру смешения можно регулировать.

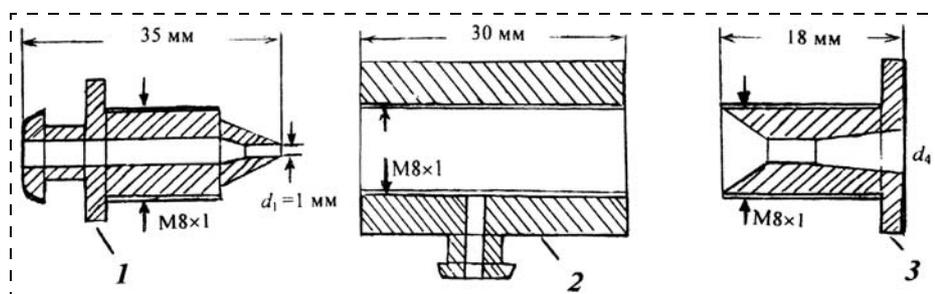


Рис. 3. Составные части или элементы регулируемого микроэжектора, соединяемые с помощью винтовой резьбы:

1 — активное сопло с внешней резьбой  $M8 \times 1$  и штуцером для шланга сжатого воздуха; 2 — корпус со сквозной внутренней резьбой  $M8 \times 1$  и штуцером для отсасываемого воздуха; 3 — блок, состоящий из приемной камеры, камеры смешения и диффузора

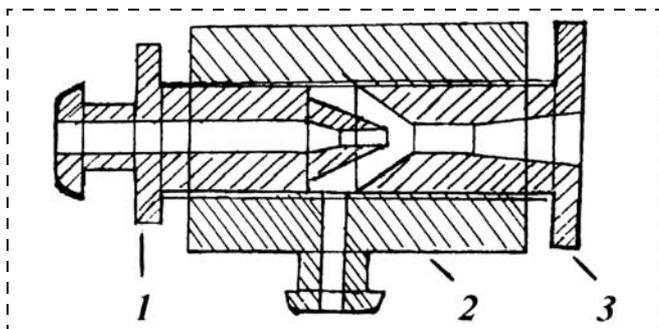


Рис. 4. Конструкция микроэжектора в собранном виде

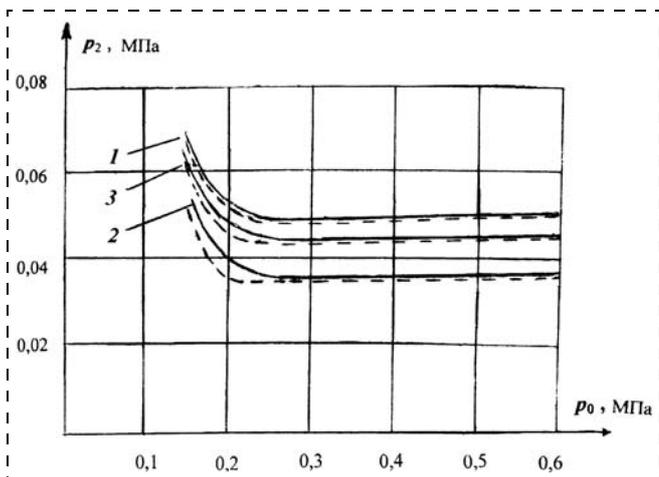


Рис. 5. Экспериментальные зависимости давления  $p_2$  в пассивном сопле от изменений давлений питания  $p_0$  в режимах нагрузки до 0,6 МПа и разгрузки до 0,2 МПа для трех значений отношений  $d_1/d_3$  диаметра среза активного сопла к диаметру камеры смешения: 1 —  $d_1/d_3 = 0,55$ ; 2 —  $d_1/d_3 = 0,6$  и 3 —  $d_1/d_3 = 0,62$

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости давления  $p_2$  от давлений питания  $p_0$  для трех значений отношений  $d_1/d_3$  диаметра среза активного сопла к диаметру камеры смешения:  $d_1/d_3 = 0,55$ ;  $d_1/d_3 = 0,6$  и  $d_1/d_3 = 0,62$ . Результаты показывают, что оптимальным является отношение  $d_1/d_3 \approx 0,6$ , при котором достигается наибольшее значение вакуума. Для разработанного эжектора с оптимальным отношением  $d_1/d_3 = 0,6$  максимальное значение вакуума в захватном устройстве поддерживается в диапазоне изменений давлений питания от 0,2 до 0,6 МПа не только в режиме нагрузки, но и при сбоях подачи давления питания и его падениях с 0,6 до 0,2 МПа.

#### Вакуумные захватные устройства на эжекторном принципе

Процесс движения роботов вертикального перемещения включает в себя осуществление сцепления с поверхностью и дальнейшее движение вдоль этой поверхности. Существуют три основных принципа движения таких роботов:

1) непрерывное движение за счет колесной системы и вакуумной системы, служащей корпусом для скользящего уплотнения, осуществляющего непре-

рывный контакт с поверхностью за счет вакуумного прижима к ней;

2) дискретное пошаговое движение, в котором поступательное движение происходит за счет системы приводов, а сцепление с поверхностью осуществляется в результате поочередного выдвигания захватных вакуумных устройств;

3) комбинированный вариант, когда колесная система объединяется с каждым вакуумным захватным устройством и робот может быстро скользить по ровной поверхности, а система приводов пошагового движения используется, чтобы робот преодолел препятствие или перешел на другую поверхность перемещения.

В данной статье рассматривается второй способ движения и соответствующий этому движению способ создания вакуума в захватных устройствах посредством эжекторов. Возможность перемещения обеспечивается поочередной фиксацией групп вакуумных захватных устройств на поверхностях перемещения. При этом часть захватных устройств фиксируется на поверхности, а остальные за счет системы приводов переносятся в требуемые позиции и в них фиксируются. Затем первая часть захватных устройств открепляется от поверхности и переносится в новое положение и в нем фиксируется, после чего указанный цикл повторяется [1].

Общая схема вакуумного захватного устройства миниатюрных мобильных роботов вертикального перемещения, приведенная на рис. 6, включает эластичный захват 1, внутри которого находится опора сцепления 2, жестко соединенная с приводом подъема-опускания 4 и датчиком положения 5, реализующим обратную связь с системой управления. Эластичный захват 1 оснащен эжектором 3 и жатчиком вакуума 6. Опора сцепления обеспечивает механическую фиксацию с поверхностью и для увеличения сил фиксации снабжена шипами.

Методика испытаний вакуумных захватных устройств в целях выявления основных особенностей эжекторных систем для миниатюрных мобильных роботов вертикального перемещения включает измерения усилий отрыва и сдвига в зависимости от основных режимов А и В.

Для проведения испытаний использовали стенд, описанный в работе [3]. Для эластичного захвата

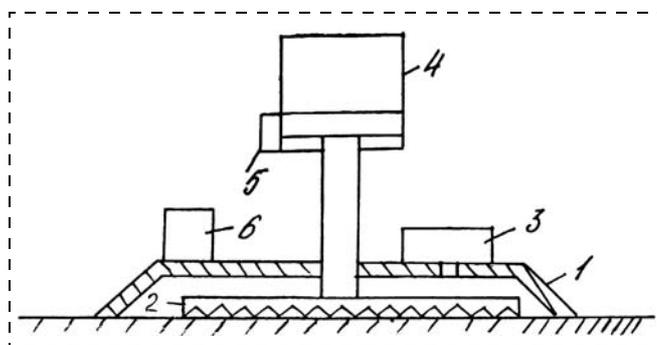


Рис. 6. Общая схема вакуумного захватного устройства

использовался герметик ВИКСИНТ У2-28. Этот герметик способен герметизировать микронеровности на поверхности фиксации и обладает повышенной термостойкостью, что необходимо для таких применений мобильных роботов вертикального перемещения, как проведение противопожарных операций.

На рис. 7 приведены результаты испытаний по определению усилий отрыва и сдвига вакуумных захватных устройств в зависимости от давления питания активного сопла эжектора. Испытания проводили как с сухими поверхностями, так и с поверхностями, смазанными машинными маслами, что позволило моделировать реальные условия эксплуатации мобильных роботов вертикального перемещения, в частности, на резервуарах горючесмазочных материалов. Кривые зависимостей 1 и 2 характеризуют отрыв захвата соответственно от сухой и замасленной поверхности, а зависимости 3 и 4 характеризуют сдвиг захвата на тех же поверхностях. Кривая зависимости 5 получена при комбинированном воздействии на захват отрыва и сдвига на сухой поверхности при температуре 20 °С. Усилие сдвига захватного устройства определяли аналогично усилию отрыва с использованием горизонтального силового цилиндра. Максимальное усилие сдвига на сухой поверхности на 5 % меньше, чем соответствующее максимальное усилие отрыва. На экспериментальном стенде проведены также температурные испытания с помощью нагревательного элемента при разогреве поверхности фикса-

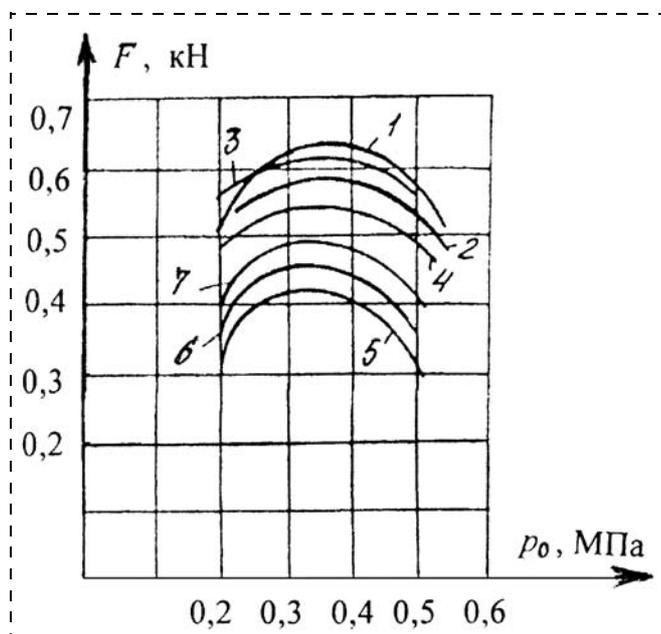


Рис. 7. Результаты испытаний по определению усилий отрыва и сдвига вакуумного захватного устройства в зависимости от давления питания: 1 — отрыв от сухой поверхности; 2 — отрыв от замасленной поверхности; 3 — сдвиг по сухой поверхности; 4 — сдвиг по замасленной поверхности; 5, 6, 7 — комбинированные воздействия отрыва и сдвига при 20 °С (5), при 150 °С (6) и при 300 °С (7) на сухой поверхности

ции до 150 °С и 300 °С. Результаты испытаний представлены на рис. 7 кривыми зависимостей 6 и 7, полученными при комбинированном нагружении захвата на отрыв и на сдвиг. Приведенные на рис. 7 характеристики не меняются для поверхностей фиксации с шероховатостью до 50 мкм. Однако при наличии неровностей и посторонних предметов значение вакуума падает на 40...70 %.

### Заключение

В результате проведенных исследований по миниатюризации систем создания вакуума в захватных устройствах роботов вертикального перемещения на основе прямоструйных эжекторов установлено, что оптимальным является звуковое активное сопло с диаметром на его срезе 1 мм. Выявлен определяющий параметр для обеспечения надежного сцепления с поверхностями в динамических процессах движения роботов вертикального перемещения в неопределенных условиях по непредсказуемым заранее поверхностям. Таким параметром является отношение диаметра среза активного сопла к диаметру камеры смещения, равное 0,6. Эксперименты подтвердили эффективность прямоструйного эжектора, разработанного на указанных принципах для поддержания вакуума на оптимальном уровне при падениях давления питания от 0,6 до 0,2 МПа.

*Работа выполнялась в рамках Программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН № 15 "Фундаментальные проблемы создания волновых и вибрационных машин и технологий", а также при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-08-00374-а "Теоретическое и экспериментальное исследование динамических процессов в миниатюрных роботах с вакуумными контактными устройствами".*

### Список литературы

1. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Фомин Л. Ф., Чашухин В. Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 271 с.
2. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калиниченко С. В., Кравчук Л. Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001. 359 с.
3. Градецкий В. Г., Рачков М. Ю. Роботы вертикального перемещения. М.: ИПМех РАН, 1997. 223 с.
4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1. Учеб. руководство: Для вузов. 5-е изд. перераб. и доп. М.: Наука, Гл. ред физ. мат. лит., 1991. 600 с.
5. Александров В. Ю., Климовский К. К. Оптимальные эжекторы (теория и расчет). М.: Машиностроение, 2012. 136 с.
6. Аркадов Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. М.: Физматлит, 2001. 336 с.
7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учебник для вузов. 7-е изд., исправл. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
8. Соколов Е. Я., Зингер И. М. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
9. Успенский В. А., Кузнецов Ю. М. Струйные вакуумные насосы. М.: Машиностроение, 1973. 144 с.
10. Шерстюк А. Н., Усанов В. В., Розеноер Т. М. Расчет характеристик малоразмерных эжекторов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1979. № 2. С. 166—171.
11. Шерстюк А. Н., Усанов В. В., Розеноер Т. М. Исследование микроэжектора при работе на воздухе и гелии // Химическое и нефтяное машиностроение. 1970. № 3. С. 19—22.

**К. Е. Румянцев**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,  
rke2004@mail.ru,

**С. В. Кравцов**, зав. лабораториями, ассистент,  
krsvtg@rambler.ru,  
ФГАОУ ВПО "Южный федеральный университет"

## Исследование параметрической связи динамики мобильного робота и бортовой бинокулярной системы технического зрения методом спектрального анализа

*Рассматривается задача определения взаимосвязи между требуемыми параметрами бортовой бинокулярной системы технического зрения и допустимой динамикой перемещения платформы мобильного робота. Использован спектральный анализ ошибок измерений ориентиров, необходимых для локализации мобильного робота на местности. В качестве бортовой бинокулярной системы технического зрения анализируется система с двумя сонаправленными цифровыми видеокамерами с идентичными параметрами. Приводятся результаты определения необходимой частоты измерений при реализации различных вариантов построения бортовой бинокулярной системы стереозрения.*

**Ключевые слова:** стереозрение, телевизионные измерения, спектральный анализ, частота измерений

### Введение

В современных областях применения систем технического зрения особо место занимает направление их использования в системах оцувствления робототехники для решения широкого круга задач анализа окружающей обстановки, в том числе координатных (позиционных) измерений объектов фиксируемой сцены. Актуальность использования систем технического зрения продиктована, прежде всего, значительной востребованностью на рынке высоко интеллектуальных робототехнических комплексов с автономным циклом управления и способностью к адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. Перспективным считается использование в мобильных роботах систем стереозрения, поскольку они позволяют формировать объемное представление об окружающей сцене, что способствует расширению функциональности мобильных роботов и повышению эффективности их применения.

В работах [1, 2] приведены математическая и стохастическая модели бинокулярной системы технического зрения (БСТЗ) на сонаправленных цифровых видеокамерах с идентичными параметрами. Применение таких систем считается перспективным для координатных измерений на сцене в силу прогнозируемости качества работы БСТЗ и относительной простоты их программно-аппаратной реализации и интеграции в контур управления мобильного робота.

Несмотря на разнообразие технической литературы с обоснованием использования в мобильных роботах систем стереозрения, необходимо заметить, что дискуссия в основном ведется относительно круга и возможностей решения различных задач с помощью систем стереозрения, без обоснования параметров самих этих систем и привязки к параметрам и динамике перемещения мобильного робота.

Необходимость такой привязки продиктована следующими двумя задачами, которые необходимо рассматривать во взаимосвязи с динамикой перемещения (движения) мобильного робота: во-первых, необходимостью обоснования требований к параметрам БСТЗ и, во-вторых, необходимостью обоснования требований к скорости обработки (передачи) информации.

Цель исследований состоит в определении взаимосвязи между требуемыми параметрами БСТЗ и допустимой динамикой перемещения платформы мобильного робота. В узком смысле исследования затрагивают вопросы определения необходимой частоты измерений при реализации различных вариантов построения бортовой БСТЗ.

В отличие от исследований условий сходимости широко применяемых в системах навигации различных вариантов калмановских фильтров в данной работе использован подход на основе спектрального анализа ошибок измерений ориентиров, необходимых для локализации мобильного робота на местности, при варьировании в допустимых (заданных) пределах параметров БСТЗ.

### Определение параметров измерительного пространства бортовой БСТЗ

Рассмотрим ситуацию (рис. 1), когда в сцене выделен и наблюдается один точечный ориентир  $M$ , удаленный от оптической оси  $0z$  БСТЗ. Платформа движется с постоянной известной скоростью  $v$ , причем направление вектора перемещения совпа-

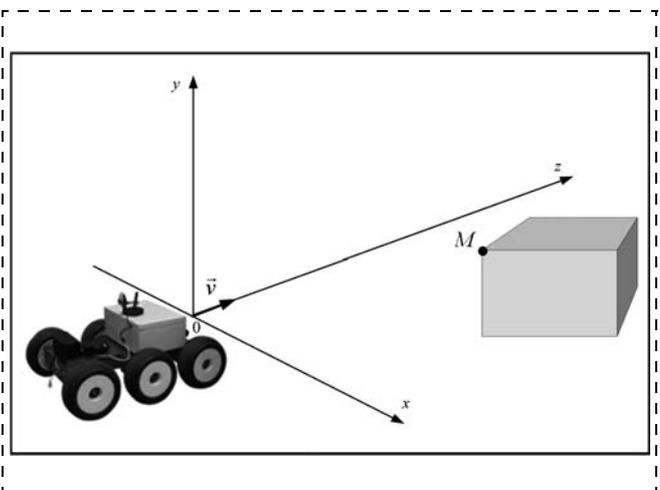


Рис. 1. Наблюдение ориентира  $M$  при движении платформы БСТЗ

дает с направлением оси  $0z$  БСТЗ. Это означает, что в течение определенного времени наблюдения ориентир  $M$  будет приближаться к платформе, пока не выйдет из зоны измерений БСТЗ. Определив параметры БСТЗ и начальные истинные координаты ориентира  $M$ , можно проанализировать результаты координатных измерений, показываемые на трассе перемещения платформы, в сравнении с истинным положением ориентира. Пример координатных измерений БСТЗ и истинная траектория ориентира при перемещении платформы мобильного робота приведены на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

Координатные измерения ориентира БСТЗ сопровождаются ошибками, которые могут достигать значительных значений на больших удалениях. Анализ ошибок измерений [2] показал, что несмещенность оценок достигается ограничением глубины измерений БСТЗ. При коэффициенте асимметрии распределений ошибок измерений по глубине меньше 0,1 ограничивающая глубина измерений БСТЗ должна определяться значениями диспарантности  $d$  (пиксельной разности отображения точки в снимках стереопары) больше 20 пикселей. Приняв значение диспарантности 20 пикселей, определим размеры измерительного пространства БСТЗ для варьируемых параметров  $b$  стереобазы и фокусных расстояний  $f$  видеокамер (ВК) при размерности фотоматриц  $1600 \times 1200$  пикселей и размере пикселя  $\Delta = 3$  мкм. Такие параметры соответствуют широкому кругу мегапиксельных камер со сменной оптикой, например ВК типа V2.920 Veward. Значения стереобазы БСТЗ варьируются от 0,1 до 1,5 м из соображений компактного размещения элементов стереосистемы на шасси мобильного робота. Фокусные расстояния объективов видеокамер измерялись в пределах от 3 до 80 мм.

Результаты расчетов параметров границ измерительного пространства БСТЗ представлены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

На рис. 3, *a* приведены определения параметров границ измерительного пространства БСТЗ:  $z_{\max}$  — ограничивающая глубина измерений БСТЗ;  $z_{\min}$  — глубина слепой зоны;  $x_{\max}$  — ширина зоны измерений на  $z_{\max}$ ; а рис. 3, *b—г* демонстрируют зависимости этих параметров от стереобазы  $b$  БСТЗ и фокусных расстояний  $f$  видеокамер.

При заданных параметрах измерительного пространства БСТЗ обеспечивается несмещенность ошибок измерений по всем координатам. Значения среднеквадратических отклонений (СКО) интегральных ошибок измерений [2]  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  по координатам  $x, y, z$  локальной системы координат для ограниченного заданной диспарантностью  $d$  изме-

рительного пространства БСТЗ определяются соотношениями

$$\sigma_x|_d \approx 0,16 \frac{b\left(\frac{N}{2} - d\right)}{d(d-1)};$$

$$\sigma_y|_d \approx 0,77 \sigma_x|_d \text{ — для формата фотоматриц 4:3;}$$

$$\sigma_z|_d \approx 0,27 \frac{fb}{d(d-1)\Delta},$$

где  $N$  — размерность фотоматриц по горизонтали.

Результаты расчета  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  при  $d = 20, \Delta = 3$  мкм,  $N = 1600$  и варьируемых значениях  $b$  стереобазы и  $f$  фокусных расстояний ВК приведены на рис. 4 (см. вторую сторону обложку).

Интегральные ошибки измерений, характеризующие все измерительное пространство, ограниченное заданной глубиной, показывают возможные ошибки при измерениях любого ориентира, который может быть определен в любом месте измерительного пространства БСТЗ. В случае траекторного измерения конкретного ориентира (см. рис. 1) следует ожидать меньших значений СКО ошибок измерений по поперечным координатам  $x$  и  $y$  локальной системы координат.

Наибольший вклад в ошибки измерений вносят измерения глубины точек сцены (рис. 4, *в*), СКО которых растет с ростом значения стереобазы и фокусных расстояний. Несмотря на рост СКО ошибок измерений глубины точек сцены, его отношение к значению ограничивающей глубины измерений БСТЗ показывает для всех вариантов построения стереосистемы значение 1,35 %.

### Определение предельной частоты измерений БСТЗ

В работе [3] рассмотрена задача определения точности позиции в локальной системе координат мобильного робота по данным измерений БСТЗ. В частности, проанализирована ситуация оптимального выбора двух ориентиров, обеспечивающих преемственность измерений при наилучшей точности позиционирования. Преемственность означает, что ориентиры при перемещении платформы мобильного робота на определенную дистанцию не должны выходить из зоны измерений БСТЗ. Для прямолинейного перемещения зона поиска в пространстве таких ориентиров показана на рис. 3, *a* (см. вторую сторону обложки) треугольником со сплошным заполнением. Зона поиска располагается вокруг оси  $z$  БСТЗ с возможной областью разнесения по оси  $x$  на величину  $x_{\text{изм}}$ . При этом ориентиры, выбранные из зоны поиска, могут наблюдаться при прямолинейном перемещении платформы на дистанции не менее  $z_{\text{изм}}$ .

Если полагать, что  $z_{\max} \gg z_{\min}$ , то тогда  $x_{\text{изм}}/x_{\max} \approx (1 - z_{\text{изм}}/z_{\max})$ . Определив  $x_{\text{изм}}$ , можно говорить о делении измерительного пространства БСТЗ на области, где выделенные ориентиры будут

представлять для мобильного робота интерес с точки зрения измерительных задач и где не будут. Область, представляющая интерес для решения измерительных задач, определена на рис. 3, а многоугольником с вертикальным штриховым заполнением. Примечательно то, что с точки зрения решения других задач, например определения проходимости или преодоления препятствий, можно прийти к аналогичному разбиению поля зрения БСТЗ на данные области.

С какой частотой необходимо проводить измерения ориентира в области, представляющей интерес для решения измерительных задач? Проанализируем энергетический спектр  $G^2(\Omega)$  радиуса отклонений  $R(z)$  (флуктуаций) точечных оценок ( $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$ ) ориентира от истинного положения ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) по пространственной частоте  $\Omega$  на прямолинейном участке перемещения платформы мобильного робота, протяженностью не менее  $z_{\text{изм}}$  от  $z_{\text{н}}$  до  $z_{\text{к}}$ , ( $z_{\text{н}} - z_{\text{к}}$ )  $\geq z_{\text{изм}}$ :

$$G^2(\Omega) = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{z_{\text{н}}}^{z_{\text{к}}} R(z) e^{-j2\pi\Omega z} dz \right|^2,$$

где  $R(z) = \sqrt{(x - \hat{x}(z))^2 + (y - \hat{y}(z))^2 + (z - \hat{z}(z))^2}$ .

Реализации  $G^2(\Omega)$  показывают распределение энергии флуктуаций точности координатных измерений на трассе наблюдения. Предварительный анализ реализаций пространственного спектра показал зависимость его протяженности от варьируемых параметров БСТЗ, а также от траектории наблюдаемого ориентира. В частности, рост протяженности спектра  $G^2(\Omega)$  обуславливается увеличением расстояния по оси  $x$  между оптической осью БСТЗ и ориентиром. Для анализа зададим  $z_{\text{изм}}/z_{\text{max}} = 2/3$ . Вариацию параметров БСТЗ выберем в таком же диапазоне, как и для расчета параметров границы зоны измерений. Траекторию наблюдаемого ориентира определим по максимальному значению разнесения от оптической оси БСТЗ по координате  $x$  для заданного значения  $z_{\text{изм}}$  дистанции наблюдения, т. е. на границе области, представляющей интерес для решения измерительных задач.

Определив уровень концентрации энергии флуктуаций точности координатных измерений на трассе наблюдения, например в 90 %, можно судить о верхней частоте  $\Omega_{\text{в}}$  пространственного спектра  $G^2(\Omega)$ . Результаты определения верхней частоты  $\Omega_{\text{в}}$  пространственного спектра  $G^2(\Omega)$  представлены на рис. 5 (см. вторую сторону обложки).

Уровень концентрации энергии флуктуаций точности координатных измерений на трассе наблюдения определяет значение  $\Omega_{\text{в}}$  верхней частоты пространственного спектра  $G^2(\Omega)$ . При его увеличении увеличивается и значение верхней частоты  $\Omega_{\text{в}}$ .

Значение верхней частоты  $\Omega_{\text{в}}$  определяет степень точности представления получаемых измерений при переходе от непрерывного наблюдения к дискретному. Следовательно, зная верхнюю частоту  $\Omega_{\text{в}}$

спектра  $G^2(\Omega)$ , можно определить значение частоты измерений ориентира по глубине  $\Omega_{\text{изм}} \geq 2\Omega_{\text{в}}$  или предельного шага измерений по глубине  $dz \leq 1/(2\Omega_{\text{в}})$ . В этом случае понятие частоты измерений совпадает со смыслом трактовки необходимой частоты дискретизации по теореме Котельникова [4], устанавливающей связь между непрерывным и дискретным представлением сигнала. Для того, чтобы совокупность измерений ориентира на всей трассе его наблюдения была правильно представлена, необходимо, чтобы частота измерений была не ниже удвоенного значения  $\Omega_{\text{в}}$  верхней частоты спектра отклонений точечных оценок ориентира от истинной и траектории.

### Взаимосвязь предельной частоты измерений с динамикой перемещения платформы мобильного робота

Требование обеспечения заданного значения частоты измерений определяет пределы динамики (скорости) продольного перемещения мобильного робота. Допустим, что условия наблюдения ориентира и вычислительные мощности БСТЗ позволяют проводить измерения ориентира в каждом кадре видеопотока. Пусть частота видеопотока  $f_{\text{пот}}$  составляет 30 кадров за секунду. Предельные скорости  $v = f_{\text{пот}} dz$  продольного перемещения мобильного робота, оборудованного различными вариантами БСТЗ, приведены на рис. 6 (см. вторую сторону обложки).

Полученные результаты вполне логичны. Более быстроходные роботы должны иметь большие размеры (исходя из размеров стереобазы) и оборудованы БСТЗ с длиннофокусными ВК или, образно говоря, для более быстрого перемещения необходимо видеть дальше. Однако проведенного анализа недостаточно, чтобы делать окончательные выводы о требуемых параметрах БСТЗ, поскольку взаимосвязь между требуемыми параметрами БСТЗ и допустимой динамикой перемещения платформы мобильного робота выявлена для идеальных условий перемещения (без траекторных нестабильностей).

Для детального анализа, конечно же, необходимы полные данные об условиях внешней среды эксплуатации мобильного робота, которые могут существенным образом влиять как на динамику перемещения, так и на границы измерительного пространства БСТЗ. В связи с этим не лишним будет рассмотреть данные (рис. 7, см. вторую сторону обложки) по углу поля зрения БСТЗ  $\alpha$  (см. рис. 3, а), которые накладывают требования на системы стабилизации локальной системы координат мобильного робота. Задача стабилизации локальной системы координат мобильного робота может решаться с помощью методов стабилизации как самой платформы мобильного робота, так и изображений в видеопотоке. К примеру, если говорить о требовании обеспечения угловой стабильности локальной системы координат в 1 %, то для широкофокусных

Стереобаза, м	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5
Фокусные расстояния ВК, мм	5	8	8	16	30	30	50	80
$z_{\max}$ — ограничивающая глубина измерений, м	7,94	38,10	63,49	127,00	333,30	476,20	952,40	1905,00
$z_{\min}$ — глубина слепой зоны, м	0,10	0,50	0,83	1,67	4,38	6,25	12,50	25,00
$x_{\max}$ — ширина зоны измерений на $z_{\max}$ , м	7,42	22,60	37,10	37,10	51,94	74,21	89,04	111,31
Угол поля зрения по $x$ , °	57,85	34,47	34,47	16,86	8,95	8,95	5,36	3,35
СКО интегральных измерений по	$x$ , м	0,03	0,09	0,15	0,15	0,21	0,30	0,45
	$y$ , м	0,02	0,06	0,11	0,11	0,16	0,23	0,34
	$z$ , м	0,11	0,52	0,86	1,71	4,51	6,43	12,86
$x_{\text{изм}}$ при $z_{\text{изм}}/z_{\text{max}} = 2/3$ , м	2,47	7,53	12,37	12,37	17,31	24,73	29,68	37,10
Верхняя частота $\Omega_{\text{в}}$ по уровню 90 % энергии $G^2(\Omega)$ , 1/м	174,31	37,59	22,55	11,47	4,39	3,07	1,54	0,77
Предельная скорость продольного перемещения, м/с (скорость видеопотока 30 кадров за секунду)	0,09	0,40	0,67	1,31	3,42	4,89	9,74	19,56

БСТЗ (см. рис. 7) это означает возможные отклонения в доли градуса, для узкофокусных БСТЗ речь будет идти уже о долях угловых минут.

В таблице приведены несколько примеров определения параметрической связи между допустимой динамикой продольного перемещения мобильного робота и бортовой БСТЗ.

Приведенный подход не противоречит исследованиям условий сходимости и устойчивости линейных фильтров, в том числе и различных вариантов фильтров Калмана, применяемых для уточнения (сглаживания) результатов траекторных измерений. Широко применяемые в таких фильтрах одометрические датчики для расчета эволюции (экстраполяции) состояния системы требуют измерений с определенной частотой в силу их инерционности и склонности к накоплению ошибок. При точной модели экстраполяции состояния системы (случай идеального одометрического датчика) параметры измерителей внешней среды (в нашем случае БСТЗ), если обеспечена несмещенность ошибок измерений и их нормальное распределение, практически не играют никакой роли, так как сглаженные значения состояния системы очень быстро приходят в соответствие с точными значениями экстраполяционной модели состояния системы. Поэтому определяющую роль в устойчивости работы линейных фильтров в основном играют точностные параметры одометрических датчиков.

Представленный подход на основе спектрального анализа ошибок измерений определяет условия представительности измерений при переходе от непрерывного наблюдения к дискретному. Это позволяет выявить параметрическую связь между системой стереозрения и предельной динамикой перемещения мобильного робота. Такой анализ обогащает (дополняет) исследования условий сходимости и устойчивости линейных фильтров, поскольку позволяет формулировать требования к параметрам бортовых измерителей внешней среды мобильного робота.

## Заключение

Задача обоснования параметров БСТЗ мобильного робота является сложной многоуровневой проблемой, требующей не только формулировки задач, решаемых БСТЗ, но и учета информации о возможной динамике перемещения мобильного робота и условиях внешней среды.

В результате исследований установлено, что взаимосвязь между требуемыми параметрами бортовой бинокулярной системы технического зрения и допустимой динамикой перемещения платформы мобильного робота может быть проанализирована посредством спектрального анализа ошибок измерений ориентиров, необходимых для локализации мобильного робота на местности.

Рассмотренный подход к спектральному анализу ошибок измерений распространим и для анализа вариантов построения стационарных БСТЗ, работающих по динамическим объектам в зоне измерений. При этом задача обоснования параметров БСТЗ упрощается, поскольку нет необходимости рассматривать вопросы стабилизации локальной системы координат БСТЗ.

## Список литературы

1. Румянцев К. Е., Кравцов С. В. Анализ измерительного пространства цифровой телевизионной стереоскопической системы. Точечное и интервальное оценивание координат точек трехмерной сцены // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. Т. 7. № 3. С. 38–48.
2. Румянцев К. Е., Кравцов С. В. Анализ ошибок измерений глубины точек трехмерной сцены цифровой телевизионной стереоскопической системой // Радиотехника. 2011. № 9. С. 83–93.
3. Румянцев К. Е., Кравцов С. В. Оптимизация выбора пар ориентиров для позиционирования по данным измерений цифровой телевизионной системы стереозрения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 4. С. 12–21.
4. Котельников В. А. О пропускной способности "эфира" и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук. 2006. № 7. С. 762–770.

**В. А. Фурсов**, д-р техн. наук, зав. кафедрой, проф.,  
fursov@ssau.ru,

**Е. В. Гошин**, аспирант,

**С. А. Бибиков**, канд. техн. наук, ассистент,  
Институт систем обработки изображений РАН,  
Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

## Реконструкция 3D-сцен на пучках эпиполярных плоскостей стереоизображений

*Рассматривается задача реконструкции 3D-сцен по стереопарам изображений. В отличие от традиционных технологий, в которых реализуются этапы ректификации и построения карт диспаратности, в данном случае соответствующие точки определяются непосредственно на эпиполярных линиях каждой заданной эпиполярной плоскости, а полная трехмерная модель объекта строится путем сканирования 3D-сцены пучками плоскостей. Приводятся результаты экспериментов, иллюстрирующие эффективность предлагаемой технологии.*

**Ключевые слова:** стереопара изображений, реконструкция 3D-сцены, проективная геометрия, эпиполярная геометрия, пучок эпиполярных плоскостей

### Введение

В системах управления роботами и манипуляторами определение траекторий и выработка сигналов управления движением осуществляются на основе анализа 3D-сцен. Для этого часто используются модели 3D-сцен, представляющие собой множество точек координат объектов сцены, сформированное с использованием стереоизображений. Реконструкция 3D-сцены по стереопаре изображений основана на том, что для каждой точки на одном изображении выполняется поиск соответствующей ей точки на другом изображении, затем по паре соответствующих точек определяют координаты их прообраза в трехмерном пространстве. Соответствующие точки на изображениях ищутся на так называемых эпиполярных линиях, которые определяются с использованием заданной (или вычисленной по заданным тестовым соответствующим точкам) фундаментальной матрицы [1, 2]. Для упрощения поиска соответствующих точек обычно осуществляют предварительную ректификацию (rectification) изображений путем проективного преобразования. Используется один из двух методов ректификации: планарная (плоскостная) и полярная ректификация [3, 4].

При планарной ректификации осуществляют проективное преобразование изображений таким образом, чтобы соответствующие эпиполярные линии находились на одних и тех же горизонтальных прямых, параллельных сторонам изображения. Если

в результате планарной ректификации для точки с координатами  $(x_0, y_0)$  соответствующая ей эпиполярная линия описывается уравнением  $x = x_0$ , то для каждой точки соответствующую ей парную точку можно искать в той же строке изображения, полученного со второй камеры.

Проблеме построения эффективных алгоритмов ректификации уделяется большое внимание. В частности, в работе [5] решалась задача выбора оптимального на множестве допустимых проективных преобразований алгоритма планарной ректификации. Планарная ректификация оказывается невозможной в случае, когда эпиполлюсы расположены на изображениях, поскольку при этом в результате преобразования размеры изображения становятся бесконечно большими. Размеры преобразованного изображения могут оказаться неприемлемо большими и в случаях, когда эпиполлюсы близки к изображениям. В статье [6] рассматривалась технология ректификации для "гетерогенных и некалиброванных изображений", возникающих в случае регистрации изображений камерами с разным фокусным расстоянием при совпадающих или близких направлениях главной оптической оси. Обычно используемые методы ректификации в этом случае, скорее всего, будут неработоспособны.

Альтернативой являются методы, использующие полярную ректификацию [4]. Этот подход позволяет избежать проблем ректификации на плоскости. В частности, метод работоспособен в случае, когда эпиполлюсы находятся на изображении, а также не вносятся искажения, связанные с проективными преобразованиями. В работе [7] метод полярной ректификации развит для случая, когда один эпиполлюс находится на изображении, а другой — в бесконечности.

Завершающим этапом традиционных технологий 3D-реконструкции обычно является формирование карт диспаратности. На этом этапе основные проблемы возникают из-за того, что окно для поиска соответствующих точек должно быть достаточно большим, чтобы улавливать изменения яркости, но не настолько большим, чтобы оказывали заметное влияние проективные искажения. Эти проблемы рассматривались в работе [8]. При решении задачи реконструкции трехмерной сцены по картам диспаратности, вследствие ошибок в определении соответственных точек, часто возникает проблема получения точечных оценок координат объектов. Связано это с тем, что из-за относительных смещений соответствующих точек лучи, на пересечении которых находится искомая точка в трехмерном пространстве, также оказываются смещенными и не пересекаются. Связанные с этой проблемой трудности триангуляции рассматривались в работе [9].

В данной статье предлагается технология реконструкции 3D-сцены, позволяющая в значительной степени избежать указанных недостатков. Метод в идейном плане близок к схеме полярной ректификации, однако в явном виде ректификация не про-

водится. В данном случае по соответствующим точкам последовательно вычисляются координаты точек трехмерной сцены, принадлежащих *одной* эпиполярной плоскости. Полная трехмерная модель сцены строится посредством объединения точек, полученных на множестве (пучке) плоскостей, проходящих через центры обеих камер.

### 1. Формализация задачи

В данной работе используется модель камеры-обскуры [10]. Рассматривается случай, когда параметры камер, а также их координаты и ориентация известны. Для их характеристики вводятся матрицы параметров камер:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & u_{10} \\ 0 & f_1 & v_{10} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} f_2 & 0 & u_{20} \\ 0 & f_2 & v_{20} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $f, i = 1, 2$ , — фокусные расстояния камер;  $(u_0, v_0)$ ,  $i = 1, 2$ , — координаты главных точек камер в системах координат, связанных с камерами [11].

Введем в рассмотрение глобальную систему координат и системы координат первой и второй камеры с центрами, соответственно, в точках  $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2$  глобальной системы координат. Ни одна из этих двух точек, в общем случае, не совпадает с началом глобальной системы координат.

Пусть  $\mathbf{M}$  — вектор координат некоторой точки в глобальной системе координат. Векторы координат этой точки в системах координат первой —  $\mathbf{m}_1$  — и второй —  $\mathbf{m}_2$  — камер определяются как [11]

$$\mathbf{m}_1 = \mathbf{P}_1 \mathbf{M}; \quad (2)$$

$$\mathbf{m}_2 = \mathbf{P}_2 \mathbf{M}, \quad (3)$$

где матрицы проекций определяются как

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{K}_1 [\mathbf{R}_1 \ ; \ \mathbf{t}_1], \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{K}_2 [\mathbf{R}_2 \ ; \ \mathbf{t}_2]. \quad (5)$$

Здесь  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$  — матрицы размерности  $3 \times 3$ , описывающие поворот систем координат первой и второй камер относительно глобальной, а  $\mathbf{t}_1 = [t_{1,x}, t_{1,y}, t_{1,z}]^T$ ,  $\mathbf{t}_2 = [t_{2,x}, t_{2,y}, t_{2,z}]^T$  — координаты начала глобальной системы координат в системах координат первой и второй камер соответственно, определяемые как

$$\mathbf{t}_1 = -\mathbf{R}_1 \mathbf{c}_1, \quad (6)$$

$$\mathbf{t}_2 = -\mathbf{R}_2 \mathbf{c}_2. \quad (7)$$

Если известны соответствующие в силу (2), (3) проекции  $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$  точки  $\mathbf{M}$  на изображениях первой и второй камер, координаты точки  $\mathbf{M}$  в трехмерном пространстве могут быть вычислены как пересечение лучей  $(\mathbf{c}_1, \mathbf{m}_1)$  и  $(\mathbf{c}_2, \mathbf{m}_2)$ . Вследствие ошибок в определении координат соответствующих точек эти лучи, скорее всего, пересекаются не будут. По-

этому, обычно, строят некоторые оценки координат точки  $\mathbf{M}$ , например, методом "средней точки", линейной триангуляции и др. [9] Источником ошибки в определении соответствующих точек являются ошибки в задании параметров внутренней и внешней калибровки, а также искажения изображений вследствие ректификации.

В предлагаемой технологии ректифицированные изображения не формируются. Соответствия ищутся непосредственно на эпиполярных линиях, принадлежащих одной плоскости. Затем для каждой пары соответствующих точек этой плоскости вычисляются пространственные координаты точек сцены. Для полной реконструкции трехмерной сцены осуществляется поиск соответствий на эпиполярных линиях пучка плоскостей, проходящих через центры обеих камер. Поскольку при этом лучи, на пересечении которых определяются координаты точек сцены в трехмерном пространстве, принадлежат одной плоскости, ошибки, характерные для случая реконструкции по картам диспарантности (из-за того, что лучи  $\mathbf{c}_1, \mathbf{m}_1$  и  $\mathbf{c}_2, \mathbf{m}_2$  скрещиваются), отсутствуют.

### 2. Определение соответствующих точек

Зададим некоторую точку  $\mathbf{m}_1$  на первом изображении, тогда становится известной эпиполярная плоскость  $\Pi$  и соответствующие этой точке эпиполярные прямые  $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ . Ясно, что при точном задании матриц проекций соответствующая точка  $\mathbf{m}_2$  на изображении второй камеры обязана лежать на прямой  $\mathbf{I}_2$ .

В действительности, вследствие ошибок различной природы, возникающих при регистрации изображений, координаты точки  $\hat{\mathbf{m}}_2$ , которая одним из известных способов [12, 13] может быть определена как соответствующая точке  $\mathbf{m}_1$ , скорее всего, будут отличаться от координат точки  $\mathbf{m}_2$ . Более того, точка  $\hat{\mathbf{m}}_2$  может не лежать на прямой  $\mathbf{I}_2$ . В этом последнем случае лучи, проходящие через точки  $(\mathbf{c}_1, \mathbf{m}_1)$  и  $(\mathbf{c}_2, \hat{\mathbf{m}}_2)$ , как указывалось выше, принадлежат разным плоскостям и не пересекаются (скрещиваются). Для того чтобы избежать этих проблем, будем искать точку  $\hat{\mathbf{m}}_2$ , ближайшую, в заданном смысле, к точке  $\hat{\mathbf{m}}_2$ , при условии, что эта точка находится на эпиполярной прямой  $\mathbf{I}_2$ . Ясно, что при этом оценка  $\mathbf{M}$  пространственных координат точки  $\mathbf{M}$  обязана лежать в плоскости  $\Pi$  на пересечении лучей  $(\mathbf{c}_1, \mathbf{m}_1)$  и  $(\mathbf{c}_2, \hat{\mathbf{m}}_2)$ .

Для определения соответствующих точек обычно сравнивают фрагменты изображений в их окрестностях. В данном случае, вследствие проективных искажений, эти фрагменты для соответствующих точек могут различаться. При этом характер и степень искажений в разных соответственных локальных областях на изображениях первой и второй камер будут различными. Тем не менее, в непосредственной близости от соответствующих точек эти искажения близки по своим свойствам

к аффинным, и распределения яркости могут обладать значительным сходством. На основе указанного свойства можно сформулировать процедуру определения соответствующих точек с использованием малых (элементарных) фрагментов, которая представлена ниже.

Соответствующие точки ищутся на множествах точек, заданных с некоторым шагом на эпилюлярных линиях  $I_1$  и  $I_2$ . Подчеркнем, что указанные точки не обязаны совпадать с пикселями на изображении. В качестве элементарных фрагментов конкретной пары точек из указанных множеств на изображениях рассматриваются окрестности этих точек, ограниченные квадратами, вершинами которых являются четыре ближайших пикселя изображения, т. е. стороны квадрата ограничиваются двумя соседними (по строкам и столбцам) пикселями. Будем полагать, что расстояние между ближайшими пикселями равно единице, а координаты вершин единичного квадрата заданы в связанной с ним системе отсчета и равны соответственно  $(0,0)$ ,  $(0,1)$ ,  $(1,0)$ ,  $(1,1)$ .

Пусть  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  — заданные в системах отсчета, связанных с единичными квадратами, координаты принадлежащих этим единичным квадратам соответствующих точек, лежащих на эпилюлярных линиях  $I_1, I_2$ , а  $f(x_1, y_1), f(x_2, y_2)$  — значения яркости в этих точках, полученные путем билинейной интерполяции отсчетов функции распределения яркости —  $f_1(0,0), f_1(0,1), f_1(1,0), f_1(1,1)$  и  $f_2(0,0), f_2(0,1), f_2(1,0), f_2(1,1)$  в угловых точках единичных квадратов:

$$f(x_1, y_1) \approx a_1 + b_1x_1 + c_1y_1 + d_1x_1y_1; \quad (8)$$

$$f(x_2, y_2) \approx a_2 + b_2x_2 + c_2y_2 + d_2x_2y_2, \quad (9)$$

где

$$a_1 = f_1(0,0), \quad a_2 = f_2(0,0);$$

$$b_1 = f_1(1,0) - f_1(0,0), \quad b_2 = f_2(1,0) - f_2(0,0);$$

$$c_1 = f_1(0,1) - f_1(0,0), \quad c_2 = f_2(0,1) - f_2(0,0);$$

$$d_1 = f_1(0,0) - f_1(1,0) - f_1(0,1) + f_1(1,1);$$

$$d_2 = f_2(0,0) - f_2(1,0) - f_2(0,1) + f_2(1,1).$$

Тогда

$$f(x_1, y_1) \approx f(x_2, y_2). \quad (10)$$

Конечно, это равенство само по себе может служить признаком соответствия точек  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ , однако при попытке его использования для отыскания соответствующих точек на всей длине эпилюлярных линий, точек, удовлетворяющих этому равенству, может оказаться достаточно много.

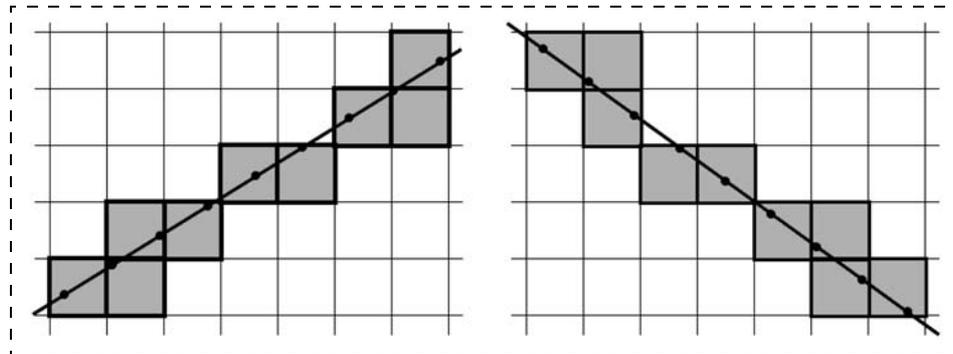


Рис. 1. Пример формирования составных фрагментов

Для повышения надежности сопоставления точек наряду с условием (10) для "центральных" единичных квадратов, содержащих соответствующие точки, будем сопоставлять также характеристики нескольких присоединенных к центральному единичных квадратов, построенных в окрестностях заданных на эпилюлярных линиях соседних точек. Фрагменты, составленные из нескольких единичных квадратов, будем называть составными, а интерполированные значения яркостей в заданных точках эпилюлярных линий, принадлежащих этим квадратам, будем обозначать  $f^{(k)}(x_1, y_1), f^{(k)}(x_2, y_2)$ ,  $k = \overline{1, N}$ , где  $N$  — число элементарных квадратов (вместе с центральным), а  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  — координаты заданных на эпилюлярных линиях  $I_1, I_2$  точек в системах отсчета, связанных с единичными квадратами.

На рис. 1 приведены примеры формирования составных фрагментов на стереоизображениях для девяти заданных точек вдоль эпилюлярных линий  $I_1, I_2$ . Подчеркнем, что при сопоставлении фрагментов на изображениях первого и второго изображений стереопары должен соблюдаться одинаковый порядок следования заданных точек. При этом, в зависимости от заданного шага, возможно попадание нескольких точек на один элементарный фрагмент.

В качестве признаков соответствия составных фрагментов наряду с условием (10), которое проверяется для всех заданных точек (единичных квадратов), принадлежащих составному фрагменту, будем использовать также информацию о характеристиках градиентов на этих же элементарных фрагментах. В частности, будем рассматривать два типа дескрипторов:

1. Дескрипторы, составленные из значений яркости и норм векторов градиентов:

$$f^{(k)}(x_1, y_1), f^{(k)}(x_2, y_2), \quad k = \overline{1, N}, \quad (11)$$

$$|\text{grad } f^{(k)}(x_1, y_1)|, |\text{grad } f^{(k)}(x_2, y_2)|, \quad k = \overline{1, N}, \quad (12)$$

вычисленных в  $N$  заданных вдоль эпилюлярных линий точках путем билинейной интерполяции значений этих характеристик в угловых точках соответствующих единичных квадратов. Достоинство этого дескриптора — простота реализации, так как

указанные характеристики не зависят от направления эпиполярной линии.

2. Дескрипторы второго типа, у которых в описании заданных точек кроме интерполированных значений яркости и норм векторов градиентов включаются также значения градиентов по направлениям  $x, y$  в точках  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ :

$$\text{grad}_x f^{(k)}(x_1, y_1), \text{grad}_y f^{(k)}(x_1, y_1), k = \overline{1, N}; \quad (13)$$

$$\text{grad}_x f^{(k)}(x_2, y_2), \text{grad}_y f^{(k)}(x_2, y_2), k = \overline{1, N}. \quad (14)$$

Это приводит к некоторому усложнению реализации, так как при определении соответствий необходимо вычислять ориентацию указанных градиентов относительно направлений эпиполярных линий, однако число ошибочных решений при этом существенно уменьшается.

Для формирования дескрипторов можно использовать также непосредственно значения градиентов в заданных, например угловых, точках единичных квадратов на эпиполярных линиях. Однако это приведет к существенному усложнению реализации, поскольку при этом необходимо следить за тем, чтобы были одинаковыми не только число компонент векторов признаков, но и порядок их следования относительно эпиполярных линий.

### 3. Определение координат сцены

После того как установлено соответствие точек  $\mathbf{m}_1, \hat{\mathbf{m}}_2$ , остается вычислить координаты точки  $M$ . Для решения этой задачи соотношения (2), (3) с учетом (4), (5), (6), (7) для однородных координат перепишем в виде

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{g_1} \mathbf{K}_1 \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \mathbf{c}_1; \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{g_2} \mathbf{K}_2 \mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \mathbf{c}_2, \quad (16)$$

где  $[x_1, y_1, 1]^T = \mathbf{m}_1, [x_2, y_2, 1]^T = \hat{\mathbf{m}}_2$ .

Приравняв векторы координат в четырехмерном пространстве из равенств (11), (12), получаем:

$$g_1 \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{K}_1^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} - g_2 \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{K}_2^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_1. \quad (17)$$

Соотношение (17) представляет собой систему из трех уравнений относительно двух неизвестных  $g_1$  и  $g_2$ .

Поскольку точки  $\mathbf{m}_1$  и  $\hat{\mathbf{m}}_2$  найдены с учетом эпиполярных ограничений, им соответствует единственная точка в пространстве, поэтому  $g_1$  и  $g_2$  также

определяются единственным образом. Далее с использованием соотношения (15) или (16) рассчитывается значение координат точки  $M$  для заданной точки  $\mathbf{m}_1$  и найденной оценки  $\hat{\mathbf{m}}_2$  соответствующей точки  $\mathbf{m}_2$ . Указанные вычисления повторяются для всех пар соответствующих точек, принадлежащих эпиполярным линиям одной плоскости, а полная картина трехмерной сцены формируется путем объединения всех таких точек, полученных на заданном пучке плоскостей.

### 4. Пример реализации

Для экспериментальной проверки работоспособности разработанной технологии использовали трехмерную модель сцены, представляющую собой плоскость с расположенными на ней предметами. Модель 3D-сцены строили с использованием программы трассировки лучей POV-Ray.

На рис. 2 показан общий вид полученной путем моделирования и использовавшейся в экспериментах сцены. На рис. 3, а и 3, б приведены два стереоизображения указанной сцены, полученные при следующих параметрах камер (здесь и далее индексы 1 и 2 применяются для левого и правого вида соответственно):

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{K}_2 = \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 400 & 0 & 400 \\ 0 & 400 & 300 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 0,984808 & 0 & 0,173648 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0,173648 & 0 & 0,984808 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -10 \end{bmatrix}.$$

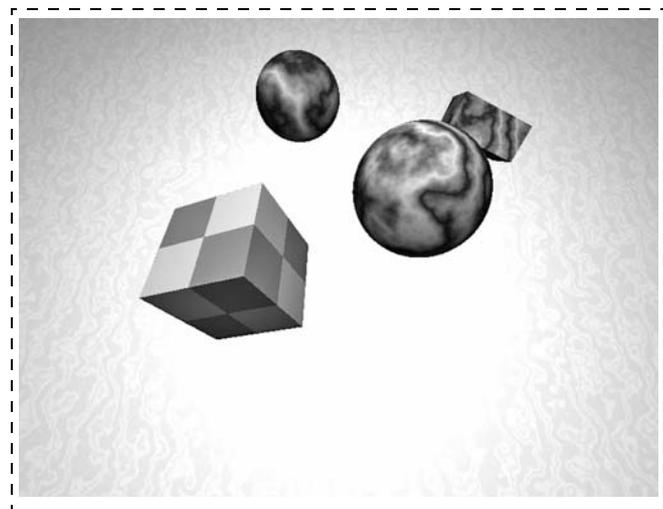


Рис. 2. Общий вид сцены

По указанным параметрам камер вычислена фундаментальная матрица:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 7,66292 \cdot 10^{-6} & -0,00229887 \\ 0 & 0 & -0,0176516 \\ 0 & 0,0143183 & 1 \end{bmatrix},$$

с использованием которой далее в эксперименте осуществлялась генерация эпиполярных плоскостей и эпиполярных линий на изображениях левого и правого видов.

Для сопоставления точек на эпиполярных линиях использовали следующие четыре вида описаний:

1. Векторы размерности  $3 \times 1$ , составленные из характеристик яркости (11) и двухкомпонентных векторов (13), (14) для одного элементарного фрагмента, "охватывающего" заданную точку на эпиполярной линии.

2. Векторы размерности  $9 \times 1$ , составленные только из характеристик яркости (11) девяти расположенных вдоль эпиполярной линии элементарных фрагментов.

3. Векторы  $18 \times 1$ , составленные из характеристик яркости (11) и градиентов (12) на том же числе элементарных фрагментов.

4. Векторы  $27 \times 1$ , составленные из характеристик яркости (11) и двухкомпонентных векторов (13), (14), содержащих в качестве компонентов градиенты по направлениям, повернутые на угол между эпиполярными прямыми.

Для удобства и оперативности формирования указанных дескрипторов на изображениях обоих видов осуществлялось предварительное формирование полей градиентов по двум направлениям с использованием следующих масок:

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а вместо нормы векторов градиентов — суммы значений градиентов по направлениям с равными весами. Для оценки меры близости соответствующих точек использовали

равномерный критерий, определяемый как сумма абсолютных величин разностей соответствующих признаков.

На рис. 4 приведены результаты реконструкции показанной выше 3D-сцены, полученные с использованием указанных выше четырех видов описаний соответственных точек. Нетрудно заметить, что по мере увеличения размерности векторов описаний соответствующих точек качество реконструкции сцены возрастает, а интенсивность шумов, связанных с установлением ошибочных соответствий, уменьшается.

Тем не менее, во всех экспериментах величина составного фрагмента, включающего лишь девять единичных квадратов, расположенных вдоль эпиполярных линий, остается небольшой. Повышение

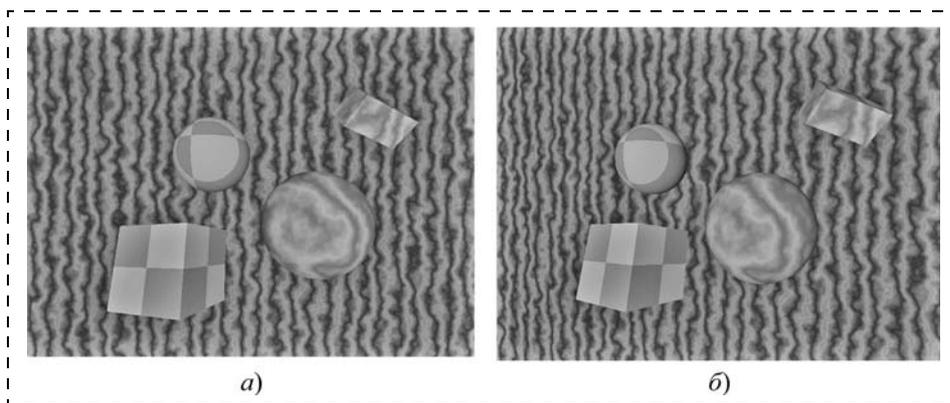


Рис. 3. Стереозображения сцены: а — левый вид; б — правый вид

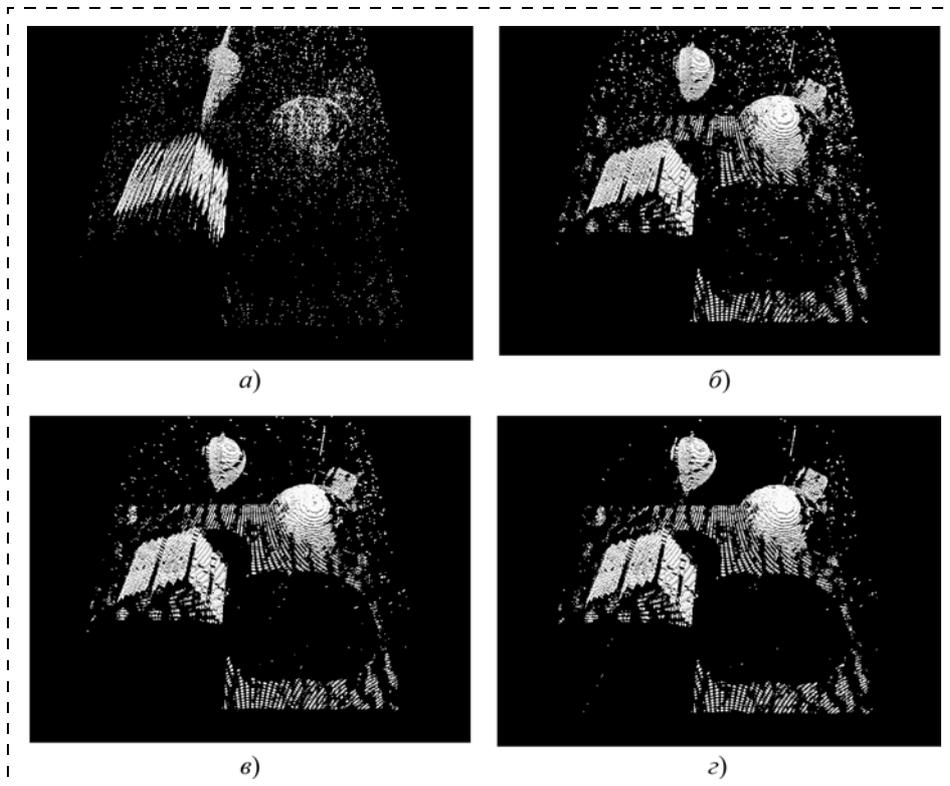


Рис. 4. Примеры реконструкции сцены при описании соответствующих точек: а —  $3 \times 1$ -вектором; б —  $9 \times 1$ -вектором; в —  $18 \times 1$ -вектором; г —  $27 \times 1$ -вектором

информативности составных фрагментов достигается увеличением числа рассчитываемых характеристик. Ясно, что это сопровождается увеличением объема вычислений в обмен на качество.

### Заключение

Отсутствие в явном виде ректификации изображений и использование для определения соответствий малых фрагментов делает предложенную технологию привлекательной с точки зрения снижения вычислительной сложности. Вместе с тем, приведенные результаты экспериментов показывают, что дополнительные эпиполярные ограничения, задающие решение в одной плоскости, и использование для описания составных фрагментов модуля и направления градиентов на элементарных фрагментах позволяет получить достаточно высокое качество реконструкции сцены.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 12-07-00581-а, 11-07-13164-офи-м-2011-РЖД).*

### Список литературы

1. **Fursov V., Goshin Ye.** Conformed Identification of the Fundamental Matrix in the Problem of a Scene Reconstruction, using Stereo Images // Image Mining. Theory and Applications. Proc. of IMTA-4 2013. 2013. P. 29—37.

2. **Фурсов В. А., Гошин Е. В.** Метод согласованной идентификации в задаче определения соответственных точек на изображениях // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36. № 1. С. 131—135.

3. **Hartley R. I.** Theory and Practice of Projective Rectification // International Journal of Computer Vision. 1999. V. 35. P. 115—127.

4. **Pollefeys M.** A simple and efficient rectification method for general motion // The Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision. 1999. V. 1. P. 496—501.

5. **Monasse P., Morel J.-M., Tang Z.** Three-step image rectification // Proc. of the British Machine Vision Conference. 2010. V. 19. P. 89.1—89.10.

6. **Kumar S., Micheloni C., Piciarelli C., Foresti G. L.** Stereo rectification of uncalibrated and heterogeneous images // Pattern Recognition Letters. 2010. V. 31. P. 1445—1452.

7. **Håming K., Peters G.** Extension of the Generalized Image Rectification — Catching the Infinity Cases // 4th International Conference on Informatics in Control, Automation, and Robotics (ICINCO 2007). 2007. P. 275—279.

8. **Baha N., Larabi S.** Accurate real-time disparity map computation based on variable support window // International Journal of Artificial Intelligence & Applications (IJAA). 2011. V. 2. P. 22—34.

9. **Hartley R. I., Sturm P.** Triangulation // Computer vision and image understanding. 1997. Vol. 68. P. 146—157.

10. **Форсайт Д., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 928 с.

11. **Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П., Перетягин Г. И., Спектор А. А.** Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.

12. **Соифер В. А.** Методы компьютерной обработки изображений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.

13. **Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / С. Ю. Желтов и др.** М.: Физматкнига, 2010. 672 с.

ИНФОРМАЦИЯ



С 16 по 19 июня 2014 г. в Москве состоится

## XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ XII),

посвященное 75-летию

Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН



### Совещание проводится в целях:

- ознакомления с последними достижениями науки и практики управления по разным направлениям исследований и практических разработок;
- выявления в процессе дискуссий наиболее перспективных направлений теории управления;
- содействия упрочению связей между представителями различных академических и отраслевых научных центров, вузовской науки и реального сектора экономики;
- обсуждения проблемы образования в области управления и задачи, которые ставит перед теорией управления современная практика.

### Направления работы Совещания

- I. Теория систем управления
- II. Управление подвижными объектами и навигация
- III. Интеллектуальные системы управления
- IV. Управление в промышленности, энергетике и на транспорте
- V. Управление системами междисциплинарной природы
- VI. Средства измерения, вычислений и контроля в управлении
- VII. Системный анализ и принятие решений в задачах управления
- VIII. Информационные технологии в управлении
- IX. Проблемы образования в области управления

*Подробная информация о Совещании находится на сайте*  
<http://vspu2014.ipu.ru>

УДК 17.519:62.50:681.306

**Н. А. Дударенко**, канд. техн. наук, доц.,  
dudarenko@yandex.ru,

**М. В. Сержантова (Полякова)**,  
канд. техн. наук, ассистент,  
12noch@mail.ru,

**А. В. Ушаков**, д-р техн. наук, проф.,  
Ushakov\_AVG@yandex.ru,

Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики

## Моделирование поведения антропокомпонентов в составе бинарных структур в надпроизводственной среде с помощью интервальных системных представлений

*Решается задача модельного представления поведения антропокомпонентов в составе бинарной структуры в надпроизводственной среде с помощью интервальных системных представлений. Предложенное модельное представление используется для оценки влияния поведения антропокомпонентов в надпроизводственной среде на эффективность производственного процесса.*

**Ключевые слова:** антропокомпонент, надпроизводственная среда, интервальное модельное представление, эффективность производственного процесса

### Введение

В работе [1] авторы предложили процедуру построения модельного представления производственной деятельности антропокомпонента (АК) — оператора в форме непрерывной динамической модели с интервальными параметрами. При формировании процедуры была использована аддитивная форма представления двух динамических процессов, характеризующих производственную деятельность АК, вращивания [2] и уставания, дополненная учетом возможности использования форсирующих свойств АК на интервале наличия запаса жизненных сил в начале каждой полусмены рабочего дня. Очевидно, картина модельного представления производственной деятельности АК будет неполной, если не будут решены задачи моделирования поведения АК, определяемого межличностными отношениями АК в составе бинарных структур в надпроизводственной среде, и оценки влияния этого поведения [3] на результаты производственной деятельности каждого АК.

### 1. Базовые системные концепции в задаче математического моделирования поведения антропокомпонентов в надпроизводственной среде

Формирование модельного представления поведения АК в составе бинарной структуры, характеризующегося ведением несанкционированного диалога, строится на основе следующих базовых системных концепций.

*Концепция 1.* Производственный процесс обладает поглощающими свойствами, так что несанкционированные диалоги, в основном, приходятся на интервал вращивания и с течением времени заканчиваются.

*Концепция 2.* При любой степени строгости по подбору членов производственного коллектива, занятых в производственном процессе, индивидуальные свойства антропокомпонентов всегда характеризуются заметным разбросом, к тому же свойства конкретного АК в зависимости от его текущего состояния будут различаться. В связи с этим представление АК как функционального элемента сложной динамической производственной системы должно строиться с использованием математической модели с интервальными параметрами [1].

*Концепция 3.* В силу концепции 2 (К2) антропокомпоненты как в моногруппах, так и в составе бинарных (и более крупных) групп в поведенческих проявлениях в надпроизводственной среде представляют собой сложную динамическую систему, характеризующуюся интервальными значениями параметров математических компонентов модельных представлений. Интервальными оказываются и параметры диалогов.

*Концепция 4.* Любой бесконфликтный диалог, как внутренний, так и внешний, есть сходящийся во времени колебательный процесс.

*Примечание 1.* Если колебательный процесс становится расходящимся, то диалог заканчивается конфликтом.

*Концепция 5.* Основной средой ведения внутреннего диалога АК является его внутренний мир, основной средой ведения внешнего диалога АК в составе бинарной структуры является аудиосреда, дополненная фактором возможного визуального контакта.

*Концепция 6.* Диалог, как внутренний, так и внешний, развивается в автономной коммутируемой колебательной среде, возбуждаемой ненулевым начальным состоянием, определяемым совокупностью всех предпроизводственных обстоятельств, формируемых по пути к рабочему месту, с переходом от внутреннего к внешнему, и наоборот.

**Концепция 7.** Внешний диалог, как правило, инициируется одним из участников диалога бинарной структуры АК.

**Концепция 8.** Любой диалог в надпроизводственной среде, как правило, влияет на производительность труда, при этом он может ее как уменьшить, так и увеличить.

**Примечание 2.** В случае, если диалог в надпроизводственной среде увеличивает производительность труда, то его следует рассматривать как позитивный, в противном случае, когда производительность труда уменьшается, диалог в надпроизводственной среде следует рассматривать как негативный.

**Концепция 9.** Частота и затухание колебательного сходящегося динамического процесса, моделирующего внешний диалог двух АК, определяются:

- личными свойствами (темпераментом, коммуникабельностью, качеством аудиосенсорики) участников;
- свойствами аудиосреды (расстояние между собеседниками, физические разделители локаль-

ных рабочих мест и т. д.), определяющими качество принимаемого АК аудиосигнала от контактера бинарной группы, а также возможность неожиданного вторжения в диалог посторонних антропокомпонентов.

**Концепция 10.** Влияние процессов в надпроизводственной среде на эффективность трудовой деятельности АК, проявляющееся в изменении производительности труда, модельно представимо в аддитивной форме, причем количественно это взаимодействие определяется способностью конкретного АК совмещать надпроизводственный диалог с производительным трудом, а по знаку определяется тем, является ли оно позитивным или негативным.

В силу высказанных базовых системных концепций в данной статье надпроизводственный процесс будет рассматриваться как влияющий на производственную эффективность [4]. Как следствие, будем полагать, что надпроизводственной средой следует управлять мотивационно, персонально, технологически и организационно в целях максимизации производительности труда.

## 2. Моделирование поведения антропокомпонентов в составе бинарных структур в надпроизводственной среде в форме автономной колебательной системы с коммутируемой структурой

На рисунке представлена структурная схема модели поведения антропокомпонентов в составе бинарной группы в надпроизводственной среде в форме: блока коммутации (БК) и модуля из двух автономных коммутируемых колебательных систем. Основными компонентами структурной схемы, представленной на рисунке, являются:

1) две пары интеграторов с цепями внутренних и внешних связей;

2) БК связей указанных в п. 1 пар интеграторов, а также цепей формирования выходных сигналов, поступающих на входы моделей антропокомпонентов, задействованных в производственной среде (см. рис. 5 в работе [1]).

На рисунке приняты следующие обозначения:  $z_{ji}$  и  $z_{li}$  ( $i=1, 2$ ) — переменные состояния  $j$ -го и  $l$ -го АК соответственно;  $\alpha_j$ ,  $\alpha_l$  — темпы сходимости колебательных процессов;  $\omega_j$ ,  $\omega_l$  — частоты их сходимости;  $[k_{j\eta 1}]$ ,  $[k_{l\eta 1}]$  — ко-

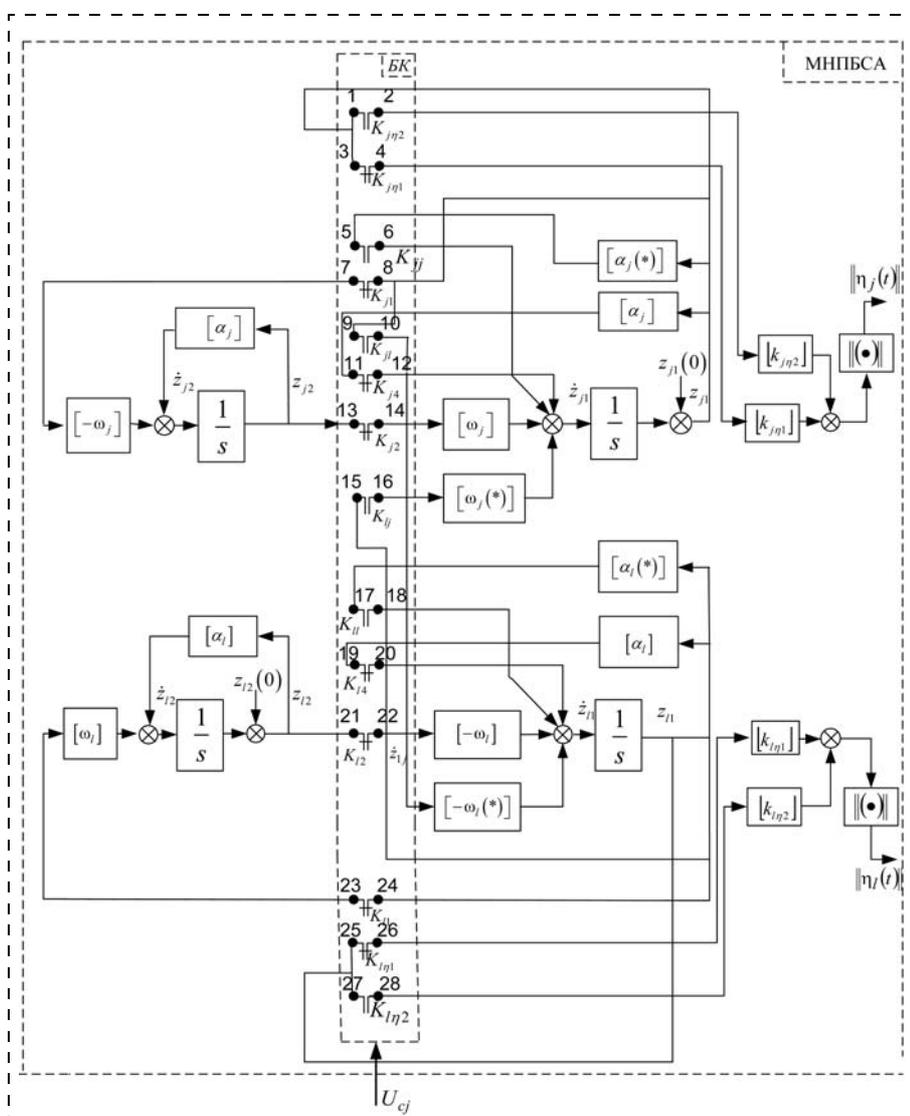


Схема моделирования поведения антропокомпонентов в составе бинарных структур в надпроизводственной среде

эффиценты влияния на производственный процесс фактора надпроизводственного поведения каждого АК в автономном режиме и  $[k_{j\eta 2}]$ ,  $[k_{l\eta 2}]$  — аналогичные коэффициенты в составе бинарной структуры;  $\|\eta_j(t)\|$ ,  $\|\eta_l(t)\|$  — нормы сигнала влияния на производственный процесс фактора надпроизводственного поведения АК.

Блок коммутации составлен из контактных групп трех видов —  $K_{(*)v}$ ,  $K_{(*)\circ}$ ,  $K_{(*)\eta\mu}$ , причем в зависимости от размещения контактной группы индекс (\*) принимает значения  $j$ ,  $l$  — номеров АК, участвующих в моделировании,  $v$  — номер коммутируемой цепи модели (\*)-го АК; индекс ( $\circ$ ) принимает значение  $l$ ,  $j$  таким образом, что пара индексов  $\{(*)\circ\}$  определяет процесс соединения цепей (\*)-го АК с цепями ( $\circ$ )-го АК; тройка индексов  $\{(*)\eta\mu\}$  определяет формирование выходного сигнала модели (\*)-го АК в  $\mu$ -м режиме функционирования модели, при этом  $\mu$  принимает значение  $\mu = 1$ , когда АК функционирует в автономном режиме, и значение  $\mu = 2$ , когда АК функционирует в составе бинарной структуры. На схеме графическим символом  $\overline{\Gamma}$  обозначен нормально замкнутый контакт, а символом  $\overline{\Gamma}$  — нормально разомкнутый. Номерами с 1-го по 28-й обозначены точки коммутации связей в структурной схеме рисунка.

Содержательно БК моделирует процесс коммутации намерений антропокомпонентов, образующих бинарную структуру.

В ситуации, когда контактные группы  $K_{(*)\circ}$  БК нормально замкнуты, интеграторы, образующие пары с одинаковыми индексами ( $j$  и  $l$ ) переменных и параметров, за счет ненулевых начальных состояний одного из них (например,  $z_{j1}(0)$  и  $z_{l2}(0)$ ) моделируют автономные поведения каждого из антропокомпонентов, характеризующие состояние их внутреннего мира.

В ситуации, когда контактная группа БК из состояния нормальной замкнутости переходит в состояние вынуждаемой разомкнутости, а нормально разомкнутые контакты переходят в состояние замкнутости, устанавливаются связи между интеграторами с различными индексами переменных и параметров, тем самым за счет ненулевого начального состояния  $z_{j1}(0)$  одного из них, принимаемого за инициатора диалога, моделируется надпроизводственное поведение бинарной ( $j$ ,  $l$ )-й группы антропокомпонентов.

Блок коммутации управляется сигналом коммутации  $U_{cj}$ , формируемым во внутреннем мире одного из АК, в качестве которого, определенности ради, принят АК с индексом  $j$ .

Следует заметить, что в соответствии с концепцией 10 для учета позитивного влияния на производственный процесс фактора надпроизводственного поведения антропокомпонентов необходимо формировать положительнозначное представление выходных сигналов последних, т. е. описывать эти процессы по норме выхода автономных систем для каждого из указанных выше режимов. При этом

сформированные таким образом сигналы поступают на входы моделей антропокомпонентов, задействованных в производственной среде (см. рис. 5 в работе [1]), через нормально замкнутые контакты блока БК (на схеме, представленной на рисунке, не показаны). В свою очередь, для учета отрицательного влияния на производственный процесс фактора надпроизводственного поведения антропокомпонентов необходимо сформировать отрицательнозначное представление выходных сигналов последних, т. е. описывать эти процессы по норме выхода автономных систем для каждого из указанных выше режимов, с последующим инвертированием. При этом сформированные таким образом сигналы поступают на входы моделей антропокомпонентов, задействованных в производственной среде (см. рис. 5 в работе [1]), через нормально разомкнутые контакты блока БК (на схеме также не показаны).

Обратим внимание на то, что все параметры связей схемы моделирования, приведенной на рисунке, представлены в интервальной форме. Выскажем несколько соображений в связи с возможными представлениями интервальных системных параметров, которые математически являются интервальными числами. Произвольное интервальное число (ИЧ)  $[\gamma]$  можно представить в формах

$$[\gamma] = [\underline{\gamma}, \overline{\gamma}] = \gamma + [\Delta\gamma] = \gamma + [\underline{\Delta\gamma}, \overline{\Delta\gamma}], \quad (1)$$

где  $\underline{\gamma}$ ,  $\overline{\gamma}$ ,  $\gamma$ ,  $[\Delta\gamma]$  — соответственно левая и правая угловые реализации ИЧ, медианная и интервальная составляющие интервального числа с равными по модулю левой  $\underline{\Delta\gamma}$  со знаком "минус" и правой  $\overline{\Delta\gamma}$  со знаком "плюс" угловыми реализациями. Представление (1) интервальных чисел позволяет записать систему равенств

$$\gamma = 0,5(\underline{\gamma} + \overline{\gamma}); \quad \underline{\Delta\gamma} = \underline{\gamma} - \gamma; \quad \overline{\Delta\gamma} = \overline{\gamma} - \gamma. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) позволяют ввести такую характеристику интервального числа, как оценка  $\delta_1(\gamma)$  относительной интервальности интервального числа  $[\gamma]$ , задаваемую соотношением

$$\delta_1(\gamma) = \overline{\Delta\gamma}/\gamma = -\underline{\Delta\gamma}/\gamma. \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет записать интервальное число  $[\gamma]$  в форме

$$[\gamma] = \gamma + [-\gamma\delta_1(\gamma), (\gamma)\delta_1(\gamma)] = \gamma\{1 + [-\delta_1(\gamma), \delta_1(\gamma)]\}. \quad (4)$$

Форма (4) является наиболее конструктивным представлением интервального числа  $[\gamma]$ , которая позволяет в аналитических расчетах использовать медианную составляющую  $\gamma$  с последующей оценкой влияния интервальности на показатели анализируемого процесса с использованием оценки  $\delta_1(\gamma)$  его относительной интервальности. Таким образом, описание процессов в схеме, приведенной на

рисунке, в их аналитическом представлении, приводимом ниже будут содержать только медианные составляющие параметров.

В связи со сказанным выше автономное поведение АК в надпроизводственной среде описывается [5, 6] векторно-матричными уравнениями:

$$\dot{z}_a(t) = \Gamma_a z_a(t); \eta_a(t) = P_a z_a(t), \quad (5)$$

где векторно-матричные компоненты имеют представления

$$z_a = (z_{j1}; z_{j2}; z_{l1}; z_{l2})^T; \eta = (\eta_j; \eta_l)^T; \quad (6)$$

$$\Gamma_a = \text{diag} \left\{ \Gamma_{aj} = \begin{bmatrix} \alpha_j & \omega_j \\ -\omega_j & -\alpha_j \end{bmatrix}; \Gamma_{al} = \begin{bmatrix} \alpha_l & \omega_l \\ -\omega_l & -\alpha_l \end{bmatrix} \right\}; \quad (7)$$

$$P_a = \begin{bmatrix} P_{aj} \\ P_{al} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{j\eta 1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{l\eta 1} & 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

вектор начального состояния  $z_a(0)$  из соображений простоты аналитических выражений, не нарушающей полноту результата, задается в форме

$$z_a(0) = (z_{j1}(0) \neq 0; z_{j2}(0) = 0; z_{l3}(0) \neq 0; z_{l4}(0) = 0)^T. \quad (9)$$

Тогда из (5) получаем

$$z_a(t) = \exp(\Gamma_a t) z_a(0), \eta_j(t) = P_{aj} \exp(\Gamma_a t) z_a(0), \eta_l(t) = P_{al} \exp(\Gamma_a t) z_a(0). \quad (10)$$

Для перехода в выражениях (10) для  $\eta_j(t)$   $\eta_l(t)$  к описанию процессов по их нормам запишем матрицу  $\Gamma_a$  в виде

$$\Gamma_a = \Gamma_{a\text{Re}} + \Gamma_{a\text{Im}}, \quad (11)$$

где

$$\Gamma_{a\text{Re}} = \text{diag} \left\{ \Gamma_{aj} = \begin{bmatrix} \alpha_j & 0 \\ 0 & \alpha_j \end{bmatrix}; \Gamma_{al} = \begin{bmatrix} \alpha_l & 0 \\ 0 & \alpha_l \end{bmatrix} \right\}; \quad (12)$$

$$\Gamma_{a\text{Im}} = \text{diag} \left\{ \Gamma_{aj} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_j \\ -\omega_j & 0 \end{bmatrix}; \Gamma_{al} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_l \\ -\omega_l & 0 \end{bmatrix} \right\}. \quad (13)$$

Тогда в силу (8), (11), (12), (13), а также свойства ортогональной матрицы не менять норму матрицы, в которую ортогональная входит сомножителем, оказываются справедливыми соотношения

$$\begin{aligned} \|\eta_j(t)\| &= \|P_{aj} \exp(\Gamma_a t) z_a(0)\| = \\ &= \|P_{aj} \exp(\Gamma_{a\text{Re}} t) \exp(\Gamma_{a\text{Im}} t) z_a(0)\| \leq \\ &\leq \|P_{aj} \exp(\Gamma_{a\text{Re}} t)\| \|\exp(\Gamma_{a\text{Im}} t)\| \|z_a(0)\| = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \left\| \begin{bmatrix} e^{\alpha_j t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\alpha_j t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\alpha_l t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\alpha_l t} \end{bmatrix} \right\| \times \\ &\times \left\| \begin{bmatrix} \cos(\omega_j t) & \sin(\omega_j t) & 0 & 0 \\ -\sin(\omega_j t) & \cos(\omega_j t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega_l t) & \sin(\omega_l t) \\ 0 & 0 & -\sin(\omega_l t) & \cos(\omega_l t) \end{bmatrix} \right\| \|z_a(0)\| = \\ &= k_{j\eta 1} e^{\alpha_j t} \|z_a(0)\|; \quad (14) \end{aligned}$$

$$\|\eta_l(t)\| = \|P_{al} \exp(\Gamma_a t) z_a(0)\| \leq k_{l\eta 1} e^{\alpha_l t} \|z_a(0)\|. \quad (15)$$

Обратимся теперь к описанию надпроизводственного поведения антропокомпонентов в составе  $(j, l)$ -й бинарной группы, представленного векторно-матричными уравнениями с медианными значениями матричных компонентов вида

$$\dot{z}_b(t) = \Gamma_b z_b(t); z_b(0) \eta_b(t) = P_b z_b(t), \quad (16)$$

где вектор  $z_b$ , матрицы состояния системы  $\Gamma_b$  и ее выхода  $P_b$  задаются в форме

$$z_b = [z_{j1}, z_{l1}, z_{j2}, z_{l2}]^T; \quad (17)$$

$$\Gamma_b = \text{diag} \left\{ \Gamma_{b j l} = \begin{bmatrix} \alpha_j^{(*)} & \omega_j^{(*)} \\ -\omega_l^{(*)} & \alpha_l^{(*)} \end{bmatrix}; \Gamma_{b j} = \alpha_j; \Gamma_{b l} = \alpha_l \right\}; \quad (18)$$

$$P_b = \begin{bmatrix} P_{b j} \\ P_{b l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{j\eta 2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{l\eta 2} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Нетрудно видеть, что матричные компоненты вида (18) отличаются от аналогичных компонент вида (7) тем, что элементы компонент вида (18) зависят от аргумента (\*), который характеризует свойство поглощения звука в аудиосреде, затрудняющее общения между собою  $(j, l)$ -х АК и порождаемое совокупностью следующих физических факторов: расстояние, технические средства эргономического разделения рабочих мест, общий производственный шум и т. д.

Тогда для процессов по норме в силу (17), (18) и (19), аналогично схеме получения результатов (14), (15), оказываются справедливыми оценочные соотношения

$$\|\eta_j(t)\| \leq k_{j\eta 2} e^{\alpha_j^{(*)} t} C\{\tilde{M}\} \|z_b(0)\|; \quad (20)$$

$$\|\eta_l(t)\| \leq k_{l\eta 2} e^{\alpha_l^{(*)} t} C\{\tilde{M}\} \|z_b(0)\|, \quad (21)$$

где

$$\alpha_{jl}^{(*)} = \arg \left\{ \det \left[ \lambda I - \begin{bmatrix} \alpha_j^{(*)} & \omega_j^{(*)} \\ -\omega_l^{(*)} & \alpha_l^{(*)} \end{bmatrix} \right] \right\} = \det \left[ \lambda I - \begin{bmatrix} \alpha_{jl}^{(*)} & \omega_{jl}^{(*)} \\ -\omega_{jl}^{(*)} & \alpha_{jl}^{(*)} \end{bmatrix} \right]; \quad (22)$$

$$\alpha_{jl}^{(*)} = 0,5\{\alpha_j^{(*)} + \alpha_l^{(*)}\},$$

$$\omega_{jl}^{(*)} = \sqrt{\omega_l^{(*)}\omega_j^{(*)} - 0,25(\alpha_j^{(*)} - \alpha_l^{(*)})^2}; \quad (23)$$

$$\tilde{M} = \arg\{\tilde{M}\tilde{\Gamma}_{jl} = \Gamma_{\delta jl}\tilde{M}\},$$

$$\tilde{\Gamma} = \text{diag} \left\{ \tilde{\Gamma}_{jl} = \begin{bmatrix} \alpha_{jl}^{(*)} & \omega_{jl}^{(*)} \\ -\omega_{jl}^{(*)} & \alpha_{jl}^{(*)} \end{bmatrix}; \Gamma_{\delta j} = \alpha_j; \Gamma_{\delta l} = \alpha_l \right\}; \quad (24)$$

$C\{\tilde{M}\} = \|\tilde{M}^{-1}\| \|\tilde{M}\|$  — число обусловленности матрицы подобия  $\tilde{M}$ .

Система соотношений (14), (15) и (20), (21) является аналитической базой для анализа процессов автономного поведения антропокомпонентов в надпроизводственной среде и в составе бинарной группы этих компонентов как функция внутренних свойств АК в виде параметров  $\alpha_j$ ,  $\alpha_l$  и  $\omega_j$ ,  $\omega_l$ , а также параметра (\*) аудиосреды, их разделяющей.

### 3. Анализ возможностей сформированной модельной среды

Сформированная среда, представленная на рисунке, позволяет моделировать поведение антропокомпонентов в составе бинарных структур в надпроизводственной среде с помощью интервальных системных представлений для оценки влияния этого поведения на эффективность производственного процесса. По мнению авторов, возможности предложенной модельной среды позволяют оценить влияние на эффективность производственного процесса следующих факторов, порождаемых в надпроизводственной среде:

- влияние предпроизводственной среды на эмоциональное состояние АК, являющееся источником несанкционированных бинарных отношений;
- влияние качества подбора кадров по их отношению к трудовой дисциплине и эмоциональной совместимости, в том числе оценка допустимого значения относительной интервальности  $\delta_1(\gamma)$  интервальных параметров АК, при которых надпроизводственные процессы в минимальной степени влияют на производительность труда;
- влияние качества эргономической организации труда на физическую возможность возникновения несанкционированных бинарных отношений.

В связи с этим авторы считают целесообразным выделить следующие ситуации, порождающие надпроизводственные процессы различного типа их протекания.

**Ситуация 0** (идеальная). Оба АК всегда позитивно настроены на производственный процесс. Эффект негативного влияния предпроизводственной среды на эмоциональное состояние антропокомпонентов за счет их внутреннего потенциала сведен к нулю.

**Ситуация 1.** На предложение  $j$ -го АК вступить в общение  $l$ -й АК не реагирует, что модельно характеризуется несвязанностью всех точек коммутации, в результате чего колебательный процесс в модельной среде не возникает. Надпроизводственная среда как фактор влияния на производственную деятельность и  $j$ -го и  $l$ -го АК отсутствует. Производственный процесс протекает без надпроизводственного возмущения.

**Ситуация 2.** На предложение  $j$ -го АК вступить в надпроизводственное общение  $l$ -й АК отвечает положительно. В этой ситуации блок коммутации переходит в состояние вынуждаемой разомкнутости, в результате чего в модельной среде возникает колебательный процесс. При этом у исследователя появляется возможность моделировать длительность надпроизводственного общения с учетом индивидуальных особенностей антропокомпонентов.

Целесообразно рассмотреть следующие варианты развития ситуации 2.

**Вариант 2.1** ситуации характеризуется заметным различием личностных свойств (темпераментов)  $j$ -го и  $l$ -го АК: на предложение  $j$ -го АК вступить в надпроизводственное общение  $l$ -й АК отвечает согласием на короткий промежуток времени, поддерживая диалог не активно. При этом в модельной среде возникает быстро затухающий колебательный процесс, характеризующийся полным прекращением за полупериод частоты  $[\omega_{jl}^{(*)}]$ .

**Вариант 2.2** ситуации 2 характеризуется наличием различия личностных свойств (темпераментов) АК, но не столь сильного, как в варианте 2.1. На предложение  $j$ -го АК вступить в общение в надпроизводственной среде  $l$ -й АК отвечает положительно, но вяло. При этом устанавливается режим "вялого диалога" характеризующегося длительностью, составляющей 3...5 полупериодов частоты  $[\omega_{jl}^{(*)}]$ .

**Вариант 2.3** ситуации 2 характеризуется личностными свойствами двух АК (темпераментов), которые близки: на предложение  $j$ -го АК вступить в общение в надпроизводственной среде  $l$ -й АК отвечает положительно и поддерживает его в режиме "активного диалога". Длительность активного диалога при этом заметно превышает пять полупериодов частоты  $[\omega_{jl}^{(*)}]$ , при этом в зависимости от личностных свойств АК наблюдается максимальное влияние на эффективность производительного труда.

С помощью предложенной модельной среды можно найти такое сочетание параметров АК,

с учетом фактора их зависимости от характеристики (\*) качества эргономического организации труда, при которой колебательных процессов или не возникает совсем, или возникают быстро сходящиеся экспоненциально затухающие.

### Заключение

Надпроизводственной средой следует управлять мотивационно, персонально, технологически и организационно в целях максимизации производительности труда. Предложенная модельная среда, по мнению авторов, может оказаться полезным подспорьем организаторам производства в этом деле.

### Список литературы

1. Дударенко Н. А., Сержантова (Полякова) М. В., Ушаков А. В. Представление производственной деятельности антропокомпо-

нента-оператора непрерывной динамической моделью с интервальными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5. С. 36–43.

2. Шипилов А. И., Шипилова О. А. Высокая работоспособность персонала — забота кадровика // Кадры предприятия. 2003. № 3. С. 7–15.

3. Петухов И. В. Исследование сенсорно-моторного взаимодействия человека-оператора и технической системы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 2 С. 33–37.

4. Падерно П. П., Павлухин И. С., Смирнов А. В. Развитие функционально-структурной теории для оценки качества деятельности операторов эргатических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5 С. 31–35.

5. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления: Пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. 832 с.

6. Ушаков А., Дударенко Н., Слита О. Современная теория многомерного управления: аппарат пространства состояний. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 418 с.

УДК 159.9; 004.81

**С. Ф. Сергеев**, д-р психол. наук, проф.,  
ssfpost@mail.ru,

Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет,  
Санкт-Петербургский государственный университет

## Интеллектуальные симбионты организованных техногенных средств управления подвижными объектами\*

*Рассматриваются вопросы взаимодействия искусственного и естественного интеллектов и форм их объединения при управлении эргатическими системами управления подвижными объектами, включенными в информационно-коммуникационные техногенные среды. Искусственные среды оказывают ориентирующее и управляющее влияние на ситуационное поведение операторов, формируя их интеллектуальное поведение. Введено понятие диффузного интеллекта как синергетического взаимообъединения искусственного и естественного интеллектов в задачах ситуационного управления в организованной среде.*

**Ключевые слова:** управление подвижными объектами, эргатические системы, ситуационный подход, интеллект, искусственный интеллект, гибридный интеллект, диффузный интеллект, коммуникация

### Введение

Объектом исследования, представленного в данной статье, являются эргатические системы управления (ЭСУ) подвижными объектами (ПО), оснащенные системами искусственного интеллекта и

\* Работа выполнена в рамках исследований, проводимых при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00161).

включенные в процессе своего функционирования в среду глобальных телекоммуникаций и сеть Интернет. К ним относятся комбинированные системы управления автомобильными, железнодорожными, водными и воздушными транспортными средствами, орбитальными и космическими объектами, системы телеуправления мобильными роботами, действующие в различных средах, в том числе и носящих опасный и экстремальный для человека характер [1].

Развитие эргатических систем управления подвижными объектами идет в направлении их интеллектуализации, усложнения функционально-технической структуры, расширения состава решаемых задач, возрастания требований к качеству и безопасности управления. Появляются задачи кооперативного взаимодействия управляющих агентов, в которых оперативное управление подвижным объектом осуществляется в процессе группового взаимодействия оператора ПО с диспетчерскими и навигационными службами, использующими технологии искусственного интеллекта. Возникающие проблемы координации взаимодействий интеллектуальных систем различной природы не могут быть решены в рамках концепции полной автоматизации и автономии в силу значительной меры информационной и ситуационной неопределенности, сопровождающей системы данного класса [2].

Основой эффективного поведения человека-оператора при управлении подвижными объектами является стабильность и завершенность концептуальной оперативной модели управления, которая возникает у оператора только в условиях адекватного задаче информирования и сопровождения его действий в логике достижения цели.

Информационные технологии предоставляют разработчикам эргатических систем широкий спектр средств, повышающих их интеллектуальность, формируя отношения человека-оператора с технической системой, подобные отношениям, возникающим между людьми в процессе естественной социальной коммуникации.

Вместе с тем, отметим, что взаимодействие человека с искусственными информационными средами отличается от его взаимодействия с естественными средами в силу структурно-функциональной дополнительности искусственных сред по отношению к когнитивным структурам человека, что ведет к процессам непрерывной модификации психических функций оператора [3]. Искусственная среда становится частью когнитивной системы оператора, его внешней памятью, частью поисковой и целеполагающей систем организма. Можно сказать, что искусственная среда усиливает возможности человека по поиску, приему и переработке информации, ведет к перестройке его когнитивного аппарата. Появляется симбиотическое объединение, включающее в возникающее единство оператора и организованную, наделенную искусственным интеллектом, техногенную среду.

Возникает проблема обеспечения симбиоза между управляющими системами разной природы — биологическими, наделенными механизмами психического отражения и активного целеполагания, и техническими, реализующими алгоритмы и технологии искусственного интеллекта. Это не аддитивная задача, так как возникающие эффекты взаимодействий носят нелинейный характер. Симбиотические отношения по настоящее время рассматривают с точки зрения реализации процессов адаптации и взаимоадаптации человека и техники [4—6]. Однако данных представлений в настоящее время явно недостаточно для описания целеустремленных развивающихся систем с искусственным интеллектом, работающих в условиях кооперативных взаимодействий управляющих элементов.

Наиболее часто эффективность функционирования сложных эргатических систем управления связывают с понятием "системный гибридный интеллект" [5]. Автор данной концепции В. Ф. Венда считает, что "любая искусственная система должна рассматриваться как модель, приложение, продолжение живых систем" [5, С. 147]. Данное утверждение, сформулированное более 30 лет назад, получает сегодня новые смысл и оттенки при включении человека в сложноорганизованные интеллектуальные среды. Появляются новые формы интеграции человека с машиной и средой — гибридные и симбиотические формы естественного интеллекта. Ставится задача обеспечения эффективной интеллектуальной деятельности человека-оператора в процессе управления ПО при его взаимодействии с различными формами искусственного интеллекта, проявляющимися в эргатических средах и системах.

Развитие глобальных информационных технологий многоуровневого управления ПО смещает акценты при проектировании операторских интерфейсов. Наблюдается переход от концепций, рассматривающих интерфейсы ЭСУ как локальные точки входа в управление технической системой, обеспечивающие связь системы с оператором (что являлось основной инженерной задачей в 70—80-х годах прошлого века), к концепциям, связанным с обеспечением посредством интерфейса множественных точек контакта с перцептивной системой человека и системами его опыта.

Предметом данного исследования являются возможные варианты симбиотического объединения интеллектуальных функций человека-оператора (групп операторов) с эргатическими системами и средами, проявляющими свойства искусственного интеллекта.

### **Интеллект: системно-философские и психологические представления**

Инструментальный характер когнитивных способностей человеческого разума, воплощенных в понятии "интеллект", впервые был показан в работах Рене Декарта и Томаса Гоббса. Человек в данных концепциях представлен как сложный механизм, реализующий целенаправленное поведение. Различия в эффективности функционирования этого механизма и ведут к различию людей по их уму и интеллекту. Эти взгляды стали первым теоретическим обоснованием возможности создания искусственного интеллекта [7]. В современных философских концепциях, основанных на кибернетических и информационных представлениях, постулируются разные формы объединений естественного и искусственного интеллектов. Рассматривается даже возможность переноса человеческого разума и сознания на иные, нежели биологические, носители, в том числе искусственные интеллектуальные среды [8]. Вместе с тем, понятие "интеллект" в психологии недостаточно точно определено, что ведет к различным формам спекуляций при создании инженерно-психологических моделей и интерпретаций данного явления.

Существование различий между людьми в умении решать задачи одного класса неоспоримо. Это позволило выдвинуть предположение о существовании в человеке особых ментальных структур, умственных способностей, отраженных в понятии "интеллект". Именно на этом предположении был основан самый известный классический тест для оценки коэффициента интеллекта (IQ — *intelligence quotient*) — шкала Д. Векслера, которая по настоящее время служит эталоном для оценки человеческого ума в его рациональных и культурно-лингвистических формах [9].

В данном тесте испытуемый выполняет задания, сложность которых постепенно увеличивается и служит показателем уровня интеллекта. Задания

включают сведения из самых различных областей человеческого знания и свидетельствуют об эрудиции и умении респондента ориентироваться в широком классе задач, называемых интеллектуальными. Тест состоит из одиннадцати субтестов, составляющих вербальную и невербальную шкалы, в которых исследуются общая осведомленность, общая понятливость, способность к формированию понятий, классификации, упорядочиванию, абстрагированию, сравнению, оперативная память и внимание, вербальный опыт (понимание и умение определить содержание слов). Оцениваются степень усвоения зрительно-моторных навыков, особенности зрительного восприятия, наблюдательность, способность отличить существенные детали, сенсомоторная координация, способности к синтезу целого из частей, способность к организации разрозненных фрагментов в логическое целое, к пониманию ситуации и предвосхищению событий, способности к синтезу целого из частей.

Очевидно, что столь широкий спектр качеств, относящихся к интеллекту, охватывает практически все аспекты отношений человека с миром и отражает особенности его разумного поведения, что выходит за пределы утилитарного понимания интеллекта как "искусства эффективного решения задач". В современной интерпретации, предложенной в работах М. А. Холодной, интеллект — это форма организации когнитивного ментального опыта человека, представленного в виде "накопленных" в ходе онтогенеза понятийных психических структур, степень сформированности которых определяет структурные характеристики субъективного пространства интеллектуального отражения. Основное назначение интеллекта по М. А. Холодной — построение особого рода репрезентаций происходящего, связанных с воспроизводством объективного знания о мире [10]. Эта задача решается посредством создания и использования человеком когнитивных инструментов [11, 12], которые должны быть достаточно удобны и эффективны для пользователя [13].

В распространенных, главным образом, факторных моделях интеллекта рассматривается его адаптивная функция по отношению к окружающей и внутренней средам. Определение интеллекта как некоторой способности, обуславливающей успешность адаптации индивида к новым условиям, является наиболее общим местом в классических моделях интеллекта.

Общая идеология факторного подхода при оценке интеллекта сводится к следующим основным постулатам:

- подразумевается, что интеллект, как и любая другая психическая реальность, существует в скрытой от наблюдателя форме, т. е. он дан исследователю только через различные косвенные проявления при решении жизненных задач;
- интеллект, будучи латентным свойством некоторой психической структуры ("функциональной системы"), может быть измерен, т. е. интел-

лект есть линейное свойство (одномерное или многомерное);

- множество поведенческих проявлений интеллекта всегда больше, чем множество свойств, т. е. можно придумать много интеллектуальных задач для выявления всего лишь одного свойства;
- интеллектуальные задачи объективно различаются по уровню трудности;
- решение задачи может быть правильным или неправильным (или может как угодно близко приближаться к правильному решению);
- любую задачу можно решить правильно за бесконечно большое время.

На основе этих положений В. Н. Дружинин сформулирован принцип, согласно которому трудность задачи определяет уровень интеллекта, необходимый для ее правильного решения [14, С. 14—25]. Фактор, обеспечивающий переработку сложной информации и детерминирующий индивидуальную продуктивность, В. Н. Дружинин называет "индивидуальным когнитивным ресурсом". Следствием этих положений является постулат: "чем труднее задача, тем более высокий уровень развития интеллекта требуется для ее правильного решения".

Вместе с тем заметим, что понятие "трудность задачи" не является синонимом понятия "сложность задачи". Трудность задачи связана с ее субъективным восприятием, интерпретацией и оценкой субъектом, который в процессе решения может как недооценивать, так и переоценивать объективную сложность задачи.

В рамках факторного подхода к интеллекту вводится понятие "идеальный интеллект". Человек, обладающий идеальным интеллектом, может правильно и в одиночку решить мыслительную задачу (или множество задач) произвольно большой сложности за бесконечно малое время, невзирая на внутренние и внешние помехи. Обычно же люди думают медленно, часто ошибаются, пасуя перед сложными заданиями.

Решение задач управления ПО осуществляется в среде физического мира, и именно здесь возникают ситуации управления, требующие для своего разрешения интеллектуального поведения эргатической системы.

В классических представлениях среда рассматривается главным образом как отдельный фактор, влияющий на формирование и проявления интеллекта, а не как его неотъемлемая часть. Эта отделенность интеллекта от среды создает иллюзии его независимости и локализации в субстрате организма человека.

Для связи когнитивной системы субъекта со средой в классическом подходе к интеллекту широко используется понятие "задача", которое при внимательном рассмотрении предстает достаточно сложным и неопределенным понятием. Во-первых, неясно, кто или что формулирует задачу? Во-вторых, одна и та же задача может быть сформулирована и решена множеством способов. Кроме того

задача является формой организации и упорядочения среды. Иными словами, среда, представленная в виде мира задач, уже не является средой, а превращается в систему. Интеллект должен вначале снять неопределенность среды, создав мир задач, относящийся к данной среде, и только затем может решать их.

В современных системах управления ПО за счет совместной работы систем искусственного и естественного интеллектов снимаются маршрутная и ситуативная неопределенность среды, и оптимизируется управление системами ПО. Системы интеллекта отражают активные, познающие среду формы отношений объекта управления со средой. Формулируются задачи управления, оптимизируются под когнитивные средства и возможности, имеющиеся у конкретного носителя интеллекта (в том числе и распределенного в техногенной среде информационно-управляющих систем). Естественный интеллект *активен и избирателен* по своей природе. Он упрощает среду деятельности до уровня, позволяющего ее операционализировать и тем самым активно преобразовывать в нужном направлении.

Ришар Мейли выдвинул гипотезу о том, что структуру интеллекта составляют четыре фактора: доступной сложности, пластичности, целостности, беглости [15]. Экспериментальная проверка этой гипотезы показала, что теоретически выделенные факторы являются инвариантными и постоянно устанавливаются в структуре психики человека, начиная с шестилетнего возраста. На основе проведенных исследований Р. Мейли предложил "компонентную модель" интеллекта, в которой факторы трактовались как условия (компоненты) индивидуальных различий в выполнении разных интеллектуальных актов. Они могут относиться как к индивиду, так и к окружающей среде. Следовательно, структура интеллекта, включающая эти факторы, содержит в неявной форме структуру взаимодействия индивида со средой.

В популярной теории множественного интеллекта Говарда Гарднера выделено девять типов интеллекта [16], каждый из которых связан с различными видами человеческой деятельности (средами жизнедеятельности). Каждый интеллект в данной модели эффективен только по отношению к специализированной среде, отражающей соответствующие формы культуры.

В практике инженерного проектирования сложных систем управления ПО данные подходы имеют ограниченное применение, так как получаемые в соответствии с ними модели не универсальны и работают только в узком диапазоне условий.

### Интеллект и сложность среды

Интеллект связан с миром задач, различающихся между собой сложностью решения, и может интерпретироваться с позиций концепций сложности.

Понятие "сложность" имеет два аспекта. Первый связан с субъективной сложностью — сложностью,

порождаемой в сознании человека и обусловленной его ограниченными возможностями по восприятию мира задач и обработке информации. Второй аспект связан с реальной сложностью физического и социального миров и возникающих в них феноменов. Это разные виды сложности по своей сути, но они часто сосуществуют совместно, порождая различные, порою противоречивые, взгляды на сложность и сложные системы.

Выделяют "онтологическую" и "семиотическую" простоту—сложность. Под первой понимают сложность материального, физического мира, а под второй — оценку знаковых систем. Понятие интеллекта в большей мере связано с семиотической сложностью, хотя мир задач обусловлен и онтологической сложностью. Отношения между этими видами сложности и определяют средово-системный континуум, в котором порождается понятие "интеллект". Традиционное понимание интеллекта как суммы локально принадлежащих когнитивному аппарату человека способностей (инструментальных возможностей искусственной системы в случае искусственного интеллекта) должно быть изменено на интегральные свойства, обусловленные средой и действующей (живущей) в ней системой.

Интеллект определяется в значительной мере степенью освоенности конкретной среды системой, действующей в ней.

Представления о сложном отражены в концептах: множественности; динамического разнообразия; нелинейности; неравномерности; сложности самоорганизующихся систем. Эти же категории применимы и к понятию "интеллект".

Множественность рассматривается как *многокомпонентность*. Она относится к описанию сложных систем, непрерывно эволюционирующих и изменяющихся. Сложная система в этой парадигме предстает как процесс бесчисленного усложнения ее сущностей, возникновения новых элементов как элементов для новых творений. Интеллект может быть представлен как свойство, воплощенное в сложную динамическую систему, позволяющее достигать результат, определяемый условиями задачи.

Множественность в концепциях динамического разнообразия дополняется качественной характеристикой — *разнообразием*. Разнообразие связано с асинхронным существованием в среде динамически существующих и сосуществующих систем и их распадающихся элементов, которые могут образовывать, в свою очередь, новые системные сущности.

Динамические процессы, связанные с разнообразием, протекают не как линейные цепочки отношений между вступающими во взаимодействие элементами, формирующими наблюдаемые формы организации системных образований, а как скачкообразные *нелинейные* процессы. Сложность данных систем отражает непредсказуемость появления новых качеств в новых структурах и неопределенность направления их развития. Причина появления нового качества может быть чрезвычайно

малой и на первый взгляд незначительной ("эффект бабочки").

Концепт *неравномерности* отражает принципиальную неравномерность распределения в пространстве одновременно существующих различных форм материи (энергии, вещества), ведущую к локальной самоорганизации и возникновению новых систем. Постулируется холистический характер мира, который разделяется на элементы только работой механизмов человеческого мышления, интеллекта и сознания.

Концепция *сложности самоорганизующихся систем* отражает непрерывную динамику мира во всех ее принципиально непознаваемых количественно-качественных проявлениях, а интеллект в ней является эмерджентным свойством сложной системы, позволяющим последней эффективно решать задачи активного (формирование искусственной среды, созидательная деятельность) и пассивного (адаптация, приспособление к среде) существования в мире.

### Интеллект в техногенных средах

Развитие локальных техногенных сред и их объединение в системах глобальных коммуникаций позволяет говорить о возникновении нового единства — глобальной техногенной среды. Ей присущи свойства интеллектуальности, проявляющиеся в сложных специфических формах отношений, возникающих с пользователями среды. Интеллект техногенной среды отличается от интеллекта традиционной эргатической системы, так как он является особой формой динамических кооперативных отношений, опосредованных средой, и представляет собой сложную систему.

Характерные свойства сложных систем:

- сложные системы являются открытыми системами, обменивающимися веществом, энергией и/или информацией с окружающей средой. Границы сложной системы порой трудно определить (видение ее границ зависит от позиции наблюдателя);
- в сложных системах возникают *эмерджентные феномены* (явления, свойства), которые не могут быть "вычитаны" из анализа поведения отдельных элементов;
- сложные системы имеют *память*, для них характерно явление гистерезиса, при смене режима функционирования процессы возобновляются по старым следам (прежним руслам);
- сложные системы регулируются петлями обратной связи: отрицательной, обеспечивающей восстановление равновесия, возврат к прежнему состоянию, и положительной, ответственной за быстрый, самоподстегивающийся рост, в ходе которого расцветает сложность [17, С. 77—78].

Данные определения даны Е. Н. Князевой. Они применимы и к интеллектуальным системам управления ПО. В этом случае интеллект является функцией от сложности самоорганизующейся системы.

Техногенные среды отличаются от естественных сред не только своим искусственным происхождением, но и организацией, представляя собой *системы организованной сложности*. Организованный характер техногенной среды определяется тем, что элементы ее содержания возникают не случайно, а являются результатами аутопоэзиса искусственной среды человеческой цивилизации. Они возникают в результате рекурсивных процессов порождения элементов сред, замкнутых в организованные сети, образующие аутопоэтические циклы самовоспроизведения. Это не случайная, а хорошо приспособленная для человека и созданная под него среда. Можно сделать вывод, что деятельность человека в среде сети Интернет не является процессом адаптации к неопределенной среде и деятельностью в ней, а несет характер целенаправленных межсистемных взаимодействий с организованными и самоорганизующимися фрагментами среды, что позволяет сохранять и культивировать опыт других участников среды, организуя коммуникацию между ними посредством систем интерфейса.

Будучи организованной средой, искусственная среда содержит в скрытой форме часть функций, присущих системам, наделенным естественным интеллектом. Это искусственный интеллект, воплощенный в искусственную среду. Он делает излишними часть функций естественного интеллекта, используемого человеком в процессе адаптации к естественной среде. Например, в искусственной информационно-коммуникативной среде сети Интернет пользователю не особенно нужны память, ассоциативный поиск, структурирование содержания, его интерпретация. Эти функции воплощены в искусственную среду, и она предоставляет их пользователю, замещая при этом функции естественного интеллекта.

Таким образом, мы приходим к понятию *диффузного интеллекта*, который представляет собой динамическую самоорганизующуюся систему, включающую естественный и искусственный интеллекты в их синергетическом взаимодействии в сложноорганизованной искусственной среде.

Чем выше уровень искусственного интеллекта, распределенного в техногенной среде, тем более эффективен при прочих равных условиях диффузный интеллект человека. Свойства диффузного интеллекта зависят от способности естественного интеллекта пользователя освоить интерфейс и интеллектуальный компонент среды. Отметим различия в понятиях диффузного и гибридного интеллектов. Гибридный интеллект локализован как некоторое свойство сложной системы, помогающее работе естественного интеллекта в данной системе, а диффузный интеллект возникает как синергетическое свойство в сложноорганизованной среде в процессе ее когнитивной коэволюции с системой естественного интеллекта.

Эффективное взаимодействие естественного и искусственного интеллектов усиливает возможно-

сти управления ПО, но только в определенных предоставляемых технологиями направлениях и границах. Задачей естественного интеллекта становится активный поиск решений и технологий, позволяющих решить конкретную задачу управления на основании внешних "подсказок", формируемых техногенной средой.

В сложных эргатических системах меняется парадигма интеллекта с понимания его как локально существующего в отдельной когнитивной системе феномена на способность человека обеспечивать эффективные межсистемные взаимодействия, ведущие к получению требуемого результата (решения задачи) в сложноорганизованных интеллектуальных средах.

В последнее время растет понимание того, что среда и взаимодействующая с ней система являются взаимодополняющими сущностями, и рассмотрение интеллекта в сложных системах вне среды их существования невозможно. Среда является внешней частью системы и во многом определяет ее поведение (в том числе и интеллектуальное). Интеллект проявляется только в организованной среде и связан с поиском, созданием и применением средств, гармонизирующих отношения системы со структурированной средой.

Основные проблемы, возникающие при проектировании сложных интеллектуальных систем, связаны с так называемым процессом выделения системы из среды. Среда представляет собой множество неоднородностей, выделение которых из среды позволяет интерпретировать их как систему. Система возникает в результате проведения операции различения, обозначения ее границ и описания свойств среды, существующей в рамках выделенной границы.

Сложные системы управления должны учитывать рекурсивный структурно-функциональный характер сложных биологических систем, в которых структура обеспечивает существование некоторой функции, которая, в свою очередь, становится причиной для появления новой структуры и изменения ее организации. Циклическое развитие сложности системы присуще всем живым организмам, в том числе и человеку. В искусственных системах структура является фиксированным образованием, а система обладает фиксированной сложностью.

Вместе с тем, сложность искусственных систем, включающих человека, непрерывно повышается за счет эволюции техногенной среды, которая превращается в систему организации коллективного опыта, формируемого в среде с памятью. Перспективы развития технологий управления ПО связаны с системами, отражающими холистические принципы организации, когда межсистемная организация осуществляется в многомерном пространстве на системных уровнях различной физической и ментальной природы [18].

## Использование сервисов техногенных сред в ЭСУ ПО

Поликультуральность техногенной среды ставит новые задачи перед создателями ЭСУ в информационном сообществе. Необходимо обеспечить трансляцию ситуационной информации из среды, ее получение, интерпретацию и использование от различных источников в процессе решения задачи управления.

В процессе управления происходит сборка интеллекта оператора эргатической системы за счет его дополнения компонентами искусственного интеллекта организованной среды. Интеллект перестает быть индивидуальной принадлежностью личности, а превращается в инструмент работы со сложноорганизованной коммуникативной системой, расширяющий когнитивные и творческие возможности оператора.

Взаимодействие между гибридным интеллектом локальной эргатической системы и интеллектом, воплощенным в техногенной среде, может осуществляться через специализированные сервисы, обслуживающие множество локальных эргатических систем в режиме онлайн, используя сервисы и возможности технологий *облачного компьютеринга* (*Cloud Computing*).

Например "веб-мозг" *Rapyuta* содержит описания объектов, с которыми системы искусственного интеллекта роботов сталкиваются в реальном мире. Он может взять на себя часть сложных вычислений, необходимых роботу, управляющему ПО [19]. Это позволяет снизить затраты на системы управления, поскольку нет необходимости сосредотачивать все вычислительные мощности на борту ПО. Сервис позволяет составлять личный каталог информации об окружающем мире для каждого управляемого ПО, который будет обращаться за помощью к *Rapyuta*, обнаружив новые для себя объекты, место или ситуацию. Такая система может быть полезна для беспилотных летательных аппаратов, систем автономного вождения и других ПО, управляемых ЭСУ.

Концепция полной автоматизации управления автомобилем, реализованная в проекте фирмы *Google*, использует системы оценки ситуации управления через множественные источники информации, расположенные на борту ПО. Это видеорекамеры, сенсорные радары и лазерные гироскопы. С их помощью машина ориентируется в дорожном потоке. Получаемая с датчиков информация включается в массивы картографической информации системы *Google*, циркулирующие в ее дата-центрах, где и происходит обработка данных [20]. Несмотря на достигнутые успехи в создании автоматизированных и автоматических ПО, необходимо отметить, что они пока не получили массового распространения в силу ограничений, вызываемых требованиями обеспечения безопасности, что ведет к необходимости обеспечения эффективных способов включения оператора в процессы управления.

## Заклучение

Интеллектуальные симбионты в ЭСУ ПО являются результатом межсистемных объединений информационных и биологических направленных на повышение качества работы эргатических систем. В них проявляется активная форма преобразования и структурирования среды.

Использование структурированных сред позволяет эффективно решать задачи управления и навигации в реальном времени.

Диффузный интеллект в организованной среде эргатической системы является формой интеграции, возникающей в процессе самоорганизации когнитивной системы человека, погруженного в сложноорганизованную информационно-коммуникативную среду. В нем в процессе симбиотического взаимодействия объединяются в эффективные структуры механизмы искусственного и естественного интеллектов. Это ведет к появлению эффективных способов структурирования содержания искусственной среды, что и проявляется в эффективном достижении целей системы. Появление техногенных сред ведет к изменению парадигмы управления ПО. Происходит переход от управления ситуативного в условиях неопределенных сред к ситуативному управлению в организованных средах.

Гибридные формы интеллектуальных симбионтов представляют собой объединения, не нарушающие системную целостность составляющих их симбионтов. При этом совместное функционирование симбионтов порождает новые, полезные для гибридной системы, интеллектуальные свойства.

При проектировании сложных эргатических систем важно правильно выбрать методы и технологии их интеллектуализации, которые в основном зависят от среды будущей деятельности. Возможность полной автономизации и автоматизации системы связана со степенью организованности среды. При работе в условиях организованных сред целесообразно использование методов распределенного искусственного интеллекта, а в слабоструктурированных средах — включение и усиление возможностей естественного интеллекта.

При создании сложных эргатических систем управления ПО необходимо учитывать эмерджентные свойства, появляющиеся вследствие сложной организации среды. Это эффекты интеллектуализации, возникновения кооперативных и гибридных форм интеллектов и их симбионтов. Включение человека в сложные техногенные среды сопровождается эффектами модификации его личности и когнитивных систем, что ведет к возникновению технопсихических симбиозов. Например, память человека заменяется памятью технической системы, функции внимания и поиска информации — работой поисковых систем и т. д.

Появление сложных информационно-коммуникативных глобальных сред меняет парадигму управления. Происходит переход с локального

управления на управление, использующее организованные и организуемые информационно-коммуникативные среды и сети, содержащие симбиотические формы интеллекта, позволяющие достигать целей управления.

При создании ЭСУ ПО целесообразно использование возможностей сложноорганизованных глобальных техногенных сред. В них аккумулируется полезный опыт деятельности человечества. При этом необходимо учитывать возникающие вследствие сложной организации среды эффекты интеллектуализации среды и появление в силу этого кооперативных и гибридных форм интеллекта и их симбионтов, определяющих поведение управляемой системы.

## Список литературы

1. Филимонов Н. Б. Системы многорежимного регулирования: концепции, принципы построения, проблемы синтеза // Изв. вузов. Приборостроение. 1988. № 2. С. 18—33.
2. Сергеев С. Ф. Методология эргономического проектирования систем искусственного интеллекта для самолетов 5-го поколения // Мехатроника. автоматизация, управление. 2007. № 11. С. 6—11.
3. Сергеев С. Ф. Образование в глобальных информационно-коммуникативных и техногенных средах: новые возможности и ограничения // Открытое образование. 2013. № 1 (96). С. 32—39.
4. Ломов Б. Ф. Человек и техника: очерки инженерной психологии. М.: Радио и связь. 1966.
5. Ванда И. Ф. Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. М.: Машиностроение, 1990.
6. Голиков А. Я. Методология психологических проблем проектирования техники. М.: Пер Сэ, 2003.
7. Сергеев С. Ф. Психологические основания проблемы искусственного интеллекта // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 7. С. 2—6.
8. Дубровский Д. И. Сознание, мозг, искусственный интеллект. М.: Стратегия-Центр, 2007.
9. Wechsler D. Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale. N. Y., 1955.
10. Холодная М. А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума: учеб. пособие. М.: Пер Сэ, 2002.
11. Сергеев С. Ф. Инструменты обучающей среды: интеллект и когнитивные стили // Школьные технологии. 2010. № 4. С. 43—51.
12. Сергеев С. Ф. Инструменты обучающей среды: стили обучения // Школьные технологии. 2010. № 5. С. 19—27.
13. Сергеев С. Ф. Когнитивная педагогика: пользовательские свойства инструментов познания // Школьные технологии. 2011. № 2. С. 35—41.
14. Дружинин В. Н. Психология общих способностей. СПб.: Питер, 1999.
15. Meili R. Analytischer Intelligenztest (AIT) / Verlag H. Huber, Bern, Stuttgart, Toronto, 1971.
16. Гарднер Г. Структура разума. Теория множественного интеллекта. М.: Вильямс, 2007.
17. Князева Е. Н. Темпоральная архитектура сложности // Синергетическая парадигма. Синергетика инновационной сложности. М.: Прогресс-Традиция, 2011. С. 66—86.
18. Сергеев С. Ф., Заплаткин Ю. Ю., Захаревич М. А. Механизмы редукции в самоорганизующихся мирах циклических коммуникаций // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XIV Междунар. конф. Самара: СНЦ РАН. 2012. С. 131—137.
19. Hunziker D., Gajamohan M., Waibel M., D'Andrea R. Rapyuta: The RoboEarth Cloud Engine // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2013.
20. Erico Guizzo. How Google's Self-Driving Car Works. URL: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/how-google-self-drivine-car-works>

**А. А. Обознов**, д-р психол. наук, проф., зав. лаб.,  
aao46@mail.ru,  
Институт психологии РАН, г. Москва

## **Адаптивный интерфейс в эргатической системе: инженерно-психологическая оценка**

*Рассмотрены возможности применения адаптивного интерфейса для преодоления ограничений ресурсов человека-оператора по приему и переработке информации при воздействии экстремальных факторов. Вводится понятие единого пространства внутренних и внешних ресурсов человека-оператора. Представлены результаты экспериментальных исследований, доказывающих эффективность применения адаптивного интерфейса.*

**Ключевые слова:** эргатическая система, ресурсы адаптации, единое пространство внутренних и внешних ресурсов адаптации, адаптивный интерфейс, экстремальные факторы

### **Введение**

Воздействия экстремальных факторов, т. е. крайних по интенсивности и темпу изменений условий рабочей среды и требований рабочего задания, являются типичными для многих видов операторской деятельности, особенно при управлении подвижными эргатическими системами. В очень широких границах — от обычных значений в сторону своих крайних значений и обратно — меняются условия окружающей среды, в частности, освещенность, шумы, перегрузки и т. д. В процессе деятельности чередуются режимы управления эргатическими системами с предельно высоким и медленным темпом изменения параметров; этапы с минимальной включенностью человека-оператора в управление сменяются периодами его максимальной загрузки, и наоборот; чередуются фазы с достаточным и ограниченным резервом времени и т. п.

Воздействия экстремальных факторов вызывают в организме и личности человека-оператора реакции, которые носят приспособительно-защитный характер. Однако будучи целесообразными с точки зрения приспособительно-защитной, эти реакции снижают уровень проявления психофизиологических и психических процессов человека-оператора, включенных в его деятельность. Например, резкое повышение абсолютного порога является приспособительно-защитной реакцией зрительного анализатора от возможных повреждений в ответ на яркую световую вспышку. Вместе с тем, эта реакция на определенный период времени существенно ограничивает возможность человека-оператора по приему и переработке информации, что снижает надежность его действий по управлению эргатической системой. Следует подчеркнуть, что поскольку указанные реакции носят закономерный и потому неизбежный характер, то они не могут преодолевать-

ся только за счет собственных ресурсов адаптации и профессионального опыта человека-оператора.

В связи с этим конструктивным представляется тезис о едином пространстве ресурсов адаптации человека-оператора — *внутренних*, т. е. его собственных, и *внешних*, которыми специально наделяются используемые им средства деятельности, включая интерфейс. К единому пространству применим принцип дополнительности, согласно которому временное снижение внутренних ресурсов адаптации может компенсироваться за счет актуализации внешних ресурсов адаптации, и наоборот. Тем самым преодолеваются ограничения возможностей человека-оператора по приему и переработке информации, вызванные воздействием экстремальных факторов [1].

Цель исследования состоит в инженерно-психологической оценке эффективности применения интерфейса как внешнего ресурса адаптации, или адаптивного интерфейса, для поддержания возможностей человека-оператора по приему и преобразованию информации при воздействии экстремальных факторов.

### **Интерфейс как внешний ресурс адаптации зрительного анализатора**

В психологии и прикладной физиологии накоплено немало сведений о снижении возможностей человека-оператора по приему и преобразованию информации, закономерно возникающем под воздействием экстремальных факторов [2—4 и др.]. Анализ имеющихся данных позволяет считать типичными проявлениями указанного снижения феномены "загрубления входа" и "туннелирования" внимания.

Феномен "загрубления входа" проявляется в повышении абсолютных порогов сенсорных систем человека-оператора вследствие воздействия экстремальных факторов. Установлено, что повышение абсолютных порогов зрительной, слуховой и тактильной сенсорных систем (в % к исходному значению порога, принятому за 100 %) в среднем составляет:

- 116 % под воздействием внезапного звука;
- 150 % под воздействием общей вибрации;
- 174 % под воздействием недостаточности информации;
- 236 % под воздействием неожиданной ситуации [5].

Феномен "туннелирования" внимания закономерно возникает вследствие повышения уровня нервно-психического напряжения человека-оператора под воздействием экстремальных факторов и выражается в сужении границ зоны обнаружения человеком-оператором новых сигналов [6]. По мере повышения нервно-психического напряжения человек-оператор спонтанно переходит на стадию активного внимания, концентрируясь на единственной текущей задаче. Тем самым утрачивается возможность эффективно распределять и переключать внимание между различными задачами [7].

Феномены "загрубления входа" и "туннелирования" внимания, учитывая неустранимость их проявления под воздействием экстремальных факто-

ров и неосуществимость компенсации за счет только внутренних ресурсов адаптации, были выбраны нами для оценки эффективности применения внешних ресурсов адаптации для поддержания возможностей человека-оператора по приему и преобразованию информации.

Носителем этих ресурсов стал интерфейс, который наделялся дополнительными, а именно, адаптируемыми характеристиками. С их помощью предполагалось компенсировать отрицательные последствия "загрубления входа" и "туннелирования" внимания. Учитывая, что речь идет о компенсации феноменов, относящихся к зрительной модальности, адаптируемыми стали параметры визуальных (зрительных) сигналов.

Требовалось ответить на вопрос, какие именно параметры визуальных сигналов — яркостной контраст, угловые размеры, пространственное расположение, движение и т. п. — выбрать в качестве адаптируемых. В решении данного вопроса исходили из того, что биологически наиболее важными признаками окружающего мира для зрительного восприятия являются относительная яркость (яркостной контраст) и движение. Уже в первые недели жизни ребенок выделяет визуальные стимулы, прежде всего, по этим двум признакам. Их выделение является генетически первыми задачами зрительного анализатора [8].

Применительно к нашей проблеме это означает, что яркостной контраст и движение являются базовыми признаками для предметного зрительного восприятия, и именно они должны быть выбраны для адаптируемых параметров. Есть основания рассчитывать, что увеличение яркостного контраста с высокой вероятностью позволит компенсировать феномен "загрубления входа". Аналогичным является допущение, что с помощью движения символов в зону центрального зрения человека-оператора можно компенсировать феномен "туннелирования" внимания.

### Результаты экспериментальной проверки эффективности адаптивного интерфейса

Эксперименты проводили на стендовой базе Государственного научно-исследовательского испытательного института авиационной и космической медицины в рамках инженерно-психологического сопровождения вновь проектируемых высокоманевренных летательных аппаратов<sup>1</sup>.

*Эффективность применения адаптивного интерфейса для компенсации феномена "загрубления входа".* Для воссоздания у человека-оператора "загрубления входа" использовали воздействие пилотажных перегрузок "голова-таз" (+Gz) до 8 ед. включительно. Исследования проводили на центрифуге.

<sup>1</sup> Автор признателен руководству Государственного научно-исследовательского испытательного института авиационной и космической медицины за предоставленную возможность проведения исследований. Особую благодарность выражаю академику РАО, профессору В. А. Пономаренко, по инициативе и под руководством которого эти исследования выполнялись.

Задание операторов состояло в выполнении двухмерного дискретного слежения и заключалось в "наложении" с помощью ручки управления подвижного кольца на неподвижное перекрестие в центре электронного индикатора. В основных экспериментах в ходе разгона центрифуги до заданной перегрузки (+Gz = 2; 5 и 8 ед) происходило увеличение по линейному закону яркостного контраста символов с  $K = 0,6$  до  $K = 0,9$ . В контрольных экспериментах исходный яркостной контраст  $K = 0,6$  не изменялся.

В исследовании приняли участие четыре оператора, прошедшие специальную медицинскую комиссию и не имевшие отклонений в состоянии здоровья. Всего ими выполнено 160 задач дискретного слежения.

Согласно полученным результатам (табл. 1), при воздействии перегрузки +Gz = 5 и 8 ед., когда у операторов отмечалось выраженное повышение абсолютного порога зрения ("загрубление входа"), время выполнения задания в основных экспериментах (при увеличении яркостного контраста) по сравнению с контрольными экспериментами было меньше на 12 и 27 % соответственно. Судя по самоотчетам операторов увеличение яркостного контраста позволило им затрачивать меньше усилий и экономить силы, лучше распределять внимание, более уверенно выполнять задание. Напротив, в обычных и близких к ним условиях (фон перед вращениями и при перегрузке +Gz = 2), когда абсолютный порог зрения практически не снижался, увеличение яркостного контраста было излишним и не приводило к улучшению показателей дискретного слежения по сравнению с контрольными экспериментами.

Следовательно, увеличение яркостного контраста выполняло роль внешнего дополнительного ресурса, "включавшегося" в периоды "загрубления входа". В обычных и близких к ним условиях существенного повышения абсолютного порога зрения не происходило, поэтому увеличение яркостного контраста становилось излишним.

*Эффективность применения адаптивного интерфейса для компенсации "туннелирования" внимания* оценивали на лабораторном стенде. Экстремальным фактором служило воздействие повышенного

Таблица 1  
Время (с) выполнения задачи дискретного слежения в зависимости от уровня яркостного контраста  $K$  (усредненные данные,  $X/\sigma$ )\*

Значение перегрузки "голова-таз" (+Gz)	Основные эксперименты, $K = 0,9$	Контрольные эксперименты, $K = 0,6$
Фон перед вращениями	1, 47/0,47	1,42/0,49
2 ед.	1,65/0,48	1,66/0,61
5 ед.	1,74/0,57	1,96/0,52
8 ед.	1,89/0,65**	2,57/1,03

\*  $X$  — усредненное для группы операторов время выполнения задания;  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение.  
\*\* При перегрузке +Gz = 8 ед. различие между  $K = 0,6$  и  $K = 0,9$  статистически достоверно ( $p < 0,05$ ).

психического напряжения, закономерно возникшего в период выполнения совмещенной операторской деятельности.

Задание операторов включало два последовательных этапа. На первом этапе длительностью 60 с задача испытуемых состояла в компенсаторном двумерном слежении за электронной меткой, которая перемещалась на индикаторе с частотой 0,1 Гц по круговой траектории с радиусом 45 мм. Операторы с помощью двухкоординатной ручки должны были удерживать метку в пределах окружности с начальным радиусом 40 мм. В процессе первого этапа слежение за меткой усложнялось за счет постепенного уменьшения радиуса окружности с 40 до 10 мм и добавления помехи, под влиянием которой метка совершала колебательные горизонтальные движения с амплитудой до 10 мм. К концу первого этапа слежение усложнялось настолько, что все операторы могли непрерывно удерживать метку в пределах уменьшенной окружности не более 0,2 с. Смысл подготовительного этапа заключался в том, чтобы за счет постепенного нарастания сложности слежения обеспечить к началу второго этапа "перевод" функционального состояния операторов от относительного покоя к состоянию нервно-психического напряжения. На втором этапе от операторов требовалось не менее четырех раз зафиксировать подвижную метку в окружности радиусом 10 мм. Момент фиксации регистрировался операторами нажатием кнопки на ручке управления. Это задание требовало от операторов повышенного нервно-психического напряжения и максимальной концентрации произвольного внимания в центре индикатора, что вызывало у них "туннелирование" внимания.

С начала второго этапа на экране индикатора слева и справа от окружности высвечивались две дуговые шкалы с подвижными стрелками. Стрелки перемещались по синусоидальному закону с частотой 0,1 Гц. На каждой из шкал имелись симметрично расположенные отметки зеленого и красного цвета. Зеленые отметки обозначали зону "норма", в пределах которой должны находиться подвижные стрелки. Красные отметки обозначали предельно допустимые значения параметров. Выход стрелки за пределы зоны "норма" и приближение к любой красной отметке считался предвестником угрожающего события, а выход стрелок за границу красной отметки означал срыв задания. За три секунды до приближения любой из двух стрелок к красной отметке включалась сигнализация об угрозе. Применялись шесть вариантов такой сигнализации:

- мигание красной отметки с частотой 2 Гц;
- мигание всей шкалы с частотой 2 Гц;
- изменение цвета шкалы с зеленого на красный;
- плавное движение шкалы к центру экрана со скоростью 1 °/с;
- плавное движение шкалы к центру экрана со скоростью 1 °/с и уменьшением линейной длины шкалы до 1,5 мм;
- мгновенный скачок шкалы к центру экрана.

При обнаружении сигнала об угрозе оператор должен был первым действием с помощью двухпозиционного кноппеля влево или вправо указать на "угрожающую" шкалу (соответственно левую или правую) и вторым действием кноппеля вверх или вниз — на направление "угрожающего" движения стрелки. В случае выполнения указанных действий до момента выхода стрелки за красную отметку стрелка автоматически возвращалась в пределы зоны "норма", и оператор продолжал выполнение текущей задачи. Выход стрелки за красную отметку означал срыв и прекращение задания.

В основных экспериментах операторы выполняли задачу слежения за подвижной меткой и задачу обнаружения сигналов об угрозе одновременно. В контрольных экспериментах выполнялась только задача обнаружения сигналов об угрозе.

В исследовании приняли участие 10 операторов, выполнивших в общей сложности 360 заданий.

В процессе выполнения первого этапа задания наблюдалось статистически достоверное возрастание показателей нервно-психического напряжения операторов (кожно-гальванической реакции по Тарханову, значение зажима ручки слежения, субъективных оценок операторов), что свидетельствовало о развитии у них нервно-психического напряжения. Поэтому есть основания считать, что сигналы об угрозе (второй этап) поступали к операторам в период выполнения ими напряженной деятельности, вызывавшей "туннелирование" внимания.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные об эффективности и надежности обнаружения сигналов об угрозе, а также об эффективности выполнения задачи слежения. Выделим два наиболее важных результата.

Во-первых, в контрольных экспериментах (без выполнения задачи слежения) время обнаружения сигналов об угрозе не зависело от варианта сигнализации. При этом не было зафиксировано ни одного случая пропуска сигналов об угрозе.

Во-вторых, в основных экспериментах, по сравнению с контрольными, наблюдалось статистически достоверное увеличение времени обнаружения сигналов об угрозе для всех вариантов сигнализации. По степени указанного увеличения все сравниваемые варианты сигнализации были поделены на две группы. Поскольку между вариантами "мигание красной отметки", "мигание всей шкалы" и "изменение цвета шкалы с зеленого на красный" различий во времени обнаружения сигналов об угрозе не было, эти варианты были объединены в одну группу. По аналогичным основаниям другую группу составили три варианта сигнализации посредством движения шкал к центру индикатора. Для первой группы вариантов сигнализации время обнаружения сигналов об угрозе составило в среднем 0,76 с, при этом зафиксировано восемь случаев пропуска сигналов об угрозе. Для второй группы вариантов сигнализации время обнаружения сигналов об угрозе составило в среднем 0,62 с или на 20 % меньше, чем в первой ( $p < 0,01$  по  $t$ -критерии).

Показатели реагирования на сигналы об угрозе и выполнения задачи слежения в зависимости от варианта сигнализации (данные, усредненные по 10 операторам)

Вариант сигнализации	Время реагирования на сигналы "об угрозе" (с)				Число пропусков сигналов "об угрозе" в основных экспериментах		Показатели выполнения задачи слежения (2-й этап)			
	Контрольные эксперименты		Основные эксперименты		Абсолютное	Относительное (%)	Относит. частота попадания метки в окружность	Ошибка слежения (усл. ед.)		
	X	$\sigma$	X	$\sigma$				X	$\sigma$	
1. Мигание красной отметки	0,50	0,23	0,79	0,38			62	16,1	5,2	
2. Мигание шкалы	0,47	0,26	0,76	0,36	5	8,0	56	18,0	4,2	
3. Изменение цвета шкалы	0,50	0,26	0,72	0,32	2	3,2	64	17,6	4,5	
<b>В среднем по вариантам 1—3</b>	<b>0,49</b>	<b>0,25</b>	<b>0,76</b>	<b>0,35</b>	<b>1</b>	<b>1,6</b>	<b>61</b>	<b>17,2</b>	<b>4,7</b>	
4. Плавное движение шкалы	0,48	0,22	0,61	0,29	0	0	64	15,3	4,3	
5. Плавное движение шкалы с уменьшением ее длины	0,45	0,24	0,64	0,27	0	0	72	17,4	4,5	
6. Движение шкалы скачком	0,47	0,21	0,61	0,27	0	0	55	14,3	5,0	
<b>В среднем по вариантам 4—6</b>	<b>0,47</b>	<b>0,22</b>	<b>0,62</b>	<b>0,28*</b>			<b>64</b>	<b>15,7</b>	<b>4,8</b>	

\* Различие в основных экспериментах между групповыми значениями (варианты 1—3 и варианты 4—6) статистически достоверно по *t*-критерию ( $p < 0,001$ ).

рию), при этом не было ни одного случая пропуска сигнала об угрозе.

Таким образом, в контрольных экспериментах, в которых задача слежения не выполнялась и предпосылок для "туннелирования" внимания не было, варианты сигнализации об угрозе с помощью движения шкал не имели преимуществ по сравнению с другими вариантами. Однако в основных экспериментах, требовавших от операторов максимальной концентрации внимания на задаче слежения и, тем самым, провоцировавших феномен "туннелирования", установлены явные преимущества вариантов сигнализации с применением движения шкал к центру индикатора.

Наиболее высокие показатели скорости и надежности обнаружения сигналов об угрозе, а также выполнения задачи слежения зафиксированы при применении варианта сигнализации с плавным движением шкалы к центру индикатора, где отображалась информация, необходимая для выполнения задачи слежения. Преимущество данного варианта определялось тем, что благодаря плавному движению сигнал об угрозе в буквальном смысле вводился в зону внимания человека-оператора даже при выраженном эффекте "туннелирования" и поэтому обнаруживался быстрее, чем при использовании иных вариантов сигнализации.

### Заключение

Результаты проведенного исследования доказали конструктивность представления о едином пространстве внутренних и внешних ресурсов адаптации человека-оператора. К единому пространству применим принцип дополнительности, согласно которому снижение собственных (внутренних) ресурсов адаптации человека-оператора может компенсироваться за счет актуализации внешних ресурсов адаптации.

В рамках представления о едином пространстве ресурсов адаптивный человеко-машинный интер-

фейс рассматривается не только в своей основной роли как средство передачи человеку-оператору сведений, необходимых для решения профессиональных задач, но еще и в роли носителя внешних ресурсов адаптации.

В обычных условиях рабочей среды эта функция является избыточной, поскольку надежность приема и переработки информации человеком-оператором обеспечивается за счет его собственных, внутренних ресурсов адаптации. Однако в условиях воздействия экстремальных факторов, когда внутренних ресурсов для поддержания необходимых показателей приема и преобразования информации уже недостаточно, внешние ресурсы адаптации становятся востребованными.

Результаты экспериментальной проверки доказали эффективность применения адаптивного интерфейса для компенсации закономерно возникавших под воздействием экстремальных факторов ограничений возможностей человека-оператора по приему и переработке информации.

### Список литературы

1. **Обознов А. А.** Психическая регуляция операторской деятельности: в особых условиях рабочей среды / Под ред. В. А. Бодрова. М.: Изд-во "Институт психологии РАН", 2003.
2. **Физиология** трудовой деятельности / В. И. Медведев, В. С. Аверьянов, А. А. Айдаралиев и др. СПб.: Наука, 1993.
3. **Психологические** проблемы деятельности в особых условиях / Отв. ред. Б. Ф. Ломов, Ю. М. Забродин. М.: Наука, 1985.
4. **Авиационная** медицина / Под ред. Н. П. Рудного, П. В. Васильева, С. А. Гозулова. М.: Медицина. 1986.
5. **Медведев В. И.** Устойчивость физиологических и психических функций человека при действии экстремальных факторов. Л.: Наука, 1982.
6. **Вэбстер Р., Хэзлеруд Дж.** Влияние внимания, направленного на выполнение зрительной или слуховой задачи, на периферическое зрение // Инженерная психология за рубежом. М.: Прогресс. 1967. С. 214—221.
7. **Суворов Н. Ф., Таиров О. П.** Психофизиологические механизмы избирательного внимания. Л.: Наука, 1985.
8. **Митькин А. А.** Системная организация зрительных функций. М.: Наука. 1988.

# БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.13.06

**А. А. Дюжев**, канд. техн. наук, ген. директор,  
Объединенный институт машиностроения  
Национальной академии наук Беларуси,  
**Д. А. Дубовик**, д-р техн. наук, доц., директор,  
НТЦ "Машиностроение",  
**В. В. Савченко**, канд. техн. наук, директор,  
bats@ncpmm.bas-net.by,  
НТЦ "Автотракторная электроника  
и электромеханика"

## Развитие бортовых электронных и мехатронных систем мобильных машин в Республике Беларусь

*Рассматриваются основные комплексные задачи научных исследований по направлению "Бортовые комплексы, системы управления мобильных машин и их компоненты", полученные результаты и их апробация. Представлена методология работ по направлению. Приведены некоторые примеры разработок, освоенных в серийном производстве на приборостроительных заводах Республики Беларусь, а также краткосрочные и среднесрочные перспективные задачи, решаемые в интересах машиностроительного комплекса.*

**Ключевые слова:** антиблокировочная система (АБС), антиблокировочно-противобуксовочная система (АБС/ПБС), гибридная силовая установка, комплексная информационно-управляющая система, мехатроника, мобильная машина

### Введение

По данным аналитического агентства Databeans (<http://www.pcweek.ru/themes>) мировой рынок автомобильной электроники находится на стадии стабильного подъема, а общий объем производства в 2013 г. достигнет 173,7 млрд долл. США. Прогнозируется существенное увеличение объема продаж в связи с ожидаемым уже в ближайшей перспективе массовым выведением на рынок транспортных средств с гибридными силовыми установками и электро-механическими трансмиссиями.

Согласно экспертным оценкам средневзвешенный удельный вес стоимости бортовых электронных и мехатронных систем в выпускаемых предприятиями Республики Беларусь мобильных машинах составляет около 8 %. При этом для современного модельного ряда седельных тягачей производства ведущих зарубежных компаний он составляет 20...25 %, увеличиваясь ежегодно в среднем на 2...3 %.

Для гибридных автомобилей и электромобилей этот уровень составляет уже порядка 40 %.

Развитие бортовых электронных и мехатронных систем мобильных машин в Республике Беларусь осуществляется в основном в рамках отдельных проектов программ разного уровня. Среди государственных программ следует выделить государственную комплексную программу научных исследований (ГПНИ) "Механика, техническая диагностика, металлургия" с одной из ее подпрограмм "Механика" и крупнейшую в республике государственную научно-техническую программу (ГНТП) "Машиностроение", головной организацией-исполнителем работ по которым является Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ОИМ НАН Беларуси). Кроме того, разработка и освоение производства бортовых электронных и мехатронных систем выполняются в рамках государственной программы импортозамещения и ГНТП "Радиоэлектроника" [1].

### Основные комплексные задачи научных исследований

Научное обеспечение разработок бортовых электронных и мехатронных систем мобильных машин сконцентрировано преимущественно в подпрограмме "Механика" ГПНИ "Механика, техническая диагностика, металлургия".

При выполнении НИР в рамках подпрограммы "Механика" на фундаментальном уровне изучаются вопросы взаимодействия с внешней средой и создания мобильных машин. При этом развивается направление исследования взаимодействия с опорной поверхностью ходовых систем [2—6].

В ходе НИР проводится анализ достигнутого уровня науки и техники в исследуемой области. Осуществляется разработка новых [7—9] или обосновывается применение уже известных из проведенного анализа критериев для количественной оценки эксплуатационных и потребительских свойств мобильных машин. На основе исследований влияния различных конструктивных параметров и эксплуатационных факторов на показатели эксплуатационных и потребительских свойств мобильных машин разрабатываются алгоритмы управления их узлами и агрегатами [10—13].

Для реализации полученных таким образом алгоритмов разрабатываются конструктивные схемы исполнительных механизмов и структурные схемы бортовых электронных и мехатронных систем [14—15]. На основе полученных результатов создаются макетные образцы систем. Последующие ис-

Основные задачи научных исследований цикла работ 2011...2015 гг.

Наименование комплексных заданий	Наименование этапов работ	Структурное подразделение ОИМ НАН Беларуси
Развитие научных основ проектирования гибридных силовых установок и их компонентов (мотор-генераторов, высокоскоростных редукторных узлов, устройств рекуперации энергии и электронных систем управления) для типажей выпускаемой в республике автотракторной и карьерной техники и их исследование на натуральных моделях	Развитие научных основ проектирования и алгоритмов функционирования гибридных силовых установок мобильных машин, макетирование компонентов, в том числе многоуровневых электронных систем управления, выполненных на базе единой программно-аппаратной платформы, экспериментальные исследования компонентов в составе ходового макета с гибридной силовой установкой	Лаборатория бортовых мехатронных систем мобильных машин
Развитие теории рабочего процесса, методов расчета и проектирования двигателей и гидромеханических трансмиссий для высокомоментной автотракторной техники на основе перспективной компонентной базы	Теоретические и экспериментальные исследования конструкций и особенностей управления автоматизированных преселекторных трансмиссий. Развитие научных основ проектирования бортовых мехатронных систем управления трансмиссиями мобильных машин	Лаборатория бортовых мехатронных систем мобильных машин
Развитие принципов построения комплекса современных бортовых систем управления и диагностики транспортных средств и разработка рекомендаций по их промышленному применению	Развитие научных принципов структурного построения и проектирования современных бортовых комплексных систем активной безопасности и информационно-управляющих систем транспортных средств	Отдел систем активной безопасности и управления
	Исследование закономерностей функционирования и обоснование параметров электрогидравлической системы управления скоростью исполнительных механизмов энергосберегающих приводов с использованием пьезоэлектрических компонентов	Лаборатория электрогидравлических систем управления
	Развитие научных основ проектирования и создание программно-алгоритмической и аппаратной платформы нового поколения бортовых мехатронных систем управления трансмиссиями мобильных машин на базе интеграции и самоорганизации	Лаборатория бортовых мехатронных систем мобильных машин

пытания макетных образцов позволяют проводить экспериментальную оценку эффективности функционирования исполнительных мехатронных компонентов и бортовых систем управления в целом. Анализ результатов испытаний позволяет формулировать технические требования к перспективным бортовым системам управления мобильных машин.

Комплексные задания выполняются с позиций междисциплинарного подхода, непосредственное взаимодействие исследователей по разным направлениям машиноведения, в том числе специалистов бортовой системотехники, позволяет прогнозировать синергетический эффект в планируемых результатах.

В рамках ГПНИ "Механика, техническая диагностика, металлургия" в цикле работ 2011—2015 гг. исследования по направлениям, перечисленным в табл. 1, выполняются ОИМ НАН Беларуси совместно с другими организациями, такими как Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Белорусско-Российский университет.

Результаты, получаемые в ходе выполнения НИР в рамках ГПНИ "Механика, техническая диагностика, металлургия" по направлению "Бортовые комплексы, системы управления мобильных машин и их компоненты", используются как научное обеспечение для обоснования новых проектов государственных научно-технических программ и разработки технических заданий по созданию и постановке на серийное производство бортовых электронных и мехатронных систем.

#### Прикладные разработки, освоенные в серийном производстве

Прикладные разработки по приоритетным направлениям деятельности, включая направление "Бортовые комплексы, системы управления мобильных машин и их компоненты", в Республике Беларусь выполняются по государственным программам. Разработка и освоение производства бортовых электронных и мехатронных систем мобильных машин в основном сосредоточены в ГНТП "Машиностроение", государственной программе импортозамещения и ГНТП "Радиоэлектроника".

В период с 2006 по 2012 гг. в рамках указанных программ завершена разработка и освоено производство более десятка новых изделий автотракторной электроники [1]. Эти системы, как правило, в соответствии с требованиями комплекта стандартов SAE J1939 для обмена данными используют CAN-протокол и включают мехатронные компоненты.

По совместным разработкам ОИМ ПАН Беларуси и приборостроительного предприятия ОАО "Экран" (г. Борисов) освоены в производстве базовые модели систем активной безопасности [16—17]:

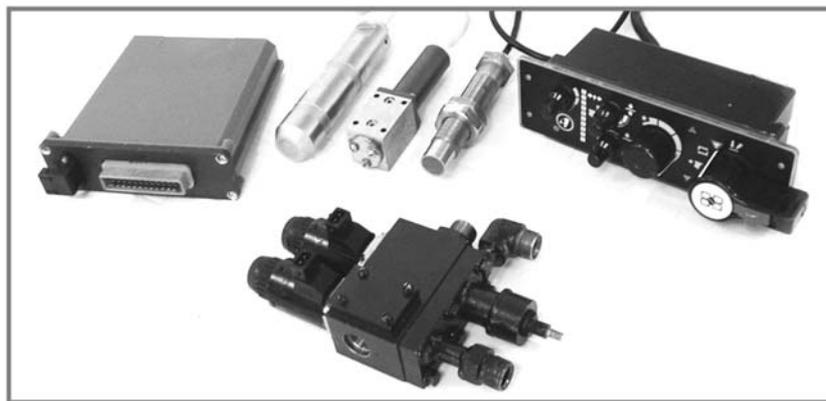
- антиблокировочная система (АБС) тормозов магистральных автомобилей и автопоездов (рис. 1, см. третью сторону обложки).
- антиблокировочно-противобуксовочная система (АБС/ПБС) (рис. 1);
- электронная система управления пневмоподвеской;
- модуль информационно-управляющий.

ОИМ НАН Беларуси совместно с ОАО "Измеритель" (г. Новополоцк) разработана и освоена в производстве электрогидравлическая система автоматического управления навесным устройством тракторов "Беларус" (рис. 2). Кроме того, разработаны и освоены в производстве в ОАО "Измеритель" система управления электрогидравлическими распределителями внешних потребителей тракторов "Беларус" (рис. 3, см. третью сторону обложки), а также компоненты системы управления подачей топлива в мобильных машинах (электронная педаль и сенсор ручного управления) с двигателями Евро-3,4 (рис. 4) [18—20].

Специалистами ОИМ НАН Беларуси разработана бортовая комплексная многоуровневая информационно-управляющая система (КИУС) автобусов семейства МАЗ. В 2012 г. ОАО "Экран" (г. Борисов) выпущена ее опытно-промышленная партия (рис. 5).

Сведения об объемах выпуска освоенных в производстве бортовых систем управления и их компонентов приведены в табл. 2.

Всего с 2006 г. только ОАО "Экран" и ОАО "Измеритель" выпуще-



Компоненты электрогидравлической системы управления навесным устройством трактора

Рис. 2. Внешний вид компонентов электрогидравлической системы автоматического управления навесным устройством трактора



Электронная педаль



Сенсор ручного управления

Рис. 4. Внешний вид компонентов системы управления подачей топлива в мобильных машинах (электронная педаль и сенсор ручного управления) с двигателями Евро-3,4

Таблица 2  
Объемы выпуска бортовых систем управления и их компонентов

Наименование изделия	Годы				
	2008	2009	2010	2011	2012
Антиблокировочная система (АБС)	19 700	9800	18 400	16 554	15 904
Антиблокировочно-противобуксовочная система (АБС/ПБС)		15	3700	9624	15 715
Электрогидравлическая система автоматического управления навесным устройством трактора "Беларус"	204	875	658	1409	9027
Система программного управления внешними потребителями тракторов "Беларус"		436	2430	861	1255
Компоненты системы управления подачей топлива (электронная педаль и сенсор ручного управления)				3161	1538



Рис. 5. Структурная схема, внешний вид блоков управления бортовой комплексной многоуровневой информационно-управляющей системы и компоновка системы на автобусах семейства МАЗ

но разработанных совместно с ОИМ НАН Беларуси, по государственным программам изделий бортовой электроники (перечисленным в табл. 2) на сумму более чем 40 млн долларов США. С каждым последующим годом общие объемы производства этих изделий постоянно увеличиваются.

ОАО "СКБ Камертон" в соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.01.2013 № 22 является сетевым оператором в сфере навигационной деятельности, осуществляющим оперативное управление и эксплуатацию Единой системы навигационно-временного обеспечения Республики Беларусь. Оно разрабатывает и производит системы мониторинга и диспетчеризации транспортных средств различного назначения. ОАО "СКБ Камертон" разработало и поставило на серийное производство в Республике Беларусь и Российской Федерации цифровые тахографы и в дальнейшем также планирует развивать эти направления.

СП "Технотон" разрабатывает и производит системы GPS/ГЛОНАСС мониторинга транспорта, бортовые системы контроля и диагностики автомобилей с использованием технологий GPS, GPRS и CAN-протокола, датчики расхода и уровня топлива, автономные расходомеры топлива.

#### Прикладные разработки в стадии реализации

С учетом ежегодно возрастающего спроса машиностроительных предприятий на бортовые системы управления и их компоненты, по ГНТП "Машиностроение" в рамках цикла работ 2011—2015 гг.

выполняется 12 самостоятельных заданий, 5 работ содержат этапы в составе заданий по разработке и освоению производства мобильной техники. ОИМ НАН Беларуси в кооперации с ОАО "Экран", ОАО "МПОВТ", ОАО "Измеритель" проводит работы в интересах ОАО "МАЗ", ПО "МТЗ", ОАО "БелАЗ", ОАО "Амкадор". ОАО "ВЗЭП" и предприятия ОАО "Интеграл" самостоятельно выполняют задания в интересах ОАО "МАЗ", ПО "Гомсельмаш", ОАО "Бобруйскагромаш", ОАО "Брестсельмаш", ОАО "Лидсельмаш".

В настоящее время, только в рамках по ГНТП "Машиностроение", ведется разработка, проводятся испытания и осуществляется подготовка серийного производства для организации выпуска следующих систем и компонентов бортовой электроники:

- антиблокировочная система для прицепного состава с функцией противоокидывания;
- система контроля продольной (курсовой) устойчивости тягача большегрузного автопоезда;
- мехатронная система управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БелАЗ;
- система автоматического управления трансмиссией самоходного погрузчика производства ОАО "Амкадор";
- система контроля и управления технологическим процессом внесения органических удобрений;
- система дистанционного контроля транспортных средств;
- центральный коммутационный блок с мультиплексной системой связи нового поколения;
- информационный комплекс нового поколения для работы в составе мультиплексной системы

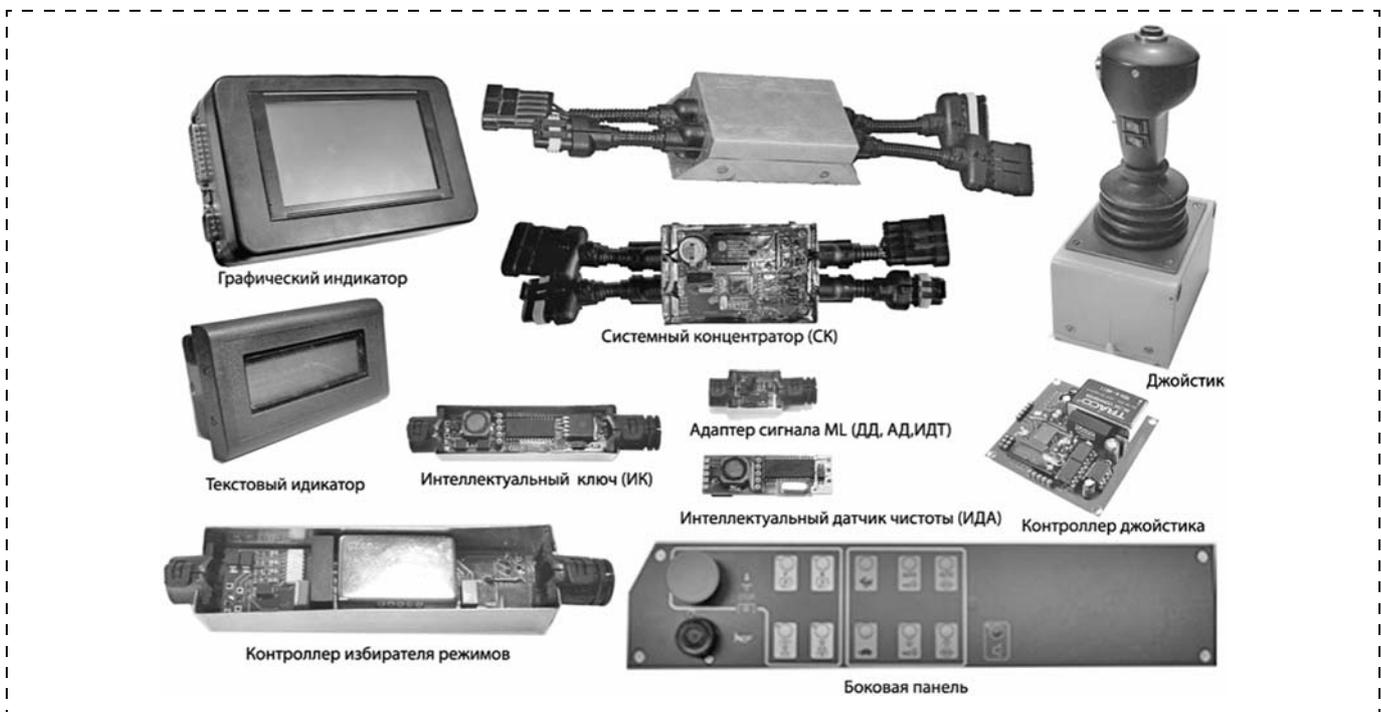


Рис. 6. Внешний вид блоков программно-аппаратной платформы построения интегрированных систем управления мобильных машин с интеллектуальной периферией

электрооборудования грузовых автомобилей семейства МАЗ;

- бортовая информационно-управляющая система универсального энергетического средства "Полесье" производства ПО "Гомсельмаш";
- система управления и контроля точности внесения минеральных удобрений с индикацией веса;
- система контроля и управления технологическим процессом внесения органических удобрений;
- рулевое колесо с многофункциональной системой управления бортовыми компонентами для автомобилей перспективного семейства МАЗ;
- сетевая система управления электрооборудованием автомобилей МАЗ на основе комбинации электронных блоков и щитка приборов нового поколения;
- бортовая комплексная многоуровневая информационно-управляющая система для автобусов семейства МАЗ.

ОИМ НАН Беларуси ведет работы по созданию устройства вибромониторинга редуктора моторколес и интегрированию его в бортовую контрольно-диагностическую систему карьерного самосвала БелАЗ [21], разрабатывает систему управления верхнего уровня тяговым электроприводом гусеничного трактора общего назначения [22]. Выполнен комплекс научных исследований для разработки бортовой системы управления приводами колес полноприводных или многоприводных машин [23—27]. Разработаны электронные модули для построения интегрированной электронной системы управления автопоездом МАЗ [28].

В сотрудничестве с ОАО "Интеграл" проводится работа по созданию системы полуавтоматического управления фрикционной трансмиссией трактора "Беларус 2422" на базе компонентов единой программно-аппаратной платформы построения интегрированных электронных систем (рис. 6) мобильных машин [29—30].

### **Среднесрочные перспективные исследования и разработки**

В целях формирования научно-технического задела для разработок бортовых систем управления мобильных машин на среднесрочную перспективу ОИМ НАН Беларуси выполняет исследования по следующим направлениям:

- разработка нового поколения электронных и мехатронных компонентов и содержания на их базе интегрированных бортовых систем активной безопасности, управления, диагностики и информационно-аналитических комплексов перспективных мобильных машин, в том числе для мониторинга и обслуживания транспортных систем "человек-машина" по фактическому состоянию;
- разработка мехатронных систем управления мобильных машин на базе компонентов единой программно-аппаратной платформы, в том чис-

ле систем управления гидромеханическими, механическими, преселекторными и электромеханическими трансмиссиями, гибридными силовыми установками и их базовыми компонентами, систем диагностики;

- синтез точных и энергосберегающих (без диссипации энергии при дросселировании рабочей жидкости) мехатронных электрогидравлических приводов, а также ультразвуковых средств измерения перемещения;
- разработка и освоение производства прецизионных электрогидравлических редукционных клапанов с использованием пьезокерамических актюаторов;
- разработка линейки бортовых мехатронных узлов, компонентов интегрированных электронных систем мобильных машин, работающих с системами точного позиционирования мобильных объектов на местности, в частности, для обеспечения технологий точного земледелия.

Для объединения потенциалов стран Союзного государства в области разработки бортовых электронных и мехатронных систем мобильных машин ОИМ НАН Беларуси принял участие в разработке проекта концепции программы Союзного государства "Автоэлектроника". Проект концепции разработан Министерством промышленности и торговли Российской Федерации, Министерством промышленности Республики Беларусь, ОАО "НПП "Радар ММС" (г. Санкт-Петербург), ОИМ НАН Беларуси и ОАО "Интеграл" (г. Минск) с привлечением ведущих специалистов машиностроительных и приборостроительных заводов по рассматриваемому направлению в рамках созданной рабочей группы. Он поддержан ведущими машиностроительными предприятиями России и Беларуси, в том числе ОАО "КАМАЗ", ОАО "Автомобильный завод "Урал", ОАО "Объединенный инженерный центр" группы ГАЗ, ОАО "МАЗ" ("АМАЗ"), ОАО "МЗКТ", ОАО "БелАЗ", ОАО "ММЗ".

Проект концепции программы предусматривает проведение работ по следующим направлениям:

- системы управления движением автотранспортных средств;
- электронные интеллектуальные системы обеспечения безопасности;
- системы управления электрооборудованием и микроклиматом автотранспортных средств;
- системы сбора информации, контроля и диагностики;
- датчики и радиоэлектронные элементы систем автомобиля.

В соответствии с резолюцией Совета Министров Союзного государства от 29.11.2010 № 1 программа "Автоэлектроника" внесена в Примерный перечень приоритетных научно-технических и инновационных программ и проектов Союзного государства для их дальнейшей разработки, утверждения и реализации.

## Выводы

Дальнейшее повышение конкурентоспособности мобильной техники стран Единого экономического пространства требует совершенствования ряда ключевых качеств, в том числе по безопасности, надежности, топливной экономичности, экологическим характеристикам, разработки и освоения производства нового поколения базовых систем бортовой электроники и мехатроники.

Разработки бортовых электронных и мехатронных систем нового поколения основываются на результатах научных и прикладных исследований, выполняемых в рамках соответствующих взаимосвязанных программ, охватывающих полный цикл создания новой продукции от научной идеи до постановки изделия на серийное производство.

## Список литературы

1. Дубовик Д. А., Савченко В. В. Бортовые системы управления мобильных машин: настоящее и будущее // Механика машин, механизмов и материалов. 2012. № 3 (20)—4 (21). С. 37—45.
2. Vantsevich V. V., Vysotski M. S., Dubovik D. A. Control of the Wheel Driving Forces as the Basis for Controlling Off-Road Vehicle Dynamics // SAE 2002 Transactions Journal of Commercial Vehicles. P. 452—459. Paper #2002-01-1472 presented at 2002 SAE Int. Off-Highway Congress, Las Vegas, Nevada, March 19—23, 2002.
3. Ванцевич В. В., Высоцкий М. С., Дубовик Д. А. Регулирование мощности в движителе как средство управления динамикой колесных машин // Автомобильная промышленность 2004. № 1. С. 13—16.
4. Сазонов И. С., Амельченко П. А., Дубовик Д. А., Ким В. А., Стасилевич А. Г., Ясюкович Э. И. Динамика колесных машин. Могилев: Беларус-Рос. ун-т., 2006. 461 с.
5. Сазонов И. С., Амельченко П. А., Дубовик Д. А., Ким В. А., Мельников А. С. Тормозные системы колесных машин. Могилев: Беларус-Рос. ун-т, 2011. 351 с.
6. Тарасик В. П., Рынкевич С. А. Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами. Минск: УП "Технопринт", 2004. 512 с.
7. Дубовик Д. А. Способ оценки эффективности ходовых систем колесных машин. Патент ВУ 9953. Дата публикации заявки: 29.11.2005.
8. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А. Коэффициент полезного действия ходовых систем колесных машин // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2007. Т. 51. № 2. С. 91—94.
9. Дубовик Д. А. Способ оценки эффективности ходовой системы колесной машины. Патент ВУ 15670. Дата публикации заявки: 24.08.2009.
10. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А., Белоус М. М., Лабецкий Л. Н., Чернин М. А. Способ управления дифференциалами многоприводных колесных машин. Патент ВУ 10163. Дата публикации заявки: 18.07.2005.
11. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А., Белоус М. М. Способ управления блокировками дифференциалов многоприводной колесной машины. Патент ВУ 12513. Дата публикации заявки: 27.03.2008.
12. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А., Белоус М. М., Мыльников Е. В. Способ управления дифференциалами колесных машин. Патент ВУ 15148. Дата публикации заявки: 27.05.2010.
13. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А., Белоус М. М., Бурдыкин И. В., Чернин М. А. Способ управления буксованием ведущих колес транспортного средства. Патент ВУ 16659. Дата публикации заявки: 02.03.2010.
14. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А., Белоус М. М. и др. Система управления блокировками дифференциалов колесной машины. Патент ВУ 3413; дата публикации заявки: 23.06.2006. Патент ВУ 4189; дата публикации заявки: 07.05.2007. Патент ВУ 4237;

дата публикации заявки: 12.07.2007. Патент ВУ 4523; дата публикации заявки: 20.11.2007.

15. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А. и др. Противобуксовочная система колесной машины. Патент ВУ 5939; дата публикации заявки: 23.06.2009. Патент RU 89462; дата публикации заявки: 03.07.2009. Патент ВУ 6001; дата публикации заявки: 21.07.2009. Патент RU 89031; дата публикации заявки: 29.07.2009.

16. Высоцкий М. С., Белоус М. М. Методология создания локальных систем управления агрегатами автомобиля // Инновации в машиностроении: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Минск 26—29 октября 2010 г. Мн., ОИМ НАН Беларуси. 2010. С. 82—86.

17. Ляхов С. В., Белоус М. М. Комплекс исследования систем активной безопасности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 5. С. 53—57.

18. Строк Е. Я., Бельчик Л. Д., Горавский С. Л. Выбор конструктивных параметров сервораспределителя путем многофакторного вычислительного эксперимента // Вестник Белор. национ. техн. ун-та, 2009. С. 62—65.

19. Строк Е. Я., Бельчик Л. Д., Горавский С. Л. Выбор структуры позиционного регулятора при активной компенсации утечек из исполнительного механизма гидропривода навесного устройства // Вестник Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Т. 1. № 2. 2010. С. 165—170.

20. Бесконтактное копирование рельефа поверхности поля рабочими органами сельхозмашин с использованием акустических методов / Е. Я. Строк, Л. Д. Бельчик, А. В. Ващула и др. // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 6. С. 35—40.

21. Ишин Н. Н., Адашкевич В. И., Скороходов А. С. Методические подходы создания инструментальных средств диагностики узлов трансмиссионных систем автомобиля в условиях эксплуатации // Механика машин, механизмов и материалов. 2010. № 1(10). С. 57—62.

22. Красневский Л. Г., Белевич А. В., Коробкин В. А. Бортовая система управления верхнего уровня гусеничного трактора с электромеханической трансмиссией: структура и особенности функционирования // Сб. науч. тр. "Актуальные вопросы машиноведения". Вып. 1. Мн.: ОИМ НАН Беларуси. 2012. С. 151—154.

23. Дубовик Д. А. Интегрированное управление касательными силами тяги ведущих колес // Вестник Белорус-Рос. ун-та. 2010. № 2. С. 34—38.

24. Дубовик Д. А. Превентивное управление приводом ведущих колес многоприводных колесных машин // Вес. Нац. акад. наук Беларусь Сер. физ. техн. наук. 2009. № 1. С. 47—53.

25. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А., Белоус М. М., Мыльников Е. В. Способ управления дифференциалами привода ведущих мостов многоприводных колесных машин // Вестник Белорус. Рос. ун-та. 2009. № 2. С. 13—23.

26. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А., Николаев Ю. И. Оценка рассогласования кинематики поворота управляемых колес мобильной машины // Вестн. машиностроения. 2010. № 10. С. 29—34. = Vysotskii M. S., Dubovik, D. A., Nikolaev Yu. I. Mismatch of Rotational Kinematics of Controllable Truck Wheels // Russian Engineering Research. 2010. V. 30. N 10. P. 989—994.

27. Дубовик Д. А. Снижение энергозатрат многоприводных колесных машин путем совершенствования механических приводов ведущих колес: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. — Мн., 2012. — 44 с.

28. Красневский Л. Г., Белевич А. В., Луцкий В. И., Шестопалов С. И. Мехатронные системы управления трансмиссиями мобильных машин: особенности архитектуры и конструкции // Матер. 3-й науч.-техн. конф. "Мехатроника, автоматизация, управление". СПб., 2006. С. 74—78.

29. Красневский Л. Г., Белевич А. В., Луцкий В. И., Шарангович А. И. Комплекс блочно-модульных мехатронных систем управления типоразмерного ряда перспективных трансмиссий с фрикционными муфтами тракторов "Беларус" // Развитие национальной базы НИОКР: сб. статей VIII международного автомобильного научного форума, Москва 20 октября 2010 г. Труды НАМИ. 2011. № 246.

30. Красневский Л. Г., Белевич А. В., Кравченко А. А., Луцкий В. И., Шестопалов С. И., Шарангович А. И. Программно-аппаратный комплекс для натурных исследований трансмиссий тракторов "Беларус" с мехатронными системами управления // Тр. науч.-техн. конф. ОИМ НАН Беларуси "Инновации в машиностроении". Мн.: ОИМ НАН Беларуси, 2008. С. 275—279.

**В. И. Поддубный**, д-р техн. наук, проф.,  
poddubny@list.ru,

Алтайский государственный технический  
университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул,

**А. Трехтлер**, проф., доктор-инженер,  
зав. кафедрой техники управления и мехатроники,  
Университет Падерборн,

**К. П. Йекер**, доктор-инженер,  
Университет Падерборн,

**Е. Харченко**, доктор-инженер,  
MLaP GmbH, г. Падерборн,

**А. Варкентин**, доктор-инженер,  
проектная группа техники проектирования  
мехатроники, Институт технологии производства  
общества Фраунгофера, г. Падерборн

## **Моделирование активной подвески для автомобиля повышенной проходимости и оценка возможности ее использования для снижения нагрузки на колесо с поврежденной шиной**

*Обсуждаются проблема конфликта между требованиями к комфорту и безопасности автомобиля и решение этой проблемы с помощью активной подвески. Описана мехатронная модель полноприводного внедорожного автомобиля в прикладном пакете Dymola. Предложена и апробирована путем математического моделирования, методика снижения вертикальной нагрузки на поврежденное колесо с использованием активной подвески автомобиля. Приводятся результаты математического моделирования движения подвески для снижения вертикальной нагрузки на поврежденное колесо. Предложено оптимальное решение проблемы.*

**Ключевые слова:** активная подвеска, мехатронная модель, автомобиль повышенной проходимости, математическое моделирование, прикладной пакет Dymola, снижение нагрузки на колесо

### **Введение**

Возрастающие требования к комфорту и безопасности автомобилей ведут к конфликту между ними, так как безопасность движения достигается применением "жесткой" подвески, в то время как улучшение комфорта водителя требует снижения жесткости подвески. Проблема конфликта между комфортом и безопасностью исследована во множествах работ [1, 2], визуально она отображена на рис. 1 (см. третью сторону обложки), где представлена зависимость вертикального ускорения кузова автомобиля (критерий для комфорта) от колебаний вертикальной нагрузки в контакте колеса с опорной поверхностью (критерий для безопасности движе-

ния) при различных значениях коэффициентов жесткости и затухания подвесок существующих автомобилей. Горизонтальные линии диаграммы получены при постоянных значениях коэффициента жесткости подвески, вертикальные штриховые линии — при постоянных значениях коэффициента затухания. Из рассмотрения этой диаграммы явно следует, что ужесточение подвески при постоянном значении коэффициента затухания вызывает рост вертикальных колебаний кузова и снижение колебаний вертикальной нагрузки на колесо. При этом снижается комфорт и повышается безопасность движения автомобиля. Путем целенаправленного подбора характеристик обычной подвески, направленного или на комфорт, или на безопасность движения, можно получить спортивные  $S$  (спорт) или комфортные  $L$  (лимузин) для пассажира ходовые качества автомобиля (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Нижняя граница диаграммы не может быть преодолена при использовании пассивных подвесок с постоянными характеристиками. Дальнейшее улучшение комфорта и безопасности движения возможно только путем внедрения в конструкцию подвески активных компонентов, использующих достижения современной теории управления, микроэлектроники, измерительные и исполнительные элементы управления. Такого рода подвески можно условно разделить на две категории — семиактивные (полуактивные) и активные.

Принцип действия семиактивных подвесок основан на изменении демпфирующей характеристики амортизатора. Это обеспечивается управлением диаметром пропускного отверстия клапана амортизатора или использованием магнито-реологической жидкости (MRF), представляющей собой суспензию в масле очень мелкодисперсных металлических магнитных частиц — диполей. При воздействии внешнего магнитного поля происходит изменение ориентации диполей и, соответственно, вязкости MRF в заданном направлении.

Активная подвеска содержит силовые элементы, перемещающие кузов автомобиля для предотвращения бокового крена при повороте или смене полосы движения, "клевка" при резком разгоне или торможении. Обычно используются гидравлические элементы высокого давления. Примером такой подвески является подвеска "Active Body Control" (ABC) автомобиля Mercedes Benz CL600.

В любом случае управление исполнительными элементами подвески должно осуществляться по алгоритму, который чаще всего разрабатывается на основе механико-математической модели автомобиля с использованием положений современной теории автоматического регулирования. Решению такого класса задач посвящены работы [3—5].

Основным недостатком управления на основе математических моделей является невозможность учесть в модели все многообразие условий, в котором находится автомобиль — изменение типа и со-

стояния опорной поверхности, положения центра масс вследствие изменения числа пассажиров или неравномерной загрузки кузова грузового автомобиля и т. д. Кроме этого довольно проблематично создать математическую модель, полностью адекватную аналогу. Вследствие вышеизложенных причин разработанный на этой основе алгоритм управления в некоторых условиях может быть неэффективен.

В последнее время появились работы, ставящие целью разработку управления, использующего нечеткую логику, нейросети. В качестве примера можно привести работу [6], в которой метод автономного адаптивного управления (ААУ) применен для построения системы управления активной и семиактивной подвеской. Преимуществом такого подхода является то, что он не основан на математической модели автомобиля. К недостаткам этого подхода относятся трудности, связанные с необходимостью постоянного автоматического доучивания или переучивания систем управления. Следует отметить, что тонкости и нюансы, связанные с реализацией такого вида управления зарубежными автомобильными фирмами, в открытой печати не освещаются.

Разработка активной и семиактивной подвески является одним из важнейших научных направлений кафедры техники регулирования и мехатроники технического университета г. Падерборн (Германия). Был успешно осуществлен ряд проектов, способствующих ее внедрению в конструкторию современных автомобилей в серийном производстве [7–9].

При реализации активной подвески для полноприводного автомобиля повышенной проходимости возникла идея использовать активную подвеску для снижения вертикальной нагрузки на колесо при повреждении шины. Это особенно актуально в том случае, когда отсутствует возможность замены поврежденного колеса и необходимо продолжать движение. Для решения этой проблемы были поставлены следующие задачи:

1. Разработка трехмассовой модели полноприводного автомобиля повышенной проходимости с активной подвеской.

2. Моделирование движения поддресоренной массы автомобиля с помощью активной подвески в целях снижения нагрузки на поврежденное колесо.

3. Определение вертикальных сил в контакте колес с опорой, активных внутренних сил при различных относительных движениях поддресоренных масс автомобиля относительно рамы и при изменении (вследствие различной загруженности автомобиля) положения центра масс в горизонтальной плоскости.

4. Выбор приемлемой стратегии регулирования для решения проблемы.

### Мехатронная модель автомобиля в прикладном пакете *Dymola*<sup>®</sup>

Модель состоит из трех твердых тел, связанных между собой сочленениями и пружинно-демпфер-

ными элементами. Тела моделируют кузов автомобиля с нагрузкой, переднюю и заднюю оси. Кузов объединяет раму, кабину, грузовой отсек, двигатель и трансмиссию. Оси автомобиля включают в себя балку моста с главной передачей, карданные валы и колеса. Рассматриваемая механическая система имеет 10 степеней свободы. Шестью степенями свободы обладает кузов при его пространственном движении, передняя и задние оси обладают двумя степенями свободы каждая при их повороте относительно продольной и поперечной осей кузова.

Иерархически модель разбита на следующие подсистемы:

1) объединяющую оси автомобиля, порты соединения колес и пружин подвески, исполнительные элементы управления (актуаторы) для введения сил;

2) описывающую активные подвески колес передней и задней оси, содержащую математические блоки для описания вводимых активных сил, блоки-измерители относительной скорости и взаимного положения элементов подвески;

3) содержащую описание кинематических соотношений и определяющую силы в контакте колеса с опорной поверхностью по теории, предложенной G. Rill (EASY-TO-USE-modell) [10].

Величина  $S$ , определяющая скольжение колеса, описывается выражением

$$S = \sqrt{S_X^2 + S_Y^2},$$

где  $S_X$  и  $S_Y$  — продольное и боковое скольжения колеса.

Боковое скольжение принимается равным тангенсу угла увода  $\alpha$  — угла, составляемого вектором скорости центра катящегося колеса с плоскостью его обода:

$$S_Y = \operatorname{tg} \alpha.$$

Продольное скольжение определяется выражениями

$$S_X = 1 - \frac{r_{dyn} \dot{\phi}}{v} \quad \text{— при торможении колеса;}$$

$$S_X = 1 - \frac{v}{r_{dyn} \dot{\phi}} \quad \text{— при действии на колесо вращающего момента,}$$

где  $v$  — проекция скорости на плоскость обода;  $r_{dyn}$  — динамический радиус колеса;  $\dot{\phi}$  — угловая скорость колеса.

Кривая зависимости суммарной горизонтальной силы от скольжения (рис. 2) разбивается на три части.

Зависимость горизонтальной силы  $F$ , действующей в контакте колеса с опорной поверхностью, от

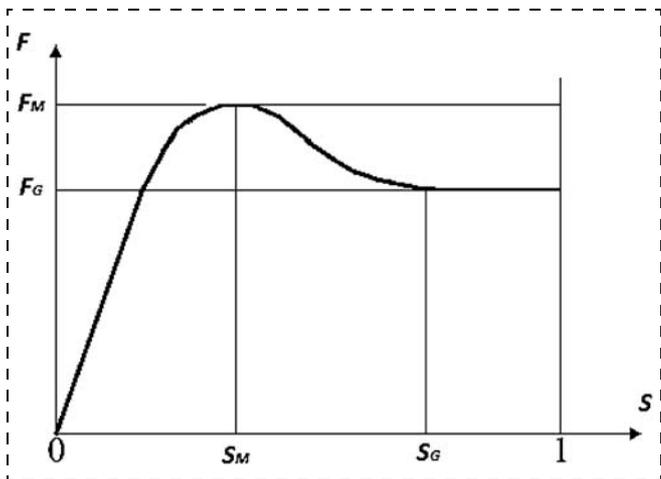


Рис. 2. Зависимость продольной силы  $F$  от скольжения  $S$

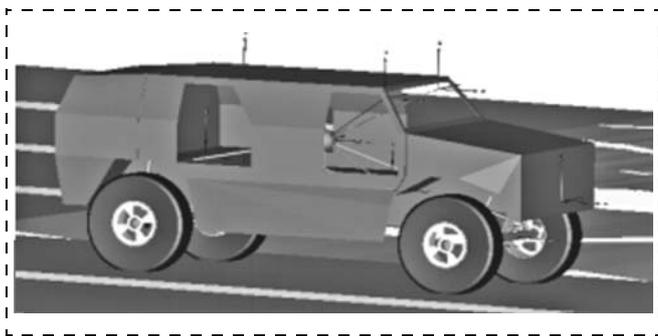


Рис. 3. 3D-модель автомобиля

скольжения описывается кусочно-аналитической функцией

$$F(S) = \begin{cases} S_M \frac{\sigma}{1 + \sigma \left( \frac{S_M}{F_M} F_0 - 2 + \sigma \right)}, \sigma = \frac{S}{S_M}, 0 \leq S \leq S_M; \\ F_M - (F_M - F_G) \sigma^2 (3 - 2\sigma), \\ \sigma = \frac{S - S_M}{S_G - S_M}, S_M \leq S \leq S_G; \\ F_G = \text{const}; S > S_G, \end{cases}$$

где  $F_M$  — максимальная передаваемая в контакте сила;  $F_G$  — установившееся значение силы трения скольжения;  $S_M$  — значение скольжения при максимуме силы в контакте колеса;  $S_G$  — минимальное значение скольжения на участке стабилизации силы в контакте;  $F_0$  — тангенс угла наклона к кривой при скольжении, равном 0:

$$F_0 = \left. \frac{dF}{dS} \right|_{S=0}.$$

Компоненты горизонтальной силы определяются через угол увода  $\alpha$  и угол наклона плоскости обода колеса к вертикали  $\delta$ :

$$F_x = F \cos \alpha; F_y = F \sin \alpha + F_z \operatorname{tg} \delta.$$

Вертикальная сила определяется выражением

$$F_z = c_z \Delta_z + V_z d_z,$$

где  $c_z$  — вертикальная жесткость колеса;  $\Delta_z$  — вертикальная деформация шины;  $V_z$  — вертикальная скорость колеса;  $d_z$  — коэффициент демпфирования шины.

Ввиду сложности отображения и восприятия читателем топология мехатронной модели автомобиля не приводится. 3D-модель в Dymola® представлена на рис. 3.

Сначала была исследована возможность снижения нагрузки на поврежденное колесо посредством направленного перераспределения нагрузки. Нагрузка на поврежденное колесо снижается при смещении центра масс кузова в горизонтальной плоскости дальше от поврежденного колеса. Это может быть осуществлено с помощью активной подвески.

Было проведено моделирование следующих движений кузова автомобиля при прямолинейном движении для случая повреждения заднего правого колеса:

- 1) выравнивание кузова автомобиля относительно горизонтальной опорной поверхности;
- 2) поворот кузова относительно продольной оси налево;
- 3) поворот кузова относительно поперечной оси вперед.

Выполнение этих движений способствует удалению центра масс кузова в горизонтальной плоскости дальше от поврежденного колеса. Имитировалось движение при различных смещениях центра масс кузова, обусловленных неравномерной загрузкой автомобиля, относительно его расчетного положения при оптимальной загрузке. Моделирование было проведено для максимально допустимого хода штока гидроцилиндра активной подвески 0,25 м. Результаты представлены на рис. 4–6, где приняты следующие обозначения:  $Z$  — процент

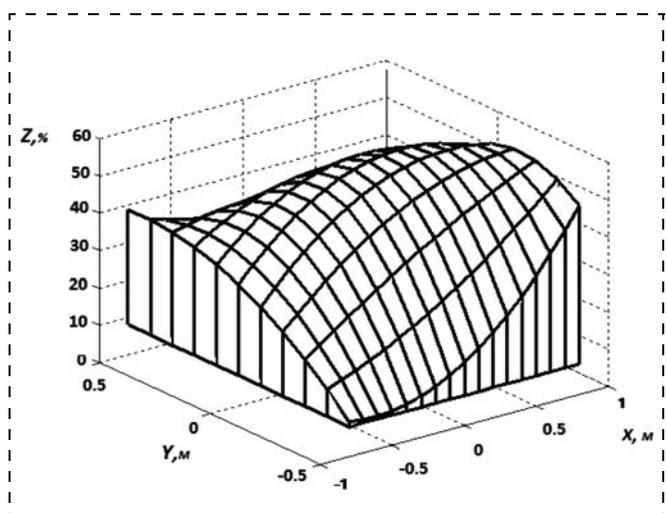


Рис. 4. Снижение нагрузки на поврежденное колесо при выравнивании кузова

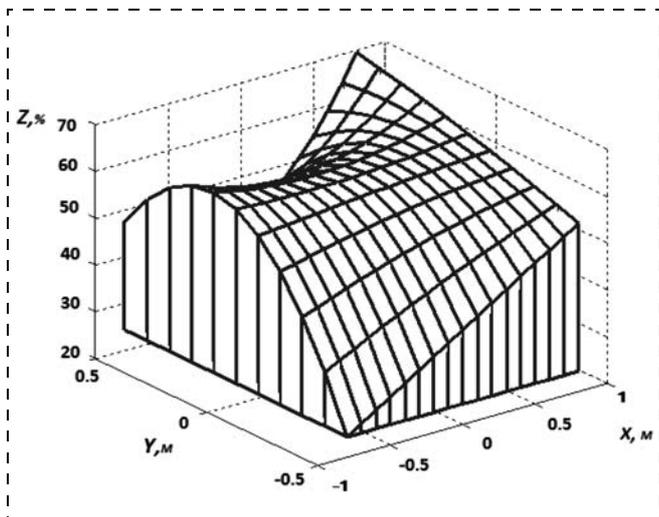


Рис. 5. Снижение нагрузки на поврежденное колесо при повороте кузова налево относительно продольной оси

снижения нагрузки на поврежденное колесо по отношению к нагрузке при отсутствии активного воздействия;  $X$ ,  $Y$  — координаты центра масс кузова в горизонтальной плоскости относительно его расчетного положения при оптимальной загрузке автомобиля.

### Выводы и рекомендации

На основании результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Относительное перемещение кузова автомобиля относительно рамы с помощью активной подвески обеспечивает снижение нагрузки на поврежденное колесо до 70 %.

2. Наибольший эффект достигается поворотом кузова относительно его продольной оси на противоположную сторону от поврежденного колеса.

Предложенную методику перераспределения веса автомобиля с помощью активной подвески можно использовать для реализации необходимых движущих и тормозных сил в контакте колеса с опорной поверхностью с целью обеспечить безопасное движение автомобиля в критических ситуациях. В этом смысле проведенные исследования представляют практический интерес для дальнейшего развития ESP-систем современных автомобилей.

### Список литературы

1. Pyper M., Schiffer W., Schneider W. ABC — Active Body Control. Muenchen: die Bibliothek der Technik, 2003.

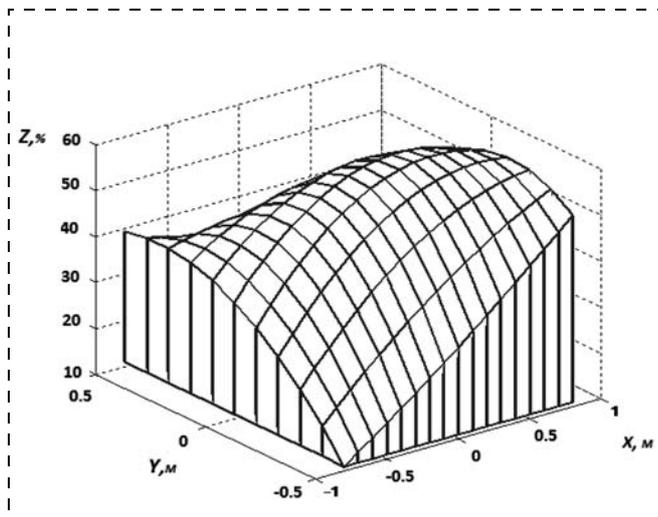


Рис. 6. Снижение нагрузки на поврежденное колесо при повороте кузова вперед относительно поперечной оси

2. Wallentowitz H., Schruellkamp T. Geregelt Fahrwerke, in: Walliser, G., Elektronik im Kraftfahrzeugwesen: Steuerungs-, Regelungs- und Kommunikationssysteme, Kontakt & Studium, Band 437, expert verlag, Renningen, 2004.

3. Андрейчиков А. В., Горобюв, А. С., Андрейчикова О. Н., Солоденков С. В., Юшкин И. В. Определение законов квази-оптимального управления многомерной системы при случайном возмущении // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. Т. 2. № 4. С. 5—7.

4. Перепелкин Е. А. Задача параметрического синтеза многовязной динамической системы как задача нелинейного программирования // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2008. № 1. С. 23—27.

5. Гришин Д. К. К выбору алгоритма управления активной подвеской землеройно-транспортной машины // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. 2012. № 4. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/377553.html>.

6. Жданов А. А., Липкевич Д. Б. AdCAS — система автономного адаптивного управления активной подвеской автомобиля // Труды Института системного программирования РАН. 2004. Т. 7. С. 119—160.

7. Wielenberg A., Harchenko J., Jäker K.-P., Trächtler A. Modellbasierte Entwicklung eines volltragenden, vollaktiven Federungssystems für ein geländegängiges Nutzfahrzeug. 4. VDI/VDE-Fachtagung zur Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren (AUTOREG 2008), Feb. 2008.

8. Nachtigal V., Trächtler A., Jäker K.-P. X-by-Wire Test Vehicle for the Test of New Design Methods and Tools to Interconnect Vehicle-Dynamics Control Systems. Fifth IFAC Symposium on Advances in Automotive Control (IFAC 2007), Aug. 2007.

9. Trächtler A. Integrierte Fahrdynamikregelung mit ESP, aktiver Lenkung und aktivem Fahrwerk. at-Automatisierungstechnik. 2005. 53. S. 11—19.

10. Rill G. Fahrzeugdynamik. Regensburg: FH Regensburg, 2001. 115 s.

# ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



## Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



### Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

### Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

### Редакционная коллегия:

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

### Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Кушнир В. М., Душко В. Р.

Воздействие нелинейных поверхностных волн на морской терминал пирамидальной формы . . . . . 52

### Дорожко В. М.

Динамическое воздействие аномально большой волны на неподвижную преграду . . . . . 59

### Пушков С. Г., Ловицкий Л. Л., Корсун О. Н.

Методы определения скорости ветра при проведении летных испытаний авиационной техники с применением спутниковых навигационных систем . . . . . 65

**В. М. Кушнир**, д-р. техн. наук, проф.,  
Kushnir@yahoo.com,

**В. Р. Душко**, канд. техн. наук, доц.,  
nikasvs@mail.ru,

Севастопольский национальный  
технический университет

## Воздействие нелинейных поверхностных волн на морской терминал пирамидальной формы

*Работа посвящена теоретическому анализу и физическим лабораторным исследованиям волновых воздействий на морской терминал в виде усеченной пирамиды. Конкретные расчеты выполнены для условий Печорского моря.*

**Ключевые слова:** морской терминал, поверхностные волны, критическая глубина разрушения волн

### Введение

Морские терминалы предназначены для загрузки и/или выгрузки нефтепродуктов и газового конденсата из танкеров в условиях открытого моря или рейда посредством подводных трубопроводов, соединенных с береговыми пунктами загрузки и/или выгрузки. Необходимость сооружений такого типа диктуется экономической целесообразностью, так как в условиях северных морей использование морских терминалов существенно сокращает затраты на капитальное строительство береговых коммуникаций [1]. Ключевой проблемой проектирования и обеспечения надежной эксплуатации та-

ких систем в течение длительного периода времени являются оценки возможных воздействия морской среды, т. е. механических (в том числе ударных) нагрузок от действия штормовых волн и ветра, ледовых полей, течений, а также вопросы устойчивости установок на слабонесущем грунте и размыва опорных оснований.

Особую актуальность проблема таких воздействий приобретает в связи с освоением многочисленных нефтяных и газовых месторождений в полярных широтах и в замерзающих морях, к которым относятся Азовское и северная часть Каспийского морей. Здесь наряду с жестокими штормами на терминалы могут воздействовать ледовые поля. Это обстоятельство послужило причиной разработки разнообразных новых конструкций ледостойких терминалов. Один из них — терминал "Варандей" — был разработан в ЦКБ "Коралл" (г. Севастополь) для работ в Печорском море — обширном районе с глубинами 10...20 м в устье р. Печора [1]. Этот район открыт для северо-западных ветров и штормовых волн, которые приходят из центральной части Баренцева моря и могут достигать 8...10 м высоты.

Для численного моделирования гидродинамического воздействия волн и течений на терминал указанной формы создана его трехмерная модель, и выполнен ее экспорт в расчетную область пакета прикладной программы COSMOSFloWorks [2]. На границах этой расчетной области задаются граничные условия, содержащие данные о параметрах волн, воздействующих на проектируемую конструкцию, внешний вид которой приведен на рис. 1.

Для проведения численных расчетов трехмерная модель терминала была помещена в расчетную область с  $l \times b \times h = 300 \times 200 \times 19,7$  м. Плотность воды задана равной  $\rho = 1,025$  кг/м<sup>3</sup>. Генерация рас-

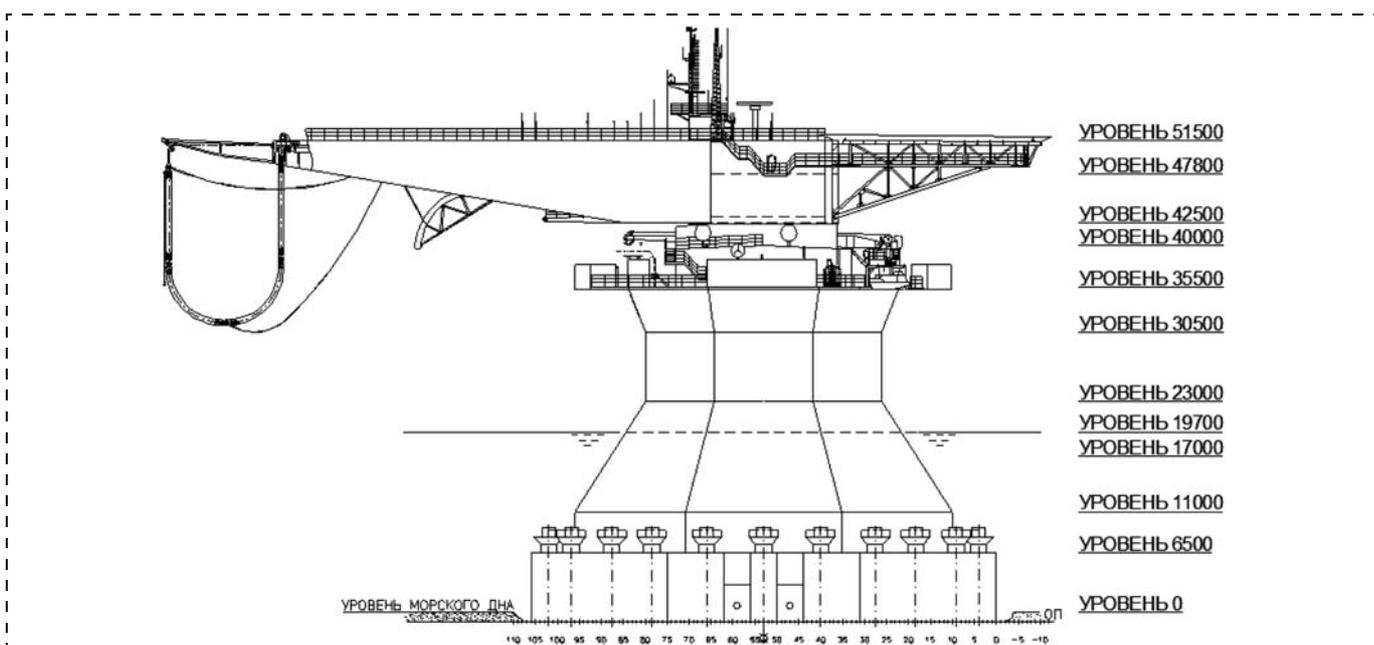


Рис. 1. Конструкция морского терминала "Варандей"

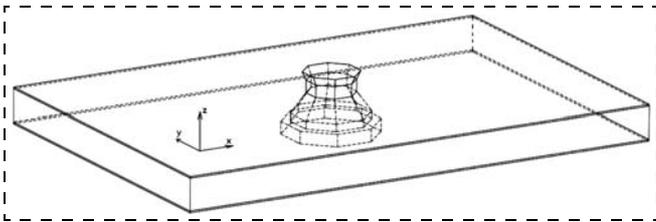


Рис. 2. Расчетная область решения краевой задачи гидродинамического взаимодействия терминала с постоянным и волновым течением

четной сетки происходила с учетом конструктивных особенностей терминала, т. е. осуществлялось ее разбиение на мелкие части в слоях, находящихся в непосредственной близости от его поверхности. Всего было сформировано 44 283 ячейки с объемом от 50 до 0,7 м<sup>3</sup>. Расчеты проводили методом конечных объемов в течение 30...36 с физического времени (более 100 итераций) до достижения сходимости. Это соответствует примерно трем периодам поверхностных волн.

Суммарные волновые нагрузки вычислены по формуле

$$F_{\text{сум}} = \sqrt{F_{\text{гидр}}^2 + F_{\text{инерц}}^2}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{гидр}}$  — гидродинамические волновые нагрузки, зависящие от перепада давления (МН);  $F_{\text{инерц}}$  — инерционные волновые нагрузки (МН), которые определяются на основе теоремы о количестве движения жидкой среды по соотношению

$$F_{\text{инерц}} = \rho S \frac{\partial}{\partial t} \iint_{xz} u(x, z) dx dz, \quad (2)$$

где  $S$  — площадь сечения терминала, перпендикулярная потоку.

Интегрирование горизонтальной оставляющей вектора скорости течения проводится по всей расчетной области.

Расчетная область решения задачи показана на рис. 2.

Целью данной работы является анализ и оценки параметров экстремальных волновых воздействий на морской терминал, выполненный в виде многогранной усеченной пирамиды, что обеспечивает устойчивость этой установки при натиске дрейфующих льдов, толщина которых может достигать 2,5...3 м.

### Статистические характеристики экстремальных поверхностных волн

Прямые измерения характеристик поверхностных волн в Печорском море крайне немногочисленны и недостаточны для определения статистических характеристик экстремального волнения при штормовых условиях. В связи с этим для определения таких характеристик использована спектрально-параметрическая модель ветрового волнения [3, 4], которая предварительно была многократно верифицирована по данным измерения волнения на Балтийском, Черном, Баренцевом и Охотском морях.

Расчеты поверхностных волн выполняли по архивным данным за 35 лет [5]. По результатам расчетов было выделено пять случаев, когда максимальная высота волн превысила 8 м. Полученный ряд максимальных высот волн был использован для вычисления эмпирического распределения плотности вероятностей  $W_e(h)$ . Эта зависимость показана на рис. 3. Глубины моря в районе Приразломного нефтяного месторождения (ПНМ) изменяются от 10 до 20 м. Скорость штормового ветра может достигать существенных значений 35...37 м/с. Возможные значения средних высот волн  $h_0$ , их длин  $\lambda_0$  и периодов  $T_0$  были определены по следующим соотношениям модели ЛОГОИН-Союзмониинпроект для условий "мелкой воды" [14]:

$$\frac{gh_0}{W^2} = 0,07 \left( \frac{gH}{W^2} \right)^{0,6}; \quad \frac{gT_0}{W} = 18,7 \left( \frac{gh_0}{W^2} \right)^{0,6};$$

$$\lambda_0 = T_0 \sqrt{gH}, \quad (3)$$

где  $W$  — скорость ветра, м/с;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $H$  — глубина моря, м.

В табл. 1 приведены результаты расчетов средних значений высот, периодов и длин волн при различной скорости штормового ветра и глубинах моря.

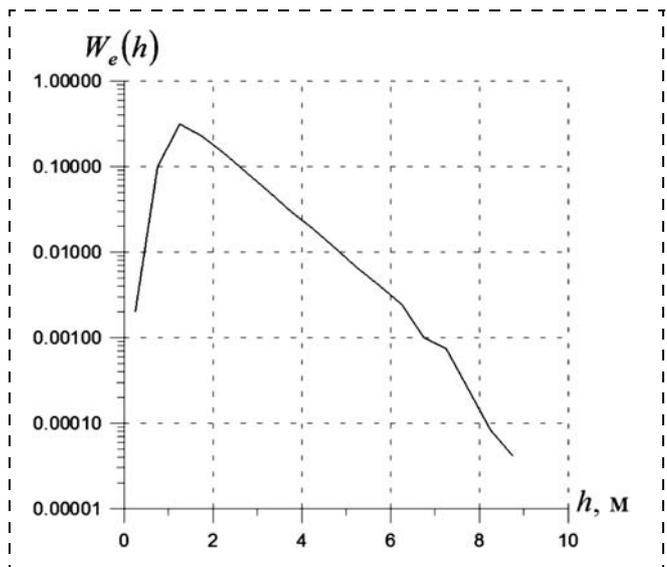


Рис. 3. Плотность распределения вероятностей экстремальных высот волн в районе ПНМ

Таблица 1  
Параметры ветровых волн в районе ПНМ

W, м/с	H, м								
	10			15			20		
	$h_0$ , м	$T_0$ , с	$\lambda_0$ , м	$h_0$ , м	$T_0$ , с	$\lambda_0$ , м	$h_0$ , м	$T_0$ , с	$\lambda_0$ , м
20	1,23	4,66	46,2	1,57	5,39	65,4	1,86	5,98	83,8
25	1,47	4,96	49,2	1,87	5,74	69,7	2,23	6,37	89,2
30	1,70	5,22	51,7	2,17	6,04	73,3	2,57	6,70	93,9
35	1,92	5,45	54,0	2,45	6,31	76,5	2,91	7,00	98,0
40	2,14	5,66	56,1	2,73	6,55	79,4	3,24	7,62	101,7

Из табл. 1 следует, что при средней глубине района ПНМ 15 м среднему значению высоты волны 2 м соответствует скорость ветра, равная 27...28 м/с, что отвечает реальным данным, на основе которых было определено вероятностное распределение  $W_e$  [15].

Вероятностные распределения высот, периодов и длин волн соответствуют распределению Вейбулла  $F(z) = \exp[-A(z/z_0)^k]$ ,  $A = \Gamma^k(1 + k^{-1})$ , где  $k = 2; 2,3; 3$  для высот, длин и периодов волн соответственно;  $A = 0,785; 0,757; 0,712$  для этих же параметров.

### Трансформация поверхностных волн при их взаимодействии с терминалом

При распространении штормовых волн вдоль наклонных стенок терминала их длина уменьшается, высота увеличивается. Разрушение волны происходит при достижении определенных критических условий ( $7h = \lambda$ ). При этом основная энергия волны расходуется на формирование ударной нагрузки на стенки платформы, и здесь же формируется экстремум волнового давления.

Известно множество моделей трансформации ветровых волн при их взаимодействии с наклонными поверхностями [7]. Экспериментальные исследования показали, что наилучшее согласие с экспериментальными данными дает соотношение

$$h_p = 0,54h_n(\lambda_n/H_p)^{0,25}, \quad (4)$$

где  $h_p, H_p$  — изменяющиеся высота волны и глубина наклонного основания платформы соответственно;  $h_n, \lambda_n$  — высота и длина волны при их подходе к основанию платформы.

Используя (3), соотношение (4) можно записать в следующем виде:

$$h_p = 1,19H^{0,125}W^{-0,05}h_n^{1,15}H_p^{-0,25} = P_h H_p^{-0,25} h_n^{1,15}. \quad (5)$$

Как это было отмечено, вероятностное распределение высот волн  $h_n$  соответствует распределению Вейбулла. Для вычисления плотности вероятностного распределения высоты волны  $h_p$  использованы общие правила преобразования нелинейно связанных случайных величин. Опуская необходимые преобразования, находим

$$W(h_p, H_p) = \frac{0,683}{h_0^2} \frac{H_p^{0,435} h_p^{0,74}}{P_h^{1,74}} \exp\left(-\frac{0,785 H_p^{0,435} h_p^{1,74}}{h_0^2 P_h^{1,74}}\right);$$

$$P_h = 1,19H^{0,125}W^{-0,05}. \quad (6)$$

На рис. 4, а приведены плотности распределения вероятностей высоты волны при различных глубинах стенки платформы ( $H_p = 5, 10, 15$  м), глубине моря 15 м и скорости ветра 30 м/с. Плотность распределения вероятностей при глубине 15 м близка к эмпирической плотности распределения вероятностей (см. рис. 3), и это свидетельствует о достоверности вычисленных вероятностных характеристик.

Выше было отмечено, что плотность распределения вероятностей длин волн  $\lambda_n$  соответствует распределению Вейбулла следующего вида:

$$W(\lambda_n) = \frac{1,741}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_0}\right)^{1,3} \exp\left[-0,757\left(\frac{\lambda_n}{\lambda_0}\right)^{2,3}\right], \quad (7)$$

где  $\lambda_0$  — среднее значение длины волны.

Экспериментальные исследования А. А. Смирнова [15, 16] показали, что при набегании волны на

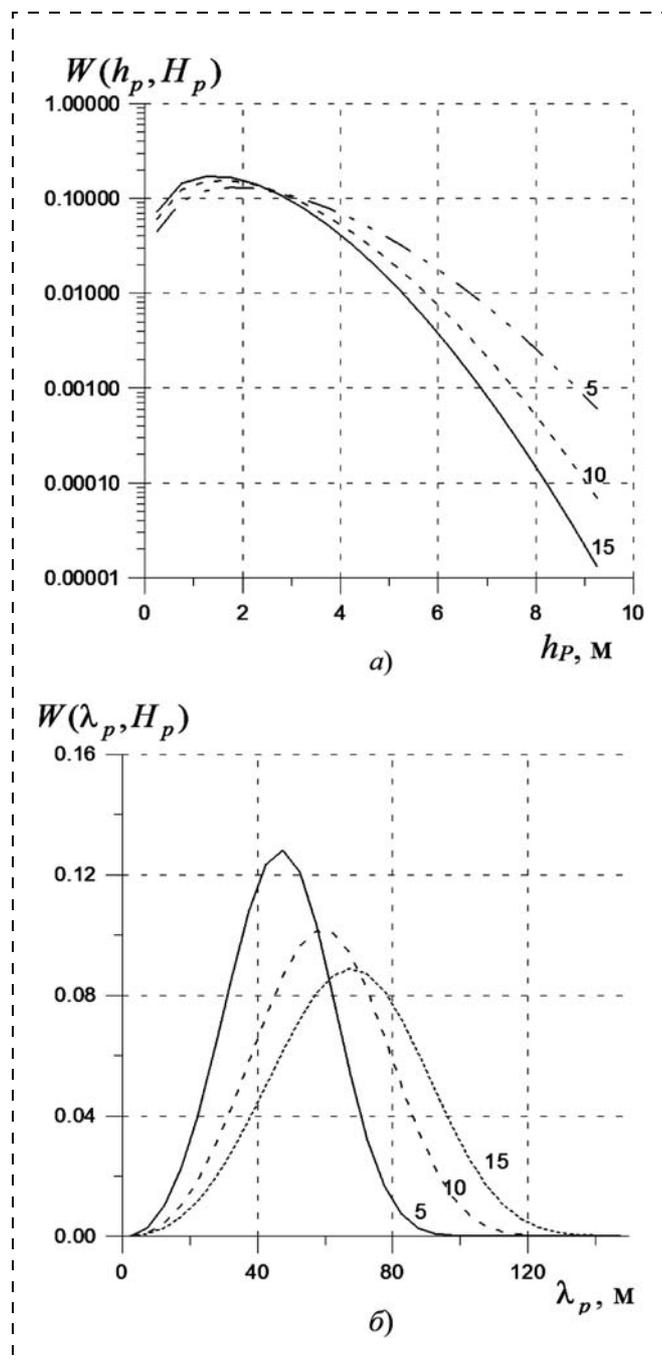


Рис. 4. Плотность распределения вероятностей: а — высоты волны при глубинах наклонной стенки платформы 5, 10 и 15 м; б — длин волн при их набегании на платформу при глубинах наклонного основания 5, 10 и 15 м

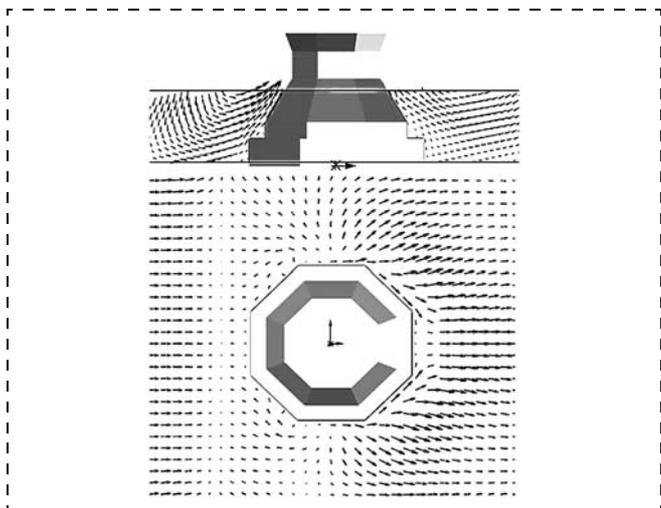


Рис. 5. Вертикальное и горизонтальное поле скорости течения при обтекании терминала

наклонную поверхность ее длина  $\lambda_p$  уменьшается в соответствии с соотношением

$$\lambda_p = 1,6\lambda_n^{0,667} H_p^{0,333}, \quad (8)$$

где  $H_p$  — глубина наклонного основания.

Используя правила нелинейного преобразования случайных величин, выражение для плотности распределения вероятностей длины волны, которая набегаем на платформу, можно записать в следующем виде:

$$W(\lambda_p, H_p) = 0,516\lambda_0^{-2,3} H_p^{-1,15} \lambda_p^{2,45} \times \exp(-0,1495\lambda_0^{-2,3} H_p^{-1,15} \lambda_p^{3,45}). \quad (9)$$

На рис. 4, б, приведены графики  $W(\lambda_p, H_p)$  для глубин 5, 10 и 15 м и при скорости ветра 30 м/с ( $\lambda_0 = 73,3$  м).

На этих зависимостях отчетливо заметно уменьшение длины волны при уменьшении глубины основания платформы.

Характерные примеры вертикального и горизонтального векторных полей скорости течения при обтекании терминала показаны на рис. 5. Результаты численного моделирования показали, что максимальная гидродинамическая нагрузка на терминал, вычисленная по перепаду давления, достигает 50...52 МН и практически не зависит от длины волны. Это соответствует теории поверхностных волн на "мелкой воде", когда глубина моря (в данном случае 15...19 м) значительно меньше половины длины волны, равной 65...85 м. При таком соотношении этих параметров волновая скорость практически постоянная по глубине, за исключением тонкого придонного пограничного слоя, и от длины волны не зависит.

Другим результатом моделирования является существенное отклонение переменного давления от гармонической зависимости, которая задана на

левой границе расчетной области. Этот эффект стал следствием взаимодействия заданного гармонического волнового течения с преградой в виде терминала.

### Разрушение волн и ударные нагрузки на платформу

При продвижении волн в сторону убывающих глубин они теряют устойчивую форму и разрушаются, превращаясь в наиболее опасную "разбитую" или "прибойную" волну. Глубина от спокойного горизонта до поверхности стенки платформы, где волна разрушается, называется критической глубиной  $H_k$  [8]. Наиболее приемлемой теорией обрушения крутых волн является теория Митчела—Хавелона, основанная на предельном профиле волны, который определяется из условия  $7h_k = \lambda_k$ , где  $h_k$ ,  $\lambda_k$  — критические значения высоты и длины волны. Эта зависимость находится в хорошем соответствии с данными лабораторных экспериментов А. А. Смирнова [7, 8].

Выше были приведены соотношения между высотой и длиной волны при изменяющейся глубине основания платформы  $H_p$ . Используя их, а также приведенное условие разрушения волны, находим

$$H_k = 4,368 h_n^{1,714} \lambda_n^{-1,714}. \quad (10)$$

Так как высота волны связана с ее длиной ( $\lambda_n = 23,5 H_p^{0,5} h_n^{0,6} W^{-0,2}$ ), величину  $H_k$  можно выразить через высоту волны следующим образом:

$$H_k = 0,4578 H^{-0,357} W^{0,143} h_n^{1,285} = P_k h_n^{1,286}, \quad (11)$$

где  $H$  — глубина моря.

Используя правила нелинейных преобразований случайных величин  $H_k = f(h_n)$ , находим

$$W(H_k) = \frac{1,22}{h_0^2} \frac{H_k^{0,555}}{P_k^{1,555}} \exp\left(-\frac{0,785 H_k^{1,555}}{h_0^2 P_k^{1,555}}\right). \quad (12)$$

Эта зависимость представлена на рис. 6.

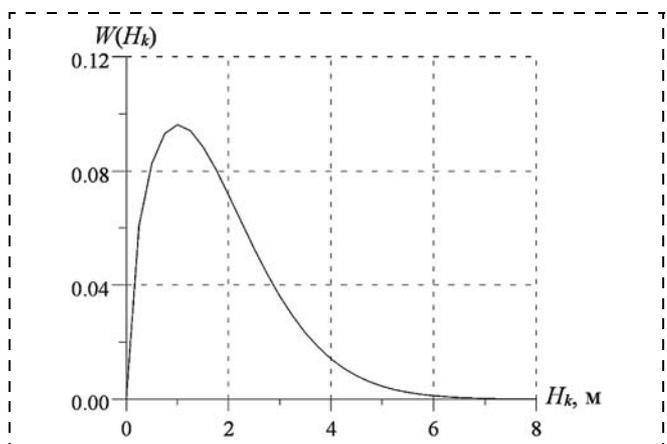


Рис. 6. Плотность распределения вероятностей глубины разрушения волны на стенке платформы

Плотность распределения вероятностей глубины разрушения волны при ее продвижении по стенке платформы является несимметричной, среднее значение равно 1,76 м.

Волновое давление на стенки платформы пропорционально квадрату орбитальной скорости разрушающейся волны и ее высоте. Максимальное давление в точке разрушения волны равно [9, 10]

$$p_w = k_s k_f p_{rel} \rho g h_k, \quad (13)$$

где  $k_s = 0,85 + 4,8 \frac{h_k}{\lambda_0} + \operatorname{ctg} \left( 0,028 - 1,15 \frac{h_k}{\lambda_0} \right)$ ;  $h_k$  — высота критической волны, равная  $\lambda_k/7$ ;  $\operatorname{ctg} \varphi = 1$

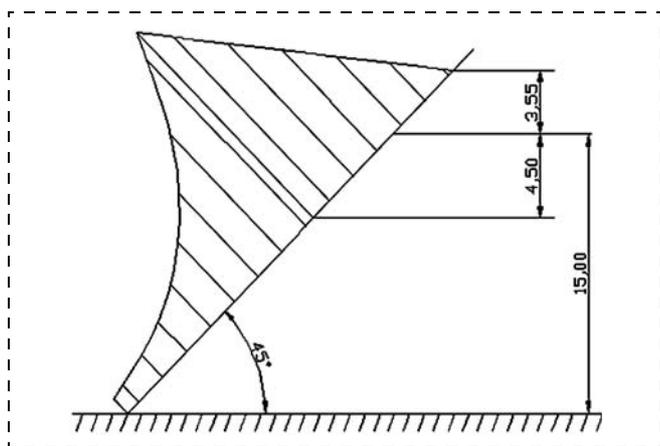


Рис. 7. Эпюра волнового давления на стенки платформы

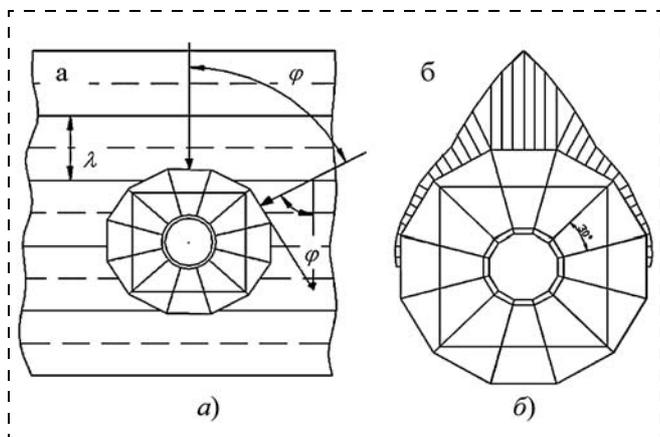


Рис. 8. Схема набегания волны на платформу (а) и расчетная эпюра амплитуды давления (б)

Таблица 2

Расчетные параметры волновых нагрузок

Характеристики поверхностных волн	Средние	1 % обеспеченности	0,1 % обеспеченности
Критическая высота волны, м	2,03	5,86	7,52
Давление $p_{rel}$	2,11	1,41	1,28
Длина волны, м	54,56	94,75	113,272
Максимальное давление, кПа	60,22	115,75	135,13

(отметим, что при  $h_k = \frac{\lambda_k}{7}$  имеем  $k_s = 1,4$ );  $k_f$  — коэффициент, зависящий от пологости волны (при  $h_k = \lambda_k/7$   $k_f = 1$ );  $p_{rel}$  — максимальное относительное волновое давление в точке разрушения волн (эта величина определяется высотой волны и ее можно представить как  $p_{rel} = 2,7766h^{-0,3829}$ );  $\rho$  — плотность воды (1020 кг/м<sup>3</sup>),  $g$  — ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>).

При увеличении глубины квадрат волновой скорости и, следовательно, волновое давление уменьшается пропорционально величине  $\exp(-4\pi\Delta H/\lambda)$ , где  $\Delta H = H - H_k$  [10].

Высота наката разбивающихся волн определяется по соотношению [9]:

$$h_r = k_r k_p k_{sp} k_{run} h_1 \%, \quad (14)$$

где  $k_r$  и  $k_p$  — коэффициенты шероховатости и проницаемости стенки платформы (при использовании железобетонных плит  $k_r = 1$ ,  $k_p = 0,9$ );  $k_{sp}$  — коэффициент, зависящий от скорости ветра  $W$  (при  $W > 20$  м/с  $k_{sp} = 1,6$ );  $k_{run}$  — коэффициент, зависящий от пологости волны (при  $\lambda_k = 7h_k$   $k_{run} = 0,47$ ). Высота волны 1 % обеспеченности определяется при использовании указанного выше распределения вероятностей высот волн и равна  $h_1 \% = 2,42h_0$ .

Таким образом, для рассматриваемых условий  $h_r = 1 \cdot 0,9 \cdot 1,6 \cdot 0,47 \cdot 2,42 \cdot h_0 = 1,638h_0$ .

Эпюра распределения волнового давления  $P(z)$  на поверхность платформы при значении угла  $\varphi$  между волновым вектором  $\vec{k}_W$  и проекцией стенки платформы на вертикальную плоскость, равном 90°, приведена на рис. 7.

Приведенные выше соотношения были использованы для расчетов волновых нагрузок на платформу для средних высот волн, высот волн 1 и 0,1 % обеспеченности. Основные расчетные параметры и результаты вычислений для случая, когда волна набегает под прямым углом ( $\varphi = 90^\circ$ , рис. 8) к вертикальной проекции стенки платформы, представлены в табл. 2.

### Лабораторные исследования волновых воздействий

Объектом исследования была модель терминала "Варандей", выполненная в масштабе 1:60. Испытания проводили в целях определения реальных физических нагрузок и верификации расчетной схемы определения экстремальных волновых нагрузок на платформы пирамидальной формы.

Лабораторные исследования выполнены в волновом бассейне длиной 800 м. Мелководная часть бассейна была оборудована экспериментальным комплексом различных технических и измерительных средств, который включает буксировочную тележку с расположенной на ней аэродинамической установкой и пневматическим волнопродуктором регулярного и нерегулярного волнения, управляе-

Таблица 3

## Характеристики волнения

$h$ , м	$\tau$ , с	$\lambda$ , м	$h/\lambda$
7,0	12,03	225,8	0,031
7,0	11,16	194,4	0,036
7,0	9,67	145,8	0,048
7,0	8,57	114,7	0,061
9,3	13,86	300,0	0,031
9,3	13,24	273,5	0,034
9,3	12,06	226,8	0,041
9,3	11,26	197,9	0,047
9,3	10,05	157,6	0,059
11,0	10,85	183,7	0,060

мого с помощью ЭВМ. Буксировочная тележка с помощью вертикальных стоек жестко соединена со вторым дном, обладающим возможностью перемещения в вертикальной плоскости от дна бассейна до свободной поверхности воды. Между вторым дном и дном бассейна устанавливается наклонная пластина, натекая на которую, волна, распространяющаяся от волнопродуктора по глубокой воде, трансформируется. Трансформированная волна пробегает по второму дну расстояние порядка 6...10 м (в зависимости от высоты волны), при этом ее параметры принимают постоянные значения. На этом расстоянии устанавливается модель терминала.

Для исследования волновых нагрузок модель была оборудована шестикомпонентным динамометром, установленным в ее верхней части. Модель через динамометр была консольно закреплена к буксировочной тележке. Крепление модели осуществлялось посредством вертикального цилиндра. Благодаря этому экспериментальная установка позволяла осуществлять перемещение модели по вертикали в случае необходимости изменения ее осадки, а также ее поворот и жесткую фиксацию в нужном направлении. С помощью динамометра проводили измерения горизонтальной и вертикальной составляющих главного вектора гидродинамических сил. В табл. 3 представлены характеристики генерируемых волн ( $h$ ,  $\lambda$ ,  $\tau$  — высота, длина и период волны соответственно) с учетом их пересчета для натуральных условий с использованием критерия подобия Фруда. Глубина моря с учетом критерия подобия была принята равной 15...20 м, что соответствует условиям Печорского моря.

Все измерительные средства были метрологически аттестованы. По данным этой аттестации относительная погрешность измерения всех параметров не превышала 2...3 %. Градуировку всех измерителей проводили непосредственно перед испытаниями и после них, каждый режим испытаний дублировался не менее трех раз.

Результаты экспериментальных лабораторных исследований волновой нагрузки после их пересчета по критерию подобия Фруда представлены в табл. 4, где использованы следующие обозначения:

$F_d$  — амплитудное значение динамической составляющей горизонтальной проекции главного вектора гидродинамических сил (эта составляющая нагрузки формируется при разрушении волны);  $F_s$  — статическая составляющая горизонтальной проекции главного вектора гидродинамических сил (весовая нагрузка волны);  $F_g$  — суммарное значение динамической и статической составляющих горизонтальной проекции главного вектора гидродинамических сил.

Полученные значения динамической составляющей горизонтальных волновых нагрузок на модель терминала приведены к безразмерному виду.

Для этого использовано соотношение для максимальных значений волнового давления  $P_d$  на наклонную стенку при разрушении поверхностных волн [17]:

$$P_d = C_d \rho g h^2 / \lambda, \quad (15)$$

где  $C_d$  — константа.

Использование нормировки  $F_d^* = F_d \lambda / C_d \rho g h^2$  обеспечило приведение всех экспериментальных данных к общей зависимости между безразмерными величинами  $F_d^* = f(h/\lambda)$ . Эта зависимость представлена на рис. 9 в виде отдельных значений. Там же

Таблица 4

## Горизонтальная составляющая волновой нагрузки, действующей на макет буровой платформы

$h$ , м	$\lambda$ , м	$h/\lambda$	$F_d \times 10^8$ , Н	$F_s \times 10^8$ , Н	$F_g \times 10^8$ , Н
7,0	225,8	0,031	1,1752	0,1152	1,2904
7,0	194,4	0,036	1,1373	0,0355	1,1721
7,0	145,8	0,048	1,0120	0,0677	1,0797
7,0	114,7	0,061	0,7555	0,0571	0,7915
9,3	300,0	0,031	1,2290	0,1685	1,3975
9,3	273,5	0,034	1,4419	0,0188	1,4601
9,3	226,8	0,041	1,4009	0,0121	1,5216
9,3	197,9	0,047	1,3421	0,0187	1,5287
9,3	157,6	0,059	1,2724	0,0981	1,3463
11,0	183,7	0,06	1,2989	0,0219	1,5187

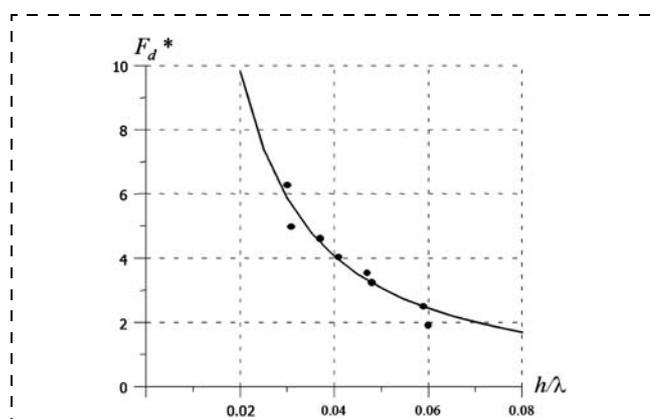


Рис. 9. Сопоставление результатов физического лабораторного эксперимента (•) и расчетной зависимости динамических волновых нагрузок на ледостойкую платформу конической формы (—)

приведена расчетная зависимость динамической нагрузки, полученная изложенным выше методом.

Можно отметить хорошее соответствие результатов физического лабораторного эксперимента и представленного аналитического метода расчета динамических волновых нагрузок на модель платформы пирамидальной формы.

### Выводы

1. Максимальное значение динамического давления на стенки платформы формируется на глубине  $H_k$  разрушения волн. Из многих теорий обрушения волн наилучшее соответствие с данными лабораторных экспериментов дает теория Митчелла—Хавелона. Она основана на представлении о предельном профиле волны, который определяется из условия  $7h_k = \lambda_k$ , где  $h_k, \lambda_k$  — критические значения высоты и длины волны. В статье представлен расчет плотности распределения вероятностей  $W(H_k)$ . Для рассматриваемых условий среднее значение этой величины равно 1,76 м; зависимость  $W(H_k) = f(H_k)$  характеризуется значительной асимметрией.

2. Суммарная величина волновой нагрузки на платформу определяется величиной интеграла

$$R_p \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} \int_{-H}^{H_n} P_W(\varphi, z) d\varphi dz, \text{ где } R_p \text{ — радиус платфор-}$$

мы,  $H_n$  — высота наката. Для рассматриваемых условий Печорского моря при высотах волн 7...9 м эта величина по данным выполненных расчетов достигает  $1,2...1,4 \cdot 10^8$  Н.

3. Лабораторные экспериментальное исследование волновых нагрузок, действующих на модель терминала "Варандей", стоящую на грунте в условиях мелководья, были использованы при пересчете полученных экспериментальных данных для натуральных условий по критерию подобия Фруда. При этом:

- максимальная динамическая нагрузка для экстремальных поверхностных волн высотой 9,3 м может достигать  $1,44 \cdot 10^8$  Н. Эта величина со-

поставима с ледовой нагрузкой на терминал и в некоторых случаях может ее превышать;

- представление экспериментальных величин динамической нагрузки от высоты и длины волны в виде безразмерной зависимости вида  $F_d^* = F_d \lambda / C_d \rho g h^2 = f(h/\lambda)$  обеспечило приведение всех экспериментальных данных к одной универсальной зависимости. Ее сравнение с расчетной зависимостью показало их идентичность. Это свидетельствует о возможности использования представленной методики расчета волновых воздействий для практических целей при проектировании платформ и расчете их оптимальных характеристик.

*Работа выполнена при финансовой поддержке з/б НИР МОН Украины (шифр "Шельф") в Севастопольском национальном техническом университете, кафедре Океанотехники и кораблестроения.*

### Список литературы

1. Кушнир В. М., Душко В. Р., Федоров С. В. Воздействие морской среды на системы освоения шельфа. Изд. СевНТУ, 2009. 309 с.
2. Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. Б., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ — Петербург, 2005. 800 с.
3. Математическая модель и метод оперативных расчетов ветрового волнения в морях СССР / И. Н. Давидан, И. В. Лавренов, Г. А. Пасечник и др. // Метеорология и гидрология. 1988. № 11. С. 81—90.
4. Лавренов И. В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб: Гидрометеоздат, 1998. 500 с.
5. Ларин М. К., Жемойдо Ю. Г., Кушнир В. М. Гидродинамические нагрузки на морской терминал: численное моделирование и экспериментальные данные // Вестник СевНТУ. Севастополь: СевНТУ, 2007. Вып. 80. С. 94—99.
6. Кудрявая К. И., Сериков Е. И., Скриптунова Л. И. Морские гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 310 с.
7. Смирнов А. А. Изменение высоты и длины волны на пологих откосах // Волновые исследования. М.: Госстройиздат, 1962. С. 37—60.
8. Смирнов А. А. Глубина обрушения волны на пологих откосах // Волновые исследования. М.: Госстройиздат, 1962. С. 177—184.
9. СНиП 2.06.04—82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Госстрой СССР. М.: Стройиздат 1983. 39 с.
10. Шулейкин В. В. Физика моря. М.: Изд. АН СССР, 1953. 989 с.

**В. М. Дорожко,**канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.,  
bendor@iacp.dvo.ru,Институт автоматики и процессов управления  
ДВО РАН, г. Владивосток**Динамическое воздействие  
аномально большой волны  
на неподвижную преграду**

*Методом вычислительной гидродинамики выполнено моделирование процесса формирования и обрушения аномальной волны. Вычислены значения кинетической энергии и давления аномальной волны, воздействующей на неподвижные вертикальную и горизонтальную преграды. Установлено, что аномальные волны с одинаковой начальной крутизной имеют подобные профили, кинематические и динамические характеристики обрушения. Полученные результаты могут найти применение при проектировании морских судов и гидротехнических сооружений.*

**Ключевые слова:** аномальная волна, обрушение, ныряющий бурун, кинетическая энергия, давление, неподвижная преграда

**Введение**

При проектировании морских судов и сооружений (нефтегазовых платформ, плавучих нефтегазовых хранилищ, ветроволновых энергетических установок т. п.) учитывается известная статистика ветроволнового воздействия [1, 2]. Однако, как показали исследования последних 30...50 лет, кроме обычного штормового волнения на море присутствуют аномально большие волны — "волны-убийцы" (далее — аномальные волны), неожиданно появляющиеся и так же быстро исчезающие [3] как в периоды штормовой погоды, так и при достаточно спокойном море.

Существует множество гипотез появления аномальных волн [4, 5]. Одной из общепризнанных причин их возникновения является модуляционная неустойчивость Бенджамена—Фейра—Захарова [6—8]. Вероятность появления аномальной волны критическим образом зависит от параметра Бенджамена — Фейра (отношение средней крутизны волнения к средней относительной ширине его спектра) [9]. Большие значения указанного параметра соответствуют спектрально узким распределениям волнового воздействия, т. е. достаточно когерентным волнам. В результате модуляционной неустойчивости таких волн формируется групповой солитон, под огибающей которого могут находиться от 14 до 20 периодов волн. В настоящее время существует единственный критерий [10] аномальной волны, который связан с определением ее высоты:  $h > 8\sigma$ , где  $\sigma$  — стандартное отклонение

возвышений морской поверхности. Аномальная волна представляет собой конечную стадию развития модуляционной неустойчивости, когда за время порядка одного периода происходит сильная концентрация энергии вокруг гребня волны, в результате ее высота увеличивается до 20...30 м [11, 12], а крутизна ( $S = ak$ , где  $a$  — амплитуда волны,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны) превышает значение 0,443 [13], после чего аномальная волна начинает обрушаться в виде "ныряющего буруна" (далее — бурун) с выбросом струи из гребня волны.

Аномальные волны наносят серьезный урон как морским сооружениям, так и морскому транспорту. Так, за период 1969—1994 гг. 22 супертанкера были потеряны или существенно повреждены [14] в Тихом и Атлантическом океанах. По наблюдениям за 2006—2010 гг. зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальной волны [15], в которых повреждены суда, погибли или получили ранения члены экипажей судов или люди, находившиеся в прибрежной полосе.

Изучение характеристик аномальных волн выполняется, численно [16—18] либо на экспериментальных установках [19, 20]. Значительное число работ, например [21—24], связано с исследованием различных аспектов взаимодействия волн с препятствиями. В большинстве случаев особенностью указанных работ является исследование коротких волн малой высоты. Исходя из изложенного можно отметить, что недостаток численных и экспериментальных исследований на полномасштабных моделях взаимодействия аномальных волн с препятствиями может затруднить при проектировании учет в полном объеме динамического воздействия аномальной волны на морское судно или сооружение.

В связи с этим в данной работе ставится задача численного моделирования методом вычислительной гидродинамики (CFD — *computational fluid dynamics*) воздействия полномасштабной аномальной волны на неподвижную преграду в глубоком месте моря (глубина воды равна или превышает длину волны) с целью получить количественные значения кинетической энергии и давления в момент гидродинамического удара.

**Основные модельные представления**

Решение поставленной задачи выполнено методом вычислительной гидродинамики, позволяющим численными методами реализовать виртуальный гидродинамический бассейн, в котором осуществляется формирование аномальной волны и ее воздействие на преграды.

В основу CFD-метода положены уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (RANSE — *Reynolds-averaged Navier-Stokes*

equations) [25], которые могут быть записаны в тензорном виде:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}), \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\{i, j, l\} = \overline{1, 3}$ ;  $x_1, x_2, x_3$  — декартовы координаты в абсолютной системе  $ox_1x_2x_3$  и соответствующие им мелкомасштабные осреднения  $u_1, u_2, u_3$  значений абсолютной скорости потока жидкости, а также  $u'_1, u'_2, u'_3$  — флуктуации абсолютной скорости, ответственные за диссипацию энергии;  $t$  — время,  $\mu$  и  $\rho$  — вязкость и плотность жидкости соответственно;  $p$  — давление;  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  — напряжение Рейнольдса, полученное осреднением флуктуационных компонент скорости. Для вычисления напряжения Рейнольдса применена модель турбулентности  $k_t - \varepsilon$  (RNG — *renormalization group mathematical technique*) [26], которая позволяет получать расчетные значения гидродинамических полей, близкие к их экспериментальным значениям [27]. В связи с этим уравнения (1), (2) дополнены уравнениями [26] переноса турбулентной кинетической энергии ( $k_t$ ) и скорости ее диссипации ( $\varepsilon$ ).

Для формального описания модели выберем правую декартову систему координат  $oxyz$ , совпадающую с системой  $ox_1x_2x_3$ . В соответствии с поставленной задачей решение системы уравнений (1), (2) выполнено численным способом в расчетной 2D-области, имеющей форму прямоугольного канала, сформированного в вертикальной плоскости  $oxy$ , ось  $ox$  которой лежит на условной поверхности тихой воды (при отсутствии волн), а ось  $oy$  направлена вверх. При этом будем полагать, что в направлении оси  $oz$  расчетная область имеет условную толщину ( $d$ ), равную одному метру.

Процесс зарождения и развития аномальной волны можно условно представить в виде трех последовательных этапов [5]:

- формирование группового солитона вследствие пространственно-временной фокусировки, обусловленной дисперсией большого числа однонаправленных монохроматических волн в узком диапазоне частот, т. е. достаточно когерентных волн, под огибающей которого находятся волны большой ( $S > 0,443$ ) крутизны (именуемые в дальнейшем — волны с начальными амплитудой  $a$  и крутизной  $S$ );
- нелинейное преобразование волн солитона до высот аномальной волны;
- обрушение аномальной волны.

В соответствии с целями поставленной задачи в данной работе моделируются два последних этапа, длительный процесс формирования группового солитона в настоящих исследованиях не рассматривается. Отличие группового солитона от монохроматической волны заключается в наличии в его спектре малых боковых лепестков наряду с основным максимумом [19], что позволяет в рассматриваемой модели использовать монохроматическую волну с начальной амплитудой  $a$ . В связи с этим граничное условие на входе расчетной области (левая вертикальная граница канала) представляет собой вектор переменной скорости потока жидкости, горизонтальная ( $v_x$ ) и вертикальная ( $v_y$ ) компоненты которого определяются выражениями [18]

$$v_x = \frac{gka}{\omega} \frac{\cosh[k(y+H)]}{\cosh(kH)} \cos(kx_{in} - \omega t + \varphi_0), \quad (3)$$

$$v_y = \frac{gka}{\omega} \frac{\sinh[k(y+H)]}{\cosh(kH)} \sin(kx_{in} - \omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $H$  — глубина воды в канале;  $x_{in}$  — координата входной границы канала;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $a$  и  $\lambda$  — амплитуда и длина волны соответственно;  $\omega = \sqrt{gk \tanh(kH)}$  — угловая частота;  $\varphi_0$  — начальное значение фазы волны.

Для формирования граничных условий на правой границе канала, включая примыкающую к ней область расчетного пространства, создавалось дополнительное затухание, в результате которого амплитуда волн постепенно снижалась до нулевого значения по мере движения волны к упомянутой границе. В итоге, с учетом симметрии солитона, в численном моделировании имитировалась его правая половина. В целях получения значений кинетической энергии и давления гидродинамического удара аномальной волны в расчетной области устанавливались две преграды: вертикальная и горизонтальная. Вертикальная преграда устанавливалась перед гребнем аномальной волны, а горизонтальная — перед падающей струей буруна. Граничные условия на преградах и на дне расчетной области соответствуют нулевому значению нормальной производной скорости. На верхней границе расчетной области реализовано стандартное атмосферное давление. Для формирования начального условия уравнений (1), (2) проводилась инициализация расчетной области от вектора скорости (3), (4), в результате чего на протяжении всего канала создавалось распределение амплитуд, скоростей и давления, соответствующее начальному состоянию бегущей волны.

Установление подобия аномальных волн выполнялось для двух длин волн (100 и 200 м), представляющих крайние значения наиболее часто встречающихся волн в штормовом море. При этом первоначально изучался процесс формирования аномальной волны и ее обрушения, затем вычислялась кинетическая энергия гребня и струи буру-

на аномальной волны перед их ударом по вертикальной и горизонтальной преградам, и, в завершение, вычислялось давление, создаваемое на поверхности указанных преград.

### Численные результаты и их обсуждение

Для полномасштабного численного моделирования волны длиной 100 м выбран прямоугольный канал длиной 700 м и высотой 200 м, при этом глубина жидкости составила 100 м, что соответствует условию глубокого моря. Начало системы координат  $oxy$  размещено на левой границе на уровне тихой воды. Начальные амплитуды ( $a$ ) волн выбраны равными 8, 10, 12 и 14 м. Плотность жидкости соответствует плотности морской воды ( $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$ ), ускорение свободного падения —  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Расчетная область заполнена прямоугольной сеткой с элементами размером  $0,25 \times 0,25 \text{ м}$ , разбивающими все пространство канала. Шаг дискретизации времени в процессе численного моделирования принят равным  $0,0025 \text{ с}$ . С целью минимизировать воздействие на поле скорости волн вертикальная и горизонтальная преграды выполнены в виде прямоугольников, узкая сторона которых составляет 1 м, а длинная — 10 м. Полномасштабное численное моделирование волны длиной 200 м с начальными амплитудами 16, 20, 24 и 28 м выполнено на сеточной модели для волны длиной 100 м путем увеличения в два раза всех ее (сеточной модели) геометрических характеристик, включая преграды, что обеспечило идентичность гидродинамических условий для обеих рассматриваемых длин волн. В процессе моделирования вычисляли поле давления и вектора скорости жидкости аномальной волны во всей расчетной области, а также значения давления в узлах сетки на поверхности преград.

Изучение профиля моделируемых аномальных волн позволило, основываясь на их геометриче-

ских признаках формирования и обрушения, условно выделить три группы.

Первая — волны с начальной крутизной в интервале значений крутизны  $[0,345; 0,443]$  (волны длиной 100 и 200 м с начальными амплитудами 5,5...7 и 11...14 м соответственно) формируются без резкого увеличения высоты, их обрушение представляет собой небольшой бурун, скатывающийся по фронту волны. Вследствие этого они не представляют опасности для судов и морских сооружений и далее не рассматриваются.

Вторая (рис. 1) — волны с начальной крутизной  $0,5 \leq S \leq 0,754$  (волны длиной 100 или 200 м с начальными амплитудами в диапазонах 8...12 или 16...24 м соответственно). Для них характерно нелинейное преобразование, в результате которого формируется аномальная волна в виде выброса (гребня) жидкости вверх (профили 3—4), а за счет быстрого его спада образуется выброс струи буруна (профили 5—6). При этом для зарождающегося буруна (промежуточный профиль между 4 и 5 профилями) характерна горизонтальная направленность вектора скорости жидкости в струе.

Третья — волны (рис. 2) с начальной крутизной  $S > 0,754$  (волны длиной 100 или 200 м с начальными амплитудами, превышающими 12 или 24 м соответственно). Отличительной чертой волн данной группы является захват пузыря воздуха в процессе образования гребня волны вследствие резкого выброса жидкости вверх (профили 3—4). Другой особенностью указанных аномальных волн является замедленный спад гребня, вследствие чего формируются два процесса обрушения: обрушение самого гребня и обрушение в самый последний момент времени его нижней части в виде струи буруна, которые на заключительной стадии (профиль 6) объединяются в единый процесс.

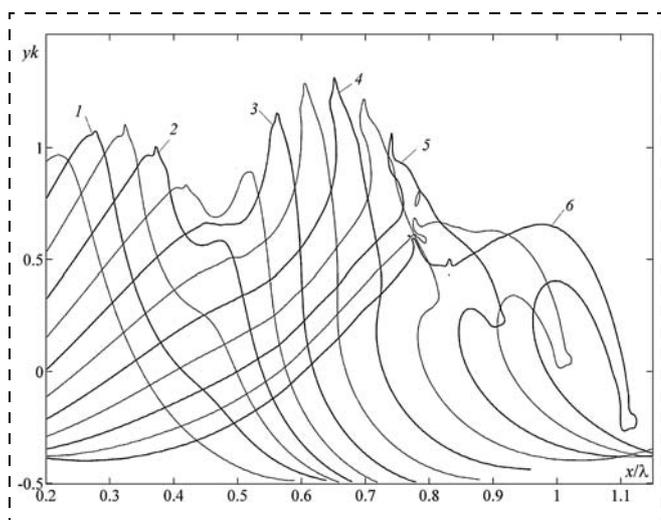


Рис. 1. Временная последовательность через каждые 0,05 с в течение нормированного времени  $t/T = 0,125...0,675$  профилей аномальной волны с начальной крутизной 0,628;  $T$  — период волны

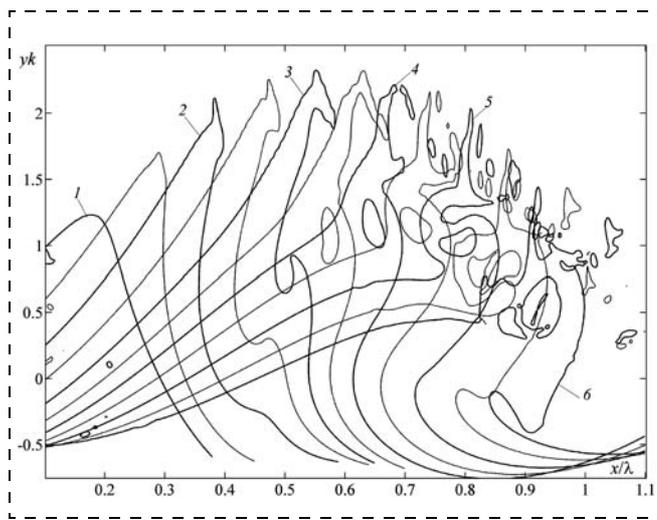


Рис. 2. Временная последовательность через каждые 0,05 с в течение нормированного времени  $t/T = 0,055...0,550$  профилей аномальной волны с начальной крутизной 0,942;  $T$  — период волны

Третья группа аномальных волн характеризуется также образованием в процессе формирования гребня большого количества брызг (профили 4–6).

Для аномальных волн с равной начальной крутизной имеет место геометрическое подобие — совпадение для одинаковых моментов нормированного времени  $t/T$  их профилей в осях  $x/\lambda$  и  $uk$ .

Результаты численного моделирования показали, что особые значения скорости жидкости наблюдаются в двух случаях: 1) когда  $x$ -компонента скорости жидкости на фронте гребня, превышая фазовую скорость волны, достигает максимума и 2) когда  $u$ -компонента скорости жидкости в струе буруна достигает максимума непосредственно перед ее падением на подошву волны. С учетом сказанного, для получения максимального эффекта от воздействия аномальной волны вертикальная преграда устанавливалась перед гребнем волны (см. рис. 1 профиль 4, рис. 2 профиль 5), а горизонтальная — перед падающей струей буруна (см. рис. 1 и 2, профили 6). Из-за графической насыщенности рис. 1 и 2 сами преграды на них не показаны.

На рис. 3 представлены графики зависимости от начальной крутизны ( $S$ ) нормированной кинетической энергии  $\xi_j^i = \frac{E_j^i}{E_k}$ , где  $E_k = \frac{1}{8} g \rho d \lambda a^2$  — кинетическая энергия положительной полуволны с начальной амплитудой  $a$ ;  $d = 1$  м — условная толщина сеточной модели в направлении оси  $oz$ ;  $E_j^i$  — вычисленная кинетическая энергия, верхний индекс  $i = \{v, g\}$  которой указывает на ее принадлежность к аномальной волне, воздействующей на

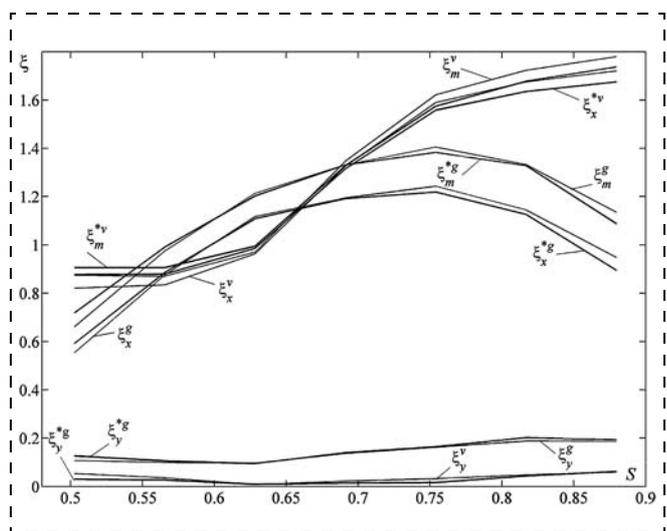


Рис. 3. Зависимость от начальной крутизны  $S$  волны нормированной кинетической энергии  $\xi_m^v$  и  $\xi_m^g$  аномальной волны и ее  $x$ - и  $y$ -компонент  $\xi_x^v$ ,  $\xi_y^v$  и  $\xi_x^g$ ,  $\xi_y^g$ . Верхние индексы  $v$  и  $g$  относятся переменные к воздействию аномальной волны на вертикальную и горизонтальную преграды соответственно. Символ (\*) в верхнем индексе переменных относит их к волне длиной 200 м

вертикальную и горизонтальную преграды соответственно.

Технология вычисления кинетической энергии

$$E_j^i = \frac{d\rho}{2} \sum_{\zeta=1}^n (v_{j,\zeta}^i)^2 S_{\zeta}^i$$

аномальной волны, воздействующей на преграду, включает в себя разбиение площади гребня (перед ударом по вертикальной преграде) или струи буруна (перед падением на горизонтальную преграду) на  $n$  равных участков  $S_{\zeta}^i$ , в каждом из которых вычисляются средние значения скорости  $v_{j,\zeta}^i$  жидкости, где индекс  $j = \{x, y, m\}$  относит скорость к  $x$ -,  $y$ -компонентам и модулю вектора скорости соответственно. В связи с этим, применительно к указанным компонентам скорости далее будут рассматриваться соответствующие компоненты нормированной кинетической энергии.

Из анализа рис. 3 следует, что при крутизне  $S > 0,7$  нормированная кинетическая энергия гребня ( $\xi_m^v$ ,  $\xi_x^v$  и  $\xi_m^{*v}$ ,  $\xi_x^{*v}$ ) начинает превосходить аналогичные компоненты нормированной кинетической энергии струи буруна. При этом важно отметить, что величина  $x$ -компоненты нормированной кинетической энергии ( $\xi_x^v$ ,  $\xi_x^{*v}$ ) гребня существенно больше величины  $y$ -компоненты нормированной энергии ( $\xi_y^g$ ,  $\xi_y^{*g}$ ) струи буруна. Это объясняется тем, что несмотря на то, что скорость жидкости в струе превышает скорость в гребне, вектор скорости в гребне волны имеет направление, близкое к нормали по отношению к вертикальной преграде, а вектор скорости жидкости в струе буруна направлен под углом  $\sim 20^\circ$  к горизонтальной преграде. Следует также отметить, что кинетическая энергия гребня аномальной волны, начиная с начальной крутизны 0,65, и аналогичная энергия струи буруна, начиная с начальной крутизны 0,6, превосходят ( $\xi > 1$ ) кинетическую энергию положительной полуволны, что согласуется с оценками разрушительной способности аномальной волны [11, 14]. Графики (рис. 3) свидетельствуют также о кинематическом подобии: имеет место удовлетворительное совпадение одноименных нормированных энергетических характеристик аномальных волн длиной 100 и 200 м.

На рис. 4, 5 представлены результаты вычисления через каждые 0,05 с максимальных значений давления на вертикальной и горизонтальной преградах, из которых следует, что максимальное давление на вертикальной преграде всегда превосходит давление на горизонтальной преграде. Это согласуется с соотношением нормированных кинетических энергий  $\xi_x^v$ ,  $\xi_x^{*v}$  и  $\xi_y^g$ ,  $\xi_y^{*g}$  аномальных волн перед их воздействием на вертикальную и горизонтальную преграды соответственно. Вычисленные

интервалы времени действия давления на уровне  $0,5 P_{\max}^a$  свидетельствуют об увеличении времени действия аномальной волны на преграды с ростом ее начальной амплитуды (см. таблицу).

Динамическое подобие струи ныряющего буруна аномальной волны оценивали с помощью числа

$$\text{Не} = \frac{P_{\max}^a}{0,5 \tilde{v}_y^2}, \text{ где } P_{\max}^a \text{ — максимальное}$$

давление на горизонтальной преграде (рис. 5) для волны с начальной амплитудой  $a$ ;  $\tilde{v}_y$  —  $y$ -ком-

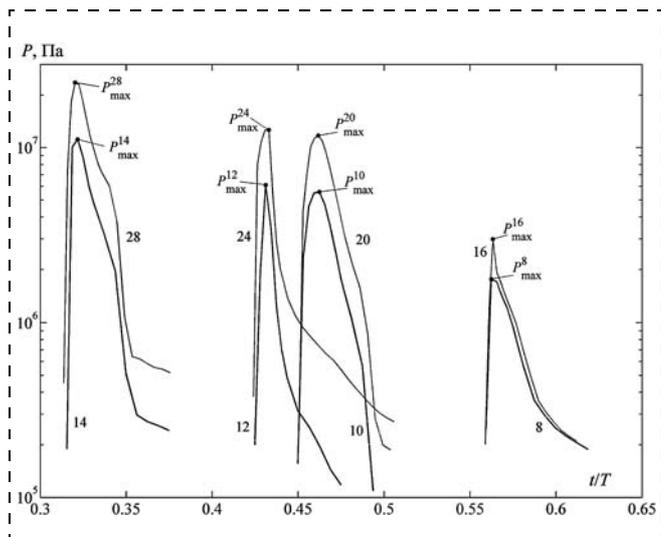


Рис. 4. Зависимость максимального давления  $P$  на вертикальной преграде от нормированного времени  $t/T$ ; числа: 8, 10, 12, 14 м и 16, 20, 24, 28 м — значения начальных амплитуд волн длиной 100 и 200 м соответственно

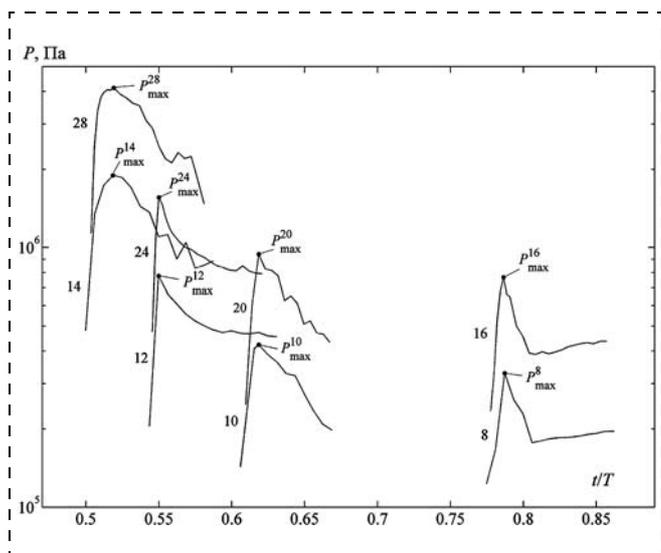


Рис. 5. Зависимость максимального давления  $P$  на горизонтальной преграде от нормированного времени  $t/T$ ; числа: 8, 10, 12, 14 м и 16, 20, 24, 28 м — значения начальных амплитуд волн длиной 100 и 200 м соответственно

Время действия давления максимального давления ( $0,5 P_{\max}^a$ ) на преграды, с

Преграда	Начальные амплитуды ( $a$ ), м	
	8, 10, 12, 14	16, 20, 24, 28
Вертикальная	[0,05; 0,1]	[0,1; 0,2]
Горизонтальная	[0,2; 0,5]	[0,3; 0,6]

понента вектора максимальной скорости жидкости в струе буруна перед ударом по преграде. Для аномальных волн с начальной крутизной  $0,5 \leq S \leq 0,754$  (волны длиной 100 и 200 м с начальными амплитудами 8, 10, 12 м и 16, 20, 24 м соответственно) среднее значение числа Ньютона и его стандартное отклонение составили 11,46 и 0,15 соответственно, что свидетельствует о динамическом подобии процесса обрушения волн указанных диапазонов. Значения числа Ньютона и его стандартного отклонения для аномальных волн с начальной крутизной  $S \geq 0,88$  (волны длиной 100 и 200 м с начальными амплитудами более 12 и 28 м соответственно) составили 26,38 и 0,75 соответственно. Несовпадение чисел Ньютона рассматриваемых волн обусловлено различием характера формирования и обрушения буруна аномальных волн второй (см. рис. 1) и третьей (см. рис. 2) групп.

Результаты вычисления зависимости максимального давления (рис. 6) от начальной крутизны показывают, что для обеих преград характерно увеличение значения максимального давления с увеличением крутизны. Данные графики могут использоваться в практических целях. Для этого на рис. 6 отмечается на оси абсцисс значение крутизны  $S'$ , для которой планируется оценить давление

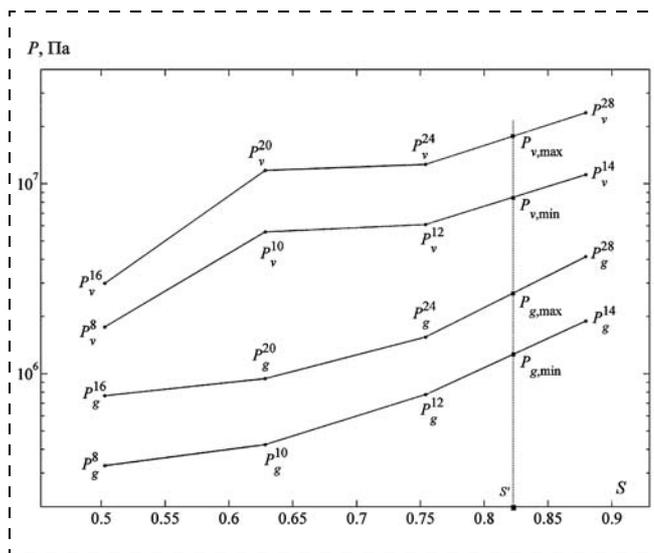


Рис. 6. Зависимость максимального давления  $P$  на горизонтальной (индекс  $g$ ) и на вертикальной (индекс  $v$ ) преградах от начальной крутизны  $S$  волн; верхние индексы: 8, 10, 12, 14 м и 16, 20, 24, 28 м — значения начальных амплитуд волн длиной 100 и 200 м соответственно

на преградах от гидродинамического удара аномальной волны. Пересекая вертикальной прямой из указанной точки  $S'$  графические кривые давления, получаем искомые значения минимальных  $P_{v, \min}$ ,  $P_{g, \min}$  и максимальных значений  $P_{v, \max}$ ,  $P_{g, \max}$  давления как на вертикальной, так и на горизонтальной преградах.

### Заключение

Обрушение аномальных волн в зависимости от начальной крутизны происходит в виде "ныряющего буруна" (выброс струи с захватом воздуха под ней) либо путем обрушения всей массы гребня волны с образованием в его нижней части ныряющего буруна в последний момент перед падением гребня на подошву волны. Рост высоты и обрушение аномальной волны протекают стремительно — за время, не превышающее ее периода. Максимальное значение энергии аномальной волны, воздействующей на неподвижную преграду, может в 1,7 раза превышать энергию положительной полуволны, при этом максимальное давление на вертикальной преграде может достигать  $3 \cdot 10^7$  Па, на горизонтальной —  $4 \cdot 10^6$  Па.

Результаты моделирования динамического воздействия аномально большой волны на преграду могут найти применение при проектировании морских судов и гидротехнических сооружений.

### Список литературы

1. **Ногид Л. М.** Остойчивость судна и его поведение на взволнованном море. Проектирование морских судов: учеб. пособие для студ. кораблестроит. вузов. Ч. 2. Л.: Судостроение, 1967. 244 с.
2. **Доусон Т.** Проектирование сооружений морского шельфа: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1986. 288 с.
3. **Куркин А. А., Пелиновский Е. Н.** Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Н. Новгород: Изд. Нижегород. гос. тех. ун-та, 2004. 158 с.
4. **Рубан В. П.** Гигантские волны в слабо-скрещенных состояниях морской поверхности // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2010. Т. 137. Вып. 3. С. 599–607.
5. **Ruban V., Kodama Y., Ruderman M.** and etc. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates // The European physical journal special topics. 2010. Iss. 185. P. 5–15.
6. **Захаров В. Е.** Устойчивость периодических волн конечной амплитуды на поверхности глубокой жидкости // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. Т. 9. № 2. С. 86–94.
7. **Захаров В. Е., Шабат А. Б.** Точная теория двумерной самофокусировки и одномерной автомодуляции волн в нелиней-

ных средах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1972. Т. 61. Вып. 1. С. 118–134.

8. **Захаров В. Е.** Гамильтонов формализм для волн в нелинейных диспергирующих средах // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. С. 326–343.
9. **Benjamin T. B., Feir J. E.** The disintegration of wave trains in deep water // J. Fluid. Mech. 1967. Iss. 27. P. 417–430.
10. **Бадурин С. И., Ивонин Д. В.** Трехмерные волны-убийцы. Еще раз о Новогодней волне // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 37–51.
11. **Пелиновский Е. Н., Слоняев А. В.** "Фрики" — морские волны-убийцы // Природа. 2007. № 3. С. 14–23.
12. **Чаликов Д. В.** Портрет волны-убийцы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 5–13.
13. **Longuet-Higgins M. S.** The asymptotic behavior of the coefficients in Stokes's series for surface gravity waves // Journal of applied mathematics. 1985. V. 34. P. 269–277.
14. **Lawton G.** Monsters of the deep (The perfect wave) // New scientist. 2001. Vol. 170. N 2297. P. 28–32.
15. **Nikolkina I., Didenkulova I.** Rogue waves in 2006–2010 // Natural hazards and Earth system sciences. 2011. V. 11. P. 2913–2924.
16. **Слоняев А. В., Сергеева А. В.** Численное моделирование и анализ пространственно-временных полей аномальных морских волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 24–36.
17. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Stuck R.** Numerical wave tank — simulation of extreme waves for the investigation of structural responses // Proceedings of OMAE 2005. 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Halkidiki. Greece. June 12–17. 2005. P. 785–789.
18. **Song C., Sirviente A. I.** A numerical study of breaking waves // Physics of fluids. 2004. V. 16. N 7. P. 2649–2667.
19. **Кузнецов С. Ю., Сапрыкина Я. В.** Экспериментальные исследования возникновения волн-убийц при эволюции узкого спектра крутых волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 52–63.
20. **Perlin M., He J., Bernal L. P.** An experimental study of deep water plunging breakers // Physics of fluids. 1996. V. 8. N 9. P. 2365–2374.
21. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Hennig J.** Simulation of rogue waves and their impact on marine structures // Proc. of MAXWAVE, Final meeting. October 8–10, 2003. Geneva, Switzerland. P. 1–10.
22. **Афанасьев К. Е., Стуколов С. В.** Численное моделирование взаимодействия уединенных волн с препятствиями // Вычислительные технологии. 1999. Т. 4. № 6. С. 3–16.
23. **Hellan O., Hermundstad O. A., Stansberg C. T.** Designing for wave impact on bow and deck structures // Proc. of the eleventh (2001) International offshore and polar engineering conference. Stavanger, Norway. June 17–22, 2001. P. 349–357.
24. **Minami M., Sawada H., Tanizawa K.** Study of ship responses and wave loads in the freak wave // Proc. of the sixteenth International offshore and polar engineering conference. San Francisco, California, USA. May 28 — June 2, 2006. P. 272–280.
25. **Поуч П.** Вычислительная гидродинамика. М.: Мир. 1980. 618 с.
26. **Yakhot V., Orszag S. A.** Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory // Journal of scientific computing. 1986. V. 1. N 1. P. 1–51.
27. **Hsu K. L., Chen Y. J., Chau S. W., Chien H. P.** Ship flow computation of DTMB 5415 // CFD workshop Tokyo, Japan. March 9–11, 2005.
28. **Чураев Р. Р.** Гидравлика. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.

**С. Г. Пушков**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,  
nio9@lil.ru,

**Л. Л. Ловицкий**, вед. инженер,  
ОАО "Летно-исследовательский институт  
им. М. М. Громова",

**О. Н. Корсун**, д-р техн. наук, проф.,  
marmotto@rambler.ru

Московский авиационный институт

## Методы определения скорости ветра при проведении летных испытаний авиационной техники с применением спутниковых навигационных систем

*Изложены методы определения вектора скорости ветра в зондирующих режимах полета испытываемого самолета, используемые в современной технологии определения воздушных параметров при проведении испытаний летательных аппаратов и бортового оборудования.*

*Представлены выражения для составляющих скорости ветра, оценки погрешностей их определения на режимах горизонтального полета с различными курсовыми углами и режимах установившегося полета без крена и скольжения.*

*Эффективность полученных решений иллюстрируется примерами расчета проекций скорости ветра различными методами с использованием данных летного эксперимента.*

**Ключевые слова:** вектор скорости ветра, летные испытания, горизонтальный полет, спутниковая навигационная система

### Введение

В практике летных испытаний авиационной техники большое значение имеют вопросы зондирования параметров атмосферы. При этом наиболее проблемными представляются вопросы определения действительных значений скорости ветра во время испытательных режимов. Важность этой задачи определяется тем, что скорость ветра является необходимым элементом в расчетах воздушной скорости, числа Маха, аэродинамических углов и других параметров полета.

Традиционное применение для зондирования параметров атмосферы шаров-зондов, шаров-пилотов, самолета-зондирующего, как правило, приводит к существенным разбросам результатов испытаний за счет нестабильности ветровых характеристик. Кроме того, указанные методы являются достаточно трудоемкими и дорогостоящими.

С появлением и использованием в летных испытаниях спутниковых навигационных систем (СНС) развитие получили методы определения скорости ветра в зондирующих режимах полета самого испытываемого самолета. В данной статье рассмотрены два варианта решения задачи, используемые в общей технологии оценивания воздушных пара-

метров с применением СНС, разработанной в Летно-исследовательском институте им. М. М. Громова и получившей применение в отечественной практике летных испытаний [1–3].

### 1. Решение задачи определения воздушной скорости и составляющих скорости ветра при выполнении режимов горизонтального установившегося полета с различными курсовыми углами

Рассматриваемый метод получил широкое распространение за счет простоты определения действительных значений воздушной скорости по замерам путевой скорости на режимах горизонтального установившегося полета (ГП) летательного аппарата с противоположными курсами. С появлением бортового оборудования нового поколения, прежде всего спутниковых технологий, была реализована возможность использования полных соотношений для расчета воздушной скорости и скорости ветра по данным измерений, выполненных СНС, инерциальными навигационными системами (ИНС) и системами воздушных сигналов (СВС). Тем самым были снижены погрешности результатов летных испытаний, возникающие за счет погрешности пилотирования при выполнении испытательных режимов. В технологии, рассмотренной в работах [1–3], метод получил применение, в первую очередь, при решении задач определения аэродинамических погрешностей приемников воздушного давления (ПВД) на режимах ГП, а также для контрольного определения скорости ветра при проведении летных испытаний.

Рассмотрим решение задачи в общем случае выполнения режимов ГП с различными курсовыми углами. Пусть в правой прямоугольной земной системе координат  $OXYZ$ , ось  $OY$  которой нормальна плоскости горизонта, движение летательного аппарата (ЛА) включает последовательное выполнение двух режимов горизонтального установившегося полета без скольжения с выдерживанием, соответственно, курсовых углов  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  и значений воздушной скорости  $V_1$ ,  $V_2$ . Пусть ось  $OX$  соответствует направлению на север в системе координат WGS-84 [4], тогда ось  $OZ$  направлена на восток. Обозначим проекции скоростей на оси  $OX$  и  $OZ$  соответственно индексами "N" и "E".

Примем допущение, что на протяжении рассматриваемого движения состояние атмосферы в области полета ЛА характеризуется постоянством вектора скорости ветра  $U = (U_N, U_E)$ , который лежит в плоскости горизонта, а само движение — малыми вертикальными скоростями  $V_y$ :  $\left| \frac{V_y}{V} \right| \ll 1$ . Будем также полагать, что углы направления воздушной скорости  $\psi_{1V}$ ,  $\psi_{2V}$  не отличаются от значений курсового угла  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ , т. е. полет выполняется без скольжения.

Тогда, полагая, что в рассматриваемых режимах установившегося полета вектор путевой скорости соответственно принимает значения  $W_1 = (W_{N1}, W_{E1})$ ,  $W_2 = (W_{N2}, W_{E2})$ , для проекций путевой, воздушной скоростей и скорости ветра можно записать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} V_1 \sin \psi_1 + U_E &= W_{E1}; \\ V_2 \sin \psi_2 + U_E &= W_{E2}; \\ V_1 \cos \psi_1 + U_N &= W_{N1}; \\ V_2 \cos \psi_2 + U_N &= W_{N2}; \\ \psi_1 &= \psi_2 + \Delta \psi; \\ V_1 &= V_2 + \Delta V, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta \psi = \psi_1 - \psi_2$  — изменение курсового угла при выполнении режимов;  $\Delta V = V_1 - V_2$  — изменение воздушной скорости при выполнении режимов.

При известных параметрах  $W_{N1}, W_{E1}, W_{N2}, W_{E2}, \Delta \psi, \Delta V$  система уравнений определяет значения курсовых углов  $\psi_1, \psi_2$ , проекций скорости ветра  $U_N, U_E$  и воздушной скорости  $V_1, V_2$ :

$$\begin{aligned} \sin \psi_1 &= \frac{(V_1 - V_2 \cos(\Delta \psi)) \Delta W_E - \Delta W_N V_2 \sin(\Delta \psi)}{(\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2}; \\ \cos \psi_1 &= \frac{(V_1 - V_2 \cos(\Delta \psi)) \Delta W_N + \Delta W_E V_2 \sin(\Delta \psi)}{(\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$V_1 = V_2 + \Delta V = \frac{\Delta V}{2} + \sqrt{a + \frac{\Delta V^2}{4}},$$

где  $\Delta W_N = W_{N1} - W_{N2}, \Delta W_E = W_{E1} - W_{E2}$ ;

$$a = \frac{(\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2 - \Delta V^2}{2(1 - \cos(\Delta \psi))};$$

$$U_N = W_{N1} - V_1 \cos \psi_1; \quad U_E = W_{E1} - V_1 \sin \psi_1 \quad (3)$$

или

$$\begin{aligned} U_N &= \frac{W_{N1} + W_{N2}}{2} - \frac{\Delta W_E \sin(\Delta \psi)}{2(1 - \cos(\Delta \psi))} - \\ &\quad - \frac{\Delta V(V_1 + V_2) \Delta W_N}{2((\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2)} + \\ &\quad + \frac{(\Delta V)^2 \Delta W_E \sin(\Delta \psi)}{2(1 - \cos(\Delta \psi))((\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2)}; \\ U_E &= \frac{W_{E1} + W_{E2}}{2} - \frac{\Delta W_N \sin(\Delta \psi)}{2(1 - \cos(\Delta \psi))} - \\ &\quad - \frac{\Delta V(V_1 + V_2) \Delta W_E}{2((\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2)} + \\ &\quad + \frac{(\Delta V)^2 \Delta W_N \sin(\Delta \psi)}{2(1 - \cos(\Delta \psi))((\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2)}. \end{aligned}$$

Возвращаясь к принятому допущению о равенстве курсовых углов и углов направления воздушной скорости, необходимо уточнить, что фактически система уравнений дает решение для углов направления воздушной скорости  $\psi_{1V}, \psi_{2V}$ . Это позволяет найти рассогласование значений  $\psi_{1V}, \psi_{2V}$  и соответствующих значений курсовых углов, для чего решения системы уравнений (1) необходимо сравнить с соответствующими значениями курсовых углов, измеренными ИНС. Полученная разница  $\Delta \psi_V$  на режимах ГП без скольжения будет включать систематическую погрешность, обусловленную несимметрией ЛА в горизонтальной плоскости, и погрешность измерения курсового угла ИНС.

Из соотношений (2) и (3) следует, что погрешности определения воздушной скорости и составляющих вектора скорости ветра минимальны при условии выполнения режимов со взаимно противоположными курсовыми углами  $\Delta \psi = \pi$  и равенстве скоростей  $V_1 = V_2$ . Выполнение данного требования предписывается при построении испытательных режимов в летных испытаниях по определению аэродинамических погрешностей ПВД на режимах горизонтального установившегося полета. Погрешность определения скорости ветра в данном случае, при условии неизменности ветра за время выполнения пары режимов, будет соизмерима с погрешностью измерения составляющих путевой скорости СНС, т. е. на уровне  $\approx 0,1$  м/с.

В соответствии с выражениями (3) на результат определения проекций скорости ветра существенно влияет наличие разности воздушных скоростей в выполняемых режимах.

При небольших значениях разность  $\Delta V$  может быть определена по данным системы воздушных сигналов СВС с учетом аэродинамических погрешностей восприятия давлений  $\Delta V = (M_1 - M_2) \sqrt{kRT}$ , где  $k$  — показатель адиабаты,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура,  $M$  — число Маха.

В общем случае, даже без учета аэродинамических погрешностей восприятия давлений (законов коррекции), погрешность определения  $\Delta V$  по данным СВС, как правило, является величиной следующего порядка малости относительно  $\Delta V$ .

При определении  $\Delta V$  компенсируется систематическая инструментальная погрешность формирования числа  $M$  в СВС, и погрешность  $\Delta(\Delta V)$  в основном зависит от изменения аэродинамической погрешности  $\Delta M = f(M, \alpha)$  в выполняемых режимах.

Для погрешности  $\Delta M$  справедливо соотношение

$$\Delta M = (1 + 0,2M^2) \left( \frac{\Delta P_{H0}}{P_{H0}} - \frac{\Delta P_H}{P_H} \right) / 1,4M, \text{ где } P_{H0},$$

$P_H$  — значения полного и статического давлений.

В первом приближении, допуская слабое изменение коэффициента восприятия статического дав-

ления  $\frac{\Delta P_H}{q} = f(M, \alpha)$  в рассматриваемых режимах,

получим оценку  $\Delta(\Delta V) \approx \Delta V \frac{\Delta P_H}{2q}$ , где  $q$  — скоростной напор.

Например, для  $V = 200$  м/с и значения коэффициента статического давления  $\frac{\Delta P_H}{q} = 0,1$  при разности скоростей  $\Delta V = 3$  м/с будем иметь погрешность  $\Delta(\Delta V) \approx 0,15$  м/с.

Таким образом, представленное решение с использованием полных выражений (3) и дополнительных данных от системы СВС позволяет снизить погрешности определения скорости ветра за счет погрешности пилотирования при выполнении режимов.

## 2. Решение задачи определения скорости ветра в зондирующем режиме установившегося полета без крена и скольжения

Постановка задачи в рамках общей технологии с применением СНС [1–3] направлена на то, чтобы минимизировать пространственно-временной интервал между зондированием параметров атмосферы и выполнением исследуемого неустановившегося режима полета ЛА и, тем самым, снизить погрешности результатов летных испытаний, связанных с нестабильностью ветровых характеристик атмосферы. В результате рассмотрения вопроса было получено достаточно простое, но очень эффективное решение, в котором параметры состояния атмосферы, включая вектор скорости ветра, определяются на режиме короткой ( $\approx 10$  с) горизонтальной площадки, выполняемой в начале испытательного режима.

Решение основывается на том, что если до проведения испытаний на неустановившихся режимах полета определены и оценены систематические погрешности бортовых средств определения воздушных параметров в условиях зондирования, то на режиме ГП перед испытательным режимом можно достаточно точно определить модуль воздушной скорости, что в совокупности с данными по курсовому углу и проекциям путевой скорости позволяет получить оценку вектора скорости ветра.

Разработанный метод позволил существенно снизить погрешности определения воздушных параметров на неустановившихся режимах полета. Максимальную результативность метод показал в случае коротких испытательных режимов: скольжения, "дачи" рулем высоты, торможения. Метод получил признание в отечественной практике летных испытаний воздушных судов (ВС) транспортной категории на больших углах атаки (БУА), исключив необходимость использования трудоемкого метода носовой штанги с эталонными приемниками [3]. На сегодняшний день в рамках разработан-

ной технологии успешно проведены испытания на БУА шести типов ВС.

Аналогично методу, изложенному в предыдущем разделе, решение задачи опирается на соотношение, связывающее векторы скорости ветра  $U$ , путевой  $W$  и воздушной  $V$  скоростей:

$$U = \begin{pmatrix} U_N \\ U_E \\ U_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_N \\ W_E \\ W_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} V_N \\ V_E \\ V_y \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для решения (4) используются измерения проекций путевой скорости СНС, воздушных параметров СВС, параметров углового положения самолета в пространстве ИНС. Проекции скоростей рассматриваются в системе координат WGS-84 [4].

При известных значениях модуля воздушной скорости, углов атаки и скольжения, углов пространственного положения самолета (курса, крена и тангажа), проекций путевой скорости (данные СНС) выражение (4) будет давать решение для вектора скорости ветра в любом режиме полета. Однако в случае неустановившегося полета имеются достаточно много дополнительных погрешностей бортовых измерений воздушных параметров, которые достаточно сложно учитывать.

Известные подходы к решению задач такого рода предполагают использование методов параметрической идентификации динамических систем, которые накладывают ряд ограничений на вид выполняемого в полете маневра для обеспечения условий идентифицируемости [5–7].

Поэтому целесообразно рассматривать зондирующие режимы в виде установившегося полета без крена и скольжения. Это позволяет исключить необходимость дополнительного измерения угла скольжения, оценивания влияния скольжения и факторов нестационарного обтекания на измерение воздушной скорости и аэродинамических углов. Заметим, что несмотря на введенные ограничения, рассматриваемый режим зондирования скорости ветра является более общим по сравнению с методом предыдущего раздела, поскольку позволяет получить решение не только для горизонтального полета, но также в режимах набора высоты и снижения.

На основании (4) при полете без крена и скольжения составляющие вектора скорости ветра определяются выражениями

$$U_N = W_N - V_\Gamma \cos \psi;$$

$$U_E = W_E - V_\Gamma \sin \psi;$$

$$U_y = W_y - V_y,$$

а модуль скорости ветра в плоскости горизонта — выражением

$$U_\Gamma = \sqrt{W_N^2 + W_E^2 + V_\Gamma^2 - 2 V_\Gamma (W_N \cos \psi + W_E \sin \psi)},$$

где  $V_x$ ,  $V_y$  — горизонтальная и вертикальная составляющие воздушной скорости соответственно,  $\psi$  — курсовой угол.

Для  $V_x$ ,  $V_y$  справедливы соотношения  $V_x = V \cos \theta$ ,  $V_y = V \sin \theta$ , где  $\theta$  — угол наклона траектории. Угол наклона траектории определяется значениями угла тангажа  $\nu$  и угла атаки  $\alpha$ :  $\theta = \nu - \alpha$ .

Угол атаки рассчитывается по измеряемым значениям местного угла атаки ДАУ на основании функциональной зависимости  $\alpha = f(\alpha_{\text{мест}}, M, \delta)$ , определенной в условиях летного эксперимента.

Если вертикальная составляющая скорости ветра заведомо мала, то горизонтальную составляющую

$V_x$  можно найти из соотношения  $V_x = \sqrt{V^2 - W_y^2}$ .

Воздушная скорость  $V$  определяется по значениям полного  $P_{H0}$  и статического  $P_H$  давлений и температуре  $T$ :

$$V = M \sqrt{kRT};$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[ \left( \frac{P_{H0}}{P_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}.$$

Здесь необходимо отметить, что в расчетах воздушной скорости должны использоваться значения полного и статического давлений и температуры, скорректированные с учетом систематических погрешностей восприятия и измерения параметров.

Оценим ожидаемые погрешности определения скорости ветра рассматриваемым методом исходя из предельных значений погрешностей измерения параметров, входящих в расчетные соотношения.

При небольших значениях угла наклона траектории,  $\theta \leq 0,1$  рад, и погрешностях определения угла наклона траектории  $\Delta \theta = 0,25^\circ$  можно принять:  $\Delta V \approx \Delta V_x$ . Тогда для погрешностей определения горизонтальных проекций скорости ветра имеем:

$$\Delta U_N = \sqrt{(\Delta W_N)^2 + (\Delta V_x)^2 \cos^2 \psi + (\Delta \psi)^2 V_x^2 \sin^2 \psi};$$

$$\Delta U_E = \sqrt{(\Delta W_E)^2 + (\Delta V_x)^2 \sin^2 \psi + (\Delta \psi)^2 V_x^2 \cos^2 \psi};$$

для погрешности определения горизонтальной составляющей скорости ветра:

$$\Delta U_x = \sqrt{(\Delta W)^2 + \left( \frac{U_{\rightarrow}}{U} \right) (\Delta V_x)^2 + \left( \frac{U_{\perp}}{U} \right) V_x^2 (\Delta \psi)^2}.$$

Здесь  $U_{\rightarrow}$ ,  $U_{\perp}$  — проекции скорости ветра вдоль и перпендикулярно СГФ самолета соответственно.

Для погрешности определения вертикальной составляющей скорости ветра при небольших уг-

лах наклона траектории  $\theta$  справедлива следующая оценка:

$$\Delta U_y = \sqrt{(\Delta W_y)^2 + (\nu - \alpha)^2 (\Delta V)^2 + V^2 ((\Delta \alpha)^2 + (\Delta \nu)^2)}. \quad (5)$$

Для расчета оценок погрешностей определения составляющих вектора скорости ветра примем:

$$\Delta W_N = \Delta W_E = 0,1 \text{ м/с}, \Delta V = 2 \text{ км/ч (0,56 м/с)}, \\ \Delta \psi = 0,4^\circ, \Delta \nu = 0,1^\circ, \Delta \alpha = 0,25^\circ. \quad (6)$$

Заданные значения погрешностей измерения путевой скорости  $\Delta W_N = \Delta W_E = 0,1$  м/с соответствуют погрешности СНС, погрешности измерения углов курса и тангажа  $\Delta \psi = 0,4^\circ$ ,  $\Delta \nu = 0,1^\circ$  — предельным значениям погрешности современных инерциальных систем ИНС,  $\Delta \alpha = 0,25^\circ$  — предельное значение погрешности определения угла атаки по измеряемым значениям местного угла атаки ДАУ.

В отношении условия  $\Delta V = 2$  км/ч мы будем исходить из того, что в процессе наземных и летных испытаний в полном объеме определены и учтены в последующих расчетах воздушной скорости следующие величины:

- систематические инструментальные погрешности измерений давлений;
- аэродинамические погрешности приемников воздушных давлений;
- коэффициенты запаздывания в трактах передачи давлений.

Достижимость значений погрешности  $\Delta V \leq 2$  км/ч с использованием измерений параметров современными системами воздушных данных была подтверждена результатами исследований и испытаний при разработке технологии, рассмотренной в работе [3].

При принятых значениях погрешностей (6) наиболее значимым при определении горизонтальных составляющих и модуля скорости ветра является фактор погрешности за счет погрешности измерения курсового угла. Следует также обратить внимание на то, что при полете без скольжения проекция СГФ самолета на плоскость горизонта может не совпадать с вектором воздушной скорости, например, за счет неидеальной симметрии самолета. Исходя из этого представляется обязательным условием выполнение оценки расхождения между измеряемыми значениями курсового угла и соответствующего угла вектора воздушной скорости на режимах горизонтального сбалансированного полета без скольжения. Возможность такой оценки была показана в разделе 1.

Вторым по значению фактором является погрешность расчета модуля воздушной скорости.

Для вертикальной составляющей скорости ветра наиболее существенной является третья составляющая в подкоренном выражении (5), обусловленная погрешностями углов атаки и тангажа.

При заданных условиях (6) и значении скорости  $V = 450 \text{ км/ч}$  ( $125 \text{ м/с}$ ) получим оценку погрешности модуля скорости ветра  $0,6 \text{ м/с} < \Delta U < 0,9 \text{ м/с}$ . Такого же порядка будут и погрешности определения составляющих скорости ветра.

Как следует из представленных оценок, значения погрешности определения вектора скорости ветра заметно выше тех, что получаются в методе расчета по данным режимов полета противоположными курсами. Погрешности могут быть снижены за счет определения и учета значений  $\Delta\psi_V$  и снижения погрешностей определения модуля воздушной скорости. Вместе с тем, необходимо отметить, что даже полученные выше значения погрешностей определения скорости ветра являются приемлемыми для решения ряда прикладных задач, например, при оценивании режимов десантирования.

Преимуществом метода является также определение мгновенных значений скорости ветра в процессе полета.

Возвращаясь к общему методу определения действительных значений воздушных параметров на неустановившихся режимах полета, описанному в начале раздела, следует обратить внимание на то, что в данном случае погрешности расчета вектора скорости ветра по данным зондирования в начале испытательного режима будут слабо влиять на результаты определения воздушной скорости в испытательном режиме, если он выполняется с небольшими отклонениями курсового угла от значений, имеющих место на режиме зондирования. Основным фактором погрешности здесь, при условии неизменности ветровых характеристик, будет погрешность определения начального значения воздушной скорости в испытательном режиме.

### 3. Примеры расчета скорости ветра по данным натурального эксперимента

Алгоритмы расчета проекций скорости ветра были отработаны по данным, полученным в летных испытаниях ВС различного типа, и показали свою эффективность. Здесь мы приведем лишь две иллюстрации результатов расчета по данным, полученным при испытаниях самолета-амфибии Бе-200ЧС.

На рис. 1 представлены результаты расчета составляющих скорости ветра:

1) по данным измерений проекций путевой скорости (СНС) и курсового угла (ИНС), полученным в парных режимах ГП без скольжения противоположными курсами, выполняемых последовательно с различными фиксированными значениями скорости по эксплуатационному диапазону для заданной высоты полета;

2) по данным измерений полного, статического давлений и температуры (СВС с учетом коррекции погрешностей восприятия давлений), проекций путевой скорости (СНС) и курсового угла ИНС в каждом режиме ГП из числа режимов по п. 1. На рисунках по оси абсцисс отложено московское время выполнения участка полета, для которого получены оценки.

Как видно, результаты расчета проекций скорости ветра различными методами имеют хорошую

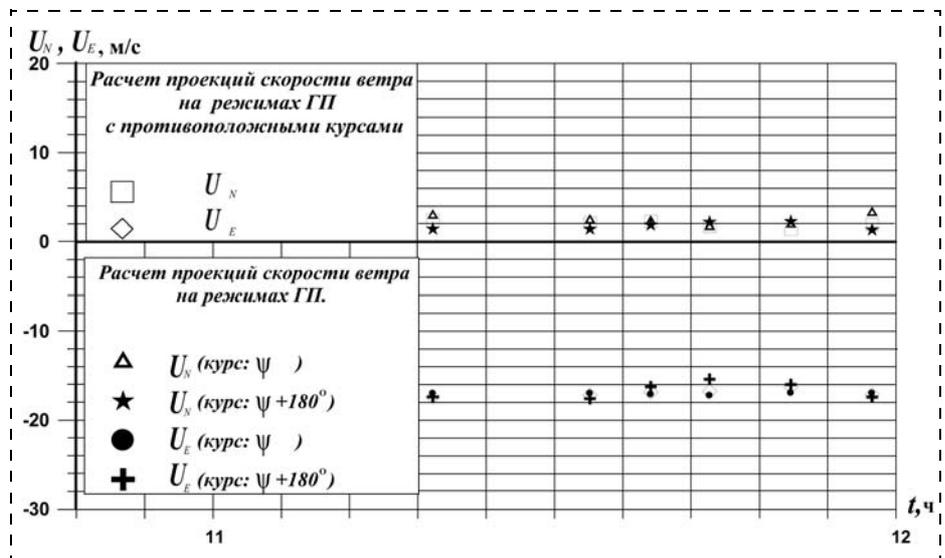


Рис. 1. Результаты расчета проекций скорости ветра на режимах ГП по алгоритмам расчета разделов 1 и 2

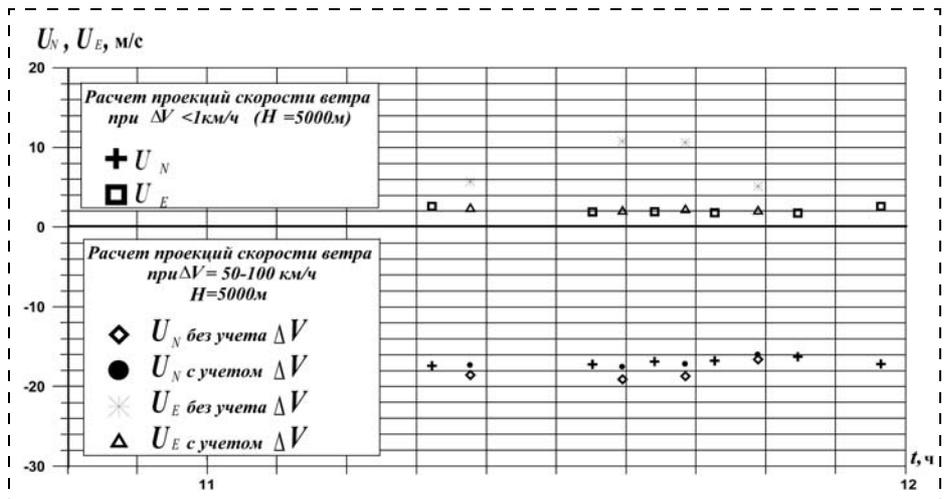


Рис. 2. Результаты расчета проекций скорости ветра на режимах ГП противоположными курсами с различными скоростями

сходимость. Кроме того, рисунки показывают, что в данном полете в течение примерно получаса гипотеза о постоянстве горизонтальной составляющей ветра выполняется с хорошей точностью.

На рис. 2. приведены результаты расчетов проекций скорости ветра  $U_N$ ,  $U_E$  по данным, полученным при выполнении режимов ГП противоположными курсами, при различных значениях разницы скоростей  $\Delta V$  в каждой паре режимов, с учетом и без учета  $\Delta V$  в алгоритмах расчета (см. раздел 1) и показывают хорошие результаты расчета  $U_N$ ,  $U_E$  даже в случаях, когда разность скоростей составляет  $\Delta V \approx 50 \dots 100$  км/ч при использовании полных соотношений (3) для  $U_N$ ,  $U_E$ .

### Заключение

Описанные в работе методы являются базовыми в технологии определения действительных значений воздушных параметров с применением СНС. Показанные решения позволили снизить погрешности определения параметров атмосферы и воздушных параметров полета в испытаниях ЛА и бортового оборудования как на установившихся, так и неуставившихся режимах полета.

*Авторы приносят благодарность Горшковой О. Ю. за оформление материалов испытаний.*

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 12-08-00682.*

### Список литературы

1. **Пушков С. Г., Харин Е. Г., Кожурин В. Р., Захаров В. Г.** Технология определения аэродинамических погрешностей ПВД и воздушных параметров в летных испытаниях ЛА с использованием спутниковых средств траекторных измерений // ВИНТИ РАН, Проблемы безопасности полетов. 2006. № 7. С. 8—26.
2. **Пушков С. Г., Харин Е. Г., Кожурин В. Р., Ловицкий Л. Л.** Эталонное измерение воздушных параметров с использованием спутниковых средств траекторных измерений в летных испытаниях воздушных судов // Авиакосмическое приборостроение. 2010. № 4. С. 5—9.
3. **Пушков С. Г., Харин Е. Г., Ловицкий Л. Л.** Технология определения воздушных параметров на больших углах атаки // Полет. 2010. № 6. С. 30—36.
4. **Руководство** по Всемирной Геодезической Системе — 1984 (WGS-84), (doc 9674). Международная организация гражданской авиации, 1997.
5. **Корсун О. П., Поплавский Б. К.** Оценка систематических погрешностей бортовых измерений углов атаки и скольжения па основе данных спутниковой навигационной системы и идентификации скорости ветра // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 1. С. 133—146.
6. **Корсун О. Н., Зиновьев А. В., Лысюк О. П., Багнюк Е. С.** Алгоритм оценивания постоянной составляющей погрешности измерения воздушной скорости при учете скорости ветра // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 9. С. 2—6.
7. **Корсун О. Н., Лысюк О. П., Зиновьев А. В.** Оценка погрешностей измерения скорости спутниковой навигационной системы движения летательных аппаратов с использованием информационной избыточности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6. № 11. С. 77—82.

ufi  
Approved  
Event

**15-17**  
АПРЕЛЯ | 2014

МЕСТО  
ПРОИЗВЕДЕНИЯ  
**МОСКВА**  
**КРОКУС ЭКСПО**  
ПАВИЛЬОН 1, ЗАЛЫ 1, 2, 3

**E-X-P-O**  
**ELECTRONICA**

**17-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА**  
ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И КОМПЛЕКТУЮЩИХ

**12-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА**  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**4-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА**  
СВЕТОДИОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МАТЕРИАЛОВ,  
ЧИПОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Организаторы: primexpo ITE GROUP PLC ufi

т. (812) 380 6003/07/00, ф. (812) 380 6001 electron@primexpo.ru

Условия участия  
в выставке на сайте  
[www.expoelectonica.ru](http://www.expoelectonica.ru)

# CONTENTS

- Grigoriev V. V., Bystrov S. V., Pershin I. M., Mansurova O. K.** Stability Analysis of the Linear Systems with Distributed Parameters. . . . . 2  
*The main idea of this article is to extend the notion of exponential stability for linear systems with distributed parameters based on frequency methods research systems, displays the modified Nyquist criterion of exponential stability for the of linear systems with the distributed parameters.*  
**Keywords:** frequency characteristics, exponential stability of linear systems with the distributed parameters
- Gayvoronsky S. A., Ezangina T. A.** Calculation of Linear Interval Control Systems with Package MdsIs . . . . . 5  
*The system of automatic control containing a linear regulator and interval object of management is considered. Using coefficient assessments of parameters of quality of system, the procedure of synthesis of parameters of the controller guaranteeing the maximal degree of stability and an admissible degree variability of system is developed. In a basis of a procedure it is put coefficient the analysis of parameters of quality and accuracy with application of the interval analysis. On the basis of a procedure software product MDSL is developed. The numerical example is resulted.*  
**Keywords:** interval polynomial, synthesis of controller, maximum degree of stability, quality coefficient of systems
- Gradetsky V. G., Fomin L. F.** Dynamic Processes in Vacuum Creation Systems of Miniature Mobile Robots . . 10  
*Paper presents dynamical processes in vacuum gripping devices retaining of miniature robots under motion over slope, vertical and ceiling surfaces. The features and characteristics of ejector vacuum gripping devices of wall climbing robots are examines. The results of testing are delivering.*  
**Keywords:** vacuum gripping devices, dynamical processes, microejectors, wall climbing robots
- Rumyantsev K. E., Kravtsov S. V.** Parametric Investigation of the Mobile Robot Dynamics and Onboard Stereovision Systems by Spectral Analysis. . . . . 15  
*An approach to determine the relationship between the required parameters onboard stereovision system and the allowable displacement dynamics of mobile robot platform. The study used the approach of spectral analysis of the measurement errors benchmarks required for the localization of a mobile robot on the ground. As the onboard stereovision system analyzes a system with two codirectional digital cameras with identical parameters.*  
*Presents the results of determining the required frequency of measurements in the implementation of various design options for onboard stereovision system.*  
**Keywords:** stereovision, television measurement, spectrum, analysis, the frequency of measurements
- Fursov V. A., Goshin Ye. V., Bibikov S. A.** 3D-Scene Stereo Reconstruction on Sheaves of Epipolar Planes . 19  
*This paper focuses on the 3D-scene reconstruction from stereo pairs of images. Unlike conventional technologies, in which searching for corresponding points and disparity map generation are preceded by the rectification of stereo images, in this paper, the corresponding points are determined directly on the epipolar lines on the initial stereo images for each predetermined epipolar plane. A complete three-dimensional model of an object is constructed by scanning the 3D-scenes by sheaf of planes. Experimental results illustrating the efficiency of the proposed technology are given.*  
**Keywords:** stereo pair, 3D-scene reconstruction, protective geometry, epipolar geometry, sheaf of planes
- Dudarenko N. A., Serzhantova (Polyakova) M. V., Ushakov A. V.** The Behavior is Modeling of Binary Structures Human-Operator Using the Interval System Representations. . . . . 25  
*The problem is solved of modeling the behavior between human-operator in the binary structure on the production with the interval of the system representations. The representation of model is used for estimating the influence of conduct between human-operator in environment on the efficiency of the production process is proposed.*  
**Keywords:** human-operator, binary structures human-operator on the production, interval system representations, production efficiency
- Sergeev S. F.** Intellect's Symbiotes Organized by Technogenic Environments in the Management of Mobile objects. . . . . 30  
*We discuss the problem of artificial and natural intelligence relations. The main topic is how to combine the artificial and natural intelligence in purpose to manage the ergatic system of moving object's control in information and communication technological settings. The artificial environments tends to aim and control operators situation behavior, creating their intellectual behavior. We define the "diffusing intelligence" conception as a synergistic integration of artificial and natural intelligence both in cases of situational management in organized environment.*  
**Keywords:** moving object's controlling, ergatic systems, situational approach, intelligence, artificial intelligence, hybrid intelligence, diffusing intelligence, communication
- Oboznov A. A.** Adaptive Interface in Ergatic System: Engineering-Psychological Assessment. . . . . 37  
*The possibility of application of adaptive interface to overcome the limitations of the human operator on reception and processing of information at the influence of extreme factors. We introduce the notion of a common space of external and internal resources of the human operator. Presents the results of experimental studies proving the effectiveness of adaptive interface.*  
**Keywords:** ergatic system, the resources of adaptation, a common space of external and internal resources adaptation, adaptive interface, extreme factors

**Dyuzhev A. A., Dubovik D. A., Savchenko V. V.** The Development of Onboard Electronic and Mechatronic Systems of Mobile Machines in the Republic of Belarus . . . . . 41

*The basic complex problems of scientific researches in such fields as "onboard systems, mobile machines control system and their components," and the results of their testing are considered. The work methodology in the direction is presented. Some examples of developments that have been put into mass production in the Republic of Belarus are described. Also instrument-making plants, as well as short-term and medium-term challenges, that should be solved in the interests of mechanical engineering, are discussed.*

**Keywords:** anti-lock braking system (ABS), anti-lock traction control (ABS/TCS), hybrid propulsion (power) system, integrated information management system, mechatronics, mobile vehicles

**Podubny V. I., Traechtler A., Jaeker K.-P., Harchenko E., Warkentin A.** Modelling of an Active Suspension for the All-Terrain Vehicle and an Estimation of Possibility of its Use to Reduce the Load on a Wheel with the Damaged Tyre . . . . . 47

*The problem of conflict between the requirements for comfort and road safety of the car and the solution of this problem by using an active suspension is described. Mechatronic model of all-terrain vehicle in application program package Dymola is presented. Proposed method to reduce the vertical load on the damaged tire with the active suspension is tested by mathematical modeling. Results of mathematical modelling of movement sprung mass of the car by means of an active suspension to reduce the vertical load on the damaged, wheel are resulted. Optimum solution of the problem is offered.*

**Keywords:** active suspension, mechatronic model, all-terrain vehicle, mathematical simulation, application program package Dymola, reducing load on a wheel

**Kushnir V. M., Dushko V. R.** Impact of the Nonlinear Surface Waves on the Marine Pyramidal Terminal . . . . . 52

*Work is devoted on the theoretical analysis and physical laboratory researches of wave impact on the iceproof terminal in the form of the truncated pyramid. Concrete calculations are executed for conditions of the Pechora Sea.*

**Keywords:** iceproof terminal, superficial waves, critical depth of destruction of waves

**Dorozhko V. M.** Dynamic Load of the Extreme Wave on the Motionless Structure . . . . . 59

*The method of computational fluid dynamics was used for modeling of formation and breaking process of an extreme wave. Values of a kinetic energy and pressure of the extreme wave acting on motionless vertical and horizontal structures was calculated. It is revealed, that extreme waves with an identical initial steepness have similar profiles, kinematics and dynamic characteristics of breaking. The received results can find application in designing of sea vessels and marine structures.*

**Keywords:** extreme wave, breaking wave, plunging breakers, kinematics energy, pressure, motionless structure

**Pushkov S. G., Lovitsky L. L., Korsun O. N.** Wind Speed Determination Methods in Flight Tests Using Satellite Navigation Systems . . . . . 65

*Wind speed vector determination methods in flight tests are slated in the article. Methods are used in modern technology of air data parameters equipment estimation in flight tests.*

*Expressions for wind vector components and determination errors are represented for level flight with different course angles and steady flight without bank and slide.*

*Obtained decision effectiveness is illustrated by examples of wind vector components calculation with different methods using data of flight tests.*

**Keywords:** wind speed vector, flight tests, level flight, satellite navigation system

---

---

### Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Дизайнер Т. Н. Погорелова.

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 31.05.2013. Подписано в печать 12.08.2013. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН913. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.